

**Construção e análise de um transdutor de força do tipo resistivo para
medição de forças de arrasto**

Bryan Emanuel Barreira

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Professor João Ribeiro

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

Abril de 2023

Agradecimentos

Este espaço é dedicado a todos aqueles com quem pude contar, não só na elaboração desta Dissertação de Mestrado, mas também a todos aqueles que me acompanharam ao longo destes anos de vida académica. A todos fica aqui o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço ao Prof. João Ribeiro pela ajuda que me deu, pela forma como orientou o trabalho e pela sua sempre simpatia e disponibilidade no auxílio a cada dúvida e dificuldade encontrada ao longo da elaboração desta dissertação.

Agradeço à minha esposa, pela paciência, incentivo e colaboração, essenciais para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, irmão e filho, por tudo que tenho na vida.

Por fim e não menos importantes, são também merecedores de uma nota de apreço os amigos que fui fazendo ao longo destes anos nesta cidade tão longe de casa. Obrigado por estarem comigo quando as dificuldades apertam e me animarem, fazendo-me andar para a frente. Sem o vosso apoio e amizade teria sido tudo muito mais difícil.

Resumo

Nas últimas décadas tem crescido a necessidade de medir forças de arrasto hidrodinâmicas. Assim, neste trabalho desenvolveu-se e construiu-se uma célula de carga para a medição de forças de arrasto hidrodinâmicas até 500 N. Com base em expressões analíticas determinou-se as dimensões e geometria do corpo da célula (tipo Z). A geometria obtida foi analisada com o recurso ao método dos elementos finitos, permitindo otimizar a seleção do material e dimensões da estrutura. Posteriormente, foi fabricado, com processos de maquinagem, o corpo da célula de carga e foram colados extensómetros resistivos em posições previamente definidas na simulação numérica. Após a fabricação da célula de carga efetuou-se a sua calibração, bem como, a sua caracterização.

Palavras-Chave: forças de arrasto; célula de carga; extensómetros elétricos; calibração

Abstract

In recent decades, the need to measure hydrodynamic drag forces has grown. Thus, in this work a load cell was developed and built to measure hydrodynamic drag forces up to 500 N. Based on analytical expressions, the dimensions and geometry of the cell body (type Z) were determined. The geometry obtained was analyzed using the finite element method, allowing to optimize the selection of material and dimensions of the structure. Subsequently, the body of the load cell was manufactured using machining processes and resistive strain gauges were glued in previously defined positions in the numerical simulation. After manufacturing the load cell, its calibration was carried out, as well as its characterization.

Keywords: drag forces; load cell; strain gage; calibration

Acrónimos

[AC] - Corrente alternada - Alternative current

[ADC] - Conversor Analógico Digital – Analog-to-Digital Converter

[AISI] - Instituto Americano do Ferro e do Aço - American Iron and Steel Institute

[BIPM] - Bureau International de Pesos e Medidas - The International Bureau of Weights and Measures

[DC] - Corrente contínua - Direct current

[FSO] - Amplitude Máxima de Saída – Full-Scale Output

[HSS] - Aço de alta velocidade - High speed steel

[IP] - Proteção de Ingresso – Ingress Protection

[LVDT] - Transformador Diferencial Linear Variável – Linear Variable Differential Transformer

[MEF] - Método elementos finitos - Finite element method

[NPL] - Laboratório nacional de física – National Physical Laboratory

[SI] - Sistema internacional de unidades - International systems of units

[UKAS] - Serviço de acreditação do reino unido - United Kingdom Accreditation Service

Grandezas Físicas

A: área

b: largura da lâmina

bar: unidade de pressão

C: coulomb (unidade de carga elétrica)

CG: centro de gravidade

CN: capacidade nominal

D: diâmetro externo

dB: decibéis (unidade de nível de som)

d: diâmetro interno

e: espessura da lâmina

F: força

FL: momento fletor

g: aceleração da gravidade

h: altura

Hz: Hertz (unidade de frequência)

H: humidade

I: momento de inércia

k: rigidez

kg: quilograma (unidade de massa)

Kgf: força em quilograma-força

L: comprimento da lâmina / comprimento da mesa em forma de L

m: massa / milímetro (unidade de comprimento)

MB: momento em B

MA: momento em A

mm: milímetro (unidade de comprimento)

m/s²: metro por segundo ao quadrado (unidade de aceleração)

mV: milivolt (unidade de tensão elétrica)

N: Newton (unidade de força)

Pa: pascal (unidade de pressão)

P: peso

π : constante matemática pi

P: pressão

q: carga

R: resistência elétrica / repetibilidade / reprodutibilidade

Rp: reprodutibilidade

σ : tensão

σ_{adm} : tensão admissível

σ_{ced} : tensão de cedência

T: temperatura

TCR: coeficiente de temperatura da saída de força no valor de zero

TCS: coeficiente de temperatura da sensibilidade

t: duração

U: incerteza

v: velocidade

V: diferença de potencial elétrico / Volt (unidade de tensão elétrica)

V/V: relação de tensão de saída em relação à tensão de entrada de um transdutor

°C: graus Celsius (unidade de temperatura)

Ω : Ohm (unidade de resistência elétrica)

Índice

Introdução	1
1.1. Enquadramento e motivações do trabalho.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
Fundamentação Teórica.....	5
2.1. Conceitos de medição.....	5
2.1.1 O sistema de unidades SI	5
2.2. Força e outras quantidades físicas	5
2.2.1. Massa.....	5
2.2.2. Força.....	6
2.2.3. Peso	7
2.2.4. Carga	7
2.3. Sistemas de medição da força	7
2.4. Introdução ao método de medição de força.....	7
2.4.1 - Transdutores de força e as suas características	7
2.4.2 - Tipos de transdutores de força	11
2.5 - Transdutor de força elásticos com extensómetros	12
2.5.1 - Geometrias dos transdutores de força utilizando extensómetros	13
2.6 - Extensómetros de resistência elétrica	14
2.6.1- Extensómetro de folha	15
2.6.2 - Extensómetros com película fina	16
2.7 - Transdutores de força do tipo cristal piezoelétrico	16
2.8 - Medição de força por meio de pressão.....	18
2.8.1 - Célula de carga hidráulica.....	18
2.8.2 - Células de carga pneumática.....	19
2.9 – Aplicações de transdutores de força.....	20
2.9.1 - Máquinas de testes para materiais.....	20
2.9.2 - Testes dos componentes.....	20

2.9.3- Durante o processo de fabrico.....	20
2.9.4- Processo de pesagem.....	21
2.10 - Escolha do projeto e operação do sistema	22
2.10.1 - Escolha do sistema de medição de força.....	22
2.11- Capacidade operacional num transdutor	23
2.11.1- Número de transdutores	23
2.11.2- Transdutor unidirecional ou bidirecional.....	23
2.11.3 - Medição estática ou dinâmica.....	24
2.11.4 - Medição de forças com múltiplos componente.....	24
2.12 - Instrumentação e leitura de dados	24
2.12.1 Considerações do design e Segurança.....	26
2.12.2 - Ambiente.....	27
2.12.3 – Espaço para instalação	27
2.12.4 - Montagem do transdutor de força	27
2.12.5 - Operação da medição do sistema de força	28
2.13 – Instrumentação usada para dispositivos de calibração de tensão.....	29
2.14 - Calibração	32
2.14.1 - Normas e rastreabilidade.....	33
2.14.2 - Calibração da tensão nas células de carga	34
2.14.3 - Metodologia de calibração	35
2.14.4 - Os procedimentos de calibração	36
2.14.5 - A realização da calibração	39
2.14.6 - Repetibilidade	39
2.14.7 - Análise dos dados de calibração	40
Capítulo 3	41
Desenho e dimensionamento do transdutor de força de tipo resistivo.....	41
3.1-Definição e constituição do transdutor de força do tipo resistivo	41
3.2-Características do transdutor a projetar.....	42
3.3-Seleção do material do corpo	42
3.4-Formas admissíveis para o corpo.....	42
3.5- Cálculos	43
3.5.1- Cálculos para a forma cilíndrica	43
3.5.2- Cálculos para a forma Z.....	46

3.6 - Análise da célula de carga pelo método elementos finitos	51
3.6- Resultados.....	52
Capítulo 4	55
Construção mecânica	55
4.1 – Construção do transdutor	55
4.2 – Construção dos parafusos.....	60
4.3 – Construção da mesa para a calibração.....	62
Capítulo 5	65
Procedimentos e instrumentação para a montagem dos extensómetros da célula de carga. ..	65
5.1- Seleção dos extensómetros	65
5.2- Instrumentação.....	65
5.2.1- Procedimento de colagens e curas	65
5.2.3- Correção e ajuste do zero	68
5.2.4- Cablagem.....	68
Capítulo 6	70
Caracterização do transdutor de forças.....	70
6.1- Medição da Flexibilidade	70
6.2 – Calibração	72
6.2.1- Calibrações usando a ponte de Wheatstone	72
6.2.2 – Cálculo da sensibilidade	75
6.3 – Linearidade	75
6.3.1 – Resultados obtidos da Linearidade	75
6.4- Repetibilidade	77
6.4.1 – Repetibilidade obtida para a calibração.....	78
6.5- Estabilidade	79
Capítulo 7	80
Conclusões e propostas para trabalhos futuros	80
7.1. Conclusões.....	80
7.2. Propostas para trabalhos futuros.....	80
Anexos.....	85
Anexo A	86
Anexo B	87
Anexo C	93

Lista de tabelas

Tabela 1 - Fatores de conversão aproximados para algumas unidades de força não-SI.	6
Tabela 2 - Tabela de vários tipos de transdutores de força e as suas características.	11
Tabela 3 - Instrumentação associada a tipos de transdutores comuns.	26
Tabela 4 - Lista de verificação dos requisitos potenciais de um sistema de medição de força.	32
Tabela 5 - Tipos de equipamento padrão de força.	33
Tabela 6 - Resultados obtidos no 1º Caso.	45
Tabela 7 - Resultados obtidos no 2º Caso.	45
Tabela 8 - Resultados obtidos no 1º Caso.	48
Tabela 9 - Resultados obtidos no 2º Caso.	48
Tabela 10 - Sensibilidade para o 1º Caso.	50
Tabela 11 - Sensibilidade para o 2º Caso.	50
Tabela 12 - Valores lidos nos comparadores para o transdutor de forças e a variação do comprimento.	72
Tabela 13 - Variação total do comprimento e a sua média, para o transdutor.	72
Tabela 14 - Valores lidos para o transdutor, os incrementos e as suas médias.	74
Tabela 15 - Valores da sensibilidade para o transdutor.	74
Tabela 16 - Valores obtidos da Linearidade.	75
Tabela 17 - Determinação do desvio de linearidade em percentagem.	75
Tabela 18 - Valores do desvio padrão e da variância.	78

Lista de figuras

Figura 1 - Características de saída comuns de um sistema de medição da força.....	8
Figura 2 - Curva Creep de um transdutor de força típico.	10
Figura 3 - Esquema básico de um elemento transdutor elástica.	12
Figura 4 - Geometrias de transdutores utilizando extensómetros e eixos principais de aplicação de forças.	13
Figura 5 - Extensómetros de folha comuns de tensão.	15
Figura 6 - Célula de carga industrial do tipo piezoelétrico.....	17
Figura 7 - Montagem de uma arruela ou anilha de carga.	18
Figura 8 - Um exemplo de uma célula de carga hidráulica.	19
Figura 9 - Transdutor para medição da força de corte.....	21
Figura 10 - Base suportada por quatro células de carga.	22
Figura 11 - Combinações típicas de instrumentação.	25
Figura 12 - Esquema básico de quatro medidores de tensão em uma célula de carga.....	30
Figura 13 - Uma gama de células de carga industriais.	31
Figura 14 - Um exemplo certificado de calibração.	40
Figura 15 - Esquema do corpo do transdutor em forma de tubo cilíndrico.	43
Figura 16 - Forma cilíndrica da cápsula.	43
Figura 17 - Forma em Z, do corpo da célula de carga.	46
Figura 18 - Localização dos extensómetros.	51
Figura 19 - Malha dos elementos finitos da célula de carga.....	52
Figura 20 - Campos de deslocamentos obtido pela simulação dos elementos finitos com uma carga de 40N.	52
Figura 21 - Campos de deslocamentos obtido pela simulação dos elementos finitos com uma carga de 500N.....	53
Figura 22 - Campo de tensões obtido pela simulação dos elementos finitos com uma carga de 40N.....	53
Figura 23 - Campo de tensões obtido pela simulação dos elementos finitos com uma carga de 500N.....	54
Figura 24 - Facejamento do veio para obter o comprimento do transdutor.....	56
Figura 25 - Furação nas extremidades da peça.....	57
Figura 26 - Maquinagem da peça numa fresadora convencional.	58
Figura 27 - Facejamento da peça utilizando uma fresa de 25mm de diâmetro.....	58

Figura 28 - Facejada nas duas faces.	59
Figura 29 - Perfuração da peça, utilizando uma fresa com diâmetro de 10mm.	59
Figura 30 - Obtenção da forma em Z, utilizando uma fresa de 10mm de diâmetro.	60
Figura 31 - Transdutor com o acabamento concluído.	60
Figura 32 - Dimensões dos parafusos.	61
Figura 33 - Processo de abrir rosca M6 nos parafusos.	61
Figura 34 - Parafusos com acabamento final.	62
Figura 35 - Suporte do apoio fixo ao parafuso da célula de carga.	62
Figura 36 - Suporte da roldana ajustável.	63
Figura 37 - Suporte de carga da mesa de tração.	63
Figura 38 - Finalização da construção da mesa de tração.	64
Figura 39 - Esquema de ligação dos extensômetros.	64
Figura 40 - Alinhamento dos extensômetros sobre a superfície de colagem.	66
Figura 41 - Neutralizador, cola e condicionador.	66
Figura 42 - Colocação dos extensômetros na zona de deformação.	67
Figura 43 - Ligação dos fios por soldadura.	67
Figura 44 - Ligações dos extensômetros aos terminais em ponte de wheatstone.	68
Figura 45 - Medição da resistência dos extensômetros após as ligações.	69
Figura 46 - Representação esquemática do transdutor na mesa de tração e o posicionamento dos comparadores relativamente ao transdutor.	71
Figura 47 - Ligações dos cabos à ponte universal de medida.	73
Figura 48 - Reta de calibração do transdutor, com respetiva equação e fator de correlação.	74

Capítulo 1

Introdução

1.1. Enquadramento e motivações do trabalho

A força é uma quantidade na qual muitas outras, tais como, o binário, o impulso e a pressão se baseiam. A medição precisa da força é necessária para muitas aplicações, nomeadamente, para a determinação da resistência dos materiais [1], controlo de qualidade durante a produção [2] pesagem [3] e segurança de pessoas [4]. Dada a grande necessidade de medição de forças, têm-se desenvolvido, ao longo do tempo, várias técnicas e instrumentos para esse fim [5]. Entre os vários instrumentos utilizados, destacam-se os sensores de força pela sua simplicidade, precisão e versatilidade [6].

Na indústria pode observar-se que as aplicações de sensores de força são inúmeras, podendo dar-se alguns exemplos como: na indústria da aviação, em que é necessário medir as forças durante os ensaios da integridade estrutural das aeronaves e de diferentes componentes usados na produção dos aviões como por exemplo asas e fuselagens; em processos industriais automatizados, como é o caso da laminagem, é necessário uma medição correta e precisa para controlar a pressão dos rolos laminadores sobre perfis ou chapas metálicas que estão a ser laminadas. Outras aplicações incluem a medição da potência do motor, o binário necessário para apertar parafusos, a tensão do cabo de guinchos e elevadores. Os sensores de força são também usados em balanças eletrónicas para medição do peso e que podem ir desde alguns miligramas até centenas de toneladas. Assim, a necessidade de medir forças ou quantidades relacionadas com esta, levam ao desenvolvimento sistemas de medida específicos, adaptados às necessidades e ao meio envolvente [7, 8]. Dessa forma, um sensor para medir as forças durante um ensaio tração num laboratório terá, necessariamente, características diferentes de uma célula de carga usada para pesar veículos pesados em via pública, neste último caso, para além do dimensionamento

referente à componente de medição, necessitará de um bom isolamento para as condições climáticas adversas, nomeadamente, temperaturas extremas e humidade elevada.

A necessidade de medir forças de arrasto hidrodinâmicas tem crescido nas últimas décadas [9, 10], especialmente, devido ao aumento da utilização dos recursos hídricos, tanto fluviais [11] como marítimos [12]. A exploração industrial destes recursos obriga a um conhecimento *in loco* do valor das forças envolventes para um melhor dimensionamento dos equipamentos utilizados [13] ou para uma monitorização constante dos processos [14]. Para além área industrial, também o turismo e o desporto fluvial e marítimo têm crescido nos últimos anos [15, 16] e, nestes setores, pode haver necessidade da medição de forças de arrasto, tanto para garantir e monitorizar a segurança das pessoas e equipamentos [17], como, especialmente no desporto, para medir e melhorar o desempenho dos atletas [18]. Dada a relevância da medição de forças de arrasto hidrodinâmicas e para colmatar a falta de um equipamento que permita medir esta grandeza optou-se, neste trabalho, por desenvolver e fabricar um transdutor de forças com esse objetivo.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é o de dimensionar e construir um transdutor de forças que permita medir forças de arrasto hidrodinâmicas. Os outros objetivos deste trabalho são:

- Determinar a geometria, dimensões e selecionar os materiais mais adequados para a obtenção do transdutor de força ou célula de carga.
- Selecionar os extensómetros mais apropriados para o transdutor a ser construído, bem como, determinar o circuito eletrónico que permitirá a medição das deformações com uma elevada resolução e sensibilidade.
- Escolher os processos de fabrico mais adequados para a obtenção do corpo da célula de carga. Definir as sequências de maquinaria e fabricar o transdutor de forças.
- Colar os extensómetros resistivos no corpo da célula de carga e fazer as ligações elétricas associadas a um circuito eletrónico.

- Implementar a calibração da célula de carga, sendo necessário executar um sistema mecânico para a realização do processo de calibração.

1.3. Estrutura da dissertação

Este projeto está dividido em sete capítulos.

No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento ao tema em estudo e são definidos os principais objetivos e finalizando com a descrição da dissertação.

No capítulo 2 é descrito a variedade dos tipos de células de carga, as suas funções e aplicações, são, também, referidos os sistemas de medição de forças e instrumentação para obtenção de dados. Finalizando a referência ao processo de calibração.

No capítulo 3 são apresentadas as características da célula de carga a projetar como a escolha do material do corpo e suas formas admissíveis, utilizando cálculos analíticos para obter as melhores dimensões através da sensibilidade. Por fim, foi realizada a análise da célula de carga pelo método elementos finitos obtendo os resultados da deformação e tensão.

No capítulo 4 será descrito a construção mecânica da célula de carga em “Z”, utilização das ferramentas e máquinas usadas na realização da peça e, também, é apresentado o fabrico de uma mesa de tração para a calibração da célula de carga.

O capítulo 5 é dedicado a escolha dos extensómetros, com os seus procedimentos de colagem e curas, a ligação dos extensómetros em ponte de Wheatstone e verificação da correção e ajuste do zero.

No capítulo 6 é apresentado o ensaio experimental começando pela medição da flexibilidade e os passos utilizados. O procedimento da calibração do transdutor utilizando uma ponte de Wheatstone e apresentação dos valores obtidos pelo indicador e medidor de tensão. Com os valores obtidos da reta de calibração foi calculada a equação e o fator de correlação. Também contém os cálculos da sensibilidade e linearidade para o transdutor de carga. Por fim, apresenta a repetibilidade dos valores das medidas para conhecer o valor mais provável.

No capítulo 7, serão apresentadas as conclusões deste projeto relativamente ao trabalho realizado e, seguidamente, as propostas de projetos futuros. O trabalho é finalizado com as referências bibliográficas essenciais na sua execução e importantes para a compreensão do trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Conceitos de medição

2.1.1 O sistema de unidades SI

Há prática convencional para expressar qualquer quantidade física mensurável como um valor numérico associado a uma unidade de medida. O sistema internacional de unidades (conhecido como SI) é coerente e é amplamente aceito como o padrão para o comércio nacional e internacional, ciência e engenharia. No sistema SI existem sete grandezas de base, sendo as três mais utilizadas as seguintes:

- Grandeza de base do comprimento, unidade de medida é o metro, em que o símbolo é o “m”
- Grandeza de base da massa, unidade de medida é o quilograma, representada pelo símbolo “kg”
- Grandeza de base do tempo, unidade de medida é o segundo, cujo símbolo é o “s”

As grandezas derivadas, tais como força, são obtidas por combinação matemática de grandezas de base [5].

2.2. Força e outras quantidades físicas

2.2.1. Massa

A massa é uma medida de quantidade de material num objeto, está diretamente relacionado com o número e tipo de átomos presentes no material. A massa não se altera com a posição, movimento ou alteração da forma do corpo, a menos que material seja adicionado ou removido. A unidade de massa do sistema SI é o quilograma (kg), que é definido como sendo igual à massa do protótipo internacional de quilograma realizada no Bureau Internacional de Pesos e Medidas (Bureau International de Pesos e Medidas - BIPM) em Paris [5].

2.2.2. Força

A força é uma medida de interação entre corpos. A força é uma grandeza vetorial com direção e magnitude. As forças que atuam num corpo em equilíbrio são somadas em torno da periferia de um corpo, igualando o somatório a zero. Se não houver qualquer força resultante atuando e o corpo não está em equilíbrio, este vai acelerar de modo que a taxa de variação da quantidade de movimento do corpo multiplicado pela velocidade da massa é igual à força. Se o corpo é mantido estacionário, de alguma forma, então haverá uma reação que atua sobre o corpo da estrutura de suporte que é igual à magnitude e oposta da direção à força aplicada. Embora a definição de unidades de força (tal como indicado abaixo) baseia-se na aceleração de um corpo livre, a maioria das medições de força são feitas com corpos em equilíbrio e, portanto, são feitas medidas das forças dentro de uma estrutura. Conceptualmente, uma estrutura pode-se 'cortar' em qualquer seção e as forças que atuam dentro do corpo da seção são aqueles que atuariam nas superfícies livres se tais cortes forem realizados. Esta propriedade constitui a base da maior parte das medições de força, como um suporte físico ou ligação de uma estrutura é substituído por um dispositivo que mede as forças que atuam nesse ponto.

Tal como acontece com qualquer quantidade vetorial, o vetor correspondente à reação pode ser projetado em três eixos ortogonais, e o equilíbrio pode ser considerado, de forma independente e paralelo a cada um desses eixos. Frequentemente, um sistema de medição de força irá reagir adequadamente apenas a forças ao longo do seu eixo principal.

A unidade SI de força é o Newton (N), definida como a unidade de força que daria a uma massa de um quilograma uma aceleração de 1 metro por segundo ao quadrado (m/s^2).

Na prática, não é conveniente produzir uma aceleração de 1 m/s^2 agindo sobre uma massa de um quilograma, com o objetivo de realizar um padrão de força de um Newton. Em vez disso, a realização prática da unidade de força faz uso de massas conhecidas que, quando submetidas ao efeito da força da gravidade local, exercem uma força conhecida sobre um suporte localizado. A estrutura mecânica para manusear e controlar tais massas é conhecida como uma máquina de peso morto.

Historicamente, tem havido uma variedade de unidades de força, e alguns fatores de conversão aproximada para unidades mais antigas são dadas na Tabela 1.

Tabela 1 Fatores de conversão aproximados para algumas unidades de força não-SI.

Unidade	Símbolo	Equivalente à libra-força
Libra-força	Lbf,	4,448 N
Tonelada-força	Tonf	9,964 kN
Quilograma-força	kgf	9,807 N

2.2.3. Peso

O peso tem o mesmo significado que a massa e é medido em quilogramas. Cientificamente, é normal afirmar que o peso de um corpo é a força gravitacional que atua sobre ele, portanto, deve ser expressa em Newton. Esta força dependente da aceleração devido à gravidade. Para obter o peso é utilizado o processo de pesagem para determinar a massa de um corpo [5].

2.2.4. Carga

Carga é um termo frequentemente usado em engenharia para definir a força exercida sobre uma superfície ou corpo. Na célula de carga é utilizado a carga em vários tipos de transdutor para a medição da força.

2.3. Sistemas de medição da força

Um sistema de medição da força é constituído por um transdutor e sua instrumentação associada. O transdutor é submetido a uma força para ser medida e com a alteração dessa força obtêm-se os valores resultantes. A instrumentação fornece alimentação ao transdutor e fornece os valores de saída do transdutor da força aplicada. Basicamente, um transdutor é um dispositivo que recebe um estímulo físico e transforma-o em outra grandeza física mensurável através de uma relação conhecida. Na prática, um transdutor de força é uma cadeia de vários transdutores, por exemplo, a força pode atuar sobre um cilindro de metal que é comprimido pela força e a alteração do tamanho altera a resistência elétrica de um extensómetro elétrico ligado à superfície do cilindro e os valores obtidos alteram com a alteração da resistência. Neste trabalho, o transdutor de força será usado para descrever a parte do sistema de medição da força que converte a força aplicada numa saída que é medida por uma instrumentação associada. Em que a unidade de saída é em Volt.

2.4. Introdução ao método de medição de força

2.4.1 - Transdutores de força e as suas características

Nas figuras seguintes, são apresentados diversos sistemas de medição da força cujo funcionamento se baseia em diferentes princípios físicos. O desempenho destes sistemas pode ser descrito por uma série de características comuns e o comportamento do sistema ou do transdutor pode ser expressa através da representação gráfica em que o valor de saída indicada tem uma relação de proporcionalidade com força aplicada (conhecida como uma curva de resposta). A Figura 1 mostra uma curva da resposta idealizada de um sistema de medição de forças, neste caso, pode observar-se força pode variar,

incrementalmente, de zero até à capacidade nominal do sistema de medição e, posteriormente, voltar à posição inicial (força nula). A capacidade nominal é a força máxima que um transdutor de força é projetado para medir.

O desvio da curva dá a resposta a partir de uma linha reta que é ampliado na Figura 1 para melhor visualização. Um método comum usado para caracterizar o desempenho deste sistema é baseado na instalação de um melhor ajuste da linha reta e indicando os erros em relação a esta linha. Desvio de valores de saída a partir desta linha dá melhor ajustamento durante o aumento da carga e é referido como não-linearidade e, geralmente, o maior desvio é dado pela especificação de um sistema. Para qualquer força exercida, seja aumentada ou diminuída, a diferença entre o valor de saída é definida como a histerese. O maior valor de histerese é, normalmente, no intervalo médio do sistema. Por vezes, pode ser útil combinar a não-linearidade e a histerese numa única figura. Neste caso, são desenhadas duas linhas paralelas à linha de melhor ajuste, de tal forma que, estas linhas fecham as curvas crescentes e decrescentes. A maior diferença destas duas linhas a partir da linha de melhor ajustamento é definido como o erro combinado.

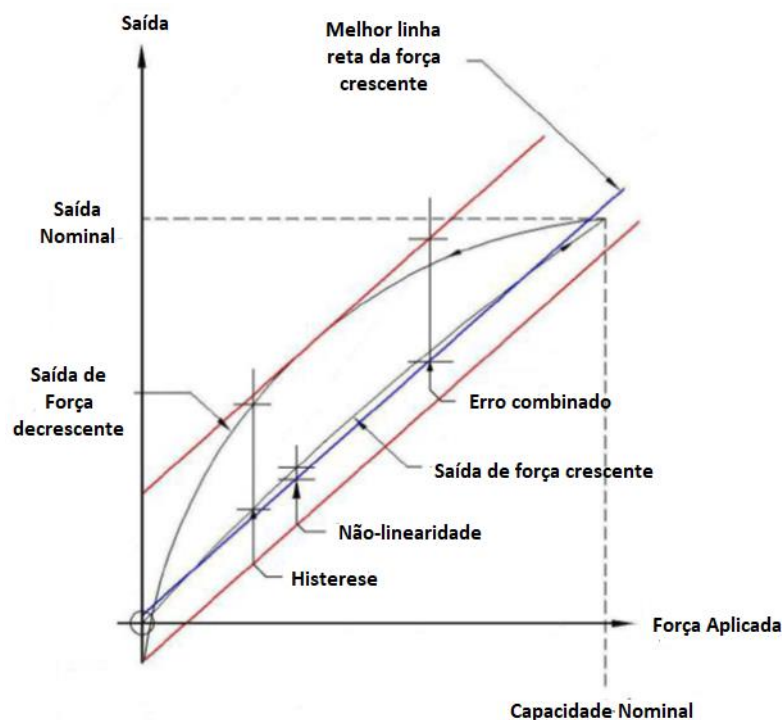


Figura 1 - Características de saída comuns de um sistema de medição da força [19].

Qualquer diferença entre o valor indicado da força e do valor verdadeiro é conhecido como um erro de medição e os erros assinalados acima podem ser expressos como uma percentagem da força real aplicada ou a percentagem de força nominal. Em produção de grande escala (FSO), também conhecida como extensão ou saída nominal, corresponde à saída da capacidade nominal menos a saída isto sem aplicar qualquer força. A sensibilidade é definida pela produção (repetibilidade dos ensaios) em grande escala dividida pela capacidade nominal de uma dada célula de carga.

Para determinar capacidade que um sistema de medição tem para medir, de forma repetida, uma força constante e é utilizado o conceito da repetibilidade. A repetibilidade é definida pela medição entre as saídas de um sistema de medição de força de vários ensaios repetidos para uma determinada força. Os testes devem ser realizados pelo mesmo operador, tanto quanto possível, nas mesmas condições de medida, isto é, com o mesmo equipamento de medição, sem perturbações mecânicas ou elétricas, com as mesmas condições de calibração, com a mesma temperatura e com o mesmo alinhamento de posição da carga e o mesmo método de leitura. Embora muitos fabricantes fornecem um valor para a repetibilidade como as características básicas do transdutor, na prática, o valor fornecido pelo fabricante, foi obtido para um determinado transdutor de força em condições específicas que não correspondem à utilização em ambiente real. Contudo, o valor de repetibilidade obtido é importante, uma vez que limita a exatidão a que as características do transdutor de força podem ser medidas.

Em contraste com a repetibilidade, a reprodutibilidade é definida como o grau de concordância entre os resultados das medições da mesma força realizado sob condições modificadas de medição. Note-se que uma declaração válida de reprodutibilidade exige especificação das condições alteradas e podem incluir mudanças no princípio de medição no método de medição, operador, instrumento de medição, localização, condições de utilização e tempo.

Num sistema de medição de força, um transdutor de força tem bastante dificuldade em ajustar-se completamente a uma alteração da força aplicada e da repetibilidade, geralmente, definida com a mudança da saída e com o tempo da sequência de um aumento de força, este valor altera de uma sequência para outra. A maioria dos fabricantes especificam o deslizamento como a variação máxima de saída ao longo de um período temporal específico e após o aumento da força a partir de zero até a força nominal. A Figura 2 mostra um exemplo de uma curva de deformação em que o transdutor de força apresenta uma mudança na produção de F_1 a F_2 ao longo de um período de tempo entre t_1 e t_2 , após uma mudança de passo entre 0 a T_1 . Esse valor pode corresponder a 0,03% da potência nominal durante 30 minutos.

A resposta de um sistema de transdutor de força é afetada pela frequência de ensaios e do tipo de material da estrutura mecânica, pode afetar o interior do transdutor até a sua

própria montagem. A constituição de um transdutor de força tem uma frequência natural de oscilação e grandes erros dinâmicos que ocorrem quando a frequência da força medida se aproxima da frequência natural de oscilação do sistema. Na prática, a frequência natural de um transdutor pode ser menos significativa do que os valores indicados pelo fabricante, como o resultado da sua montagem.

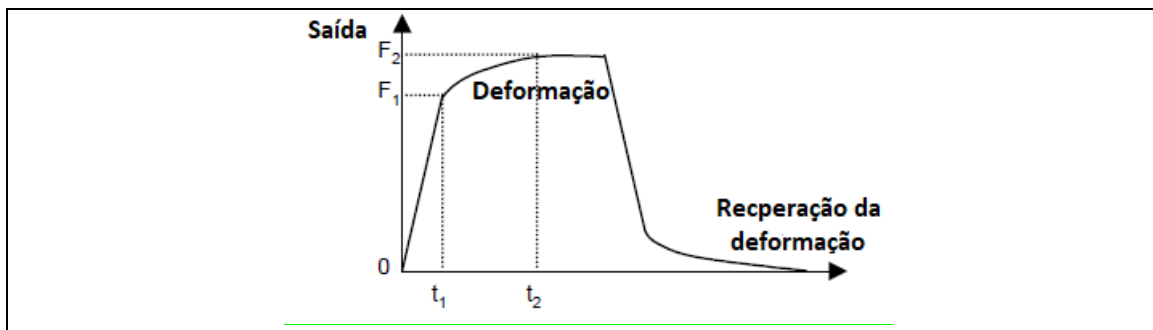


Figura 2 - Curva Creep de um transdutor de força típico [5].

O efeito das alterações da temperatura é sentido tanto no valor de zero e como no nominal de saída do sistema de medição de força. O coeficiente de temperatura da saída de força no valor de zero e o coeficiente de temperatura da sensibilidade são medidas, deste efeito, para um dado sistema. Um sistema de medição de força deve ser mantido a uma temperatura constante, ou ser configurado com bastante antecedência para compensar o efeito da temperatura em medições de alta precisão. Em alguns casos, os gradientes de temperatura no interior do equipamento de medição podem criar um problema, mesmo quando a temperatura média é estável.

Outra grandeza que influencia é a humidade, pressão, e as mudanças de energia elétrica, ou de perturbações, tais como a interferência de rádio frequência, podem ter efeitos análogos aos da temperatura e podem ser avaliados de um modo semelhante.

Em geral, um transdutor de força tem duas interfaces através das quais é aplicada uma força. Em algumas células de carga, a carga pode ser aplicada nas superfícies superior e inferior de um transdutor de força à compressão ou aplicado nos filetes de uma rosca de um dispositivo à tração. Em outros transdutores, as interfaces podem ser afastadas do elemento elástico. Em cada interface, haverá uma distribuição de força que irá depender das condições de carga máxima. Uma alteração nestas condições de carga, podem causar uma alteração na distribuição da força, resultando numa alteração da sensibilidade do transdutor, mesmo que a força resultante na interface permaneça inalterada.

O alinhamento axial real da força aplicada ao longo de um eixo principal de um transdutor e as suas condições de carga necessárias para garantir essa direção, são os principais fatores na conceção de uma instalação confiável e precisão de um sistema de medição de força. Transdutores de força utilizados para medir um componente de força único são

projetados para ser insensíveis aos componentes da força ortogonais, desde que, estes estejam dentro dos limites especificados, embora o erro possa ser devido a pequenos desalinhamentos na calibração [20]. O alinhamento da força em relação ao eixo do transdutor pode variar ao longo de cada ciclo de carga de uma aplicação típica dando origem erros elevados e, potencialmente, não quantificáveis na medição. Os operadores de sistemas de medição de força devem aderir às recomendações do fabricante para o alinhamento na instalação dos transdutores de força.

Uma força dinâmica pode variar com o tempo. Para medir qualquer valor instantâneo, requer uma alteração na frequência do sistema de medição de força e deve ser suficiente elevado para acompanhar a força variável. Uma definição da resposta em frequência mais alta é a frequência sinusoidal de força aplicada em que o sistema pode medir com uma precisão específica. Quando, num transdutor, são aplicadas várias cargas ao longo do tempo, deve ser considerada o efeito da fadiga na estrutura do transdutor. A fadiga do material pode ser definida pelo número total de ciclos completos da força exercida aplicados ao transdutor.

2.4.2 - Tipos de transdutores de força

Existem vários tipos de transdutor de força, e estes podem ser usados com uma complexidade variada de instrumentação. Na conceção ou especificação de um sistema de medição de força, é útil compreender o funcionamento de base do transdutor a ser utilizado. Neste capítulo descrevem-se os tipos de transdutores e instrumentações mais utilizados. Um resumo das características dos vários dispositivos descritos neste documento é apresentado na Tabela 2. Os números na tabela representam os valores comuns dos sistemas de transdutores que mais vezes operam fora destes limites, mas com o aumento do erro.

Tabela 2 - Tabela de vários tipos de transdutores de força e as suas características [5].

Tipo de Transdutor	Gama típica de capacidades nominais	Típico de incerteza% da leitura	Típica sensibilidade à temperatura e gama de funcionamento% da leitura por ° C
Transdutores de força elásticos utilizando extensómetros: - extensómetros de semicondutores - extensómetros de película fina - extensómetros de folha	- 0,01 N até 10 kN - 0,1 N até 1 MN - 5 N até 50 MN	- 0,2 até 1 - 0,02 até 1 - 0,02 até 1	- 0,02 (-40 °C a +80 °C) - 0,02 (-40 °C a +80 °C) - 0,01 (-40 °C a +80 °C)
Cristal piezoelétrico	1,5 mN até 120 MN	0,3 to 1	0,02 (-190 °C a +200 °C)

Hidráulico	500 N até 5 MN	0,25 to 5	0,05 (+5 °C a +40 °C)
Pneumático	10 N até 500 kN	0,1 até 2	0,05 (+5 °C a +40 °C)
LVDT, capacitivo, diapasão, vibrando fio	10 mN até 1 MN	0,02 até 2	0,02 (-40 °C a +80 °C)
Magnetostrictive	2 kN até 50 MN	0,5 até 2	0,04 (-40 °C a +80 °C)
Gyroscopic**	50 N até 250 N	0,001	0,0001 (-10 °C a +40 °C)
Equilíbrio de força**	0,25 N até 20 N	0,0001	0,0001 (-10 °C a +40 °C)

Nota: ** os transdutores de deslocamento podem ser utilizados numa célula de carga e o equilíbrio rigoroso do giroscópico. Os limites exatos do desempenho dependerão do tipo de especificação a utilizar (escolha do modelo ideal).

2.5 - Transdutor de força elásticos com extensómetros

O princípio de funcionamento dos transdutores de força elásticos utilizando extensómetros é ilustrado na Figura 3. O transdutor de força, neste caso, é um cilindro circular, constituído por um metal com características como o aço. A força é aplicada na extremidade do cilindro e a deformação é medida pela diferença entre o comprimento inicial (sem carregamento) e após uma carga de compressão. O cilindro fica deformado quando este sofre compressão. A razão entre tração transversal e compressão longitudinal é determinado pelas propriedades do material, por meio do coeficiente de Poisson.

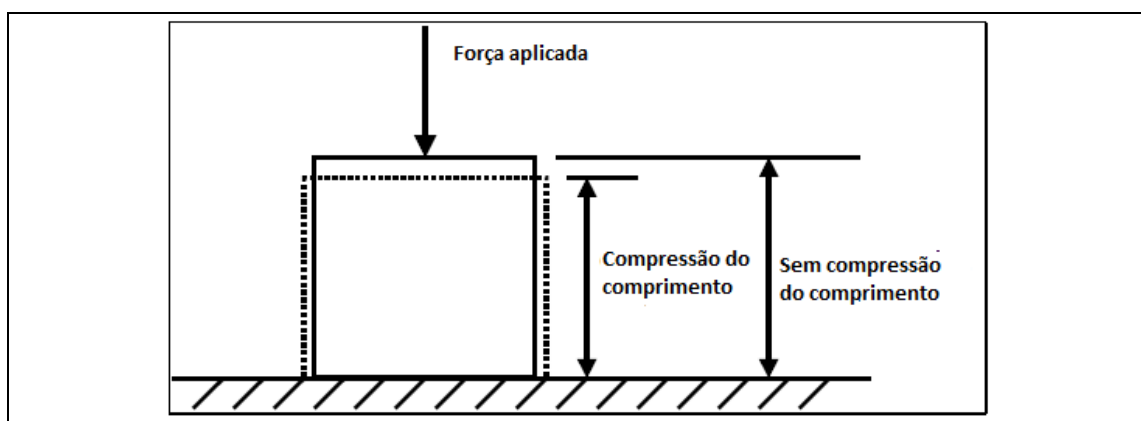


Figura 3 - Esquema básico de um elemento transdutor elástica [5].

Todos os dispositivos elásticos utilizam a mesma base de constituição, mas o método de medição da deformação do elemento elástico varia consideravelmente. O método mais comum é fazer medições de tensões, longitudinalmente e transversalmente, e quando este

método é realizado por calibração de resistência elétrica esse transdutor é conhecido por uma célula de carga de calibração de tensão. Células de carga do tipo de tensão são o tipo mais comum disponível comercialmente do transdutor de força.

Outro tipo de transdutor utilizado para a medição de força é baseado no fenômeno piezoelétrico constituído por determinados materiais cristalinos são aplicadas cargas elétricas na superfície do cristal, a quantidade de carga é proporcional à força aplicada. Estes dispositivos são agora muito utilizados.

Muitos outros relações físicas podem ser utilizadas em transdutores de medição de força como, por exemplo, os sistemas de pressão.

2.5.1 - Geometrias dos transdutores de força utilizando extensômetros

A geometria do elemento elástico usado nas células de carga depende de vários fatores, incluindo a zona de força a ser medido, os limites dimensionais, desempenho necessário e os custos de produção.

A Figura 4 mostra uma seleção de diferentes geometrias de transdutor de força com utilização de extensômetros elásticos e das suas capacidades comuns. Cada elemento é projetado para medir uma força que vai atuar ao longo de um eixo principal para não ser afetado por outras forças, como cargas laterais. As setas na figura 4 indicam o eixo principal de cada elemento.

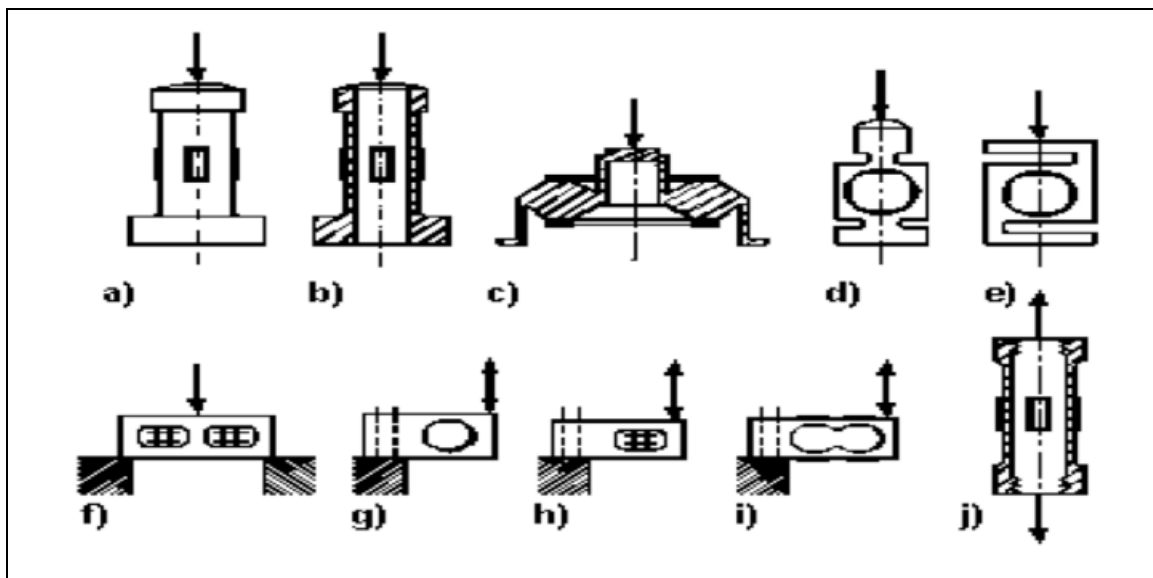


Figura 4 - Geometrias de transdutores utilizando extensômetros e eixos principais de aplicação de forças [21].

Legenda:

- a) Cilindro de compressão 50 kN a 50 MN
- b) Cilindro de compressão (oca) 10 kN a 50 MN
- c) Anel toroidal 1 kN a 5 MN
- d) Anel de 1 kN a 1 MN
- e) S-feixe (flexão ou cisalhamento) 50 N a 50 kN
- f) *Double-ended* 20 de feixe de cisalhamento kN a 2 MN
- g) Feixe duplo dobra (simplificado) 500 N a 50 kN
- h) Feixe de cisalhamento 1 kN a 500 kN
- i) De duplo feixe de dobra 5 N a 10 kN
- j) Do cilindro de tensão 50 kN a 50 MN

O material utilizado para um transdutor elástico com extensômetro é, normalmente, aço inoxidável, ligas de alumínio ou de cobre. A razão para a utilização destes materiais é porque apresentam uma relação linear entre a força aplicada e a tensão (potência), com baixa histerese e baixa fluência na zona de trabalho. Também deve ser garantido o grau de repetibilidade entre ciclos de força para assegurar que a célula de carga seja um dispositivo de medição fiável. Para atingir estas características é habitual submeter o material a um tratamento térmico especial.

2.6 - Extensómetros de resistência elétrica

Muitos transdutores de força utilizam um extensómetro na zona de deformação ou a combinação de vários extensómetros. A aplicação da força ao extensómetro faz com se deforme e esta deflexão é feita uma leitura por um medidor que converte em potência. Os valores de saída podem ser de sinal elétrico como num medidor de tensão de células de carga tipo LVDT. Estes extensómetros são conhecidos como dispositivos elásticos que são utilizados na maior parte dos transdutores de força convencionais. Existem tipos de extensómetros com várias formas podem ser circulares, quadrados ou retangulares.

Em termos elétricos, nos extensómetros por deformação de resistência elétrica pode ser considerado o comprimento do material condutor, como um fio. Quando o comprimento do fio é submetido a uma tensão dentro do seu limite elástico, o comprimento aumenta com diminuição do seu diâmetro logo a resistência elétrica também aumenta. Se o

material do condutor é ligado a um elemento elástico sob tensão, a sua resistência vai sofrer alterações quando for feita a sua medição. Esta alteração é utilizada para calcular a calibração do dispositivo através da força.

Os materiais mais comuns utilizados para o fabrico dos extensómetros eléctricos são o cobre-níquel, níquel-crómio, níquel-crómio-molibdénio e ligas de platina-tungsténio. Há uma variedade de calibradores de deformação por resistência disponíveis para várias aplicações, algumas dos quais são descritas abaixo. Cada extensómetro é projetado para medir ao longo de um eixo bem definido para que ele possa ser apropriadamente alinhado com o campo de deformação.

O extensómetro de tensão de folha é do tipo mais utilizado e em vários exemplos são mostrados na Figura 5, em que apresenta vantagens significativas sobre qualquer outro tipo de medidor de tensão e é utilizado na maioria das células de carga de precisão.

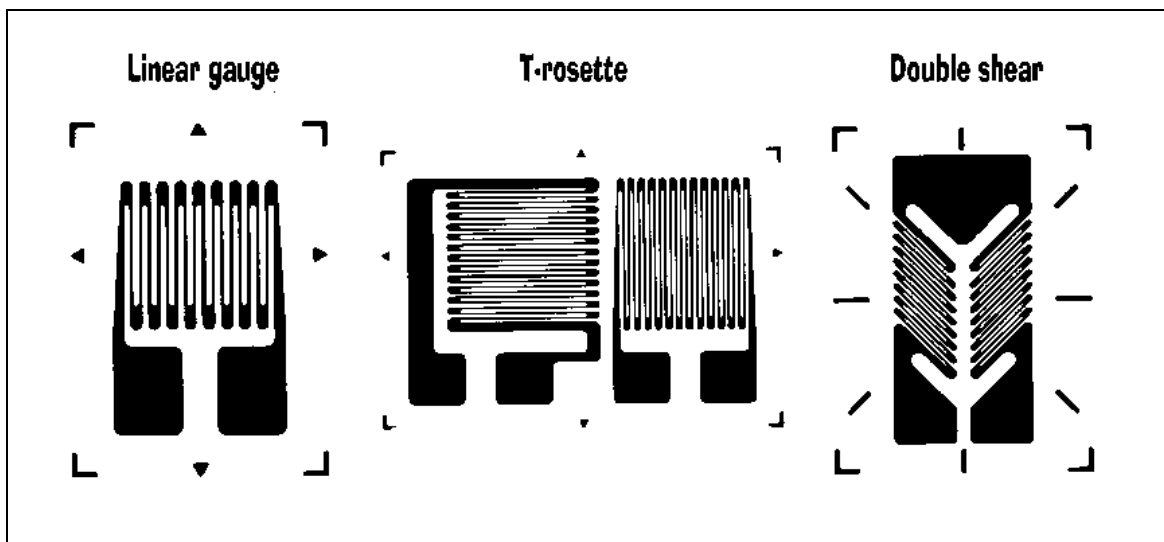


Figura 5 - Extensómetros de folha comuns de tensão [5].

2.6.1- Extensómetro de folha

O extensómetro de folha consiste num elemento com um formato de folha metálica, colocada sobre um suporte isolante, constituído por filamentos metálicos, 2-5 μm de espessura, sobre uma folha de suporte de 10-30 μm de espessura. As técnicas de produção utilizados são semelhantes aos utilizados na indústria de fabrico de circuitos impressos destinados à automação e de baixo custo unitário. Os materiais de revestimento comuns são epóxido, poliamida e resina epóxido fenólico reforçado com vidro. O revestimento fornece isolamento eléctrico entre a folha e o elemento elástico, facilita o manuseamento

e apresenta uma superfície flexível. Às vezes, no extensómetro é utilizado uma camada de fita adesiva, para facilitar a colocação, reduzindo o tempo de manuseamento. O epóxido ou um material derivado de epóxido é difícil de manusear devido à sua composição frágil, mas é o mais utilizado nas células de carga de alta precisão devido ao seu bom desempenho especialmente em deslizamento e a baixo nível de absorção da humidade. Existe uma grande variedade de modelos de folhas que estão disponíveis comercialmente.

2.6.2 - Extensómetros com película fina

Os extensómetros com película fina são produzidos por pulverização catódica ou evaporação por películas finas de metais ou suas ligas, quer diretamente sobre o elemento elástico ou num substrato metálico pequeno para ajudar na fixação do elemento. O fabrico de um sistema de um extensómetro com película fina vai passar por várias fases de evaporação e pulverização catódica e pode ter até oito camadas de material.

A resistência nominal do extensómetro varia com o tipo de aplicação. Extensómetros de fio têm resistências na faixa de 60 a 350 Ω , tiras e semicondutores calibres de 120 Ω a 5 k Ω e dos tipos de filme fino, aproximadamente, de 10 k Ω . Os critérios de seleção podem incluir o tamanho, o sobreaquecimento e requisitos de energia.

2.7 - Transdutores de força do tipo cristal piezoelétrico

Quando é exercida uma força sobre certos materiais cristalinos, são geradas cargas elétricas superfície do cristal, que proporcionais à força aplicada. Para a utilização num dispositivo, é necessário um amplificador de carga para dar um sinal que seja proporcional à força aplicada. Os primeiros transdutores a serem aplicados com sensores de piezoelétrico para medição era utilizado o quartzo extraído naturalmente, em contrapartida, hoje em dia a maioria de quartzo usado é artificial. Por causa disto, estes dispositivos são muitas vezes conhecidos como transdutores de força de quartzo, embora o termo mais usado é cristal piezoelétrico.

Estes sensores piezoelétricos de cristal (ver Figura 6) são diferentes da maioria das outras tecnologias de sensores por serem sensores ativos. Não é necessária alimentação de tensão e a deformação para obter um sinal, tem a vantagem de uma resposta com alta frequência do sistema de medição, sem introduzir modificações geométricas na medição da força.

São sensores que sofrem grandes impactos, como ondas de choques em sólidos, utilizados em prensas de impacto. Com outros sensores não poderia ser possível estas medições.

Sensores piezoelétricos trabalham com uma pequena carga elétrica e exigem um cabo de alta impedância para a interface elétrica. É importante a utilização de uma cablagem adequada para este tipo de transdutor.



Figura 6 - Célula de carga industrial do tipo piezoelétrico [22].

Sensores de cristal piezoelétrico são projetados principalmente para aplicações usando um parafuso pré-tensionado, que permite a medição de forças em tensão e compressão. Numa montagem de uma arruela ou anilha carga, é ilustrada na Figura 7. A pré-carga é importante para assegurar a máxima linearidade e o sensor deve ser calibrado depois de montar. Numa extensão deste princípio, são utilizados pinos de medição de força, que são colocados dentro da estrutura de uma máquina e mede as forças no interior da estrutura.

Há uma pequena perda de carga na ligação ao amplificador de carga, o que faz com que o sinal seja desviado. Assim, enquanto transdutores de força piezoelétricos são ideais para medições dinâmicas, mas não são adequados para medições estáticas. As medições podem ser feitas ao longo de um período de minutos ou mesmo horas, e transdutores piezoelétricos são referidos para fazer as medições "quase-estáticos".

Sensores de cristal piezoelétricos são adequados para medições em laboratórios, bem como, em instalações industriais. A faixa de medição é muito grande e os transdutores sobrevivem sobrecargas elevadas (tipicamente > 100% da sua produção em grande escala). Estes sensores podem trabalhar a altas temperaturas, até 350 °C.

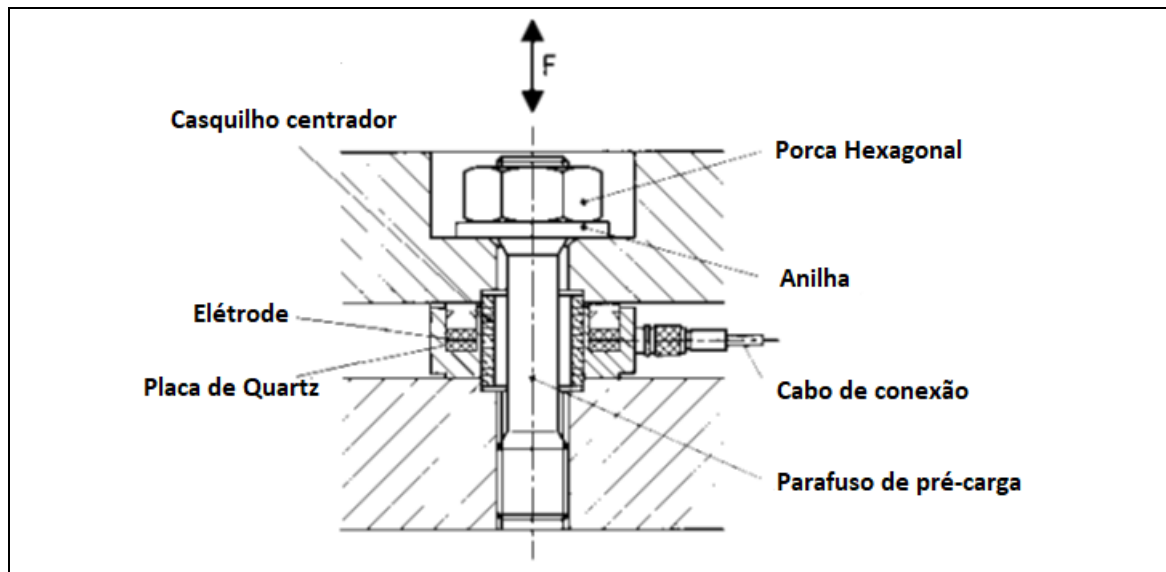


Figura 7 - Montagem de uma arruela ou anilha de carga [5].

2.8 - Medição de força por meio de pressão

2.8.1 - Célula de carga hidráulica

A célula de carga hidráulica é um dispositivo cheio com um líquido (normalmente óleo hidráulico), que tem uma pressão de pré-carga. Aplicação da força ao elemento de trabalho aumenta a pressão do fluido, que é medida por um transdutor de pressão ou com um manómetro de pressão de óleo.

Quando utilizado como um transdutor de pressão, as células de carga hidráulicas são inerentemente muito rígidas, desviando apenas cerca de 0,05 mm sob condições de força total. Embora estas células só tenham uma capacidade de carga máxima até 5 MN, a maioria dos dispositivos que estão disponíveis no mercado são de uma escala de 500 N e 200 kN. O sistema de medição de pressão utilizado para monitorizar a força, pode estar distanciado vários metros do dispositivo através da utilização de uma mangueira especial cheia de fluido.

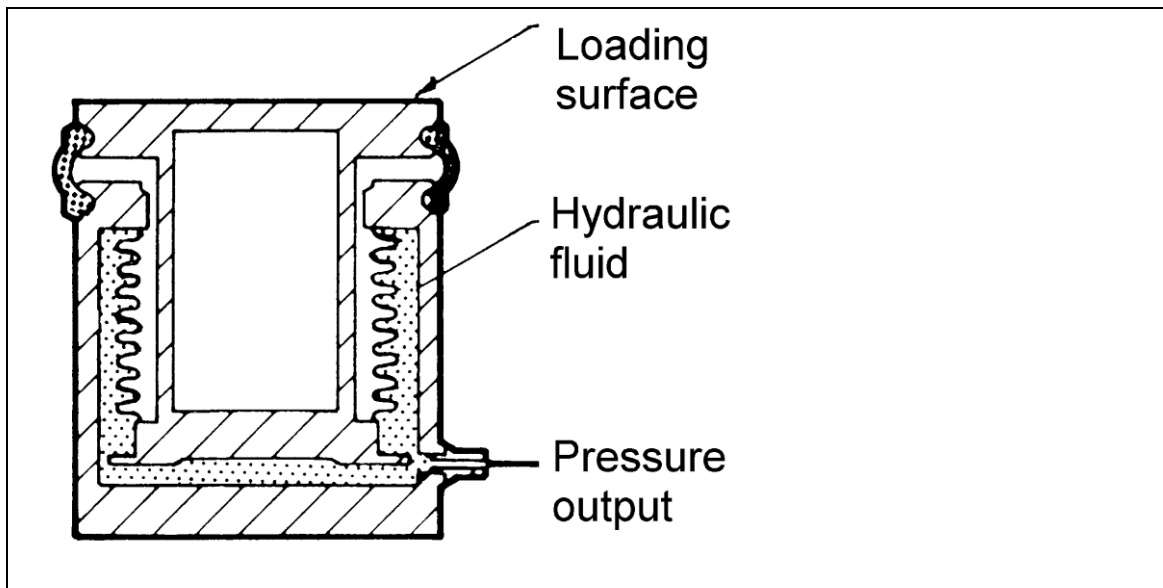


Figura 8 - Um exemplo de uma célula de carga hidráulica [5].

Células de carga hidráulicas, como a que se encontra ilustrada na Figura 8, são autossuficientes e não necessitam de alimentação externa. Elas são inerentemente adequadas para uso em atmosferas potencialmente explosivas e podem ser dispositivos de tração ou compressão. Com uma conceção cuidadosa e funcionando em condições favoráveis, o erro de medição pode ser inferior a 0,25%. Este tipo de células carga são sensíveis às variações de temperatura e, normalmente, têm que ser feita as instalações para ajustar a leitura de saída de zero, os coeficientes de temperatura são da ordem de 0,02% a 0,1% por °C.

2.8.2 - Células de carga pneumática

Os princípios de funcionamento da célula de carga pneumática são semelhantes aos da célula de carga hidráulica. A força é aplicada a um lado de um êmbolo ou um diafragma de material flexível e equilibrado por pressão pneumática sobre a outra extremidade. Esta pressão neutralizante é proporcional à força e é mostrado um mostrador de pressão.

O dispositivo consiste num sensor colocado na câmara com um suporte de ajustamento apertado. A pressão de ar aplicada à câmara acumula-se até que seja igual à força aplicada sobre a camara do lado posterior. Qualquer aumento adicional na pressão irá levantar a camara (êmbolo) permitindo que o ar possa ultrapassar o êmbolo até que o equilíbrio de pressão seja atingido. Nesta posição de equilíbrio, a pressão na câmara é uma indicação da força sobre o êmbolo e pode ser lido pelo calibrador de pressão pneumática.

2.9 – Aplicações de transdutores de força

2.9.1 - Máquinas de testes para materiais

Sistemas de transdutor de força são, geralmente, instalados em máquinas de teste de materiais para monitorar a carga, estes testes de amostras de material servem determinar as suas características de tensão, deformação e fadiga. Estas máquinas trabalham, geralmente, num único eixo e podem aplicar forças de tração e compressão.

2.9.2 - Testes dos componentes

Testes de componentes são importante em muitas indústrias, particularmente na indústria aeroespacial e indústria automóvel. Os componentes, partes maiores da estrutura e, às vezes, as estruturas completas são testadas sob condições de trabalho e simuladas. As medições podem ser feitas para as forças aplicadas e para as forças e no interior da estrutura, e este pode envolver a utilização de células carga convencionais.

2.9.3- Durante o processo de fabrico

2.9.3.1 - Instalação de cabos

Grandes quantidades de cabos são colocadas ao redor do mundo, seja submarina ou em valas no solo. Esses cabos podem ser de cobre ou de fibra ótica, e a força aplicada precisa de ser monitorizada e controlado para a eficiência da operação e para assegurar que o cabo não está sobrecarregado. Nos guinchos, normalmente, utiliza-se um rolo na colocação dos cabos e um motor linear para manusear o cabo, fixando-o entre pares de voltas de cabo. O cabo normalmente enrola ou desenrola próximo do eixo horizontal.

Para medir a força de tração, que é a reacção entre a máquina e o convés de montagem, o mecanismo de guincho linear ao manusear o cabo é suportado diretamente pela força de corte do pino, transdutores (ver Figura 9) com eixos horizontais.

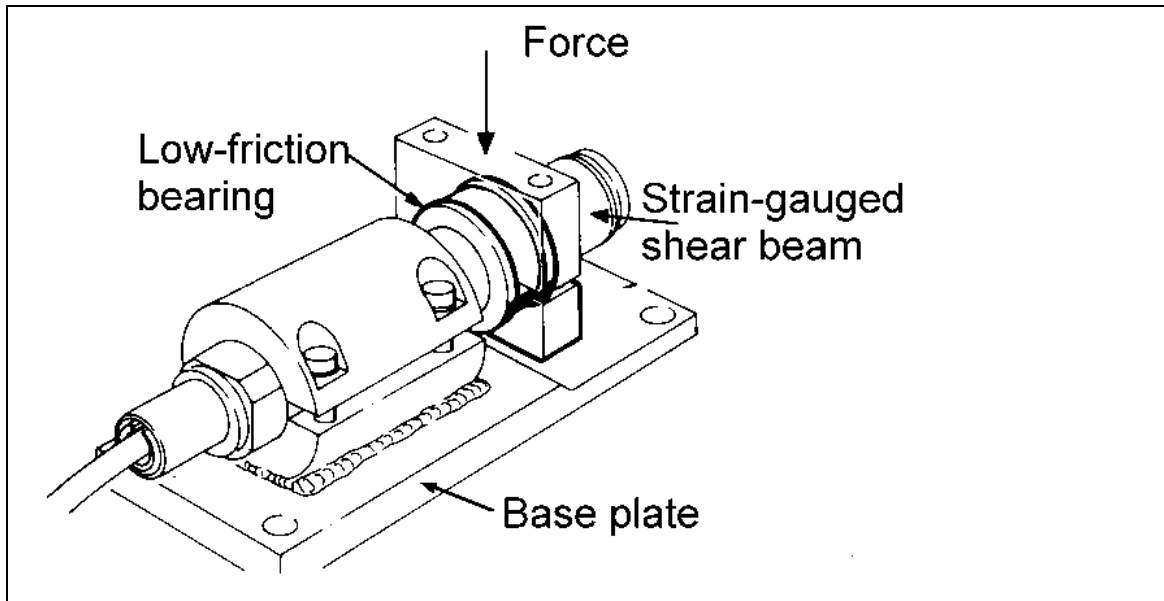


Figura 9 - Transdutor para medição da força de corte [5].

2.9.4- Processo de pesagem

2.9.4.1- Medição de força na pesagem

Determinação da massa ou peso de um produto é, muitas das vezes, um passo importante no processo de fabricação, e é conhecido como processo de pesagem. Mistura das cargas, camião de carga, embalagem e enchimento do reservatório de líquidos, gases ou sólidos são todos os processos que requerem a determinação exata do peso [23]. Um guia completo para a determinação da massa efetuado em laboratório. Em muitas situações no processo de pesagem usam-se células de carga para medir forças a partir do qual o peso do produto é derivado [19].

A determinação da força pode ser simples, a interpretação do componente gravitacional atuando sobre a massa pode não ser assim tão simples, como mostrado pelo exemplo no seguinte do recipiente de pesagem na Figura 10.

A Figura 10, por exemplo, mostra um tanque de suporte em quatro células de carga. Muitas das vezes, para reduzir o custo pode ser montada sobre uma célula de carga e dois apoios ou duas células de carga e dois apoios, e assume-se que força é igualmente distribuída entre os pontos ativos e não ativos.

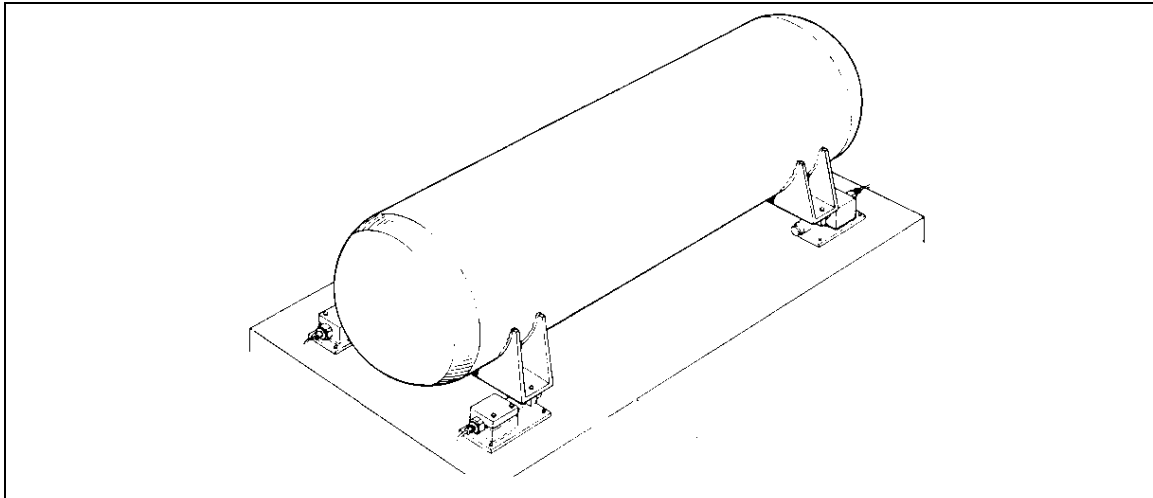


Figura 10 - Base suportada por quatro células de carga [5].

A pesagem de um tanque em movimento utilizando um transdutor de força, desta forma, a medição fica inconstante com as variações do centro de gravidade devido as cargas não ficaram equilibradas ou uniformes. A precisão de pesagem, com estes sistemas é, geralmente, pobre (embora, por vezes, aceitável para a medição de nível), mesmo se o material no tanque é um produto de auto-nivelamento ou outro líquido. Os efeitos das tubagens, acessórios e deformação não-linear do tanque vão provocar um movimento no centro de gravidade entre as condições vazias e cheios, bem como, afetar a força total vista pelos dispositivos de medição.

2.9.4.2- Requisitos de erros

Requisitos de erros de medição variam de acordo com a aplicação e, até mesmo, dentro da indústria para a mesma aplicação. As necessidades de erros menores são padrões da área de transferência de força, onde há erros de produção superiores a 0,005% da escala completa (FSO) e repetibilidade de 0,001% FSO ou melhor são obrigatórios. Um dos requisitos mais rigorosos nesta área é a inter-relação de máquinas de grande porte (muito pesadas) e, também, na calibração de pesos de massa. Incertezas muito mais elevados são, geralmente, encontrados em sistemas de proteção de sobrecarga, tais como, proteção contra sobrecarga nas gruas de elevação de navios, pesando sem apoiar plenamente o navio, onde 5% FSO - 10% FSO é, frequentemente, aceitável. Normalmente, a incerteza na maioria das outras aplicações será de 0,1% a 2% FSO.

2.10 - Escolha do projeto e operação do sistema

2.10.1 - Escolha do sistema de medição de força

Pode ser visto a partir dos tópicos anteriores que existe uma vasta escala de aplicações para medições de força em diferentes indústrias. A escolha do sistema de medição de

força só pode ser feita depois de considerar os detalhes específicos para a sua aplicação. O projetista deve considerar a escala de força a ser utilizada, o número de pontos de carga, a direção das forças estão à tração, em compressão ou ambos, a duração e a velocidade à qual a força é aplicada ao transdutor e as suas condições ambientais. Como resultado destas considerações, a escolha pode ser feita sobre um tipo de transdutores a ser utilizado, quantos serão necessários e de que qualidade, se são uni ou bidirecional, e se a força é aplicada num eixo ou multe eixo.

Também deve ser considerado a escolha da instrumentação a usar, a frequência e a quantidade de dados a serem recolhidos, bem como, o modelo do indicador e todas as ligações para uma aquisição de dados ou de um sistema de controlo.

O projeto do sistema de medição de força tem de cumprir os limites exigidos de incerteza, tendo em conta as incertezas de cada componente do sistema e sua calibração.

2.11- Capacidade operacional num transdutor

Normalmente, o transdutor deverá ser escolhido de tal forma que ele possa ser operado dentro da sua escala de carga a ser projetado. A consideração cuidadosa deve ser dada aos eventos potências de sobrecarga. Um transdutor pode estar em sobrecarga sem ser aplicado nenhuma força e pode comprometer a calibração do transdutor, especialmente sob carga dinâmica.

2.11.1- Número de transdutores

A decisão sobre o número de transdutores a utilizar pode ser influenciado por vários fatores. Esses fatores incluem a consideração do espaço disponível, exigência de capacidade total e as capacidades das células de carga disponíveis, o número de pontos de carga, requisitos de precisão e restrições de custo. Colocar transdutores em todos os pontos de carregamento irá reduzir a incerteza em relação ao uso de pivots ou cargas de células fictícias em alguns dos pontos de carga irá minimizar os efeitos de descentrar a carga e forças de flexão. Pode ser necessário usar vários transdutores para obter a capacidade necessária, ou pode ser benéfico para minimizar os modelos de diferentes dispositivos a serem suportados, mas o uso de vários transdutores pode incluir mais custos devido ao hardware e calibração.

2.11.2- Transdutor unidirecional ou bidirecional

A escolha da utilização de um transdutor de força unidirecional ou bidirecional é necessária quando ambas as forças de tração e compressão sejam medidas no mesmo

equipamento ou máquina. A escolha óbvia de um transdutor bidirecional é a vantagem de utilização de menos transdutores e tem uma montagem mais simples. No entanto, uma desvantagem é o erro da medição pode aumentar à medida que o ponto zero de força é abordado. Note-se que a transição através de zero irá introduzir erros adicionais. Em certas situações que requerem erros baixos, a utilização de dois transdutores unidirecionais pré-carregada contra o outro pode ser considerada, mas o desenho de um tal sistema é complexo. Quando for necessário medir forças bidirecionais, é importante que o sistema seja rígido e que o ponto zero de força seja bem definido mecanicamente, com folga reduzida.

Em muitas aplicações de medição de força, pode envolver a montagem de um transdutor num suporte de tração ou compressão, que, geralmente, é fixo num único apoio do transdutor, fixado por uma extremidade.

2.11.3 - Medição estática ou dinâmica

O sistema de medição de força deve ser capaz de medir as taxas de variação de força que são importantes para qualquer transdutor a ser utilizado e deve ter uma frequência natural de resposta superior à frequência máxima esperada do dispositivo. Como foi descrito anteriormente, alguns transdutores (tais como cristal piezoelétrico) são usados para as medições de alta frequência.

2.11.4 - Medição de forças com múltiplos componente

No caso de estarem a ser medidos vários componentes de força, o sistema pode compreender transdutores de uniaxiais alinhados para cada eixo requerido, ou usar um transdutor multi componente.

Dependendo do intervalo de medição de força, pode ser possível a utilização de um único sensor de força multi componente para resolver um problema de uma determinada medição.

2.12 - Instrumentação e leitura de dados

A instrumentação associada num transdutor de força pode variar, desde o mais simples, ao extremamente complexo. Cada tipo de transdutor tem determinado tipos de instrumentação associada e alguns exemplos são dados na Tabela 3. Os instrumentos podem incluir uma série de elementos separados e algumas combinações possíveis são mostrados na Figura 11.

Há, normalmente, um indicador sobre o instrumento, o que fornece o valor da medição em unidades de força (após calibração prévia) ou em unidades tais como mV ou mV/V. Além disso, o instrumento pode ser necessário para comunicar a saída diretamente a um sistema de aquisição de dados ou sistema de controlo. Esta saída pode ser analógica ou digital.

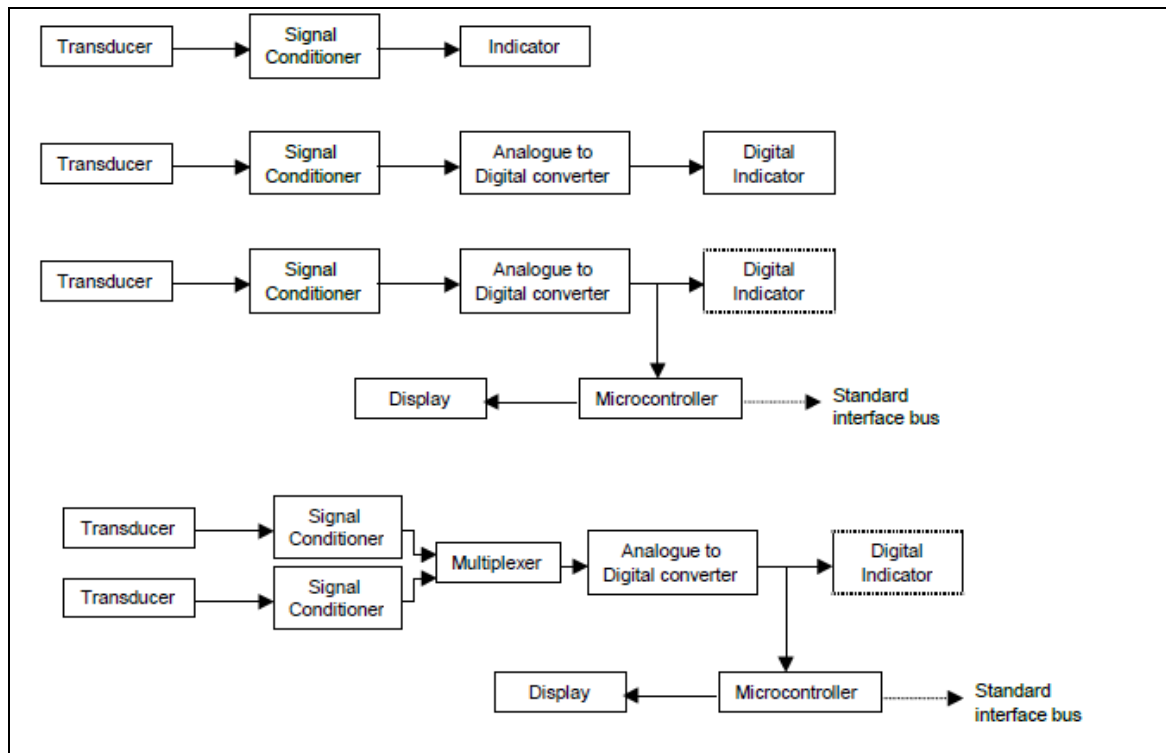


Figura 11 - Combinações típicas de instrumentação [5].

Saída analógica é, geralmente, de 0 V a 5 V em sistemas de instrumentação para uso em laboratório e de 4 mA a 20 mA para uso industrial [20]. Saída digital é, normalmente, por via de sistemas de comunicação eletrónico, tais como interfaces ou redes de campo, em que o nível especifica o tipo de ligações, os sinais disponíveis, a localização das ligações. As utilizações de saídas digitais permitem que diferentes instrumentos sejam facilmente adicionados a uma rede. Ver tabela 3.

A obtenção de dados de um sistema de medição de força é de particular importância quando as medições de forças mudam rapidamente. O projeto deve acomodar os requisitos técnicos que abordam a velocidade, período e volume de dados. A suscetibilidade de um sistema para o desenvolvimento de erros não detetados como calibrações devem ser consideradas. Estes erros podem ser corrigidos através da construção de redundância,

geralmente, usado dois transdutores de medição de força semelhantes para cruzar referência da sua medição. Monitorização de múltiplos canais pode introduzir erros de leitura devido à enorme quantidade de repetições (a situação em que todos os canais não podem ser lidos ao mesmo tempo e a força mudou ligeiramente entre as leituras dos diferentes canais). O deslocamento pode ser eliminado pela utilização de técnicas de amostragem e retenção.

Tabela 3. Instrumentação associada a tipos de transdutores comuns [5].

Tipo de transdutor	Saída	Instrumentação típica
Carregando coluna, Anel provando	Deflexão (comprimento)	Indicador de discagem
Strain célula de carga calibre	Tensão	Voltímetro. Muitas vezes combinados com a fonte de alimentação do transdutor e indicador digital de saída.
Piezoelétrico	Carga	Amplificador de carga
Hidráulica, pneumática célula de carga	Pressão	Medidor de pressão, tradicionalmente tubo de Bourdon, ou transdutor

2.12.1 Considerações do design e Segurança

O projeto de um sistema de medição de força deve incluir os requisitos de segurança necessários. Este trabalho não pode ser específico para uma determinada instalação e o utilizador deve ser totalmente responsável por todos os requisitos de segurança de qualquer aplicação em particular. O projeto de uma instalação deve abordar os riscos potenciais produzidos pela sua utilização desde o confinamento e transporte de energia em diversas formas. Deve ser dada atenção a esses riscos dentro do sistema de medição de força e seu dispositivo associado, em conjunto com a compatibilidade e necessidades das áreas e processos circundantes. Potenciais riscos de segurança podem incluir elétrica, mecânica, hidráulica, térmica, de radiofrequência, químicas ou fontes de luz de energia.

Quando um sistema de medição de força é projetado para operar num ambiente potencialmente explosivo, devem ser utilizadas regras apropriadas de design para um sistema operacional de segurança intrínseca [24].

No caso de flutuação de forças, a frequência natural da célula de carga e da própria montagem deve ser muito maior do que a frequência imposta, de maneira a evitar que o sistema entre em ressonância.

2.12.2 - Ambiente

O ambiente no qual o sistema de medição de força tem de trabalhar pode ter um efeito significativo sobre o seu desempenho. Os parâmetros a serem considerados incluem a temperatura, vibrações, a humidade, a natureza corrosiva do ambiente, a variação da pressão ambiente e da liberdade de movimento exigido pelo deslocamento de todos os transdutores de medição de força.

A proteção de um transdutor de força contra a penetração de objetos estranhos (incluindo mãos e ferramentas, pó, etc.) a proteção contra a humidade é, normalmente, dada por um código IP.

Temperatura torna-se um problema quando os limites de temperatura do sistema de medição de força e seus transdutores são aproximados ou ultrapassados. Neste caso, deve ser feita a medição da temperatura do transdutor e seu ambiente. Tanto a temperatura como a taxa de variação real devem ser medidas. O último é importante como gradientes de temperatura podem ocorrer e que poderiam afetar, significativamente, a precisão da leitura de medição de força.

Deve ser considerada a vibração induzida no sistema de medição de força. O projeto deve assegurar que a vibração é mantida dentro dos limites operacionais especificados. Os efeitos da humidade e atmosfera corrosiva sobre o sistema de medição de força pode ser abordada através de técnicas de normalização industriais.

2.12.3 – Espaço para instalação

Durante a conceção do transdutor de força deve ter-se em consideração o espaço necessário para permitir a sua instalação, calibração e manutenção, bem como, todos os componentes auxiliares, nomeadamente, o padrão de transferência, equipamentos de regulação de temperatura, dados de telemetria ou ligações de controle. No projeto do transdutor deve ser identificado a alimentação (cablagem) negativa e positiva para fins de monitorização ou controle, leituras específicas ou manuseamento, iluminação do espaço ou segurança dos equipamentos, incluindo possíveis constrangimentos e sistemas de isolamento.

2.12.4 - Montagem do transdutor de força

A localização e o alinhamento do transdutor de força e componentes de montagem dentro do transdutor precisam de ser avaliadas. Isso é para garantir que durante a operação não possam ser introduzidas forças laterais normais e momentos de torção desnecessários para a posição de carga ideal para ser utilizado.

A liberdade de circulação é essencial ao longo da escala de funcionamento da força aplicada, esta deve estar em ambas as direções, se as forças bidirecionais estão a ser medidas. O projeto deve, também, garantir que não há caminhos de carga paralelas (conhecidos como desvios de força), que podem influenciar no valor da força que é suposto ser medido pelo transdutor. Forças de Shunts podem estar presentes em todo o tempo (tal como através de ligação da cablagem) ou pode ocorrer quando o movimento do sistema é preso por batentes de sobrecarga.

Os encaixes das extremidades do transdutor devem ser concebidos para minimizar as cargas e momentos de flexão laterais para permitir que a força seja transferida para o transdutor ao longo de um eixo bem definido, normalmente, o eixo principal do transdutor. A interface do transdutor é removida da sua instalação do equipamento para fins de calibração, e não deve implicar qualquer ajustamento ou remoção de qualquer apoio roscado sobre o próprio transdutor de força.

2.12.5 - Operação da medição do sistema de força

A forma como o sistema de medição de força é operado pode ter um efeito significativo sobre os erros obtidos. Deve ser tomado cuidado para que a instrumentação e fontes de alimentação tenham o tempo necessário para aquecer antes da sua utilização (geralmente algumas dezenas de minutos), para que a temperatura do transdutor e instalação seja estável. Por vezes, pode apresentar erros de gradientes térmicos, mesmo quando o processo esteja em estado estacionário.

É uma boa prática monitorizar a saída aproximadamente no valor de zero como uma verificação regulada. Esta verificação é particularmente ótima para determinar quando o transdutor entra em sobrecarga e as suas características sejam afetadas. É importante assegurar que a força zero é realmente zero e repetível. Se a força zero não for adequada, deve ser usada outra força para verificação que o mecanismo está bem definido.

Outros cuidados devem ser tomados na instalação de ligação de cabos devido aos efeitos eletromagnéticos e termicamente induzidos sejam evitados.

Uma derivação da calibração pode ser realizada na célula de carga para verificar a instalação de comutação por um resistor através da ponte de Wheatstone (ver Figura 12). Isto coloca um desvio conhecido para a saída da ponte para simular uma carga que tenha sido determinado no momento de calibração do transdutor pelo fabricante. Os valores individuais são necessários para cada transdutor e alguns fabricantes só fornecem estes valores por encomenda especial. Uma derivação de calibração é uma verificação útil sobre o desempenho da parte elétrica do sistema, mas não é um substituto para uma calibração de força. Atenção especial para as ligações e cabos para a calibração do *shunt* devem ser realizados, caso contrário, podem ocorrer erros significativos. Se o cabo for cortado ou

estendido, em seguida, um fator de correção deve ser aplicada de acordo com as instruções do fornecedor. A melhor incerteza que pode ser esperada a partir de uma calibração de derivação é de 0,2%, mas isto não pode ser assumido a menos que o sistema fosse cuidadosamente avaliado.

Em aplicações de alta precisão, pode ser necessário uma verificação do funcionamento correto do sistema de medição de força antes e depois de eventos críticos. Sempre que possível estes controlos devem identificar a magnitude do erro de cada fonte.

Os controlos também devem identificar os erros produzidos pelos suportes do sistema, que podem assumir as formas de secção, limitação da liberdade de circulação, e outros efeitos indesejados de carregamento. Essas verificações de confiança devem ser uma parte do programa de manutenção regular. Verificações contínuas deverão também incluir provas que o transdutor de força e seu ambiente foram mantidos dentro dos limites requeridos.

2.13 – Instrumentação usada para dispositivos de calibração de tensão

A fonte de tensão ligada ao elemento elástico é um transdutor secundário que converte a tensão produzida pela força aplicada no elemento sofrendo alterações no valor da resistência. Quando ligado eletricamente numa configuração de ponte de Wheatstone, esta tem a vantagem de minimizar os efeitos das alterações ambientais tais como a temperatura que atuam igualmente em todos extensómetros elétricos. A alteração da resistência é detetada através da medição da tensão diferencial através da ponte (ver Figura 12).

Uma ponte de Wheatstone é, normalmente, constituído por quatro extensómetros, embora não seja raro usar dois extensómetros para uma "meia ponte", ou mais do que quatro elementos elásticos em formas mais complexas. Neste último caso, a metade do número total de extensómetros são submetidos a tensões de compressão e a outra fica sujeita a tensões de tração. A tensão de saída da ponte quando excitado por uma tensão de entrada é linearmente relacionada com a alteração da resistência dos medidores de tensão e, portanto, é uma função da força aplicada ao elemento. Pode ser mostrado que a tensão de saída é o produto matemático da tensão e a tensão de excitação. A potência nominal de uma célula de carga pode ser normalizada num nível nominal, geralmente, dois mV / V (2 milivolt saída por volt aplicado), mas isto pode variar de 1 mV / V para 4 mV / V.

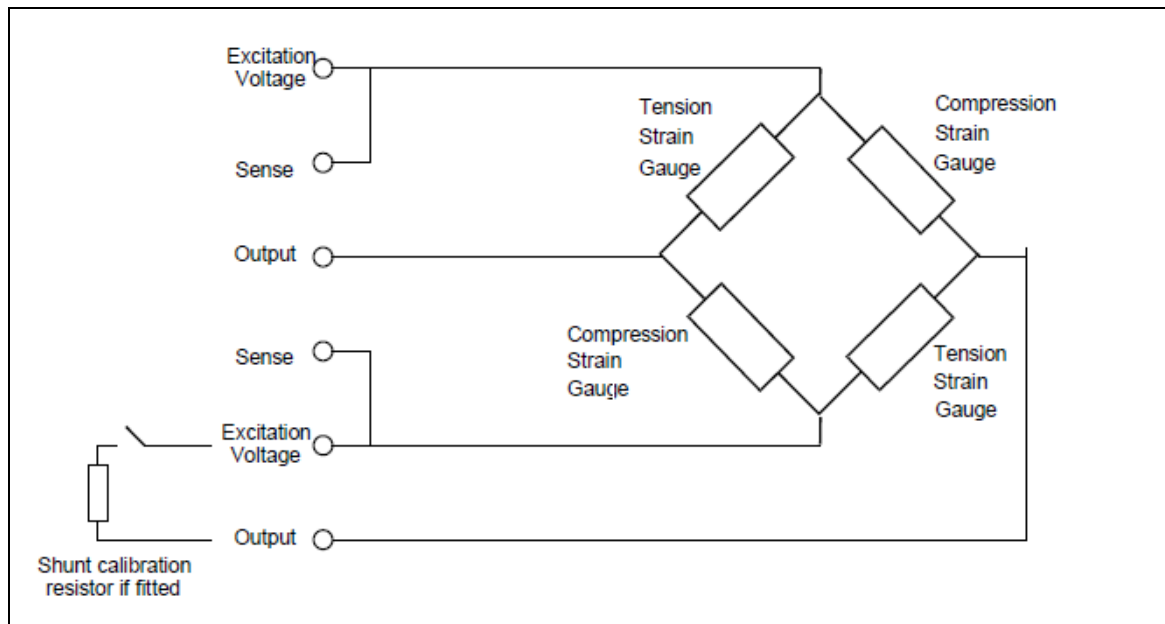


Figura 12 - Esquema básico de quatro medidores de tensão em uma célula de carga [5].

Um resistor de derivação pode ser necessário para realizar uma calibração do *shunt* (ligação) e esta é muitas vezes montado numa unidade de sinal condicionado para ser ligado através de um braço da ponte quando necessário. O *Shunt* altera os valores de resistência de calibração utilizado numa ponte de $350\ \Omega$ são $40\text{k}\Omega$ e $80\ \text{k}\Omega$ que equivale a, aproximadamente, 90% e 45% da carga total de um $2\ \text{mV} / \text{V}$ transdutor.

Uma célula de carga é parte de uma cadeia de medição, e que exige uma fonte de tensão a ser fornecida e de amplificação e condicionamento do sinal de saída antes de poder ser significativamente exibido ou utilizado num sistema de controlo.

Normalmente, um sistema DC fornece a célula de carga uma tensão de corrente contínua (CC) e amplifica a saída através de um amplificador de instrumentação. Esta cadeia possui uma gama de frequências grandes, com alta estabilidade e custo relativamente baixo.

Em aplicações industriais, a distância entre a célula de carga e o instrumento de medição pode ser considerável, possivelmente distâncias de centímetros. A queda de tensão ao longo do cabo de conexão e a sua resistência à temperatura pode contribuir para o erro do sistema. Este erro adicional pode ser resolvido através da utilização da técnica de ligação de seis fios mostrado na Figura 12. A tensão é detetada numa célula de carga e é mantido a um nível pré-definido constante.

Uma alternativa para a alimentação DC (corrente contínua) é o sistema de AC de corrente alternada, que fornece a célula de carga um sinal AC onda sinusoidal, onda quadrada ou outra entrada que varia periodicamente. A saída é processada através de um amplificador de AC, um desmodulador síncrono, filtro e amplificador DC. Um sinal de corrente

contínua de alto nível é obtido em um valor adequado para um conversor ou para um conversor analógico ou digital, com a utilização de um conversor analógico-para-digital (ADC) este sistema tem uma maior resistência aos efeitos térmicos na instrumentação e efeitos termoelétricos no transdutor, a rejeição de ruído elevado, boa estabilidade do valor de saída com zero forças e obter um bom isolamento entre o sinal de saída e a célula de carga. No entanto, tendo em conta que esta forma de medição é relativamente complexa e estes sistemas costumam a ser caros.

Numa utilização que seja necessário obter um valor com muita precisão é necessário eliminar o fator da temperatura no elemento elástico.

Geralmente, é necessário proteger o elemento elástico, estes instrumentos de medida ou componentes eletrônicos utilizados em muitas células de carga estão expostos a ambientes industriais agressivos. A forma da célula de carga é instalada, dependendo da aplicação a que se destina, e existe uma grande variedade de formas e tamanhos, incluindo cilíndrica, retangular e feixes circulares e dispositivos de tensão como tensores. O invólucro (cápsula ou suporte) deve ter pontos de fixação adequados tais como parafusos ou suportes porque são importantes na obtenção do valor mais do elemento elástico. O invólucro utilizado para este fim pode desempenhar outras funções, tais como a limitação das forças laterais sobre o elemento e como proteção dos vários componentes elétricos. Vários tipos de células de carga são apresentados na Figura 13 e os outros serão referidos na Tabela 4.



Figura 13 - Uma gama de células de carga industriais [5].

Tabela 4 resume os recursos que podem ser necessários em muitas aplicações de medição de força, e que devem ser considerados para qualquer nova instalação.

Tabela 4. Lista de verificação dos requisitos potenciais de um sistema de medição de força [5].

<p>Força aplicada Força máxima Trabalhando gama vigor Deslocamento de origem Exigência de sobrecarga Carga estática / dinâmica Incerteza exigido Carga lateral Carga inclinada Carga bidirecional Carga multe eixo Classificação fadiga Os níveis de vibração</p> <p>Mecânico Deflexão Orientação célula de carga Mudança de orientação Compartilhamento de carga igual Número de pontos de carregamento Flexures / restrições Carregamento direto Pivôs Construção sujeira</p>	<p>Calibração Célula de carga Sistema Direta / indireta deadweight Padrão de transferência shunt</p> <p>Ambiente Molhado / húmido Imersão Poeira Vedação específica exigida Corrosivo Perigoso Faixa de temperatura Higiénico</p> <p>Instrumentação Analógico / Digital Resolução Exibição local / remota Repita exibição</p>	<p>Abastecimento - rede elétrica AC - Baixo V DC - Bateria</p> <p>Pontos de viagem Habitação Saídas O sensor de tensão Comprimento do cabo O ruído elétrico Área de risco Filtragem</p> <p>Configuração de Sistema Várias saídas para redundância Ajuste de compartilhamento de carga - Mecânico - Elétrica</p> <p>Instrumentação Caixa de junção Conexão célula de carga - Cabo - Conector</p> <p>Normas para verificação / conformidade</p>
--	--	--

2.14 - CALIBRAÇÃO

Os tópicos anteriores referem-se à escolha, operação e projeto dos sistemas de medição de força e sua respetiva instalação. Mesmo com transdutores apropriados e conceção do sistema, as medidas não podem ser invocadas sem algum controlo sobre o desempenho do sistema. Efeitos inesperados de instalação, a degradação do equipamento ao longo do tempo ou o abuso do utilizador podem levar a medições cujo erro é superior ao definido pelo projetista. Por conseguinte, as calibrações iniciais e subsequentes são necessárias para garantir que a medição da força satisfaça as necessidades do utilizador e atinja o grau definido do erro.

A calibração de um sistema de medição de força requer uma compreensão da rastreabilidade, normas, metodologias, procedimentos e análise dos dados.

2.14.1 - Normas e rastreabilidade

Rastreabilidade e as normas oficiais são a melhor maneira para garantir a precisão das medições e da consistência das medições entre vários operadores, em diferentes momentos e locais. A medição rastreada é aquela que pode estar relacionado com um padrão primário através de uma cadeia de calibrações.

Padrões primários são, normalmente, definidos a nível nacional ou internacional por um único instrumento de medição autoritária conhecido como um padrão nacional ou padrão internacional. Rastreabilidade, habitualmente, significa que as calibrações foram realizadas pelo laboratório nacional de padrões (por exemplo NPL no Reino Unido), por um laboratório acreditado (por exemplo, um credenciado pelo UKAS), ou por um laboratório nacional ou acreditados em outro país com o qual existe um acordo de reconhecimento recíproco.

Máquinas capazes de realizar calibrações de força são conhecidos como máquinas normalizadas de força e elas podem ser classificados como primário ou secundário. Máquinas normalizadas primários na medição de força são aqueles cujo erro pode ser verificado através de princípios físicos diretamente para as unidades de base fundamentais de massa, comprimento e tempo. Máquinas normalizadas secundárias são aquelas que podem reproduzir forças com fiabilidade e serem comparados com padrões primários através da utilização de um padrão de transferência de força, que é um transdutor de força calibrado, frequentemente, um tipo de células de carga calibrada.

Tipos de máquinas normalizadas de força e suas características são fornecidas na Tabela 5. Os instrumentos utilizados durante a calibração em si devem ter uma rastreabilidade total, quer por calibração do sistema de medição de força completa do transdutor e instrumentação em conjunto, ou separadamente para a instrumentação de calibração.

Tabela 5 - Tipos de equipamento padrão de força.

Tipo de máquinas	Princípio da Operação	Incerteza*	Categoria
Máquinas de porte bruto	Uma massa conhecida é suspensa no campo gravitacional da Terra e gera uma força sobre o apoio	0,001%	Primário ou Secundário

Máquinas hidráulicas de amplificação	Uma pequena máquina de inércia se aplica uma força a um conjunto de êmbolo-cilindro e a pressão assim gerada é aplicada a um conjunto de êmbolo-cilindro maior	0,02%	Secundário
Máquinas de amplificação Lever	Uma pequena máquina de peso morto com um conjunto de alavancas que amplificam a força	0,02%	Secundário
Máquinas transdutor de força de referência	Um ou mais padrões de transferência de força estão colocadas em série com o instrumento a ser calibrado (tipicamente em uma máquina de ensaio de materiais)	0,02%	Secundário
Máquinas transdutor de força de referência	Um ou mais padrões de transferência de força estão colocadas em série com o instrumento a ser calibrado (tipicamente em uma máquina de ensaio de materiais)	0,02%	Secundário

* "Incerteza" relaciona-se com o menor valor normalmente atingível num ambiente de laboratório

2.14.2 - Calibração da tensão nas células de carga

O tipo de transdutor de força mais utilizado são do modelo de elemento elástico (ou geometria elástica), usado na célula de carga para medição de tensão. Cada célula baseia-se num elemento elástico para que cada número de medições de tensão por resistência

elétrica esteja interligado. A forma geométrica e o módulo de elasticidade do elemento a determinar a magnitude do campo de tensão produzida pela ação da força.

As capacidades nominais das células de carga na calibração da tensão normalmente variam entre 5 N até 50 MN, estes são os transdutores de medição de força com mais precisão. Eles podem ser usados como indicadores digitais de alta resolução como padrões de transferência da força.

2.14.3 - Metodologia de calibração

Existem três opções principais de calibração disponíveis para estabelecer o erro do sistema de medição de força. A primeira é deixar o transdutor de força na sua posição permanente de instalação e usar um padrão de transferência para recolher as calibrações. A segunda é para calibrar o transdutor de força e remover antes da instalação e para novas calibrações. A última opção, é para calibrar o transdutor de força antes da sua instalação permanente no sistema de medição de força e não se deve recalibrar durante o tempo da instalação.

2.14.3.1 - Transdutor permanentemente instalado com o padrão de transferência

A opção preferida para um sistema que requer um nível baixo de erros é instalar, permanentemente, o transdutor de força, de seguida, usar um padrão de transferência para fornecer calibrações regulares. Antes da instalação serem completas do transdutor de força permanente deve ser calibrado ao longo de sua faixa operacional, sempre que possível replicar o previsto nas condições de funcionamento, incluindo a escala, a direção, a taxa de mudança, e a duração da força aplicada, bem como, a temperatura e a simulação de um ciclo comum de trabalho. Esta calibração inicial, pode ter sido realizada pelo fabricante antes da entrega e é usada para determinar a fluência, o não retorno ao “zero”, histerese e não-linearidade.

Nos intervalos apropriados durante a vida útil do sistema, um padrão de transferência é instalado no dispositivo em série com o dispositivo permanente e as saídas são comparadas ao longo de uma escala de forças aplicadas. Estas calibrações garantem que o nível de erro é mantido, e também alterações auxiliares na identificação de qualquer problema na instalação ou transdutor. A utilização de calibrações automatizadas pode ser apropriada quando se pretende obter baixos níveis de erros. Calibração automatizada podem obter mais precisão das condições operacionais do transdutor de medição de força, portanto, pode reduzir os erros do sistema.

2.14.3.2- Transdutor de força removível

Se o transdutor de força pode ser removido a partir da instalação, em seguida, para além da calibração inicial, o transdutor pode ser removido periodicamente para recalibração contra um padrão. Este método permite uma calibração mais precisa para o transdutor, mas pode não ter em conta incertezas da instalação como o atrito e o alinhamento. A instrumentação pode ser calibrada com o transdutor ou separadamente contra um outro padrão.

2.14.3.3 -Transdutor de força permanentemente instalados sem o padrão de transferência

Um transdutor de força poderá ficar instalado, de forma permanente, se não for possível removê-lo para efetuar calibrações periódicas, neste caso, só é realizada a calibração inicial. A calibração inicial deve estabelecer um nível de incerteza dentro dos requisitos do sistema para acomodar desvios e deterioração no transdutor de força durante sua vida operacional. Alguma confiança na incerteza operacional em curso pode ser alcançada realizando periodicamente uma calibração de shunt e verificando um ou mais pontos operacionais bem definidos, incluindo força aplicada zero. Quaisquer reivindicações de rastreabilidade para tais sistemas precisam levar em consideração a incerteza associada ao método de calibração de derivação. O uso de transdutores de força com mais de uma ponte de extensómetros pode aumentar a confiança da medição, comparando a saída de um com o outro e fazendo com que o sistema relate desvios fora dos limites predefinidos.

2.14.4 - Os procedimentos de calibração

2.14.4.1 - Especificação da calibração

Ao planear a calibração de um sistema de medição de força, é necessário considerar as seguintes questões:

Quando calibrar?

Diferentes transdutores são operados sobre diferentes condições e com diferentes especificações de erros são necessários recalibrar em diferentes intervalos. Um bom ponto de partida para decidir sobre intervalo de calibração será o manual do fabricante para o dispositivo, em particular a especificação para a estabilidade a longo prazo. Se, depois de várias calibrações, for evidente que o intervalo de tempo é muito longo (a sensibilidade muda significativamente em cada operação) ou intervalos de tempo muito curtos (não há nenhuma alteração significativa da sensibilidade), em seguida, o período pode ser ajustado de acordo com [25]. No entanto, os períodos de recalibração são apenas uma

recomendação e aplicam-se a condições normais de serviço, normalmente os prazos baseiam-se em experiências empíricas para definir o período para a recalibração. No entanto, existem vários fatores que podem influenciar a necessidade de uma maior ou menor frequência de calibrações, incluindo:

- Condições ambientais
- As ramificações de transdutores operacionais que não executam a especificação e as consequências de contar com os dados imprecisos assim produzidos
- A frequência e duração de utilização
- Tratamento severo do transdutor durante o armazenamento, transporte ou uso
- O nível de precisão exigido pelo utilizador
- Os requisitos de procedimentos de GQ

Em última análise, é o utilizador que determina o período de calibração adequado, tendo em conta o ambiente operacional e os requisitos de desempenho.

A possibilidade de efetuar a operação internamente ou subcontratado?

Com o conhecimento adequado, calibrações pode ser levada a cabo com sucesso por parte do utilizador sem enviar instrumentos para um laboratório externo. No entanto, a criação de uma facilidade de calibração interna pode exigir investimentos consideráveis em equipamentos e de formação (treino). Muitas vezes, é melhor ter o trabalho feito por um laboratório especializado, de preferência um que detenha acreditação de medição reconhecido.

Calibrar em local ou em laboratório?

O ambiente ideal para uma calibração de um instrumento é, geralmente, considerado para ser um laboratório, onde pode ser fornecidas condições controladas de referência e estáveis. No entanto, muitas vezes há boas razões para a realização da calibração local como conveniência, custo, para evitar perturbar o instrumento, ou para calibrá-lo nas condições exatas da sua utilização.

Calibrar o sistema inteiro ou apenas o transdutor?

Normalmente, é preferível calibrar a medição de toda a cadeia de transdutor ao indicador usando os mesmos cabos, são usados instrumentos e fontes de alimentação durante a operação normal. Por vezes, esta é impraticável no caso em que o transdutor e instrumentação devem ser calibrados separadamente devido a normas de rastreamento.

Se é necessário solicitar os ajustes?

A calibração é, por vezes, considerada como significando "o ajuste de um instrumento para ler corretamente", o que não é verdade. Calibração e ajuste são conceitos bastante distintos, e os dois não devem ser confundidos. Assim, ao organizar para a calibração de um sistema de medição de força, é importante estabelecer claramente se o sistema está a ser ou não ajustado, bem como, calibrado. Se assim for, deve ser especificado se a informação de calibração é necessária somente após o ajuste.

Qual é o nível de incerteza exigido?

Tanto na calibração e utilização de um sistema de medição de força, o nível de incerteza precisa ser considerado. Alguns tipos de incerteza podem ser quantificados com base em técnicas estatísticas, tais como, desvio padrão ou a dispersão, e estes (frequentemente relacionado a efeitos aleatórios) são conhecidos como componentes do tipo A. As incertezas obtidas por qualquer outros métodos são conhecidos como componentes de tipo B. A incerteza combinada para uma medição é a combinação de todas as fontes de incerteza para uma determinada medição. É comum sintetizar as incertezas individuais usando os "soma raiz quadrados" método para obter uma incerteza combinada. Assim:

$$\text{Incerteza combinada} = [(u_1)^2 + (u_2)^2 + \dots + (u_n)^2]^{0,5}$$

Onde u_1, \dots, u_n são os componentes individuais de incerteza, todos expressos no mesmo nível de confiança e nas mesmas unidades. Enquanto existir incertezas em todos os momentos na utilização de um sistema de medição de força, muitas vezes, o único momento em que são especificamente referidos é, durante o processo de calibração. Para mais informações sobre as incertezas na medição de força, ver [26].

O nível de incerteza exigido para a calibração de um sistema de medição de força pode ser determinado pelo utilizador. As necessidades dependem da aplicação e pode ser definido pelo processo (como em controle de processo), por meio de regulamento (tais como saúde e segurança), ou pelos padrões da indústria particular. A calibração deve ser suficiente para atender a essas necessidades, mas seria um desperdício para calibrar a muito alto padrão. Se o requisito de medição de força é $\pm 5\%$ da força aplicada, então seria um exercício dispendioso e inútil para calibrar o dispositivo numa máquina de inércia quando uma máquina de ensaio de materiais poderia fazê-lo. Como orientação, a incerteza de medição da máquina de calibração deve ser três vezes melhor que a precisão exigida do sistema a ser calibrado. Por exemplo, se o requisito de incerteza no transdutor for de 3%, a incerteza da força de calibração deve ser inferior a 1%.

Qual a direção e a faixa de operação da força?

A seleção da gama de medição deve ser cuidadosamente considerada. Um dispositivo é calibrado, normalmente, em toda a sua gama completa de tração e/ou de compressão, mas, se for sempre apenas usado em, por exemplo, 20% da força nominal, não seria

necessário calibrar-se para 100%. Neste caso, calibrações limitadas são aceitáveis, desde que o dispositivo seja usado apenas dentro de sua faixa de calibração.

Quais são as condições de fim de carga na aplicação?

As condições de carregamento final na calibração devem corresponder o mais próximo possível às da aplicação.

Qual é a faixa de temperatura para a aplicação?

O transdutor deve ser calibrado na faixa de temperaturas operacionais ou a sua sensibilidade à temperatura deve ser determinada de outra forma, possivelmente, a partir da especificação do fabricante, e a incerteza deve incluir os efeitos da temperatura [5].

2.14.5 - A realização da calibração

Uma avaliação das incertezas de medição atribuída ao equipamento de calibração e método devem ser calculados e avaliados. Isso incluirá todos os aspectos, como a incerteza do dispositivo de aplicação da carga, os efeitos ambientais, efeitos de carregamento, etc. Uma quantidade percentual, seja calculada ou estimada, é atribuída a cada um dos efeitos que possam estar presentes.

Antes de tomar quaisquer leituras de calibração do transdutor deve ser pré-carregado até, pelo menos, a sua força nominal, ou, de preferência, um valor superior (tipicamente 10% acima), e voltar a zero várias vezes.


Geralmente, num ciclo de calibração completa a força é aplicada de forma incremental até à força nominal e, de seguida, reduzida até zero. O resultado é a curva de calibração, que é usado para estabelecer os valores de calibração de sensibilidade, a linearidade, e histerese.

2.14.6 - Repetibilidade

Repetibilidade é, provavelmente, o fator mais importante porque ajuda a definir o transdutor de força adequado para a função pretendida. Dependendo da incerteza de medição exigida é aconselhável calibrar o dispositivo com a mesma força, no mínimo, duas ou três vezes. Na sequência da avaliação para a repetibilidade é aconselhável verificar a reprodutibilidade num curto prazo do dispositivo. O método mais comum e mais simples é remover e substituir o transdutor na máquina de calibração antes de realizar o próximo ensaio de calibração.

2.14.7 - Análise dos dados de calibração


Análise dos dados de calibração, muitas vezes, são realizados pelo laboratório de calibração e são fornecidas ao utilizador o certificado de calibração quando o transdutor é desenvolvido. Um exemplo de um certificado de calibração é apresentado na Figura 14.



NATIONAL PHYSICAL LABORATORY
Teddington, Middlesex, UK, TW11 0LW, Telephone: +44 20 8977 3222

Certificate of Calibration

UKAS
CALIBRATION
0175



STRAIN GAUGE LOAD CELL
1000/2C

This certificate is issued in accordance with the laboratory accreditation requirements of the United Kingdom Accreditation Service. It provides evidence of measurement in accordance with national standards, and is valid for measurements made in the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

FOR	National Physical Laboratory Hampson Road Teddington Middlesex TW11 0LW
IDENTIFICATION	A compression strain gauge load cell, made by NPL, with a serial number 1000/2C and a nominal capacity of 1 000 kN. A digital indicator, made by NPL, with a serial number D1-6331. A ball seating unit was provided for use in compression. A load cell cable, with a serial number NPL 689.
BASIS OF CALIBRATION	BS EN ISO 376:2004
DATE OF CALIBRATION	5 February 2013
CLASSIFICATION	The load cell satisfies the requirements of BS EN ISO 376:2004 for the following classification range: Interpolation Compression Class 00 1 000 kN down to 20 kN

The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k=2$, providing a level of confidence of approximately 95%. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with UKAS requirements.

Reference: E9901029X

Page 1 of 4

Date of Issue: 7 February 2013

Signed: *[Signature]* (Authorised Signatory)

Checked by: *[Signature]*

Name: A N Other (for Managing Director)

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY
Continuation Sheet

STRAIN GAUGE LOAD CELL
1000/2C

METHOD

The calibration was made in NPL's 1.2 MN national force standard machine in terms of the SI unit of force, the newton. The uncertainty of the forces applied by this machine is 0.001 % of the applied force.

A force of 1 000 kN was applied six times in compression before three calibration tests. The forces were applied through the ball seating unit provided, located centrally.

Four tests were made in compression. The forces were applied through the ball seating unit provided, located centrally on the load cell.

The calibration was made with the digital indicator provided.

MEASUREMENTS

- The bearing pad test, Clause B.2 of Annex B of BS EN ISO 376:2004, had been carried out during a previous calibration at NPL, certificate 08C01194262FM1675, dated 27 October 1994. The load cell satisfies the requirements of the bearing pad test for the following classification range:

Class 00 1 000 kN down to 20 kN
- The temperature of the load cell during the calibration varied between 21.4 °C and 21.7 °C. The temperature was measured using a thermometer, serial number 1253, provided by NPL. The uncertainty of the temperature measurement was ±0.5 °C.
- The indicator reading at zero applied force during the calibration varied between -2.935 units and -2.855 units.
- The forces applied and the resulting deflections are given in Table 1; no correction for temperature has been applied to these results.
- A calibration factor, in units per kN, was calculated for each incremental force value by dividing the estimate of the mean deflection by the applied force. The coefficients of second degree equations relating the calibration factor to the applied force, and the inverse of the calibration factor to the mean deflection, were then calculated by the method of least squares. These coefficients, which can be used to express applied force as a function of deflection, and deflection as a function of applied force, are given in Table 2.

Reference: E9901029X

Page 2 of 4

Checked by: *[Signature]*

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY
Continuation Sheet

STRAIN GAUGE LOAD CELL
1000/2C

RESULTS

Table 1: Compression

Test number: Orientation:	1 0°	2 0°	3 120°	4 240°	Unbiased estimate of m_{cal} *
Force kN	Deflection units				
20	20.115	20.115	20.115	20.115	20.120
50	50.275	50.280	50.270	50.275	50.275
100	100.520	100.525	100.505	100.510	100.515
200	200.940	200.940	200.920	200.925	200.920
300	301.230	301.240	301.215	301.225	301.225
400	401.470	401.470	401.435	401.450	401.450
500	501.095	501.010	501.490	501.585	501.560
600	601.525	601.610	601.595	601.595	601.575
700	701.545	701.555	701.435	701.495	701.495
800	801.380	801.360	801.225	801.310	801.305
900	901.020	901.010	900.960	900.975	900.985
1 000	1 000.660	1 000.650	1 000.570	1 000.545	1 000.590
900			900.960	900.935	900.935
800			801.225	801.250	801.275
700			701.360	701.425	701.420
600			601.505	601.570	601.560
500			501.550	501.610	501.600
400			401.465	401.485	401.485
300			301.255	301.265	301.250
200			200.930	200.930	200.935
100			100.490	100.495	100.495
50			50.250	50.260	50.255
20			20.105	20.110	20.105

* For increasing forces, the unbiased estimate of mean is given by the average of the results of Tests 1, 3, and 4. For decreasing forces, the estimate of the mean is given by the mean value for the corresponding increasing force corrected for the average hysteresis observed in Tests 3

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY
Continuation Sheet

STRAIN GAUGE LOAD CELL
1000/2C

Table 2: Coefficients

For a given measured deflection D (in units), the applied force F (in kN) is calculated thus:

$$F = a_1 D + a_2 D^2 + a_3 D^3$$

where:

for a compression force
$a_1 = 0.994\ 207$
$a_2 = 5.651 \times 10^{-6}$
$a_3 = -5.04 \times 10^{-10}$

For a given applied force F (in kN), the expected deflection D (in units) is calculated thus:

$$D = b_1 F^2 + b_2 F^3 + b_3 F^4$$

where:

for a compression force
$b_1 = 1.005\ 826$
$b_2 = -5.743 \times 10^{-4}$
$b_3 = 5.61 \times 10^{-10}$

Figura 14 - Um exemplo certificado de calibração [5].

Capítulo 3

Desenho e dimensionamento do transdutor de força de tipo resistivo

3.1-Definição e constituição do transdutor de força do tipo resistivo

Um transdutor é um instrumento destinado a transformar uma grandeza física qualquer numa grandeza elétrica com vista a uma medição.

Existe uma grande variedade de transdutores elétricos. Os seus princípios derivam de fenómenos conhecidos da eletricidade: indutância mútua, piezoelectricidade, magnetismo, efeitos fotoelétricos diversos, etc. A transformação de uma grandeza em informação elétrica é das mais vantajosas, devido à sua precisão, fidelidade, e variedade de emprego dos dispositivos eletrónicos e eletromecânicos. As aplicações dos transdutores são muito numerosas: pesagem industrial, medida ou regulações de pressões, forças, momentos, potências, estudo de vibrações e aplicações diversas na medicina, etc.

Dentro destes transdutores, os mais utilizados são aqueles que utilizam os extensómetros elétricos pela igualdade de performances com outros métodos, aliada à vantagem de utilizar instrumentos universais de emprego generalizado e com uma técnica perfeitamente definida.

Um transdutor resistivo compreende um dispositivo mecânico destinado a sofrer uma deformação, sob a influência duma grandeza a estudar, por exemplo uma força, uma pressão, uma aceleração, etc. A este dispositivo chama-se, normalmente, corpo de ensaio.

Os extensómetros colados sobre o corpo de ensaio e convenientemente agrupados transformam as suas deformações em variações de resistência elétrica.

3.2- Características do transdutor a projetar

O transdutor que se pretende projetar e construir será utilizado para medir forças de arrasto hidrodinâmicas em diferentes tipos de condições, nomeadamente, em ambientes fluviáteis, marítimos, entre outros. Como tal, necessita de ser fabricado num material com elevada resistência à corrosão e os componentes eletrónicos deverão estar bem isolados da humidade existente nesses meios.

O transdutor deverá ter um comportamento linear elástico até uma carga máxima de 500N. Para isso, a geometria, as dimensões e o material deverão ser dimensionados para este tipo de comportamento e limite de utilização, com um elevado fator de segurança.

3.3- Seleção do material do corpo

Uma vez que transdutor será utilizado em ambientes com muita humidade e agressividade (ex. ambientes marítimos) provocando um grau de corrosão elevada, haverá um forte condicionamento na seleção dos materiais nos quais será fabricado o transdutor. Assim, a escolha para o fabrico do corpo do transdutor, vai para um aço inoxidável dado as suas propriedades de resistência à corrosão, bem como, as suas características mecânicas.

A proteção do transdutor poderá ser feita com uma blindagem em aço.

3.4- Formas admissíveis para o corpo

Para o projeto do transdutor de força pensou-se, num com a forma de um tubo cilindro, conforme se mostra na figura 16 e outro em forma Z representando já na figura 15.

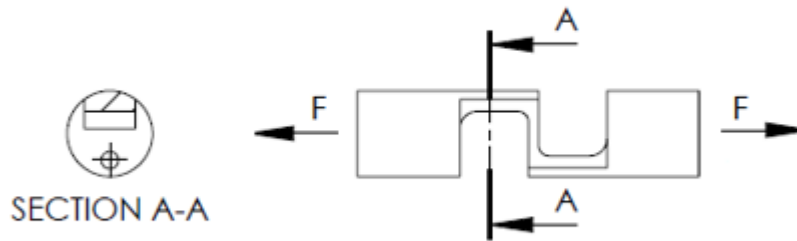


Figura 15 - Esquema do corpo do transdutor em forma de tubo cilíndrico.

A escolha destas formas, resulta do modo de funcionamento do transdutor, bem como, do facto da capacidade de o transdutor ser relativamente baixa.

3.5- Cálculos

3.5.1- Cálculos para a forma cilíndrica

Para o dimensionamento do transdutor, considera-se apenas o corpo central. Assim, temos a simplificação que se segue na figura 16.

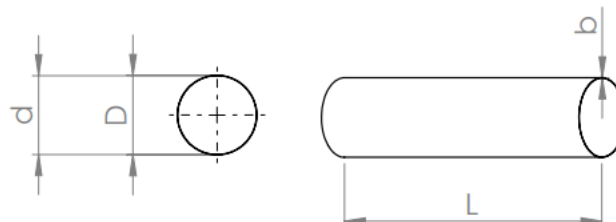


Figura 16 - Forma cilíndrica da cápsula.

Como

$$\sigma = \frac{F}{A} \leq \sigma_{adm} \quad (\text{Eq. 1})$$

Logo

$$\sigma_{adm} \geq \sqrt{\frac{F}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$D \geq \sqrt{\frac{4F}{\pi\sigma_{adm}} + d^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sabendo que:

$$\sigma_{adm} = \frac{2}{3}\sigma_{ced} \quad \text{e que a capacidade do transdutor é } F = 500N$$

Então, resolvendo a equação 3 para dois tipos de aço inoxidável:

1º Caso – Aço inoxidável AISI 304

$$\sigma = \frac{2}{3}\sigma_{ced} \Rightarrow \sigma_{adm} = 200 \text{ MPa}$$

$$D \geq \sqrt{\frac{10}{\pi} + d^2}$$

2º Caso – Aço inoxidável AISI 304 L

$$\sigma = \frac{2}{3}\sigma_{ced} \Rightarrow \sigma_{adm} = 220 \text{ MPa}$$

$$D \geq \sqrt{\frac{9,09}{\pi} + d^2}$$

Os resultados obtidos, relativos às dimensões do corpo, para cada um dos casos, são apresentados nos quadros abaixo:

Tabela 6 - Resultados obtidos no 1º Caso.

d(mm)	D(mm)	b(mm)
25	25,09531	0
20	20,11901	0,1
15	15,15832	0,1
10	10,23595	0,1
9	9,26146	0,1
8	8,293048	0,1

Tabela 7 - Resultados obtidos no 2º Caso.

d(mm)	D(mm)	b(mm)
25	25,08666	0
20	20,10822	0,1
15	15,144	0,1
13	13,16589	0,1
10	10,21472	0,1
8	8,266837	0,1

Pela observação dos quadros tanto para o 1º Caso como para o 2º caso, podemos concluir que fabricar um transdutor de força com espessura **b** indicadas, está fora de questão. Se quisermos tornear um transdutor em forma de tubo cilíndrico, temos que o fazer com

espessura aceitável e o diâmetro interior não pode baixar para valores inferiores a 10mm atendendo ao comprimento necessário.

3.5.2- Cálculos para a forma Z

Assim sendo, vamos então passar ao estudo de um corpo em forma em **Z**. Para o dimensionamento, considera-se apenas a lâmina central e temos, assim, os elementos de redução nos pontos A e B, conforme mostra a figura 17.

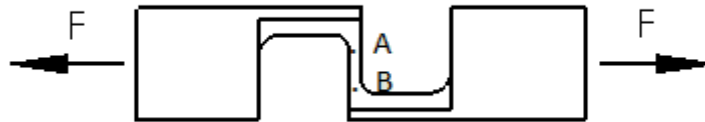


Figura 17- Forma em Z, do corpo da célula de carga.

Assim,

$$\Sigma M_B = 0 \Rightarrow M_B + M_A - FL = 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$M_B = FL - M_A$$

$$M_B = FL - M_A$$

$$M_B = \frac{1}{2}FL \quad (\text{Eq. 5})$$

Como

$$\sigma = \frac{Me}{I} \leq \sigma_{adm} \quad (\text{Eq. 6})$$

Logo

$$\sigma_{adm} \geq \frac{\frac{1}{2}FLe}{I} \quad (\text{Eq. 7})$$

Sabendo que:

$$\sigma_{adm} = \frac{2}{3}\sigma_{ced}$$

$$F = 500N$$

$$e = \frac{h}{2}$$

$$I = \frac{bh^3}{12}, \text{ sendo } b \text{ a largura da lâmina.}$$

Substituindo em 7

$$\sigma_{adm} \geq \frac{1500L}{bh^2} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$h \geq \sqrt{\frac{1500L}{b\sigma_{adm}}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Resolvendo a equação 9 para os dois tipos de aço inoxidável:

1º Caso – Aço inoxidável AISI 304

$$\sigma_{adm} = \frac{2}{3}\sigma_{ced} \Rightarrow \sigma_{adm} = 200 \text{ MPa}$$

$$h \geq \sqrt{\frac{7.5L}{b}}$$

2º Caso – Aço inoxidável AISI 304L

$$\sigma_{adm} = \frac{2}{3}\sigma_{ced} \Rightarrow \sigma_{adm} = 220 \text{ MPa}$$

$$h \geq \sqrt{\frac{6.81L}{b}}$$

Os resultados obtidos, relativas as dimensões das lâminas, para cada um dos casos, são apresentados nos quadros abaixo:

Tabela 8 - Resultados obtidos no 1º Caso.

b(mm)	L(mm)	h(mm)
10	9	3,2
15	9	2,6
10	10	3,4
15	10	2,7
10	15	4,1
15	15	3,4
10	20	4,7
15	20	3,9
10	25	5,3
15	25	4,3

Tabela 9 - Resultados obtidos no 2º Caso.

b(mm)	L(mm)	h(mm)
13	10	2.8
15	10	2.6
13	13	3.2
15	13	3
13	15	3.4
15	15	3.2
13	20	4
15	20	3.7
13	25	4.4
15	25	4.1

Feito este estudo, passamos a verificar a sensibilidade:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (\text{Eq. 10})$$

Substituindo em 8

$$\varepsilon = \frac{1500L}{Ebh^2} \quad (\text{Eq. 11})$$

Como

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Eq. 12})$$

e

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Substituindo em 12

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{4} K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Considerando que:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 \text{ e } \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \varepsilon$$

Então

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{4} K (\varepsilon + \varepsilon + \varepsilon + \varepsilon)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = K\varepsilon$$

Se $K=2$,

$$\frac{\Delta V}{V} = 2\varepsilon$$

Substituindo em 11

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{2 \times 1500L}{207000bh^2}, \text{ para } E=207 \text{ GPa}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3L}{207bh^2}$$

Os resultados obtidos são apresentados nos quadros seguintes:

Tabela 10 - Sensibilidade para o 1º Caso.

$\Delta V/V$	L(mm)	b(mm)	h(mm)
0,001274	10	9	3,2
0,001286	15	9	2,6
0,001254	10	10	3,4
0,001325	15	10	2,7
0,001293	10	15	4,1
0,001254	15	15	3,4
0,001312	10	20	4,7
0,00127	15	20	3,9
0,00129	10	25	5,3
0,001306	15	25	4,3

Tabela 11 - Sensibilidade para o 2º Caso.

$\Delta V/V$	L(mm)	b(mm)	h(mm)
0,001422	13	10	2,8
0,001429	15	10	2,6
0,001415	13	13	3,2
0,001396	15	13	3
0,001447	13	15	3,4
0,001415	15	15	3,2
0,001394	13	20	4
0,001412	15	20	3,7
0,00144	13	25	4,4
0,001437	15	25	4,1

Feito este estudo, o material escolhido para o fabrico do transdutor recaiu sobre o aço inoxidável AISI 304L, por ter sido o que melhor se adapta ao caso em estudo. Obtivemos as melhores sensibilidades em função de um determinado h, L e b. Quanto às dimensões da lâmina, a nossa escolha, tendo em conta o atravancamento do transdutor, foi para as dimensões de 13×15×3,4 mm³.

Na realidade, o dimensionamento, tomando em consideração a sensibilidade, admitiu-se que as deformações ϵ eram, em módulo, todas iguais o que na prática não sucede, pois, o posicionamento de R_1 e R_3 é diferente do de R_2 e R_4 como pode ver-se pela figura 18.

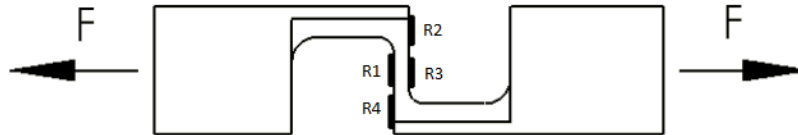


Figura 18 - Localização dos extensómetros.

3.6 - Análise da célula de carga pelo método elementos finitos

A simulação numérica foi realizada com recurso ao método elementos finitos (MEF), tendo sido utilizado o programa comercial Ansys®.

Para efetuar a simulação numérica foi necessária criar um modelo com geometria e dimensões idênticos à amostra utilizado no ensaio experimental, para a geometria foi realizado no programa Solidworks® e foi gravado com a extensão parasolid.x_t.

Considerou-se um comportamento elástico e foi definido as propriedades do aço inox AISI 304 L, foi feito uma malha com uma refinação média como representa na figura 19. As condições de carregamento foram idênticas às usadas no ensaio experimental só com a carga mínima e máxima de 4 N e 500 N.

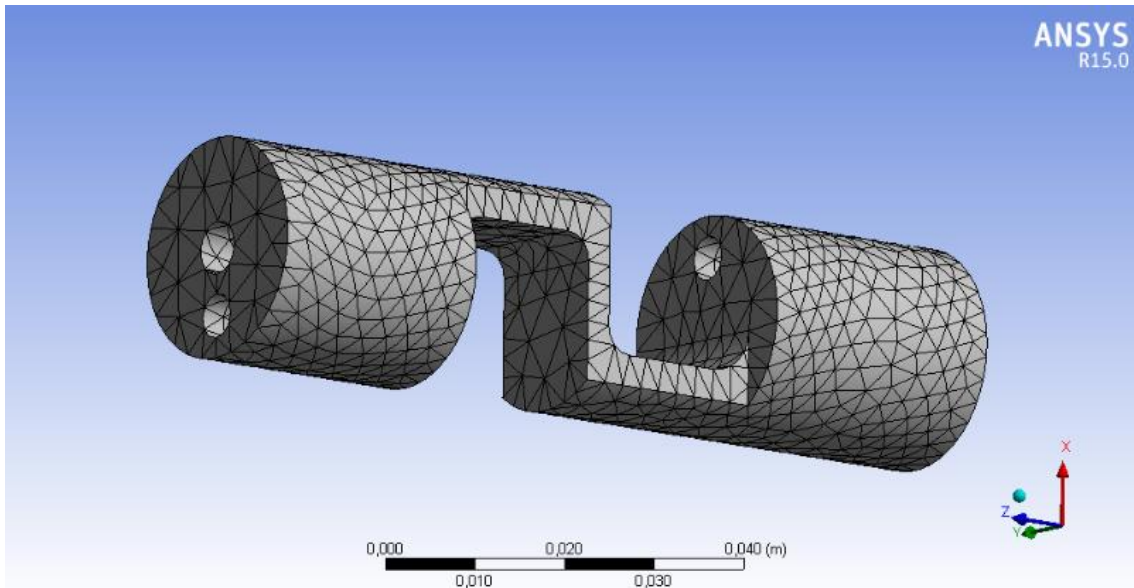


Figura 19 - Malha dos elementos finitos da célula de carga.

3.6- Resultados

O modelo foi implementado usando um programa de elementos finitos. Assim, foi determinado o campo dos deslocamentos utilizando uma carga de 40N e 500N e obtivemos uma deformação máxima de 0.068 mm e 0.62 mm, estão representados nas figuras 20 e 21.

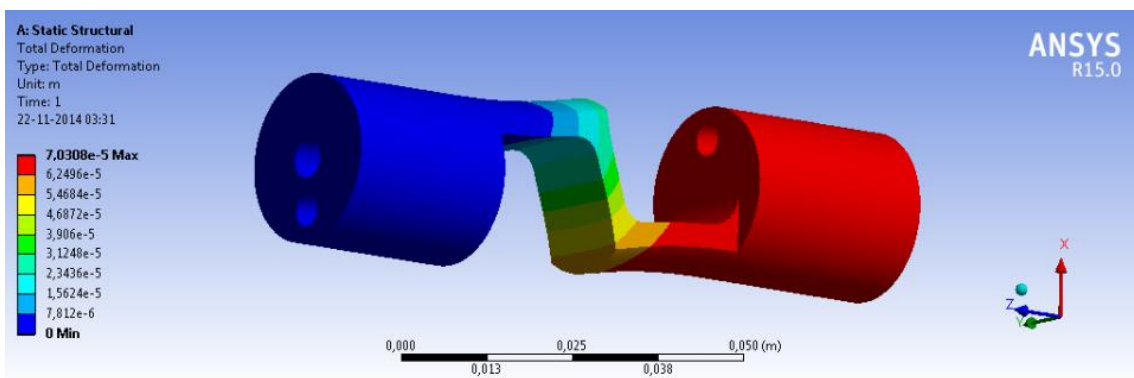


Figura 20 - Campos de deslocamentos obtido pela simulação dos elementos finitos com uma carga de 40N.

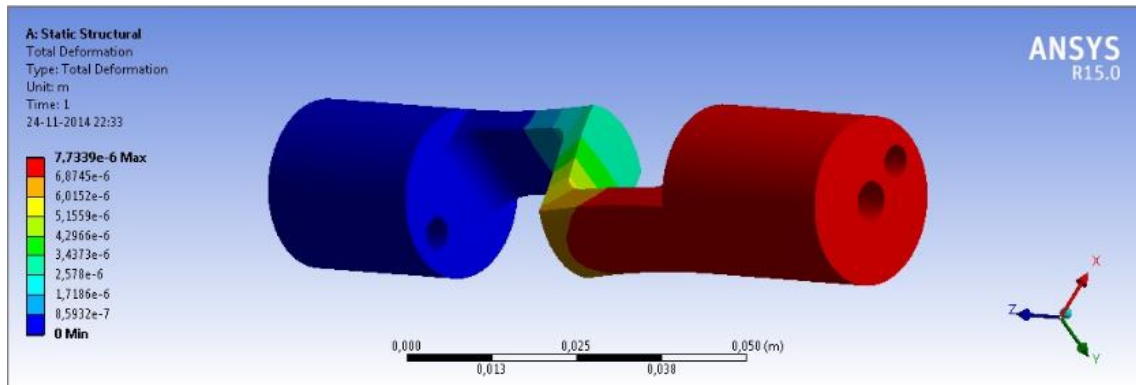


Figura 21 - Campos de deslocamentos obtido pela simulação dos elementos finitos com uma carga de 500N.

Foram obtidos os valores do campo de tensões equivalentes de Von-Mises, para as mesmas cargas de 40N e 500N, com valores de tensão máxima de 8,4 MPa e 83,6 MPa, estão representados nas figuras 22 e 23.

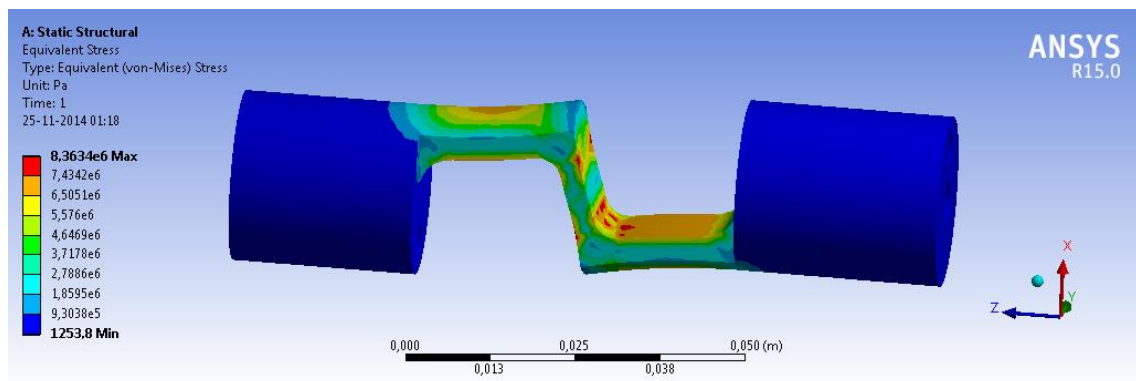


Figura 22 - Campo de tensões obtido pela simulação dos elementos finitos com uma carga de 40N.

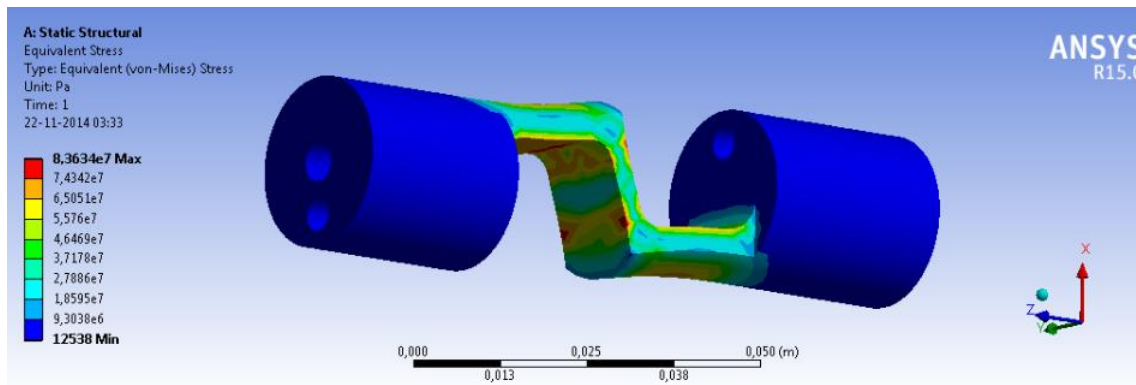


Figura 23 - Campo de tensões obtido pela simulação dos elementos finitos com uma carga de 500N.

Capítulo 4

Construção mecânica

Dadas as limitações de fabrico, já referidas no ponto anterior, aquando dos cálculos efetuados, tanto para a forma cilíndrica como para a forma em **Z**, a nossa opção para a fabricação do transdutor recaiu sobre o transdutor em forma de **Z**. Em termos construtivos, as limitações para a forma em **Z** prendem-se, basicamente, com espaço disponível, aberto no corpo central do transdutor, que esta forma dá para o manuseamento e colagem dos extensómetros.

Na figura 18 foi apresentado o aspeto da geometria do corpo do transdutor, onde se mostra a localização dos extensómetros.

4.1 – Construção do transdutor

O fabrico da peça foi efetuado numa fresadora e num torno convencional. O primeiro passo, foi cortar, na serra fita, um varão maciço de aço inoxidável AISI 304L de 25mm de diâmetro, com comprimento de 100 mm. De seguida, foi facejada no torno mecânico até obter um comprimento de 97 mm, com uma velocidade de 1000 rot/min e com um avanço de 0.5mm/min. Na figura 24 é possível observar-se a operação de facejamento no torno mecânico.



Figura 24 - Facejamento do veio para obter o comprimento do transdutor.

Depois, com as dimensões desejadas do comprimento do transdutor, foi feito um ponto no centro do veio com uma broca de centro. De seguida, com o ponto de centro realizado foi furado com uma broca HSS de 5 mm de diâmetro com uma profundidade de 20 mm e com uma velocidade de 350 rot/mim, local onde vai levar os parafusos com rosca M6 em cada extremidade da peça, onde vai exercer a força no transdutor. Na figura 25 podemos observar o processo de furação no centro da peça.



Figura 25 - Furação nas extremidades da peça.

Depois da peça ser torneada, o resto da maquinagem foi realizado numa fresadora convencional, com uma velocidade de 400 rot/min com um avanço de 0.4mm/min, podemos ver na próxima figura 26, a fixação da peça na prensa de apertos.



Figura 26 - Maquinagem da peça numa fresadora convencional.

Depois da fixação da peça e devidamente alinhava, foi utilizado uma fresa de 25mm de diâmetro para remover 5mm de matéria em 43mm de comprimento no centro da peça, este processo foi realizado na face posterior a 180°. Como podemos observar na Figura 27.



Figura 27 - Facejamento da peça utilizando uma fresa de 25mm de diâmetro.

Peça facejada nas duas faces, observando na figura 28.



Figura 28 - Facejada nas duas faces.

No próximo passo, foi utilizado uma fresa de diâmetro de 10mm, utilizando os mesmos parâmetros de velocidade e avanço. Foi removido material até obter a forma em Z. Como se pode ver, a perfuração com uma fresa de diâmetro 10mm na figura 29 e a forma em Z na figura 30.



Figura 29 - Perfuração da peça, utilizando uma fresa com diâmetro de 10mm.



Figura 30 - Obtenção da forma em Z, utilizando uma fresa de 10mm de diâmetro.

Por fim, para finalizar a forma em Z e acabamento do transdutor utilizou-se uma fresa de diâmetro de 6mm, para perfurar na junto a zona de deformação do transdutor, obtendo-se, assim, a forma final do transdutor, observando na figura 31.



Figura 31 - Transdutor com o acabamento concluído.

4.2 – Construção dos parafusos

Os parafusos onde vai exercer força no transdutor também foram fabricados num torno e numa fresa mecânica convencional, com as seguintes dimensões como se pode ver na figura 32.

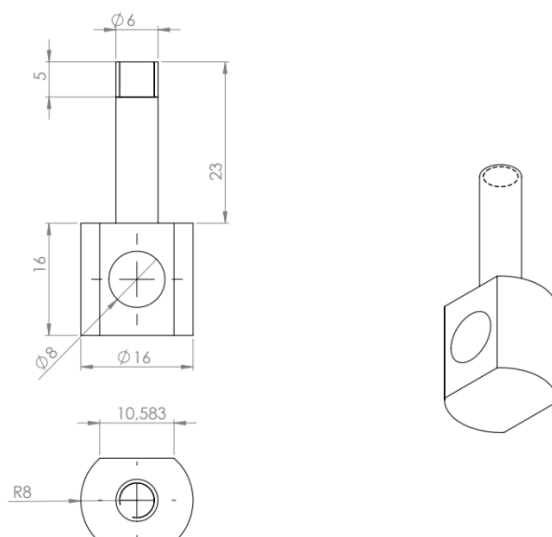


Figura 32 - Dimensões dos parafusos.

Inicialmente, foi torneado um veio com diâmetro de 16mm com um comprimento de 39 mm total, a dimensão da rosca com comprimento de 23mm e diâmetro de 6mm, abrindo uma rosca M6 de passo 0.5, na figura 33 podemos observar como foi realizado a rosca, utilizando um caçonete M6.



Figura 33 - Processo de abrir rosca M6 nos parafusos.

Finalmente, foi facejado na fresa 2mm nas duas extremidades a 180° e foi furado no centro onde foi facejado com uma fresa de 8mm de diâmetro. Obtendo, assim, a peça maquinada como demonstra na figura 34.



Figura 34 - Parafusos com acabamento final.

4.3 – Construção da mesa para a calibração

Para realizar a calibração do transdutor, foi necessário construir uma mesa com a forma em L, de maneira que o transdutor de carga fique alinhado em relação à carga. Para ajustar o alinhamento foi construído um suporte para a célula de carga ficando esta com um apoio fixo ao parafuso numa extremidade da célula de carga, como se verifica na figura 35.



Figura 35 – Suporte do apoio fixo ao parafuso da célula de carga.

Na outra extremidade foi utilizado um cabo de aço de 5mm fixo ao parafuso da célula de carga com um cerra-cabos. Ainda para ajustar o alinhamento foi aplicado uma roldana ajustável como se pode ver na seguinte figura 36.



Figura 36 – Suporte da roldana ajustável.

Para aplicar as cargas foi realizado uma estrutura para colocar as várias massas (previamente calibradas com uma balança de precisão), obtendo movimentos como um pendulo

como demonstra a figura 37, de maneira podendo estabilizar a carga. É fixo por umas correntes nas quatro arestas ao cabo de aço da célula de carga unidos por um cerra-cabos.



Figura 37 – Suporte de carga da mesa de tração.

Para a construção da estrutura da mesa para a calibração foram soldados todos os elementos com o processo de soldadura de arco elétrico com elétrodos revestidos, as pernas da mesa foram feitas por tubo e cada perna pode ser ajustável em altura para estabilizar e nivelar a mesa de tração ao pavimento do solo. Na figura 38 podemos ver a mesa de tração concluída.



Figura 38 – Finalização da construção da mesa de tração.

Na figura 39 é apresentado o esquema de ligação dos extensómetros em ponte de Wheatstone, relativo ao transdutor fabricado.

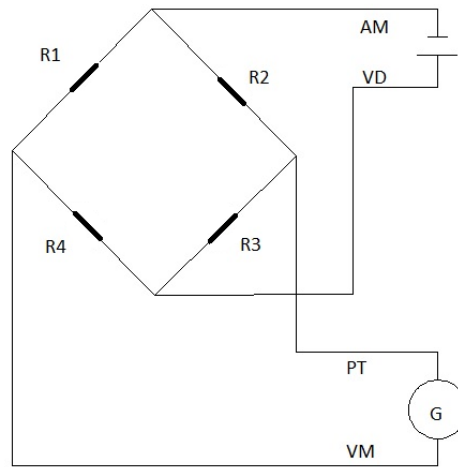


Figura 39 - Esquema de ligação dos extensômetros.

Capítulo 5

Procedimentos e instrumentação para a montagem dos extensómetros da célula de carga.

5.1- Seleção dos extensómetros

No fabrico do transdutor de força, os extensómetros escolhidos foram os do tipo 1-LY111.5/350. A razão para escolher da serie LY11, pretende-se com o facto ser a mais aconselhável para os transdutores de precisão, com aplicações em intervalo de temperatura normais de funcionamento (-10°C a +45°C). O primeiro **1** tem influência com o tipo de ligação do extensómetro e o segundo **1** é para um aço ferrítico. Os extensómetros de 350Ω são, tipicamente, os mais utilizados em transdutores, onde se consegue aumentar o sinal elétrico correspondente, à custa de um aumento da diferença de potencial aplicada nos terminais do extensómetro [1].

5.2- Instrumentação

5.2.1- Procedimento de colagens e curas

Na Instalação dos extensómetros depois de se fazer o polimento da superfície com abrasivos (lixas) de grão 500 e 600 [2], procederam-se os seguintes passos:

1. Desengorduramento da área de colagem com acetona pura.
2. Com uma caneta permanente foram feitas as marcas de alinhamento dos extensómetros sobre a superfície de colagem, como mostra na figura 40. Repetidamente, aplicou-se o Condicionador (HBM – M_Prep Conditioner A), como se vê na figura 41 uma solução ácida, até a superfície ficar limpa.



Figura 40 - Alinhamento dos extensómetros sobre a superfície de colagem.

3. Aplicação do Neutralizante (HBM – M_Prep neutralizer 5A), representado na figura 41 é uma solução alcalina, e fez-se limpeza com lenços de papel.
4. Remoção dos extensómetros do seu acetato de proteção.
5. Com ajuda da fita adesiva Mylar JG posicionaram-se os extensómetros com as marcas de alinhamento.
6. Aplicação da cola (Z70- HBM), demonstrada na figura 41 , na superfície de colagem e nos extensómetros, deixando secar cerca de 30 minutos para o solvente se evaporar.



Figura 41 - Neutralizador, cola e condicionador.

7. Recolocação dos extensómetros na posição original.

- Os extensómetros foram pressionados com a mão durante alguns minutos para certificar que ficaram bem colados, como demonstra a figura 42.



Figura 42 - Colocação dos extensómetros na zona de deformação.

- Depois da secagem da cola, foi removido a fita-cola, ficando o procedimento da colagem dos extensómetros concluída.

A ligação dos extensómetros aos cabos para ligar à ponte universal de medida, foram soldados a estanho, com um posto de soldadura manual, devido à fragilidade dos fios dos extensómetros foi utilizado uma temperatura de 250 C° e protegidos com manga termo retráctil no local da ligação dos fios como demonstra na figura 43.



Figura 43 - Ligação dos fios por soldadura.

Feitas estas operações, procedeu-se, de seguida, à ligação dos extensómetros em ponte de Wheatstone a um terminal de ligação, ligando este terminal ao medidor. Demonstrado na figura 44.

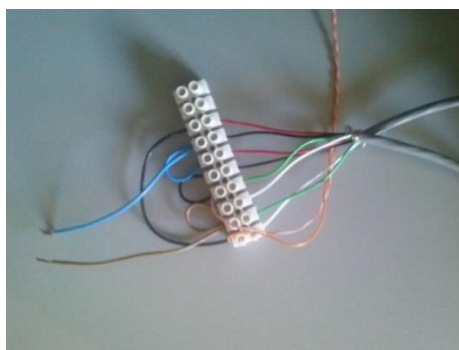


Figura 44 - Ligações dos extensómetros aos terminais em ponte de wheatstone.

5.2.3- Correção e ajuste do zero

Após todas estas operações, procedeu-se, então, à verificação do zero dos transdutores. Tendo sido utilizado, para o efeito, uma fonte de alimentação a 10,000 V e um multímetro. Verificou-se que não foi necessário de colocar nenhuma resistência externa porque, medindo com o multímetro, verificou-se que o erro máximo foi de 0,04 m Ω [4].

5.2.4- Cablagem

Para a cablagem utilizaram-se dois cabos de quatro condutores para cada ligação a dois extensómetros de cada face lâmina de deformação do transdutor. Após as ligações dos extensómetros verificou-se se a ligação foi adequada, tendo-se constatado, através de medições com um multímetro, que os extensómetros tinham uma resistência de 350 Ω , como se estava à espera. Na figura 45 verificamos com um multímetro a medição da resistência de cada extensómetro.



Figura 45 - Medição da resistência dos extensômetros após as ligações.

Capítulo 6

Caracterização do transdutor de forças

6.1- Medição da Flexibilidade

No estudo da flexibilidade de um transdutor de força pretende-se determinar qual a sua rigidez.

Para a determinação da flexibilidade recorreremos ao seguinte equipamento:

- Multímetro
- Fonte de alimentação
- Mesa de tração
- Comparador OM 1
- Comparador OM 2

O ensaio de flexibilidade teve os seguintes passos:

1. Colocou-se o transdutor de força na mesa de tração, alinhando e nivelando com a direção da aplicação das forças, usando um cabo de aço de 5mm fixa ao parafuso na extremidade da célula de carga.
2. Fizeram-se as ligações elétricas do transdutor à ponte universal de medida, servindo de fonte de alimentação e multímetro.
3. Usaram-se dois comparadores para medir os deslocamentos sofridos pelo transdutor, no momento da aplicação das forças. Estes comparadores foram colocados como indica a figura 46.

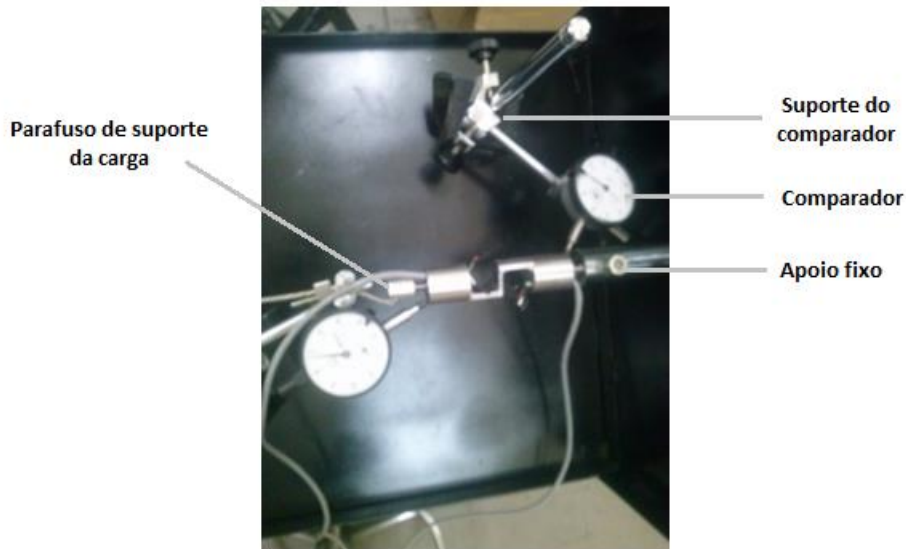


Figura 46 - Representação esquemática do transdutor na mesa de tração e o posicionamento dos comparadores relativamente ao transdutor.

4. Aplicaram-se forças de 40N e 500N, alternadamente, e fez-se a leitura dos deslocamentos do transdutor nos comparadores. Neste ensaio, foram utilizados blocos de aço (massas) que foram previamente pesados numa balança digital de precisão, obtendo, assim, as cargas pretendidas. Fizeram-se três leituras para confirmar a variação da flexibilidade ou existência de algum erro na leitura dos comparadores das forças aplicadas na célula de carga.

Nas tabelas 12 e 13 mostram-se os valores lidos nos comparadores, a sua variação de comprimento com a força e a respetiva média. Os Δ_i representam a diferença entre valores lidos nos comparadores quando aplicamos as forças de 4 e de 50Kgf (o índice **i** corresponde ao número da leitura que estava a ser realizado). O total de Δ_i representa a diferença dos valores de Δ_i entre os dois comparadores. A média de Δ_j representa a média aritmética do total de Δ_i das três leituras (o índice **j** representa o transdutor no qual se estão a fazer as leituras).

Tabela 12 - Valores lidos nos comparadores para o transdutor de forças e a variação do comprimento.

	Força	Força	Comparador	Comparador	Total
	Kgf	(N)	OM 100	OM 101	Δ_i
1ª Lei- tura	4	39,24	0,05	-0,25	
(mm)	50	490,5	1,08	1,35	
$\Delta 1$ (mm)			1,03	1,6	2,63
2ª Lei- tura	4	39,24	0,05	-0,2	
(mm)	50	490,5	1,08	1,35	
$\Delta 2$ (mm)			1,03	1,55	2,58
3ª Lei- tura	4	39,24	0,1	-0,2	
(mm)	50	490,5	1,15	1,38	
$\Delta 3$(mm)			1,05	1,58	2,63

Tabela 13 - Variação total do comprimento e a sua média, para o transdutor.

Total de $\Delta 1$ (mm)	Total de $\Delta 2$ (mm)	Total de $\Delta 3$ (mm)	Média de Δ (mm)
2,63	2,58	2,63	2,613

1 Kgf = 9.81N

6.2 – Calibração

Para o procedimento da calibração do transdutor usou-se uma ponte de Wheatstone recorrendo a uma ponte universal de medida.

6.2.1- Calibrações usando a ponte de Wheatstone

Para este procedimento de calibração utilizamos o seguinte equipamento:

- Ponte universal de medida
- Mesa de calibração

E seguimos os seguintes passos:

1. Colocação do transdutor na mesa de tração alinhado com a direção da aplicação das forças. As forças aplicadas tinham a direção horizontal, o transdutor estava alinhado como se indica na figura 46.
2. Ligou-se os cabos à ponte universal de medida (Micro-Measurements®, Modelo P3), como se vê na figura 47.

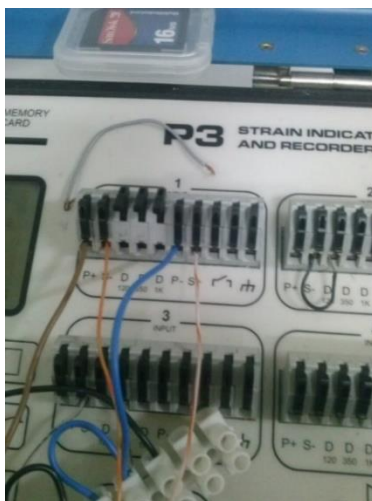


Figura 47-Ligações dos cabos à ponte universal de medida.

3. Aplicaram-se forças de 0 a 500 N, alternadamente, os blocos de aço para as forças aplicadas foram devidamente pesados numa balança digital e agrupados em quilograma da seguinte forma: (0, 4, 10, 25, 40, 50) cujo valores se encontram na tabela 12.

Na tabela 14, apresentamos, para além dos valores lidos, os incrementos, estes são obtidos a partir da primeira leitura, subtraindo-lhe o valor lido para 0 N (erro de offset). Nessa tabela apresenta, também, a média dos valores lidos e dos incrementos.

A reta de calibração resulta do tratamento dos valores dos incrementos e pela aplicação do método dos mínimos quadrados.

Tabela 14 - Valores lidos para o transdutor, os incrementos e as suas médias.

	Força (kgf)	0	4	10	25	40	50
	Força (N)	0	39,24	98,1	245,25	392,4	490,5
1ª Leitura (mV)	Leitura	-0,01	0,029	0,079	0,186	0,292	0,336
	Increment.	0	0,039	0,089	0,196	0,302	0,346
2ª Leitura (mV)	Leitura	-0,009	0,028	0,078	0,191	0,282	0,334
	Increment.	0	0,037	0,087	0,2	0,291	0,343
3ª Leitura (mV)	Leitura	-0,009	0,027	0,073	0,189	0,279	0,33
	Increment.	0	0,036	0,082	0,198	0,27	0,339
4ª Leitura (mV)	Leitura	-0,008	0,028	0,07	0,184	0,276	0,329
	Increment.	0	0,036	0,078	0,192	0,284	0,337
5ª Leitura (mV)	Leitura	-0,009	0,029	0,074	0,181	0,269	0,319
	Increment.	0	0,038	0,083	0,19	0,278	0,328
6ª Leitura (mV)	Leitura	-0,006	0,027	0,07	0,179	0,264	0,314
	Increment.	0	0,033	0,076	0,185	0,27	0,32
Média (mV)	Leitura	-0,0085	0,028	0,074	0,185	0,277	0,327
	Increment.	0	0,0365	0,0825	0,1935	0,2825	0,3355

Na figura 48 representamos a respetiva reta de calibração sob a forma gráfica, bem como, a equação a partir da qual obtivemos as retas e o fator de correlação.

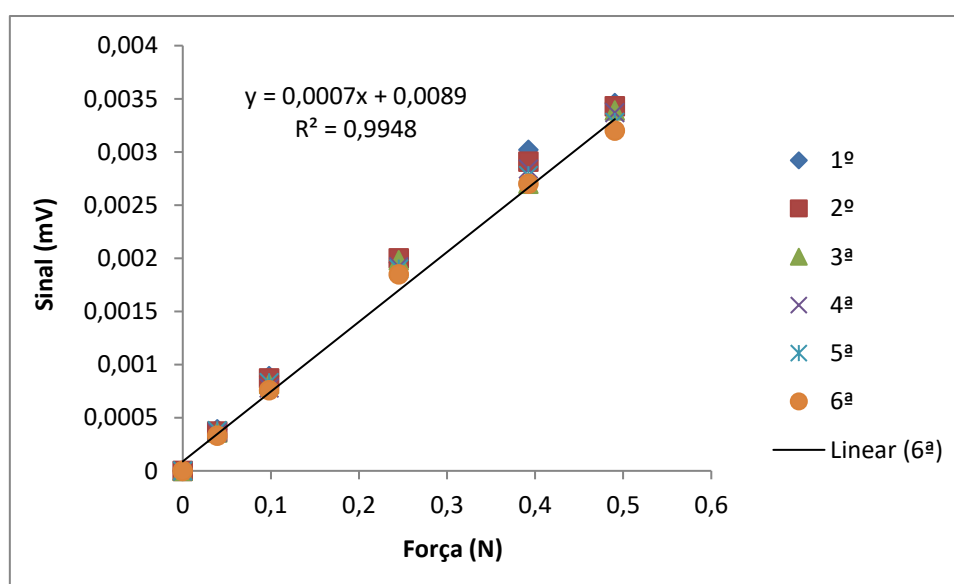


Figura 48 - Reta de calibração do transdutor, com respetiva equação e fator de correlação.

6.2.2 – Cálculo da sensibilidade

A sensibilidade é o cociente da variação do sinal de saída pela correspondente variação de sinal de entrada para um determinado estado do transdutor. É expressa em unidades de grandeza da saída pelas unidades de grandeza da entrada, como se verifica na tabela 15.

No transdutor de força o valor da sensibilidade é definido para o estado máxima amplitude de medição.

Tabela 15 - Valores da sensibilidade para o transdutor.

Transdutor	$V_{saída}$ (mV)	$V_{entrada}$ (V)	Sensibilidade (mV/V)
1ª Leitura	0.346	10 V	0.0346

O transdutor tem maior sensibilidade na primeira leitura já que foi considerado o valor da sensibilidade como a relação entre o valor da tensão média do incremento, para a máxima amplitude de medição, sobre o valor de tensão de entrada.

6.3 – Linearidade

A variação de linearidade é a maior diferença entre os pontos de incremento e os correspondentes da reta de calibração, que foi obtida recorrendo ao método dos mínimos quadrados. Nos quadrados seguintes representaram-se os valores de tensão obtidos a partir da reta de calibração para as diferentes forças aplicadas, a diferença entre valores obtidos a partir da reta, os valores de incremento e os valores desta diferença. A variação de linearidade é dada, no final, em percentagem.

6.3.1 – Resultados obtidos da Linearidade

A equação obtida na calibração foi:

$$Y = 0.0007x + 0.0089$$

Obtendo os valores da Linearidade apresentados na tabela 16.

Tabela 16 - Valores obtidos da Linearidade.

Força(N)	0	39,24	98,1	245,25	392,4	490,5
Reta (mV)	0,0089	0,036368	0,07757	0,180575	0,28358	0,35225
1ª inc (mV)	0,0089	0,002632	0,01143	0,015425	0,01842	0,00625
2ª inc (mV)	0,0089	0,000632	0,00943	0,019425	0,00742	0,00925
3ª inc (mV)	0,0089	0,000368	0,00443	0,017425	0,01358	0,01325
4ª inc (mV)	0,0089	0,000368	0,00043	0,011425	0,00042	0,01525
5ª inc (mV)	0,0089	0,001632	0,00543	0,009425	0,00558	0,02425
6ª inc (mV)	0,0089	0,003368	0,00157	0,004425	0,01358	0,03225
Valor Max (mV)	0,0089	0,003368	0,01143	0,019425	0,01842	0,03225

O valor do desvio de linearidade, em termos percentuais, foi obtido utilizando a expressão 13.

$$\left\| \text{Desvio de Linearidade}(\%) = \frac{\text{ValMax}_{\text{Desvio linearidade}}}{\text{ValMax}_{\text{Incremento}}} \times 100 \right\| \quad (\text{Eq. 13})$$

$\text{ValMax}_{\text{Desvio linearidade}}$ - Valor Máximo do desvio de linearidade.

$\text{ValMax}_{\text{Incremento}}$ - Valor do incremento para o desvio máximo de linearidade.

O valor do desvio de linearidade, em termos percentuais, foi obtido utilizando a expressão 13 e encontra-se apresentado na tabela 17.

Tabela 17- Determinação do desvio de linearidade em percentagem.

$\text{ValMax}_{\text{Desvio linearidade}}$	$\text{ValMax}_{\text{Incremento}}$	Desvio de Linearidade (%)
0,03225	0,2	16,125

Pela observação dos desvios de linearidade, pode verificar-se que o maior desvio ocorre para a força de 500 N.

6.4- Repetibilidade

Quando se fazem medidas repetidas, normalmente, temos uma dispersão de resultados. O tratamento estático destes resultados permite-nos: conhecer o valor mais provável da grandeza medida, e fixar os limites da incerteza.

Se fizermos repetidamente a medição de um mesmo valor, obtemos vários resultados: m_1, m_2, \dots, m_n . O valor médio é por definição:

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n} \quad (\text{Eq. 14})$$

Uma indicação da dispersão destes resultados é dada pelo desvio padrão (σ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{(m_1 - \bar{m})^2 + (m_2 - \bar{m})^2 + \dots + (m_n - \bar{m})^2}{n - 1}} \quad (\text{Eq. 15})$$

Quando os erros aleatórios, afetando as diferentes medidas, são independentes, a probabilidade do aparecimento de diferentes resultados satisfaz, habitualmente, a lei normal (lei de Gauss).

A probabilidade $P(m_1, m_2)$ de obter como resultado duma medida um valor da grandeza, compreendida entre dois valores m_1 e m_2 pode ser escrita:

$$P(m_1, m_2) = \int_{m_1}^{m_2} p(m) dm \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde $p(m)$ é a densidade de probabilidade para o valor m da grandeza.

No caso da lei Gauss

$$p(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(m-\bar{m})^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (\text{Eq. 17})$$

- O valor de m mais provável é \bar{m} .

- A probabilidade de um resultado da grandeza nos limites indicados é:

$$P(\bar{m} \pm \sigma) = 68,27\%$$

$$P(\bar{m} \pm \sigma) = 95,45\%$$

$$P(\bar{m} \pm \sigma) = 99,73\%$$

A repetibilidade é a qualidade de um aparelho de medida em que os erros aleatórios têm um peso pequeno: este traduz-se pelos resultados duma medição agrupados em torno do seu valor médio. O desvio padrão reflete a dispersão de resultado e é muitas vezes considerado como erro de repetibilidade: ele permite-nos uma apreciação quantitativa da repetibilidade.

6.4.1 – Repetibilidade obtida para a calibração

Nos quadros seguintes determinamos o valor médio (\bar{m}) dos seis incrementos, o desvio padrão (σ) recorrendo à expressão 15 e a variância (σ^2).

Na tabela 18 são apresentados os valores do desvio padrão e da variância do transdutor.

Tabela 18 - Valores do desvio padrão e da variância.

Força (N)	0	39,34	98,1	245,25	392,4	490,5
1ªInc (mV)	0	0,039	0,089	0,196	0,302	0,346
2ªInc (mV)	0	0,037	0,087	0,2	0,291	0,343
3ªInc (mV)	0	0,036	0,082	0,198	0,27	0,339
4ªInc (mV)	0	0,036	0,078	0,192	0,284	0,337
5ªInc (mV)	0	0,038	0,083	0,19	0,278	0,328
6ªInc (mV)	0	0,033	0,076	0,185	0,27	0,32
m (mV)	0	0,0365	0,0825	0,194	0,281	0,338
σ (mV)	0	0,001892969	0,004573	0,005091	0,011456	0,008920949
σ^2	0	3,58333E-06	2,09E-05	2,59E-05	0,000131	7,95833E-05

Fazendo uma análise aos valores do desvio padrão (σ), verifica-se que o desvio padrão mais baixo se encontra para uma força de 40N, o que significa que temos uma maior probabilidade da leitura, logo, aproxima-se do valor exato.

6.5- Estabilidade

A estabilidade é a aptidão do instrumento de medição para o transdutor de força, para conservar as suas características metrológicas (normalmente considerada em relação ao tempo).

O estudo da estabilidade devia ser realizado ao longo do tempo, que não foi o caso desta célula de carga, e serem realizadas novas calibrações para confirmar as medições obtidas. Isto para ver se as características metrológicas se mantêm inalteradas ou se elas sofrem variações ao longo do tempo.

Capítulo 7

Conclusões e propostas para trabalhos futuros

7.1. Conclusões

Neste trabalho, foi dimensionado e construído um transdutor de forças que permite medir forças de arrasto hidrodinâmicas até 500 N.

Para o dimensionamento do transdutor foi utilizado um método analítico e numérico (método dos elementos finitos). Tendo resultado na escolha de uma geometria na forma de Z, foram avaliados dois materiais diferentes tendo-se comprovado o material mais adequado para o transdutor de forças foi o aço inoxidável AISI 304L. Os extensômetros usados para o transdutor foram de 350 Ω (elevada sensibilidade e resolução) ligados por um circuito em ponte de Wheatstone completa.

A estrutura metálica do transdutor foi fabricada por processos de maquinagem. Após o fabrico da estrutura, foram colados os extensômetros do tipo resistivo no corpo da célula de carga e fazer as ligações elétricas associadas a um circuito eletrónico. Finalmente, foi realizada a calibração da célula de carga, tendo sido necessário construir um sistema mecânico para a realização do processo de calibração.

Com base na calibração foi determinada a respetiva equação e fator de correlação do transdutor de força ou célula de carga. Foi, também, calculada a sensibilidade, a linearidade e a repetibilidade. A estabilidade só será possível determinar ao longo do tempo de utilização da célula de carga.

7.2. Propostas para trabalhos futuros

Como projeto futuro, na construção de uma mesa de tração fornecida a escola para trabalhos futuros, a construção de outras células de carga com geometria em “S” ou “C” para

comparar os valores obtidos deste ensaio e comprovar a melhor geometria da célula de carga.

Referências bibliográficas

- [1] W. Olivera, G. Pharra. 1992. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7(6): 1564-1583.
- [2] I. Korkut, M. Donertas. 2007. The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool–chip contact length during face milling. *Materials & Design*, 28(1): 308–312.
- [3] B. Bauer, S. Namikas. 1998. Design and field test of a continuously weighing, tipping-bucket assembly for aeolian sand traps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(13): 1171–1183.
- [4] D. Janda, C. Bir, B. Wild, S. Olson, M. Hensinger. 1995. Goal Post Injuries in Soccer A Laboratory and Field Testing Analysis of a Preventive Intervention. *The American Journal of Medicine*, 23(3): 340-344.
- [5] Andy Hunt et al. 2013. *Guide to the Measurement of Force*, Published by the Institute of Measurement and Control, London.
- [6] J Shieh, J.E Huber, N.A Fleck, M.F Ashby. 2001. The selection of sensors, *Progress in Materials Science*, 46(3-4): 461–504.
- [7] S. Toms, G. Dakin, J. Lemons, A. Eberhardt. 2002. Quasi-linear viscoelastic behavior of the human periodontal ligament. *Journal of Biomechanics*, 35(10): 1411–1415.
- [8] J. Li, G. Wang, J. Zhang, et al. 2012. Dynamic characteristics of piezoelectric six-dimensional heavy force/moment sensor for large-load robotic manipulator. *Measurement*, 45: 1114–1125.
- [9] S. Malavasi, A. Guadagnini. 2003. Hydrodynamic Loading on River Bridges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(11): 854–861.
- [10] S. Puijalon, G. Bornette, P. Sagnes. 2005. Adaptations to increasing hydraulic stress: morphology, hydrodynamics and fitness of two higher aquatic plant species. *Journal of Experimental Botany*, 56(412): 777-786.
- [11] T. Moss. 2004. The governance of land use in river basins: prospects for overcoming problems of institutional interplay with the EU Water Framework Directive. *Land Use Policy*, 21(1): 85–94.

- [12] R. Greiner, M. Young, A. McDonald, M Brooks. 2000. Incentive instruments for the sustainable use of marine resources. *Ocean & Coastal Management*, 43(1): 29–50.
- [13] Y. Katada, M. Sagara, Y. Kobayashi, T. Kodama. 2004. Fabrication of High Strength High Nitrogen Stainless Steel with Excellent Corrosion Resistance and Its Mechanical Properties. *Materials and Manufacturing Processes*, 19(1): 19-30.
- [14] L. Mangal, V. Idichandy, C Ganapathy. 2001. Structural monitoring of offshore platforms using impulse and relaxation response. *Ocean Engineering*, 28(6): 689–705.
- [15] A. Rico-Amoros, J. Olcina-Cantos, D. Sauri. 2009. Tourist land use patterns and water demand: Evidence from the Western Mediterranean. *Land Use Policy*, 26(2): 493–501.
- [16] S. Gössling, P. Peeters, et al. 2012. Tourism and water use: Supply, demand, and security: An international review. *Tourism Management*, 33(1): 1–15.
- [17] T. Fossen. 2011. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Edited by John Wiley & Sons, West Sussex, United Kingdom.
- [18] H. Toussaint, P. Roosc, Sergei Kolmogorov. 2004. The determination of drag in front crawl swimming. *Journal of Biomechanics*, 37(11): 1655–1663.
- [19] WGC1099. A guide to the specification and procurement of industrial process weighing systems. Institute of Measurement and Control, London, 2000. ISBN 0 904457 32 X.
- [20] BS 8422:2003 Force measurement. Strain gauge load cell systems. Calibration method.
- [21] <https://www.metropein.com/conocimientos-basicos-celulas-de-carga/>. Consultado a 11 de novembro de 2022.
- [22] <https://www.hbm.com/pt/6810/sensores-piezoelétricos>. Consultado a 21 de outubro de 2022.
- [23] *The Measurement of Mass and Weight, Measurement Good Practice Guide No. 71*, NPL, 2004. ISSN 1368-6550).
- [24] *Intrinsically Safe Instrumentation - A Guide*, 3rd edition. Garside R. Hexagon Technology Ltd., 2 West End, Weston Turville, Aylesbury, Bucks. HP22 5TT. 1995
- [25] *Intrinsically Safe Instrumentation - A Guide*, 3rd edition. Garside R. Hexagon Technology Ltd., 2 West End, Weston Turville, Aylesbury, Bucks. HP22 5TT. 1995

- [26] EURAMET cg-4, Version 2.0, Uncertainty of Force Measurements, 2011.

Anexos

Anexos A – Ficha técnica do Aço Inoxidável

Anexos B – Simulação Ansys

Anexos C – Desenhos de Definição

Anexo A

Marca: Aço Inox R304

FICHA TÉCNICA DO AÇO

Designação: Aço Inoxidável

Cópia Não Controlada

1 ⇒ QUALIDADE E NORMAS EQUIVALENTES

Num. Do Material	EURONORM	AISI	DIN	AFNOR
(1.4301)	(X5 CrNi 18 10)	(304)	(X5CrNi 18 10)	(Z 6 CN 18-09)

2 ⇒ ESTADO DE FORNECIMENTO:

Austenítico

Rm: 500 - 1000 MPa; Rp0,2: ≥ 190 MPa; A ≥ 12 %

3 ⇒ COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Elemento Químico (%)	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Outros
Máximo	0,08	1,00	2,00	20,0	10,50	0,030	0,045	N ≤ 0,11
Mínimo	-	-	-	17,0	8,00	-	-	

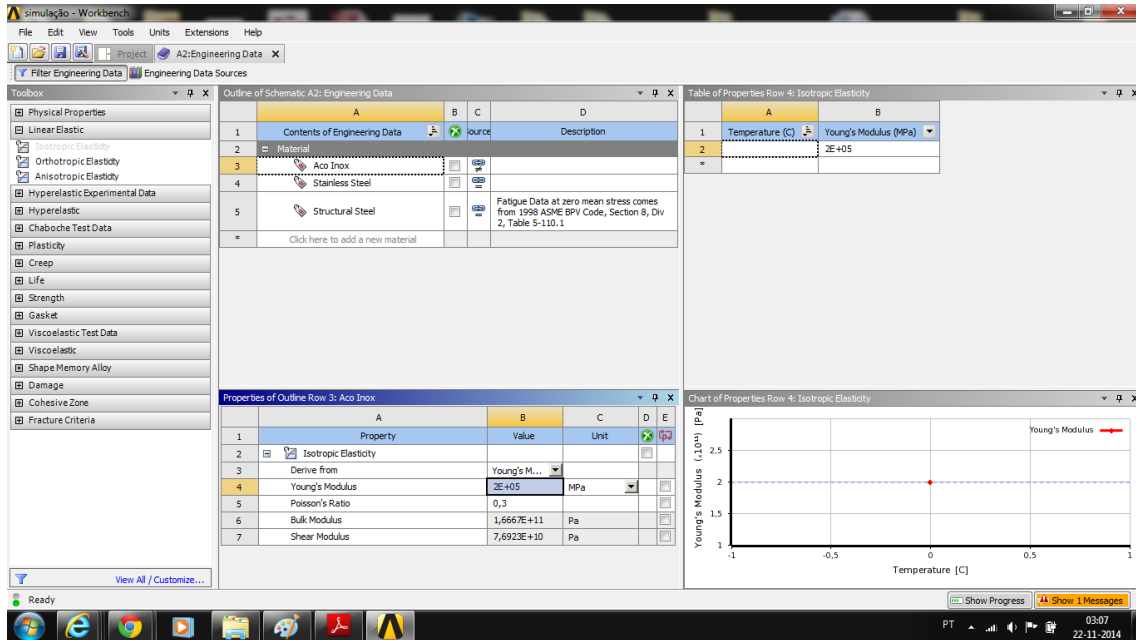
4 ⇒ CERTIFICADOS AÇOS (segundo a norma EN 10204:2004)

2.1- Certificado de conformidade	<input checked="" type="checkbox"/>
2.2- Relatório de ensaio	<input checked="" type="checkbox"/>
3.1- Certificado de inspeção (+)	<input checked="" type="checkbox"/>

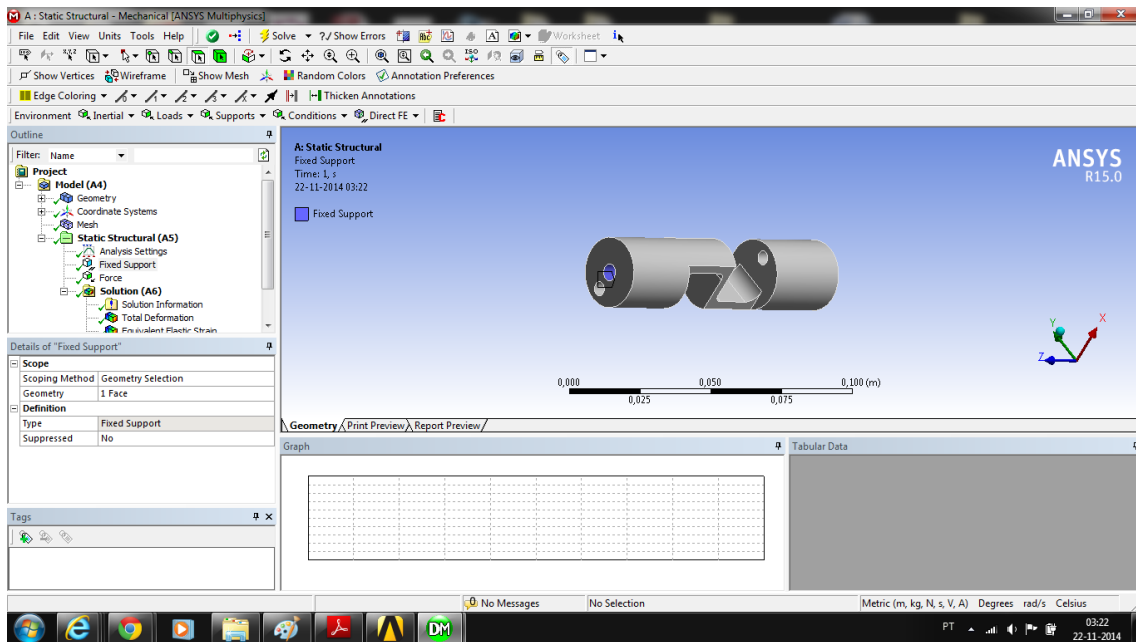
(+) Em casos especiais quando previamente acordado

Anexo B

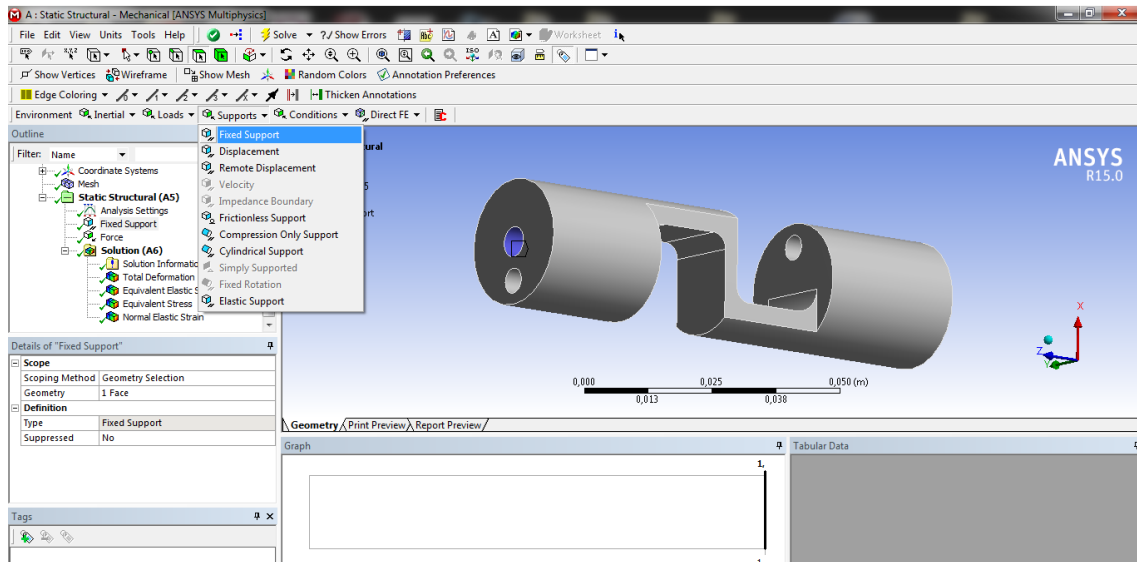
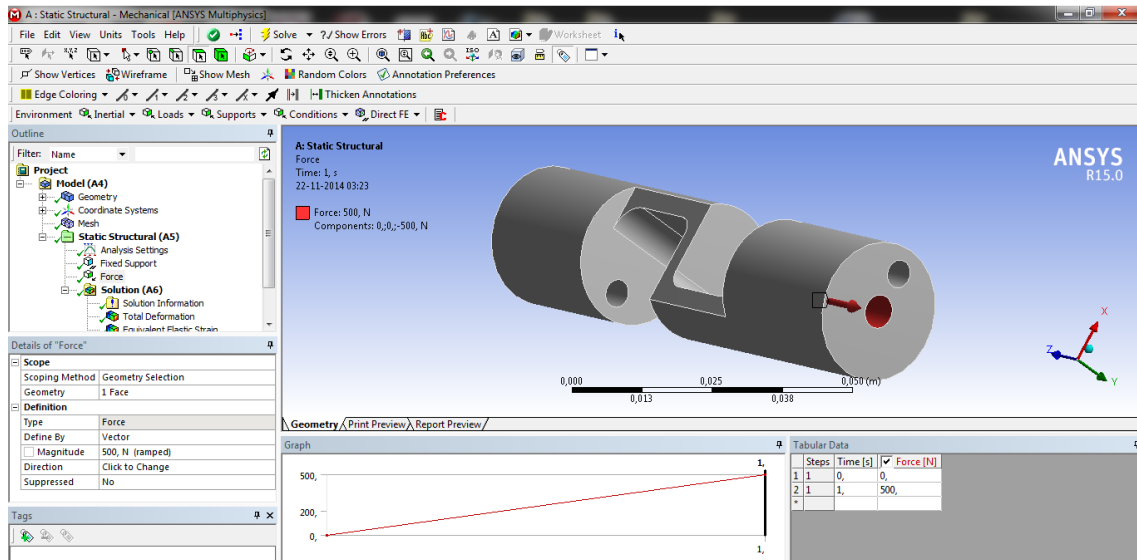
Inserir as propriedades do tipo de material utilizado



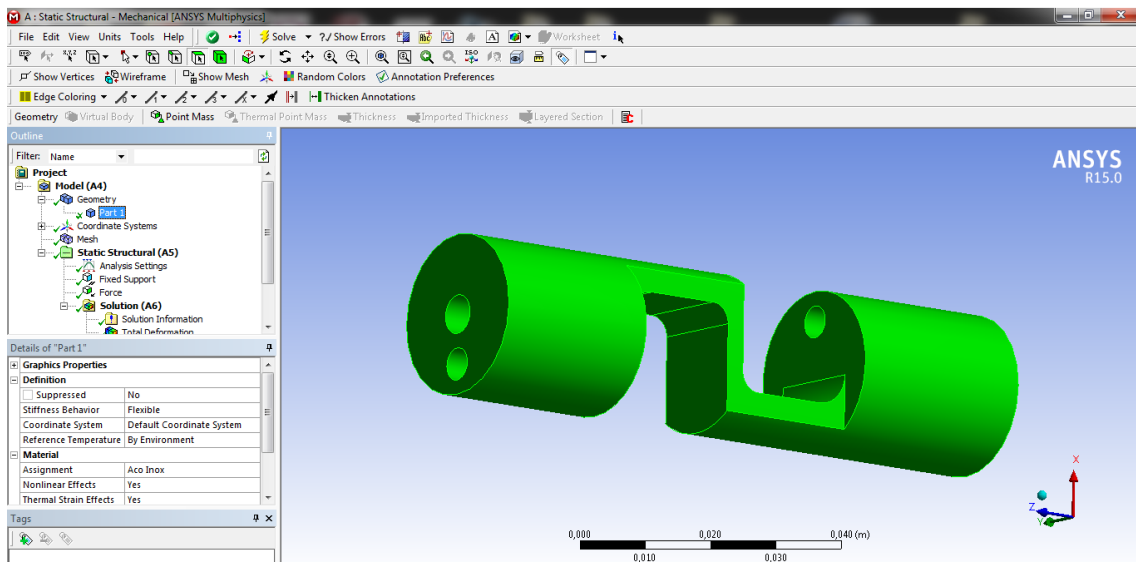
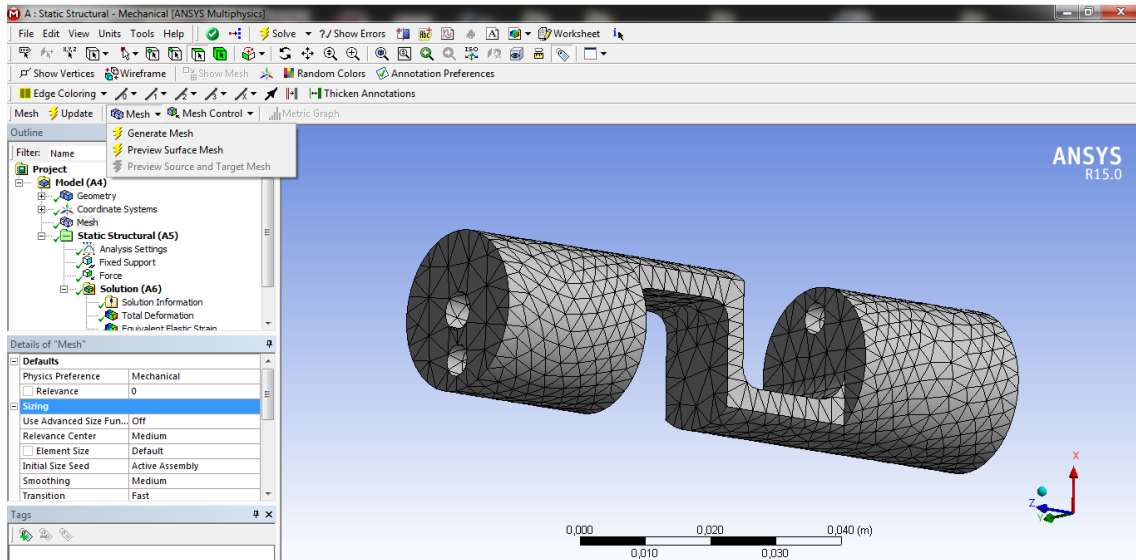
Indicar o ponto fixo do transdutor



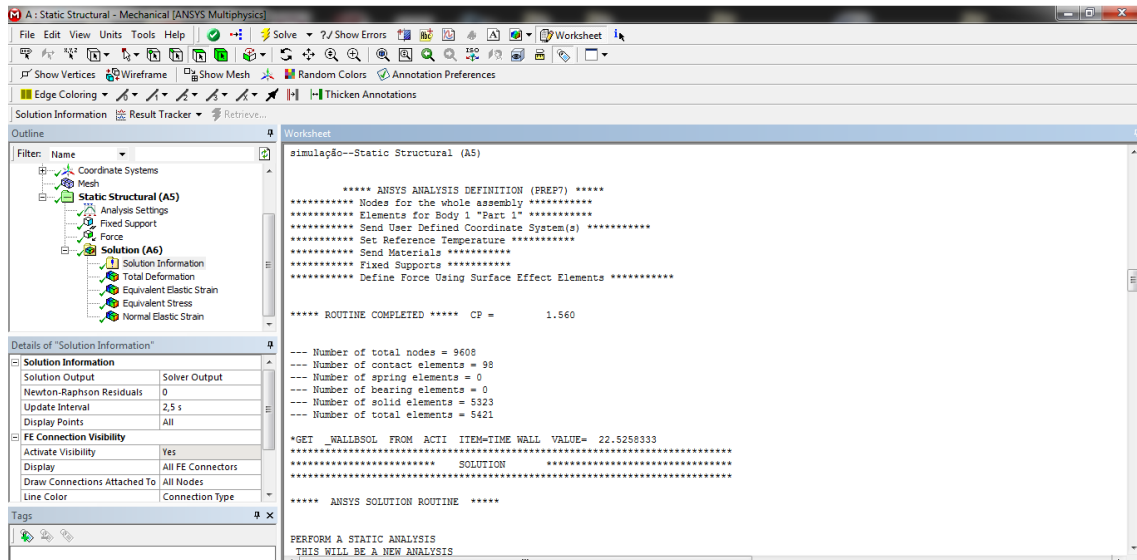
Inserir a força aplicado de 500N no apoio



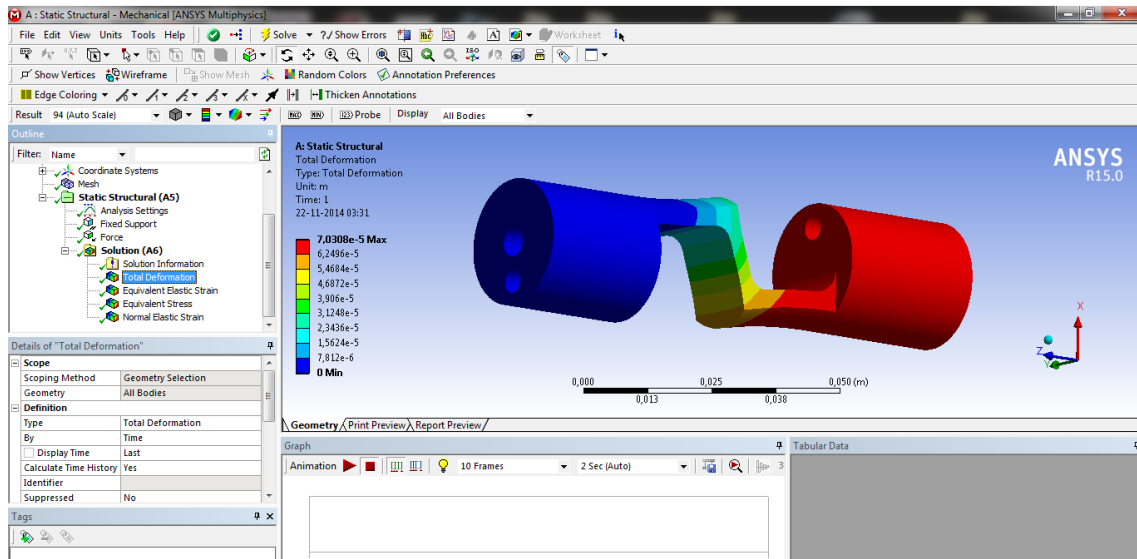
Colocar a malha na peça para análise



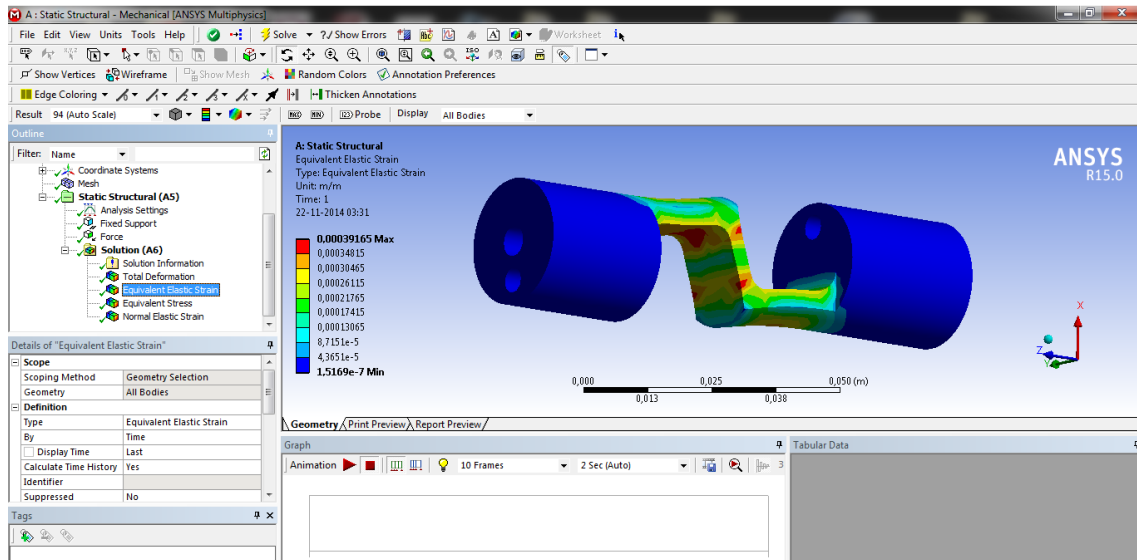
Dados obtidos do número de elementos



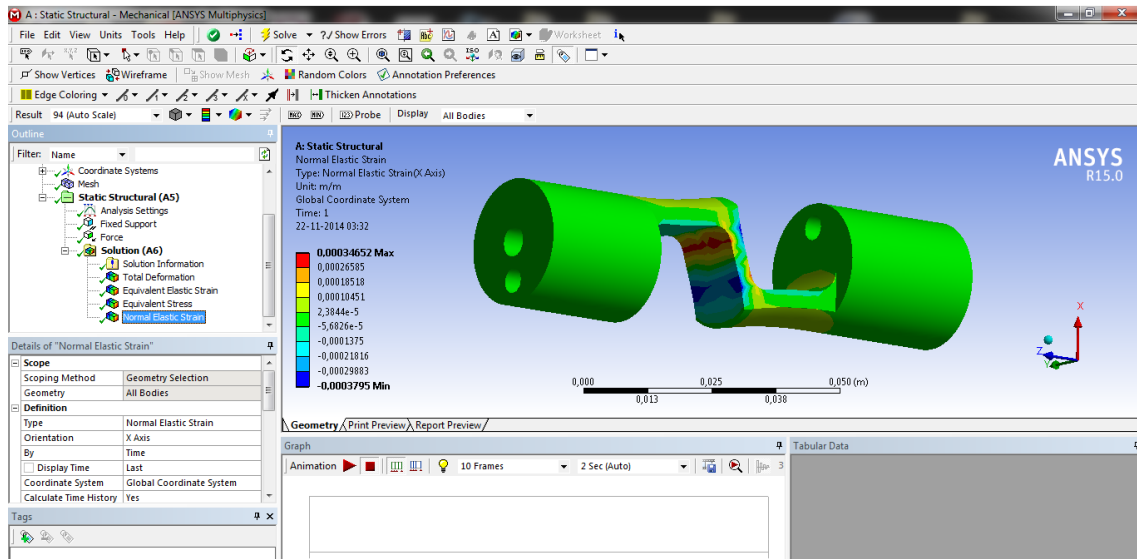
Total de deformação



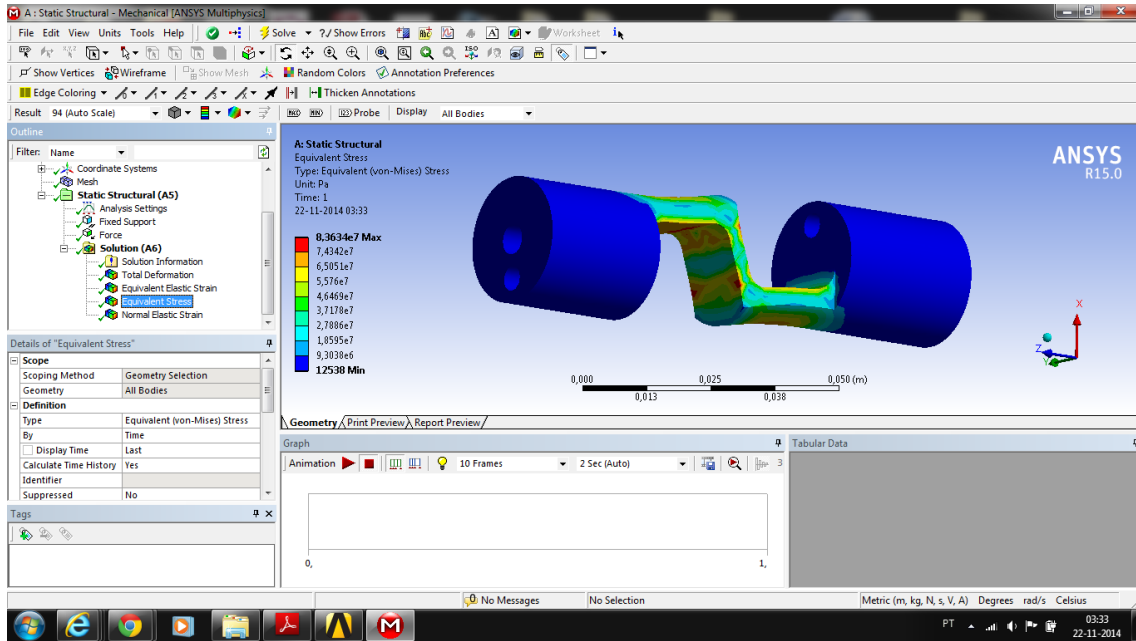
Deformação elástica equivalente



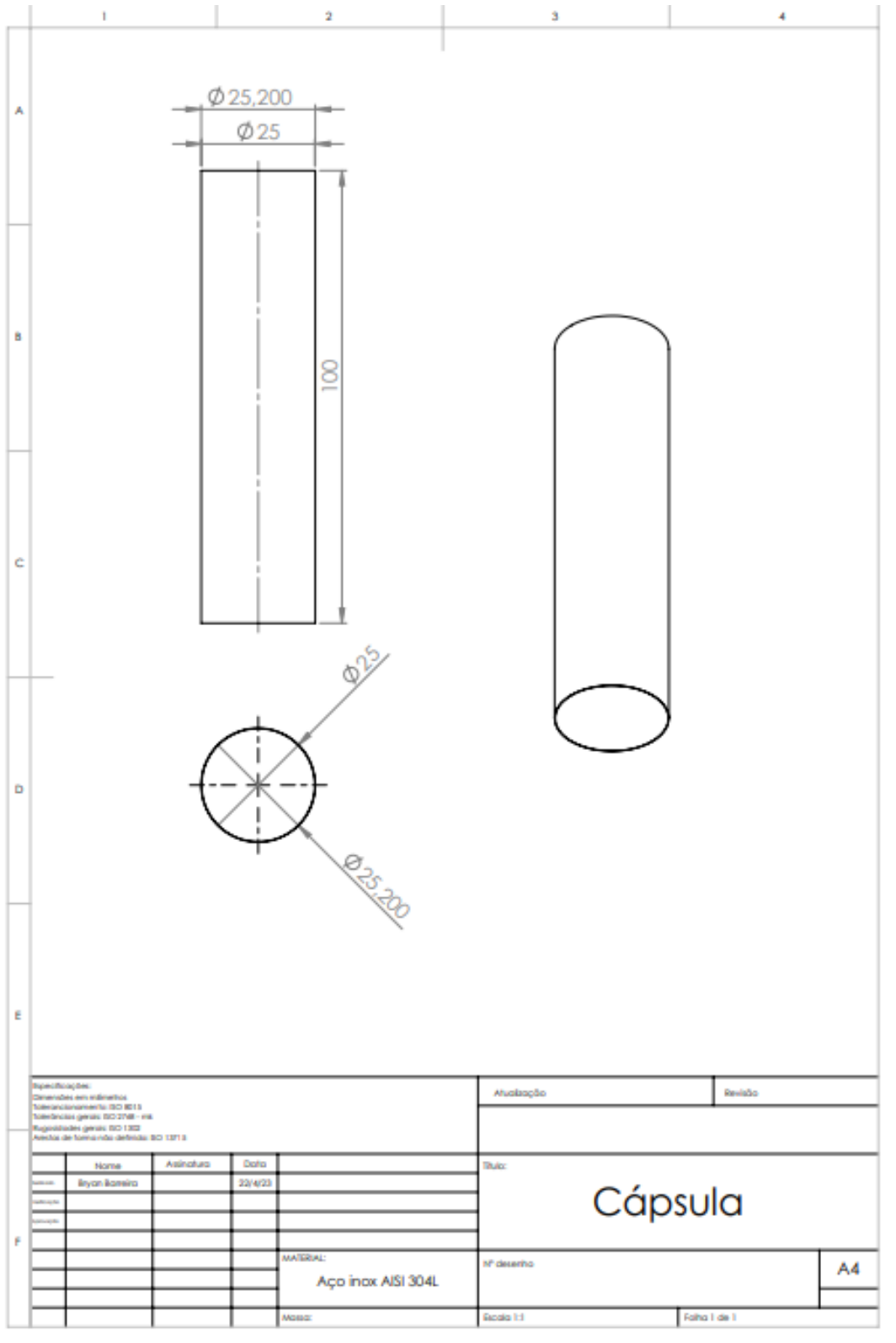
Tensão equivalente

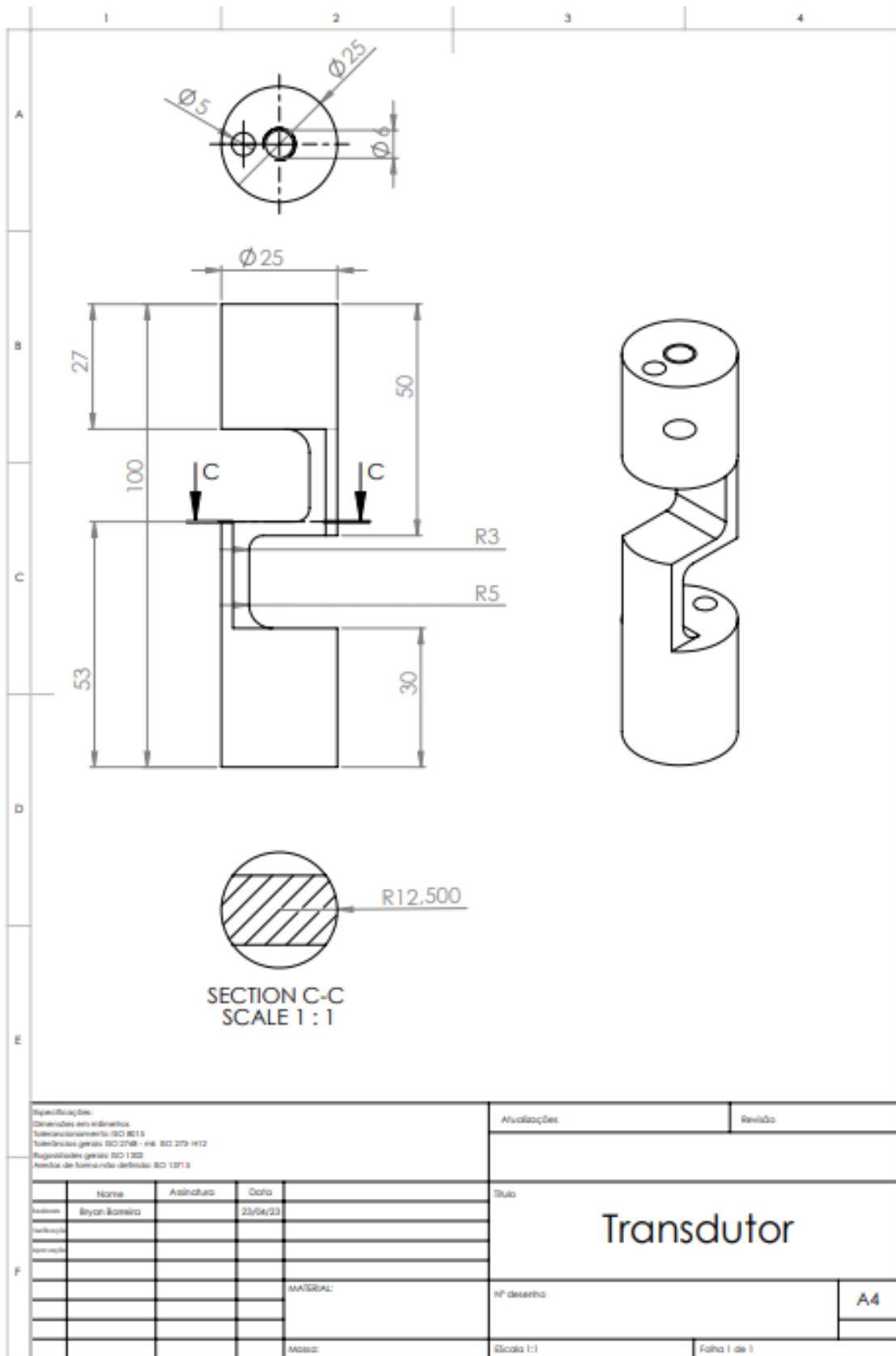


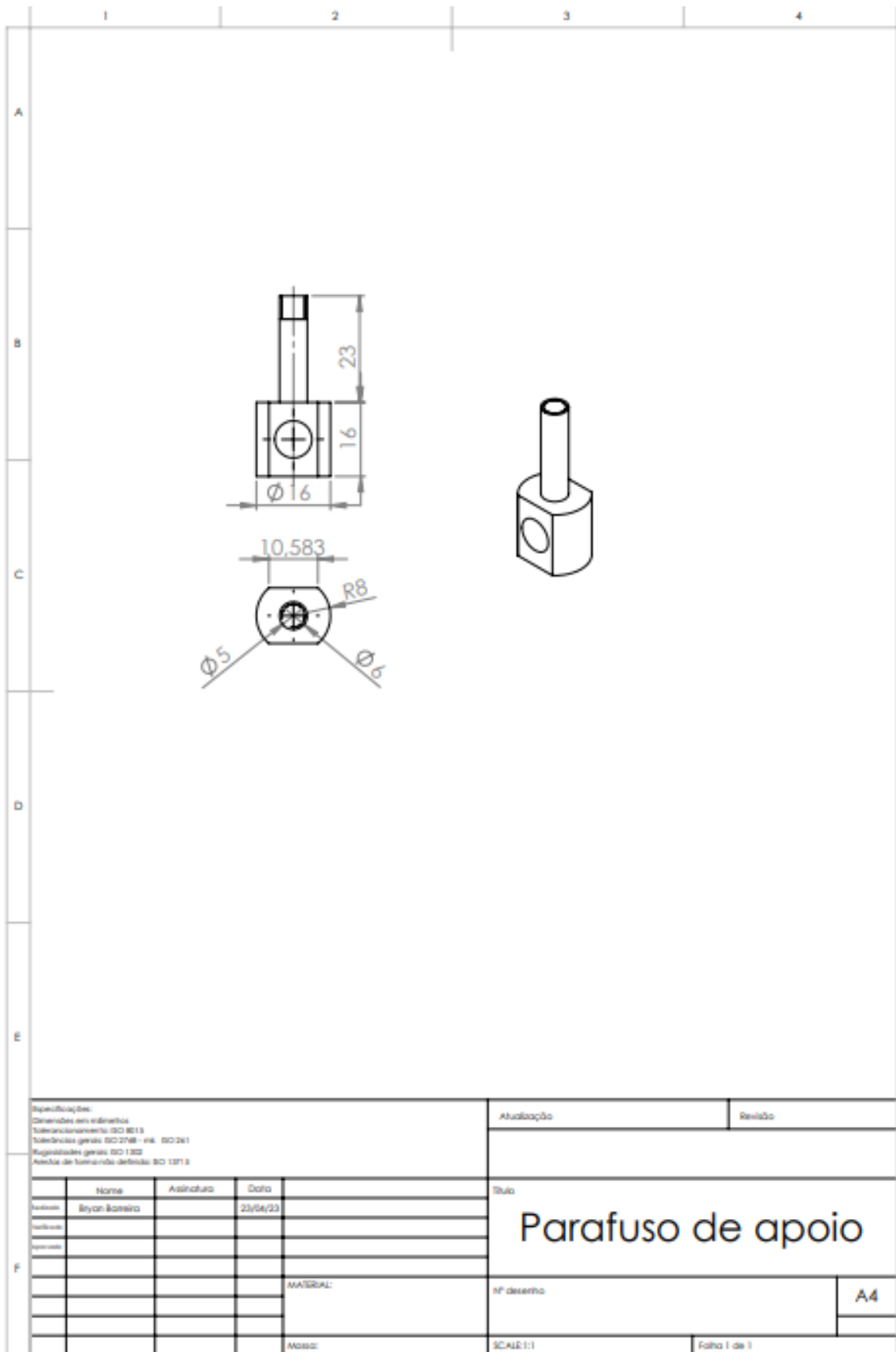
Deformação elástica normal



Anexo C







Especificações:
 Dimensões em milímetros
 Tolerâncias nominais: ISO 2813
 Tolerâncias gerais: ISO 2768 - m3 ISO 2811
 Rugosidades gerais: ISO 1302
 Aechas de torção definidas: ISO 13713

Atualização	Revisão
-------------	---------

Nome	Assinatura	Data
Desenho: Bryan Romero		23/04/23
Verificação:		
Aprovação:		
MATERIAL:		
Massa:		

Título	
Parafuso de apoio	
Nº desenho	A4
SCALE:1:1	Folha 1 de 1