

METROLOGIA e INSTRUMENTAÇÃO

*Extensometria
(Instrumentação)*

*UCS
Departamento de Engenharia Mecânica*

*Albano Luiz Weber
2008*

1- Introdução

Os medidores de deformação chamados extensômetros elétricos são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica, e são usados usualmente entre os engenheiros de instrumentação. O extensômetro é a unidade fundamental destes dispositivos.

Diferentes métodos de inspeção não destrutivos para medidas de tensões têm sido explorados e desenvolvidos, mas nenhum outro dispositivo tem uma utilização mais ampla do que os extensômetros com relação à sua aplicabilidade. Isto devido à precisão das medidas, facilidade de manipulação e da capacidade do mesmo de monitorar as deformações até as cargas últimas em ensaios destrutivos.

Extensômetros são usados para medir deformações em diferentes estruturas. A medida é realizada colando um extensômetro nestas estruturas, convertendo a deformação causada em uma quantidade elétrica (voltagem) e amplificando-a para leitura em um local remoto. Deformações em várias partes de uma estrutura real sob condições de serviço podem ser medidas com boa precisão sem que a estrutura seja destruída. Assim, isto leva a uma análise quantitativa da distribuição de deformação sob condições reais de operação. Os extensômetros fornecem um método excelente de converter deformações em quantidade elétrica. As características das medidas com extensômetros são resumidas abaixo:

- Alta precisão de medição;
- Pequeno tamanho e pouco peso;
- Excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos;
- Fácil utilização desde que conhecida a boa técnica; Excelente linearidade;
- Medições possíveis dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- Aplicáveis submersos em água ou em atmosfera de gás corrosivo desde que utilizado tratamento apropriado;
- Usados como elementos transdutores para medidas de várias quantidades físicas (força, pressão, torque, aceleração, deslocamento);
- Possibilita a medida em locais remotos;

2 Transdutor

Transdutor é um dispositivo que tem a capacidade de transformar um tipo de energia em outra, através de um estímulo e ou por uma reação de uma grandeza física, conforme ilustrado na fig 01. Em termos de instrumentação um transdutor ideal deve apresentar as seguintes características:

- Deve medir com confiabilidade a intensidade do fenômeno físico.
- Deve reproduzir com fidelidade o evento físico em relação ao tempo. Idealmente não deve haver retardo.
- Deve reproduzir precisamente toda a faixa de frequência do fenômeno físico sem alteração ou degradação em qualquer porção do espectro a ser medido.
- Deve operar sob efeito de grandezas indesejáveis, tais como: umidade, temperatura, choque e/ou vibração.
- Deve ser capaz de fornecer um sinal de saída que seja compatível com o equipamento de condicionamento do sinal, com modificação desprezíveis nas características originais do evento.
- Deve ser de constituição robusta e de fácil operação, de modo que possa ser manejado por pessoas inexperientes, sem que seja danificado e sem ter afetadas suas características do sinal de saída.

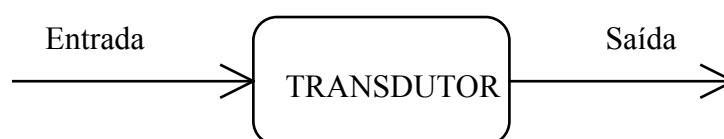


Fig. 01 - Representação esquemática de um transdutor.

O estímulo na entrada, compressão e/ou torque, aplicado sobre um objeto pode ser verificado por diversos tipos de sensores, como: extensômetros elétricos, capacitivos, indutivos, etc., convertendo esses estímulos em sinais de grandezas físicas.

Na figura 02 temos a esquematização dos três estágios do processamento da informação desde a excitação até a resposta.

No primeiro estágio, a força aplicada na célula provoca deformações elásticas numa parte da estrutura denominado de elemento elástico. Esta deformação depende da geometria e do material deste elemento elástico.

No segundo estágio, estas deformações elásticas são transformadas em variações de resistências elétricas, através de extensômetros de resistência colados no elemento elástico. Estas resistências são ligadas num circuito tipo ponte que, alimentados com uma tensão V , fornece o sinal elétrico de desbalanço ΔV . Pode-se mostrar que $\Delta V/V$ é proporcional a $\Delta R/R$.

Como as deformações elásticas e os sinais elétricos são pequenos, necessita-se de um amplificador para medir os desbalanços ΔV . É comum o uso de dispositivos condicionadores de sinais especiais para extensômetros e transdutores com baixo ruído, o que completam o processamento do último estágio da informação.

Assim, num transdutor, é a célula de carga que deve ser escolhida para cada aplicação específica. Apesar da informação sofrer três estágios de processamento, é possível construir dispositivos de baixo custo e que medem com precisão melhor que 2%. A aplicação se justifica quando se tem aplicações especiais, tais como, medições de força de trefilação, laminação, medições de pressões dinâmicas, etc.

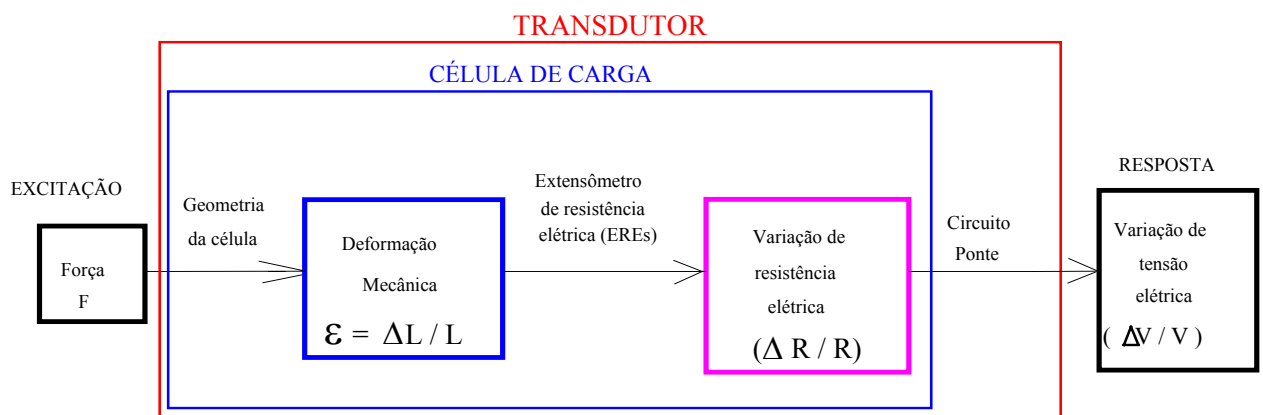


Fig. 02 - Representação do diagrama do processamento da informação desde a excitação até a resposta.

2.1 Transdutor de Resistência Elétrica

Transdutor extensométrico é um dispositivo a base de extensômetros de resistência elétrica (ERE's) sensível a deformações específicas que provocam variações de resistência elétrica no sensor (strain gauge).

O princípio de operação dos ERE's, data de 1856 quando Lord Kelvin, na Inglaterra, constatou que havia variação na resistividade de fios metálicos quando os mesmos apresentavam deformação. Ele demonstrou que a variação relativa da resistência $\Delta R/R$ relaciona-se linearmente com a variação relativa do comprimento $\Delta L/L$, ou seja:

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L}$$

O valor de K é constante se a deformação se processa na região elástica do material.

O desenvolvimento do primeiro extensômetro de resistência elétrica, como é conhecido atualmente, é atribuído a Simmons e Ruge, em 1939, nos Estados Unidos, que o desenvolveram independentemente.

Daquela época para cá houve um desenvolvimento muito grande das técnicas de construção e na utilização de ERE's. Hoje são construídos diversos tipos de transdutores extensométricos como: células de carga, torquímetros, manômetros, etc., utilizando-se geometrias de elementos elásticos apropriadas, adequando-os de acordo com a capacidade e sensibilidade do estímulo a ser medido.

Quando um material qualquer é submetido a solicitações mecânicas, este expande-se ou contrai-se. Se ERE's com características de resistência selecionadas forem coladas à superfície do objeto (elemento elástico), estas alongar-se-ão ou comprimir-se-ão de acordo com as solicitações desta superfície à qual as resistências estão coladas. O extensômetro de resistência elétrica está baseado neste princípio de que, quando um condutor está sujeito a um esforço de tensão ou de compressão, ocorre uma variação de sua resistência elétrica. A intensidade da variação, relacionada com a resistência inicial é proporcional à intensidade do esforço aplicado.

Para um fio de comprimento (L) e resistência elétrica (R), ilustrado na fig. 04, se aplicada uma força mecânica em suas extremidades, o mesmo sofrerá uma deformação ($\epsilon = \Delta L / L$), expressa usualmente em $\mu m/m$.

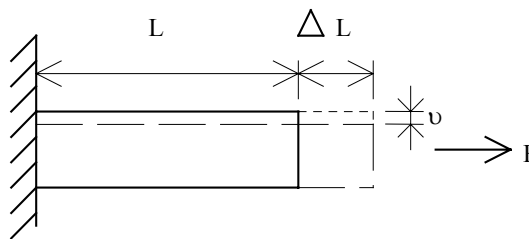


Fig. 04 - Variação do comprimento (ΔL) e o efeito de poisson (ν) de um elemento (fio) após aplicação de uma força F.

Em conseqüência desta deformação, há uma variação da resistência do fio expressa por:

$$\Delta R = R \text{ final} - R \text{ inicial}$$

Para um extensômetro de resistência elétrica de fio, pode-se deduzir uma expressão geral para a sensibilidade K (gauge factor). Supondo um fio fr comprimento L, ϕD e resistência R, resistividade ρ e coeficiente de poisson ν , podemos escrever:

$$R = R(\rho, L, D) = \frac{4L\rho}{\pi D^2}$$

Considerando variação infinitesimal (∂L) e derivando a equação acima, supondo (∂R) a diferencial de R, resulta:

$$\frac{\partial R}{R} = \frac{\partial L}{L} - 2 \frac{\partial D}{D} + \frac{\partial \rho}{\rho}$$

Como: $\nu = -\frac{\partial D/D}{\partial L/L}$ Segue que: $K = \frac{\partial R/R}{\partial L/L} = 1 + 2\nu + \frac{\partial \rho/\rho}{\partial L/L}$

Apesar do incompleto conhecimento dos mecanismos físicos envolvidos, a sensibilidade K pode ser considerada constante para as faixas usuais para os extensômetros comerciais. O valor de K é determinado experimentalmente através da expressão:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad \boxed{K \cdot \epsilon = \frac{\Delta R}{R}}$$

Como:

e

Resulta:

2.2 Elemento sensor (Strain gauge) – ilustrado na figura 03, é um sensor tipo folha de deformação mecânica localizada e que substitui os medidores mecânicos e óticos (em especial os de difícil acesso) e medidas dinâmicas em geral que podem ser processados por computador. Devido ao fato de fornecer um sinal elétrico, são comuns em células de carga, principalmente em balanças eletrônicas, medição de pressão, temperatura, torque, vazão, forças em geral, etc.

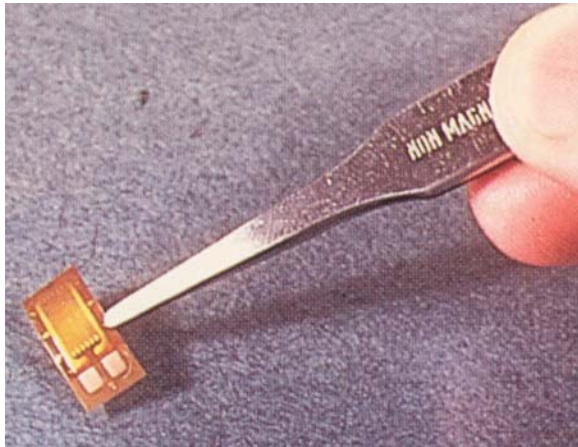
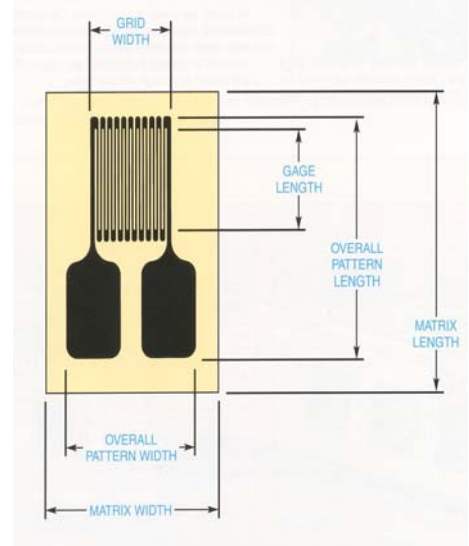


Figura 03



São produzidos com materiais que atendam os seguintes fatores desejados:

- alta sensibilidade K ;
- alta resistividade ρ ;
- baixa sensibilidade à variação com temperatura;
- alta tensão de escoamento;
- fácil manuseio;
- boa soldabilidade;
- baixa histerese;
- baixa f.e.m. térmica quando ligada com outros materiais;
- boa resistência à corrosão.

A sensibilidade à temperatura é um dos fatores que impõe mais dificuldades ao uso de extensômetros de resistência elétrica. Na maioria das aplicações prevê-se compensação nos circuitos elétricos, entre tanto, isso nem sempre elimina o problema.

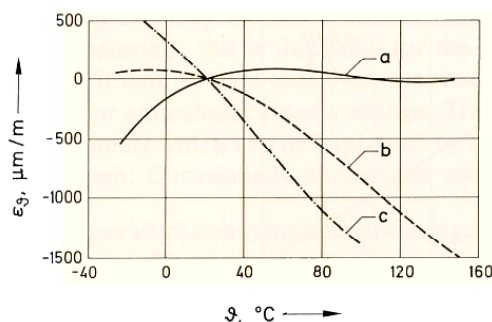
Dois fatores estão envolvidos:

- o coeficiente de dilatação diferencial que existe entre o suporte da grade e a grade propriamente dita, resulta numa deformação da grade;
- o coeficiente de variação da resistividade com a temperatura.

Hoje são fabricados extensômetros com variados valores de dilatação térmica (α) para as mais variadas aplicações de forma a minimizar estes efeitos. Caso seja necessário considerar a variação da dilatação linear, esta é dada por:

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T$$

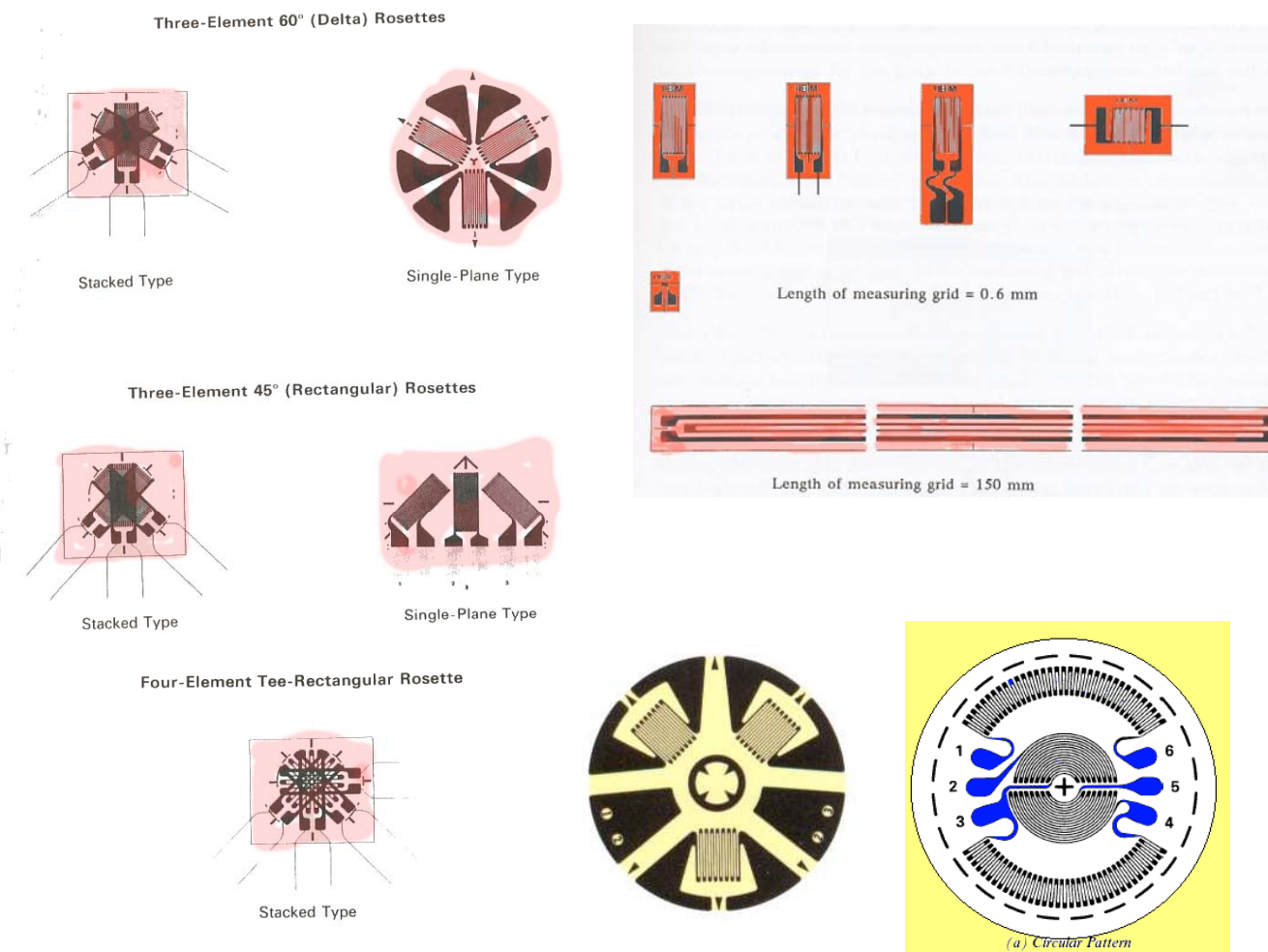
É importante que na escolha do extensômetro seja observado o valor da dilatação (α) do elemento com a da base onde será aplicada, de forma que sejam o mais parecido entre si, eliminando assim este efeito.



a aluminum	$\alpha_C = 23 \cdot 10^{-6}/K$
b steel	$\alpha_C = 12 \cdot 10^{-6}/K$
c quartz	$\alpha_C = 0.5 \cdot 10^{-6}/K$

Outros efeitos como o de Seebeck e campos magnéticos devem ser observados, visto que podem vir a interferir nos sinais, bem como a variação de temperatura dos fios de ligação dos extensômetros.

No comércio existe um variedade muito grande de tamanhos, formas e disposição das grades na folha. Normalmente possuem resistência de 120, 350 ou 600 ohms, sendo mais comum os dois primeiros.

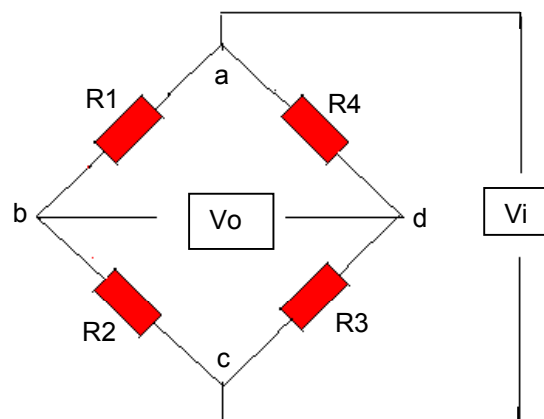


3. Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone é um circuito que, além de compensar resistores, se presta para medir variações relativas de resistência elétrica.

Pela figura 05, o diagrama geral mostra uma ponte formada por resistores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , onde suas impedâncias são iguais aos resistores, alimentadas por uma tensão c.a. " V_i " e " V_o " a tensão na saída.

A ponte é energizada nos terminais "a" e "c" pela tensão V_i ; e o sinal de saída V_o é obtido nos terminais "b" e "d".



Este conjunto forma dois pares divisores independentes. Um par serve para comparar e o outro para medir as variações.

Partido do pressuposto que $V_i = V_{abc} = V_{adc}$

Como $V=R \cdot I$, substituindo resulta: $I_{abc}(R_1+R_2) = I_{adc}(R_3+R_4)$

Fig. 05 - Ponte de Wheatstone excitada por uma tensão V_i , e com sinal de saída V_o . Os extensômetros de resistência elétrica são representados por R_1 , R_2 , R_3 e R_4 ; ab , bc , cd e da , são os braços da ponte e abc e adc são os ramos da ponte.

$$\text{Assim o ramo : } V_{abc} = I_{abc} R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_i \quad \text{e} \quad V_{adc} = I_{adc} R_4 = \frac{R_4}{R_4 + R_3} V_i$$

$$\text{Então a tensão de saída "Vo" será: } V_o = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} \cdot V_i, \text{ que é a equação geral.}$$

Considerando que "Vo" sofra pequena variação " ΔV_o " isso será possível se houver variação nas resistências. Assim pode-se reescrever a equação obtendo:

$$V_o = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4 + R_3 + \Delta R_3)} \cdot V_i$$

$$\text{Se a ponte estiver em balanço, então: } V_o = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} \cdot V_i = 0$$

Se todas as resistências forem iguais, temos a relação "r" da ponte, ou seja:

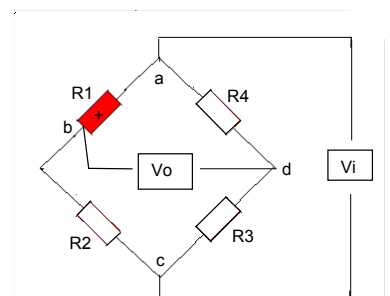
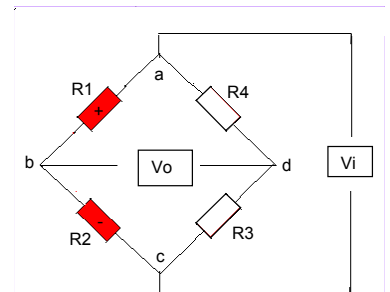
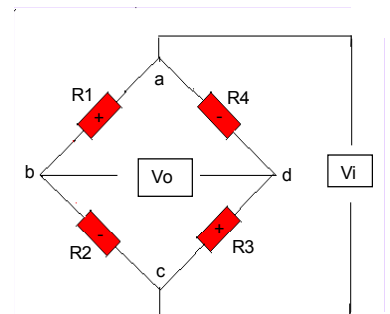
$$\Rightarrow R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad \text{ou} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} = \frac{1}{r}$$

O balanço da ponte depende da disposição das resistências "iguais" de cada um dos braços da ponte, ou seja, (R_1 e R_2) e (R_3 e R_4). Entretanto não podemos trabalhar de qualquer jeito. Algumas observações devem ser consideradas para a configuração da ponte apresentada:

- para se obter o máximo sinal de "Vo", R_1 deverá ser submetido à tensão trativa, R_2 tensão compressiva, ou seja (+ R_1 e - R_2) e conseqüentemente (+ R_3 e - R_4). Neste caso estar-se-á operando em ponte completa, onde todos os sensores serão ativos.

- pode-se operar com meia ponte ou seja, apenas com um dos braços ativos e os outros dois em equilíbrio, sem variação de resistência. Para isso, seguir o critério da distribuição das tensões no braço ativo.

- Pode-se operar com apenas um quarto de ponte ativa. Evidentemente que o sinal será bem menor, necessitando de mais amplificação, mas nada impede seu funcionamento. Neste caso apenas um dos sensores será ativo, os demais ficam em equilíbrio, sem variar suas resistências. Cuidados adicionais serão necessário.



Um deles é a forma de ligação deste sensor para anular o efeito da temperatura. Para isso utiliza-se ligação a três fios, conforme ilustrado ao lado.

O outro é que elas tendem apresentar uma parcela de não-linearidade $(1+\eta)$ mais expressiva que outras formas, expressa por:

$$\Delta V_o = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1+\eta) V_i$$

Considerando $r = 1$ para ponte inteira com todos os sensores ativos, fica:

$$\Delta V_o = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1+\eta) V_i$$

Considerando $r = 1$ para $\frac{1}{2}$ ponte com $(\Delta R_1/R_1$ e $\Delta R_2/R_2)$ ativos, os demais zeram, fica:

$$\Delta V_o = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) (1+\eta) V_i$$

Considerando $r = 1$ para $\frac{1}{4}$ de ponte com $(\Delta R_1/R_1)$ ativo, os demais zeram, fica:

$$\Delta V_o = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) (1+\eta) V_i$$

O fator de não-linearidade é dada pela expressão:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1+r}{\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} + r \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)}}$$

Considerando $r = 1$ para $\frac{1}{4}$ de ponte com $(\Delta R_1/R_1)$ ativo, os demais zeram, fica:

$$\eta = 1 + \frac{1}{2R_1}$$

O fator de não-linearidade resulta em um valor muito pequeno, não sendo relevante para as medidas comerciais, por isso é desconsiderado. *Veja no anexo linearidades de pontes de wheatstone.*

Em análise para circuito de meia ponte e ponte inteira, este fator normalmente não existe para deformações iguais aplicada na ponte.

Na forma usual com sensores de resistência R iguais, tem-se:

$$V_o \approx \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4}{R} V_i$$

Ou na forma alternativa:

$$\frac{V_o}{V_i} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right), \text{ como } \frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad \text{substituindo resulta:}$$

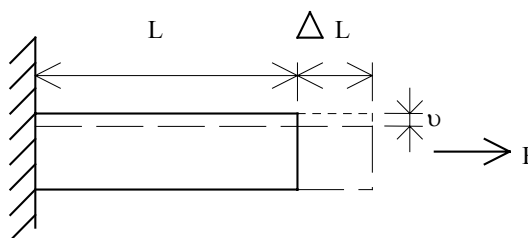
$$\frac{V_o}{V_i} \approx \frac{1}{4} K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Se $\varepsilon_1 = 1000 \mu\text{m/m}$ e $K = 2 \Omega/\Omega$ então:

$$\frac{V_o}{V_i} \approx \frac{1}{4} \cdot 2(1000 \times 10^{-6} - 0 + 0 - 0) = \frac{1}{2}(0,001) = 0,0005 \text{ (V/V)} \Rightarrow V_o = 0,0005 V_i$$

A tensão de excitação pode ser AC ou DC e o sinal de saída pode ser direto, por anéis escovas, por telemetria, por transformador rotativo.

4. Deformações Relativas x Deformações Absolutas



$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \text{ unidade } \left(\frac{m}{m} \right)$$

Qualquer que seja o valor de L e ΔL o valor de da deformação relativa “ ε ” será sempre a mesma.

Unidade comercial é dado ($\mu\text{m/m}$). Assim: $1 \text{ m/m} = 1 \times 10^6 \mu\text{m/m} = 1.000.000 \mu\text{m/m}$

Então, se valor de $\varepsilon = 0,001 \text{ m/m}$, isso equivale na unidade comercial uma $\varepsilon = 1000 \mu\text{m/m}$, que corresponde a mesma leitura do condicionador.

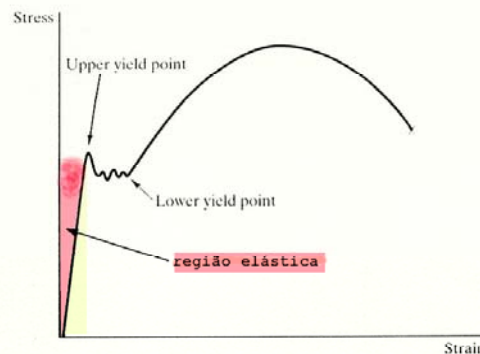
5. Geometria – Escolha, projeto e dimensionamento

Uma vez conhecendo o estado de carregamento em uma estrutura, sempre é possível calcular as tensões principais ortogonais ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) e seu estado triaxial de deformações ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$), determinadas por:

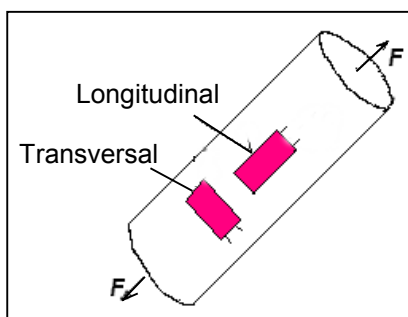
$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$



a) Corpo cilíndrico – deformação longitudinal e transversal:



Tensão normal: $\sigma = \frac{F}{A}$ e Módulo de elasticidade: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

Nestas condições: $\sigma_1 = \sigma$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$

$$\varepsilon_2 = -\nu \sigma_1 / E = -\nu \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_3 = -\nu \sigma_1 / E = -\nu \varepsilon_1$$

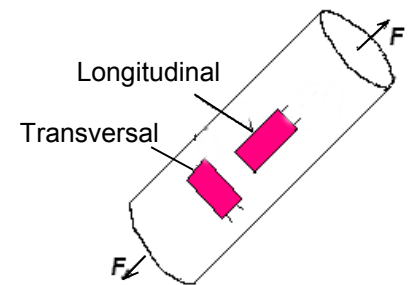
Onde ν é o coeficiente de poisson = 0,3 para os aços

Fazendo $\sigma_1 = \sigma$, segue que: $\varepsilon_{Longitudinal} = \frac{F}{EA}$ e $\varepsilon_{Transversal} = -\nu \frac{F}{EA}$

Estas equações expressam as deformações na estrutura, onde pode-se concluir que a deformação longitudinal é significativamente superior as deformações transversais.

Exemplo-1:

Considere uma ponte inteira montada numa coluna circular de $\phi 15$ mm, com força aplicada de 10.000 N, com resistência dos strain gauge de $R = 120 \Omega$, $K = 2,0 (\Omega/\Omega)/(m/m)$, $\nu = 0,3$, $E = 210$ GPa e tensão de escoamento 600 MPa. a) Determine o sinal de saída (mV/V) de uma célula de carga nesta configuração. b) Qual a força máxima aplicável, levando em consideração o limite máximo da tensão atuante c) Qual a variação de resistência gerada.



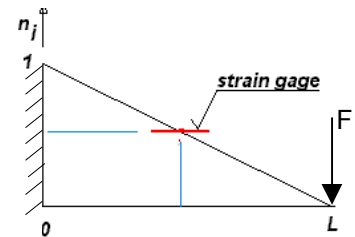
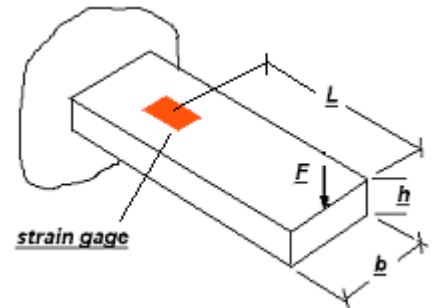
b) Lâmina engastada:

Se uma lâmina de altura “h”, largura “b”, engastada em uma extremidade e submetida a um momento fletor “M”, a uma distância “y” do centro aparece uma tensão longitudinal “σ”. S “I” é o momento de inércia, então:

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y} \quad \text{e} \quad I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Como interessamos tensões superficiais, tem-se:

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{(h/2)} \quad \text{e} \quad \sigma = \frac{6M}{b \cdot h^2}$$

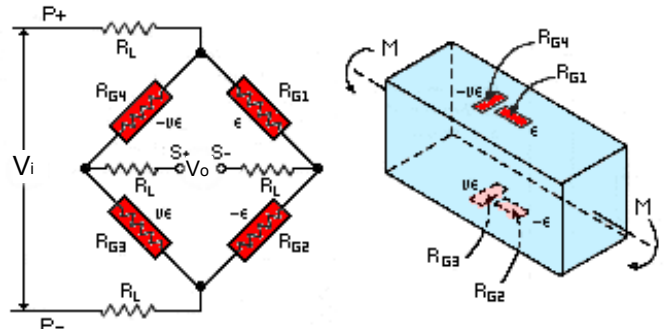


Considerando a aplicação da força a uma distância “L”, tem-se:

Com isso a expressão pode ser reescrita para:

Em casos onde são utilizados strain gauge transversais lembrar que:

a tensão de da ponte é dada por:



Exemplo-2:

Se ocorrer uma variação de 0,01 Ω em uma resistência de um “stain gauge” cuja resistência nominal é de 120 Ω com K = 2,0; qual a deformação esperada?

Exemplo-3:

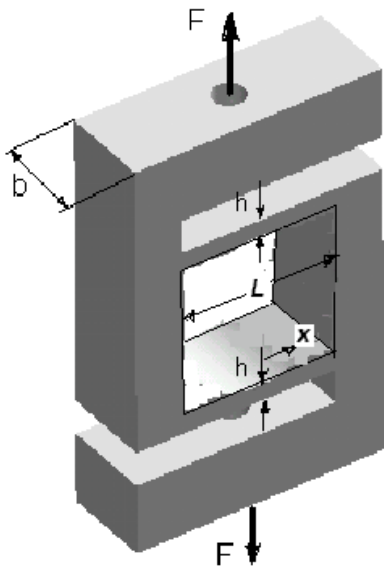
Um condicionador alimenta uma ponte inteira com 5 V e indica uma deformação de 1500 μm/m. Sabendo-se de se tratar de uma viga engastada num lado, e que possui L = 150 mm, h = 2 mm e b = 15 mm; R = 120 Ω, E = 210 GPa, K = 2,0 (Ω/Ω)/(m/m), ν = 0,3; responda:

- a) Qual a força sobre a viga, considerando que esta está concentrada na extremidade livre?
- b) Qual tensão de saída na ponte?

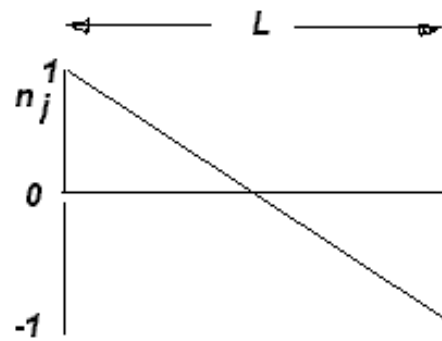
a)

b) Tensão de saída:

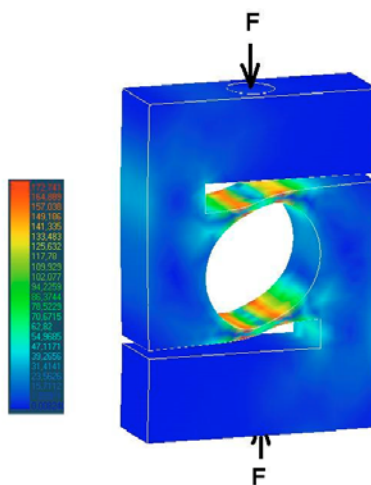
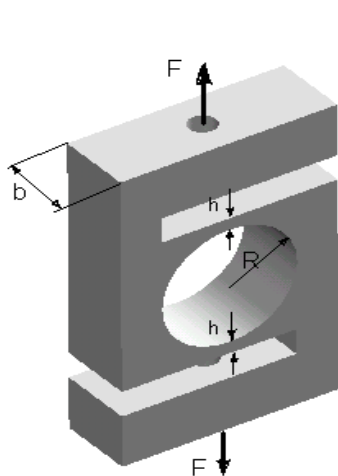
c) Célula tipo “S” para furo quadrado



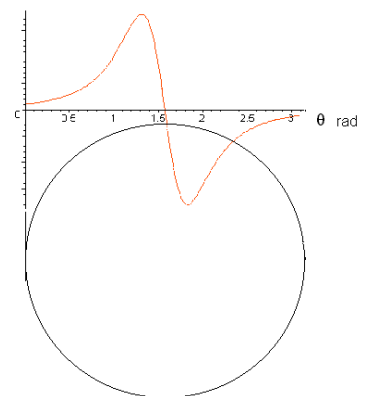
Comportamento das deformações sobre sua superfície



c) Célula tipo “S” para furo circular



Comportamento das deformações sobre sua superfície



Exercícios:

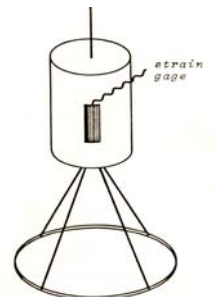
- 1) Um strain gauge tem $k=2,0$ e pode ser usado para detectar uma deformação máxima de 2% (acima disso danifica-se). Determine a variação percentual da resistência elétrica que corresponde a esta deformação.

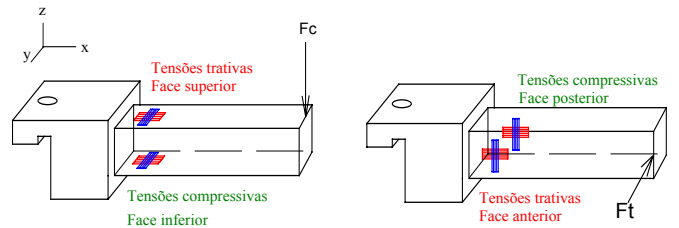
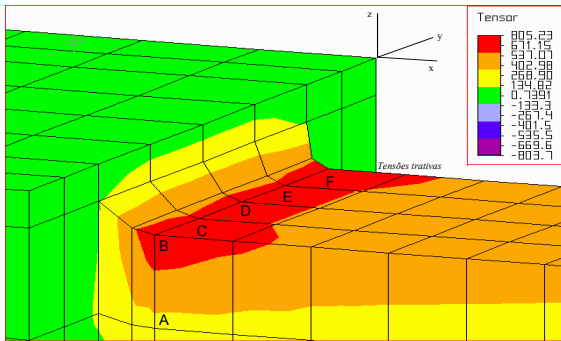
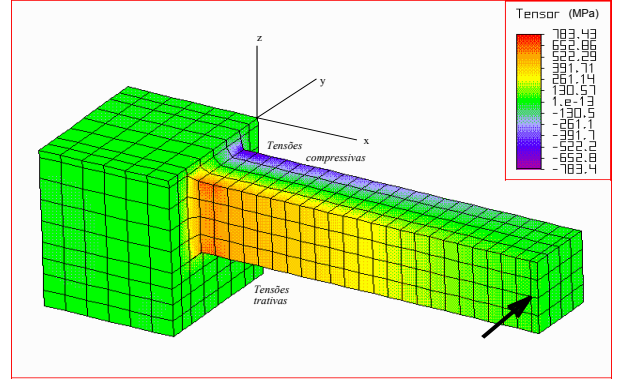
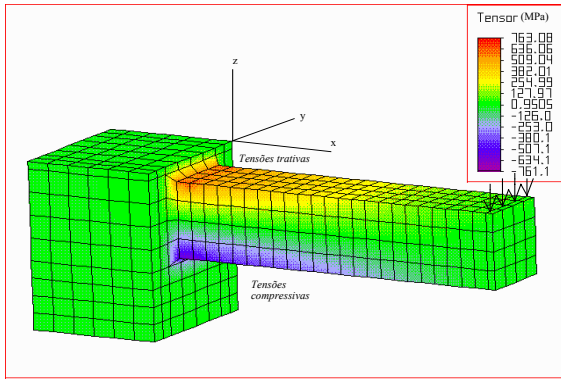
- 2) Uma barra metálica possui um strain gauge com $K = 2,0$ e $R = 120 \Omega$. Quando a barra é tracionada longitudinalmente mediante uma tensão de 2000 MPa, a resistência passa para $120,2 \Omega$. Determine o módulo de elasticidade do material da barra.

- 3) Um extensômetro de $K = 5$ com resistência de 2500Ω é adaptado a um eixo de motor que sofre uma variação de temperatura de 10°C . Em consequência sua resistência aumenta 5Ω . Determine o coeficiente de dilatação linear do material metálico que compõe o eixo.

- 4) Um strain gauge tem $R = 120 \Omega$ e $K = 2,2$. Qual é a deformação máxima que ele pode sofrer se a variação da deformação correspondente equivale a uma variação de $0,6 \Omega$ de resistência elétrica?

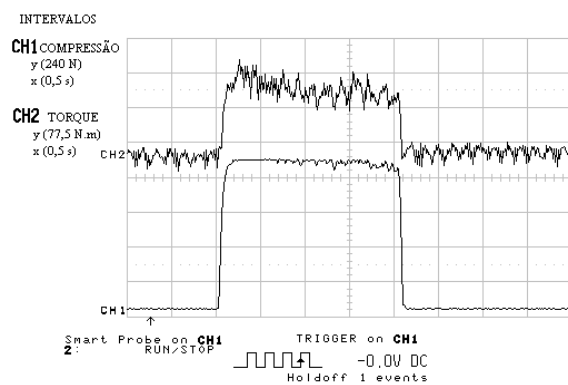
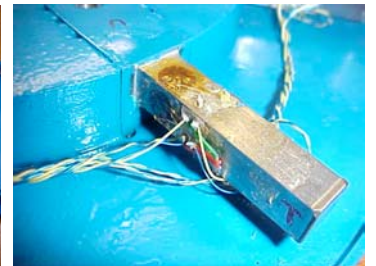
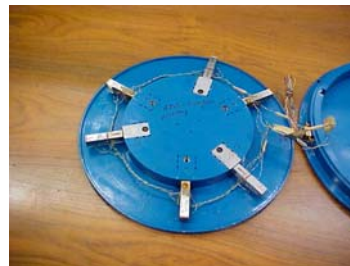
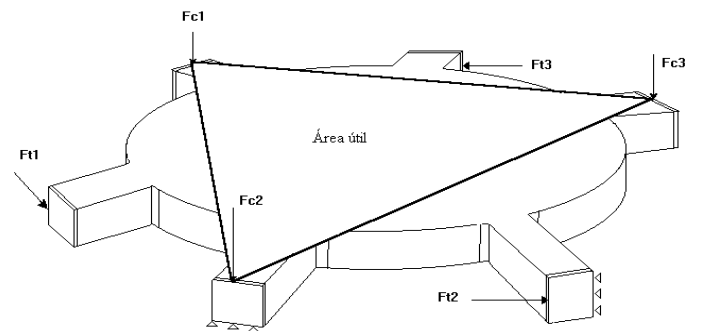
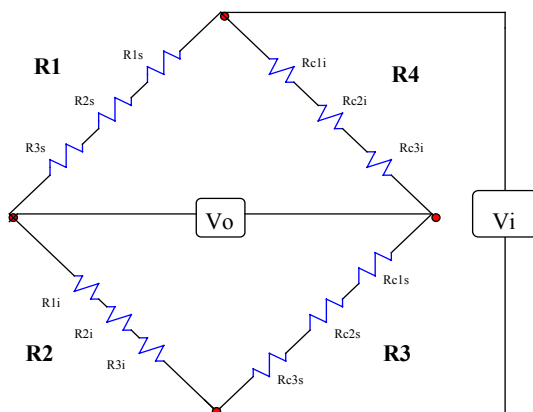
- 5) Fabrica-se uma balança, conforme modelo ao lado, com strain gauge de $R = 120 \Omega$, $K = 2,0$ em barra de aço (ϕ 20 mm, comprimento 50 mm). Quando em balanço for colocado um peso, a ponte sofre um desbalanço de 2 mV. Sabendo-se que a ponte é alimentada por 6 V, determine o peso deste corpo. ($E = 211 \text{ GPa}$).



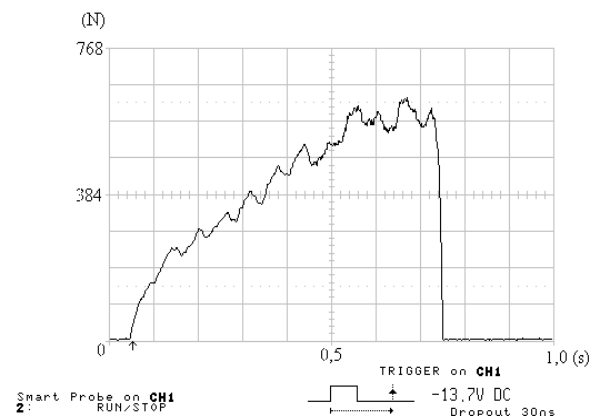


ELEMENTO ELÁSTICO, COM OS ERE'S COLADOS.
PARA SOLICITAÇÕES DE COMPRESSÃO

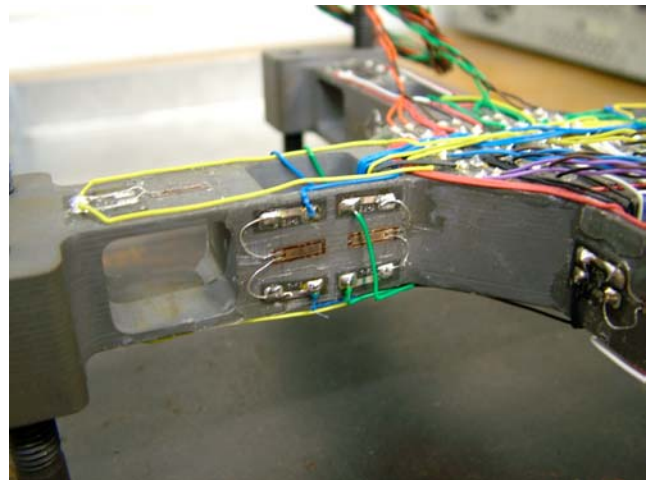
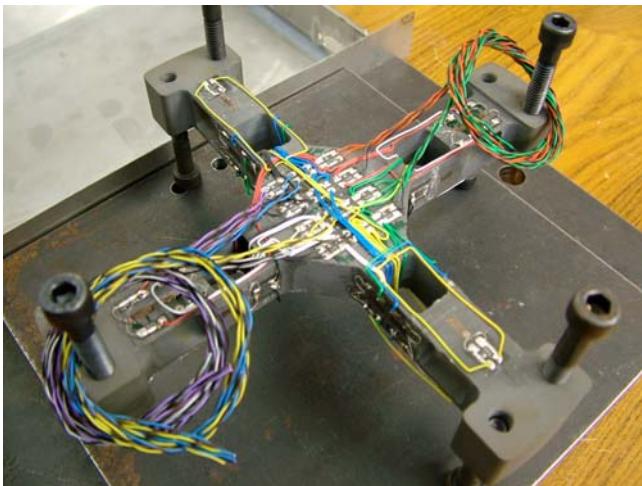
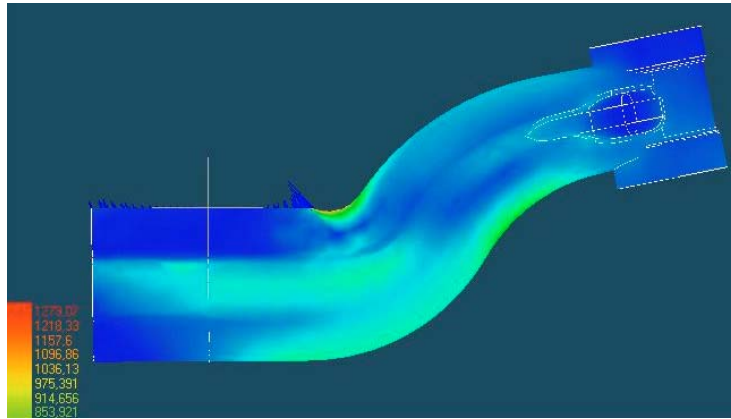
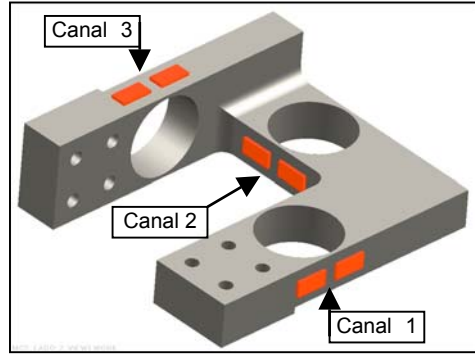
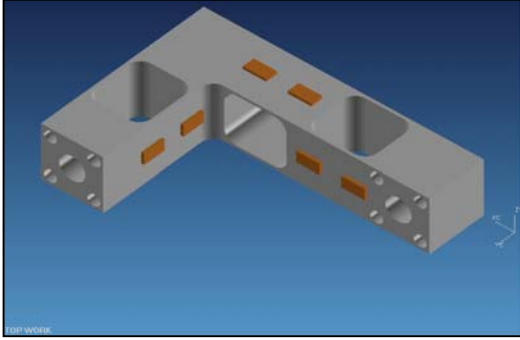
ELEMENTO ELÁSTICO, COM OS ERE'S COLADOS.
PARA SOLICITAÇÕES DE TORQUE



Medidas de torque e compressão simultâneas do furo 30,
onde: $r = 1655 \text{ rpm}$, $a = 331 \text{ mm/min}$



Execução de furo de centro (profundidade de 1,0 mm,
 $r = 1000 \text{ rpm}$, $a = 60 \text{ mm/min}$).



ANEXO:

LINEARIDADE DA PONTE DE WHEATSTONE - Configurações

Bridge/Strain Arrangement (Note 1)	Description	Bridge Output, E_o/E mV/V (Notes 2, 3)	Nonlinearity, η Where $E_o/E = K\epsilon \times 10^{-3} (1-\eta)$ (Notes 2, 3)	Corrections (Note 3)
1 	Single active gage in uniaxial tension or compression.	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon \times 10^{-3}}{4 + 2F\epsilon \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F}{4}$ $\eta = \frac{F\epsilon \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{2 - F\epsilon_i \times 10^{-6}}$
2 	Two active gages in uniaxial stress field – one aligned with maximum principal strain, one "Poisson" gage.	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon(1+\nu) \times 10^{-3}}{4 + 2F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F(1+\nu)}{4}$ $\eta = \frac{F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{2(1+\nu) - F\epsilon_i(1-\nu) \times 10^{-6}}$
3 	Two active gages with equal and opposite strains – typical of bending-beam arrangement.	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon}{2} \times 10^{-3}$	$K = \frac{F}{2}; \eta = 0$	$\epsilon = \frac{\epsilon_i}{2}$
4 	Two active gages with equal strains of same sign – used on opposite sides of column with low temperature gradient (bending cancellation, for instance).	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon \times 10^{-3}}{2 + F\epsilon \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F}{2}$ $\eta = \frac{F\epsilon \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{4 - F\epsilon_i \times 10^{-6}}$
5 	Four active gages in uniaxial stress field two aligned with maximum principal strain, two "Poisson" gages (column).	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon(1+\nu) \times 10^{-3}}{2 + F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F(1+\nu)}{2}$ $\eta = \frac{F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{4(1+\nu) - F\epsilon_i(1-\nu) \times 10^{-6}}$
6 	Four active gages in uniaxial stress field – two aligned with maximum principal strain, two "Poisson" gages (beam).	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon(1+\nu) \times 10^{-3}}{2}$	$K = \frac{F(1+\nu)}{2}; \eta = 0$	$\epsilon = \frac{\epsilon_i}{2(1+\nu)}$
7 	Four active gages with pairs subjected to equal and opposite strains (beam in bending or shaft in torsion).	$\frac{E_o}{E} = F\epsilon \times 10^{-3}$	$K = F; \eta = 0$	$\epsilon = \frac{\epsilon_i}{4}$

- Notes: 1. $(R_1/R_2)_{nom} = 1; (R_2/R_3)_{nom} = 1$ when two or less active arms are used.
 2. Constant voltage power supply is assumed.
 3. ϵ and ϵ_i (strains) are expressed in microstrain units (in/in $\times 10^6$).