

MICHELLE MORAES LOPES

Projeto de células de carga para aplicações industriais

Michelle Moraes Lopes

Projeto de células de carga para aplicações industriais

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

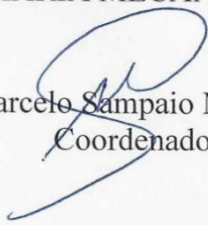
L864p	Lopes, Michelle Moraes Projeto de células de carga para aplicações industriais / Michelle Moraes Lopes – Guaratinguetá, 2021. 40 f. : il. Bibliografia : f. 39-40
	Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
	1. Extensômetro. 2. Medidores de tensão. 3. Arduino (Controlador programável). 4. Microprocessadores. I. Título. CDU 621.381

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

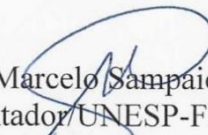
MICHELLE MORAES LOPES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**”

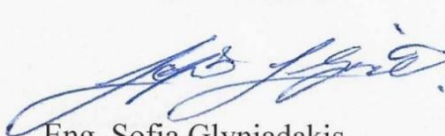
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Me. Everton Coelho de Medeiros
UNESP-FEG


Eng. Sofia Glyniadakis
UNESP-FEG

Dezembro/2019

DADOS CURRICULARES

MICHELLE MORAES LOPES

NASCIMENTO	19.09.1992 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Gilberto Lopes Sobrinho Mariane Moraes Lopes
2015/2020	Curso de Graduação Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista

Ao curso de Engenharia Mecânica da FEG e às
pessoas com quem convivi nos anos em que fui
parte dessa instituição, que tanto me ensinaram
dentro e fora de sala.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, meu primordial amparador, provedor e amigo.

Agradeço a meus pais, sem os quais não seria possível a vida, e sem cuja influência não vejo como se daria a conclusão deste curso.

Agradeço à República Puricanas por estes anos de estrondoso crescimento pessoal nesse “lar mutável”, que segue crescendo e com o qual sigo crescendo juntamente.

Agradeço ao círculo de alunos e repúblicas estudantis pela conexão, fortalecimento e alegrias incontáveis compartilhadas nesse processo de formação, bem como pelas lindas memórias e laços formados.

Agradeço aos professores da FEG, em especial ao Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins e aos outros da minha experiência, pela livre escolha de empregar sua dedicação em ensinar pessoas, e por toda atitude de fortalecimento, colaboração e persistência no investimento de sua energia na formação de alunos - atitude da qual também tive o privilégio de ser alvo, como tantos outros alunos que por aqui passam.

Agradeço à instituição UNESP e à minha nação brasileira pelo sistema de ensino existente e pela estrutura que me possibilitou esta graduação. Gratidão.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros
de gigantes.”

Isaac Newton

RESUMO

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é disponibilizar um manual para projetos de células de carga de flexão e tração - formas típicas de aplicação de carga - a partir da utilização de extensômetros e de cálculos baseados na literatura. Neste trabalho são apresentados alguns conceitos básicos para assimilação do raciocínio, como Lei de Hooke e definições de deformação, tipos de solicitação e de extensômetros, bem como características relevantes de extensômetros atuais e para o correto posicionamento destes. Além disso, é explicada a utilização das Pontes de Wheatstone em suas diferentes configurações enquanto medidores por comparação, os principais tipos de transdutores construídos por extensômetros, e a utilização do microcontrolador Arduino enquanto relevante alternativa para leitura de deformações e tratamento de dados. Por fim são apresentados os cálculos para dois tipos de transdutores de carga: o modelo binocular e o modelo com concentrador de tensão, e espera-se que seja possível o projeto completo de células de cargas para aplicações industriais nas modalidades de flexão e tração em diferentes materiais, a partir destes memoriais.

PALAVRAS-CHAVE: Células de carga. Extensômetro. *Strain gage*. Flexão. Tração. Binocular. Concentrador de tensão. Lei de Hooke. Ponte de Wheatstone. Microcontrolador Arduino.

ABSTRACT

The objective of this graduate work is to provide a manual for load cell projects, specifically ones submitted to flexion and traction - typical forms of load application - based on the use of extensometers and calculations developed on literature. In this work, some basic concepts for assimilation of reasoning are presented, such as Hooke's Law and deformation definitions, types of request and strain gauges, as well as relevant characteristics of current strain gauges and for their correct positioning. In addition, the use of Wheatstone Bridges in their different configurations as meters for comparison is explained, as well as the main types of transducers built by strain gauges, and the use of the Arduino microcontroller as a relevant alternative for reading deformations and for data treatment. Finally, the calculations for two types of load transducers are presented: the binocular model and the model with stress concentrator, and it is expected that the complete design of load cells for industrial applications in the flexion and traction modalities is possible for different materials, from these memorials.

KEYWORDS: Load cells. Extensometer. Strain gage. Flexion. Traction. Binocular. Stress concentrator. Hooke's law. Wheatstone bridge. Arduino microcontroller.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de Células de Carga comerciais para aplicações industriais	11
Figura 2 – Tensão sobre um determinado ponto	14
Figura 3 – Curva $\sigma \times \epsilon$	15
Figura 4 – Elementos básicos de um extensômetro	16
Figura 5 – Geometria da grade do extensômetro	18
Figura 6 – Ponte de Wheatstone	20
Figura 7 – Ligação em "quarto de Ponte"	20
Figura 8 – Ligação em Meia Ponte.....	21
Figura 9 – Ligação em Meia Ponte Diagonal.....	21
Figura 10 – Ligação em Ponte Completa.....	22
Figura 11 – Tipos de transdutores.....	23
Figura 12 – Produtos comerciais de transdutores	24
Figura 13 – Ponte de Wheatstone	24
Figura 14 – Exemplos comerciais de células de carga.....	25
Figura 15 – Posicionamento da célula de carga sobre a plataforma	26
Figura 16 – Placa Arduino.....	27
Figura 17 – Desenho esquemático do transdutor.....	28
Figura 18 – Célula de carga de geometria binocular	29
Figura 19 – Indicação da posição dos extensômetros na célula	29
Figura 20 – Reação da célula ao ser submetida a aplicação de carga.....	30
Figura 21 – Ilustração para construção do transdutor concentrador de tensão	34
Figura 22 - Diferença ilustrativa da espessura do corpo se feito em aço e em liga de alumínio forjado (2014-T6)	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.2	JUSTIFICATIVAS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	CONCEITO DE DEFORMAÇÃO	13
2.2	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (ϵ).....	13
2.3	TIPOS DE SOLICITAÇÕES	15
2.4	EXTENSÔMETROS	16
2.5	COLAGEM DO EXTENSÔMETRO	18
2.6	EXTENSÔMETRO ELÉTRICO (“ <i>STRAIN GAGE</i> ”).....	19
2.7	PONTE DE WHEATSTONE.....	19
2.8	TRANSDUTORES	22
2.9	TRANSDUTORES DE CARGA (CÉLULAS DE CARGA)	24
2.10	PLATAFORMA ARDUINO PARA EXTENSÔMETROS	26
3	DESENVOLVIMENTO	28
3.1	TRANSDUTOR BINOCULAR.....	28
3.2	TRANSDUTOR CONCENTRADOR DE TENSÃO.....	33
4	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	Error! Bookmark not defined.

1 INTRODUÇÃO

O uso de células de carga como transdutores de medição de força abrange hoje uma vasta gama de aplicações, desde balanças comerciais até automatização e controle de processos industriais. A célula de carga é um dispositivo eletromecânico que tem como propriedade a medição das deformações de um corpo, seguida de sua transformação em tensão elétrica, e posterior conversão dessa tensão em força. Para a obtenção destes sinais são utilizados sensores do tipo o *strain gage*, ou extensômetros, que convertem, após cálculo, a deformação em tensão mecânica, em conjunto com um circuito - a ponte de Wheatstone - que proporciona uma amplificação do sinal elétrico à medida que se aplica maior peso ou força na estrutura (CARER; CARRARO, 2010).

Obviamente que a forma e as características do corpo da célula de carga, conforme exemplos e meios de solicitação mecânica (tração/compressão e flexão) mostrados na Figura 1, devem ser objeto de um meticuloso estudo, tanto no seu projeto quanto na sua execução, visando assegurar que a relação de proporcionalidade entre a intensidade da força atuante e a consequente deformação do extensômetro seja preservada tanto no ciclo inicial de pesagem quanto nos ciclos subsequentes, independentemente das condições ambientais. A forma geométrica, portanto, deve conduzir a uma "linearidade" dos resultados. Existem diversos tipos de aplicação em uma célula de carga, como por exemplo, compressão, tração ou torque e para cada tipo de célula existem diferentes tipos e quantidades de extensômetros e configurações de circuito.

Figura 1 – Exemplos de Células de Carga comerciais para aplicações industriais



Fonte: HBM (2019).

O intuito deste trabalho é projetar células de carga, compostas por extensômetros elétricos, que apresentam importante aplicação cotidiana. Para realização deste projeto, foi feita pesquisa em relação a tipos diversos de transdutores, e cálculos acerca de uma célula de carga, atuando em flexão e em tração.

Os cálculos apresentados neste trabalho são realizados de forma geral, possível de ser aplicada a outras dimensões de célula de carga, desde que respeitadas as devidas proporcionalidades.

O projeto foi totalmente desenvolvido de forma teórica, enquanto que os cálculos necessários foram realizados de forma efetiva e baseados na literatura. Os cálculos foram anexados ao item “3. DESENVOLVIMENTO” deste trabalho.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho objetiva o projeto de células de carga de flexão e tração destinadas a aplicações industriais. Será apresentada uma revisão bibliográfica, junto de uma memória de cálculo para a confecção completa destes transdutores mencionados.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Pretende-se com esse trabalho de graduação apresentar as formas típicas de aplicação de células de carga, por esta ser uma temática importante para a formação do engenheiro mecânico e por este tema não ser amplamente aprendido durante o curso de graduação. Espera-se que a contribuição desta monografia seja em apresentar como se projetar este tipo de sensor de forma clara para diversas aplicações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITO DE DEFORMAÇÃO

Quando se aplica uma força em um corpo, este tende ter sua forma e dimensão alteradas. Essas mudanças são chamadas de deformações, e essas alterações podem ser desde visíveis a olho nu, até praticamente imperceptíveis quando sem o uso de equipamentos precisos de medição. Exemplos desses tipos de deformações são o ato de esticar um elástico, cuja deformação acaba por ser nítida e perceptível; ou mesmo dentro de um prédio, onde a deformação se dá nos elementos das estruturas deste, devido ao caminhar de pessoas de um lado para outro – esta, porém, que requer certo grau de precisão para ser observada. Em geral, as deformações não são totalmente uniformes sobre todo o volume do corpo em questão: ao longo do comprimento do corpo, a deformação pode variar. Se considerarmos um segmento de linha sobre o corpo, podemos observar que há situações em que uma parte do segmento pode sofrer alongamento, enquanto outra parte sofre contração. Porém, quanto menor considerarmos estes segmentos de linha, mais retilíneos eles ficarão após sofrerem deformação (HIBBELER, 2004).

2.2 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (ε)

Segundo Beer e Johnston (1995), para um estado uniaxial de tensão, estando estas tensões abaixo do limite de proporcionalidade do material, a lei de Hooke é válida, ou seja, a tensão σ é diretamente proporcional à deformação específica ε , e pode ser calculada pela Equação (1):

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

Onde: E = módulo de elasticidade do material ou módulo de Young;

ε = deformação específica;

A deformação específica pode ser determinada pela Equação (2):

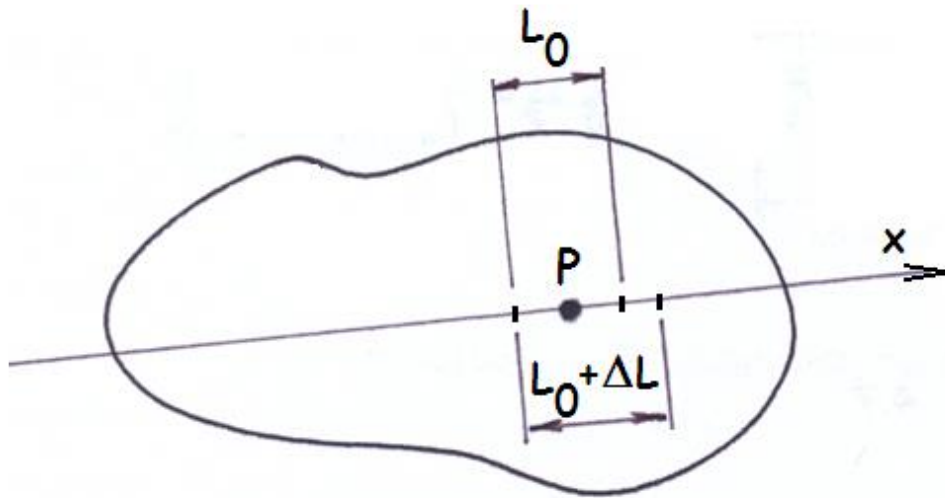
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Onde: L_0 : corresponde a um comprimento base (referência);

ΔL : é a variação do comprimento base;

A F exemplifica tal situação, para determinar a tensão num dado ponto P. Na direção x, traça-se uma distância L_0 em torno do ponto, e após a aplicação de carga sobre este, nota-se uma pequena variação no comprimento L_0 , passando a ser considerado como ΔL . Com isso, torna-se possível determinar a deformação específica normal.

Figura 2 – Tensão sobre um determinado ponto

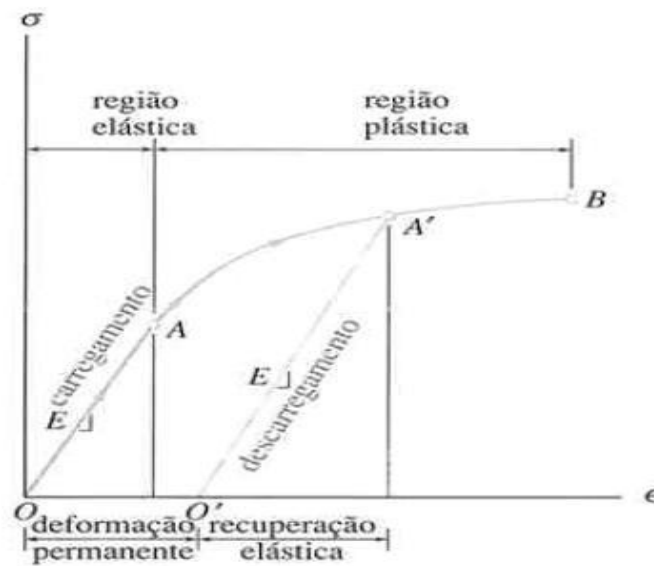


Fonte: Pereira (2014).

A medição dessa forma não apresenta grande precisão, pois é feita baseando-se em um comprimento finito L_0 , e o ideal seria que fosse sobre um ponto; entretanto, tal erro envolvido está relacionado ao gradiente de deformação e comprimento L_0 . Porém, se a deformação específica não variar, ou for linearmente ao longo da peça, podemos desconsiderar os erros devido ao comprimento L_0 .

Para realizar medições de deformações geralmente utiliza-se extensômetros, na qual cada um possui um valor base de L_0 , que deve ser o menor possível, a fim de minimizar erros.

A F mostra a região em que a Lei de Hooke é válida, ou seja, compreendida somente dentro do “Domínio elástico”, onde o material sendo submetido a deformação consegue recuperar-se. A região compreendida entre o limite elástico até o final da curva é denominada “região plástica”, onde o material não consegue recuperar-se totalmente após sofrer deformação, e, portanto, não é válida a Lei de Hooke (PEREIRA, 2012).

Figura 3 – Curva $\sigma \times \epsilon$ 

Fonte: Hibbeler (2004).

Como a deformação específica é uma grandeza adimensional, o módulo de elasticidade E , terá a mesma unidade da tensão σ , Pascal ou seus múltiplos no Sistema Internacional, e psi ou ksi no Sistema Inglês de unidades.

2.3 TIPOS DE SOLICITAÇÕES

Antes de iniciar o estudo sobre os extensômetros e como são medidas as deformações atuantes, será feito um breve resumo dos tipos de solicitações, na qual geram deformações normais e angulares.

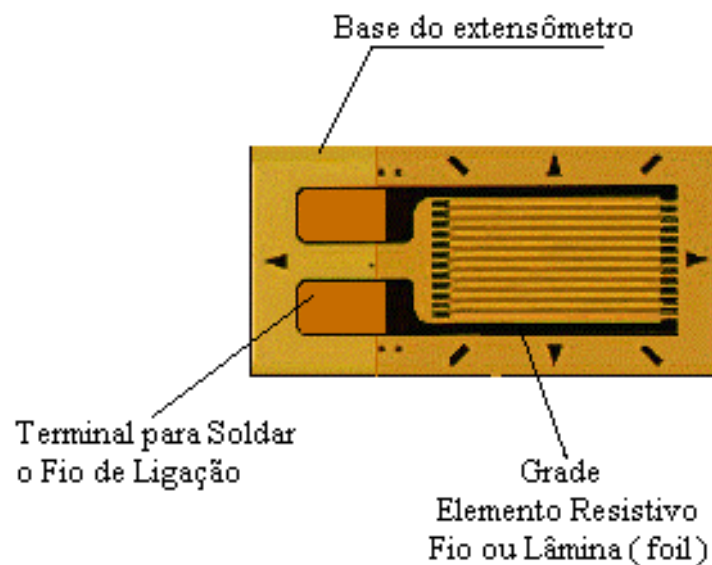
- **Tração (Deformação Normal):** Esse tipo de deformação tende a alongar o corpo, tendo direção no sentido oposto ao apoio ou inércia resultante do sistema de forças (exemplo: um cabo de aço de um guindaste);
- **Compressão (Deformação Normal):** Esse tipo de deformação tende a encurtar o corpo, tendo direção no mesmo sentido do apoio ou inércia do sistema de forças (exemplo: colunas de construção civil);
- **Cisalhamento (Deformação Angular):** Esse tipo de deformação tende a cortar o corpo (exemplo: tesouras e guilhotinas);

- **Flexão (Deformação Normal):** Solicitação tende a girar o corpo. A tensão tende a uma rotacionar o eixo geométrico do corpo e tangenciando o apoio ou inércia (exemplo: trampolim de piscina);
- **Torção (Deformação Angular):** Solicitação que tende a torcer o corpo, a tensão tende a uma rotação angular sobre o eixo geométrico do corpo e axial ao apoio ou inércia (exemplo: eixo cardã dos caminhões) (BEER; JOHNSTON, 1995).

2.4 EXTENSÔMETROS

Basicamente o extensômetro é um elemento utilizado na medida de deformações de um corpo. Quando o material que queremos medir sofre deformação, a grade do extensômetro colado diretamente sobre uma das superfícies do corpo sofre alteração em seu comprimento, fazendo com que a resistência elétrica medida seja alterada proporcionalmente a essa deformação. A F ilustra um exemplo de extensômetro, no qual podemos ver a grade enquanto parte frágil que sofre deformação (UNIVERSITY OF DELAWARE, 2013).

Figura 4 – Elementos básicos de um extensômetro



Fonte: University of Delaware (2013).

Para caracterizar como seria um extensômetro ideal, podemos listar as principais características:

- Apresentar um menor comprimento base L_0 possível;
- Possuir pequenas dimensões e pouco peso;
- Ter grande sensibilidade e precisão;
- Ser de fácil instalação;
- Conseguir realizar medições estáticas e dinâmicas;
- Permitir leitura local e/ou a longa distância;
- Baixo custo;
- Livre de ações de interferências externas, como temperatura, vibrações, umidade, etc.

O extensômetro que mais se aproxima das características de um extensômetro ideal é o extensômetro elétrico (EER).

Vale ressaltar que os extensômetros são sensíveis apenas a deformações normais (ϵ), sejam elas de tração ou de compressão. Quando há a necessidade de medir deformações de cisalhamento (γ), podemos consegui-las através da medição das deformações normais em duas ou três direções diferentes (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

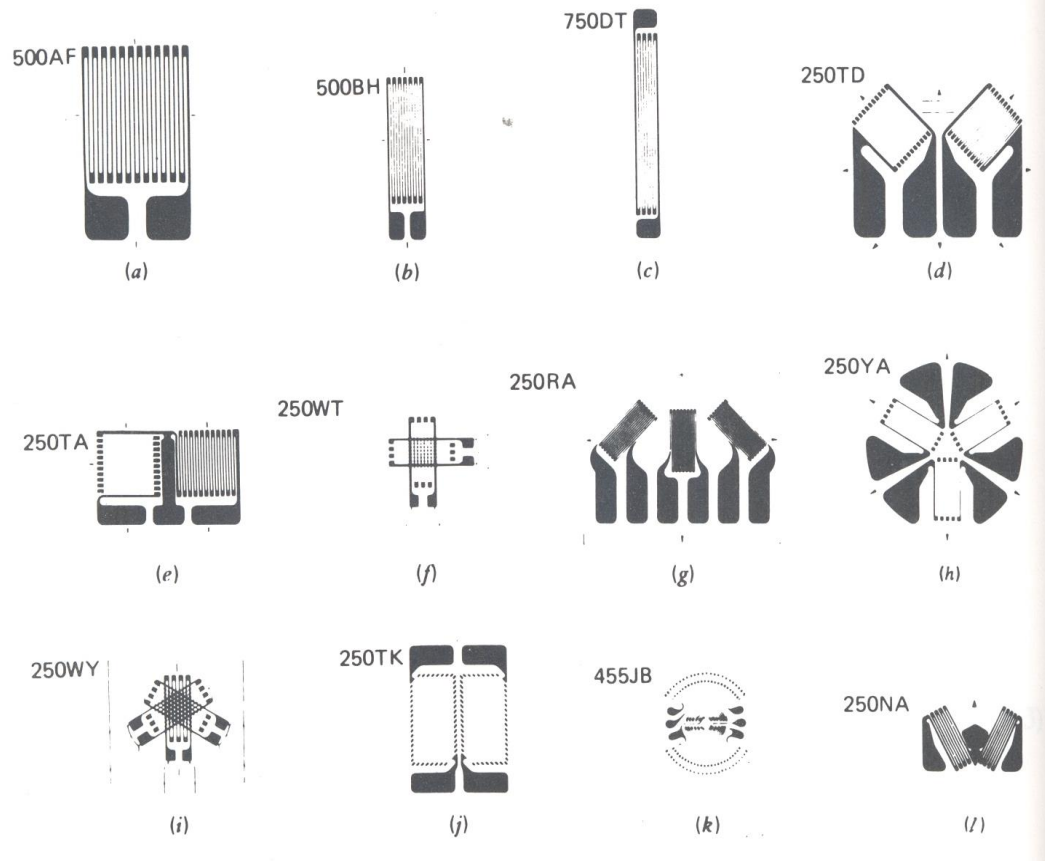
As ligas mais utilizadas comercialmente na fabricação das grades dos extensômetros são:

- Constantan – também chamado de Advance, destacando que é material com mais ampla utilização.
- Karman ou Evanohm – utilizado em transdutores quando se quer compensar a variação do módulo de elasticidade do material do corpo do transdutor com a alteração da temperatura.
- Isoelástico – utilizado em ensaios que são submetidos a altas frequências e por longos períodos de tempo (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Podemos ter diferentes disposições de grade dos extensômetros, dependendo do tipo de esforço a que os mesmos serão submetidos. O posicionamento da grade do extensômetro deve coincidir com a direção da deformação principal.

A F apresenta alguns exemplos de diferentes disposições de extensômetros que podem ser encontradas no mercado.

Figura 5 – Geometria da grade do extensômetro



Fonte: Dally, Riley e McConnell (1993).

2.5 COLAGEM DO EXTENSÔMETRO

Para que o extensômetro exerça sua função de forma correta, deve-se tomar alguns cuidados básicos no momento de colá-lo a superfície da peça que será submetida a tensão para que não haja distorção dos resultados. Aparentemente essa colagem pode ser feita com qualquer adesivo que possua uma cola de qualidade, porém, alguns cuidados devem ser tomados para que não ocorra problemas que possam prejudicar as informações obtidas com o equipamento, como por exemplo diferença na variação de resistência elétrica, problemas caracterizados por histerese, entre outros (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

Segundo Dally, Riley e McConnell (1993), antes de ser instalado o extensômetro, deve-se tomar algumas precauções com a superfície do corpo, mantendo a superfície limpa e eliminando qualquer vestígio que possa interferir na aderência do material. A preparação consiste em remover tintas e camadas de ferrugem (se necessário realizar lixamento), eliminação de óleos ou qualquer substância semelhante (utilizando solventes para poder eliminá-los, geralmente acetona ou metiletil cetona).

Após feita a colagem, o adesivo passa por um procedimento a determinadas condições de temperatura e pressão por um intervalo de tempo para garantir a aderência adequada para o processo.

Temos diversos materiais para adesivos, porém destacamos aqui os mais comumente utilizados: cimento de nitrato de celulose, cimento de epóxi, cimento cerâmico e cimento de cianoacrilato. (DALLY; RILEY; MCCONNELL, 1993).

2.6 EXTENSÔMETRO ELÉTRICO (“*STRAIN GAGE*”)

O extensômetro segue o fundamento de que os materiais metálicos sofrem alteração de resistência elétrica ao sofrem algum tipo de deformação.

Para fios, de acordo com a teoria elétrica, temos que a resistência depende do comprimento do fio e da área de seção transversal deste. A Equação (3) a seguir fundamenta tal dependência:

$$R = \rho \cdot \frac{l_0}{A} \quad (3)$$

Sendo: ρ : resistividade do material;

l_0 : comprimento original do fio (antes da deformação);

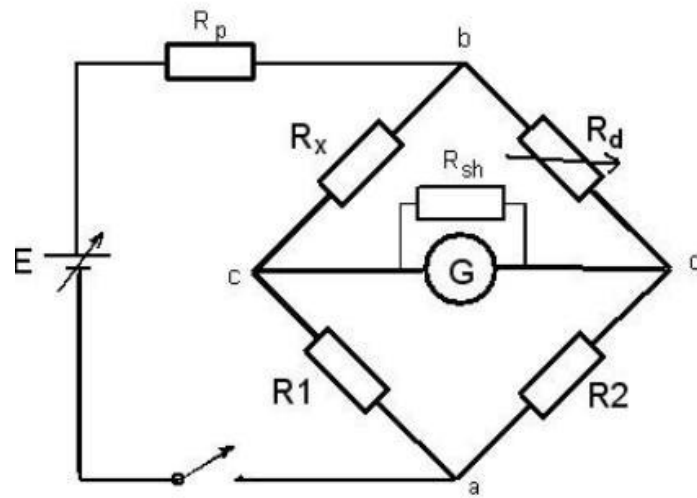
A: área da seção transversal do fio;

2.7 PONTE DE WHEATSTONE

A Ponte de Wheatstone é um circuito utilizado como medidor por comparação, medindo-se as resistências do circuito. Analisando a F, se os valores das resistências R_x , R_d , R_1 e R_2 estiverem posicionados de forma que os potenciais **c** e **d** estejam iguais, nenhuma corrente será indicada no Galvanômetro.

Com a ponte em equilíbrio, se uma das resistências for desconhecida, consegue-se determinar esta incógnita. Para conseguir o equilíbrio da ponte utiliza-se uma resistência de valor ajustável. Uma característica importante da Ponte de Wheatstone é que sua sensibilidade é máxima quando são utilizadas 4 resistências de igual valor (ou bem próximas), se o valor de uma delas variar um pouco, a variação de corrente indicada no Galvanômetro é grande.

Figura 6 – Ponte de Wheatstone



Fonte: Instituto de Física da UNICAMP (2013).

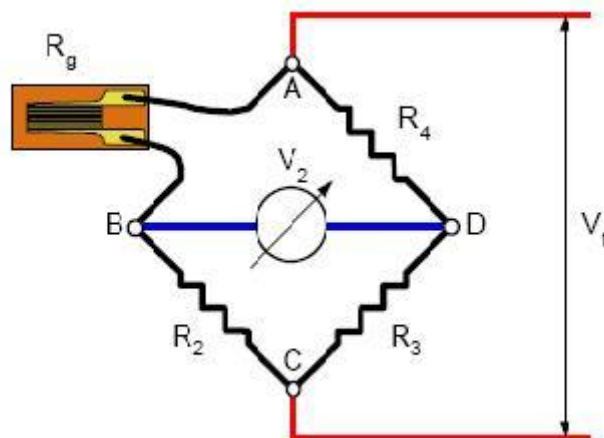
Os transdutores geralmente utilizam quatro extensômetros ligados em circuito de ponte de Wheatstone. Existem três formas de ligá-los em ponte de Wheatstone, conforme Figuras 7 a 10.

- Ligação em “quarto de Ponte” – utiliza apenas um extensômetro ativo, e os demais atuam apenas como resistores, não sofrendo deformações.

Neste tipo de ligação temos:

- $R_1=R_2=R_3=R_4 \rightarrow r=1$ e;
- $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ (as resistências não sofrem deformação).

Figura 7 – Ligação em "quarto de Ponte"



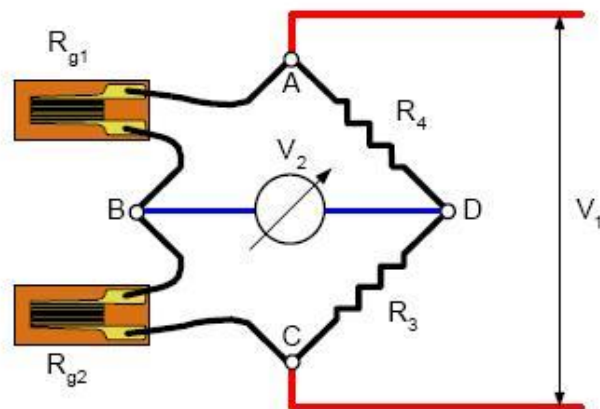
Fonte: Instituto de Física da UNICAMP (2013).

- Ligação em “meia Ponte” – utiliza dois extensômetros ativos, e os outros atuam apenas como resistores, ou seja, não sofrem deformações.

Neste tipo de ligação temos:

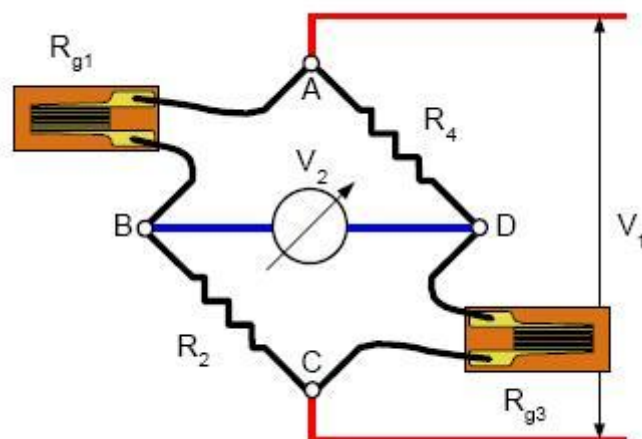
- $R_1=R_2=R_3=R_4 \rightarrow r=1$ e;
- $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ (as resistências não sofrem deformação).

Figura 8 – Ligação em Meia Ponte



Fonte: Instituto de Física da UNICAMP (2013).

Figura 9 – Ligação em Meia Ponte Diagonal

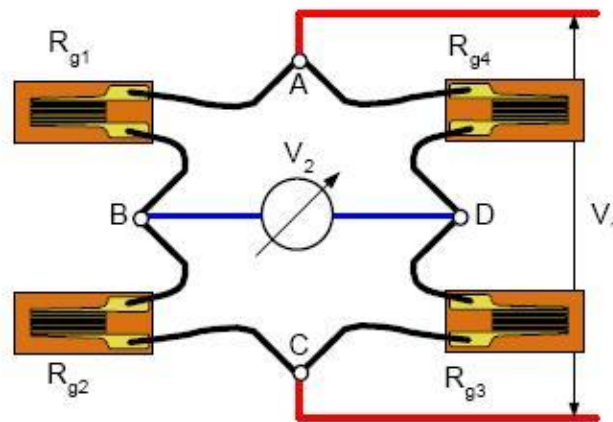


Fonte: Instituto de Física da UNICAMP (2013).

Ligação em “Ponte completa” – todos os extensômetros são ativos. Neste tipo de ligação o efeito da temperatura é eliminado (PEREIRA, 2014).

Neste tipo de ligação temos: $R_1=R_2=R_3=R_4 \rightarrow r=1$.

Figura 10 – Ligação em Ponte Completa



Fonte: Instituto de Física da UNICAMP (2013).

2.8 TRANSDUTORES

Segundo Barreto Júnior (2012), “transdutor é qualquer dispositivo capaz de transformar um tipo de sinal em outro para permitir um controle de processos físicos ou realizar uma medição”.

Geralmente, em análise experimental de estruturas, utilizam-se aparelhos mecânicos, elétricos, ópticos e acústicos para medição dos movimentos. Podemos citar alguns exemplos mecânicos podemos como relógios comparadores, quanto a elétrica podemos citar aparelhos resistivos e indutivos, quanto aos ópticos temos a mira telescópica e a interferometria a laser, e por fim quanto a acústica podemos citar os transdutores de corda vibrante (BARRETO JUNIOR, 2012).

Segundo Barreto Junior (2012), um transdutor é constituído basicamente de elemento elástico, extensômetros e circuitos compensadores e Invólucro externo. O elemento elástico é a peça que sofre a deformação, devido a carga aplicada sobre ela. Os extensômetros são colados no elemento elástico, e apresentam uma pequena variação de resistência elétrica, proporcional a deformação sofrida pelo corpo. O invólucro externo serve de proteção para os extensômetros e as ligações, evitando contato com poeira, umidade, ou até mesmo danos mecânicos.

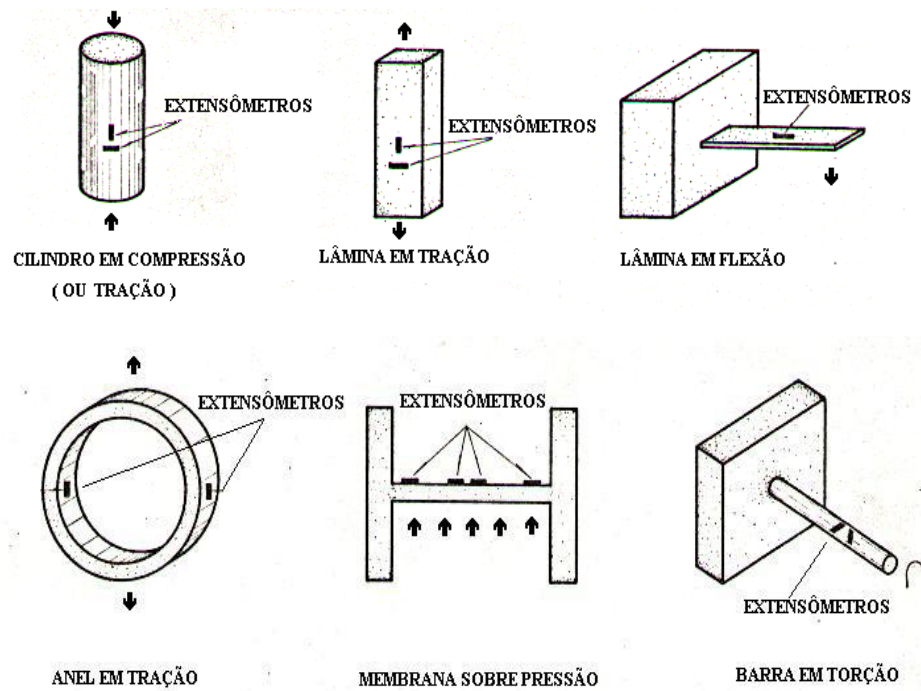
Podemos citar que os principais tipos de transdutores construídos com extensômetros são:

- Transdutor de carga (célula de carga);
- Transdutor de pressão;

- Transdutor de deslocamento;
- Transdutor de inclinação;
- Transdutor de aceleração (acelerômetro);

A F ilustra alguns exemplos de geometria do elemento elástico dos transdutores.

Figura 11 – Tipos de transdutores



Fonte: Barreto Junior (2012).

A F mostra alguns exemplos de células de carga comumente encontradas comercialmente:

Figura 12 – Produtos comerciais de transdutores



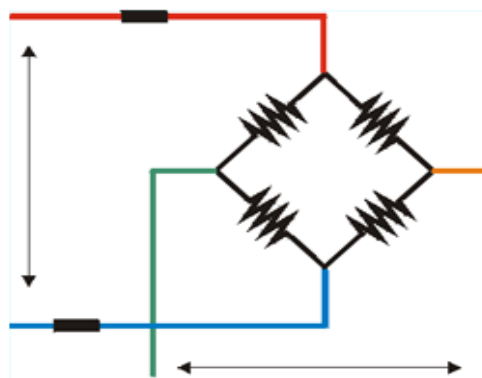
Fonte: LABMETRO (2012).

2.9 TRANSDUTORES DE CARGA (CÉLULAS DE CARGA)

O tipo mais comum de transdutor de força é a chamada célula de carga, geralmente utilizada em balanças. A maioria das células de carga são baseadas em um elemento elástico e em elementos resistivos ou indutivos de deslocamento ou de deformação.

O princípio de funcionamento da célula de carga consiste na variação de resistência ôhmica do sensor, denominado extensômetro, que é fixado em uma estrutura rígida, e submetida a uma deformação. Normalmente, as células de carga utilizam quatro extensômetros ligados entre si em circuito de Ponte de Wheatstone (conforme F), e o desbalanceamento da mesma em virtude da deformação dos extensômetros é proporcional à força aplicada (MIROTTI, 2008).

Figura 13 – Ponte de Wheatstone



Fonte: MIROTTI (2012).

Nas células de carga normalmente, são utilizadas pontes completas, ou seja, os quatro resistores ativos.

Dois fatores fundamentais que caracterizam a deformação do material são: a forma geométrica do mesmo e seu módulo de elasticidade.

As variações de capacidade nominal das células de carga abrangem um intervalo grande, desde 5 N e chegam até 50 MN, sendo um sistema de medição amplamente utilizado (UFSC, 2012).

A F mostra alguns exemplos de células de carga encontradas no mercado.

Figura 14 – Exemplos comerciais de células de carga

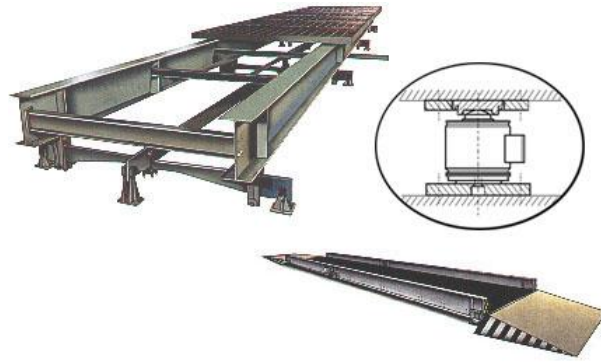


Fonte: LABMETRO (2012).

As células de carga tem maior utilização na indústria, para pesagens de tanques, plataformas de pesagem, medição de nível, dinamômetros, correias transportadoras, silos, automatização de processos, entre diversas outras aplicações.

A F ilustra uma plataforma de pesagem, destacando a localização da célula de carga na mesma.

Figura 15 – Posicionamento da célula de carga sobre a plataforma



Fonte: Portal Célula de Carga (2013).

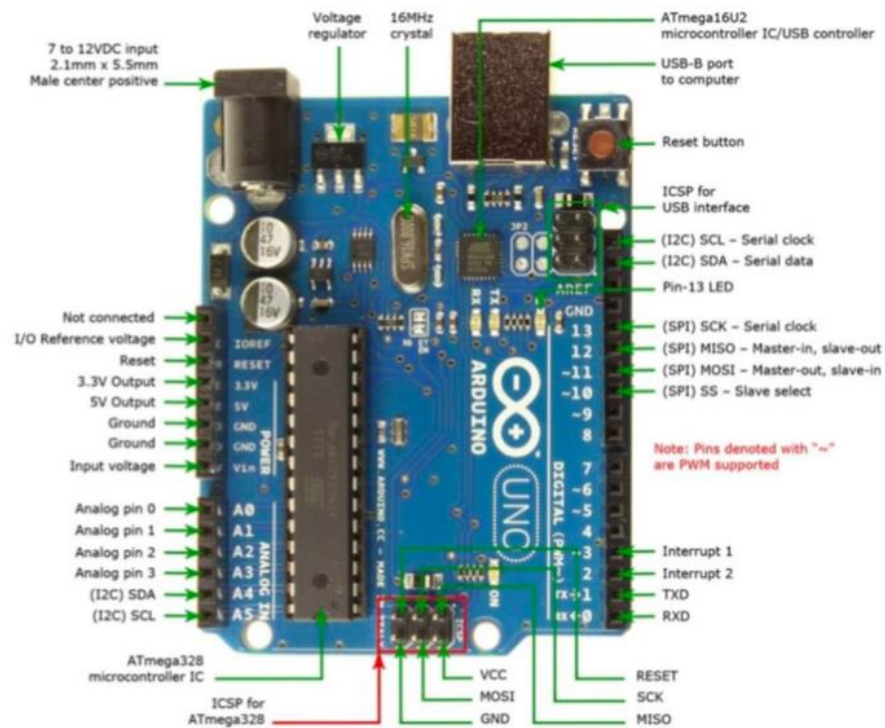
2.10 PLATAFORMA ARDUINO PARA EXTENSÔMETROS

Segundo Silva et al. (2018), em muitas situações práticas da engenharia, o conhecimento de esforços e tensões que são aplicadas em uma estrutura é de vital importância, pois a previsibilidade dos materiais depende particularmente desses parâmetros. Além disso, é importante evitar deformações que podem levar a estrutura a falhar quanto a proposta a qual ela foi construída. Geralmente, modelos matemáticos ou métodos de elementos finitos são necessários para prever os esforços na estrutura. Porém há algumas situações que modelamentos não são possíveis ou seus resultados são aproximações que não podem ser comparadas com as tensões reais que agem na estrutura. Nesses casos, para evitar o superdimensionamento, o ensaio é uma alternativa.

O método mais comum na medição de tensões é o que utiliza o extensômetro elétrico de resistência, e como já citado anteriormente, ele permite que a tensão seja medida indiretamente, a partir da medição da variação da resistência elétrica enquanto a peça é submetida a deformação, o que é comumente realizado através da Ponte Wheatstone. Porém, visto que o custo para o uso de extensômetros é relativamente elevado, que eles não são reutilizáveis e que o tratamento dos dados obtidos no experimento geralmente necessita de um equipamento já preparado que plote as curvas de tensão x deformação e apresente as tensões obtidas durante o ensaio, o custo total do experimento é geralmente alto.

Nesses casos, o uso do microcontrolador Arduino, exemplificado na Figura 16, tem sido amplamente utilizado para leitura de deformação dos extensômetros e tratamento dos dados - como mostra Vieira (2016) - devido ao seu baixo custo e facilidade de programação, pois este utiliza uma linguagem um pouco mais familiar ao mundo da eletrônica: a linguagem C++.

Figura 16 – Placa Arduino



Fonte: Vieira (2016).

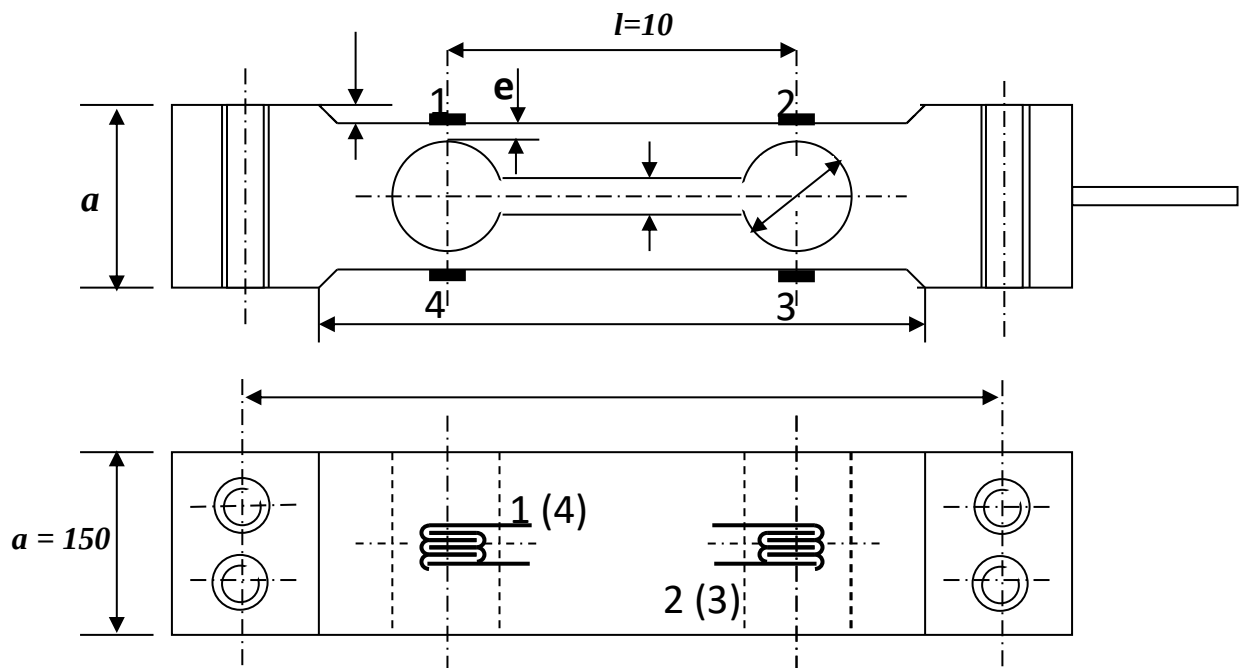
3 DESENVOLVIMENTO

Este trabalho apresenta os cálculos para projeto dois tipos de transdutores de carga, no caso, o modelo binocular e com concentrador de tensão. A escolha por estes modelos de transdutores foi idealizada em virtude de sua ampla aplicabilidade, em relação a outros modelos disponíveis no mercado.

3.1 TRANSDUTOR BINOCULAR

Tendo estipulada a carga a ser aplicada, pode-se dimensionar a espessura “e” necessária para que a célula de carga trabalhe de forma eficaz e segura. Na **Error! Reference source not found**.17 tem-se o desenho da peça que será utilizada nos cálculos, com as cotas necessárias para o desenvolvimento dos cálculos. Além disso, no desenho pode-se notar a disposição dos extensômetros (numerados de 1 a 4).

Figura 17 – Desenho esquemático do transdutor



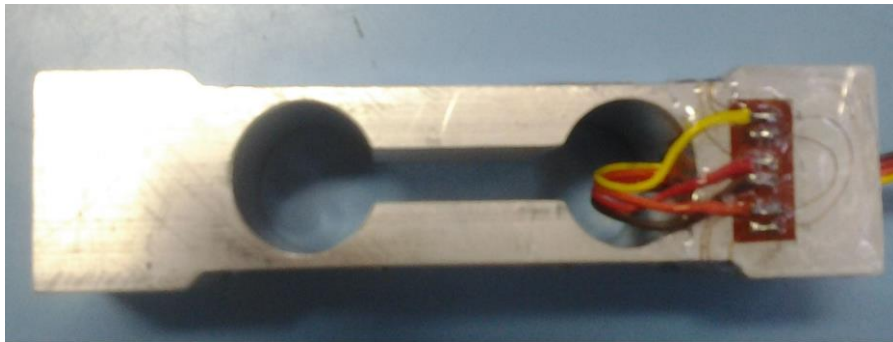
Fonte: HBM (2019).

O trabalho foi realizado de forma totalmente teórica, seguindo fielmente os conceitos da literatura apresentada nas referências bibliográficas deste trabalho. Portanto, afirma-se que os

cálculos podem ser estendidos para aplicações em diferentes condições de operações, respeitando-se as devidas proporções.

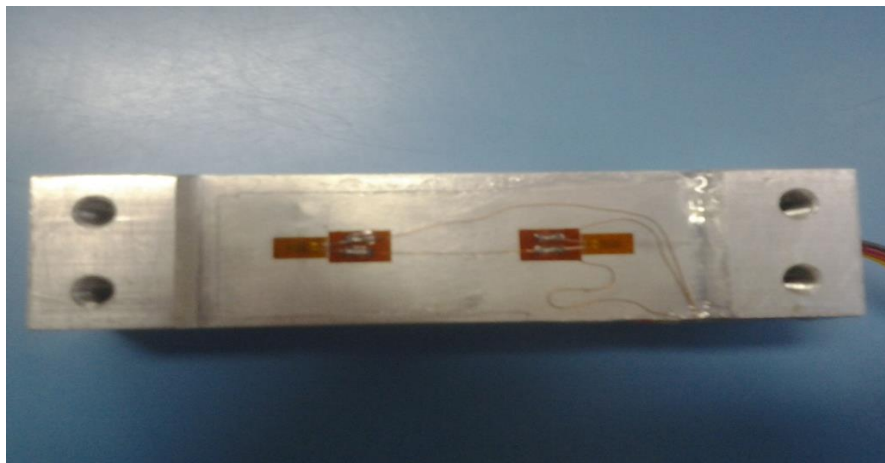
A **Error! Reference source not found.**17 mostra uma peça com geometria binocular real, conforme a utilizada nos cálculos e a **Error! Reference source not found.**18 ilustra o posicionamento dos extensômetros conforme apresentado anteriormente na **Error! Reference source not found.**7.

Figura 18 – Célula de carga de geometria binocular



Fonte: Própria autora.

Figura 19 – Indicação da posição dos extensômetros na célula

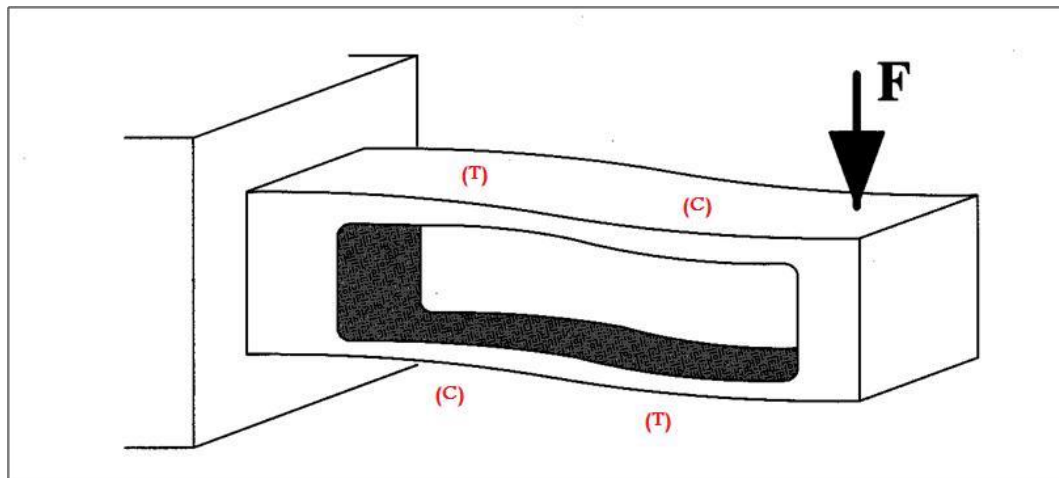


Fonte: Própria autora.

Para este experimento foi considerado Ponte de Wheatstone completa, posicionando dois extensômetros de cada lado da peça, de acordo com a Figura 19, sendo resistor R1 paralelo a R4, e o resistor R2 paralelo a R3.

Ao ser submetida à aplicação de carga, a célula reage como o exemplo apresentado na **Error! Reference source not found.**0, com cada lado, tanto inferior como superior, sofrendo tração e contração ao mesmo tempo. Isso explica o posicionamento dos extensômetros.

Figura 20 – Reação da célula ao ser submetida a aplicação de carga



Fonte: Fujimoto (2013).

Foram realizados os cálculos para dois tipos de materiais diferentes (Aço e Alumínio) onde se pode observar com os resultados, a diferença necessária na espessura da célula para que ambas possam trabalhar de forma segura.

Na Figura 20, pode-se observar o comportamento (em relação aos tipos de esforços), que ocorrem em uma célula de carga do tipo binocular, onde, em virtude de uma maior concentração de massa nos extremos da célula (vide Figura 19), além do rasgo interno, fazem com que estes esforços apresentem-se diferentes de uma viga engastada com um carregamento concentrado localizado na extremidade oposta à vinculação.

Baseando-se na teoria, definida a geometria (binocular) e o material a ser utilizado em uma célula de carga, será determinada a espessura necessária para atender ao esforço solicitado para a célula.

Para o primeiro cálculo utilizamos o alumínio como material da célula de carga, e definimos a carga a ser aplicada. Em um segundo momento, realizamos o mesmo procedimento sob as mesmas condições, porém alterando apenas o material, dessa vez utilizando o aço.

Para o estudo adotamos uma carga de $m = 5$ toneladas (5000 kg) ou seja, $F = 49,1$ kN, $l = 100$ mm de comprimento entre os centros das circunferências, $a = 150$ mm que corresponde a ambas altura e largura da peça, conforme cotas indicadas na **Error! Reference source not found.**

Adotada a carga a ser utilizada para a célula, e com o auxílio das equações que serão apresentadas, será possível definir a espessura “e”, conforme apresentado na **Error! Reference**

source not found.. Para facilitar o entendimento, são listados os parâmetros utilizados neste estudo:

P = carga aplicada;

a = largura da célula de carga;

l = comprimento da região da célula de carga onde serão colados os *strain gages*;

E= módulo de elasticidade do material da célula de carga;

1,08 = corresponde a 8% de acréscimo no sinal para compensar a inserção dos resistores de ajuste;

1º caso

Dados relativos ao material:

Material: Alumínio

E = 70 GPa ($0,71 \cdot 10^6$ kgf/cm²)

P = 5000 kgf

Definidos os parâmetros utilizados, pode-se efetuar os cálculos do momento fletor (Equação 4), módulo de resistência à flexão (Equação 5) e tensão normal devido à flexão pelas Equações (Equação 6) e deformação específica devido à flexão (Equação 7).

$$M = \frac{Pl}{4} \quad (4)$$

$$W = \frac{ae^2}{6} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{3Pl}{2ae^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{3Pl}{2Eae^2} \quad (7)$$

- **Momento Fletor na posição do gage.**

$$M = \frac{Pl}{4} \leftrightarrow M = \frac{5000 \cdot 10}{4} = \mathbf{12500 \text{ kgf. cm}}$$

- **Módulo de resistência à flexão.**

$$W = \frac{ae^2}{6} \quad \leftrightarrow \quad W = \frac{15.e^2}{6} = 2,5e^2$$

- **Tensão normal devido à flexão.**

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{3Pl}{2ae^2} \quad \leftrightarrow \quad \sigma = \frac{12500}{2,5e^2} = \frac{5000}{e^2}$$

- **Deformação Específica, devido à flexão.**

Para a condição de projeto $2mV/V$, tem-se:

$$\frac{\Delta E}{V} = k\varepsilon \quad \varepsilon = \frac{1}{k} \left(\frac{\Delta E}{V} \right) \cong \frac{1}{2} * \frac{2mV}{V} = \frac{1mV}{V} = 1.10^{-3} \rightarrow \varepsilon = 1000.10^{-6}$$

Substituindo na Equação 7, tem-se:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \leftrightarrow \varepsilon = \frac{5000}{e^2} \cdot \frac{1}{0,71.10^6} \leftrightarrow e = \sqrt{\frac{5000}{0,71.10^6.10^{-3}} \cdot 1,08} \leftrightarrow e = 2,76 \text{ cm} = \underline{\underline{27,6 \text{ mm}}}$$

Portanto, tem-se que a espessura “e” deve ser igual a 27,6 mm.

2º caso

Dados relativos ao material:

Material: Aço

$$E = 200 \text{ GPa } (2,04.10^6 \text{ kgf/cm}^2)$$

$$P = 5000 \text{ kgf}$$

No segundo caso, será realizado o mesmo procedimento, entretanto, dessa vez será utilizando o aço como material.

- **Momento Fletor na posição do gage.**

$$M = \frac{Pl}{4} \leftrightarrow M = \frac{5000 \cdot 10}{4} = \mathbf{12500 \text{ kgf. cm}}$$

- **Módulo de resistência à flexão.**

$$W = \frac{ae^2}{6} \leftrightarrow W = \frac{15 \cdot e^2}{6} = \mathbf{2,5e^2}$$

- **Tensão normal devido à flexão.**

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{3Pl}{2ae^2} \leftrightarrow \sigma = \frac{12500}{2,5e^2} = \frac{5000}{e^2}$$

- **Deformação Específica, devido à flexão.**

Para a condição de projeto $2mV/V$, tem-se:

$$\frac{\Delta E}{V} = k\varepsilon \quad \varepsilon = \frac{1}{k} \left(\frac{\Delta E}{V} \right) \cong \frac{1}{2} * \frac{2mV}{V} = \frac{1mV}{V} = 1 \cdot 10^{-3} \rightarrow \varepsilon = \mathbf{1000 \cdot 10^{-6}}$$

Isolando-se a variável “e” na Equação (7), tem-se:

$$e = \sqrt{\left(\frac{3Pl}{2Ea\varepsilon} \right)} \cdot 1,08 \leftrightarrow e = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 5000 \cdot 10}{2 \cdot 2,04 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-3}} \right)} \cdot 1,08 = \mathbf{1,63 \text{ cm} = \underline{\underline{16,3 \text{ mm}}}}$$

Para o Aço tem-se a espessura $e = 16,3 \text{ mm}$.

Relação entre as espessuras encontradas:

$$\frac{e(Al)}{e(Aço)} = \frac{2,76}{1,63} = \mathbf{1,69}$$

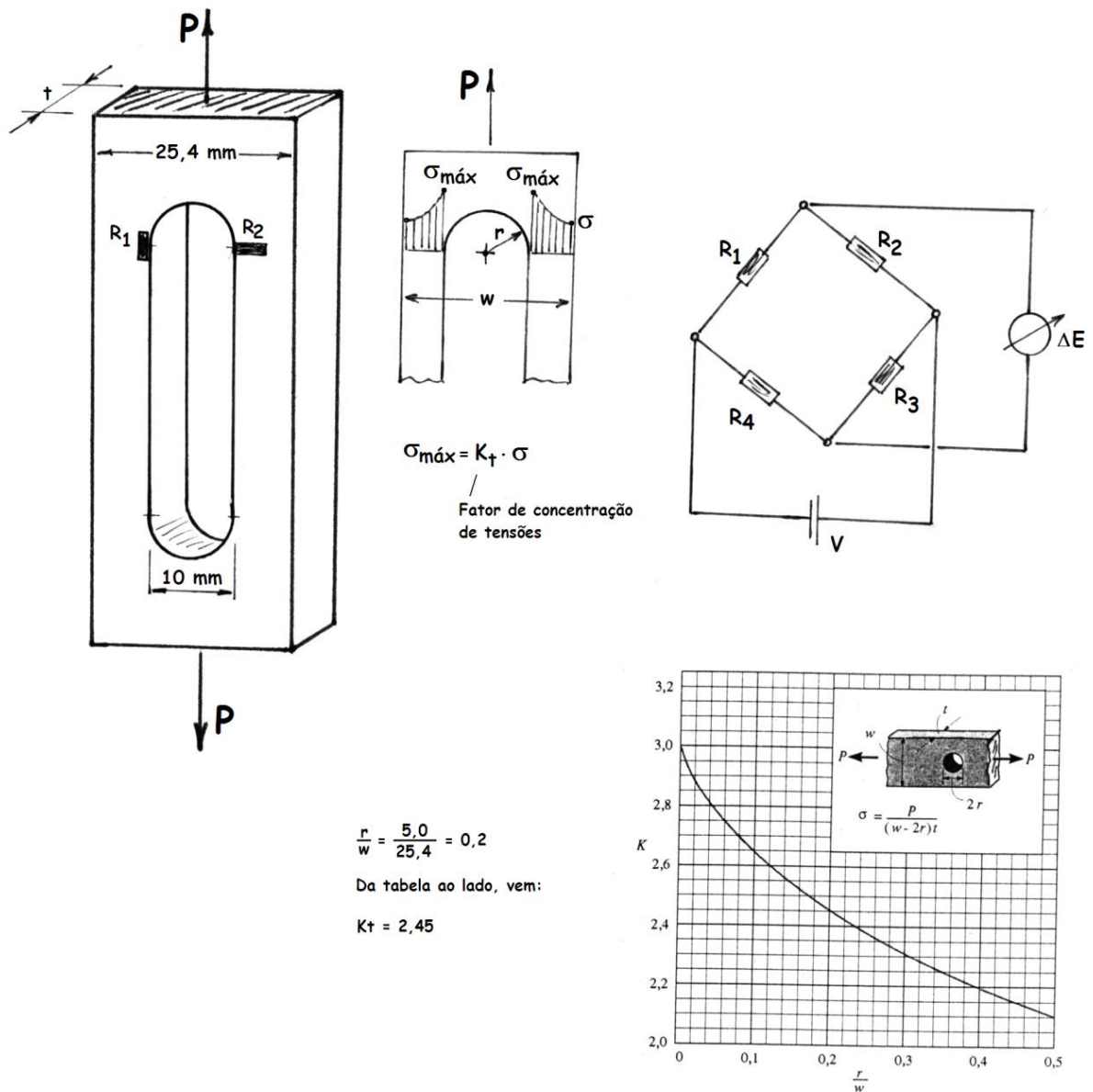
Comparando as espessuras encontradas nos cálculos nota-se que para a célula de alumínio a espessura deve ser consideravelmente maior do que a apresentada para célula de carga de aço, de acordo com os cálculos a relação entre as espessuras é maior que 1,5.

Isso pode ser explicado devido ao alumínio apresentar baixo módulo de elasticidade do material, geralmente 1/3 do apresentado no aço, fazendo com que sua deformação seja maior do que a do aço.

3.2 TRANSDUTOR CONCENTRADOR DE TENSÃO

Deseja-se construir uma “célula de carga” para medir uma força máxima de 4000 N ($\approx$ 400kgf). O material do transdutor é aço com $E = 210$ GPA e $\sigma_{adm} = 310$ MPa. Adotando o coeficiente de Poisson igual a 0,3 e considerando que irá se utilizar uma chapa de 1” (25,4 mm) de largura, com furo alongado no centro de diâmetro 10 mm, como mostrado. Pede-se especificar a espessura para essa chapa.

Figura 21 – Ilustração para construção do transdutor concentrador de tensão



Fonte: Pereira (2014)

Tomando-se os quatro extensômetros, dois de cada lado, sendo R_1 paralelo a R_3 e R_2 paralelo a R_4 , que foram colados em pontos de concentração de tensões, onde as tensões são máximas (maior sensibilidade), como mostrado na figura. Montando-se a correspondente ponte de Wheatstone (ponte completa), temos a Equação (8):

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{k}{4} [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4] \quad (8)$$

Dada a disposição dos extensômetros (longitudinal e transversal) no corpo, então temos a Equação (9):

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon \quad (\text{deformação longitudinal}) \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_4 = -\nu\varepsilon \quad (\text{deformação transversal})\end{aligned}$$

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{k(1+\nu)}{2} \varepsilon \quad (9)$$

Considerando que as deformações sejam elásticas (lei de Hooke) e a tensão no local onde estão colados os extensômetros é máxima, temos a Equação (10):

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{máx}} &= K_t \cdot \sigma = K_t \cdot \frac{P}{A} \\ \sigma &= E \cdot \varepsilon \quad \text{então :} \quad \varepsilon = \frac{K_t \cdot P}{E \cdot A}\end{aligned} \quad (10)$$

A partir da Equação (10) podemos reescrever a Equação (9) e determinar a Equação (11):

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{k(1+\nu)}{2} \cdot \frac{K_t}{EA} P \quad (11)$$

Onde: E , ν – depende do material do corpo

A – depende da geometria do corpo

Pode-se analisar da Equação (11), que:

- Se A for muito grande $\rightarrow \Delta E/V$ é pequeno
- Se A for muito pequeno $\rightarrow \Delta E/V$ é grande

Na Equação (11) tomando-se a carga P como a carga máxima $P_{\text{máx}} \rightarrow (\Delta E/V)_{\text{máx}}$.

Reescrevendo obtemos a Equação (12):

$$\left(\frac{\Delta E}{V}\right)_{\text{máx}} = \frac{k(1+\nu)}{2} \cdot \frac{K_t}{EA} P_{\text{máx}} \quad (12)$$

ou ainda, como a Equação (13):

$$A_{\min} = \frac{k(1+\nu)}{2 \left(\frac{\Delta E}{V}\right)_{\max}} \cdot \frac{K_t}{E} P_{\max} \quad (13)$$

Por outro lado, $\left(\frac{\Delta E}{V}\right)_{\max}$ não pode assumir qualquer valor, há restrições que devem ser obedecidas, tal como mostra a Equação (14):

$$\sigma_{\max} = \frac{K_t \cdot P_{\max}}{A} \leq \sigma_{\text{adm}} \quad \text{ou} \quad P_{\max} \leq \frac{A}{K_t} \sigma_{\text{adm}} \quad (14)$$

Então, substituindo a Equação (13) na Equação (14) e considerando $k=2,0$, temos a Equação (15):

$$\left(\frac{\Delta E}{V}\right)_{\max} \leq \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \sigma_{\text{adm}} \quad (15)$$

Então substituindo os valores numéricos iniciais na Equação (15) temos:

$$\left(\frac{\Delta E}{V}\right)_{\max} \leq \frac{(1+0,3)}{210 \times 10^9} \cdot (310 \times 10^6) = 0,00192 \approx 0,0020$$

Como para transdutores comerciais normalmente temos a relação da Equação (16):

$$0,001 \leq \left(\frac{\Delta E}{V}\right)_{\max} \leq 0,003 \quad (16)$$

Vamos adotar, por exemplo, $\left(\frac{\Delta E}{V}\right)_{\max} = 0,0015$ e voltando na equação (13):

$$A_{\min} = \frac{2,0(1+0,3)(2,45)}{2(210 \times 10^9)(0,0015)} \cdot 4000 = 4,04 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Como a área da seção transversal, onde estão posicionados os extensômetros, é dada pela Equação (17):

$$A = (w - 2r)t = (0,0254 - 0,010)t = 0,0154t \quad (17)$$

Logo, para que o transdutor não seja danificado temos que:

$$A \geq A_{\min} \quad \therefore \quad 0,0154t \geq 4,04 \times 10^{-5} \quad \rightarrow \quad \underline{t \geq 2,62 \text{ mm}}$$

Observação: Se o corpo fosse de *liga de alumínio forjado (2014-T6)* com as seguintes características: $E = 70 \text{ GPa}$; $\nu = 0,346$; $\sigma_e = 255 \text{ MPa}$ e adotando $\left(\frac{\Delta E}{V}\right) = 0,0015$, teríamos

uma espessura maior, tal como:

$$A_{\min} = \frac{2,0 (1 + 0,346) (2,45)}{2 (70 \times 10^9) (0,0015)} \cdot 4000 = 1,257 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Como, $A = 0,0154 t$, teríamos: $\underline{t \geq 8,16 \text{ mm}}$. A situação é ilustrada na Figura 22.

Figura 22 - Diferença ilustrativa da espessura do corpo se feito em aço e em liga de alumínio forjado (2014-T6)



Fonte: Própria autora.

4 CONCLUSÃO

Através do método apresentado, pode-se executar o projeto completo de células de carga para aplicações industriais, sendo estes na modalidade de flexão e tração e em diferentes materiais, conforme apresentados: alumínio e aço.

O equacionamento, instrumentação e fabricação das células de carga podem ser aplicados conforme especificações de uso para estes transdutores. Desta forma, acredita-se que este trabalho de graduação pode atender aos objetivos inicialmente propostos.

REFERÊNCIAS

BARRETO JUNIOR, E. **Extensometria**: manual prático. Apostila, UNESP, 2012.

BEER, F. P.; JOHNSTON JÚNIOR, E. R. **Resistência dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 1995. 1255 p.

CARER, M.; CARRARO, E. **Célula de carga**. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/BrenoAkerman/celulas-decargas1>. Acesso em: 11 out. 2019.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; MCCONNELL, K. G. **Instrumentation for engineering measurements**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1993. 608 p.

4.1.1 FUJIMOTO, T. M. **Projeto de um transdutor binocular utilizando extensometria e aplicação na pesagem rodoviária**. 2013. 88 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2013.

HBM - HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. **Strain gauges catalog**: as introduction to measurements using strain gauges. Darmstadt, 2019. 88 p.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 674 p.

HOFFMANN, K. **An introduction to stress analysis and transducer design using strain gages**. Darmstadt: HBM, 1989. 265 p. Disponível em: http://www.kk-group.ru/help/Strain_Gauge_Measurements_Book_2012_01.pdf. Acesso em: 11 out. 2019.

INSTITUTO DE FÍSICA DA UNICAMP. **Conceito sobre ponte de Wheatstone**. Disponível em: http://www.ifi.unicamp.br/leb/f329-06/4_ponte_de_Wheatstone.pdf. Acesso em: 10 out. 2019.

LABMETRO. **Apostila Departamento de Engenharia Mecânica**. Santa Catarina: UFSC, 2012. Não Publicado.

MIROTTI, M. **Definição de célula de carga**. Disponível em: http://www.primaxbalancas.com.br/site200801a/celulas_conceito.htm. Acesso em: 10 out. 2019.

PEREIRA, C. P. M. **Mecânica dos materiais avançada**. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 432 p.

PORTAL CÉLULA DE CARGA. **Célula de carga**. C2019. Disponível em: <http://celuladecarga.com.br/17/celulas-de-carga/>. Acesso em: 10 out. 2019.

SILVA, A. L.; VARANIS, M.; MERELES, A. G.; OLIVEIRA, C.; BALTHAZAR, J. M. **A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices**. Disponível

em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172019000300401. Acesso em: 11 out. 2019.

VIEIRA, M. A. R. **Sensor inteligente para medição de cargas mecânicas**. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/13185/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o.pdf>. Acesso em: 11 out. 2019.

UNIVERSITY OF DELAWARE. **Conceito de extensômetro**. Disponível em: <http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>. Acesso em: Set. 2019.