

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

MATHEUS VILLANI

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA CÉLULA DE CARGA PARA
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

Xanxerê

2023

MATHEUS VILLANI

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA CÉLULA DE CARGA PARA
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

Monografia apresentada ao
Curso de Engenharia
Mecânica do Câmpus de
Xanxerê do Instituto
Federal de Santa Catarina
para a obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Me.
Samuel Scheleski

Xanxerê
2023

V716p Villani, Matheus.
Projeto e desenvolvimento de uma célula de carga para aplicações industriais /
Matheus Villani; orientador: Samuel Scheleski. — Xanxerê, 2023.
84 p. il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Câmpus Xanxerê.
Inclui referências.

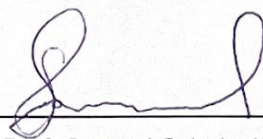
1. Célula de carga. 2. Extensometria. 3. Esforços mecânicos. 4. Análise
estatística. I. Scheleski, Samuel. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina - Câmpus Xanxerê. III. Título.

MATHEUS VILLANI

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA CÉLULA DE CARGA PARA
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

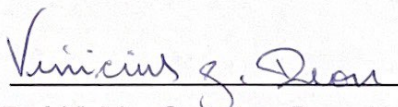
Xanxerê, 24 de novembro de 2023.



Prof. Samuel Scheleski, Me.

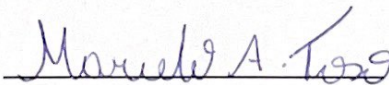
Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Vinicius Gonçalves Deon, Me.

Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Marcelo Andre Toso, Dr

Instituto Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado sabedoria e discernimento para conduzir este trabalho, por ter me iluminado em todos os momentos de dúvida e incerteza, mas principalmente por ter me cercado de pessoas magníficas que tornaram tudo possível.

Aos meus pais pelo amor, incentivo e apoio incondicional, pelas lições e valores passados por vocês a mim. A minha irmã, Letícia, pela amizade, afeto, amor, incentivos nos momentos difíceis, momentos de descontração e inúmeros conselhos.

A Amanda, minha namorada, que contribuiu muito, me ajudando e apoiando durante a preparação deste trabalho, obrigado pelos seus cafés, orientações e companheirismo.

Ao meu orientador, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções, conhecimentos transmitidos e incentivos.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação e trajetória, o meu muito obrigado.

“Algumas pessoas querem que algo aconteça,
outras desejam que aconteça,
outras fazem acontecer.”
(Michael Jordan)

RESUMO

Este projeto aborda o desenvolvimento de uma célula de carga axial, sua comparação com uma célula comercial e o esclarecimento do tema para pesquisadores e interessados. Os métodos utilizados incluem pesquisa bibliográfica e experimental, culminando na fabricação, calibração e testes da célula de carga. Os resultados incluem a produção da célula de carga, solução de problemas de usinagem, a etapa de testes e a comparação dos dados de ambas as células. Analisando os resultados, obteve-se um erro máximo de medição de 1,19% e de 6,90% na comercial e na projetada respectivamente, e na mesma ordem, a média dos erros foi de 0,3865% e 3,8441%, o que confirma a melhor precisão da célula de carga comercial, porém, quando levado em consideração o custo de aquisição, a célula projetada demonstrou-se mais de 7 vezes mais barata. Na escolha entre desenvolver uma célula de carga ou adquirir uma, é crucial analisar as necessidades do processo, se a precisão na leitura for essencial, a compra de uma célula comercial é mais recomendável, se a precisão não é crítica e o custo é um fator decisivo, então o desenvolvimento e projeto de uma célula de carga personalizada podem ser uma opção a considerar. Além disso, a extensometria pode ser benéfica para empresas locais, melhorando projetos e processos, contribuindo para o desenvolvimento regional. Os resultados deste projeto têm potencial para avançar na tecnologia de medição de esforços axiais, oferecendo uma alternativa de qualidade e de baixo custo diante das células de carga comerciais.

Palavras-Chave: Célula de carga; Extensometria; Esforços mecânicos; Análise estatística.

ABSTRACT

This project deals with the development of an axial load cell, its comparison with a commercial cell and clarification of the subject for researchers and interested parties. The methods used include bibliographical and experimental research, culminating in the manufacture, calibration and testing of the load cell. The results include the production of the load cell, the solution of machining problems, the testing stage and the comparison of data from both cells. Analyzing the results, a maximum measurement error of 1.19% and 6.90% was obtained for the commercial and designed cells respectively, and in the same order, the average errors were 0.3865% and 3.8441%, which confirms the better accuracy of the commercial load cell, but when the cost of acquisition is taken into account, the designed cell proved to be more than 7 times cheaper. When choosing between developing a load cell or purchasing one, it is crucial to analyze the needs of the process, if accuracy in reading is essential, the purchase of a commercial cell is more advisable, if accuracy is not critical and cost is a deciding factor, then the development and design of a customized load cell may be an option to consider. In addition, extensometry can be beneficial for local companies, improving projects and processes, contributing to regional development. The results of this project have the potential to advance axial strain measurement technology, offering a quality, low-cost alternative to commercial load cells.

Keywords: Load cell; Extensometry; Mechanical stresses; Statistical analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação esquemática do funcionamento de uma célula de carga..	20
Figura 2: Diagrama do processamento de informação.....	21
Figura 3: Modelos comerciais de células de carga.....	23
Figura 4: Modelo de um extensômetro ou Strain Gauge.....	25
Figura 5: Deformação de um fio sob tração.....	26
Figura 6: Classificação dos tipos de extensômetros.....	27
Figura 7: a) extensômetro uniaxial; b) extensômetro biaxial; c) extensômetro triaxial; d) extensômetro especial; e) extensômetro duplo.....	28
Figura 8: Modelo de ponte de Wheatstone.....	29
Figura 9: Ligação em $\frac{1}{4}$ de ponte.....	29
Figura 10: Ligação em $\frac{1}{2}$ de ponte.....	30
Figura 11: Ligação em $\frac{1}{2}$ de ponte em diagonal.....	30
Figura 12: Ligação de ponte completa.....	30
Figura 13: Representação das etapas para colagem correta de um extensômetro..	31
Figura 14: Processo de colagem dos extensômetros.....	32
Figura 15: Teste da borracha.....	33
Figura 16: Corpo de prova.....	34
Figura 17: Esquema de uma máquina universal de ensaios.....	34
Figura 18: Diagrama tensão versus deformação do aço estrutural.....	35
Figura 19: Determinação da resistência ao escoamento pelo método de desvio de 0,2%.....	36
Figura 20: Limite de resistência à tração.....	37
Figura 21: Deformação gerada aplicação de uma força de tração.....	38
Figura 22: Gráfico da distribuição normal: desvio padrão (σ), média (μ) e o ponto de inflexão.....	41
Figura 23: Fluxograma de Projeto.....	45
Figura 24: Modelamento base da célula de carga.....	46
Figura 25: Detalhamento da célula de carga.....	47
Figura 26: Modelagem 3D da célula de carga.....	48
Figura 27: Detalhes da malha e aplicação das cargas.....	49
Figura 28: Resultado - Fator de segurança.....	50
Figura 29: Resultado - Deslocamento estático.....	50
Figura 30: Resultado - Tensão de Von Mises.....	51
Figura 31: Resultado - Deformação estática.....	51
Figura 32: Torno ROMI - Modelo GL 240.....	52
Figura 33: Simulação no SSCNC.....	53
Figura 34: Simulação no modo teste na máquina CNC.....	53
Figura 35: Usinagem em nylon.....	54
Figura 36: Barra de material bruto de 32 milímetros.....	54

Figura 37: Furo de centro.....	55
Figura 38: Material bruto posicionado e pronto para usinagem.....	55
Figura 39: Peça usinada.....	55
Figura 40: Peça pronta para a colagem.....	56
Figura 41: Flúídos de limpeza para colagem.....	57
Figura 42: Corpo da célula e dois os extensômetros antes da colagem.....	58
Figura 43: Célula de carga pronta.....	59
Figura 44 : Célula de carga adquirida.....	60
Figura 45: Conjunto da célula de carga comercial.....	61
Figura 46: Sistema e software Lynx: (a) ADS 1800; (b) Interface do AqDados.....	62
Figura 47: Ligação recomendada para $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone.....	62
Figura 48: Ligações elétricas no sistema.....	63
Figura 49: Lista de sensores.....	63
Figura 50: Configuração do Strain Gauge.....	64
Figura 51: Sistema de aquisição completamente montado.....	64
Figura 52: Teste da borracha.....	65
Figura 53: Resultados do teste da borracha.....	65
Figura 54: Computer Controlled Universal Testing Machine - Modelo WDW - 100 E	66
Figura 55: Posicionamento na máquina universal de ensaios.....	66
Figura 56: Valores residuais após calibração.....	67
Figura 57: Posicionamento do conjunto da célula de carga adquirida.....	68
Figura 58: Gráfico do erro de cada medição da célula de carga projetada.....	70
Figura 59: Gráfico do erro de cada medição da célula de carga comercial.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição e fator de sensibilidade (K) para ligas utilizadas em extensômetros.....	27
Tabela 2 - Parâmetros de projeto.....	48
Tabela 3 - Cálculos teóricos da célula de carga.....	49
Tabela 4 - Cálculos reais da área, tensão, coeficiente de segurança e deformação.....	57
Tabela 5 - Custo de fabricação da célula de carga.....	60
Tabela 6 - Dados base para cálculo.....	68
Tabela 7 - Teste de medição da célula de carga projetada.....	70
Tabela 8 - Teste de medição da célula de carga adquirida.....	71
Tabela 9 - Análise estatística da célula projetada.....	72
Tabela 10 - Análise estatística da célula comercial.....	72
Tabela 11 - Comparação das análises estatísticas.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

NAFEMS - *International Association for the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community*

GUM - Guia para a Expressão de Incerteza de Medição

CNC - Comando Numérico Computadorizado

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

LISTA DE SÍMBOLOS

L_p - Comprimento Paralelo
 l_0 - Comprimento inicial
 r - Raio de transição
 σ - Tensão
 E - Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young
 ε - Deformação
 l_i - Comprimento final
 Δl - Alongamento ou Variação do comprimento
 A_0 - Área da seção transversal original ou inicial
 F - Força
 ρ - Resistividade
 R - Resistência elétrica
 l - Comprimento
 A - Área
 π - Pi
 d - Diâmetro
 b - Base
 t - Espessura da lâmina
 K - Fator de Sensibilidade
 ν - Coeficiente de Poisson
 $\Delta\rho$ - Variação de Resistividade
 \bar{q} - Média Aritmética
 n - Número de medições/observações
 q_k - Valor variável obtido na leitura k
 s - Desvio padrão da amostra
 sM - Desvio padrão das médias
 s^2 - Variância
 dmp - Diâmetro menor projetado
 ε_{ct} - Deformação calculada da célula
 dmr - Diâmetro menor real
 dr - Deformação residual
 dm - Deformação medida
 dM - Deformação média
 Fa - Força aplicada
 Fm - Força medida
 Er - Erro percentual
 MEr - Média dos erros percentuais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Justificativa.....	17
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo geral.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
2 DESENVOLVIMENTO.....	20
2.1 Célula de Carga.....	20
2.1.1 Tipos de transdutores.....	21
2.1.2 Célula de carga.....	21
2.2 Extensometria.....	23
2.2.1 Extensometria elétrica.....	24
2.2.2 Princípio de funcionamento.....	25
2.2.3 Tipos de extensômetros.....	27
2.2.4 Ponte de Wheatstone.....	28
2.2.5 Instalação / Colagem.....	31
2.3 Ensaio de tração.....	33
2.4 Metrologia.....	38
2.4.1 Definições.....	38
2.4.2 Distribuição de probabilidades.....	41
2.4.3 Média aritmética amostral.....	42
2.4.4 Desvio padrão amostral ou experimental e média.....	42
2.4.5 Variância.....	42
2.4.6 Incerteza da medição.....	43
3 METODOLOGIA.....	44
3.1 Pesquisa Bibliográfica.....	45
3.2 Projeto da Célula de Carga.....	46
3.2.1 Simulação Computacional da Célula de Carga.....	49
3.3 Fabricação.....	52
3.3.1 Colagem dos Extensômetros.....	57
3.4 Aquisição de Uma Célula de Carga Comercial.....	59
3.5 Configuração do sistema e calibração do sensor.....	61
3.6 Testes e medições.....	67
3.7 Análise dos resultados - Comparação.....	68
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	72
4.1 Projeto e desenvolvimento da célula de carga.....	72
4.2 Testes e medições.....	72
4.3 Comparação entre as células de carga.....	73
5 CONCLUSÃO.....	75
REFERÊNCIAS.....	77

APÊNDICE A – Folha de desenho - Detalhamento e Modelamento 3D.....	81
APÊNDICE B – Código programado para usinagem CNC.....	82
ANEXO A – Orçamento da célula de carga adquirida.....	84

1 INTRODUÇÃO

A globalização, juntamente com o desenvolvimento tecnológico e o acesso à informação, tornou a concorrência empresarial acirrada e transformou-se em um desafio a ser enfrentado. Para se destacar neste ambiente cada dia mais competitivo, é necessário otimizar o processo de desenvolvimento de produtos, buscando melhor produtividade, redução de custos e materiais, além de diminuir os erros de processo. Em concordância com isso, a área da instrumentação teve um avanço significativo e se tornou um diferencial competitivo no cenário industrial, tendo seu divisor de águas sendo o desenvolvimento dos mais diversos tipos de sensores, para as mais variadas aplicações (RIBEIRO, 2002).

Ao criar um novo instrumento, é necessário utilizar uma variedade de análises e conceitos dos instrumentos já existentes, a fim de encontrar um ponto em que esses conceitos convergem e atendem às necessidades específicas. Portanto, o desenvolvimento de uma célula de carga axial requer a correlação entre as propriedades mecânicas obtidas por meio do ensaio de tração e da extensometria. Isso ocorre porque a deformação medida pelos extensômetros é convertida em valores de tensão e, para garantir a precisão dos dados, é necessário considerar a parte metrológica para obter resultados confiáveis.

O ensaio de tração é um teste mecânico realizado em materiais para medir a resistência à tração e outras propriedades mecânicas importantes, sendo realizado por meio da aplicação de uma força axial de tração em uma amostra de material, com uma máquina de ensaio específica que mede a força e a deformação elaborando um diagrama, de onde são obtidas as propriedades mecânicas, tais como o limite de elasticidade, de resistência, a ductilidade e a tenacidade. Este é amplamente utilizado para garantir a qualidade dos materiais utilizados na fabricação de peças, componentes e mecanismos (HIBBELER, 2009).

Segundo Andolfato, Camacho e Brito (2004, p.2), “os medidores de deformação chamados extensômetros elétricos são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica”.

A variação da resistência elétrica é convertida em deformação e posteriormente em valores de tensão e são utilizadas para as mais diversas aplicações como máquinas, navios, pontes, entre outros. A utilização dos

extensômetros se deve pelo seu baixo custo, boa linearidade e precisão, facilidade de instalação e possibilidade de automação para leituras a longa distância e, principalmente, pelo fato de ser um ensaio não destrutivo (BARRETO, 2009).

De acordo com Thomazini e Albuquerque (2011, p.106) “as células de carga são estruturas mecânicas, planejadas para receber esforços e deformar-se dentro do regime elástico para que foram projetadas. Essa deformação é suficiente para gerar um sinal de saída linear e compatível com a carga aplicada”

Corroborando com o autor acima citado, complementa-se as células de carga como um sensor de força para medir a carga e é composta por um bloco metálico com um ou mais extensômetros colados a ele. As células de carga são amplamente utilizadas em diversas aplicações, tais como balanças comerciais, controle de processos industriais, monitoramento de cargas em estruturas de pontes, plataformas de petróleo, elevadores, entre outras (FIALHO; CUNHA; HIRT, 2014).

Durante o processo de medição é comum que ocorram imprecisões na leitura, resultando em erros que podem afetar significativamente o resultado final. A exatidão de um dispositivo está diretamente ligada ao desvio padrão de um conjunto de medidas, ou seja, quanto maiores forem os erros e o desvio padrão, menos preciso será o instrumento. Nesse contexto, a calibração é realizada com o objetivo de validar os resultados obtidos por um instrumento, determinando a sua taxa de variação de leitura (Brasil, 2008).

1.1 Justificativa

As células de carga são dispositivos importantes e muito utilizados na medição de força, peso e diversas outras variáveis físicas em múltiplos campos, incluindo a indústria, agricultura, transporte e saúde. Suas aplicações vão desde as mais simples, como uma balança de cozinha, até as mais complexas, como equipamentos de construção aeroespacial, mostrando, desse modo, a relevância do tema (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011).

Nos últimos anos houve avanços significativos quanto às tecnologias em geral, incluindo dentro deste, o desenvolvimento de novos materiais e técnicas de fabricação com maior precisão e o avanço relativo aos algoritmos e ao processamento de dados (COLTRO et al., 2007). As células de carga possuem

também um enorme potencial de inovação, especialmente em áreas como a miniaturização, a resistência a condições extremas (como alta temperatura ou pressão) e a integração com outras tecnologias e a internet das coisas, podendo beneficiar diferentes campos de pesquisa e atuação.

Outro aspecto importante que deve ser ressaltado são os desafios técnicos e limitações das células de carga, como a calibração, a linearidade da resposta, e a estabilidade da resposta para condições de aplicação diferentes (Brasil, 2008). Desse modo, motivando estudos nesta área para que ajudem a entender e superar tais desafios, objetivando obter dispositivos que ofereçam medições mais precisas e confiáveis (MENDES; ROSÁRIO; 2019).

Dessa forma, pode-se apontar como justificativas para realizar o presente estudo, a interdisciplinaridade do tema e a importância do processo de medição cada vez mais preciso e aplicável aos mais diversos ambientes e condições, objetivando contribuir para o desenvolvimento do assunto e superar as limitações técnicas e específicas das células de carga.

Assim, o problema de pesquisa é elaborar uma célula de carga que possa suportar cargas axiais e garantir precisão adequada e confiabilidade de medição considerando as propriedades mecânicas dos materiais para aplicações industriais comparando-a a uma célula comercial.

Desse modo, o presente projeto tem como objetivo desenvolver uma célula de carga axial por completo e compará-la a uma célula comercial, além de trazer esclarecimentos sobre o tema, auxiliando desse modo pesquisadores e interessados a elucidar dúvidas e compreender o assunto. Para que, o mesmo contribua para os acervos bibliográficos gerando conhecimento técnico-científico, bem como um passo a passo para o desenvolvimento de uma célula de carga tornando possível a replicação do mesmo a fins de conhecimento contribuindo com a comunidade científica e facilitando futuras pesquisas sobre as células de cargas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Elaborar e validar uma célula de carga para garantir a medição de cargas axiais, com precisão e confiabilidade.

1.2.2 Objetivos específicos

- a. Desenvolver uma célula de carga, selecionando o tipo de sensor e materiais necessários para aplicação, projetando-a com base nos mesmos;
- b. Testar a célula de carga para verificar a precisão da medição e calibrar o sensor;
- c. Comparar a célula de carga desenvolvida com uma célula de carga comercial para validar sua precisão, funcionalidade e custos;

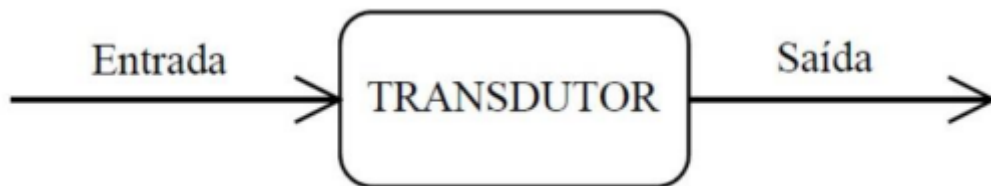
2 DESENVOLVIMENTO

Uma célula de carga contempla em si o conjunto de diversos conceitos, alguns abordados indiretamente e outros diretamente, por esse motivo, faz-se necessário realizar uma revisão bibliográfica para conceituar os elementos presentes neste trabalho.

2.1 Célula de Carga

Segundo Barreto Júnior (2012), “célula de carga ou transdutor é qualquer dispositivo capaz de transformar um tipo de sinal em outro para permitir um controle de processos físicos ou realizar uma medição”. Voeltz (2019, p.23) complementa que os “transdutores são dispositivos que têm a capacidade de converter um tipo de energia em outra, através de um estímulo ou por uma reação de uma grandeza física”. A Figura 1 mostra um esquema de funcionamento de uma célula de carga.

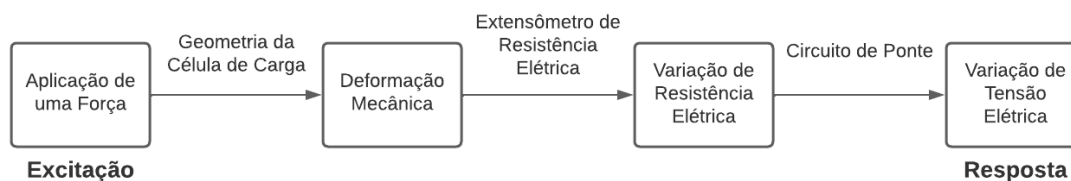
Figura 1: Representação esquemática do funcionamento de uma célula de carga



Fonte: Weber (2008)

Desse modo, uma célula de carga recebe um dado de entrada, proveniente da aplicação de uma força, seja esta de tração, compressão ou torção, sendo essa aplicada sobre o corpo da mesma e resultando em uma deformação, que é lida pelo sensor (extensômetro elétrico) pela variação da resistência elétrica, dentro de um circuito de ponte de Wheatstone, resultando em uma variação de tensão elétrica. Esta última, pode ser lida por um sistema de aquisição de dados, e através das equações, encontrar a força aplicada inicialmente na célula (WEBER, 2008). A Figura 2 demonstra esse passo a passo.

Figura 2: Diagrama do processamento de informação.



Fonte: Adaptada pelo autor de Weber (2008)

2.1.1 Tipos de transdutores

Um transdutor é composto basicamente por um elemento elástico, extensômetros e circuitos compensadores. O elemento elástico é a parte do transdutor que sofre deformação em resposta à carga aplicada. Os extensômetros são conectados ao elemento elástico e apresentam uma pequena variação de resistência elétrica proporcional à deformação sofrida pelo corpo. Essa variação é medida por meio de circuitos compensadores, que ajustam a tensão elétrica na saída do transdutor para compensar possíveis variações de temperatura ou outros efeitos indesejáveis (BARRETO, 2009).

O autor ainda mostra os principais tipos de transdutores construídos com extensômetros, sendo separados da seguinte maneira:

- I. Transdutor de carga (Célula de carga)
- II. Transdutor de de pressão
- III. Transdutor de deslocamento
- IV. Transdutor de inclinação
- V. Transdutor de aceleração

2.1.2 Célula de carga

Para Lopes (2019, p.26) dentre os tipos mais comuns, a célula de carga é o transdutor mais conhecido, sendo utilizada, geralmente, em balanças. A autora ainda afirma que “o princípio de funcionamento da célula de carga consiste na variação de resistência ôhmica do sensor, denominado extensômetro, que é fixado em uma estrutura rígida, e submetida a uma deformação”.

Segundo Fialho, Cunha e Hirt (2014), às células de carga medem esforços, dinâmicos ou estáticos aplicados sobre uma geometria, sendo esta, variável para

cada célula, geralmente escolhida, por características de projeto e de leitura do sensor.

Os mais variados tipos de células de carga são considerados para uma aplicação destas, sendo uma característica de projeto e determinação do melhor tipo. A fabricante de sensores Omega Engineering (2015) aponta os principais e mais usuais tipos de células de carga, sendo eles:

I. Miniatura

As células de carga em formato miniatura e subminiatura, destinadas a aplicações de compressão, são projetadas para operar com cargas substanciais em espaços extremamente reduzidos (OMEGA ENGINEERING, 2015).

II. Viga

Tipo viga de flexão, que apresenta menor capacidade e boa relação custo benefício (OMEGA ENGINEERING, 2015).

III. Plataforma

O tipo plataforma, são células hermeticamente seladas, e são particularmente adequadas para aplicações que demandam resistência à penetração de elementos externos, ou seja, impermeáveis, e precisão superior, como em processos industriais na área de alimentos (OMEGA ENGINEERING, 2015).

IV. S

“As células de carga do tipo são geralmente utilizadas para aplicações em tração. Sendo projetadas para oferecer o melhor desempenho em cargas compactas e versáteis” (OMEGA ENGINEERING, 2015).

V. Canister ou coluna

As células de carga do tipo canister, também conhecidas como células de carga tipo coluna, encontram aplicação em pesagens únicas ou múltiplas de grande porte. Isso se deve à sua notável capacidade de resistir a flexões e deformações, tornando-as ideais para aplicações

que envolvem tanto forças de compressão quanto tração axial (OMEGA ENGINEERING, 2015).

VI. Compensação Hidrostática

“Célula utilizada em operações submersas, como pesagem marítima, plataformas submarinas. Totalmente construída em aço inox, é bastante confiável em condições subaquáticas severas” (OMEGA ENGINEERING, 2015).

As células de carga possuem inúmeras aplicações, sendo aplicadas em balanças residenciais e industriais, em pontes rolantes, na pesagem de silos e tanques, pesagem e balanceamento de aeronaves, pesagem rodoviárias e industriais. Desse modo, as variações quanto aos tipos, formatos e especificidades são variáveis para cada processo, resultando dessa forma, em inúmeros modelos comerciais de diferentes células de carga, como exemplificado na Figura 3.

Figura 3: Modelos comerciais de células de carga



Fonte: Lopes (2019) adaptada de Labmetro (2012)

2.2 Extensometria

Com o passar do tempo, a evolução tecnológica e as engenharias facilitaram o dia a dia e transformaram o modo de pensar e projetar equipamentos e estruturas, tornando cada vez mais desenvolvidos e integrados. Partindo desse princípio e de descobertas científicas, a área da instrumentação teve grande desenvolvimento nos últimos anos graças à evolução dos extensômetros e dos sensores elétricos.

A extensometria é compreendida como uma análise experimental de deformações usual para a avaliação de estruturas e equipamentos, tendo suas

bases fixadas nos elementos sensores, geralmente, extensômetros, e nas propriedades de resistência dos materiais, podendo encontrar as cargas desconhecidas de um processo, de forma iterativa e durante o seu funcionamento (HOFFMANN, 2012).

Segundo Andolfato, Camacho e Brito (2004, p.2):

“Os medidores de deformação chamados extensômetros elétricos são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica, e são usados usualmente entre os engenheiros de instrumentação. O extensômetro é a unidade fundamental destes dispositivos. [...] Extensômetros são usados para medir deformações em diferentes estruturas. A medida é realizada colando um extensômetro nestas estruturas, convertendo a deformação causada em uma quantidade elétrica (voltagem) e amplificando-a para leitura em um local remoto.”

Ao encontro da conceitualização, o autor Barreto (2009), aponta as diversas vantagens existentes na utilização do extensômetro, como a alta precisão nas medições realizadas, as dimensões reduzidas que facilitam a sua utilização em diversos tipos de equipamentos, a facilidade de operação, a possibilidade de utilização em ambientes submersos ou com atmosferas corrosivas, a capacidade de medição, a distância e a versatilidade quanto à quantidade física medida. O extensômetro tem como base a lei de Hooke (Equação 8) e a relação entre a tensão e a deformação.

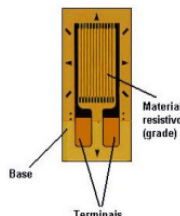
Para Grante (2004) a extensometria é dividida em tipos de acordo com as medidas de deslocamento, que se remetem a variação do tipo de extensômetro trabalhado, sendo nesse aspecto, dividida em mecânicos, capacitivos, elétricos semicondutores, metais depositados, fibra ótica, piezelétricos, óticos, entre outros. Sendo neste estudo, considerado os extensômetros elétricos.

2.2.1 Extensometria elétrica

A extensometria elétrica, ou de resistência elétrica, tem como princípio fundamental a utilização de sensores ou extensômetros do tipo resistência elétrica, também conhecidos como *strain gauges*. Esses sensores operam com base na variação da resistência elétrica de um material quando submetido a uma

deformação, permitindo relacionar essa variação com a tensão aplicada (PERTENCE JUNIOR, 2010 *apud* SILVA, 2018).

Figura 4: Modelo de um extensômetro ou Strain Gauge



Fonte: Magalhães (2008)

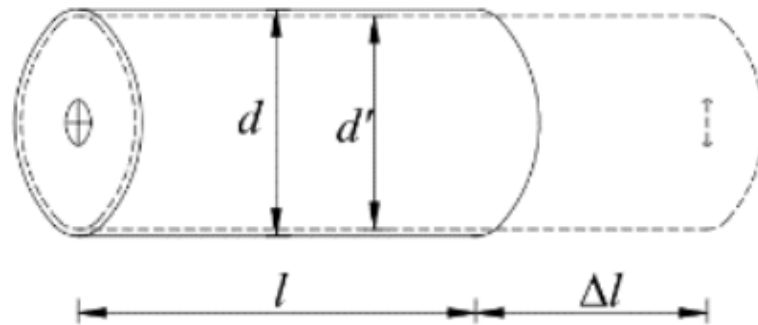
Complementando o autor anterior, Guadagnini; Saraiva; Elisabeth (2011), demonstram que o extensômetro de resistência é aplicado na estrutura em análise antes da aplicação dos esforços externos. Após aplicação de força, esta promove deformações na estrutura que são diretamente transmitidas para base do extensômetro, que por sua vez deforma a resistência metálica, fazendo assim a variação da mesma, que é medida e interpretada.

2.2.2 Princípio de funcionamento

O princípio básico que rege os extensômetros é baseado no fato de que os metais quando sofrem alguma deformação, a sua resistência elétrica também é alterada (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004). Corroborando com isso, Grante (2004) complementa que “o princípio de trabalho do extensômetro de metal está baseado na relação deformação/resistência do condutor elétrico, já que todo condutor elétrico muda sua resistência elétrica quando submetidos a tensões mecânicas, sejam compressivas ou trativas”.

Desse modo, “à medida que o fio sofre uma tração axial seu comprimento inicial l é alterado para $l + \Delta l$, o que ocorre na mesma proporção com a resistência elétrica que passa de R para $R + \Delta R$ ” (SILVA, 2018, p. 43), como representado na Figura 5, que demonstra a deformação de um fio e variação de comprimento e diâmetro, com a aplicação de uma força trativa.

Figura 5: Deformação de um fio sob tração.



Fonte: Andolfato; Camacho; Brito (2004)

Dessa forma a resistência elétrica, medida em ohms, depende da geometria e resistividade do material. A fórmula para calcular a resistência em uma seção transversal do fio de resistividade ρ , de um extensômetro, é demonstrada pela equação 1 (MAGALHÃES, 2008).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (1)$$

Onde a área da seção transversal é, na maioria das aplicações, circular ou retangular, e pode ser encontrada através das respectivas equações 2 e 3.

$$A = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot d^2 \quad (2)$$

$$A = b \cdot t \quad (3)$$

Entretanto, Silva (2018) mostra que, como evidenciado na Figura 6, a deformação do condutor ocorre nos dois sentidos, longitudinal e transversal, resultando em uma redução da seção transversal, sendo, desse modo, necessário a aplicação do coeficiente de Poisson, resultando na equação 4, para um condutor circular.

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = (2 \cdot \nu + 1) \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right) \quad (4)$$

“A relação entre a deformação específica e a variação de resistência é denominada *Gage Factor* (*GF*) ou Fator de Sensibilidade (*K*), e é um coeficiente adimensional fornecido pelo fabricante do sensor” (SILVA, 2018, p. 44). Ele é representado pela equação 5.

$$K = \left(\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \right) \quad (5)$$

Minela (2017, p.24) reafirma que “o valor do fator de sensibilidade é definido pelo fabricante em função do material em que o extensômetro é fabricado”, a Tabela 1, mostra o valor do fator para algumas ligas utilizadas.

Tabela 1 - Composição e fator de sensibilidade (K) para ligas utilizadas em extensômetros

Material	Composição (%)	K
Constantan	57 Cu, 43 Ni	2,05
Karma	73 Ni, 20 Cr, res. Fe + Al	2,1
Nichorme V	80 Ni, 20 Cr	2,2
Platina – Tungstênio	92 Pt, 8 W	4,0

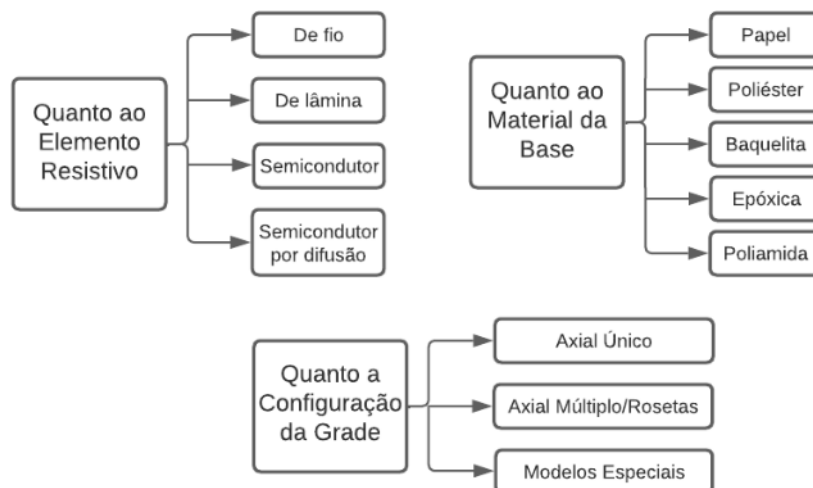
Fonte: Minela (2017)

Desse modo, “quando o *strain gauge* é contraído (comprimido), há uma redução da sua resistência elétrica e o contrário acontece quando o mesmo é alongado (tracionado). É possível determinar a deformação através desta variação na resistência” (VOELTZ, 2019, p.22).

2.2.3 Tipos de extensômetros

Existem diversos tipos de extensômetros, cada qual com a sua especificidade, e eles são classificados de diversas formas. Para Barreto (2008) os extensômetros são classificados das maneiras apresentadas na Figura 6.

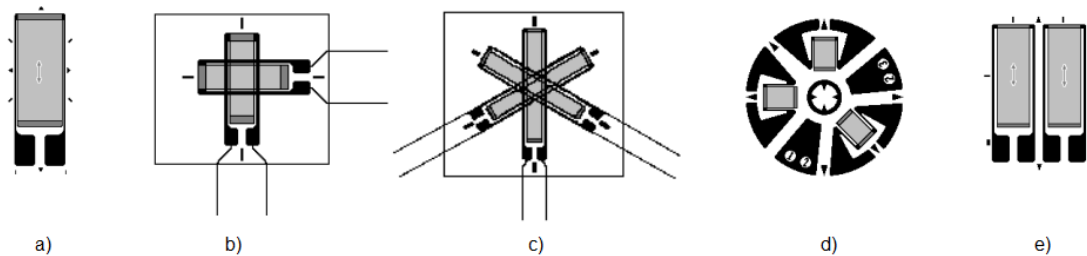
Figura 6: Classificação dos tipos de extensômetros



Fonte: Adaptado de Barreto (2008)

Quanto a configuração de grade, são indicados, para quando se conhece o sentido da deformação, o tipo axial único (Figura 7a), caso seja em uma direção, o axial múltiplo, caso a deformação seja em duas direções ou mais (Figura 7b e c). É comum, também, para alguns tipos de célula de carga axial a utilização de dois extensômetros axiais (denominado nessa composição de extensômetro axial duplo), dispostos lado a lado (Figura 7e), porém, geralmente utilizados em geometrias retangulares (BARRETO, 2008).

Figura 7: a) extensômetro uniaxial; b) extensômetro biaxial; c) extensômetro triaxial; d) extensômetro especial; e) extensômetro duplo



Fonte: Barreto (2008)

2.2.4 Ponte de Wheatstone

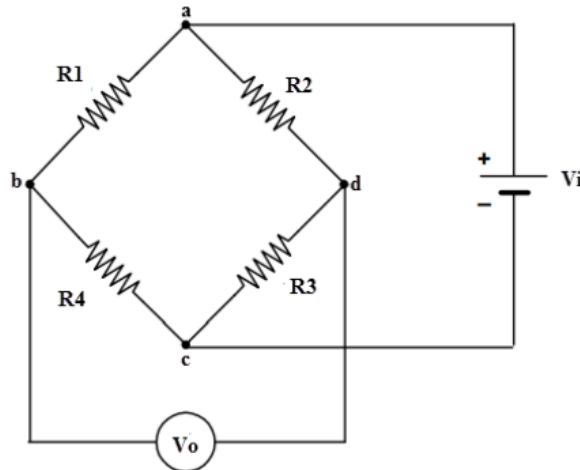
O funcionamento de um extensômetro está baseado na relação entre a deformação de um material e a variação da sua resistência elétrica. Quando um material é submetido a uma deformação, isso causa uma alteração na resistência elétrica do extensômetro, que é proporcional à magnitude da deformação. Para medir essa variação de resistência, é necessário utilizar um método capaz de quantificá-la de forma precisa (BARALDI, 2022).

Desse modo, Guadagnini; Saraiva; Elisabeth (2011) afirmam que quando as deformações causam uma variação de resistência muito pequena, é necessário utilizar uma Ponte de Wheatstone que trata-se de um circuito elétrico que consiste em quatro braços resistivos, sendo que o extensômetro (ou extensômetros) é ligado a resistores de igual potência. A variação de resistência do extensômetro é medida indiretamente pela variação de tensão elétrica na saída da Ponte, que é proporcional à variação de resistência no extensômetro.

Corroborando com ideia anterior, Barreto Júnior (1998) apud Voelz (2019, p. 39) “a ponte de Wheatstone é o circuito com maior uso na extensometria, não

apenas para medições de deformações estáticas, como também dinâmicas. Este tipo de circuito elimina facilmente a influência da variação de temperatura no extensômetro”. A Figura 8 exemplifica uma ponte de Wheatstone:

Figura 8: Modelo de ponte de Wheatstone

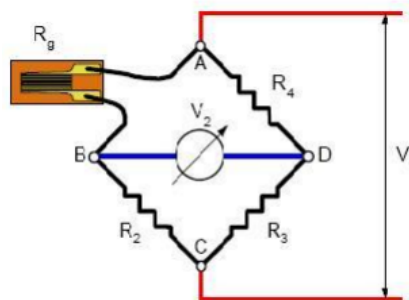


Fonte: Adaptado de Andolfato, Camacho e Brito (2004) por Minela (2017)

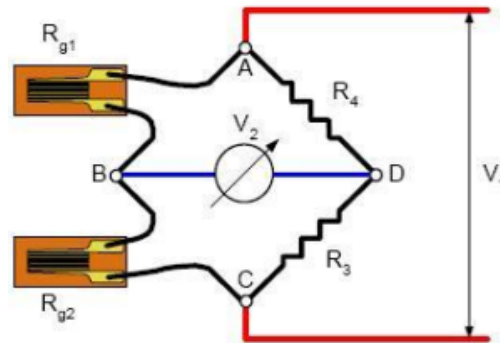
Grante (2004) e Gallina (2003) trazem informações concordantes entre si, em relação que a ponte de Wheatstone pode ser montada de diferentes maneiras, dependendo do número de extensômetros utilizados e da aplicação específica. As opções incluem um quarto de ponte, meia ponte, três quartos de ponte e ponte completa. Cada uma dessas configurações é escolhida com base nas necessidades de medição de deformação e na precisão exigida para a aplicação em questão.

Segundo Minela (2017, p. 46) “na condição em que a barra estiver submetida a esforços trativos, diferentes formas de ligação da ponte de Wheatstone podem ser utilizadas, $\frac{1}{4}$ de ponte, $\frac{1}{2}$ ponte ou a ligação em ponte completa”. Desse modo, os extensômetros para cargas axiais podem ser ligados das formas representadas nas Figuras abaixo:

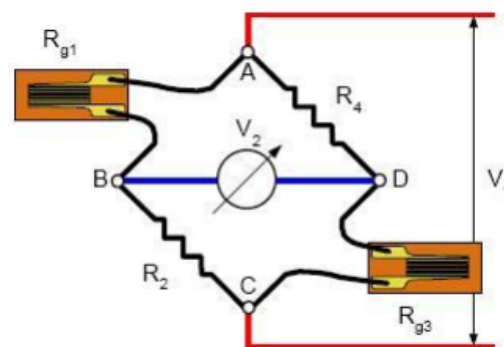
Figura 9: Ligação em $\frac{1}{4}$ de ponte



Fonte: Instituto de Física da UNICAMP (2013)

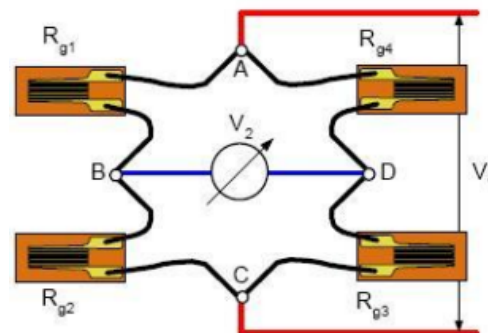
Figura 10: Ligação em $\frac{1}{2}$ de ponte

Fonte: Instituto de Física da UNICAMP (2013)

Figura 11: Ligação em $\frac{1}{2}$ de ponte em diagonal

Fonte: Instituto de Física da UNICAMP (2013)

Figura 12: Ligação de ponte completa



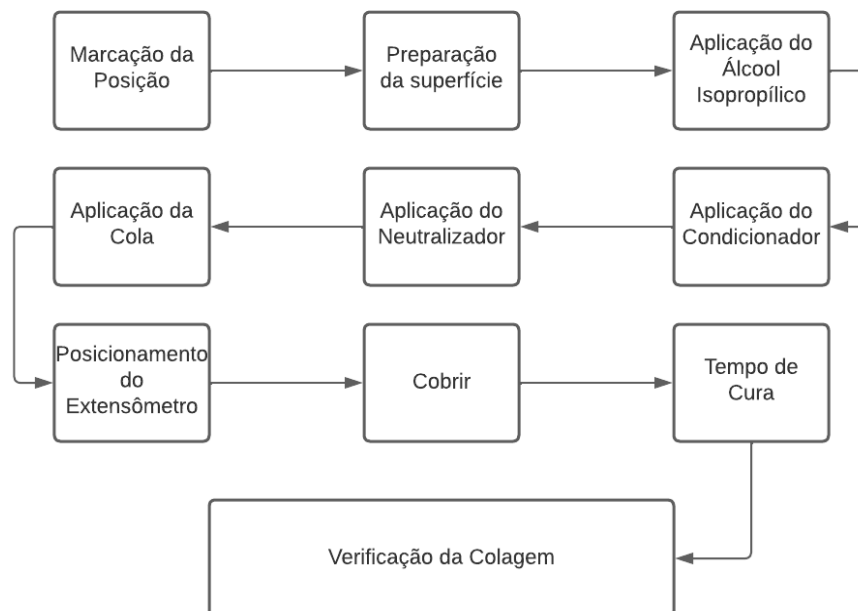
Fonte: Instituto de Física da UNICAMP (2013)

Na medição das tensões em um material com base em suas deformações, é utilizada a Lei de Hooke. A escolha da configuração da Ponte de Wheatstone depende do estado de tensão no ponto de medição, tornando a etapa preliminar de planejamento do ensaio uma etapa fundamental. É importante escolher a configuração mais apropriada para a aplicação específica, a fim de garantir medições precisas e confiáveis das tensões no material. (GRANTE, 2004)

2.2.5 Instalação / Colagem

Segundo Magalhães (2008), para que um extensômetro possa funcionar corretamente, é necessário que sua instalação, ou colagem, ocorra de forma precisa e correta, pois caso isso não aconteça, as leituras obtidas podem ser comprometidas, sendo imprecisas e até incoerentes com a realidade. O autor ainda afirma que para garantir a colagem correta e precisa, deve-se seguir alguns passos, apontados pelo mesmo na sequência apresentada na Figura 13.

Figura 13: Representação das etapas para colagem correta de um extensômetro.



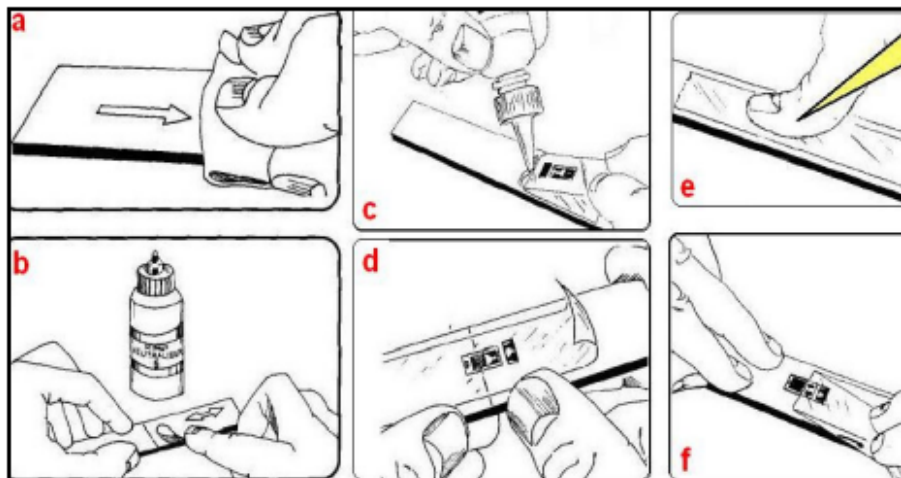
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Magalhães (2008, p.50-51), determina as etapas a serem seguidas para a colagem dos extensômetros (as quais foram exemplificadas na imagem anterior) e, descritas como:

- I. Marcação da posição da peça
Marcar a posição na peça onde se deseja colar os extensômetros.
- II. Preparação da superfície
Usar uma lixa para polir a superfície de teste removendo riscos, pinturas
- III. Aplicação álcool isopropílico
Aplicar álcool isopropílico (recomendado para remoção de gorduras na superfície de peças já pré-limpas e lixadas e também para a limpeza e remoção de gorduras de objetos utilizados no processo de colagem do extensômetro como

- pinças, tesouras, etc), bem como provenientes dos próprios locais de trabalho
- IV. Aplicação um condicionador
Aplicar um condicionador (líquido volátil ligeiramente ácido) recomendado para a remoção de pequenas oxidações superficiais, melhorando as condições de adesão do extensômetro.
 - V. Aplicação um neutralizador
Aplicar o neutralizador (líquido volátil ligeiramente básico), a ser usado em conjunto com o condicionador, para neutralizar a acidez introduzida pelo condicionador
 - VI. Aplicação a cola no material
Aplicar uma pequena quantidade de cola sobre a superfície a ser testada.
 - VII. Posicionamento do extensômetro
Colocar o extensômetro na posição correta, já marcada anteriormente.
 - VIII. Cobrir com uma folha de poliéster
Cobrir com uma folha de poliéster (material que não adere à superfície da peça em contato com a cola)
 - IX. Tempo de cura
O tempo de cura difere dependendo do tipo do extensômetro, material a ser testado, condições da superfície, temperatura, etc. Normalmente varia entre 30 a 60 segundos. Caso necessário pode-se utilizar uma camada de silicone para proteger o extensômetro.

Figura 14: Processo de colagem dos extensômetros



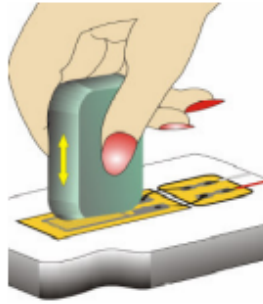
Fonte: Magalhães (2008, adaptado de CRAIG, 2007)

X. Verificação

A forma de testar a colagem é através da utilização de uma borracha comum com o extensômetro ligado a um sistema de medição. Deve-se pressionar a borracha contra o mesmo, tomando-se o cuidado para não flexionar ou solicitar a peça. O sistema de medição deverá ler um valor baixo (até 50 microdeformações). Se a leitura for alta, mesmo com pouca carga é porque o extensômetro está parcialmente descolado. (PAULINO, 2007 apud MAGALHÃES, 2008, p. 52)

A Figura 15, demonstra o processo da verificação da colagem do extensômetro:

Figura 15: Teste da borracha



Fonte: Paulino (2007)

Desse modo, caso o resultado do teste seja falho, deve-se realizar a colagem novamente, para garantir a confiabilidade da medida.

2.3 Ensaio de tração

Para uma célula de carga o material utilizado se torna parte essencial do instrumento, pois são as propriedades deste que determinam as capacidades máximas da mesma, bem como são empregados para o cálculo das tensões e forças aplicadas no equipamento. Desse modo, torna-se necessário conceitualizar sobre esses materiais e os meios de obtenção dessas propriedades.

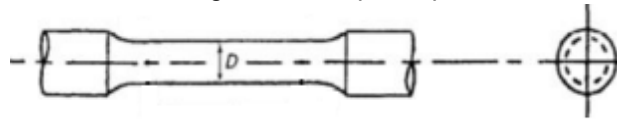
Os materiais utilizados na engenharia são muito específicos e variam de acordo com aspectos como aplicação, ambiente e o meio, mas principalmente de acordo com as suas propriedades mecânicas. O modo de determinar as propriedades é por meio de ensaios laboratoriais que reproduzem as condições de aplicação e geram um gráfico de tensão-deformação, de onde são retiradas as propriedades daquele material (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

"Um dos testes mais importantes nesses casos é o ensaio de tração ou compressão, [...], ele é usado para determinar a relação entre a tensão normal média e a deformação normal média em materiais usados na engenharia, como os metais" (HIBBELER, 2009, p. 57).

A execução de um ensaio de tração para materiais metálicos é regida pela norma NBR ISO 6892-1/2013 e pela norma estadunidense ASTM E8 (*American Society for Testing and Materials*) que regulamentam o processo de ensaio, que consiste na aplicação de uma carga de tração sob um corpo de prova fabricado, geralmente, por usinagem, com dimensões pré-definidas e que apresentem certa proporcionalidade para que a incerteza do ensaio seja baixa (ABNT, 2013).

A Figura 16 mostra um corpo de prova e as nomenclaturas de cada dimensão:

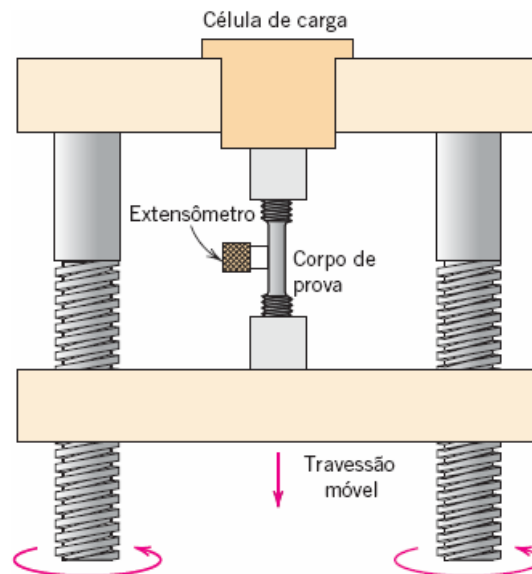
Figura 16: Corpo de prova



Fonte: Bertoldi (2014)

Para o ensaio o corpo de prova é fixado nas garras da máquina universal de ensaios, como representado na Figura 17, com a fixação variando de acordo com a garra de cada máquina. O equipamento aplica uma carga de tração, alongando o corpo de prova a uma taxa constante e constantemente, com uma célula de carga e um extensômetro, mede o valor da carga que está sendo aplicada e o alongamento do corpo de prova, respectivamente, aplicando tal carga até a fratura, para desse modo determinar as propriedades do material (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Figura 17: Esquema de uma máquina universal de ensaios



Fonte: Callister e Rethwisch (2018)

“O resultado de um ensaio de tração desse tipo é registrado como carga ou força em função do alongamento” (CALLISTER; RETHWISCH, 2018, p.127). Desse modo a relação obtida entre a carga e o alongamento é transformada em uma relação de tensão nominal (ou de engenharia) e deformação nominal, e é apresentada em forma de gráfico, conhecido como diagrama de tensão-deformação

(CALLISTER; RETHWISCH, 2018). A tensão e a deformação nominais são representadas matematicamente pelas respectivas equações:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (6)$$

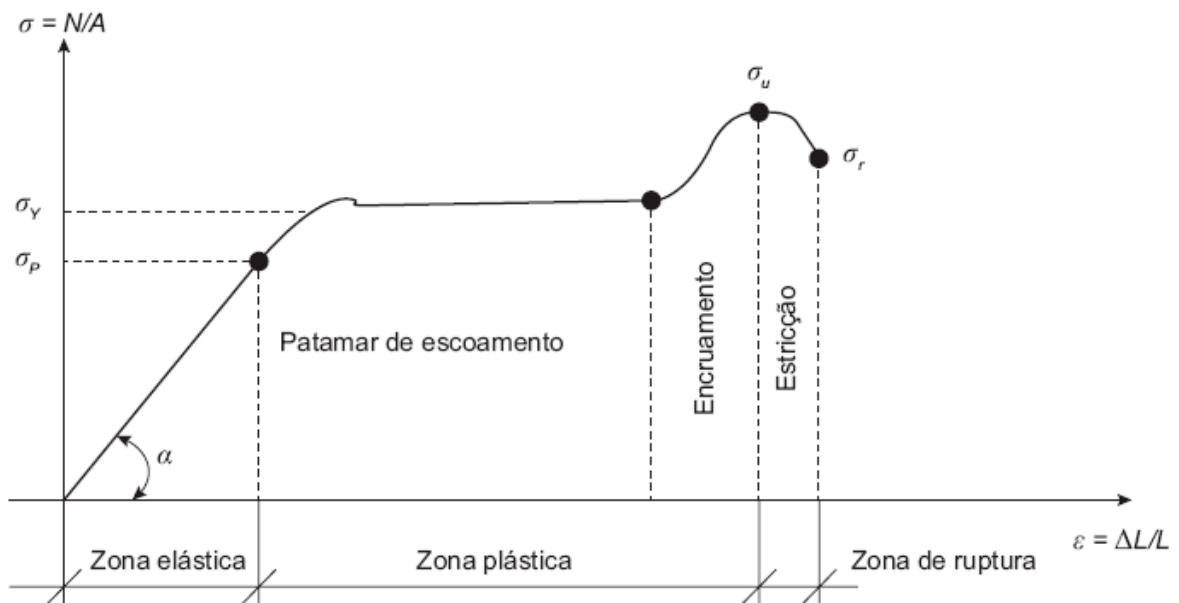
$$\varepsilon = \frac{(l_i - l_0)}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (7)$$

Desse modo, com as equações anteriores, pode-se, tendo a força aplicada e podendo calcular a área e medir os comprimentos inicial e final, encontrar a tensão e a deformação do objeto nessa situação. Essa é a lógica utilizada para o diagrama tensão-deformação, porém alterando a força aplicada e consequentemente a deformação.

Hibbeler (2009) afirma que “esse diagrama é muito importante na engenharia porque proporciona os meios para se obterem dados sobre a resistência à tração de um material sem considerar a sua geometria.”

A Figura abaixo mostra a forma do diagrama tensão *versus* deformação obtido pelo ensaio de tração para um material dúctil, como o aço estrutural:

Figura 18: Diagrama tensão *versus* deformação do aço estrutural.



Fonte: Pinheiro e Crivelaro (2021)

Analisando o diagrama de um determinado material obtemos algumas propriedades mecânicas do mesmo, as quais são consideradas e são essenciais para projetos de engenharia.

Segundo Hibbeler (2009), e como é possível observar no diagrama anterior, grande parcela dos materiais de engenharia exibem uma relação linear entre a deformação e a tensão, na região elástica, ou seja uma proporcionalidade entre as variáveis conhecido como módulo de elasticidade ou módulo de Young (E) sendo representado matematicamente, na Lei de Hooke (Eq. 8), como:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (8)$$

σ = Tensão

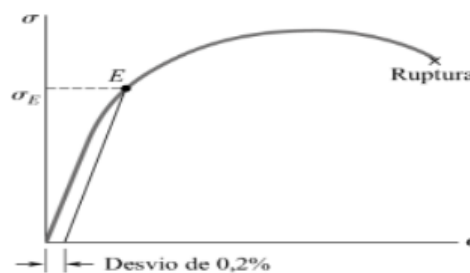
E = Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young

ε = Deformação

Desse modo, obtendo uma determinada deformação, realizada pela aplicação de uma carga ou por um fenômeno em conjunto com o módulo de elasticidade, o qual é um dado relativo ao material, que é encontrado em tabelas, catálogos e referências bibliográficas, é possível obter a tensão que está sendo aplicada no corpo, equipamento, entre outros.

As aplicações de engenharia geralmente são projetadas para que os componentes não atinjam a região plástica do material, ou seja, onde ocorre deformação plástica (permanente) na estrutura. “Para metais que apresentam essa transição gradual de deformação elástica para deformação plástica, o ponto de escoamento pode ser determinado como aquele onde ocorre o afastamento inicial da linearidade na curva tensão-deformação” (CALLISTER; RETHWISCH, 2018), como representado pelo ponto E na Figura 19, onde por convenção é considerado um desvio de 0,2%.

Figura 19: Determinação da resistência ao escoamento pelo método de desvio de 0,2%



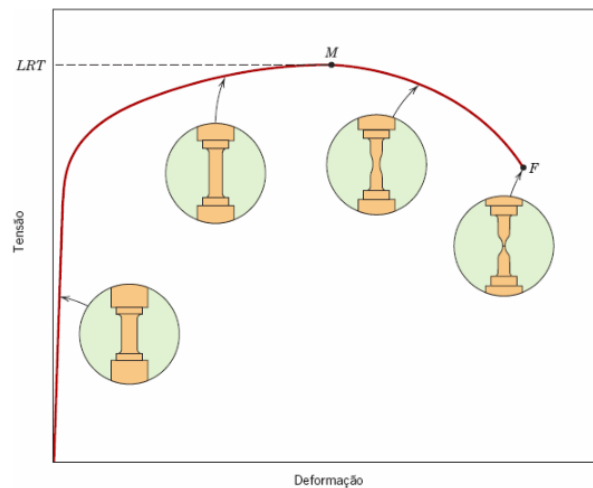
Fonte: Beer (2021)

Desse modo, é possível determinar o limite de resistência ao escoamento (σ_E) de um material.

Segundo Callister e Rethwisch (2018, p.137) “o limite de resistência à tração é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação de engenharia. Esse ponto corresponde à tensão máxima suportada por uma estrutura sob tração; se essa tensão for aplicada e mantida, ocorrerá fratura”. Os valores deste limite variam de acordo com o material analisado, podendo variar, para os materiais metálicos, de 50 MPa a mais de 3000 MPa, esse valor normalmente não é considerado para projetos pois quando esse valor é alcançado, a estrutura já está comprometida. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018)

A Figura abaixo, exemplifica onde se localiza o limite de resistência à tração no gráfico de tensão-deformação.

Figura 20: Limite de resistência à tração



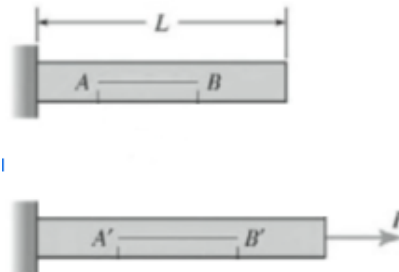
Fonte: Callister e Rethwisch (2018)

“A tenacidade é uma propriedade indicativa da resistência de um material à fratura quando uma trinca (ou outro defeito concentrador de tensões)” (CALLISTER; RETHWISCH, 2018, p. 141). Ou seja, ela é a capacidade que um material tem de receber, absorver energia e se deformar plasticamente sem fraturar, e é representada, matematicamente, pela área abaixo da curva do diagrama tensão-deformação (UGURAL, 2009).

A deformação é uma modificação do tamanho de determinado objeto após aplicação de uma força, ou seja, o valor da variação das suas medidas de comprimento, por exemplo. Considerando a força aplicada, como uma força de

tração, esta deformação é evidenciada como um “alongamento” do objeto, como evidenciada na Figura 21 (UGURAL, 2009).

Figura 21: Deformação gerada aplicação de uma força de tração



Fonte: Modificada de Ugural (2009)

A deformação pode ser de dois tipos, elástica ou plástica, sendo a deformação elástica, reversível, ou seja, quando retirada a força aplicada, suas dimensões retornam as iniciais e a deformação plástica, permanente, desse modo, mesmo após cessar a força aplicada, o objeto não retorna ao seu estado inicial (HIBBELER, 2009).

2.4 Metrologia

Ao relatar o resultado de uma medição de uma grandeza física, é fundamental fornecer uma indicação quantitativa da qualidade do resultado, isso é necessário para que aqueles que utilizam o resultado possam avaliar sua confiabilidade e compará-lo com outros resultados ou valores de referência fornecidos em especificações ou normas. É essencial que exista um procedimento amplamente aceito para avaliar e expressar a incerteza de uma medição, que seja fácil de compreender e de aplicar rapidamente. Sem essa indicação de incerteza, os resultados de medição não podem ser comparados ou considerados confiáveis. Portanto, é fundamental que se adote um procedimento padronizado para caracterizar a qualidade de um resultado de medição (INMETRO, 2012).

2.4.1 Definições

Neste aspecto, torna-se necessário conceitualizar algumas definições, para que não haja discordâncias entre relações, já que metrologia e o ramo das estatísticas tem termos que podem ser confundidos dependendo das circunstâncias.

Uma grandeza é um atributo ou propriedade de um fenômeno, objetos, corpos ou substâncias que podem ser medidas ou mensuradas a fim de correlacionar os mesmos atributos em corpos diferentes. A título de exemplo, as grandezas em um sentido geral são tempo, comprimento, massa, entre outros (INMETRO, 2012).

Segundo VIM (1993 *apud* INMETRO, 2012, p. 46) “o valor verdadeiro consiste na definição quantificável de uma grandeza específica, ou seja, é o valor que seria obtido por uma medição perfeita”.

Uma medição entende-se como o processo e o conjunto de operações que objetivam atribuir um valor numérico a uma grandeza (INMETRO, 2012). Geralmente, as medições apresentam características que originam erros em seu resultado. Um erro é composto por duas partes, a porção aleatória (variações temporais, espaciais, imprevisíveis) que não é possível compensar nem eliminar, somente reduzir com um número maior de medições, e a porção sistemática (origina-se de um efeito reconhecido de uma grandeza), esse também não pode ser eliminado, porém, pode ser quantificado e se for significativo, pode-se utilizar um fator de correção para compensá-lo (INMETRO, 2012).

“Frequentemente, os instrumentos e sistemas de medição são ajustados ou calibrados utilizando-se padrões de medição e materiais de referência para eliminar os efeitos sistemáticos, mas as incertezas devem ser consideradas” (INMETRO, 2012, p.20).

A incerteza do resultado de uma medição está diretamente relacionada à falta de conhecimento preciso do valor do mensurando. Após a correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, o resultado da medição se torna uma estimativa do valor do mensurando, mas ainda assim pode haver incerteza decorrente de efeitos aleatórios e correções imperfeitas para os efeitos sistemáticos. Em outras palavras, o resultado da medição é uma estimativa sujeita a uma certa margem de erro, que é influenciada por diversos fatores, incluindo os erros aleatórios e sistemáticos associados ao processo de medição. Portanto, é importante que a incerteza seja adequadamente avaliada e relatada juntamente com o resultado da medição para que os usuários possam compreender a confiabilidade e a precisão da medição realizada. (INMETRO, 2012)

Existem várias fontes possíveis de incerteza como apresentado na ISO GUM 2008 (INMETRO, 2012, p. 21):

- I. Definição incompleta do mensurando;

- II. Realização imperfeita da definição do mensurando;
- III. Amostragem não representativa – a amostra medida pode não representar o mensurando definido;
- IV. Conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- V. Erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- VI. Resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- VII. Valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- VIII. Valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
- IX. Aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- X. Variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Desse modo, faz-se necessário a calibração do instrumento de medição, considerando os erros possíveis, e determinando os seus fatores de correção.

É comum que os instrumentos de medição apresentem erros, decorrentes tanto do próprio dispositivo quanto de grandezas de influência externa, o que pode gerar dúvidas e, em casos mais graves, retrabalhos. Por isso, é fundamental realizar análises periódicas do desempenho dos instrumentos de medição, a fim de conhecer os erros de forma quantitativa e identificar possíveis fontes de variação que possam comprometer a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos. Dessa forma, é possível tomar medidas corretivas e preventivas para minimizar os efeitos desses erros e garantir que as medições sejam precisas e confiáveis (FRAGOSO; FERREIRA; SILVA, 2018).

Portanto, a calibração do dispositivo de medição torna-se necessária, sendo definida para VIM (2012, p.27) como "uma operação que estabelece uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas". Em vista disso, "a calibração permite determinar os erros do instrumento e as correções a serem aplicadas quando necessário" (FRAGOSO; FERREIRA; SILVA, 2018, p. 24).

Por fim, uma célula de carga pode ser calibrada, aplicando diferentes forças conhecidas, podendo-se utilizar gabaritos de carga e observando a relação entre a

força aplicada e a força lida pelo instrumento. Tendo desse modo os valores iniciais como referência do sistema, podendo-se aplicar fatores de correção para a célula que diminua o erro gerado pela leitura, tornando o instrumento mais confiável (FIGLIOLA; BEASLEY, 2019).

Segundo Albertazzi e Sousa (2008, p.130) “a verificação é uma calibração simplificada utilizada para testar se um sistema de medição, ou medida materializada, está em conformidade com uma dada especificação técnica” sendo um processo “simples, rápido e de fácil aplicação e eficaz”.

O fator de correção de acordo com VIM (1993 apud INMETRO, 2012, p. 53) “é o fator numérico pelo qual o resultado não corrigido de uma medição é multiplicado para compensar um erro sistemático”.

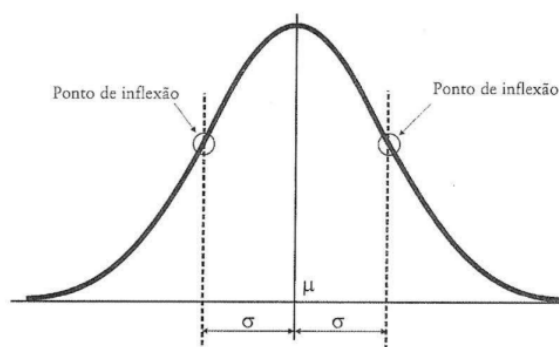
2.4.2 Distribuição de probabilidades

Segundo Albertazzi e Sousa (2008, p.51), a distribuição normal de probabilidades:

“O comportamento aleatório do erro de medição pode ser representado por uma distribuição normal ou gaussiana, que segue o teorema central do limite, que afirma que quanto mais variáveis forem adicionadas, mais a combinação se aproxima de uma distribuição normal.”

Como consequência de várias leituras com o erro de medição relacionado, tem-se a distribuição normal que mostra que cada evento tem a mesma probabilidade de ocorrer, desse modo, para melhor compreender um erro é normal associá-lo a esta distribuição, representada na Figura 22. Os dois parâmetros que são a base deste gráfico são a média e o desvio-padrão (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008).

Figura 22: Gráfico da distribuição normal: desvio padrão (σ), média (μ) e o ponto de inflexão.



Fonte: Albertazzi e Sousa (2008)

De acordo com a Albertazzi e Sousa (2008), uma distribuição com baixo desvio padrão indica que os valores estão próximos ao valor médio, resultando em uma pequena dispersão dos dados. Isso significa que o fenômeno em questão tem uma concentração significativa dos valores em torno da média. Portanto, o valor do desvio padrão em uma distribuição normal é uma medida que indica o grau de dispersão do fenômeno em análise.

2.4.3 Média aritmética amostral

A estimativa mais usual, e que geralmente tem um resultado aproximado mais exato com relação ao valor esperado de uma grandeza que varia aleatoriamente em um número específico de observações (n) é a média aritmética, representada pela equação 9 (INMETRO, 2012).

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (9)$$

2.4.4 Desvio padrão amostral ou experimental e média

O desvio padrão da amostra, ou experimental, é uma medida que quantifica o grau de dispersão dos dados da amostra. Ele representa uma estimativa do desvio padrão da população, sendo calculado a partir dos valores observados na amostra e é representado na equação 10. O desvio padrão da amostra é utilizado para inferir informações sobre a variabilidade dos dados na população, fornecendo uma medida da dispersão dos valores em relação à média amostral (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

$$s_x = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_k^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1}} \quad (10)$$

2.4.5 Variância

A variância é uma medida que representa a média dos quadrados das diferenças entre cada valor da variável aleatória e sua média, sendo um estimador não tendencioso e eficiente da variância da população, o qual fornece uma medida

da dispersão dos dados em relação à média e é representada pela equação 11 (INMETRO, 2012).

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_k^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (11)$$

2.4.6 Incerteza da medição

Segundo INMETRO (2012), às incertezas de uma correção de um efeito são agrupadas em duas categorias, de acordo com seu método de avaliação, categoria “A” e “B”, é interessante classificar apenas para avaliar os componentes, já que ambos os tipos têm como base as distribuições de probabilidades, quantificadas por variâncias e desvios padrão. Desse modo,

“A incerteza-padrão do resultado de uma medição, quando esse resultado é obtido de valores de várias outras grandezas, é denominada incerteza-padrão combinada e designada por μ_c . Ela é o desvio-padrão estimado associado com o resultado e é igual à raiz quadrada positiva da variância combinada (INMETRO, 2012, p. 7).

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do projeto de uma célula de carga engloba inúmeros aspectos e conceitos relacionados à pesquisa, que são indispensáveis e integrados mutuamente para que o estudo atinja os objetivos propostos de forma satisfatória e confiável. Desse modo, faz-se necessário compreender, documentar e selecionar a forma que será abordado, o tipo de pesquisa, os métodos e técnicas utilizadas para o desenvolvimento do mesmo.

A pesquisa é classificada, de acordo com a sua natureza, como uma pesquisa aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimento partindo de uma aplicação prática dos conteúdos abordados, solucionando problemas e buscando melhorias de projeto. Já quanto a forma de abordagem, a pesquisa se classifica como qualitativa e quantitativa, pois serão analisados e interpretados o processo e os dados obtidos tanto de forma subjetiva como de forma estatística e numérica, sendo consideradas as duas maneiras de forma conjunta para atingir os resultados (SILVA; MENEZES, 2001).

Analisando a pesquisa quanto aos seus objetivos, essa se classifica como uma pesquisa exploratória, pois proporciona maior familiaridade com o tema, desenvolvendo hipóteses para atingir os objetivos propostos. Essa, geralmente, envolve um levantamento bibliográfico de informações já publicadas, análise de estudos de caso e exploração de uma determinada área (Gil, 1991 *apud* SILVA; MENEZES, 2001).

Os métodos utilizados serão a pesquisa bibliográfica, elaborada a partir de artigos, teses, livros, entre outros disponíveis em acervos para familiarização, aprofundamento e conceitualização dos assuntos e temas relacionados ao projeto. A pesquisa experimental, pois será selecionado as características que possam interferir no projeto, analisando e definindo as formas de abordagem e de controle do processo, observando seus efeitos. E por fim, um estudo de caso específico, analisando as particularidades do fenômeno estudado e a sua concordância com a pesquisa bibliográfica (Gil, 1991 *apud* SILVA; MENEZES, 2001).

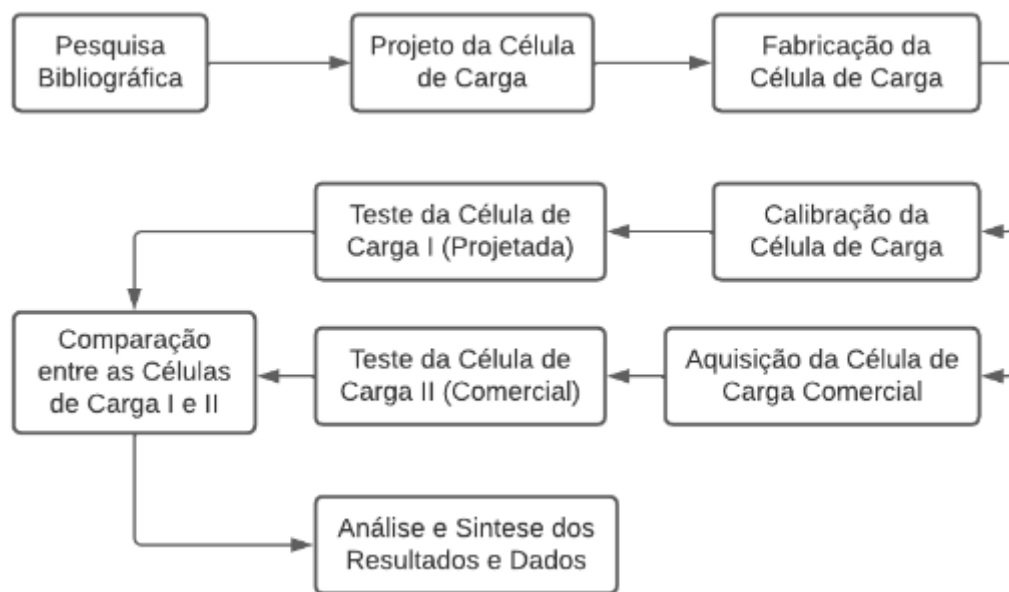
O desenvolvimento do presente projeto será dividido em 6 processos, as quais contemplam a pesquisa como um todo, sendo descrito pelas seguintes etapas:

1. Pesquisas bibliográficas

2. Projeto da Célula de Carga
3. Fabricação da Célula de Carga
4. Calibração da Célula de Carga
5. Testes e medições - Comparação entre a célula projetada e a comercial
6. Análise e Síntese dos resultados

As etapas são representadas, também, na Figura 23, representada abaixo:

Figura 23: Fluxograma de Projeto



Fonte: Do Autor (2023)

3.1 Pesquisa Bibliográfica

Na primeira etapa, de pesquisa bibliográfica, realizou-se uma busca eletrônica nas bases de dados em Periódicos CAPES, Scopus e SciELO, entre outros, empregando os mais atuais conteúdos e utilizando termos de pesquisa como: célula de carga, extensometria, calibração, deformação, transdutores, ensaio de tração. Dentre os artigos, livros, monografias, dissertações, teses e materiais encontrados, foram selecionados materiais para compor o presente estudo, bem como validá-lo e referenciá-lo adequadamente.

As bases bibliográficas deste trabalho foram analisadas e escolhidas pela qualidade das informações contidas nelas, bem como a utilização dos mesmos nos cursos de graduação, importância e impacto no âmbito educacional. A maioria

dessas bases foram utilizadas de forma digital, mas em alguns materiais o acesso deu-se de forma física.

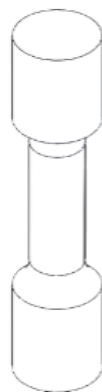
3.2 Projeto da Célula de Carga

Esta etapa iniciou-se com a definição da geometria do protótipo, em análise aos modelos, tipos de célula e buscando uma melhor adaptação em aplicações e menor influência nos resultados dos testes posteriores, onde foi selecionada o tipo cilíndrico para a célula, mais especificamente baseando-se num modelo de um corpo de prova da ensaio de tração, como representado na imagem 17, visto que seria aplicado uma força axial de tração na mesma.

Posteriormente, foi determinado que a carga máxima que a célula poderia medir seria de 10 kN e seria composta por uma peça metálica, com um coeficiente de segurança mínimo de 3 e colado dois extensômetros na direção para medir deformações axiais no corpo de prova, ligando o mesmo em um circuito de $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone.

Tendo definido esses aspectos, iniciou-se a etapa do desenvolvimento da modelagem base da célula de carga, essa realizou-se com auxílio do software de engenharia de CAD 3D, SolidWorks, versão 2020. Essa foi realizada baseando-se na norma ASTM E8 e na norma NBR ISO 6892-1/2013, sendo possível observar o projeto inicial na Figura 24.

Figura 24: Modelamento base da célula de carga



Fonte: Do autor (2023)

Após realizar esse modelamento base e observar outras características do processo de fabricação, como do tipo da célula, da aplicação e dos testes, algumas determinações do pré-dimensionamento foram alteradas, visando melhor qualidade

de dados e facilidade de produção e colagem de extensômetros, como principalmente sobre o diâmetro máximo da célula de carga, pois para a execução dos testes, esse valor não deverá ser superior a 26 mm. Desse modo, o dimensionamento da célula se torna:

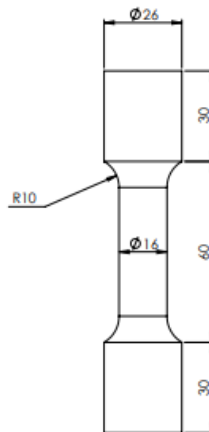
Tabela 2 - Parâmetros de projeto

Parâmetros de projeto	
Força máxima	10 kN
Diâmetro máximo	26 mm
Diâmetro mínimo	11,5 mm
Coefficiente de Segurança	3 ou maior

Fonte: Do autor (2023)

Posteriormente, com os parâmetros de projeto definidos, torna-se necessário realizar o modelamento 3D e detalhamento da célula de carga, utilizando a modelagem básica que já foi realizada. No apêndice A, está presente a folha de desenho com as informações e dimensões completas do detalhamento e modelagem da mesma, as Figuras 25 e 26, apresentam respectivamente, de forma resumida essas informações.

Figura 25: Detalhamento da célula de carga



Fonte: Do autor (2023)

Figura 26: Modelagem 3D da célula de carga



Fonte: Do autor (2023)

Como penúltima parte da etapa de projeto, tem-se a definição do material, esse foi selecionado por conveniência de aquisição, considerando as propriedades do mesmo, principalmente o módulo de elasticidade, para que a célula seja resistente e tenha uma deformação de possível leitura. O material selecionado foi o aço 1020, considerando, segundo Callister e Rethwisch (2018), o módulo de elasticidade deste é igual a 207 GPa.

Com esses dados e determinações, torna-se necessário calcular os fatores teóricos, eles estão apresentados na Tabela abaixo, que foram calculados com base nas equações 2, 6 e 8.

Tabela 3 - Cálculos teóricos da célula de carga

Cálculos teóricos		
Diâmetro menor projetado - dmp	16	mm
Limite de Escoamento do Aço 1020	300	MPa
Módulo de elasticidade do Aço 1020	207	GPa
Força aplicada	10000	N
Área da seção transversal	201,06	mm ²
Tensão aplicada	49,74	MPa
Coefficiente de segurança teórico	6,03	-
Deformação Calculada	0,00024	m

Fonte: Do autor (2023)

Desse modo, a deformação calculada da célula é:

$$\epsilon_{ct} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,24 \text{ mm}$$

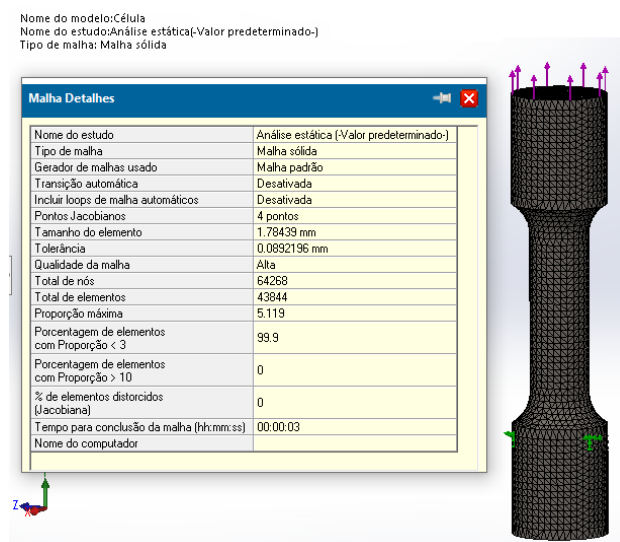
3.2.1 Simulação Computacional da Célula de Carga

Subsequentemente ao projeto teórico da célula, objetivando comparar os dados obtidos a partir do modelo teórico, empregou-se o software SolidWorks a fim de conduzir uma simulação das condições de aplicação a partir da aplicação da força de 10 kN. Essa simulação é para análise de elementos finitos da célula e verificação de convergência de resultados para maior precisão do estudo, sendo esta função do software validada pela International Association for the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community (NAFEMS).

O Método de Análise de elementos Finitos (FEA - Finite Element Analysis) é o estudo que consiste na reprodução virtual das condições de funcionamento do elemento, simulando a aplicação real e analisando as características sem a necessidade da fabricação de um protótipo, tornando o projeto mais ágil, assertivo e permitindo a otimização de processos (LEAL, 2015). O procedimento para realização desta simulação parte da prototipagem no CAD 3D do modelo geométrico, que já foi realizado e está representado nas Figuras 25 e 26.

Posteriormente realizou-se a geração da malha de elementos e determinação da aplicação das forças simulando a realidade, ou seja, a parte inferior fixa e a aplicação de 10 kN na parte superior, tracionando axialmente o corpo da peça. A Figura 27 mostra os dados da malha e as condições de submissão de carga.

Figura 27: Detalhes da malha e aplicação das cargas

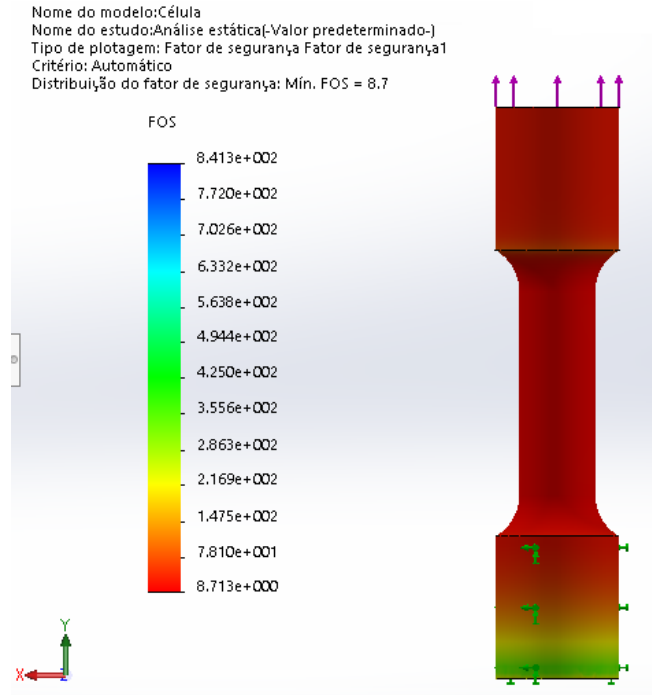


Fonte: Do autor (2023)

Com essas características já definidas, resta apenas realizar a execução do

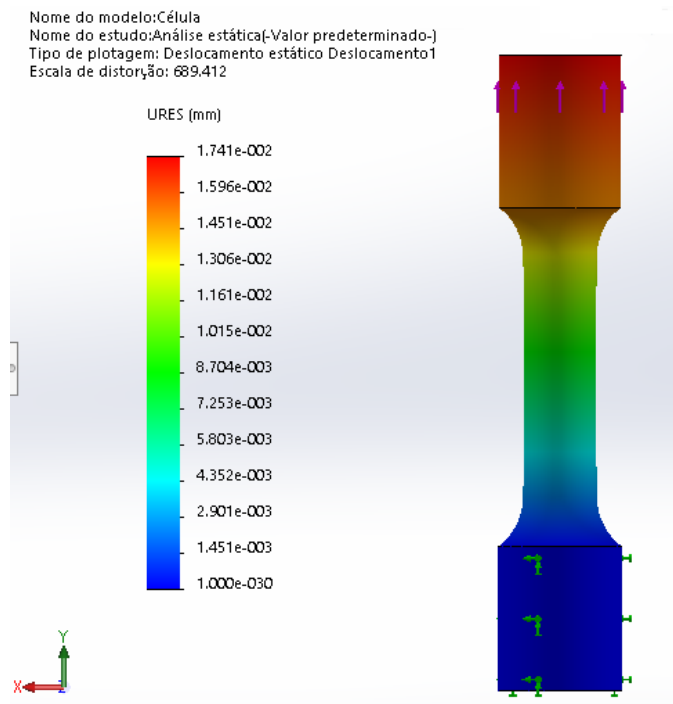
estudo, da simulação. Executando-a ela resulta em valores de coeficiente de segurança, deslocamento, tensão de Von Mises e deformação, que estão representadas, respectivamente nas Figuras 28, 29, 30 e 31, sendo a última a informação a ser comparada a deformação calculada da tabela 3.

Figura 28: Resultado - Fator de segurança



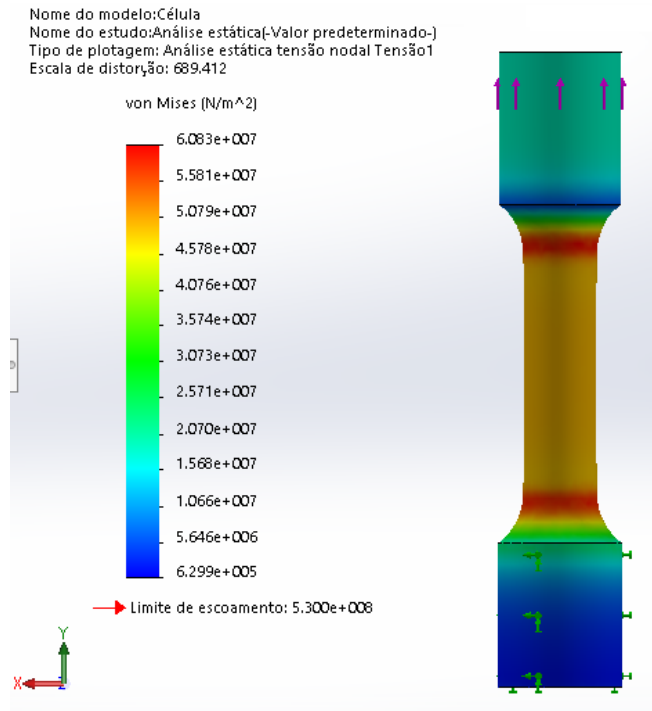
Fonte: Do autor (2023)

Figura 29: Resultado - Deslocamento estático



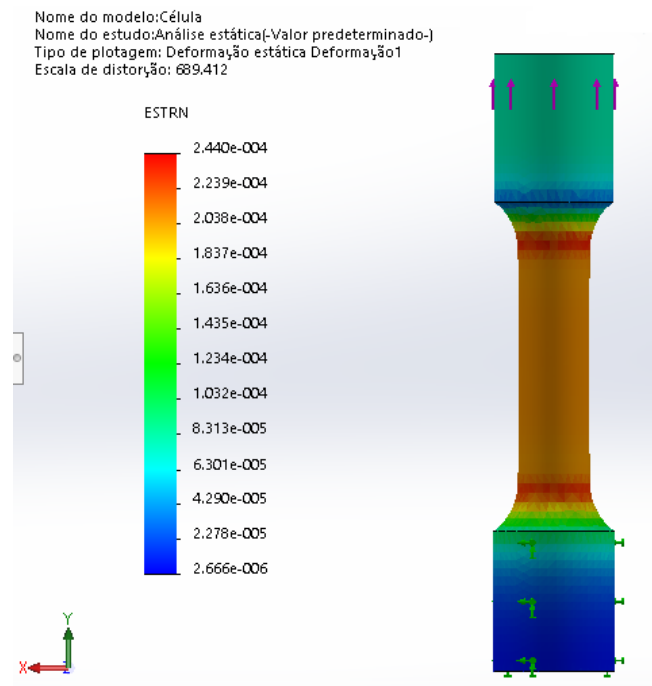
Fonte: Do autor (2023)

Figura 30: Resultado - Tensão de Von Mises



Fonte: Do autor (2023)

Figura 31: Resultado - Deformação estática



Fonte: Do autor (2023)

A simulação resultou, nos seus valores máximos, os seguintes dados:

$$\text{Coeficiente de segurança} = 8,7$$

$$\text{Deslocamento estático} = 1,741 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$\text{Tensão de Von Mises} = 6,083 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

$$\text{Deformação estática} = 2,44 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,24 \text{ mm}$$

Desse modo, tem-se que a deformação estática calculada e simulada são as mesmas, sendo considerada satisfatória para a continuação do projeto. Portanto, esta etapa é dada como concluída, tendo como resultado a definição dos parâmetros de projeto, o detalhamento e modelamento da célula de carga, bem como uma simulação do funcionamento da mesma nas características de projeto, enquadrando o coeficiente de segurança a um valor superior ao definido.

3.3 Fabricação

A fabricação da célula de carga foi produzida por usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado), utilizando um torno ROMI, modelo GL 240, representado na Figura 32, escolhido por conveniência e facilidade de acesso. Para iniciar esta etapa e para a fabricação em um torno CNC, torna-se necessário programar um código para que a máquina leia e compreenda o que fazer, sendo este código programável da usinagem desenvolvido e testado no Software de Simulação CNC (SSCNC), elaborado pela Nanjing Swan Software Technology Company, antes da execução, para validação do mesmo e buscando melhorias.

Figura 32: Torno ROMI - Modelo GL 240



Fonte: Do autor (2023)

O código programado, já pronto, está descrito no apêndice B, porém houve vários desafios a serem superados até o mesmo estar concluído. Inicialmente o

Posteriormente, foram definidas as características de usinagem determinadas pelo material e com base na norma NBR ISO 6892-1, para a definição do acabamento e das velocidades de corte. Tendo isso definido, o código pronto e testado tornou-se possível realizar a usinagem da célula, como estava sendo a primeira experiência de usinagem em um torno CNC, realizou-se primeiro a usinagem em nylon, para verificar o funcionamento real do código durante a usinagem, a Figura 35 mostra o resultado da usinagem em nylon.

Figura 35: Usinagem em nylon



Fonte: Do autor (2023)

A usinagem em nylon demonstrou a necessidade de realizar um furo de centro no material bruto, e colocar o contraponto para que evite as vibrações ocorridas na ponta mais externa do material bruto, garantindo assim, a precisão de corte e que a geometria esperada se mantenha. Partindo disso, foi selecionado uma barra do material bruto (Figura 36), que tivesse diâmetro superior ao do projeto apresentado na Figura 25, tendo essa um diâmetro de 32 milímetros e um comprimento de 450 milímetros.

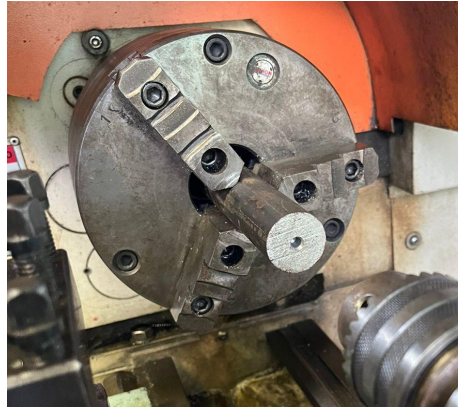
Figura 36: Barra de material bruto de 32 milímetros



Fonte: Do autor (2023)

Após selecionada a barra de material bruto, realizou-se o furo de centro, representado na Figura 37, para qual utilizou-se um torno convencional Nardini Mascote modelo MS 205, escolhido por facilidade de acesso e familiaridade.

Figura 37: Furo de centro



Fonte: Do autor (2023)

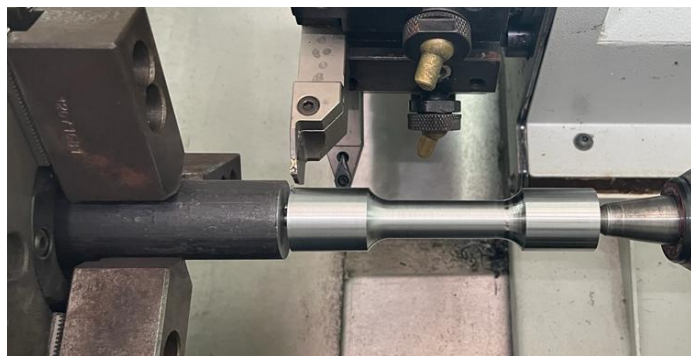
Com o material bruto e o código preparados, torna-se possível posicionar na máquina, realizar o zeramento das ferramentas e executar o programa de usinagem. Na Figura 38, é possível ver o material bruto posicionado com as ferramentas zeradas, o contraponto colocado, estando tudo preparado para realização da usinagem e a Figura 39 mostra a peça já usinada, faltando apenas o corte final da mesma.

Figura 38: Material bruto posicionado e pronto para usinagem



Fonte: Do autor (2023)

Figura 39: Peça usinada



Fonte: Do autor (2023)

Após, procedeu-se à etapa de lixamento da peça, com o intuito de remover as asperezas superficiais e garantir uma aderência superior dos extensômetros. Para assegurar um lixamento eficaz, adotou-se um método que variou a granulometria das lixas, começando com as mais grossas e progredindo para as mais finas. Utilizaram-se lixas com granulometrias de 320, 600, 1500 e 2000. A Figura 40 mostra a peça usinada e lixada, estando pronta para iniciar o processo de colagem.

Figura 40: Peça pronta para a colagem



Fonte: Do autor (2023)

Após a usinagem e o lixamento, realizou-se a conferência das medidas com o auxílio de um paquímetro para verificação das tolerâncias geométricas e determinação dos cálculos da área de secção transversal real. O diâmetro menor ficou com 15,6 milímetros e o maior, 25,6 milímetros, a Tabela 4 mostra os cálculos da área, coeficiente de segurança, tensão aplicada e deformação esperada real.

Tabela 4 - Cálculos reais da área, tensão, coeficiente de segurança e deformação

Cálculos Reais		
Diâmetro menor real - dmr	15,6	mm
Limite de Escoamento do Aço 1020	300	MPa
Módulo de elasticidade do Aço 1020	207	GPa
Força aplicada	10000	N
Área da seção transversal	191,13	mm ²
Tensão aplicada	52,32	MPa
Coeficiente de segurança real	5,73	-
Deformação Calculada	0,00025	m

Fonte: Do autor (2023)

3.3.1 Colagem dos Extensômetros

A última parte do processo de fabricação da célula de carga é o processo de colagem dos extensômetros que está representado na Figura 13, entretanto, antes de realizar a colagem em si, torna-se necessário realizar a limpeza da célula com uma série de fluidos especiais, os quais estão representados na Figura 41, sendo eles o álcool isopropílico, remover, condicionador e neutralizador, representados respectivamente da esquerda para a direita.

Figura 41: Fluidos de limpeza para colagem



Fonte: Do autor (2023)

O procedimento teve início com a completa limpeza da peça usando álcool isopropílico para eliminar quaisquer vestígios de gordura e resíduos provenientes do processo de lixamento. Em seguida, utilizou-se um removedor com o propósito de eliminar qualquer oleosidade incrustada na superfície da peça. Após essa etapa, aplicou-se um condicionador para remover pequenas oxidações superficiais, preparando a superfície para uma aderência mais eficaz do extensômetro. Por fim, procedeu-se à aplicação de um neutralizador para contrabalançar a acidez

introduzida pelo condicionador.

Após a conclusão desses procedimentos, a peça encontra-se pronta para a colagem dos extensômetros. A Figura 42 ilustra a peça e os dois extensômetros do modelo BF350, antes da colagem dos mesmos.

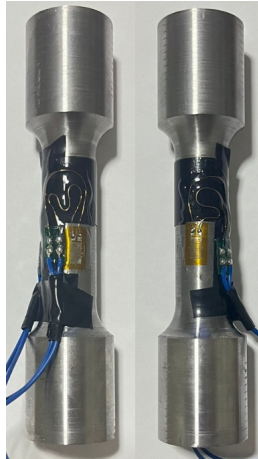
Figura 42: Corpo da célula e dois os extensômetros antes da colagem



Fonte: Do autor (2023)

A colagem foi executada aplicando cola instantânea na superfície, e com o auxílio de uma pinça, o extensômetro é posicionado na superfície e pressionado com o dedo até que esteja completamente fixado. Em seguida, é aplicada uma camada de silicone sobre o extensômetro para protegê-lo. A Figura 43 exhibe, de maneira separada, os dois extensômetros colados na célula de carga, uma vez que estão posicionados em lados opostos. A célula de carga está pronta para a fase de testes.

Figura 43: Célula de carga pronta



Fonte: Do autor (2023)

Por fim, fez-se necessária a verificação de passagem de corrente pelos fios do extensômetros, com auxílio de um multímetro, visando desse modo, garantir que o mesmo não esteja danificado.

A determinação do custo da célula deu-se com base nos materiais utilizados, desconsiderando valores relativos ao tempo de fabricação, bem como valores de custo de maquinário e energia, por exemplo. Desse modo, a Tabela 5 demonstra o custo considerando a parte de material bruto e os extensômetros utilizados, determinando, com a soma de ambos, o custo total de fabricação da célula se torna R\$80,48.

Tabela 5 - Custo de fabricação da célula de carga

Custos da Célula de carga			
Descrição	Custo	Unidade	
Barra redonda de aço - 1 ½" - 1020 - 6 metros (ArcelorMittal)	R\$ 382,45	Reais	
Barra redonda de aço - 1 ½" - 1020 - 0,45 metros	R\$ 28,68	Reais	
Número de extensômetros	2	Unidades	
Custo por extensômetro	R\$ 25,90	Reais	
Custo total da fabricação da célula de carga	R\$ 80,48	Reais	

Fonte: Do autor (2023)

3.4 Aquisição de Uma Célula de Carga Comercial

Esta etapa iniciou-se com uma larga pesquisa nos fabricantes brasileiros e internacionais de células de carga, analisando as características técnicas, tempo de entrega, modelos das células e custo de aquisição. Como base das características

técnicas considerou-se que tivesse a capacidade igual às células projetadas, com o objetivo de realizar uma comparação direta entre ambas as células a fim de comparar os resultados obtidos e os erros encontrados em cada medição, quando aplicadas as mesmas forças em ambas as células.

Após a pesquisa, foram selecionadas várias células que poderiam ser utilizadas nas mesmas condições e aplicação, bem como estivessem dentro das características de projeto, que fosse de fácil aquisição e entrega relativamente rápida. Porém, a parcela determinante na escolha da célula comercial foi o custo geral desta e que inclui-se um indicador do valor medido. Após solicitar e analisar vários orçamentos, a célula de carga selecionada foi uma célula do tipo S, com capacidade máxima de medição de 1000 Kg e que realiza medições de tração e/ou compressão, a Figura 44 demonstra o modelo da célula de carga selecionada.

Com o modelo selecionado, foram considerados os orçamentos, selecionando a célula com o menor custo e entrega ágil, sendo selecionada a célula referente ao orçamento presente no Anexo A, sendo que neste, já está incluso o indicador de resultado de medição. A Figura 44 mostra a célula já em posse e abaixo, o custo da mesma, desconsiderando o custo do indicador, já que o mesmo não será analisado, sendo esse custo de R\$665,00.

Figura 44 : Célula de carga adquirida



Fonte: Do autor (2023)

Como subparte desta etapa, necessitou-se adquirir dois parafusos para fixação da célula na máquina para realização dos testes, foram comprados dois parafusos sextavados MA 12 X 100, classe 8.8 de aço polido e com passo de rosca de 1,75 mm, seu custo foi de R\$ 3,02 por unidade, resultando em R\$ 6,04 ambos.

Para utilização e adequação a aplicação dos testes, fez-se necessário cortar a cabeça do parafuso com o objetivo de fixar nas garras da máquina, a Figura 45, mostra o conjunto completo da célula de carga e dos parafusos acoplados e prontos

para a realização dos ensaios.

Figura 45: Conjunto da célula de carga comercial



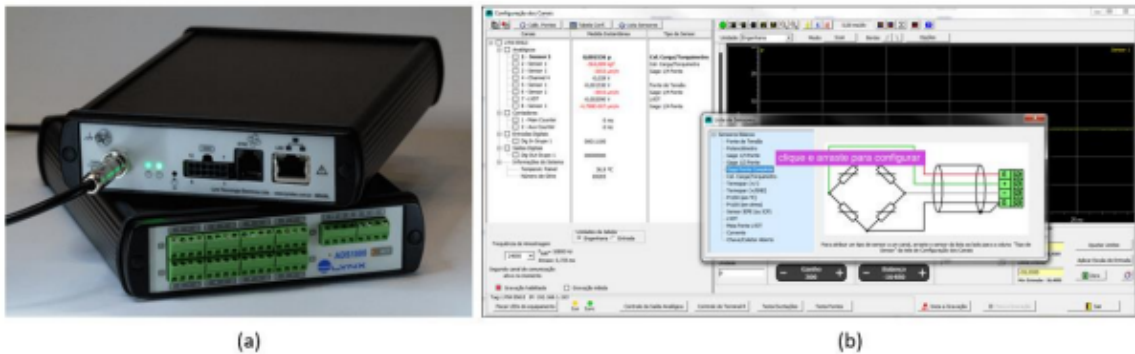
Fonte: Do autor (2023)

Desse modo, o valor total de aquisição do conjunto da célula de carga foi de R\$671,04.

3.5 Configuração do sistema e calibração do sensor

Inicialmente, a fim de mensurar os dados exportados pelos extensômetros, é essencial utilizar um dispositivo capaz de amplificar e registrar as variações. Dessa forma, será empregado um sistema de aquisição de dados com o objetivo de coletar e filtrar as informações provenientes dos *strain gauges*. O equipamento selecionado, por comodidade e facilidade de acesso, para essa finalidade específica será o ADS 1800, desenvolvido pela *Lynx*, ilustrado na Figura 46. Este equipamento possui recursos que possibilitam uma taxa de amostragem de 24000 dados por segundo, oito canais de medição e uma resolução de 24 bits.

Figura 46: Sistema e software Lynx: (a) ADS 1800; (b) Interface do AqDados



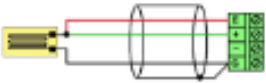
Fonte: LYNX Tecnologia (s.d.)

Este equipamento foi utilizado como instrumento de leitura de dados, portanto tornou-se necessário realizar a configuração do sistema aquisitor de dados, onde tal configuração segue a seguinte ordem:

1. Ligações elétricas e a configuração da ponte
2. Determinação do tipo de sensor
3. Configuração do sensor
4. Verificação do sensor
5. Posicionamento na máquina de ensaios
6. Zeramento
7. Identificação dos valores residuais

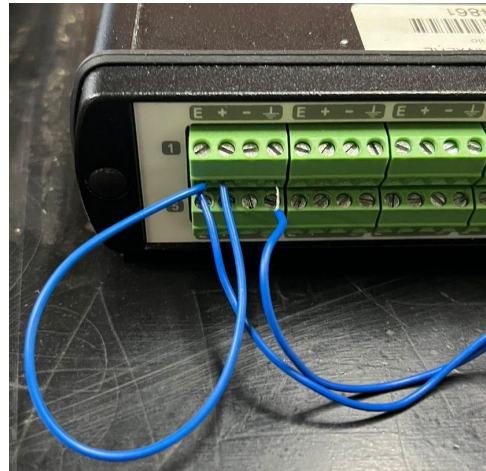
Antes de proceder com as conexões elétricas, é essencial determinar o tipo de configuração da ponte de Wheatstone a ser utilizada. Neste caso, optou-se por empregar o formato de $\frac{1}{4}$ de ponte, conforme ilustrado na Figura 9. A Figura 47 apresenta o esquema de conexão dos fios recomendado pelo fabricante do sistema de aquisição de dados para a configuração de $\frac{1}{4}$ de ponte. A Figura 48 exhibe a conexão dos fios de um extensômetro ao sistema, seguindo o mesmo padrão, sendo que o outro extensômetro foi conectado da mesma forma à entrada adjacente.

Figura 47: Ligação recomendada para $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone

QUARTO DE PONTE LIGAÇÃO A 3 FIOS (STRAIN GAGE)		$\frac{1}{4}$ Ponte	DC 2V para 120 Ω 5V para 350 Ω (MAX. 45mA)	- 33,3mV ... + 33,3mV a - 3,33mV ... + 3,33mV
--	---	---------------------	---	---

Fonte: LYNX Tecnologia (s.d.)

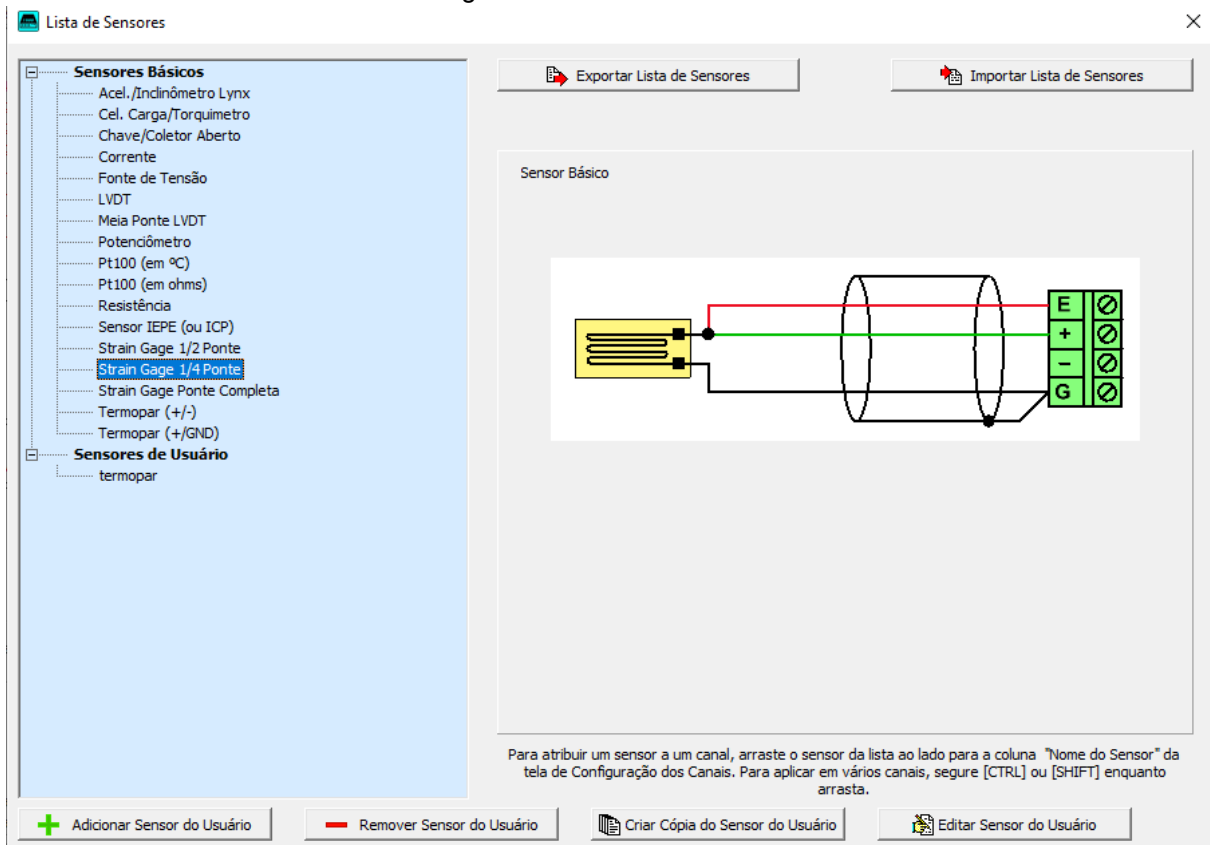
Figura 48: Ligações elétricas no sistema



Fonte: Do autor (2023)

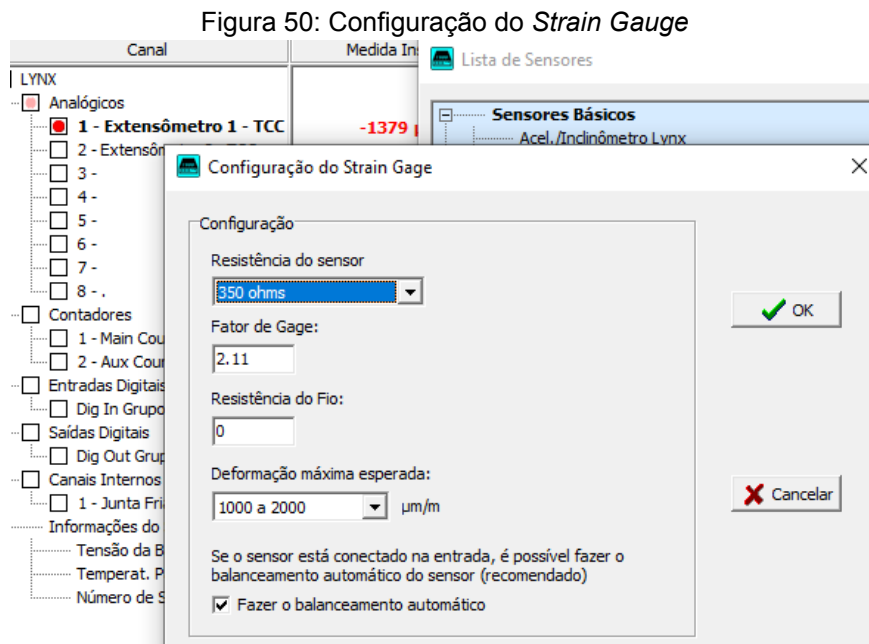
Com os fios devidamente conectados, é viável realizar a configuração do tipo de sensor no software do sistema de aquisição de dados, que oferece uma lista de opções de sensores disponíveis, como ilustrado na Figura 49. Na seleção, optou-se pelo *strain gauge* na configuração de $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone, que corresponde ao sensor utilizado.

Figura 49: Lista de sensores



Fonte: Do autor (2023)

Posteriormente a isso, é definida as configurações específicas relativas ao sensor, definindo a resistência do sensor, o fator de Gauge, a resistência do fio e uma aproximação da deformação máxima esperada, os quais estão representados na Figura 50. Com o sensor configurado resta somente colocar nos canais os quais foram conectados os cabos elétricos, neste caso os canais 1 e 2.



Fonte: Do autor (2023)

A Figura 51 ilustra o sistema completamente instalado, com as ligações elétricas conectadas, os sensores definidos e configurados dentro do software, estando desse modo a célula de carga pronta para a realização das próximas etapas.

Figura 51: Sistema de aquisição completamente montado



Fonte: Do autor (2023)

A próxima etapa é a verificação da colagem correta do extensômetro como demonstrado na Figura 15, com o teste da borracha realizado nos dois extensômetros colados na célula de carga, sendo demonstrado em um deles na Figura 52. Para confirmar a correta colagem dos extensômetros, durante a aplicação da carga com a borracha em cima do mesmo, deve-se obter uma deformação máxima de $50 \mu m/m$, a Figura 53 mostra os resultados desse teste.

Figura 52: Teste da borracha



Fonte: Do autor (2023)

Figura 53: Resultados do teste da borracha

Medição	Valor	Configuração
1 - Célula de Carga - TC	1,765 $\mu m/m$	Strain Gage 1/4 Ponte
2 - Extensômetro 2 - TCC	2,315 $\mu m/m$	Strain Gage 1/4 Ponte

Fonte: Do autor (2023)

Em seguida, procedeu-se ao posicionamento da célula de carga na *Computer Controlled Universal Testing Machine* ou máquina universal de ensaios, modelo WDW-100 E, com uma capacidade de 100 kN, conforme representado na Figura 54. A célula de carga foi cuidadosamente colocada e fixada nas garras da máquina, garantindo que estivesse bem segura, como mostrado na Figura 55.

Figura 54: Computer Controlled Universal Testing Machine - Modelo WDW - 100 E



Fonte: Do autor (2023)

Figura 55: Posicionamento na máquina universal de ensaios



Fonte: Do autor (2023)

Após a colocação da célula de carga na máquina, procedeu-se ao processo de zeramento dos valores dos extensômetros. Essa operação foi realizada através do software fornecido pela Lynx, que automaticamente reduziu os valores medidos quase a zero, efetuando assim a calibração manual da célula de carga. No entanto, é importante observar que após a conclusão desse processo, ainda resta um valor

residual de variação na leitura dos extensômetros, o qual deve ser considerado na fase de testes e medições subsequentes, na Figura 56 são ilustrados os valores residuais antes da aplicação das cargas.

Figura 56: Valores residuais após calibração

Canal	Medida Instantânea	Nome do Sensor
LYNX		
Analógicos		
1 - Extensômetro 1 - TCC	-10,901 $\mu\text{m/m}$	Strain Gage 1/4 Ponte
2 - Extensômetro 2 - TCC	48,123 $\mu\text{m/m}$	Strain Gage 1/4 Ponte

Fonte: Do autor (2023)

3.6 Testes e medições

Nesta etapa, os testes foram conduzidos dividindo a capacidade nominal de ambas as células de carga em 25 partes iguais, ou seja, dividindo 10 000 N em 25 partes iguais de 400 N. Para cada uma dessas partes iguais, as mesmas aplicações de carga foram realizadas, observando a relação entre a força aplicada e a força medida por ambas as células. No processo de aplicação de força, começou-se com o pré-carregamento usando o valor máximo da carga que seria aplicada, ou seja, 10 kN, para garantir o aperto e evitar o escorregamento nas garras da máquina. Em seguida, a aplicação da carga foi realizada de maneira lenta, gradual e crescente, iniciando em 400 N até 10000 N, registrando-se o valor aplicado pela máquina universal de ensaios e o valor lido por cada célula de carga.

Primeiramente foi realizado esse procedimento de teste na célula de carga projetada, pois a mesma já estava posicionada na máquina da etapa anterior, como mostram as Figuras 51 e 55, com o sistema montado e a célula posicionada, respectivamente. A Tabela 6 apresenta os dados utilizados como base para os cálculos e desenvolvimento dos resultados dos testes da célula de carga projetada.

Tabela 6 - Dados base para cálculo

Dados		
Diâmetro Célula	15,6	mm
E - Módulo de Elasticidade (1020)	207000000000	Pa
Área da secção da célula	191,13	mm ²
% da Força Máxima	4,00%	-
Força por Medição	400	N
dr1 - Def. residual 1	-0,000010901	mm
dr2- Def. residual 2	0,000048123	mm

Fonte: Do autor (2023)

Após a conclusão deste teste, o conjunto da célula de carga adquirida foi posicionado e fixado na máquina de ensaios, conforme representado na Figura 57, e realizado o zeramento desta, com a função disponível no indicador. Com este procedimento concluído, tornou-se possível realizar o mesmo teste executado anteriormente para a outra célula de carga, aplicando as mesmas cargas para ambas as células.

Figura 57: Posicionamento do conjunto da célula de carga adquirida



Fonte: Do autor (2023)

Com os testes concluídos e os valores registrados, será possível organizar os dados em tabelas, permitindo, assim, a comparação entre eles e entre as células de carga. Na etapa seguinte, os resultados do projeto serão definidos com base nessa análise comparativa.

3.7 Análise dos resultados - Comparação

Para a realização da análise e síntese de dados, primeiramente foi realizada a preparação dos dados para que estivessem prontos para a análise, desta forma envolvendo a limpeza dos dados, codificação de variáveis, verificação de valores ausentes e transformação dos dados em formatos adequados, sendo feita a análise descritiva dos dados, com objetivo de identificar as medidas de tendência central, como a média, sendo realizada através do Excel em formato de tabelas.

As Tabelas 7 e 8 representam, respectivamente, os dados obtidos dos testes de medição realizados anteriormente na célula de carga projetada e na adquirida, apresentando os valores de força aplicados e os valores de deformação lidos pelos dois extensômetros colados, bem como a deformação média (calculada pela equação 12), a força medida, calculada utilizando a equação 8, na célula projetada, e um erro percentual determinado a equação 13, calculado para ambas as células.

$$dM = \frac{(dm\ 1 - dr\ 1) + (dm\ 2 - dr\ 2)}{2} \quad (12)$$

$$Er = \frac{Fm}{Fa} \cdot 100 \quad (13)$$

Tabela 7 - Teste de medição da célula de carga projetada

Célula de Carga Projetada						
Medição	Fa [N]	dm 1 [mm]	dm 2 [mm]	dM [mm]	Fm [N]	Er [%]
1	400	-0,000002811	0,000060297	0,000010132	400,87	0,22%
2	800	0,000009974	0,000070362	0,000021557	852,90	6,61%
3	1200	0,000021206	0,000080004	0,000031994	1265,84	5,49%
4	1600	0,000033789	0,000089412	0,000042990	1700,87	6,30%
5	2000	0,000045454	0,000099682	0,000053957	2134,80	6,74%
6	2400	0,000054787	0,000111348	0,000064457	2550,21	6,26%
7	2800	0,000065576	0,000122945	0,000075650	2993,06	6,90%
8	3200	0,000075742	0,000134152	0,000086336	3415,87	6,75%
9	3600	0,000086694	0,000144378	0,000096925	3834,82	6,52%
10	4000	0,000100279	0,000152934	0,000107996	4272,82	6,82%
11	4400	0,000109694	0,000163039	0,000117756	4658,98	5,89%
12	4800	0,000117760	0,000174706	0,000127622	5049,34	5,19%
13	5200	0,000125258	0,000186674	0,000137355	5434,43	4,51%
14	5600	0,000132253	0,000198902	0,000146967	5814,71	3,83%
15	6000	0,000138995	0,000211553	0,000156663	6198,35	3,31%
16	6400	0,000145743	0,000224355	0,000166438	6585,09	2,89%
17	6800	0,000151876	0,000237392	0,000176023	6964,32	2,42%
18	7200	0,000158230	0,000250632	0,000185820	7351,94	2,11%
19	7600	0,000164594	0,000263694	0,000195533	7736,23	1,79%
20	8000	0,000170852	0,000276960	0,000205295	8122,46	1,53%
21	8400	0,000176942	0,000290232	0,000214976	8505,49	1,26%
22	8800	0,000183217	0,000303176	0,000224586	8885,69	0,97%
23	9200	0,000189577	0,000316290	0,000234323	9270,93	0,77%
24	9600	0,000196110	0,000329263	0,000244076	9656,81	0,59%
25	10000	0,000202740	0,000342180	0,000253849	10043,50	0,43%

Fonte: Do autor (2023)

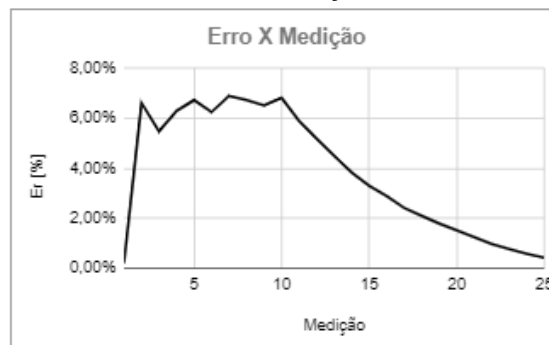
Tabela 8 - Teste de medição da célula de carga adquirida

Célula de Carga Adquirida			
Medição	Fa [N]	Fm [N]	Er [%]
1	400	395,3	1,19%
2	800	798,3	0,22%
3	1200	1201,3	0,10%
4	1600	1604,3	0,27%
5	2000	2007,3	0,36%
6	2400	2410,3	0,43%
7	2800	2813,3	0,47%
8	3200	3216,3	0,51%
9	3600	3619,3	0,53%
10	4000	4022,3	0,56%
11	4400	4417,5	0,40%
12	4800	4820,5	0,43%
13	5200	5223,5	0,45%
14	5600	5626,5	0,47%
15	6000	6021,8	0,36%
16	6400	6424,8	0,39%
17	6800	6827,8	0,41%
18	7200	7230,8	0,43%
19	7600	7626,0	0,34%
20	8000	7982,5	0,22%
21	8400	8370,0	0,36%
22	8800	8835,0	0,40%
23	9200	9222,5	0,24%
24	9600	9610,0	0,10%
25	10000	9997,5	0,02%

Fonte: Do autor (2023)

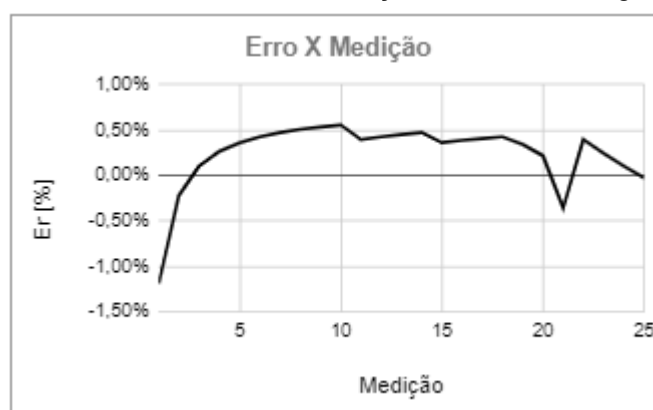
Com os dados tabelados torna-se fácil a comparação principalmente entre o valor medido e o valor aplicado, conseguindo, desse modo, calcular o erro de cada medição. As Figuras 58 e 59, representam os gráficos dos erros relativos a cada medição das células de carga projetada e adquirida, respectivamente, mostrando a variação de uma leitura a outra.

Figura 58: Gráfico do erro de cada medição da célula de carga projetada



Fonte: Do autor (2023)

Figura 59: Gráfico do erro de cada medição da célula de carga comercial



Fonte: Do autor (2023)

Posteriormente, com esses dados quantificados, permite-se realizar uma análise estatística das células, determinando a média dos erros relativos das medições, o desvio padrão desses erros, o desvio padrão da média e a variância da amostra de dados. As Tabelas 9 e 10 apresentam essa análise estatística das células projetada e comercial, respectivamente, desenvolvida com base nas equações 9, 10 e 11.

Tabela 9 - Análise estatística da célula projetada

Análise estatística - Célula Projetada	
Média dos Erros - M _{Er}	3,8441%
Desvio padrão - s	2,4695%

Fonte: Do autor (2023)

Tabela 10 - Análise estatística da célula comercial

Análise estatística - Célula Adquirida	
Média dos Erros - M _{Er}	0,3865%
Desvio padrão - s	0,2158%

Fonte: Do autor (2023)

Com os dados em mão pode-se partir para o processo de análise quantitativa, qualitativa e uma comparação direta dos mesmos, bem como definir os resultados obtidos com a conclusão do projeto, verificando se foram cumpridos os objetivos geral e específicos, e determinar os resultados, definindo futuras melhorias e possíveis alterações do projeto.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos foram organizados em tabelas, com o objetivo de facilitar a leitura, compreensão e tratamento dos mesmos, bem como possibilitar as análises, determinação dos resultados do projeto e buscar possíveis melhorias do mesmo.

4.1 Projeto e desenvolvimento da célula de carga

A parte de projeto e desenvolvimento da célula de carga ocorreu de forma fluida, com exceção da etapa de fabricação, onde foram encontradas algumas dificuldades, sendo estas principalmente pela falta de familiaridade e experiência quanto aos processos de usinagem CNC, mas com pesquisa e discussões com profissionais da área essas dificuldades foram superadas e o projeto prosseguiu como planejado.

Os materiais utilizados foram escolhidos considerando principalmente a facilidade de acesso, mas sem desconsiderar suas características e importância na aplicação do presente estudo. Analisa-se estes fatores como escolhidos corretamente, pois os mesmos atenderam a expectativa, permitiram o desenvolvimento do início ao fim da célula gerando resultados significativos.

Outro ponto interessante e que deve ser ressaltado é o aprofundamento quanto aos mecanismos, métodos e áreas da engenharia mecânica, onde o projeto da mesma permitiu gerar maior familiaridade com os softwares de auxílio da engenharia, máquinas de fabricação e testes, bem como servir de exemplo do dia a dia do engenheiro.

4.2 Testes e medições

Os testes foram realizados de forma igual para as duas células de carga com o objetivo de verificar a precisão do transdutor, bem como possibilitar a realização da comparação entre as células. Os resultados obtidos desses testes, relativos a fabricação de uma célula de carga para posterior comparação entre essa e uma célula comercial estão representados nas Tabelas 7 e 8, com os resultados dos testes de medição de cada célula.

Ambas as células apresentaram bom desempenho, porém a célula comercial apresentou um erro relativo percentual menor que a fabricada, tendo os valores entre -1,19% e 0,56% relativo a variação entre o valor aplicado e o valor medido, enquanto a célula de carga fabricada, teve esta variação entre 0,22% e 6,90%, ou seja, uma variação consideravelmente maior, quando comparadas diretamente.

Desse modo, a mesma se mostrou mais confiável quando comparada a fabricada, considerando os valores de medição isoladamente, ou seja, a mesma apresentou melhor precisão de leitura de forma geral.

4.3 Comparação entre as células de carga

Por fim, para efetuar a comparação entre as duas células de carga, é necessário realizar uma análise estatística dos dados das Tabelas 7 e 8. Como resultado dessa análise, foram geradas as Tabelas 9 e 10, que apresentam essa análise. Os principais resultados dessa análise estão demonstrados abaixo, unindo as Tabelas 9 e 10, na Tabela 11.

Tabela 11 - Comparação das análises estatísticas

Análise estatística - Comparação		
	Projetada	Comercial
Média dos Erros - MEr	3,8441%	0,3865%
Desvio padrão - s	2,4695%	0,2158%

Fonte: Do autor (2023)

Observando os dados da Tabela 11, conclui-se que a célula de carga comercial possui maior precisão de leitura e uma média de erros consideravelmente inferior, quase 10 vezes menor do que a célula projetada, a mesma também possui valores abaixo de desvio padrão, desvio padrão da média e variância, determinando, desse modo, que a célula de carga comercial mostrou-se mais precisa e confiável quanto ao valor da medição.

As variações encontradas na célula de carga projetada com valores acima da comercial já eram esperadas, principalmente pelo desenvolvimento industrial e tecnológico buscado em produtos industriais. As variações podem ser causadas por diversos fatores, como: erro de leitura dos extensômetros, erro na colagem dos extensômetros e incerteza com relação ao módulo de elasticidade do material

utilizado.

Por fim, quando realizada a comparação dos custos de fabricação e custo de aquisição, evidencia-se, também, grande variação entre as células. O conjunto célula de carga adquirida, teve custo de compra de R\$671,04 (seiscentos e setenta e um reais e quatro centavos), enquanto a célula de carga projetada, teve o custo de R\$80,48 (oitenta reais e quarenta e oito centavos). Desse modo, mesmo tendo sido considerados somente os custos dos materiais para a fabricação da célula, ela apresentou-se consideravelmente mais econômica, aproximadamente R\$590,00 (quinhentos e noventa reais), do que a comercial.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve por foco e objetivo a criação do projeto e desenvolvimento de uma célula de carga que são equipamentos que possuem diversas aplicações, tanto comerciais em balanças, quanto industriais, em silos, linhas de produção e máquinas. Com o objetivo de produzir a célula de carga para aplicações industriais sob a condição de medir esforços de tração axial. Considera-se que o trabalho cumpriu seu objetivo geral esperado, ou seja, a célula foi elaborada e validada para a medição de tração axial.

Este trabalho possibilita um aprofundamento e familiarização com os temas relativos à extensômetros, células de carga, ensaio de tração, metrologia e análises estatísticas, bem como gera experiência em projetos de engenharia, tanto quanto aos softwares comumente utilizados, quanto aos processos de fabricação, maquinários e desafios permitindo o desenvolvimento na área da mecânica e fornecer conhecimentos sobre os assuntos abordados.

Analisando os resultados do presente trabalho, determinados pelos testes e análises, conclui-se que a célula de carga adquirida é mais confiável para a realização de medições do que a célula de carga projetada e fabricada, com valor do erro máximo de cada célula, comercial e projetada, sendo 1,19% e 6,90%, respectivamente. Seguindo a mesma ordem, a média dos erros foi de 0,3865% e 3,8441%, o que confirma a melhor precisão da célula de carga comercial. Porém, quando levado em consideração o custo de aquisição, a célula projetada demonstrou-se mais de 7 vezes mais barata.

Desse modo, na escolha entre desenvolver uma célula de carga ou adquirir uma, é crucial analisar as necessidades do processo. Se a precisão na leitura for essencial, a compra de uma célula comercial é mais recomendável. No entanto, se a precisão não é crítica e o custo é um fator decisivo, então o desenvolvimento e projeto de uma célula de carga podem ser uma opção a considerar. A decisão deve ser baseada nas características específicas do processo e nos requisitos de precisão e orçamento.

É necessário ressaltar que este projeto desenvolveu-se baseado na literatura encontrada, informações de fabricantes e auxílio de professores, podendo o mesmo servir de base para futuros projetos com o mesmo tema, sendo sugerido, inclusive, a realização deste, com a utilização de mais extensômetros, ou com uma diferente

geometria e utilizar o sistema de aquisição de dados para ambas as células, objetivando gerar melhor precisão de medição mantendo o baixo custo, evitando interferências. Sugere-se também realizar mais testes em cada célula com as mesmas forças, objetivando verificar melhor a precisão e poder gerar um coeficiente de correlação para uma faixa de leitura referente, aumentando assim a confiabilidade de medição na célula de carga projetada.

Do mesmo modo, sugere-se fazer uma verificação do módulo de elasticidade do material utilizado para garantir o valor da propriedade para que a leitura seja ainda mais precisa, bem como adicionar ranhuras nos diâmetros maiores da célula objetivando gerar melhor fixação da célula nas garras da máquina evitando assim os escorregamento da célula e que pode gerar uma alteração no resultado da medição.

Por fim, conclui-se que os objetivos gerais e específicos do trabalho foram concluídos, já que a célula de carga foi projetada, fabricada e testada, verificando a sua precisão, e comparada a uma célula de carga comercial nas questões de precisão e custos.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. de. **Fundamentos da Metrologia Científica e Industrial**. São Paulo: Manole, 2008. 407 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. 13a ed. United States: 2013. 28 p. Disponível em: <https://www.galvanizeit.com/uploads/ASTM-E-8-yr-13.pdf>. Acesso em: 28 set. 2023.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A.. **Extensometria básica**. Ilha Solteira: Nepae, 2004. 46 p.

ARCELORMITTAL (Belo Horizonte). **Barra Redonda de Aço - 1 1/2" 1020 6M**. 2023. Disponível em: <https://loja.arcelormittal.com.br/barra-redonda-de-aco-1-1-2-1020-6-metros/p>. Acesso em: 01 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 376: Materiais Metálicos - Calibração de Instrumentos de medição de força utilizados para a verificação de máquinas de ensaios uniaxiais**. 2 ed. Rio de Janeiro:., 2012. 40 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1: Materiais Metálicos - Ensaio de Tração - Parte 1**. Rio de Janeiro: Abnt, 2013. 70 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8197: Materiais Metálicos - Calibração de Instrumentos de medição de força de uso geral**. Rio de Janeiro: ., 2021. 13 p. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br/visualizador-docviewer> Acesso em: 07 jun. 2023.

BARALDI, D.. **Projeto, construção e validação de uma célula de carga para medir torque**. 2022. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina, Xanxerê, 2022.

BARRETO JÚNIOR, E.. **Extensometria: manual prático**. São Paulo: Unesp, 2009. 79 p.

BEER, F. P.. **Mecânica dos Materiais**. Porto Alegre: Grupo A, 2021. E-book. ISBN 9786558040095. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786558040095/>. Acesso em: 24 fev. 2023.

BERTOLDI, E.. **Análise de Ensaio de Tração em Corpo de Prova de Aço SAE 1020**. In: IV Semana Internacional de Engenharia e Economia, 4., 2014, Horizontina: Fabor, 2014. v. 4, p. 35-45.

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G.. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2020. E-book. ISBN 9788521637325. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

COLTRO, W. K. T. et al. **Microssistemas de análises químicas: Introdução, tecnologias de fabricação, instrumentação e aplicações**. Química Nova, São Paulo, v. 30, n. 8, p. 1986-2000, 09 nov. 2007. Anual. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/cFLLP8Vr9Nv5sm7V6hTQGcF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 mar. 2023.

FIALHO, L. F. L.; CUNHA, V. C. da; HIRT, W. E. D.. **Simulação e Projeto de Células de Carga**. Porto Alegre: Delet, 2014. 38 p.

FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E.. **Theory and design of mechanical measurements**. 7. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2019.

FRAGOSO, L. F. S.; FERREIRA, N. G.; SILVA, W. C.. **Engenharia da qualidade na avaliação de método para periodicidade de calibração de instrumentos**. 2018. 110 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

GALLINA, R.. **Os extensômetros elétricos resistivos: evolução, aplicações e tendências**. 2003. 75 f. Monografia (Pós-Graduação Lato Sensu em Mecatrônica) - Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2003.

GUADAGNINI, P. H.; SARAIVA, F.; ELISABETH, V.. **Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força**. Lat. Am. J. Phys. Educ., v. 5, p. 753–762, 2011.

GRANTE (Florianópolis). Universidade Federal de Santa Catarina. **Apostila de Extensometria**. Florianópolis: Ufsc, 2004. 48 p.

HIBBELER, R. C.. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 637 p.

HOFFMANN, K.. An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges. **Darmstadt**: Hbm, 2012. 261 p.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008**. Duque de Caxias: INMETRO, 2012. 141 p. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/gum_final.pdf. Acesso em: 04 abr. 2023.

INSTITUTO DE FÍSICA DA UNICAMP. **Conceito sobre a ponte de Wheatstone**. Disponível em: http://www.ifi.unicamp.br/leb/f329-06/4_ponte_de_Wheatstone.pdf. Acesso em: 02 abr. 2023.

LEAL, C. E. F.. **Formulação do método dos elementos finitos para a análise elástica linear de placas delgadas**. 2015. 136 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6307/3/CM_COECI_2015_2_05.pdf. Acesso em: 15 maio 2023.

LOPES, M. M.. **Projeto de células de carga para aplicações industriais**. 2019. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019.

MAGALHÃES, R. R.. **Avaliação do uso da extensometria na análise de tensões residuais de soldagem**. 2008. 129 f. Monografia (Especialização) - Curso de Mecatrônica, Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia Escola Politécnica, Salvador, 2008.

MENDES, A.; ROSÁRIO, P. P. N.. **Metrologia e Incerteza de Medição** – Conceitos e aplicações. LTC, Sociedade Brasileira de Metrologia, 2019.

MINELA, S. N.. **Extensometria: Estudo e aplicação**. 2017. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/141515841.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2023.

MK, Controle e Instrumentação LTDA. **CÉLULA DE CARGA CSL ZL**. 2023. Disponível em: <https://mkcontrole.com.br/produto/celula-de-carga-csl-zl/>. Acesso em: 15 out. 2023.

OMEGA ENGINEERING (Brasil). **Como Avaliar e Instalar uma Célula de Carga**. São Paulo: Omega, 2015. 4 p. Disponível em: <https://br.omega.com/artigos-tecnicos/pdfs/Como-Avaliar-Instalar-C%C3%A9lula-Car-ga.pdf>. Acesso em: 20 out. 2023.

PARAFUSO FÁCIL (Jaraguá do Sul). **Parafuso Sextavado MA 12 X 100 Classe 8.8 Aço Polido**. 2023. Disponível em: <https://www.parafusofacil.com.br/ProdutosDetalhes.php?Nome=parafuso-sextavado-ma-12-x-100-classe-8.8-aco-polido&Codigo=1097305>. Acesso em: 18 out. 2023.

PAULINO, H. L.. **Apostila curso “Extensometria”**, Campinas: UNICAMP, 2007, 73p.

PINHEIRO, A. C. da F. B.; CRIVELARO, M.. **Resistência dos Materiais**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2021. E-book. ISBN 9788521637783. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637783/>. Acesso em: 30 nov. 2023.

RIBEIRO, M. A.. **Instrumentação**. 9. ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 2002. 360 p.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M.. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 3. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino A Distância da Ufsc, 2001. 121 p.

SILVA, J. B. L. P. e.. **Desenvolvimento de sistema para monitoramento de estruturas com utilização da plataforma arduino**. 2018. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Programa de Pós-Graduação, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018. Disponível em: http://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/bitstream/handle/123456789/15105/ceatec_ppgsiu_me_Joao_BL. Acesso em: 01 abr. 2023.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B.. **Sensores Industriais: fundamentos e aplicações**. 4. ed. Fortaleza: Erica, 2011. 216 p.

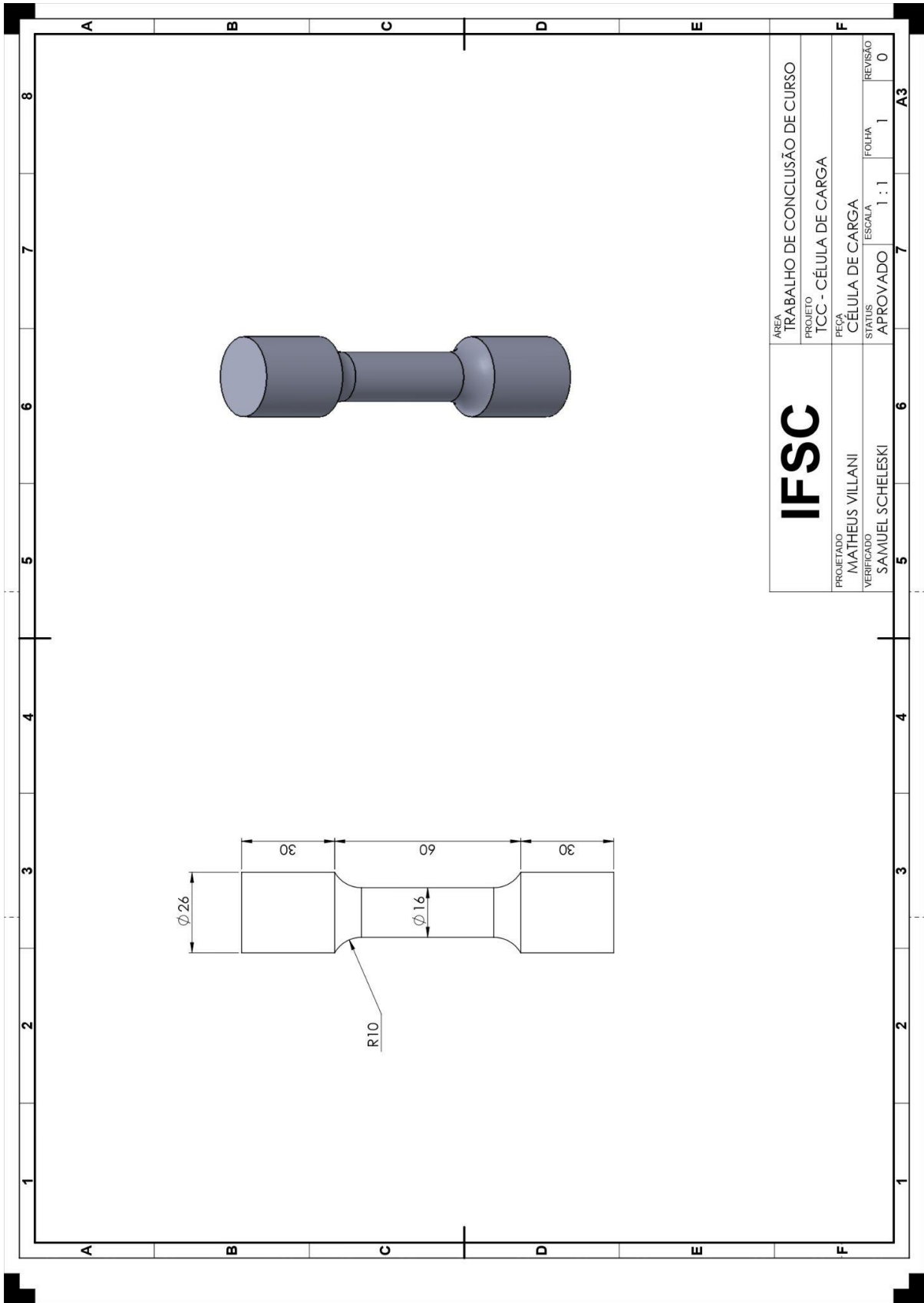
UGURAL, A. C.. **Mecânica dos Materiais**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2009. E-book. ISBN 978-85-216-2485-1. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2485-1/>. Acesso em: 27 mar. 2023.

VIM. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados - VIM 2012**. 1ª. ed. - Rio de Janeiro: Ed. INMETRO, 2012.

VOELZ, A. A.. **Estudo sobre a utilização de extensômetros elétricos para a análise experimental de estruturas de concreto armado**. 2019. 121 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unisc.br/jspui/bitstream/11624/2514/1/Arthur%20Augusto%20Voelz.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2023.

WEBER, A. L.. **Metrologia e Instrumentação**. 2008. 15 p. Trabalho acadêmico. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2008. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/arquivos%20H%E9lio/Strain_gauge%20e%20xtensometria.pdf. Acesso em: 03 abr. 2023.

APÊNDICE A – Folha de desenho - Detalhamento e Modelamento 3D



IFSC	ÁREA	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO		
	PROJETO	TCC - CÉLULA DE CARGA		
PROJETADO	MATHEUS VILLANI	PEÇA	CÉLULA DE CARGA	
VERIFICADO	SAMUEL SCHELESKI	STATUS	ESCALA	FOLHA
		APROVADO	1 : 1	1
				REVISÃO
				0

APÊNDICE B – Código programado para usinagem CNC

O0001

N10 G21 G40 G90 G95

N20 G54 G00 X180 Z180

N30 T0303

N40 G54

N50 G96 S200

N60 G92 S2500 M4

N70 G00 X180 Z2

N80 G00 X32 Z2

N90 G71 U1 R2

N100 G71 P100 Q160 U.1 W.1 F.1

N110 G01 X26 Z2

N120 G01 Z-30

N130 G02 X16 Z-40 R10

N140 G01 Z-80

N150 G02 X26 Z-90 R10

N160 G01 Z-120

N170 X32

N180 X180

N190 G54 G00 X180 Z2 T00

N200 T0505

N210 G54

N220 G96 S200

N230 G92 S2200 M4

N240 G00 X180 Z2

N250 G00 X32 Z2

N260 G70 P100 Q160 F.1

N270 G54 G00 X180 Z180 T00

N280 T0606

N290 G54

N300 G00 X180 Z2

N310 G96 S160

N320 G92 S800 M4

N330 G00 X40 Z-123

N340 G75 R2

N350 G75 X5 Z-123 P3000 Q1000 F.1

N360 M05 M00

N370 G92 S500 M4

N380 G75 R2

N390 G75 X-2 Z-123 P3000 Q1000 F.1

N400 G00 X180

N410 G54 G00 X180 Z180 T00

N420 M30

ANEXO A – Orçamento da célula de carga adquirida

Itens do Orçamento

Código	Descrição	NCM	Quant.	Unid. (R\$)	Valor Total (R\$)	
CSL/ZL-1T	A-CELULA DE CARGA CSL/ZL- 1T (301)	9031.80.60	1,00	PC	665,000	665,00
	CAPACIDADE: 1.000Kgf, Sentido de Trabalho: Tração/Compressão, Sensibilidade: 2mV/V +-10%, Alimentação: 10Vcc, Material: Aço Liga					
DNZL-2035	A-INDICADOR DIGITAL DNZL-2035	8423.90.29	1,00	PC	935,000	935,00
	Alimentação: 110/220V, Saída: a relê, Microprocessado: ., Display de led: 4 dígitos (20mm) Sentido de trabalho único: tração ou compressão					
Subtotal:						1.600,00
IPi:						0,00
ICMS ST:						0,00
Total:						1.600,00

Vencimentos À Vista

Parcela	1
Vencimento	24/08/2023
Valor (R\$)	1.600,00