

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA

1800318 - Laboratório de Projeto de Engenharia (2019)

**Utilização de extensômetros para aquisição de forças no protótipo
Baja 2019**

Helio Hugo Faganelli Martins, N USP: 10262440
Manassés Barros de Faria Filho, N USP:8956731

6 de Setembro de 2019

1 Objetivos

Verificar a possibilidade de medir deformações em um cilindro metálico, quando submetido a torque ,através do desbalanceamento de uma ponte de Wheatstone composta por strain gauges colados ao cilindro. Medir os valores das resistências de cada strain gauge com um multímetro. Obter o equacionamento elétrico do circuito e a simulação do experimento no PSIM e no MATLAB.Montar um circuito elétrico com resistores para zerar a ponte de Wheatstone. Adicionar ao circuito um resistor limitador de corrente que passará pelos strain gauges. Acoplar o circuito com a ponte de Wheatstone, o circuito estabilizador da ponte e o resistor limitador de corrente ao C.I. INA125.

2 Introdução

A possibilidade de estudo e interpretação de um problema físico real de maneira indireta , através da leitura de outras grandezas a ele relacionadas são de imenso interesse para a engenharia. Através de medidas de corrente elétrica e de diferença de potencial elétrico , buscar-se-á encontrar relação entre essas grandezas e uma força mecânica aplicada a uma peça metálica.

Este experimento buscará evidenciar as dificuldades e possibilidades enfrentadas por profissionais e estudantes que trabalham desenvolvendo sensores para os mais diversos usos, inclusive com software simuladores. Especialmente na área automotiva.

3 Teoria

Os medidores de deformação chamados extensômetros são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas suas medições em variações equivalentes em sua resistência elétrica.

Diferentes métodos de inspeção não destrutivos para medidas de tensões têm sido explorados e desenvolvidos, mas nenhum dispositivo tem uma utilização mais ampla do que os extensômetros em relação à sua aplicabilidade. Isto se deve à precisão das medidas, a facilidade de manipulação e sua capacidade de monitorar deformações desde as mais pequenas até grandes cargas.

Extensômetros, portanto, são utilizados para medir deformações em diferentes estruturas. A medida é realizada fixando-o em um corpo, tendo em vista que ele converte a deformação em uma variação de resistência elétrica, que é transformada para níveis de tensão. Deformações em diversos pontos de estruturas sob condições de serviço podem ser obtidas, com uma boa precisão e sem destruir o material que está sob análise. Dentre as características das medidas com extensômetros estão:

- Alta precisão na medição;
- Pequeno tamanho e pouco peso;
- Excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos;
- Fácil utilização;
- Excelente linearidade;
- Medições obtidas dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- Usados para obtenção de força, pressão, torque, aceleração, deslocamento;
- Possibilita as medidas em locais remotos;

Princípio de funcionamento

Se um dado material sofre uma força aplicada, sabe-se que esta força é proporcional à deformação causada na região elástica do material, no qual se mantém uma relação constante entre magnitude desta força e o valor da deformação.

Comumente, quando os materiais são tracionados eles têm a propriedade de se alongar, e de encolher quando são comprimidos.

A deformação é obtida através da equação 1, no qual Δl apresenta a variação no comprimento inicial l .

A propriedade de a deformação responder linearmente à tensão na região elástica obedece à Lei de Hooke, dada pela equação 2 e pode ser representada no diagrama tensão x deformação da figura 1. Onde E é uma constante que varia de acordo com o material do corpo.

O extensômetro é baseado no fato de que os metais mudam sua resistência elétrica quando sofrem uma deformação. Na Figura 2 a linha contínua mostra parte de um fio metálico, como usado nos extensômetros, onde l é o comprimento original antes da deformação, e este apresenta uma resistência elétrica, R . A linha pontilhada apresenta o fio metálico alongado, seu comprimento agora igual a $l + \Delta l$ e resistência igual a $R + \Delta R$. A resistência elétrica R é dada

pela equação 3. Onde ρ corresponde a resistividade do material do fio e A refere-se à secção transversal do condutor. Assim, pode-se notar que quanto maior o comprimento l do fio, maior será sua resistência, e é através desse princípio que se dá o funcionamento dos extensômetros.

Tipos de extensômetros

Um tipo comum de extensômetro é mostrado na Figura 3. Uma lâmina metálica resistiva de espessura de alguns microns é fixada em um material eletricamente isolado chamado base. Porções desnecessárias do material da lâmina são eliminadas pelo processo de fotogração, de acordo com o padrão desejado do extensômetro. Então, este trabalho é seguido pela soldagem dos fios de saída. Usualmente, extensômetros são feitos para ter uma resistência de 120Ω mas existem extensômetros disponíveis com resistências de 350Ω , 500Ω , 1000Ω .

Existem muitos tipos de extensômetros disponíveis dependendo dos propósitos de aplicação, tamanhos e materiais, e eles são geralmente classificados como:

- Fios resistivos;
- Lâmina;
- Semicondutor;
- Semicondutor por difusão

Classificação de acordo com o material de base:

- Base de papel;
- Base de baquelita;
- Base de poliéster;
- Base de poliamida;

Outros (finalidades especiais).

Classificação de acordo com sua configuração:

- Uniaxiais;
- Biaxiais;
- Múltiplos eixos (roseta);
- Padronização especial

Existem muitas condições a serem consideradas para a comparação das características dos extensômetros, porém, usualmente os extensômetros de lâmina são superiores aos de fios resistivos.

Uma grande variedade de extensômetros de diferentes especificações é disponível para escolha dependendo do propósito e das condições de medição. Uma escolha imprópria resultará em uma não efetiva aquisição de medidas. Para a correta escolha dos extensômetros é necessário atentar para algumas características de operação, tais como:

- Faixa de temperatura à que o extensômetro estará submetido;
- Limite máximo de alongamento do próprio extensômetro;
- Corrente (amperagem) máxima suportada pelo extensômetro;

- Resistência à umidade;
- Durabilidade necessária; Limite máximo de alongamento do próprio extensômetro;

Cada fabricante de extensômetro trará suas especificações mais precisas sobre cada tipo fabricado, assim a tabela abaixo é somente uma indicação sobre os tipos mais usuais de extensômetros usados e suas características. A Tabela 1 mostra especificações sobre os tipos de extensômetros.

Técnicas de medição

Circuitos elétricos especiais são empregados para medidas de deformação com extensômetros montados em corpos de prova, em outras palavras, para medir as variações de resistência dentro de um circuito elétrico, visto que esta variação é muito pequena, da ordem de $(10)^{-4}\Omega$. O circuito é geralmente chamado de ponte de Wheatstone. Este é o circuito mais frequentemente usado e o que apresenta maior precisão para medidas de pequenas variações de resistência.

A função de um circuito de ponte é de converter uma pequena mudança na resistência em uma tensão elétrica. O circuito da ponte de Wheatstone é formado por quatro resistores, R1, R2, R3 e R4, como mostrado na Figura 4.

Após a ponte de Wheatstone, é necessário ainda circuitos que amplifiquem o sinal de tensão obtido e um microcontrolador utilizado para fazer a conversão dos níveis de tensão elétrica para força. O diagrama de blocos é mostrado na figura 5.

Fixação do extensômetro

O extensômetro utilizado deve ser fixado no corpo a ser ensaiado através de uma cola baseada em resina epóxi.

Para colar um extensômetro no corpo de prova, a cola é aplicada na parte de trás da base do extensômetro e na área de colagem do próprio corpo de prova, e então o extensômetro é colocado na posição requerida e permitido o endurecimento da cola com uma pressão aplicada sobre o conjunto.

Algumas colas apresentam um endurecimento tão rápido que em quase todos os casos uma mera pressão na superfície do extensômetro com a ponta dos dedos é suficiente para completar o trabalho colagem. Outras colas, no entanto, necessitam a aplicação de uma pressão contínua por um período fixo de tempo para completar o trabalho colagem.

É de praxe utilizar pinças de mola para fornecer a pressão necessária na colagem dos extensômetros. Existem vários tamanhos de pinça com diferentes pressões de mola, porém, a adequada pressão de colagem é ajustada segundo a área do homogeneizador de tensões, que usualmente é uma chapa de aço que tem uma chapa de borracha de silicone colada a ela.

Já que as condições de cura têm amplos efeitos na colagem e no desempenho do extensômetro, é de suma importância sempre manter a temperatura e a pressão indicada por cada fabricante pelo tempo determinado de forma mais criteriosa possível.

3.1 Equações

Equação 1:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Equação 2

$$\sigma = \epsilon E$$

Equação 3

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Equação 4

$$\frac{V_0}{V_1} = TG \frac{16(u+1)}{\pi E I D^3 \epsilon}$$

Equação 5

$$\frac{V_0}{V_1} = CF$$

3.2 Tabelas

Tabela 1: Especificações sobre os tipos de extensômetros

Tipo (base)	Temperatura de Operação(C)	Alongamento Máximo(%)	Corrente Máxima(mA)	Mudança da resistência do extensor com a idade	Principais aplicações
lâmina (Phester)	-50 a +180	2	30 ou menos	Pequena	Medidas gerais de tensão ,transdutores ,medidas de tensões residuais
lâmina (polamida)	-50 a +180	2	30 ou menos	Pequena	Medidas gerais de tensão ,transdutores ,medidas de tensões residuais
lâmina (polamida para grandes deformações)	-10 a +120	8 a 10	30 ou menos	Pequena	Medidas de deformações plásticas
Fios (papel)	-50 +80	1.2	25 ou menos	Ligeira variação	Medidas usuais de tensões
Fios (poliéster)	-50 +170	1	25 ou menos	Pequena	Medidas usuais de tensão em estruturas de campo

3.3 Diagramas e Figuras

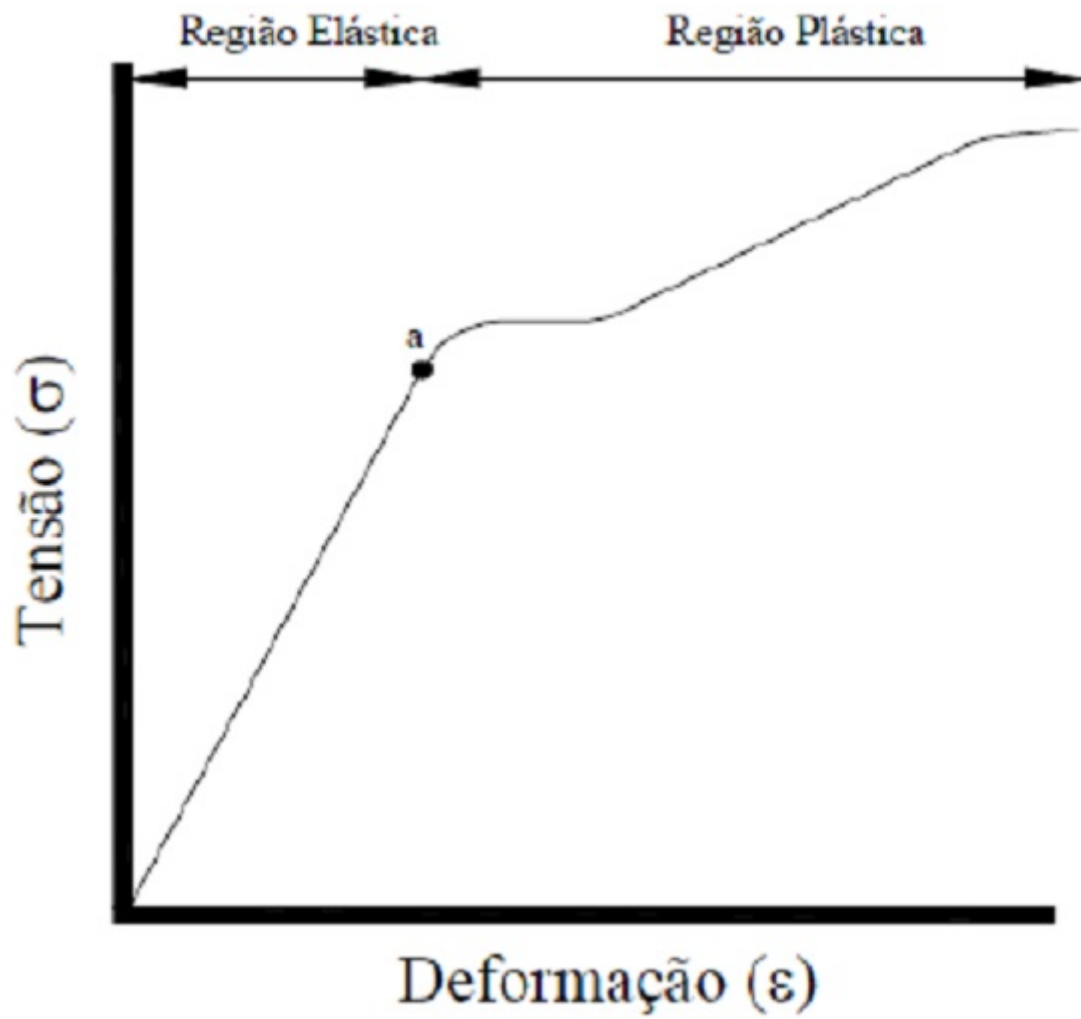
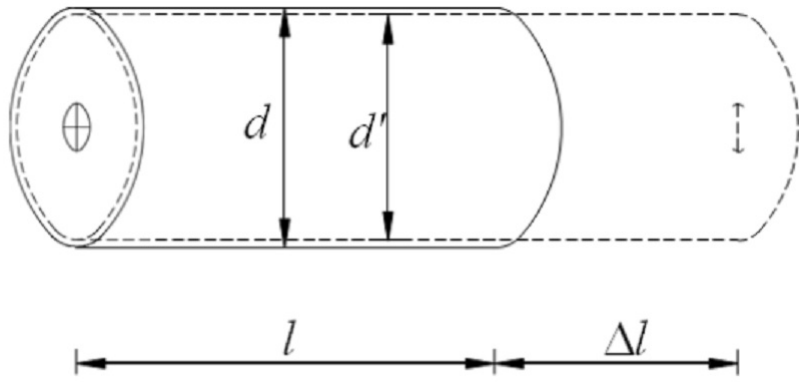


Figura 1: diagrama tensão x deformação



abaixo

Figura 2: Deformação de um fio metálico

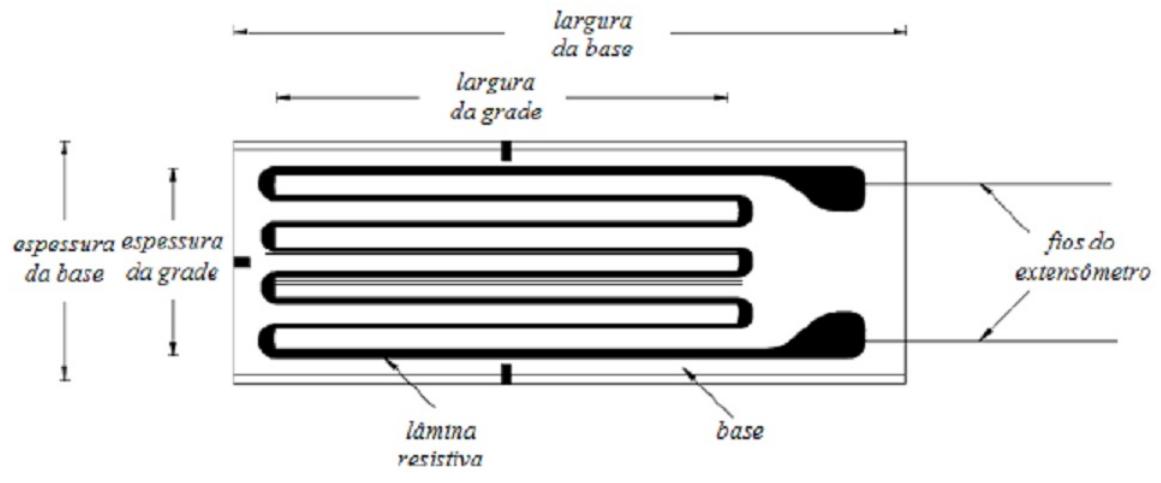


Figura 3: Aspecto físico de um extensômetro

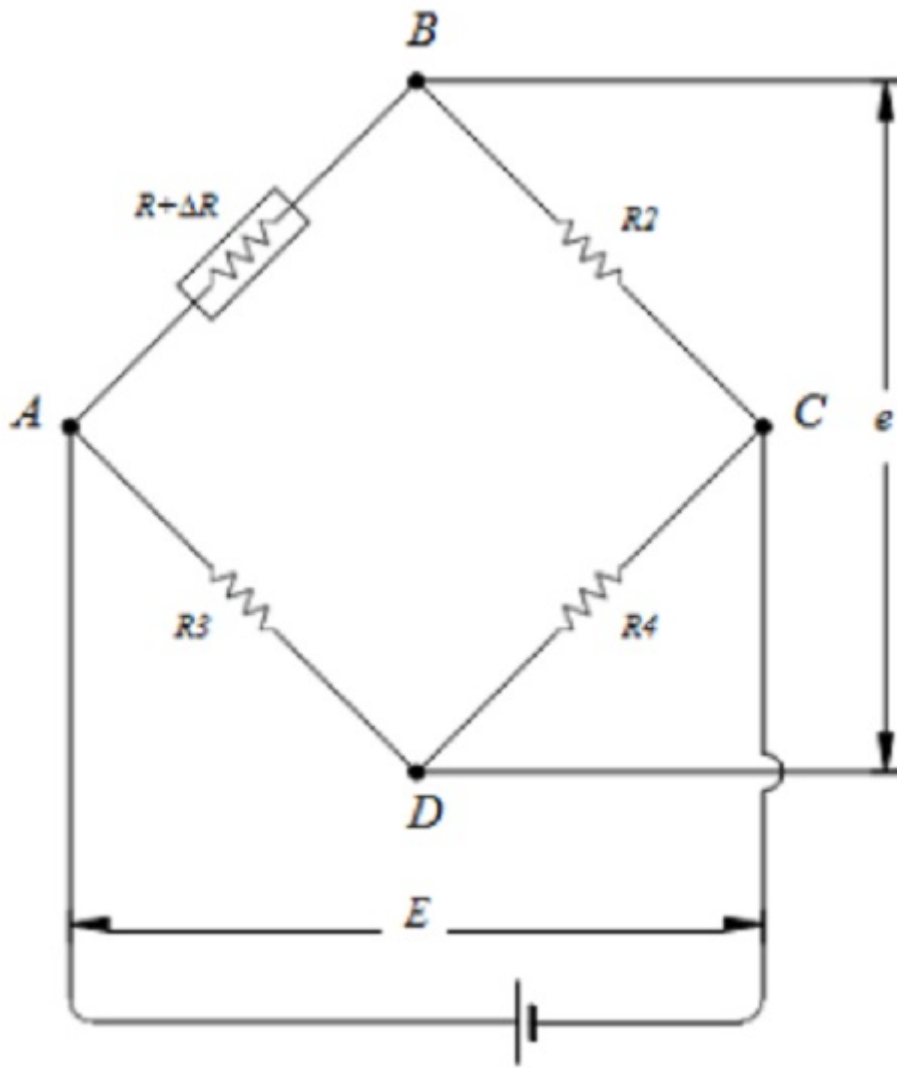


Figura 4: Ponte de Wheatstone

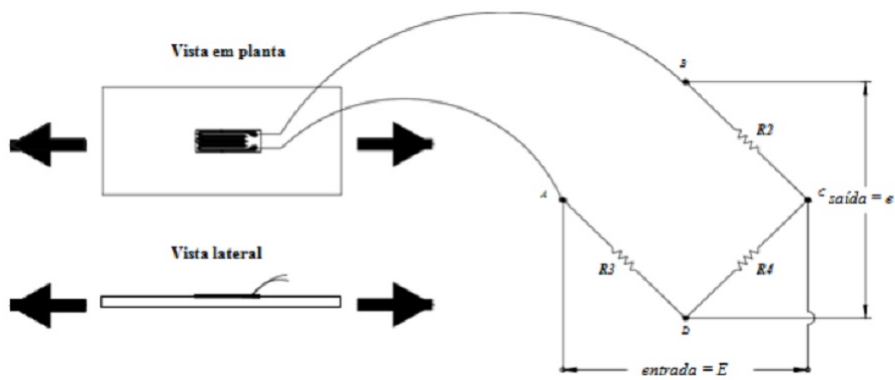


Figura 5: Esquema de uma ligação real do extensômetro na ponte

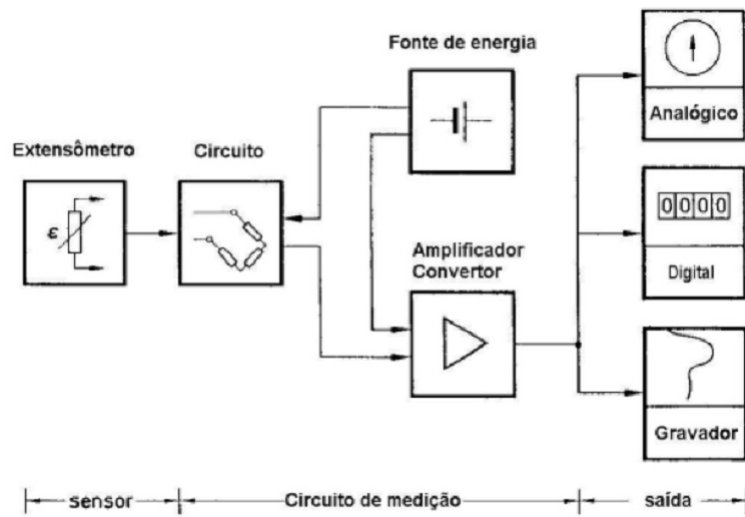


Figura 6: Diagrama de blocos que envolve a leitura do extensômetro

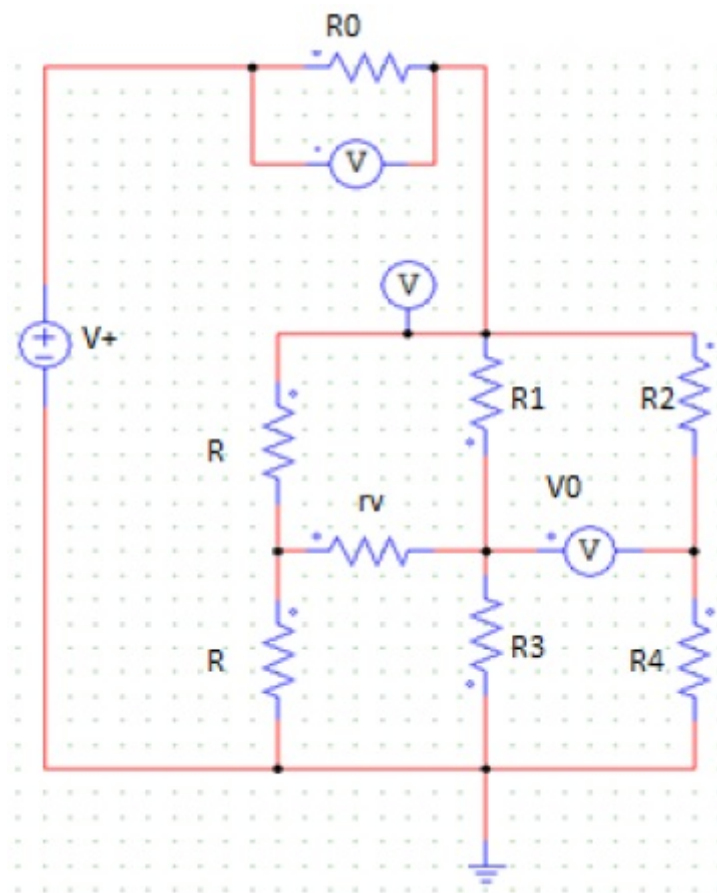


Figura 7: circuito montado no PSIM com ponte equilibrada

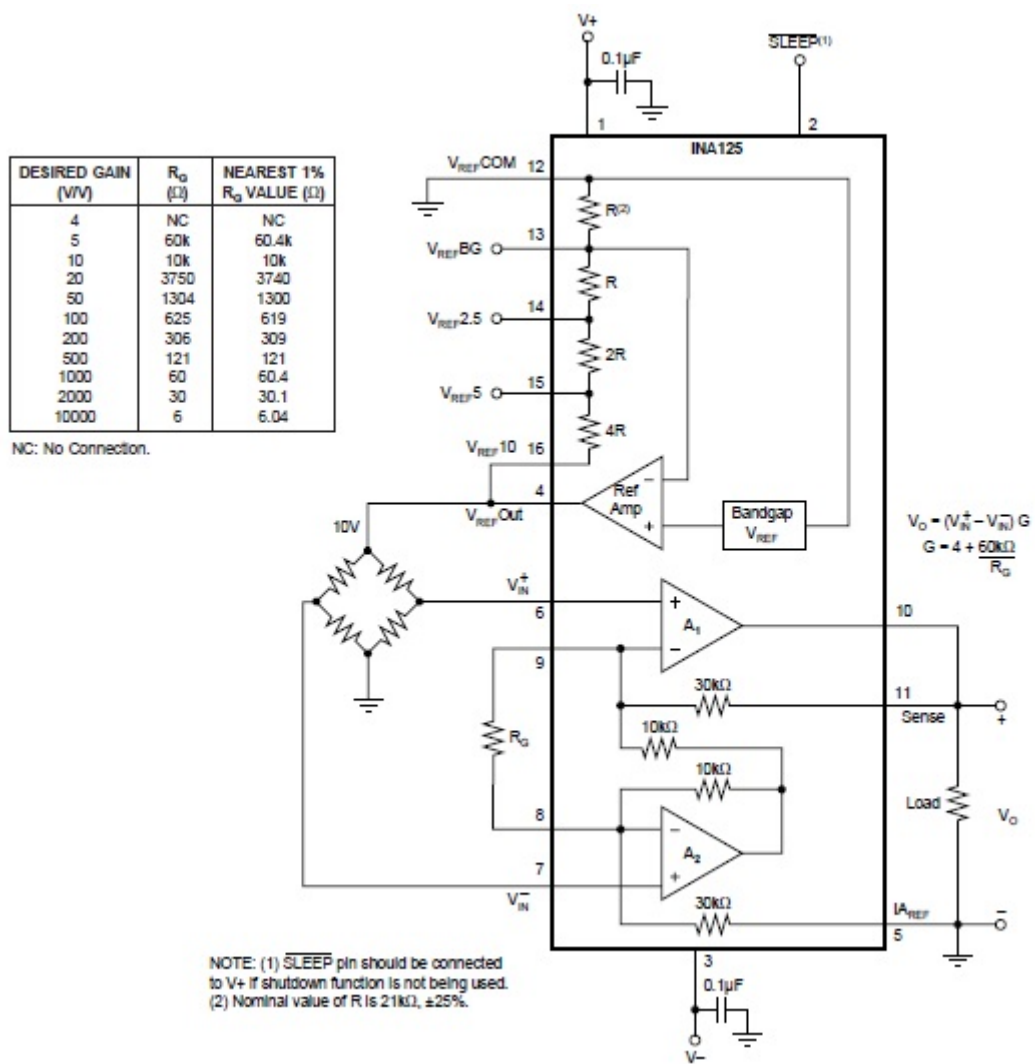


Figura 8: Célula de carga ligada ao amplificador

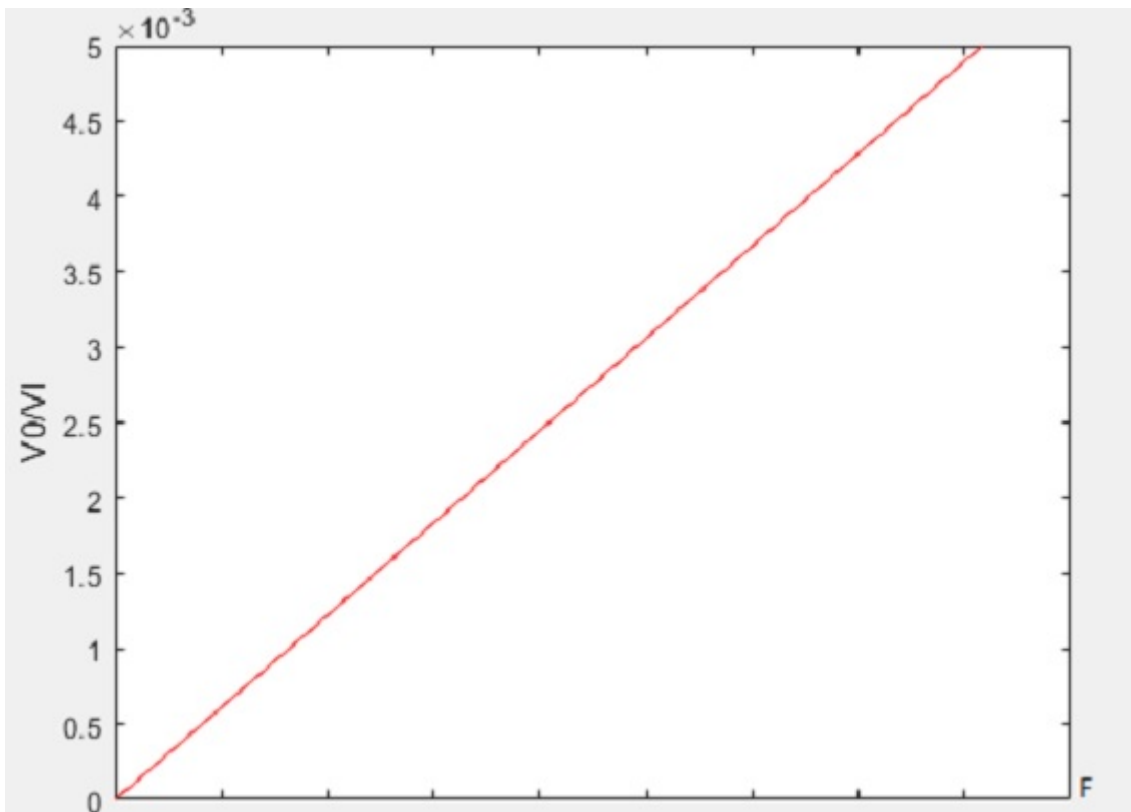


Figura 9: Dependência linear entre V_0 e F .

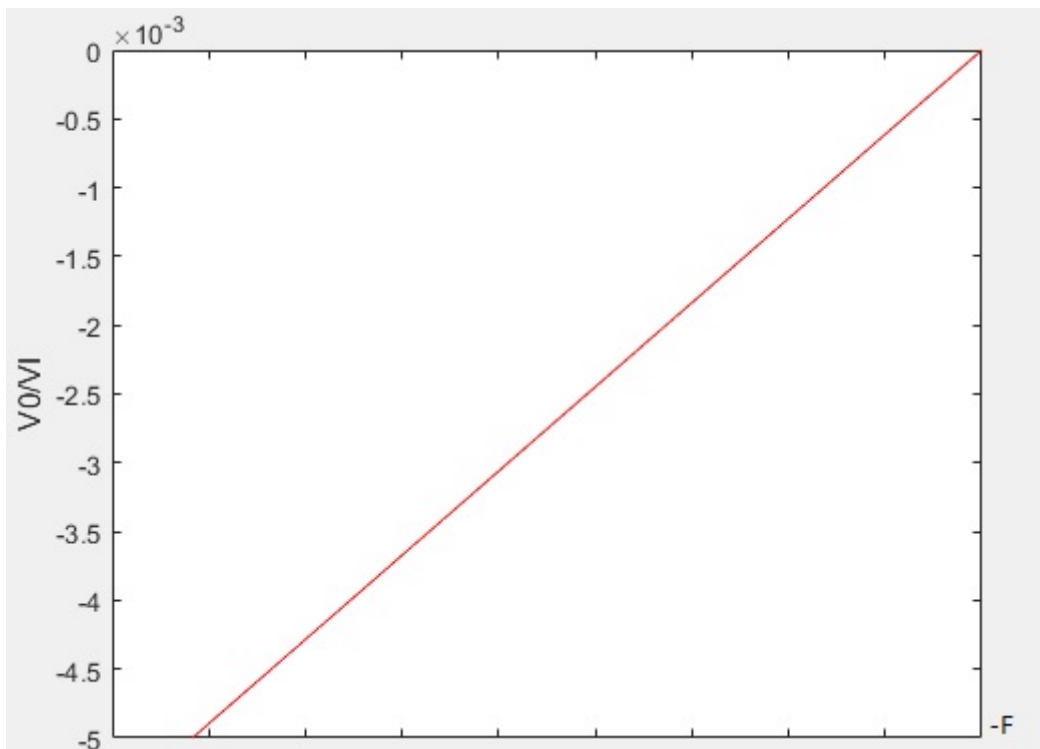


Figura 10: Dependência linear entre V_0 e $-F$.

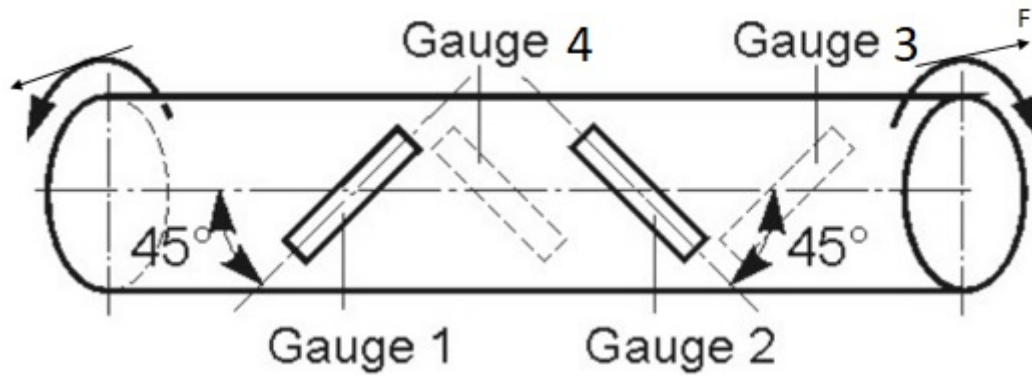


Figura 11: Strain Gauges acoplados ao cilindro com força tangencial F aplicada

3.4 Código de Matlab

```

MATLAB1:
S=-1.4741259e-003 ;
V0=1.2272727e+001;
Va=18; Vb=0;
T=Va+Vb-V0;
T1=Va-V0;
R=500;R1=350;R2=350;
rv=1;r1=350;r2=350;r3=350;r4=350;
%V2
numV2=((R1+R2)*rv+R1*R2)*rv*[0 (Vb-T1) (r3*T1+r1*Vb)] + (T1*r2+R1*Vb)*rv*[-1 r3-
r1 r1*r3];
denV2=[-(R1+R2)*rv (R1+R2)*rv*(r3-r1) (R1+R2)*rv*r1*r3+((R1+R2)*rv+R1*R2)*rv*(r1+r3)];
%V3
V3=[(T1-Vb)/(r2+r4) (T1*r4+Vb*r2)/(r2+r4)];
% Tensao de saída na ponte : V2-V3-S=0
p=madd([0 numV2],conv(-V3,denV2),[0 -S*denV2]);
%deformacao
raizes=roots(p);
alfa=raizes(3);

```

4 Procedimentos Experimentais

- cilindro metálico com strain gauges acoplados;
- multímetro;
- 2 pilhas de 9V;
- protoboard;
- resistores : $1 \times 1\Omega$, $2 \times 100\Omega$, $1 \times 500\Omega$, $1 \times 100\Omega$;
- 1 C.I. INA125;
- Osciloscópio;
- Fonte de tensão;

Usando uma pilha e o multímetro mediu-se os valores das resistências de cada strain gauge.

Strain gauge 1: $R_1 = 122\Omega$

Strain gauge 2: $R_2 = 122.5\Omega$

Strain gauge 3: $R_3 = 122.5\Omega$

Strain gauge 4: $R_4 = 123\Omega$

A figura 11 mostra o modo como os strain gauges são acoplados ao cilindro metálico. A figura 7 mostra o circuito como cilindro metálico acoplado a ponte de wheatstone.

Foi feito o equacionamento do circuito com as leis de Kirchhoff da corrente e da tensão ,com base nestes dados foi construído o programa MATLAB 1 que fornece a deformação α nos strain gauges. A parte do circuito composta pelas resistências R e rv são necessárias para o equilíbrio da ponte porque os valores de R_1, R_2, R_3 e R_4 não anulam o valor de V_0 .

Foram feitas simulações do circuito da figura 7 no PSIM , com o intuito de verificar os dados previstos no equacionamento e possibilitar maior visualização.

Quando o cilindro for submetido a um torque, as linhas de forças atuantes são tais que os strain gauges R_1 e R_4 são esticados ou comprimidos ao mesmo tempo. A mesma correspondência existe entre os strain gauges R_2 e R_3 .

No presente experimento a ponte de Wheatstone não teve o valor de V_0 igualado a zero antes da aplicação do torque no cilindro. Isto se deve ao fato de que o objetivo é apenas visualizar as variações em V_0 para diferentes torques.

Os valores esperados de V_0 quando o cilindro é submetido a um torque é muito pequeno para que possa ser medido com o multímetro, o uso do amplificador INA125 é necessário para a medição. A figura 8 mostra como é feita a ligação entre o amplificador e a ponte , o valor de R_g utilizado é de 100Ω

5 Resultados

No experimento mostrado em sala de aula ,com a aplicação de força manual à peça metálica foi possível observar um comportamento aproximadamente linear na curva de tensão V_0 quando observada no osciloscópio. Esta correspondência aproximadamente linear entre a força aplicada ao cilindro e a curva de tensão no decorrer do tempo , ocorreu para ambos os sentidos correspondente à direção do eixo do cilindro.

Os valores de V_0 ficaram entre 0 e 3.3 V. O valor de R_g igual a 100 ohms implica em um valor de amplificação da ordem de 600 vezes. Desta forma o valor de V_0 sem amplificação variou entre 0 e 0,005V.

6 Discussão

A força manual aplicada ao cilindro e a temperatura ambiente não são suficientes para deformar o material para além da região elástica, o que implica num valor constante de C . Conforme a equação 4 e a equação 5, e mantendo VI constante, a correspondência entre a função de transferência ($\frac{V_0}{V_I}$) e a força (F) aplicada é linear. Isso pode ser visto na figura 9 e na figura 10, com valores genéricos de F . Desta forma, a prática confirma a correspondência teórica entre F e V_0 .

A principal dificuldade encontrada no experimento corresponde à parte da aquisição de dados, que só tornou-se possível com o uso de amplificador.

7 Conclusões

Foi possível observar de maneira indireta, através da medição de tensão elétrica, a deformação física do cilindro metálico. Houve correspondência aproximadamente linear entre a força de torção aplicada à peça e a variação da tensão V_0 na ponte de Wheatstone.

As medições feitas não permitem chegar a uma estimativa do valor de deformações do cilindro e dos strain gauges, pois características inerentes a estes materiais como coeficientes de deformação longitudinal e transversal, fator de gauge, sensibilidade da célula de carga, entre outros, são desconhecidos. Porém constantes nas condições do experimento. Desta forma o objetivo do experimento é a visualização e estimativa da relação entre a força aplicada no cilindro, gerando torque, e a variação da tensão na ponte de Wheatstone, medida através de amplificação. Ferramentas como o MATLAB e PSIM, sob certas condições idealizadas, são capazes de orientar e prever o comportamento do circuito real.

Referências Bibliográficas

<http://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf> Acessado em 05/07/2019.

<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometriabasica.pdf> Acessado em 05/07/2019.

<https://br.omega.com/guides/straingages.html> Acessado em 05/07/2019.

http://www.fem.unicamp.br/instmed/Deformacao_Torque.htm Acessado em 05/07/2019. <http://ensus.com.br/strain-gauge-o-que-e-quando-utilizar/> Acessado em 05/07/2019.

<https://www.hbm.com/pt/2073/catalogo-pdf-strain-gauge> Acessado em 05/07/2019.