

INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL APLICADA À INDÚSTRIA DE PETRÓLEO

Professor Valner Brusamarello -
UFRGS



Encontro IV



Ministério de
Minas e Energia



Medição de Força

- Força
- Peso
- Torque
- Pressão
- Outras
 - Variáveis que dependem direta ou indiretamente da força



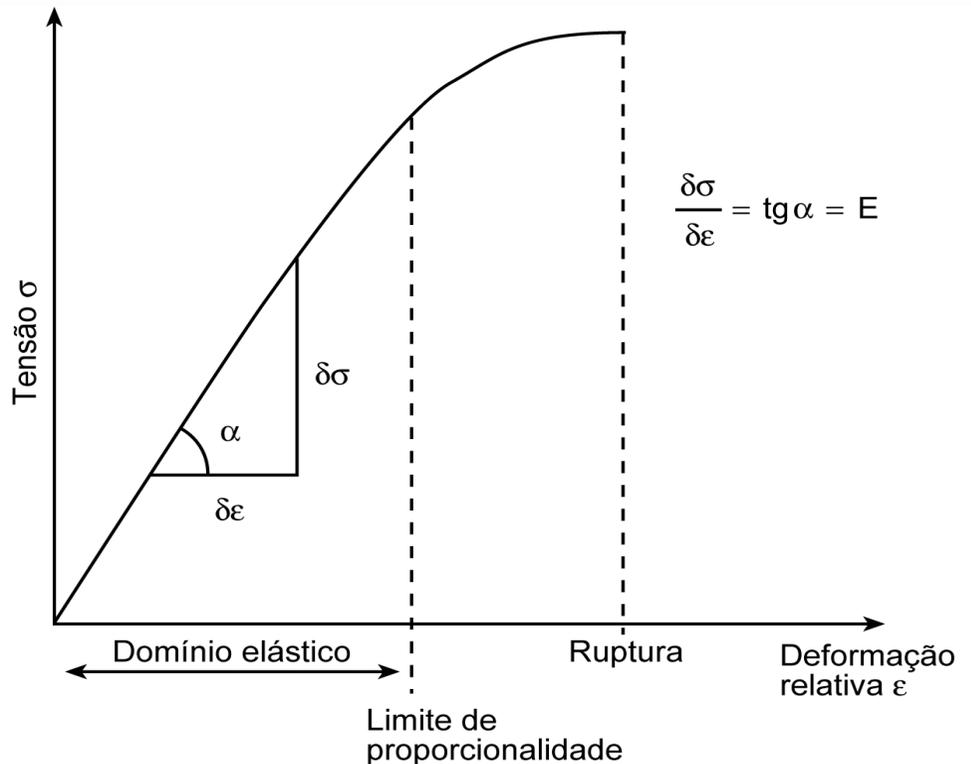
Fundamentação Teórica

- Robert Hook estabeleceu a relação entre tensão e deformação. Quando uma força é submetida a uma mola, a mesma deflexiona segundo a lei de Hook: $F = Kx$
- F é força em N, k a constante de rigidez da mola e x o deslocamento em m.
- De fato, a lei de Hook é uma aproximação do que realmente acontece com os corpos deformáveis, pois a relação entre a força e a deflexão é aproximadamente linear quando as cargas aplicadas apresentam baixos níveis. A lei de Hook também pode ser expressa por: $\sigma = E\varepsilon$
- onde σ é a tensão mecânica, ε é a deformação percentual (%) e E é o modulo de Young ou módulo de elasticidade expresso nas mesmas unidades que a tensão mecânica.



Fundamentação Teórica

- Tensão e deformação são as versões normalizadas de força e deflexão. Tensão é força por unidade de área e deformação é o alongamento por unidade de comprimento inicial.
- O módulo de elasticidade é uma característica física do material e de grande importância no projeto de células de carga.
- Células de carga são transdutores de força, nos quais uma estrutura mecanicamente rígida possui sensores fixados. Quando é aplicada uma carga mecânica, o sistema deforma-se e a informação é transmitida ao sensor.



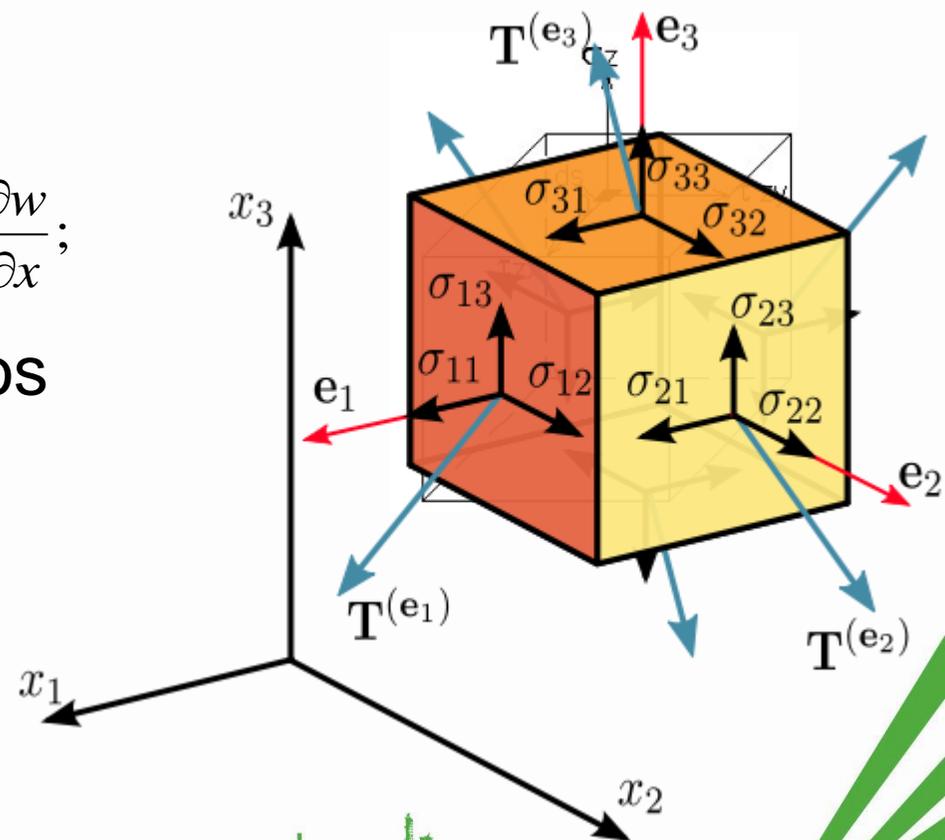
Tensões e deformações

- A tensão em um sistema de deformações tridimensional cartesiano:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z};$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x};$$

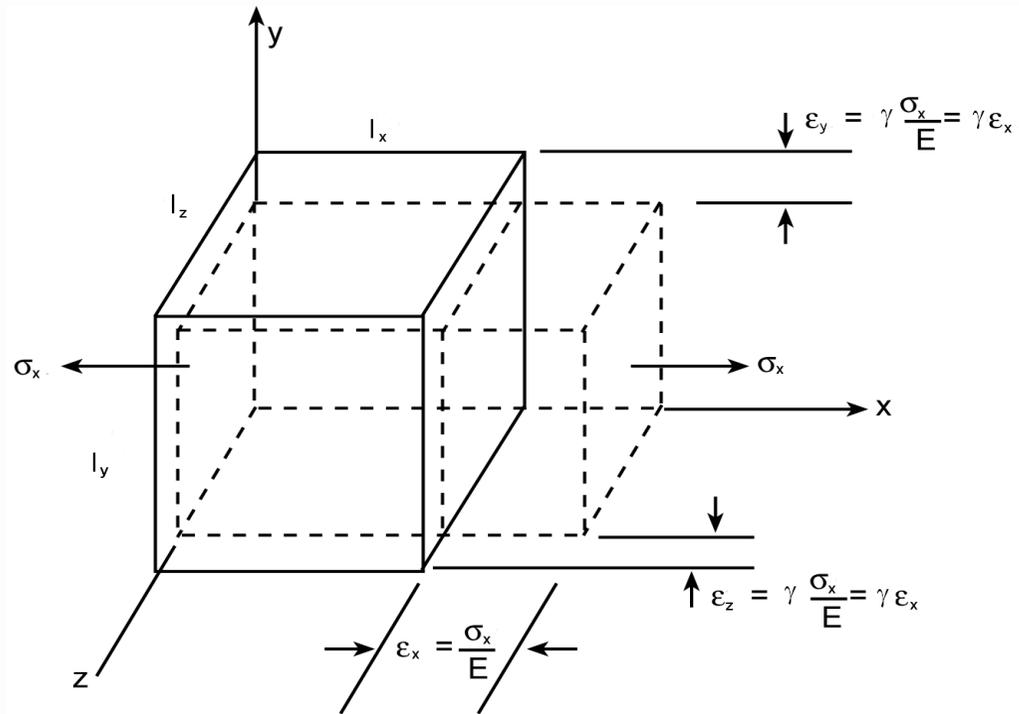
- Onde u , v e w são deslocamentos nas direção x , y e z respectivamente.



Relações tensão x deformação

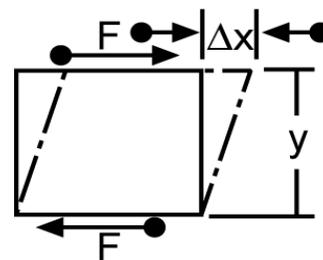
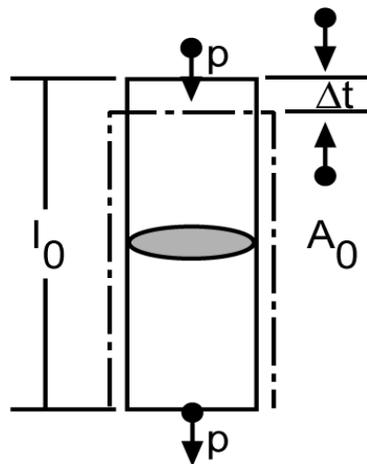
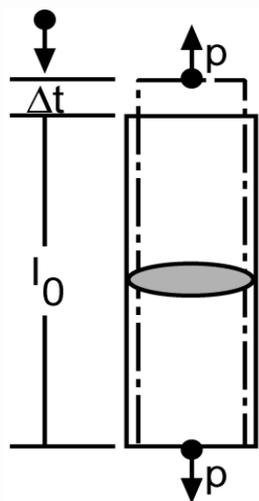
- A deformação não ocorre apenas na direção em que a força é aplicada, eixo x, mas também ocorre uma redução (ou aumento) da secção transversal do corpo, eixo y e z.
- A relação entre a deformação transversal e a longitudinal, para materiais isotrópicos, aqueles que apresentam as mesmas propriedades mecânicas para todas as direções, é representada pelo coeficiente de Poisson γ

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad \varepsilon_y = -\gamma \frac{\sigma_x}{E} = -\gamma \varepsilon_x \quad \varepsilon_z = -\gamma \frac{\sigma_x}{E} = -\gamma \varepsilon_x$$



Fundamentação Teórica

- Quando um material é submetido a uma tensão mecânica, uma compressão uniaxial ou um cisalhamento ocorre uma deformação elástica até um valor de tensão mecânica, compressão ou força de cisalhamento críticos. A partir deste ponto, começa a ocorrer uma deformação plástica.
- Durante a deformação elástica, os átomos do material estão deslocados, mas tendem a voltar para a posição de equilíbrio quando a carga mecânica é removida.

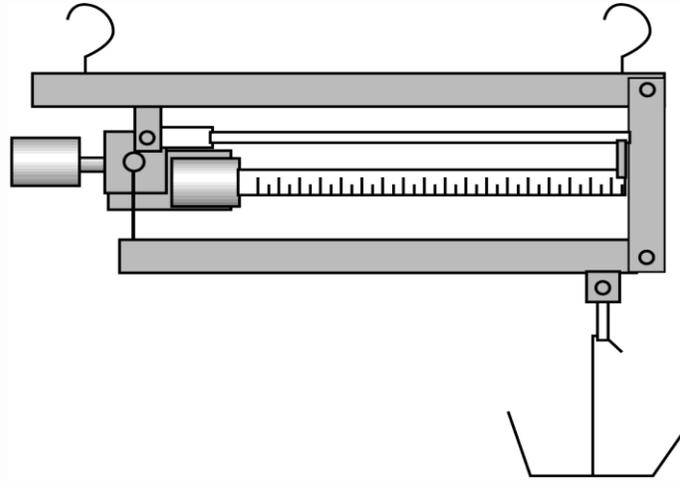
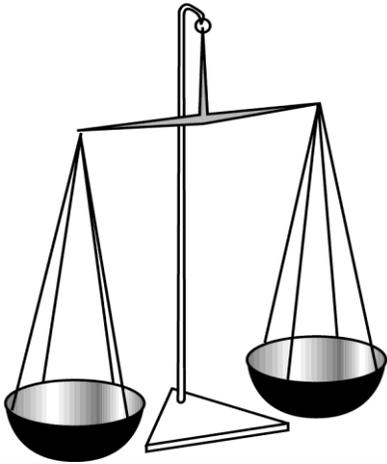


$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \tau = \frac{F}{A}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

- Na figura é mostrada uma tração, compressão e um cisalhamento.

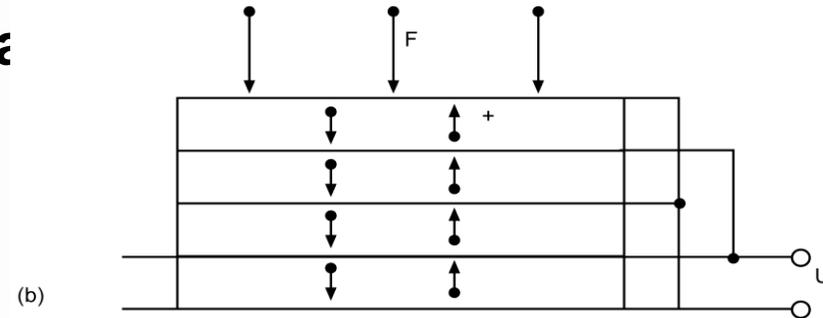
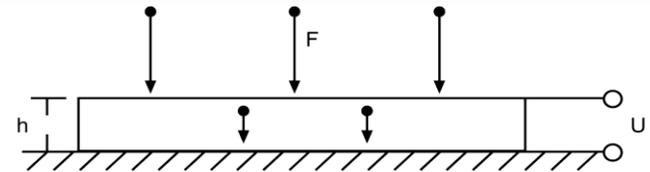
Balanças e a medição de peso



Atualmente é pouco comum encontrar-se em supermercados, em farmácias, ou em açougues as balanças mecânicas. Geralmente são utilizadas balanças eletrônicas. Seu menor custo, simplicidade de operação, mas principalmente a melhor qualidade de medição fez com que estas substituíssem as balanças analógicas (mecânicas).

Transdutores de força

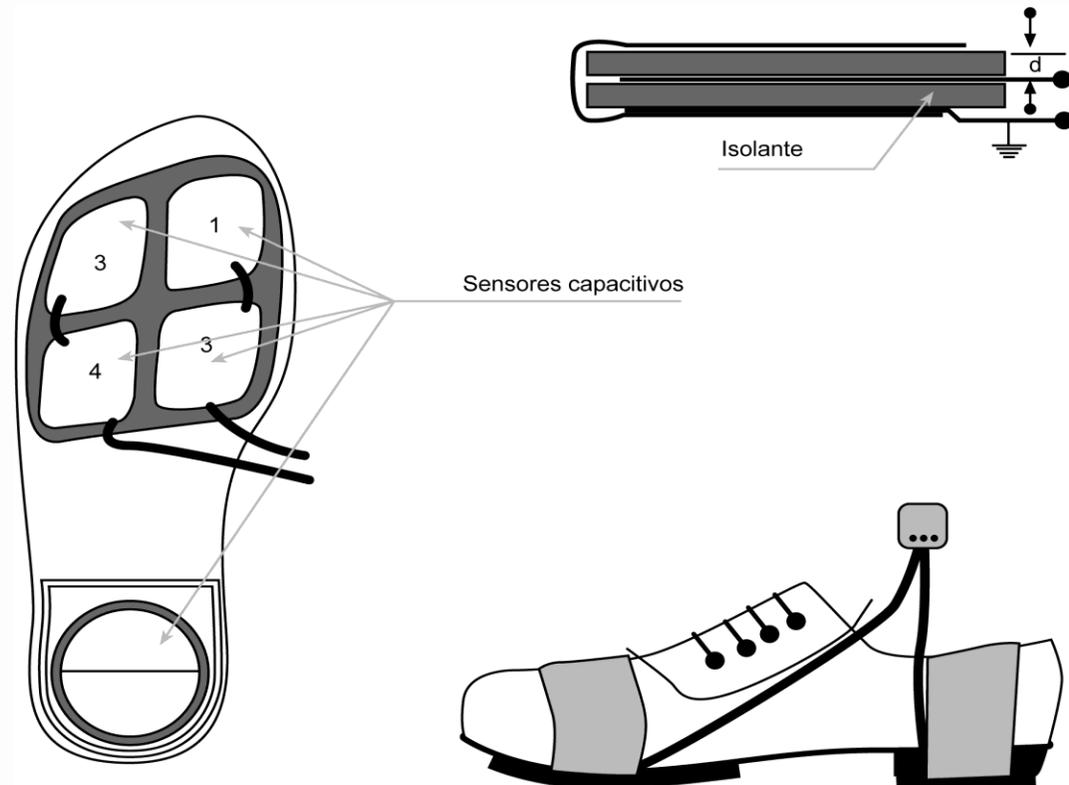
- Transdutor de força piezo-elétrico
- Uma vez que a tensão elétrica aumenta quase que linearmente com a tensão mecânica aplicada, o PZT pode ser utilizado como sensor de força. **Deve, entretanto, ser observado que as cargas elétricas surgem apenas quando a carga mecânica é aplicada.** A mesma será descarregada pela resistência de entrada do instrumento que é utilizado para fazer a medida. Desta forma, **não é possível utilizar o PZT na medição de força ou pressão estática.**
- Um sensor de força piezo-elétrico é quase tão rígido quanto uma peça de aço. Esta característica permite que esses sensores sejam inseridos diretamente em partes de estruturas de máquinas.



Transdutores de força

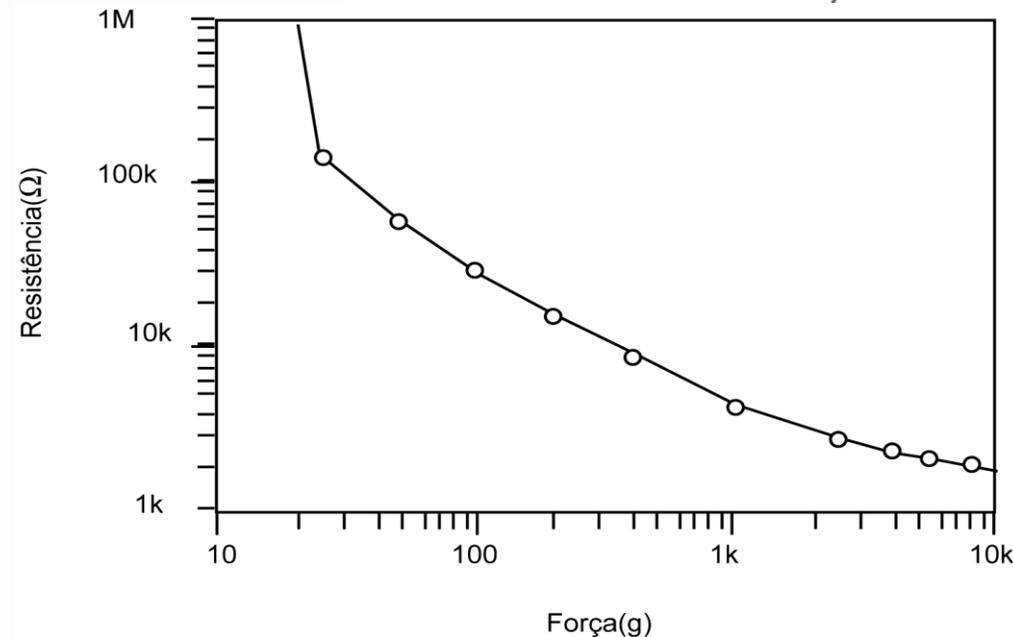
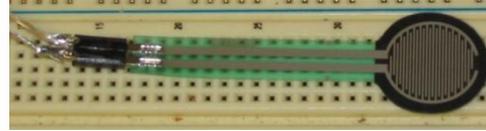
- Transdutor de força capacitivo
- Considerando-se um capacitor de placas paralelas tem-se:
- onde ϵ_0 é a constante dielétrica do ar, ϵ_r a constante dielétrica relativa do material isolante entre as placas (se houver algum), A a área das placas condutoras e d a distância entre as placas.
- Uma tendência atual é a miniaturização de componentes. Desta forma, muitos dispositivos sensores estão sendo fabricados diretamente em pastilhas semicondutoras. Esses sensores são conhecidos como MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*).

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$



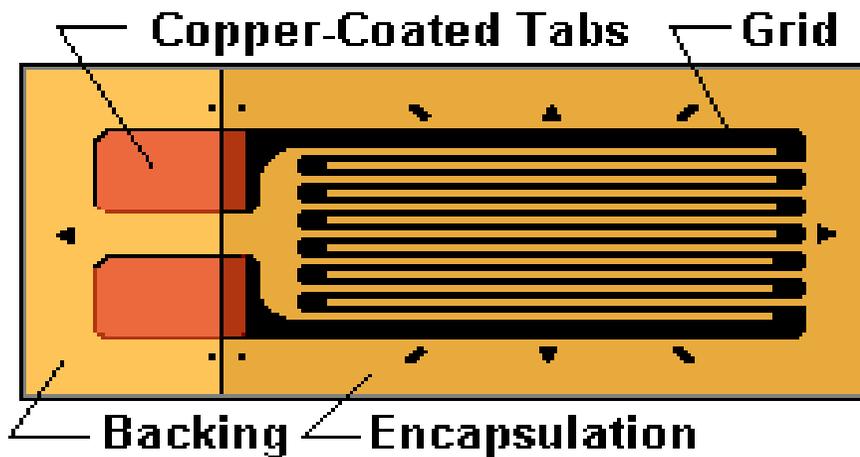
Transdutores de força

- Resistor sensor de força (*FSR- Force sensitive resistor*)
- Um FSR apresenta uma variação de resistência dependente da força (ou pressão) aplicada. Na verdade o nome correto deveria ser “sensor de pressão” ao invés de “sensor de força”, uma vez que o mesmo é dependente da área onde a força é aplicada.
- O FSR consiste em um polímero que exibe uma diminuição da resistência com um aumento da força na superfície ativa do sensor.
- Os sensores do tipo FSR são conhecidos pela precisão muito pobre, por erros da ordem de 25% e pela não linearidade da saída



Extensômetro de resistência elétrica (*Strain gages*)

- A extensometria é o método que utiliza o princípio da relação que existe entre tensões e deformações em corpos submetidos a solicitações mecânicas, conforme estabelecido por Hook.
- Em 1856, Kelvin realizou experimentos utilizando fios de cobre e ferro e observou que a resistência elétrica de ambos mudava quando os materiais sofriam deformação na região elástica
- Atualmente os extensômetros de resistência elétrica são sensores que são colados em estruturas sólidas, com o objetivo de medir a deformação provocada pela tensão mecânica originada por uma força.



- Extensômetro uniaxial típico projetado para medir tensões na direção das linhas da grade.
- A dimensão da grade varia muito. Por exemplo (Micro-Measurements) de 0,20 mm a 101,6 mm.

Extensômetro de resistência elétrica (*Strain gages*)

- A variação relativa da resistência sobre a variação relativa da deformação é uma constante.

$$\frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = K \qquad K = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\varepsilon}$$

- onde K (S_g) é constante (fator do extensômetro ou fator gage), R_0 a resistência inicial do fio metálico, l_0 o comprimento inicial, ΔR e Δl as variações de resistência e comprimento respectivamente e ε a deformação relativa.

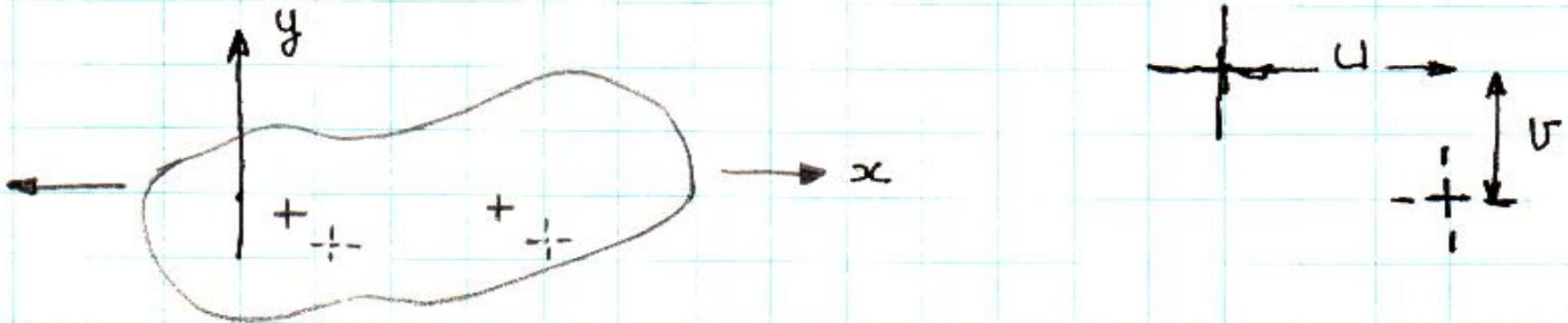


Extensômetro de resistência elétrica (*Strain gages*)

- Na maioria dos casos, o maior interesse é medir deformações lineares ou planares. Podemos então reduzir o problema ao caso biaxial apenas:

ε_{xx} ; ε_{yy} ; e γ_{xy} ou Na forma incremental

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta u}{\Delta x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\Delta v}{\Delta y}; \quad e \quad \gamma_{xy} = \frac{\Delta u}{\Delta y} + \frac{\Delta v}{\Delta x}$$



Extensômetro de resistência elétrica (*Strain gages*)

- A resistência elétrica R de um fio com comprimento l , secção A e resistividade ρ é:

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

- Quando o fio é deformado longitudinalmente, cada uma das quantidades que afetam R alteram-se.

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} - 2\frac{dD}{D}$$

- Como abordado anteriormente, esta relação é válida para a região de deformação elástica.



Fator de Sensibilidade transversal nos *Strain Gages*

- Um extensômetro de resistência elétrica pode também responder a deformações transversais.
- Esse efeito está combinado com o efeito da direção axial e pode produzir erros em um campo biaxial de tensões.
- Esse comportamento é governado pelo fator de sensibilidade transversal do extensômetro.



Sensibilidade transversal

- A sensibilidade de um condutor submetido a uma deformação unidirecional é definida como:

$$S_L = \frac{dR/R}{\varepsilon} \approx \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$$

- Em um extensômetro, o condutor dificilmente será uniforme sobre toda a grade, dessa forma a sensibilidade depende de outros fatores. De fato, uma boa aproximação pode ser feita ao considerar um *strain gage* colado em um corpo (como uma barra, por exemplo) e submetido a um esforço de tração ou compressão. Sua variação de resistência pode ser definida:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_a \varepsilon_a + K_t \varepsilon_t + K_{cis} \gamma_{at}$$

- A sensibilidade do extensômetro para a deformação na direção do cisalhamento é pequena e pode ser desprezada. Entretanto a sensibilidade à deformação transversal é significativa e os fabricantes fornecem um fator de sensibilidade transversal para cada sensor

$$K_t = \frac{S_t}{S_a}$$

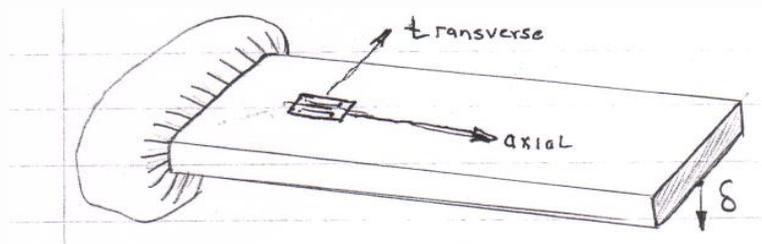
Sensibilidade transversal

$$\frac{\Delta R}{R} = S_g \mathcal{E}_a; \quad S_g = \text{FATOR GAUGE} = \text{FATOR DO EXTENSÔMETRO}$$

\mathcal{E}_a = DEFORMAÇÃO AXIAL

S_g é avaliada experimentalmente usando uma barra calibrada e aplicando uma deformação conhecida. (Pode também ser denotado por)

Mas para um estado de tensões biaxiais:



$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= S_A \left(S_a \mathcal{E}_a + S_t \mathcal{E}_t \right) \\ &= S_a \left(\mathcal{E}_a + \frac{S_t}{S_a} \cdot \mathcal{E}_t \right) \\ &= S_a \left(\mathcal{E}_a + K_t \mathcal{E}_t \right) \end{aligned}$$

Sensibilidade transversal

$$K_t = \frac{S_t}{S_a} = \text{Fator de Sensibilidade transversal (especificada pelo fabricante)}$$

“Fator Gauge” é geralmente expresso como S_g (K) ou S_a

Para a barra de Calibração: $\mathcal{E}_t = -\nu_o \mathcal{E}_a$; $\nu_o = 0.285$ $\nu_o =$ padrão para haste
 $= 0.285$

Para um campo Biaxial de tensões:

$$\frac{\Delta R}{R} = S_a \mathcal{E}_a \left(1 + K_t \frac{\mathcal{E}_t}{\mathcal{E}_a} \right); \text{ mas } S_a = \frac{S_g}{(1 - \nu_o K_t)} \therefore \frac{\Delta R}{R} = \frac{S_g \mathcal{E}_a}{(1 - \nu_o K_t)} \left[1 + K_t \frac{\mathcal{E}_t}{\mathcal{E}_a} \right] \text{ ou: } S_g \mathcal{E}_a = \frac{\Delta R}{R} \left[\frac{(1 - \nu_o K_t)}{1 + \frac{K_t \mathcal{E}_t}{\mathcal{E}_a}} \right]$$

Se chamarmos $\mathcal{E}'_a = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{S_g}$ de “deformação aparente” então a diferença entre a deformação real e a aparente é o erro de deformação.

$$\mathcal{E}_a = \mathcal{E}'_a \left[\frac{(1 - \nu_o K_t)}{1 + \frac{K_t \mathcal{E}_t}{\mathcal{E}_a}} \right]$$

Sensibilidade transversal

- Se a relação entre a deformação aparente e a real é conhecida, podemos calcular o erro resultante da negligência da sensibilidade transversal em um campo de deformações biaxiais fazendo:

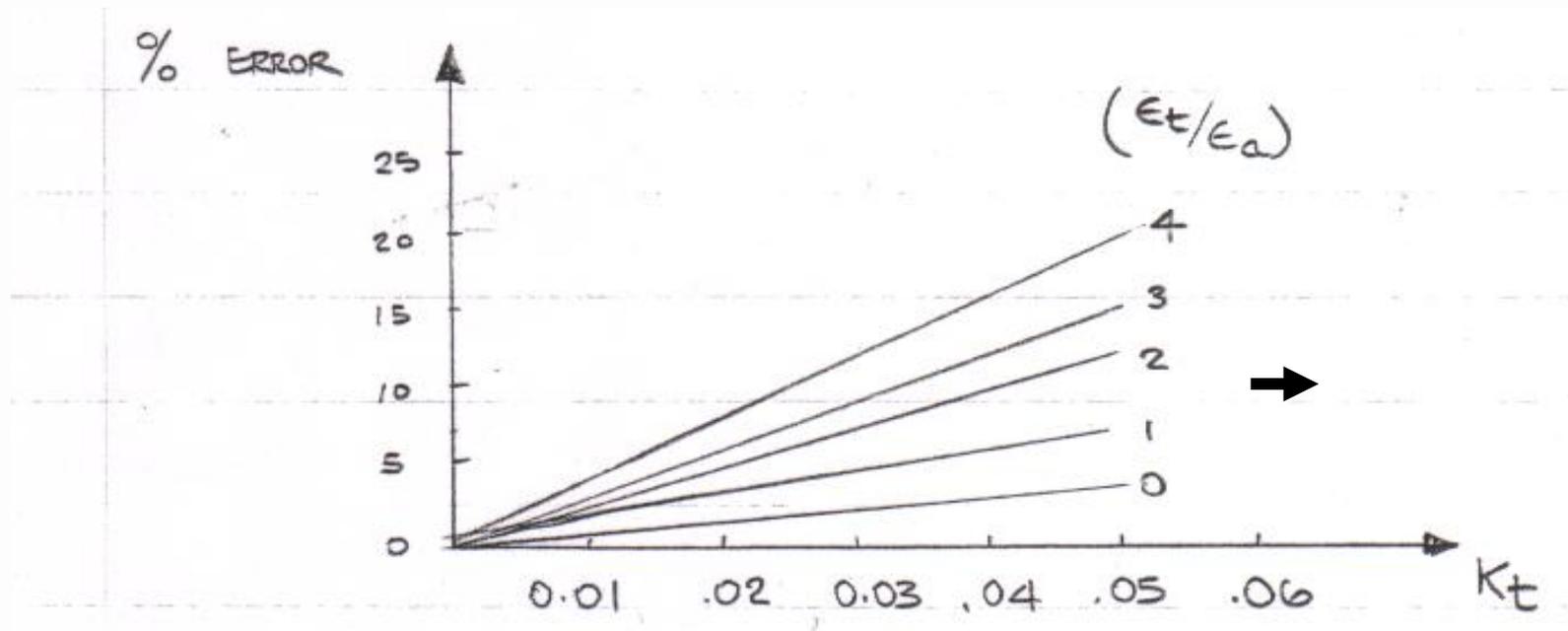
$$\frac{\varepsilon_a - \varepsilon'_a}{\varepsilon_a} (100) = K_t \frac{\left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} + \nu_o \right)}{(1 - \nu_o K_t)} (100)$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon'_a \left[\frac{(1 - \nu_o K_t)}{1 + \frac{K_t \varepsilon_t}{\varepsilon_a}} \right]$$

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\frac{\frac{\Delta R}{R}}{S_g} - \left(\frac{\frac{\Delta R}{R}}{S_g} \right) \left[\frac{(1 - \nu_o K_t)}{1 + K_t \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a}} \right]}{\frac{\frac{\Delta R}{R}}{S_g} \frac{(1 + \nu_o K_t)}{\left(1 + K_t \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} \right)}} = K_t \frac{\left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} + \nu_o \right)}{(1 + \nu_o K_t)}$$

Efeitos da sensibilidade

- Exemplo: $K_t = 0.4\%$; $\frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} = 1.0$; erro $\approx 1\%$.



$$K_t \quad +1.8\% \text{ a } -9.2\%$$

Correção da sensibilidade transversal

A fim de fazer a correção para a deformação transversal, é necessário medir deformação em ambas as direções axial e transversal. Se ϵ'_{xx} e ϵ'_{yy} são as deformações aparentes medidas nas direções x e y, então:

$$\epsilon'_{xx} = \frac{\Delta R}{S_g \cdot R} \quad \text{e} \quad \epsilon'_{yy} = \frac{\Delta R / R}{S_g}; \quad S_g \text{ fator do extensômetro}$$

$$\epsilon'_{xx} = \frac{\epsilon_{xx} + K_t \epsilon_{yy}}{(1 - \nu_0 K_t)}; \quad \epsilon'_{yy} = \frac{\epsilon_{yy} + K_t \epsilon_{xx}}{(1 - \nu_0 K_t)}$$

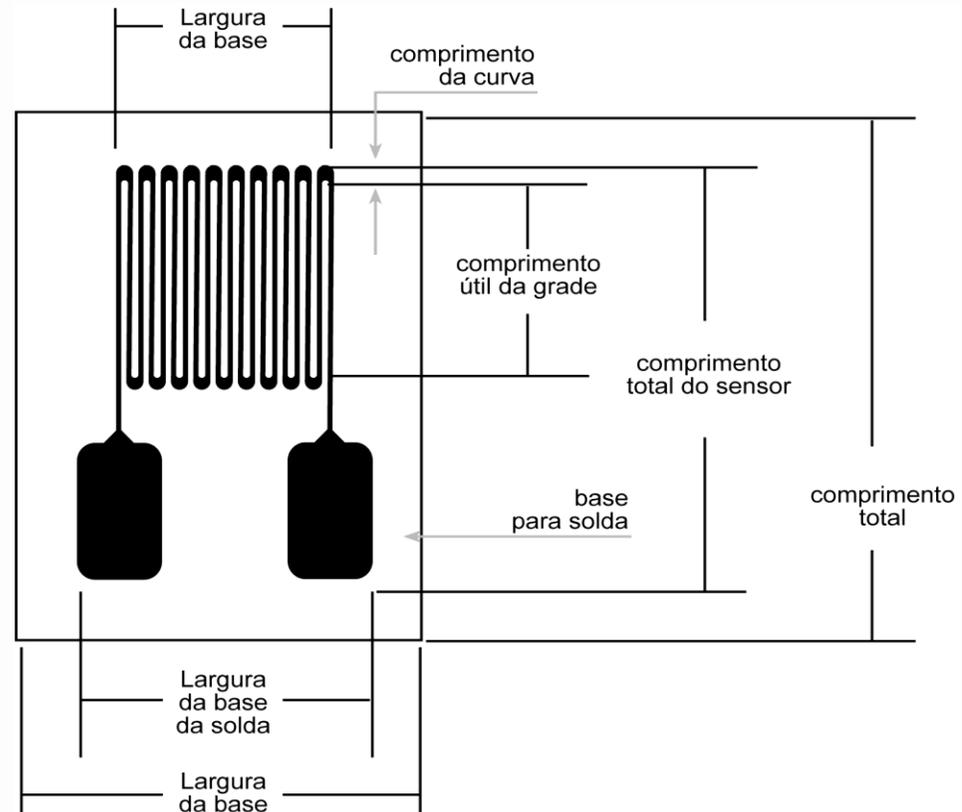
Resolvendo simultaneamente, temos:

$$\epsilon_{xx} = \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 - K_t^2} (\epsilon'_{xx} - K_t \epsilon'_{yy}) \quad \text{e de forma similar para y.}$$



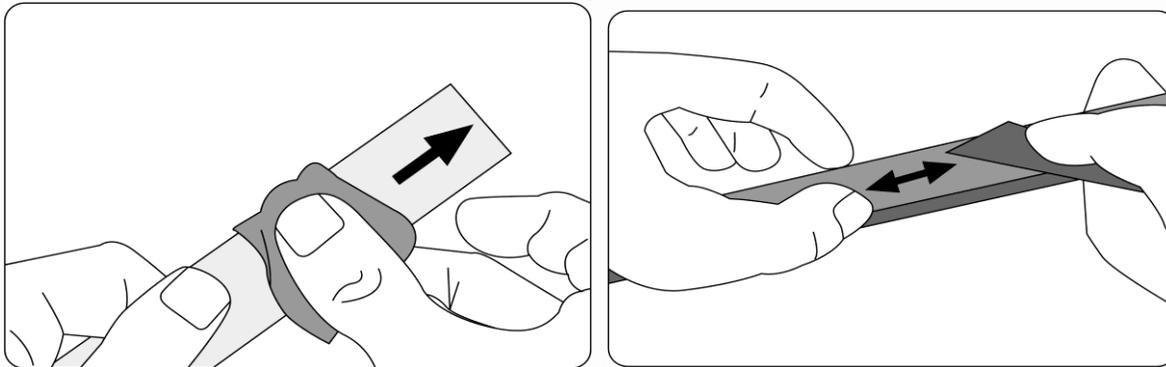
Extensômetro de resistência elétrica

- O extensômetro de resistência elétrica (tipo folha) é formado por dois elementos: a base e a grade
- Os extensômetros de resistência elétrica do tipo folha são os sensores mais populares na medição de força (e grandezas relacionadas) em função do seu tamanho, alta linearidade e baixa impedância.

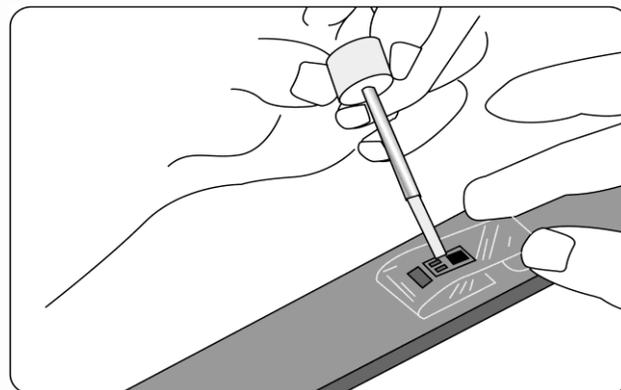
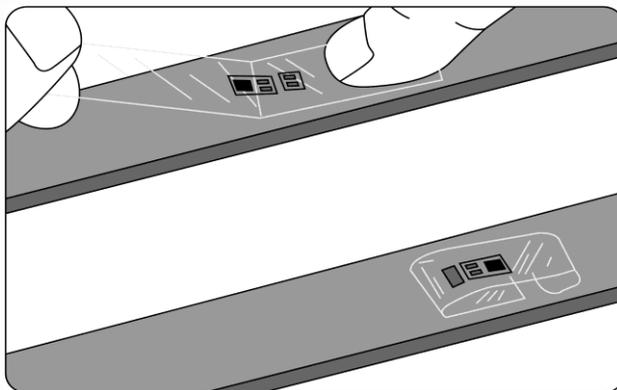
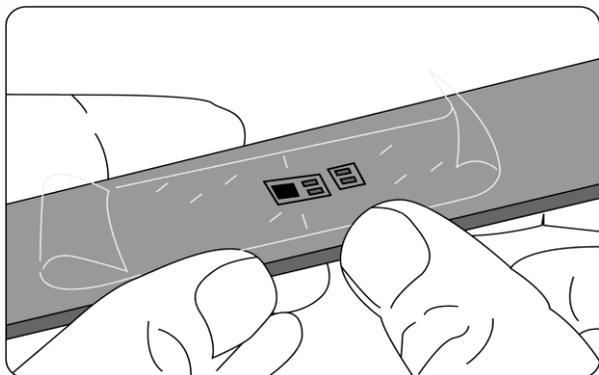
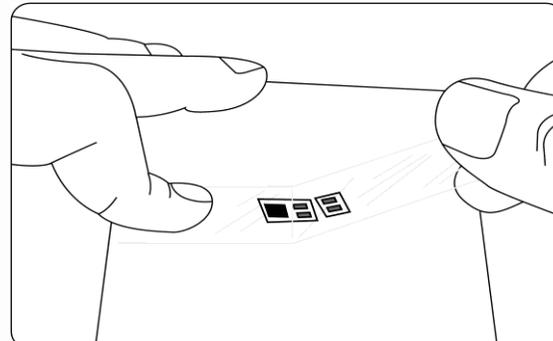
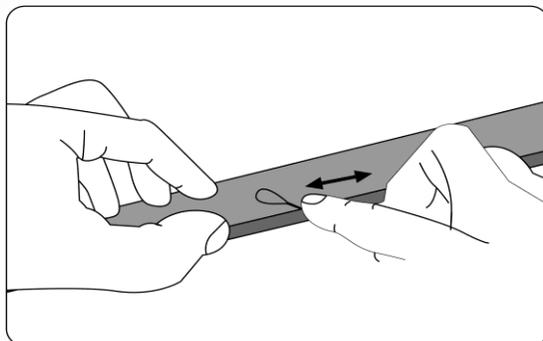
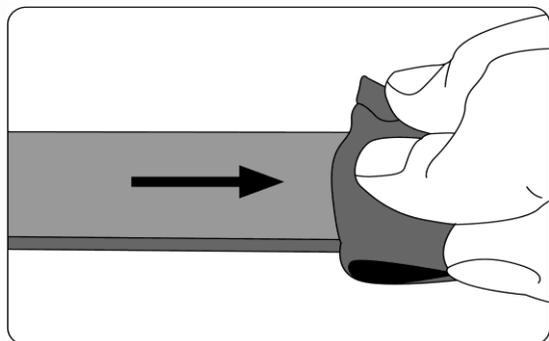


Colagem e método de montagem

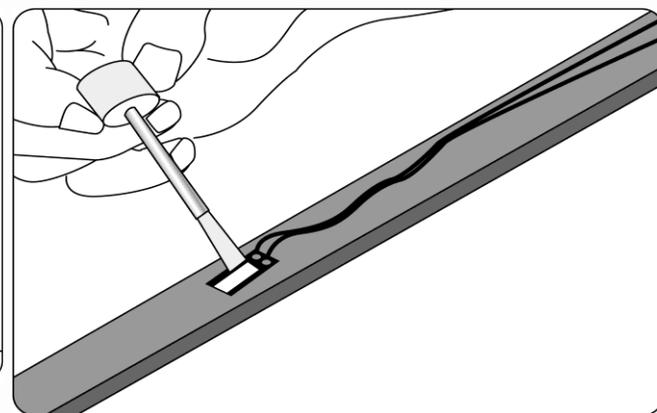
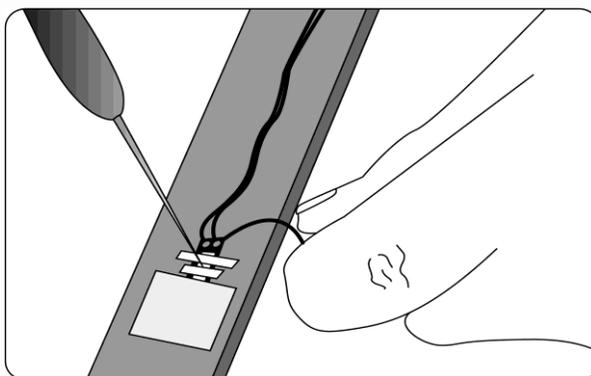
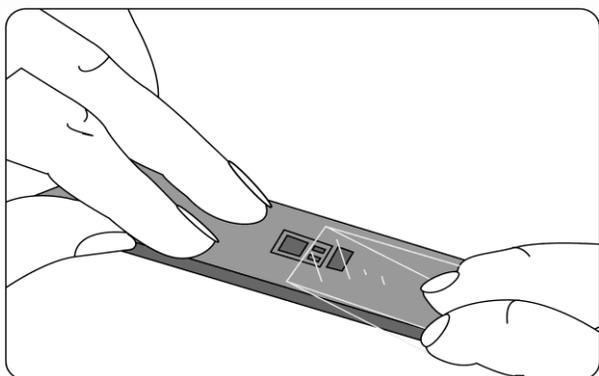
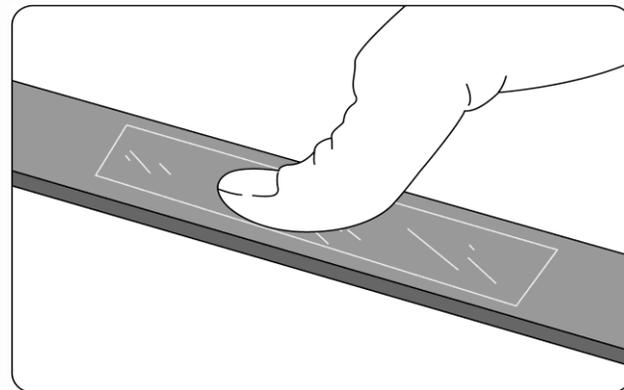
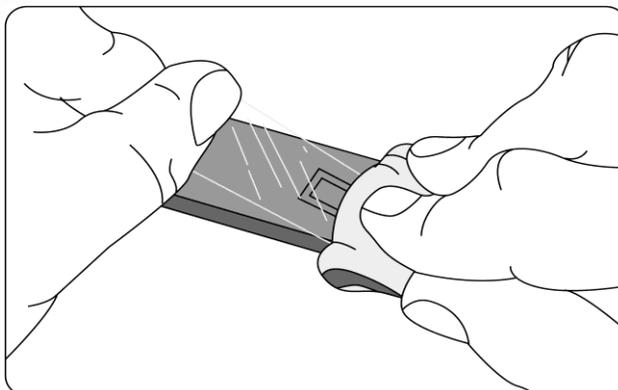
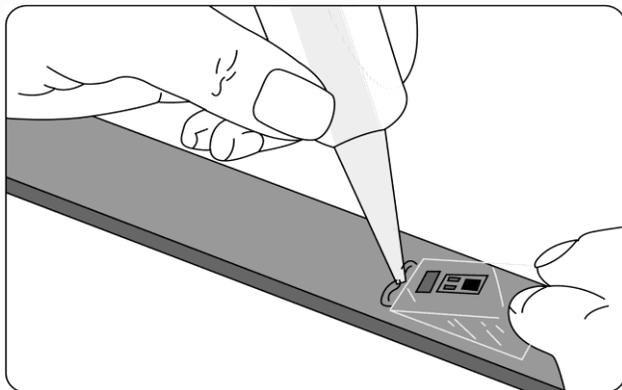
- **Processo de colagem dos extensômetros de resistência elétrica**



Processo de colagem

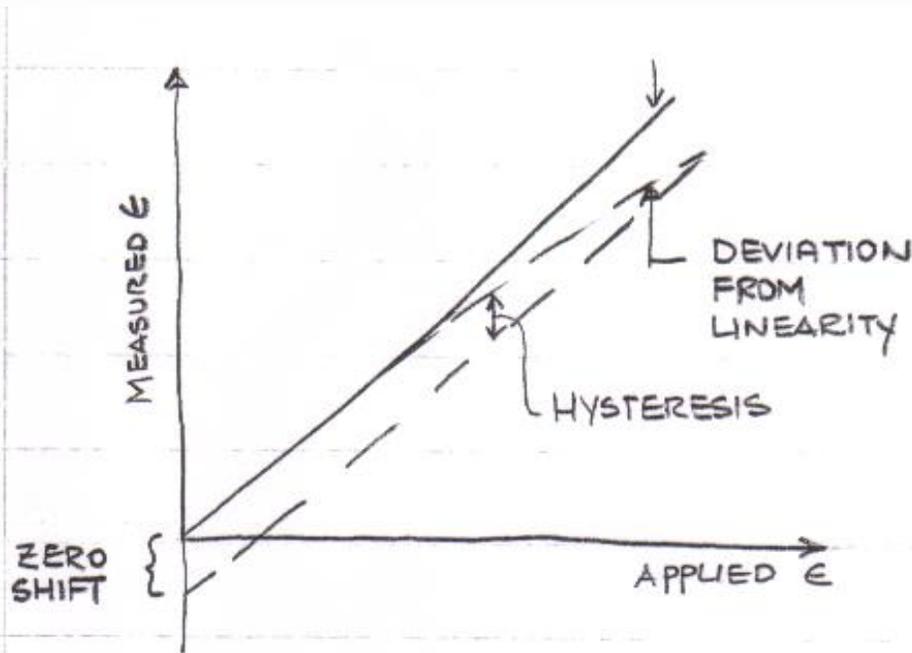


Processo de colagem



Desempenho de extensômetros

Linearidade, Histerese e deslocamento de Zero



Desvios da linearidade para um extensômetro instalado apropriadamente deve ser de aproximadamente 0.1% da max. leitura (polymide) e ~0.05% (epoxy).

Histerese e deslocamento de zero são funções da espessura do adesivo e tipo base. Um deslocamento de zero de 1% é geralmente observado em aplicações típicas. Isso pode ser reduzido para 0,2% se alguns ciclos de deformação grandes são aplicados antes de coletar os dados.

compensação de temperatura

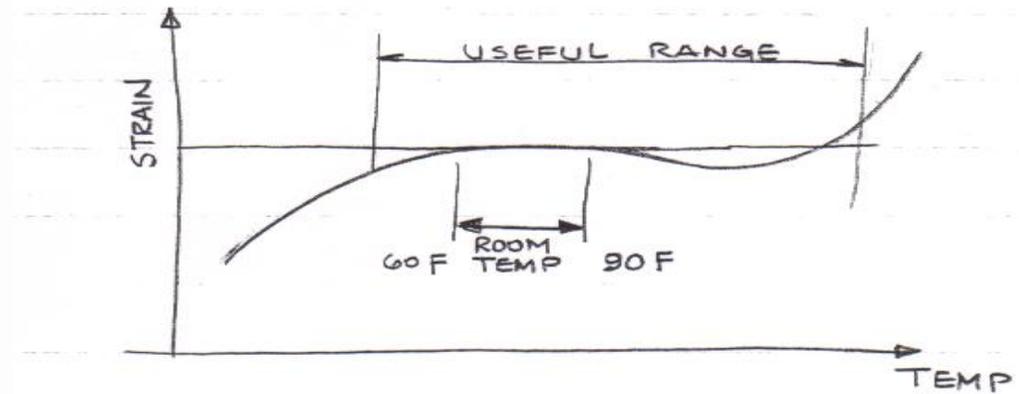
- Os extensômetros de resistência elétrica são construídos de diferentes metais e ligas tais como constantan (Cu57Ni43), karma (Ni75Cr20FexAly), nicromo (Ni80Cr20) entre outras.
- Também são produzidos em semicondutores, tais como, o silício e o germânio.
- Basicamente a escolha do sensor consiste na determinação de uma combinação de parâmetros compatíveis com o ambiente e com as condições de operação do sensor.
- Em aplicações estáticas tanto a ponte de Wheatstone como o extensômetro devem ser compensados para anular o efeito da temperatura. Quando a temperatura varia podem ocorrer quatro efeitos:
 - O fator do extensômetro varia com a temperatura
 - A grade sofre um alongamento ou uma contração. . $\Delta l / l = \alpha \Delta T$
 - A célula alonga ou contrai .
 - A resistência do extensômetro varia $\Delta R / R = \gamma \Delta T$



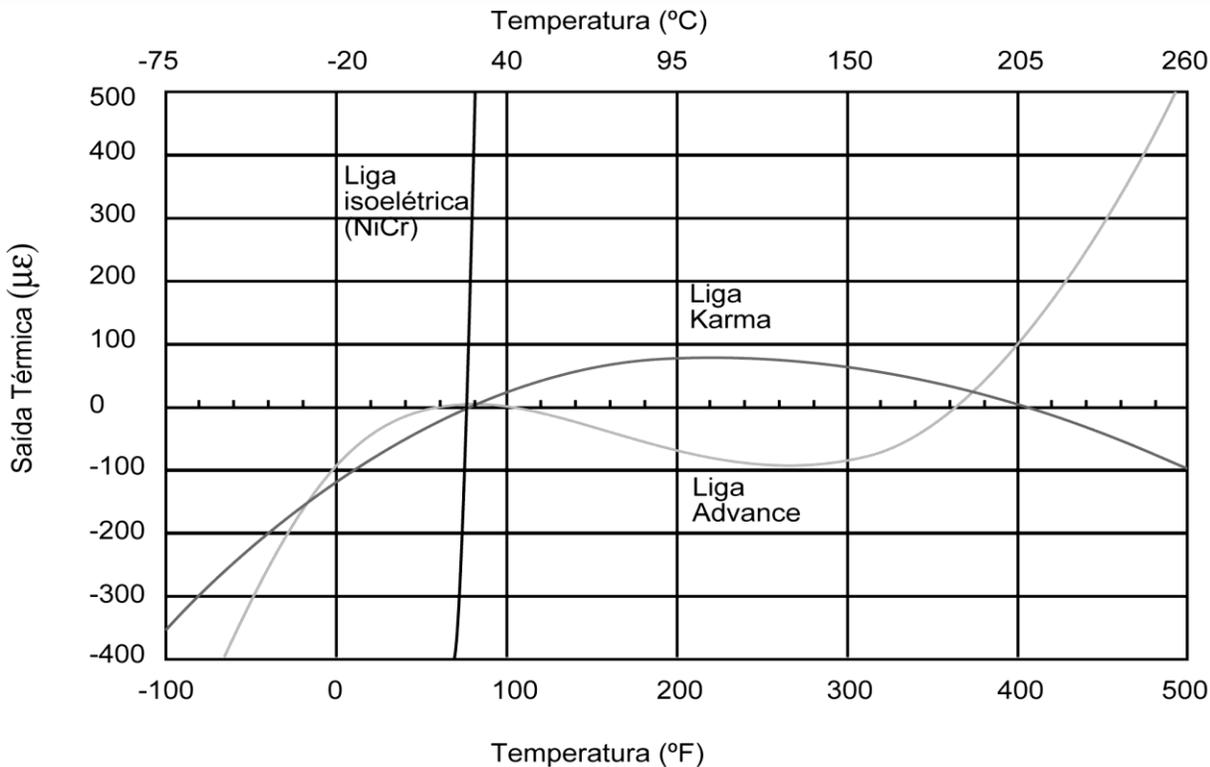
Extensômetros com compensação de temperatura

- O efeito combinado da grade do sensor, da base metálica e da variação de resistência pode ser escrito como:
- Isto pode ser minimizado utilizando $\beta=\alpha$ e ainda utilizando materiais com baixo valor de γ .

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta T} = S_g (\beta - \alpha) \Delta T + \gamma \Delta T$$



Extensômetros com compensação de temperatura



Os fabricantes de extensômetros selecionam ligas no intuito de compensar os efeitos dos parâmetros observados.

Essa característica é conhecida como **auto-compensação de temperatura**.

Strain gages com auto-compensação de temperatura são projetados para apresentar o mínimo de deformação aparente em uma faixa aproximada de -45 a 200°C .



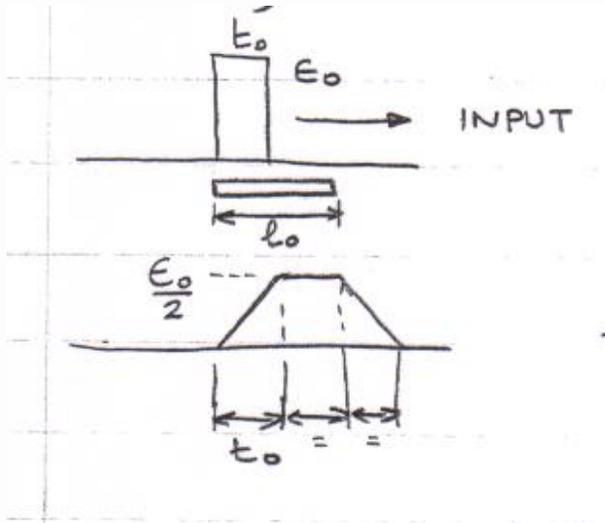
Limites de alongamento

- A deformação máxima que pode ser medida com extensômetros do tipo folha depende do comprimento do sensor, da liga, do material do substrato da grade e do adesivo utilizado.
- Limites típicos são:
 - Advance com substrato de polyimide + -5%
 - Karma com substrato de polyimide + -1.5%
 - Extensômetros de alto alongamento + -20%
- Alguns SG tipo folha advance de substrato com polyimida de alto alongamento e adesivo epoxy modificado com urethano pode variar dimensões acima de 20%.



Resposta dinâmica

- Para funções de estímulo muito estreitas, a saída pode ser muito distorcida

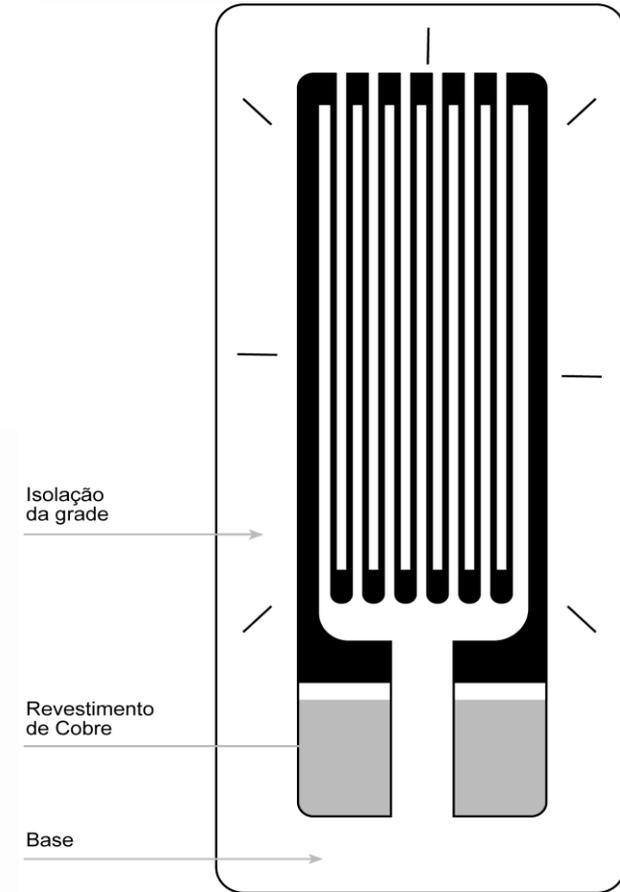
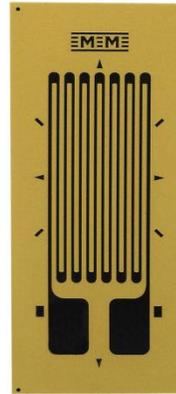


fazendo $t_0 = \frac{l_0/2}{c}$ (1/2 comp. do sensor)

$l_0 = 1/8''$; $t_0 \cong 6\mu s$; (83kHz) ← Problemas!!!!

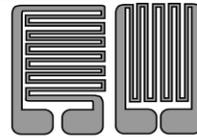
Extensômetros uniaxiais

- Consistem nos *strain gages* com o formato de grades mais simples
- As resistências típicas são 120 ou 350 Ω . Neste aspecto, quando é possível a escolha, é melhor optar por resistências maiores, pois isto reduz o aquecimento na grade, além de reduzir o efeito devido a conexões e soldas.

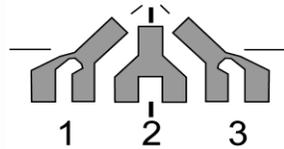


Extensômetros do tipo roseta

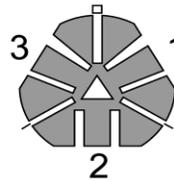
- Para um estado de tensões biaxiais é necessária a utilização de mais de um elemento.
- Existem os extensômetros do tipo roseta, os quais apresentam mais de uma grade sensora em uma mesma base.
- As rosetas devem ser escolhidas de acordo com a distribuição das tensões e posicionados de forma que as direções preferenciais de cada grade coincidam com as direções das componentes da tensão mecânica.
- Ou em casos quando não se conhece a direção de tensões principais.



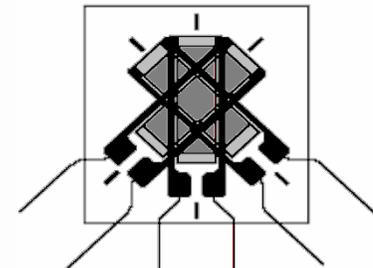
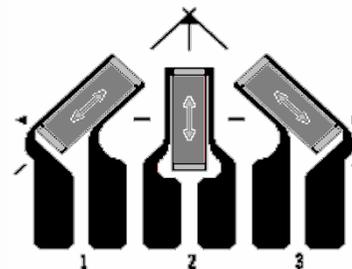
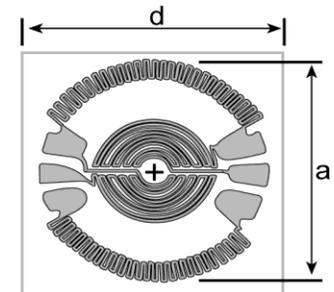
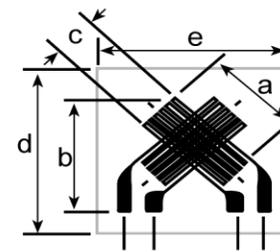
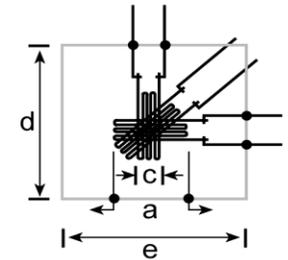
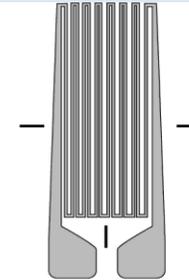
0-90° Roseta T



0-45-90° Roseta Retangular

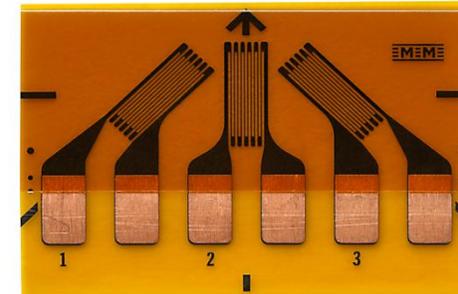
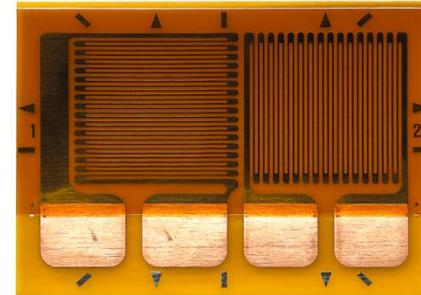


60-120° Roseta Delta



Extensômetros do tipo roseta

- Na prática, com tensões superficiais com eixos principais desconhecidos, pode-se utilizar uma roseta com três elementos e determinar as direções preferenciais.
- As rosetas podem ser do tipo planar ou empilhadas . Geralmente a primeira é uma escolha mais vantajosa em relação à segunda. As rosetas empilhadas apresentam uma dificuldade maior na dissipação de calor das grades e isso pode influenciar no desempenho bem como na estabilidade do sensor.
- Outra desvantagem é em relação a aplicações com pequenas amplitudes de tensões, onde as rosetas planares estão próximas da superfície submetida ao esforço, enquanto que nas rosetas empilhadas, a transmissão da deformação é mais pobre uma vez que a mesma se faz pelas grades individuais



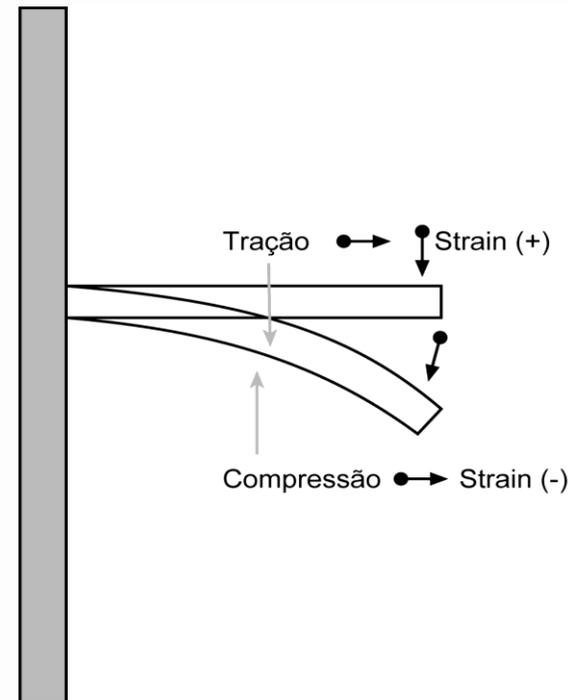
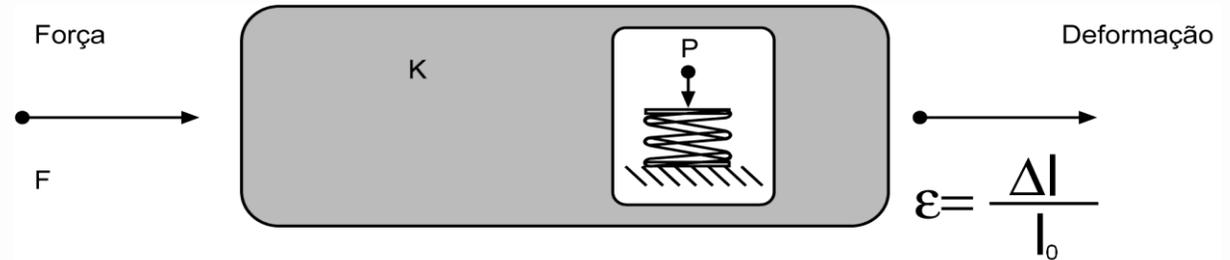
Extensômetros semicondutores

- Os *strain gages* semicondutores foram inventados nos Laboratórios da *Bell Telephone Company* nos anos 50. No início da década de 70 os primeiros extensômetros semicondutores foram aplicados na indústria automobilística.
- Diferente dos sensores metálicos, os extensômetros semicondutores utilizam o efeito piezo-resistivo do silício ou germânio.
- Normalmente é necessário um cuidado muito especial para a colagem por nem sempre apresentar uma base como os extensômetros metálicos
- As principais vantagens dos extensômetros semicondutores são as altas sensibilidades, os valores de resistência elevados além do tamanho reduzido. As comparações com os extensômetros populares (metálicos tipo folha) são inevitáveis e muitas vezes controversas na literatura. Sabe-se que os *strain gages* semicondutores são bastante sensíveis à variação de temperatura, apresentando forte tendência de *drift*. Outro problema dos semicondutores é o desvio de linearidade. Estes problemas, entretanto, podem ser consideravelmente minimizados com eletrônica e processamento adequados.
- Aplicações práticas, atuais deste tipo de tecnologia podem ser encontradas em muitos sensores de pressão onde o diafragma é micro-usinado em silício e os extensômetros são difundidos neste substrato na forma de ponte



Introdução ao projeto de transdutores de força

- Um Sistema Mecânico (Elemento Mola) converte força em alongamento mecânico
- Colando o *strain gage* sobre o corpo submetido à tensão mecânica, ambos estarão submetidos à mesma deformação. Desta forma, uma variação de resistência ocorrerá na saída, a qual é ligada a um circuito do tipo ponte como será mostrado



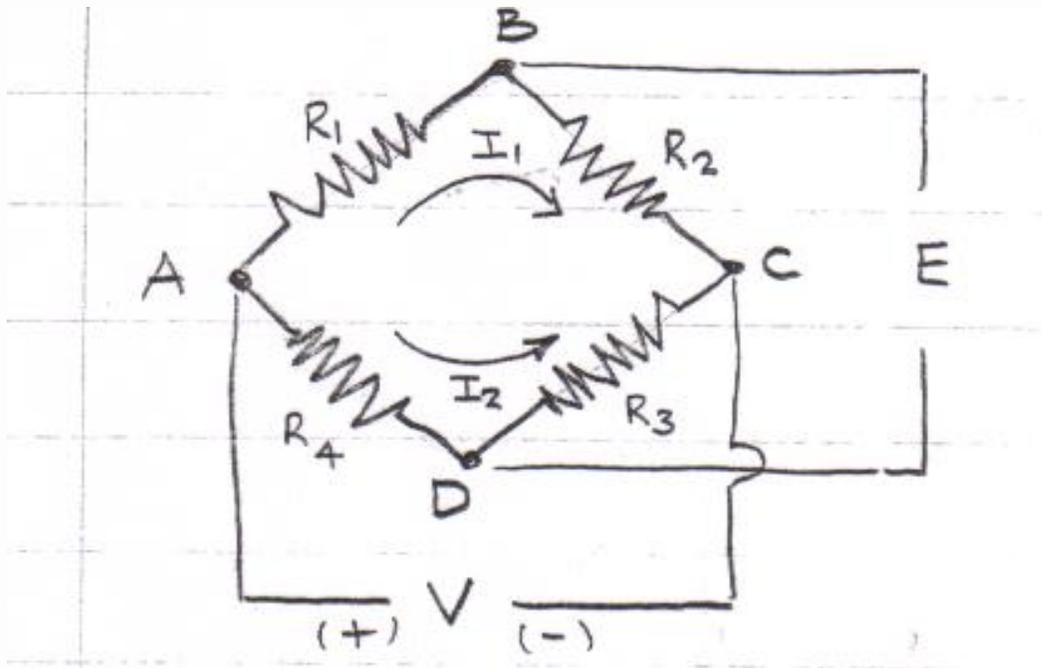
Introdução ao projeto de transdutores de força

- A Figura mostra as etapas distintas de transdução desde o estímulo até a resposta



Circuitos em ponte típicos

Já vimos o funcionamento da ponte de wheatstone em outra oportunidade. Lembrando:



$$V_{AB} = I_1 R_1 = \frac{V}{R_1 + R_2} \cdot R_1$$

$$V_{AD} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V$$

Circuitos em ponte típicos

$$\text{mas } E = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD} \quad \text{ou } E = \left(\frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right) V$$

$$\text{Se } R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ então } E = 0 \quad \text{ou } \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \text{ i.e. uma ponte balanceada}$$

Se a ponte está inicialmente balanceada, mas cada resistência tem uma variação:

$$\Delta E = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right]$$

Fazendo $R_2/R_1 = r$; :

$$\Delta E = \frac{Vr}{(r+1)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right]$$

Para apenas um sensor ativo e

$$\text{encontramos: } \Delta E = \frac{\Delta R}{4R} \cdot V$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

$$\text{Mas } \frac{\Delta R}{R} = S_g \mathcal{E} \quad \Delta E = \frac{S_g V}{4} \cdot \mathcal{E} \quad (\text{millivolts})$$

Na ponte de wheatstone temos 4 possibilidades:

- 1 SG ativo
- 1 SG ativo e 1 SG passivo (caso 1 e 2)
- 2 SG ativos
- 4 SG ativos

Sensibilidade (alternativamente)

- Podemos diferenciar a tensão de saída para cada variável em separado:

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

$$\frac{\partial E}{\partial R_1} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} V \quad \frac{\partial E}{\partial R_2} = -\frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2} V \quad \frac{\partial E}{\partial R_3} = \frac{R_4}{(R_3 + R_4)^2} V \quad \frac{\partial E}{\partial R_4} = -\frac{R_3}{(R_3 + R_4)^2} V$$

- Somando as parcelas individuais:

$$\frac{\partial E}{V} = \frac{\partial R_1 R_2 - \partial R_2 R_1}{(R_1 + R_2)^2} - \frac{\partial R_3 R_4 - \partial R_4 R_3}{(R_3 + R_4)^2}$$

- Veja que para a ponte balanceada basta que
- Mas se $R_1=R_2=R_3=R_4$:

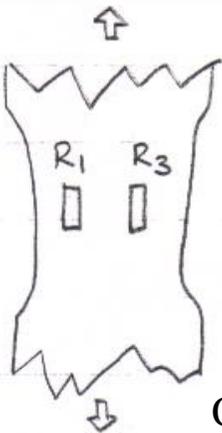
$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

$$\Delta E = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right]$$

Sensibilidade do circuito do transdutor

$$\therefore S_c = \frac{\Delta E}{\varepsilon} = \frac{S_g V}{4} \quad (\text{Para transdutor de deformação})$$

Considere dois extensômetros ativos montados em uma amostra sob tensão:

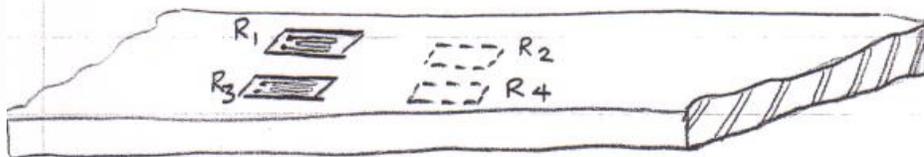


$$\Delta E = \frac{Vr}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{R_2}{R_2} + \frac{R_3}{R_3} - \frac{R_4}{R_4} \right)$$

A sensibilidade de saída nesse caso:

$$\Delta E = V \frac{2\Delta R}{4R} \quad \text{ou} \quad S_c = \frac{S_g V}{2}$$

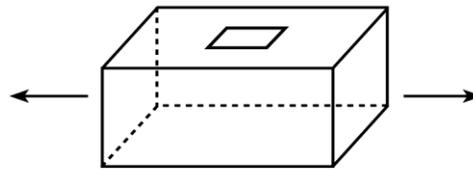
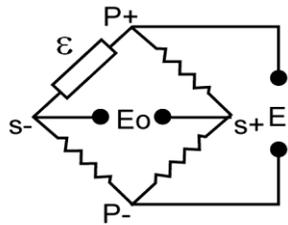
Quatro sensores ativos:



$$S_c = S_g V$$

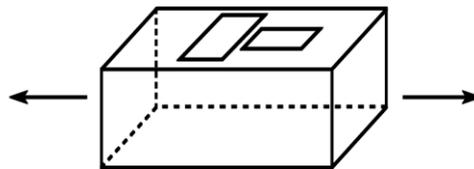
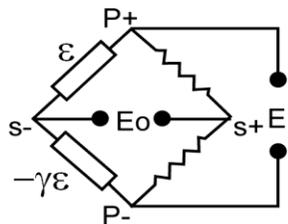
Projeto da célula de carga

- A sensibilidade da célula de carga é influenciada diretamente pelo número de extensômetros, pela posição dos extensômetros e pela configuração na ponte de Wheatstone



$$\frac{E_o}{E} = \frac{\pm K \varepsilon}{4 \pm 2K \varepsilon} \quad \frac{E_o}{E} = \frac{\pm K \varepsilon \times 10^{-3}}{4 \pm 2K \varepsilon \times 10^{-6}} \left[\frac{mV}{V} \right]$$

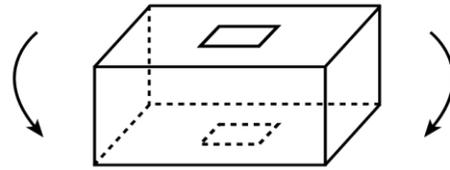
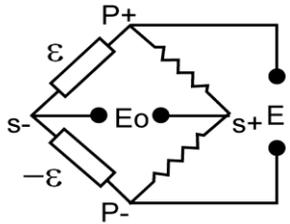
$$\Delta E_o = V \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} \right] \text{ mas } \frac{\Delta R_1}{R_1} = S_g \varepsilon \quad \Delta E_o = V \frac{1}{4} S_g \varepsilon$$



$$\frac{E_o}{E} = \frac{K \varepsilon (1 + \gamma) \times 10^{-3}}{4 + 2K \varepsilon (1 - \gamma) \times 10^{-6}} \left[\frac{mV}{V} \right]$$

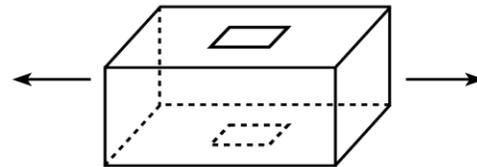
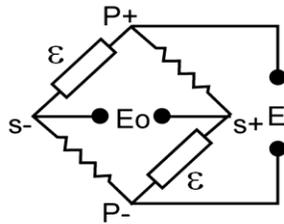
$$\Delta E = V \frac{1}{4} [k \varepsilon + \gamma k \varepsilon]$$

Projeto da célula de carga



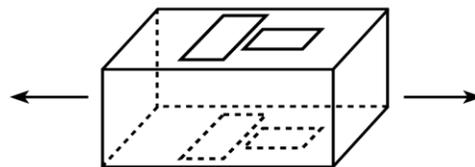
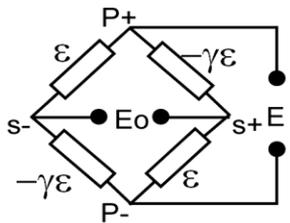
$$\frac{E_o}{E} = \frac{K\varepsilon \times 10^{-3}}{2} \left[\frac{mV}{V} \right]$$

$$\Delta E = V \frac{1}{4} [k\varepsilon + k\varepsilon] = V \frac{1}{2} k\varepsilon$$



$$\frac{E_o}{E} = \frac{K\varepsilon \times 10^{-3}}{2 + K\varepsilon \times 10^{-6}} \left[\frac{mV}{V} \right]$$

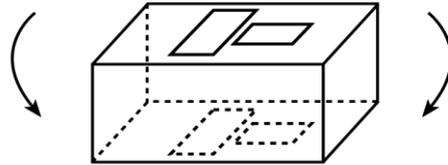
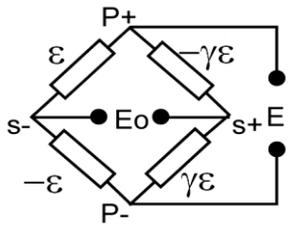
$$\Delta E = V \frac{1}{4} [k\varepsilon + k\varepsilon] = V \frac{1}{2} k\varepsilon$$



$$\frac{E_o}{E} = \frac{K\varepsilon(1+\gamma) \times 10^{-3}}{2 + K\varepsilon(1-\gamma) \times 10^{-6}} \left[\frac{mV}{V} \right]$$

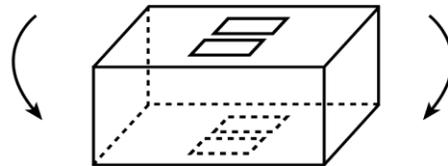
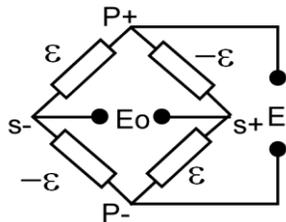
$$\Delta E = V \frac{1}{4} [2k\varepsilon + 2\gamma k\varepsilon] = V \frac{1}{2} k\varepsilon (1+\gamma)$$

Projeto da célula de carga



$$\frac{E_o}{E} = \frac{K\varepsilon(1+\gamma) \times 10^{-3}}{2} \left[\frac{mV}{V} \right]$$

$$\Delta E = V \frac{1}{4} [k\varepsilon + k\varepsilon + \gamma k\varepsilon + \gamma k\varepsilon] = V \frac{1}{2} k\varepsilon(1+\gamma)$$



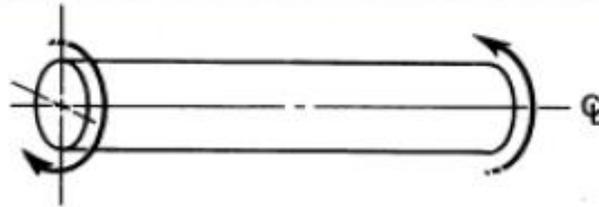
$$\frac{E_o}{E} = K\varepsilon \times 10^{-3} \left[\frac{mV}{V} \right]$$

$$\Delta E = V \frac{1}{4} [k\varepsilon + k\varepsilon + k\varepsilon + k\varepsilon] = V k\varepsilon$$



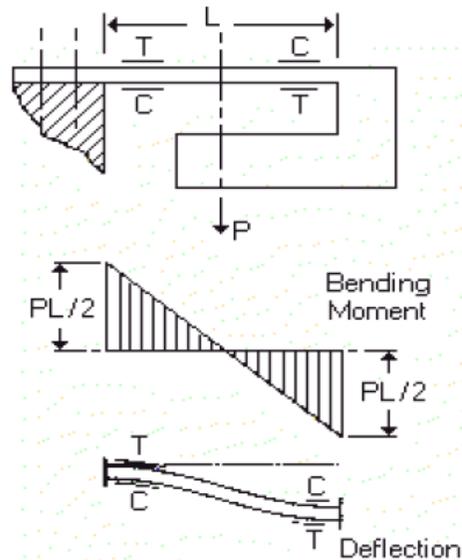
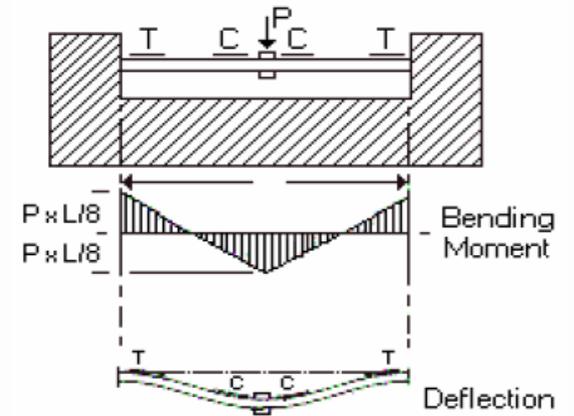
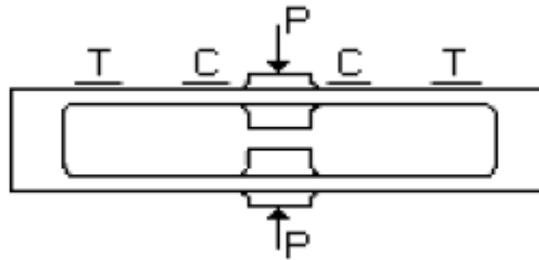
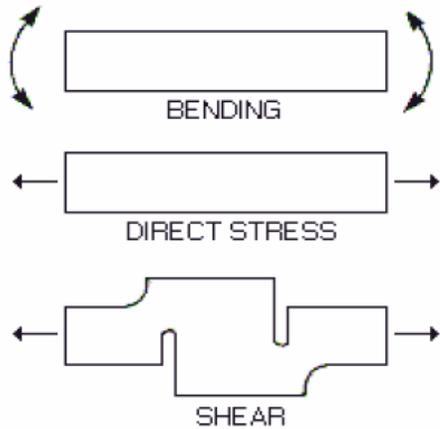
Orientação do sensor e interpretação dos resultados

Torsion

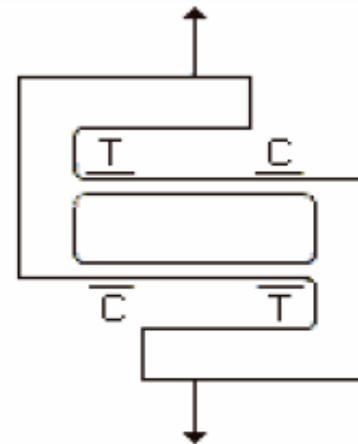


J	K = 2		<p>Two-arm bridge.</p> <p>Temperature and axial load components are compensated.</p> <p>Bending components are accentuated.</p>
K	K = 2		<p>Two-arm bridge.</p> <p>Temperature effects and axial load components are compensated.</p> <p>Relatively insensitive to bending.</p>
L	K = 4		<p>Four-arm bridge.</p> <p>Sensitive to torsion only.</p> <p>(Gages 1 and 3 are on opposite sides of the shaft from gages 2 and 4.)</p>

Elementos Mola

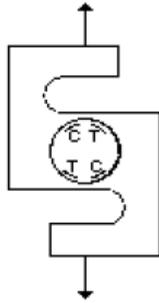


Reversed bending induced by folded cantilever

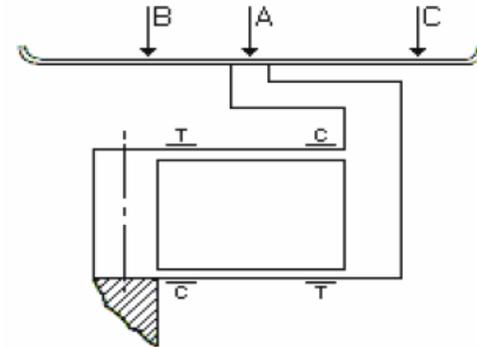


Coupled dual-beam spring element -- basic configuration.

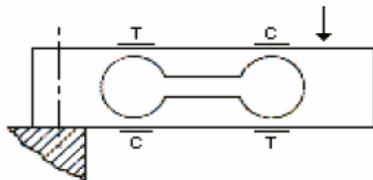
Elementos Mola



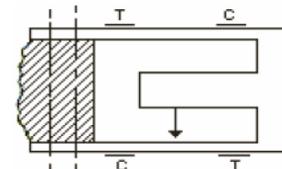
Coupled dual-beam spring element -- compact, low-compliance design.



Dual-beam spring element for reduced sensitivity to off-axis loads.

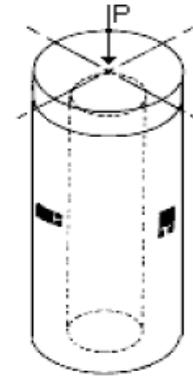
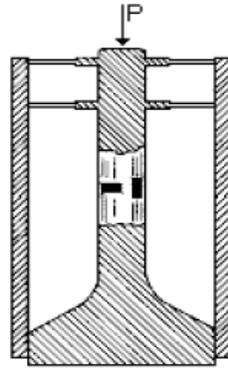
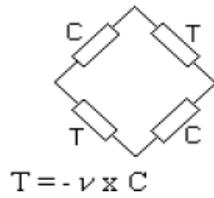
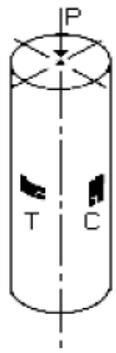


Popular "binocular" spring element, widely used in low-capacity scale applications.



Centrally loaded dual-beam arrangement to eliminate direct stress in sensing beams.

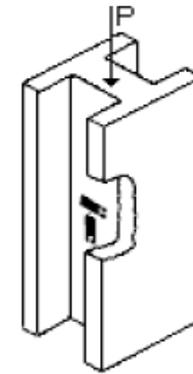
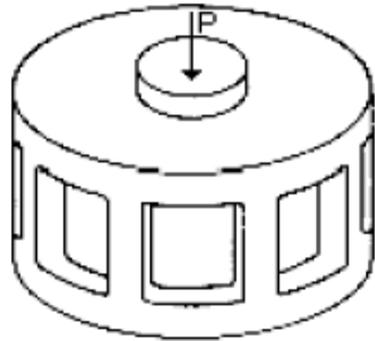
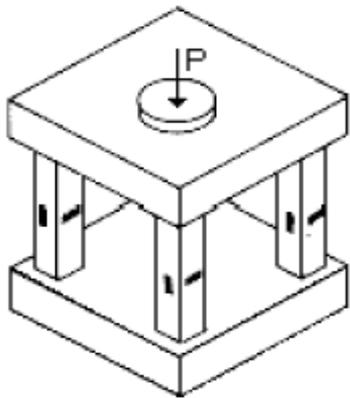
Elementos Mola



Principle of the column load cell.

Representative design for a column load cell.

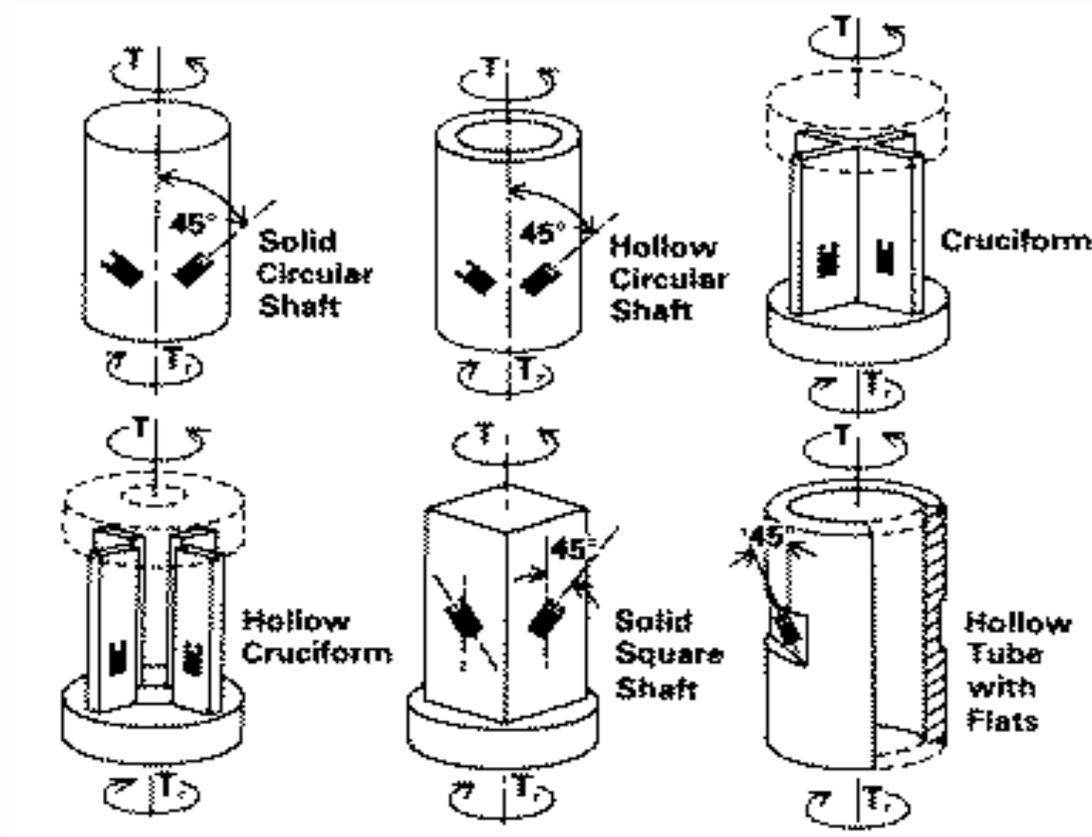
Hollow cylindrical load cell is less sensitive to bending moments



H-section column, with gages close to the load axis, has reduced sensitivity to bending moments..

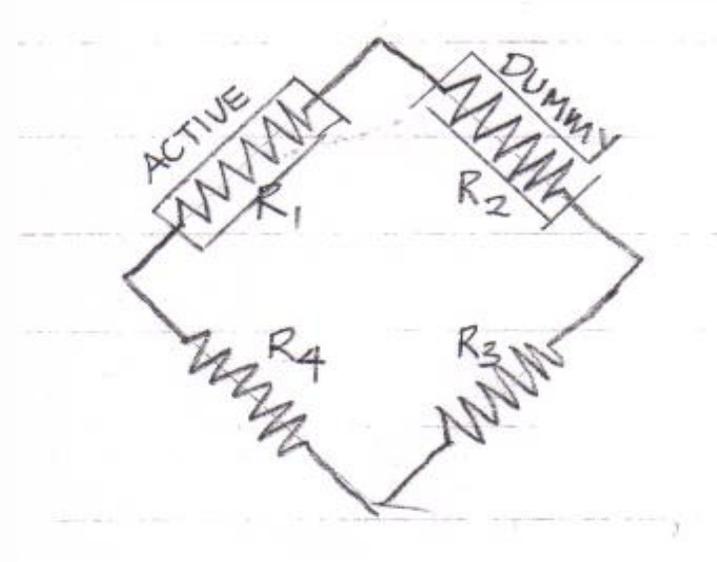


Elemento mola - Torque



Compensação dos efeitos da temperatura

- Pode-se obter uma compensação de temperatura utilizando-se adequadamente a ponte de Wheatstone.
- Por exemplo, se utilizarmos dois extensômetros como na figura: um deles é ativo e outro não acompanha a deformação, apenas varia sua resistência em função da temperatura.



$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_\varepsilon}{R_1} + \frac{\Delta R_T}{R_1}; \quad \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_T}{R_2}$$

$$\text{ie. } R_1 = R_2 = R$$

$$\text{então: } \Delta E = \frac{V}{4} \left(\frac{\Delta R_\varepsilon}{R} + \frac{\Delta R_T}{R} - \frac{\Delta R_T}{R} \right)$$

$$\therefore \Delta E = \frac{V}{4} \frac{\Delta R_\varepsilon}{R} = \frac{V}{4} S_\varepsilon \varepsilon$$

∴ Cancelam-se os efeitos de Temperatura

Compensação dos efeitos da temperatura

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E} \quad e \quad \mathcal{E}_2 = -\nu\mathcal{E}; \quad e$$

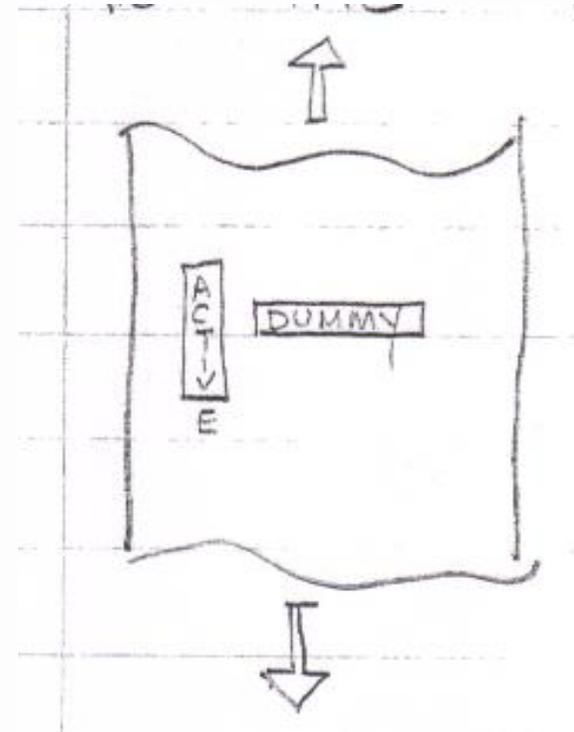
$$\Delta R_1 = \Delta R_{\mathcal{E}} \quad \Delta R_2 = -\nu\Delta R_{\mathcal{E}}; \quad \nu = \text{poisson}$$

mudança de temp ΔT

$$\Delta R_1 = \Delta R_T \quad R_2 = \Delta R_T$$

$$\Delta E = \frac{V}{4} \left(\frac{\Delta R_{\mathcal{E}}}{R} + \frac{\Delta R_T}{R} + \frac{\nu\Delta R_{\mathcal{E}}}{R} - \frac{\Delta R_T}{R} \right)$$

$$= \left(\frac{1+\nu}{4} \right) \frac{\Delta R_{\mathcal{E}}}{R} V = \left(\frac{1+\nu}{4} \right) S_g \mathcal{E} V$$



- Se Não for possível colar o extensômetro em uma posição isolada da tensão mecânica, pode-se colocar o mesmo na direção transversal.
- Nesse caso, o sensor sofre a deformação transversal.

Compensação dos efeitos da temperatura

- Os 4 braços da ponte são sensíveis a temperatura.
- s é o estímulo, R a resistência nominal e α sensibilidade, V_0 é tensão de offset devido a desbalanço inicial.
- B é o coeficiente de temperatura da sensibilidade TCS.
- Opção 1: Utilização de um sensor de temperatura como parte de uma rede de compensação.
- Considerando R_t a rede de compensação R_B a resistência equivalente da ponte

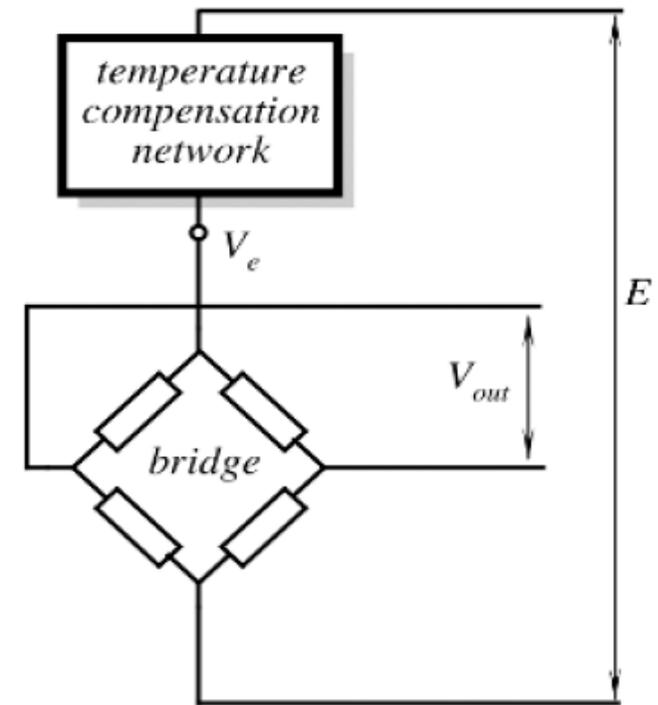
$$V_e = E \frac{R_B}{R_B + R_t}$$

$$R_i = R(1 \pm \alpha s) \quad \alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{ds}$$

$$V_{out} = V_e \alpha s + V_0 \quad [dV_0/dT = 0]$$

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial T} = s \left(\alpha \frac{\partial V_e}{\partial T} + \frac{\partial \alpha}{\partial T} V_e \right)$$

$$\frac{1}{V_e} \frac{\partial V_e}{\partial T} = - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial T} = -\beta$$



Compensação dos efeitos da temperatura

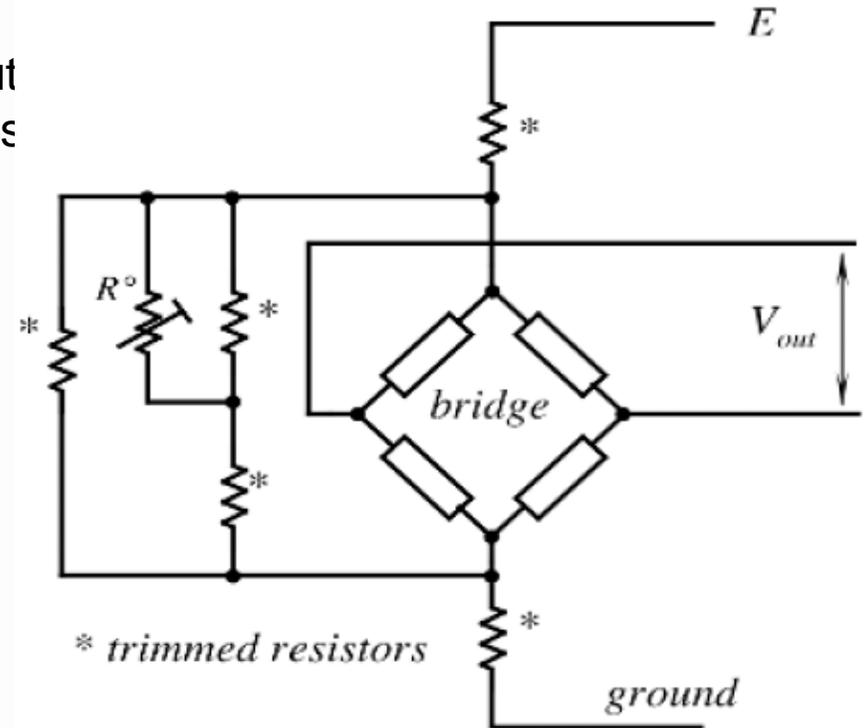
- TCS deve ser negativo.
- R_t deve incorporar um NTC.
- Faixa de -20 a 70°C.
- Na figura R° é um termistor.
- O Sensor de pressão Motorola PMX2010 ut
- Os demais resistores da rede são ajustados
- γ coeficiente de temperatura do braço TCR

$$\frac{\partial V_e}{\partial T} = E \left[\frac{1}{R_B + R_t} \frac{\partial R_B}{\partial T} - \frac{R_B}{(R_B + R_t)^2} \left(\frac{\partial R_B}{\partial T} + \frac{\partial R_t}{\partial T} \right) \right]$$

$$\frac{1}{V_e} \frac{\partial V_e}{\partial T} = \frac{1}{R_B} \frac{\partial R_B}{\partial T} - \frac{1}{R_B + R_t} \left(\frac{\partial R_B}{\partial T} + \frac{\partial R_t}{\partial T} \right)$$

$$R_B = R \quad (1/R)(\partial R/\partial T) = \gamma$$

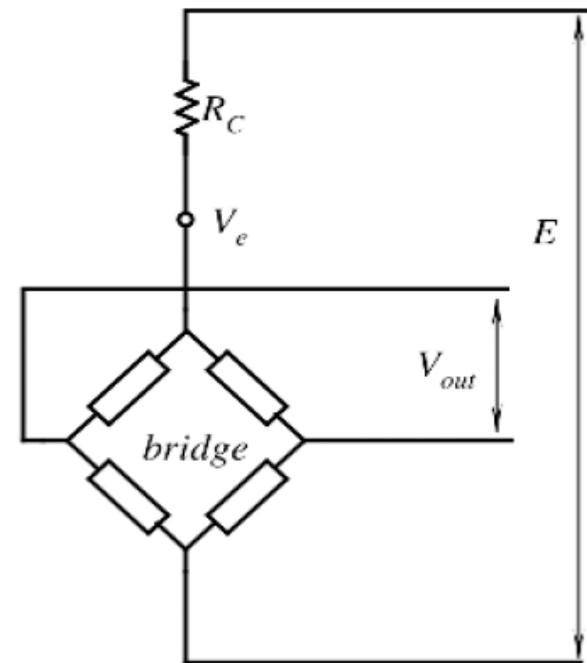
$$-\beta = \gamma - \frac{1}{R + R_t} \left(\frac{\partial R}{\partial T} + \frac{\partial R_t}{\partial T} \right)$$



Compensação dos efeitos da temperatura

- Opção 2: A compensação de temperatura é feita com um resistor fixo.
- É a compensação de temperatura mais popular.
- $R_t=R_c$ deve ter baixa sensibilidade a temperatura (abaixo de 50 ppm) e pode-se então desprezar sua contribuição.
- O $|\beta| < \gamma$ pois a equação é válida para um valor negativo do TCS
- Deve-se conhecer β , γ e R_c para utilizar esta opção.
- Faixa limitada a 25 ± 15 °C

$$\frac{1}{R_c} \frac{\partial R_c}{\partial T} = 0 \quad -\beta = \frac{\partial R}{\partial T} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + R_c} \right)$$

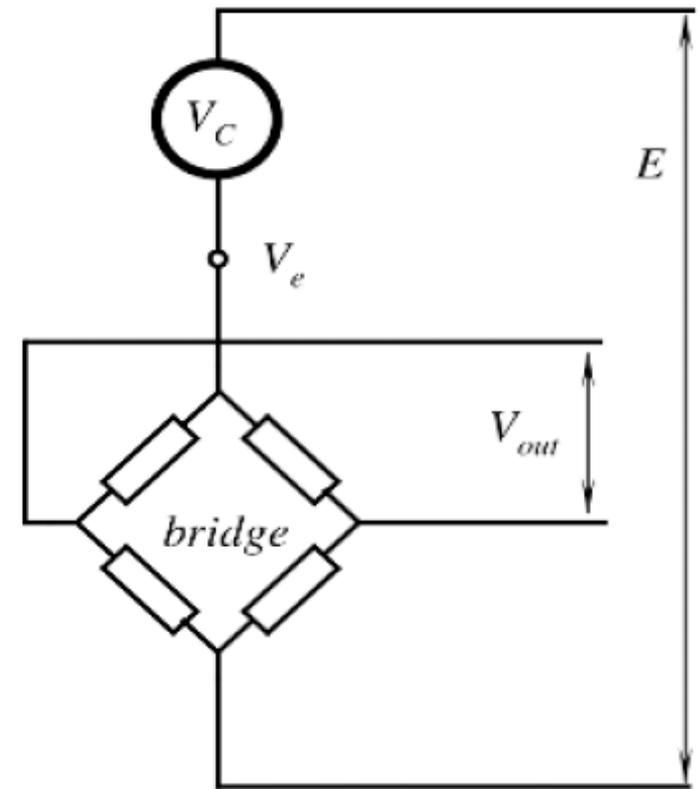


$$R_c = -\frac{\beta R}{\partial R / \partial T + \beta R}$$

$$R_c = -R \frac{\beta}{\gamma + \beta}$$

Compensação dos efeitos da temperatura

- Opção 3: A compensação de temperatura é feita com uma fonte de tensão com controle de temperatura (com um diodo ou um transistor).
- Vantagem: componentes fáceis de encontrar (diodo ou transistor).
- Este sensor deve operar em uma temperatura estabilizada.
- β_c é o coeficiente de temperatura da fonte.
- 25 ± 15 °C



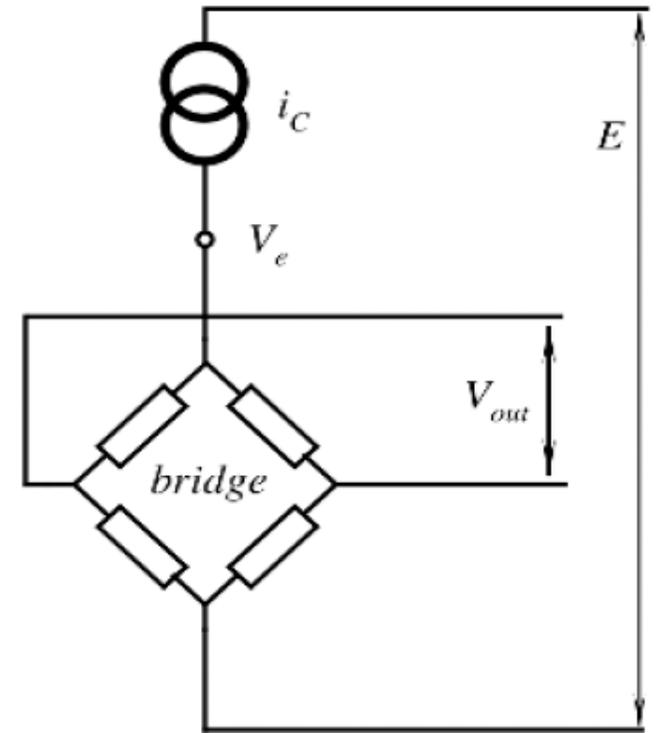
$$\beta_c = \beta \left(\frac{E}{V_c} - 1 \right)$$

Compensação dos efeitos da temperatura

- Opção 4: A compensação de temperatura é feita com uma fonte de corrente
- $\alpha = -\beta$ e $R_B = R$
- 1 a 2% do FE em 50 °C

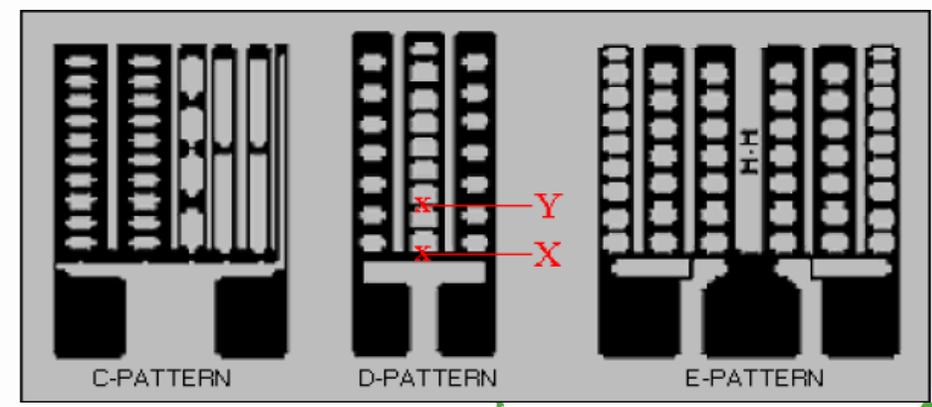
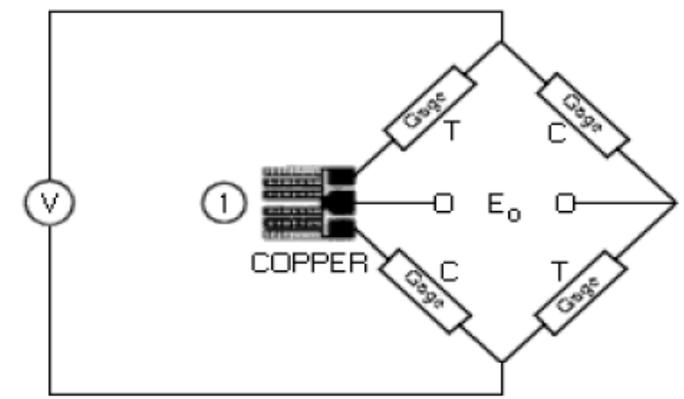
$$V_e = i_c R_B \quad \frac{\partial V_e}{\partial T} = I_c \frac{\partial R}{\partial T}$$

$$\frac{1}{V_c} \frac{\partial V_e}{\partial T} = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T}$$



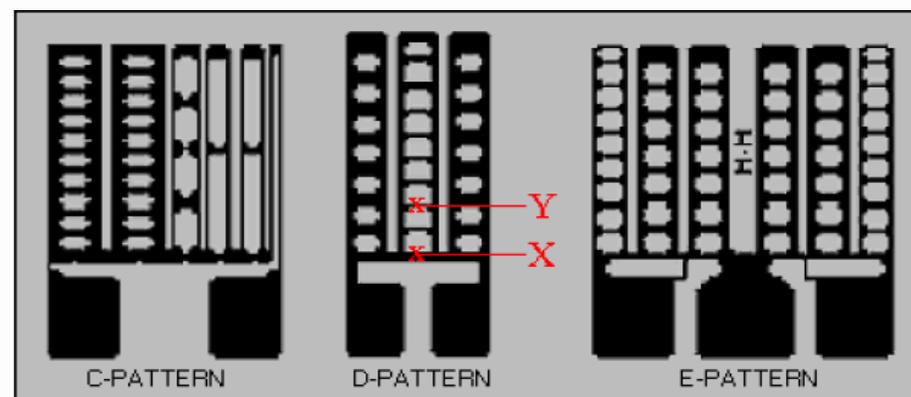
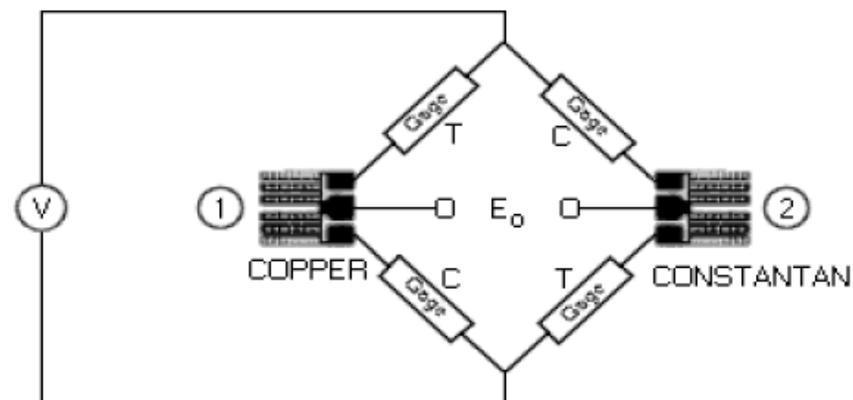
Compensação de temperatura: outra abordagem:

- Compensação do deslocamento de zero com a T: medir a saída da ponte para a variação de temperatura e compensar a mesma com um resistor metálico com CT conhecido. É comum a utilização de resistores de cobre que podem ser ajustados manualmente, cortando as trilhas (trimmed resistor.)



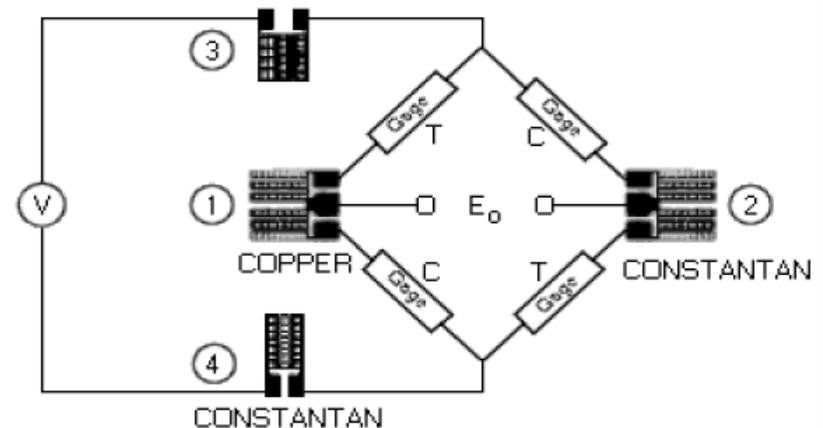
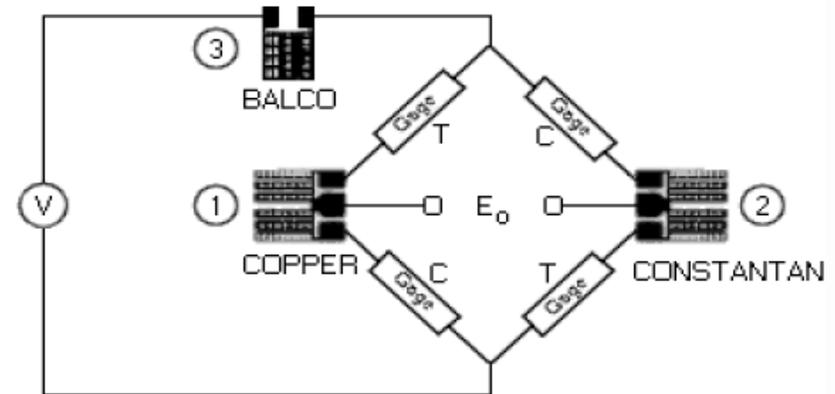
Compensação do zero sem carga, outra abordagem:

- A compensação do zero também pode ser feita utilizando resistores que podem ser ajustados manualmente. Entretanto, nesse caso o material deve possuir um baixo CT. Por exemplo, o Constantan é uma boa escolha.



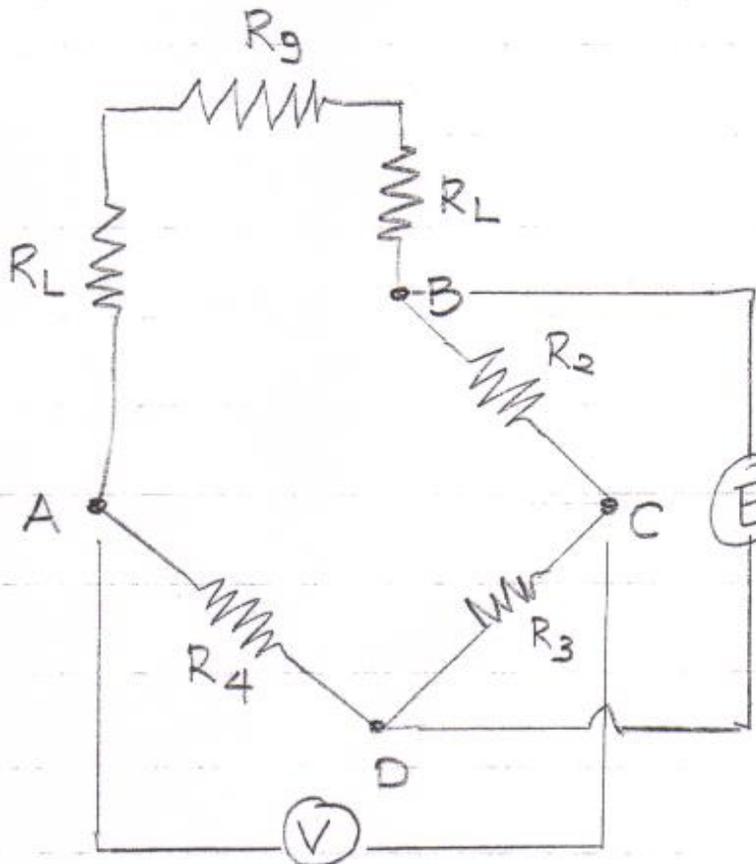
Compensação do deslocamento da faixa de trabalho com a temperatura:

- A inserção de um resistor com CT muito alto - BALCO (liga de Ni e Fe).
- Quando a temperatura aumenta, a tendência é que a saída em tensão da ponte também aumente.
- O resistor de BALCO, faz com que a queda na resistência equivalente da ponte seja compensada, uma vez que sua resistência aumenta com a T.
- O ajuste da variação de faixa ou span pode ser feito com um resistor com baixo CT. Por exemplo, constantan novamente.



Efeito dos cabos condutores para um extensômetro ativo sujeito a ϵ

- Considere a deformação em um extensômetro único, conectado ao restante da ponte dentro do instrumento.
- Onde R_L = resistência do cabo
- conexões: A,B,C,D estão dentro do instrumento.



$$\Delta E = \frac{V(R_g + 2R_L)R_2}{(R_g + 2R_L + R_2)^2} \left[\frac{\Delta R_g}{R_g + 2R_L} \right]$$

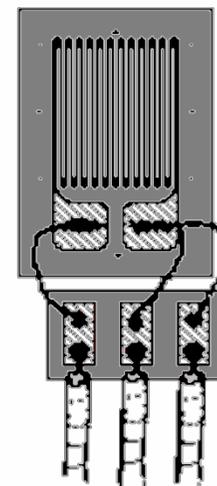
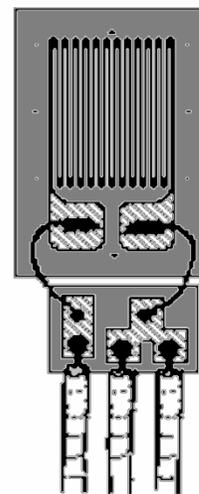
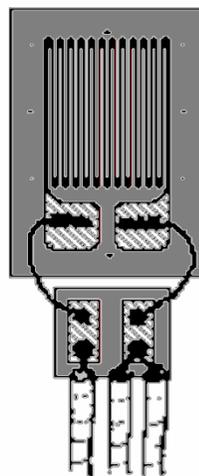
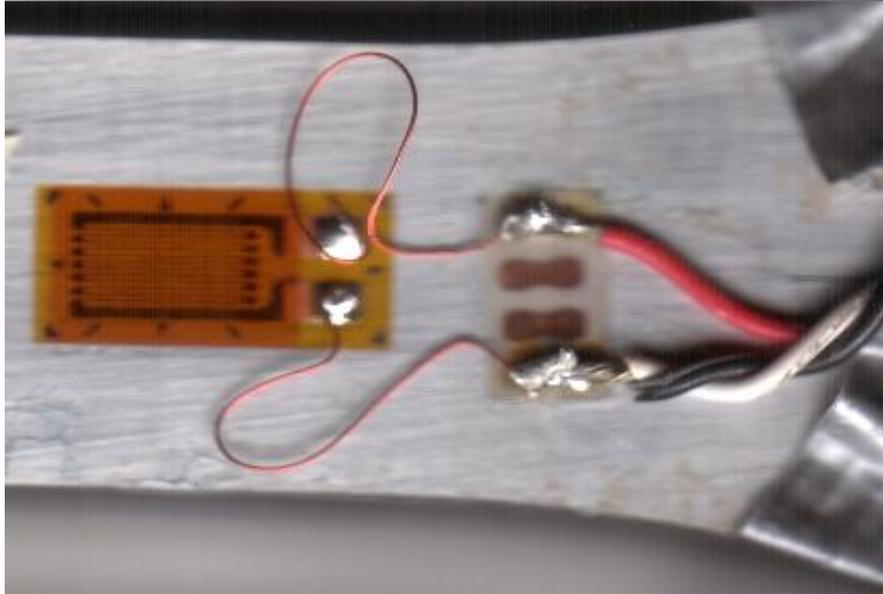
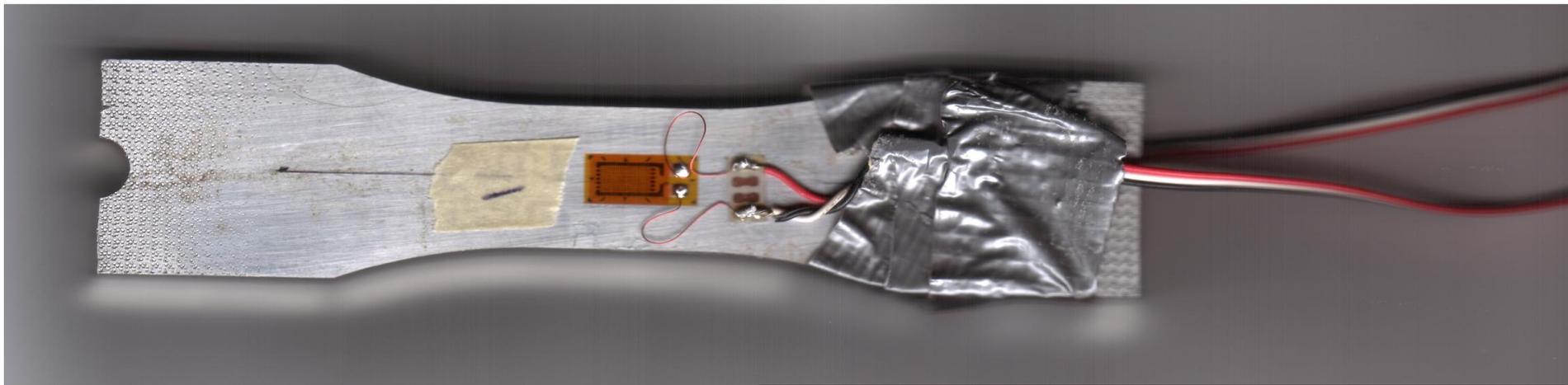
$$R_1 = (R_g + 2R_L)$$

$$\text{mas } \frac{\Delta R_g}{R_g} = S_g \epsilon$$

$$\Delta E = \frac{V(R_g + 2R_L)R_g R_2}{(R_g + 2R_L + R_2)^2 (R_g + 2R_L)} S_g \epsilon$$

$$= \frac{V R_g R_2}{(R_g + 2R_L + R_2)^2} S_g \epsilon \quad \text{mas se } R_T = R + R_L \Rightarrow \frac{V R_g R_2}{(R_T)^2} S_g \epsilon$$

1/2 Ponte na prática com ligação a 3 fios



Sistema a 3 fios

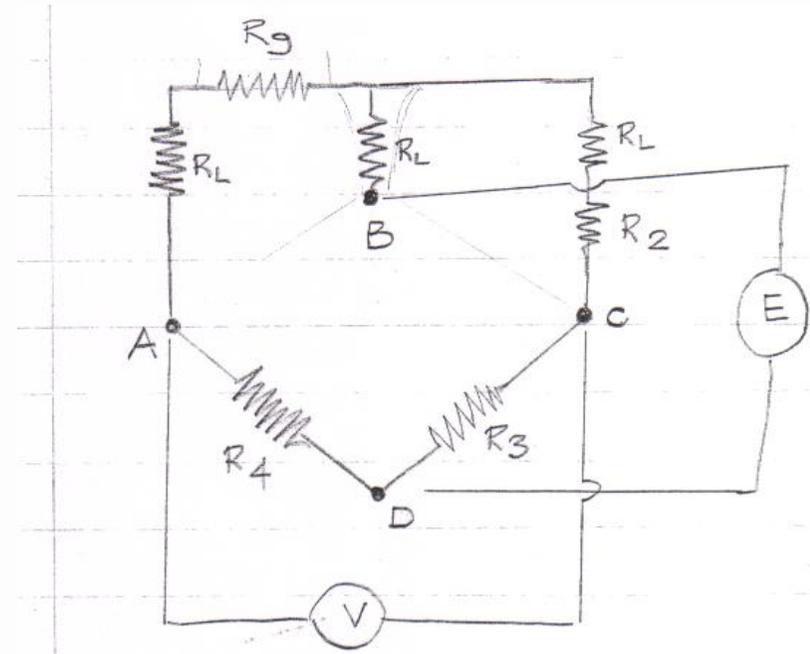
Anteriormente, se $R_L = 0$;
$$\Delta E = \frac{VR_g R_2}{(R_g + R_2)^2} S_g \epsilon$$

- A resistência dos cabos tende a reduzir a sensibilidades do extensômetros e produz uma deformação aparente.

Valores típicos para resistências de cabos de cobre ($\Omega/100$ ft)

Are:	Cabo	$R_L / 100'$ (Ω)
	12	0.159
	20	1.015
	30	10.31
	40	100 or more

Considere o mesmo exemplo com um sistema a 3 fios:



Sistema a 3 fios

$$\Delta E = \frac{V(R_g + R_L)(R_2 + R_L)}{(R_g + 2R_L + R_2)^2} \left[\frac{\Delta R_g}{R_g + R_L} \right]$$

$$\Delta E = \frac{V(R_2 + R_L)R_g}{(R_g + 2R_L + R_2)^2} \frac{\Delta R_g}{R_g}$$

$$= \frac{V(R_2 + R_L)R_g}{(R_g + 2R_L + R_2)^2} S_g \mathcal{E}$$

Se $R_2 = R_g$ e $R_T = R_g + R_L$, então

$$\Delta E = \frac{VR_T R_g}{(2R_T)^2} S_g \mathcal{E}$$

$$= \frac{VR_g}{4R_T} S_g \mathcal{E}$$

Para um sistema a dois fios teríamos:

$$\frac{VR_g}{4R_T} \left(\frac{R_2}{R_T} \right) S_g \mathcal{E}$$



Efeito dos cabos

- **Resumo:**

- Sem cabos:

$$\Delta E = \frac{V}{4} S_g \mathcal{E}$$

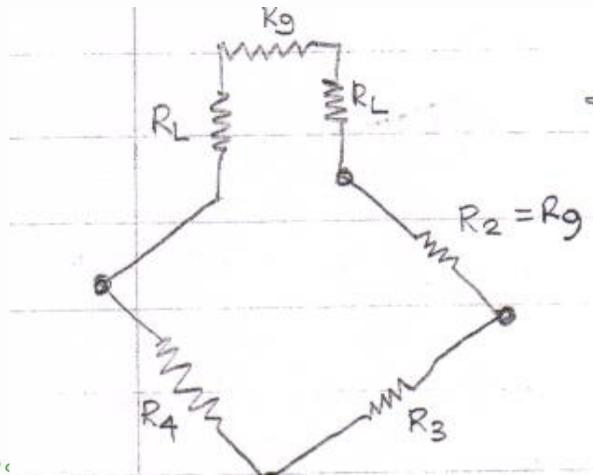
- 2 fios:

$$\frac{V}{4} \left(\frac{R_g}{R_T} \right)^2 S_g \mathcal{E}$$

- 3 fios:

$$\frac{V}{4} \left(\frac{R_g}{R_T} \right) S_g \mathcal{E}$$

- Cabos longos também têm um efeito com a temperatura. Considere novamente o sistema a 2 fios:



Se $R_3 = R_4 = R_g = R_2$

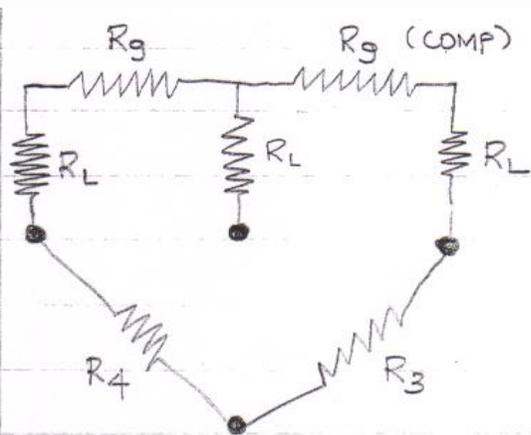
então
$$\Delta E = V \frac{(R_g + 2R_L) R_g}{(2R_g + 2R_L)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right)$$

Efeitos dos cabos

- Se a resistência do sensor R_g e as resistências dos cabos R_L mudam com a temperatura, então:

$$\Delta E = V \frac{(R_g + 2R_L) R_g}{(2R_g + 2R_L)^2} \left[\left(\frac{\Delta R_g}{R_g + 2R_L} \right)_\varepsilon + \left(\frac{\Delta R_g}{R_g + 2R_L} \right)_{\Delta T} + \left(\frac{2\Delta R_L}{R_g + 2R_L} \right)_{\Delta T} - \left(\frac{\Delta R_g}{R_g} \right)_{\Delta T} \right]$$

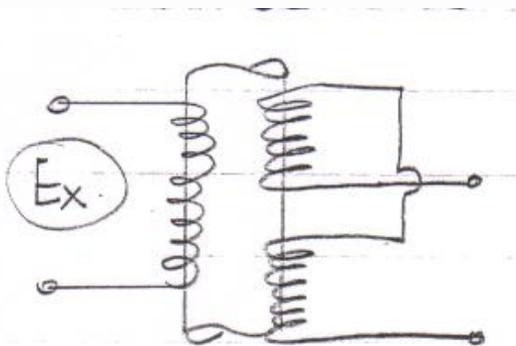
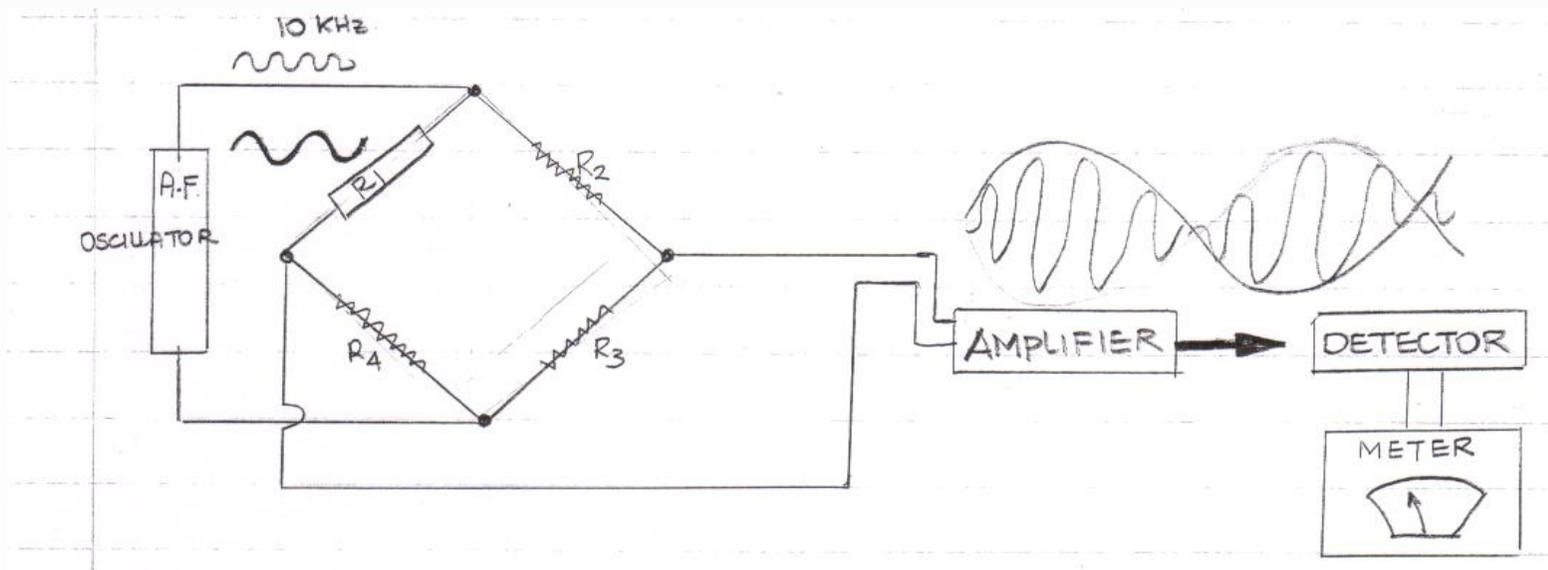
- Pode-se verificar que não existe a compensação de temperatura. Considere agora um sistema a 3 fios com compensação remota de temperatura:



$$\Delta E = V \frac{(R_g + R_L)^2}{(2R_g + 2R_L)^2} \left[\left(\frac{\Delta R_g}{R_L + R_g} \right)_\varepsilon + \left(\frac{\Delta R_g}{R_L + R_g} \right)_{\Delta T} + \left(\frac{\Delta R_L}{R_L + R_g} \right)_{\Delta T} - \left(\frac{\Delta R_g}{R_L + R_g} \right)_{\Delta T} - \left(\frac{\Delta R_L}{R_L + R_g} \right)_{\Delta T} \right]$$

$$= \frac{V}{4} \left(\frac{R_g}{R_T} \right) S_g \varepsilon$$

Ponte com excitação AC



- Regra: frequência de excitação: $< 1/10$ da portadora
- Vantagem: O extensômetro esquenta menos e a mesma excitação pode ser usada para um outro sensor como um LVDT.

Célula de carga do tipo coluna

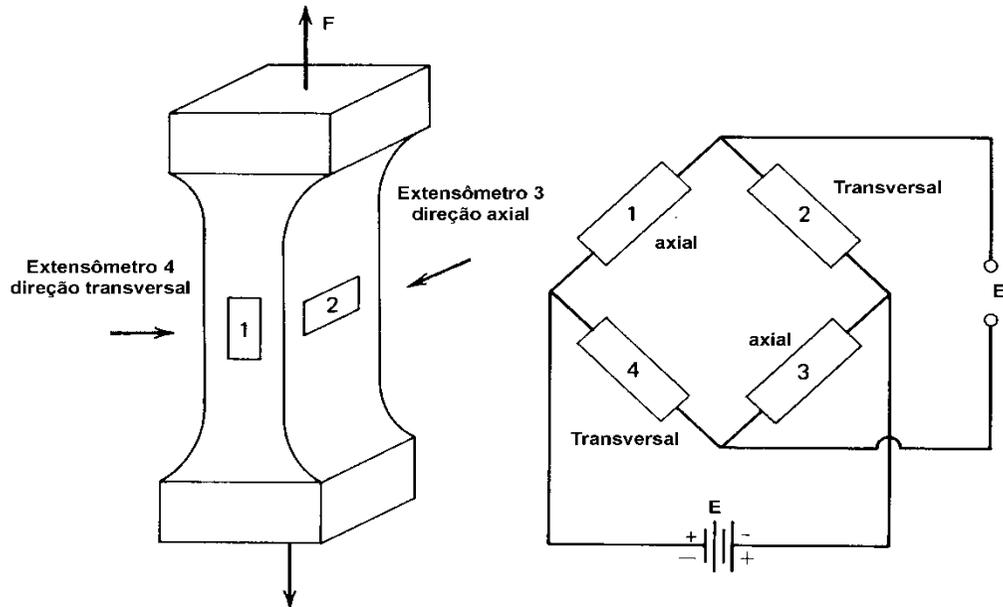
$$\varepsilon_a = \frac{F}{AE} \quad \varepsilon_t = -\frac{\gamma F}{AE}$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = K \varepsilon_a$$

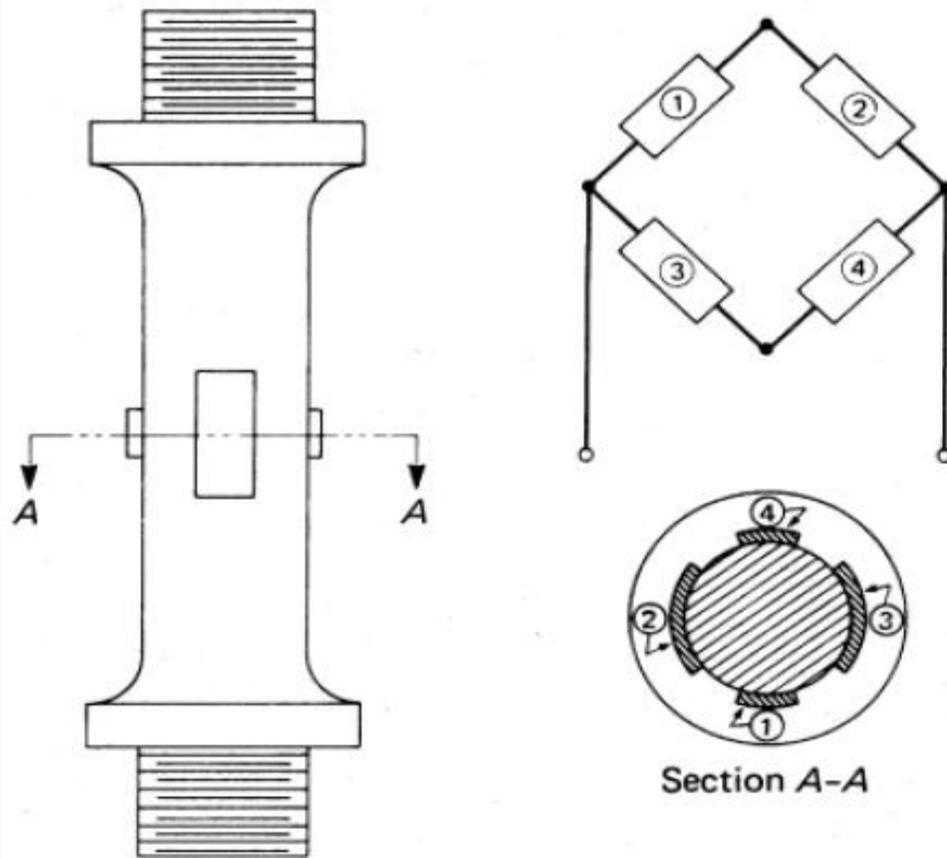
$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = -\gamma K \varepsilon_a$$

$$F = \frac{2AE}{K(1+\gamma)E_{Fonte}} E_0 = CE_0$$

$$\frac{E_0}{E_{Fonte}} = \frac{K(1+\gamma)}{2AE} F$$

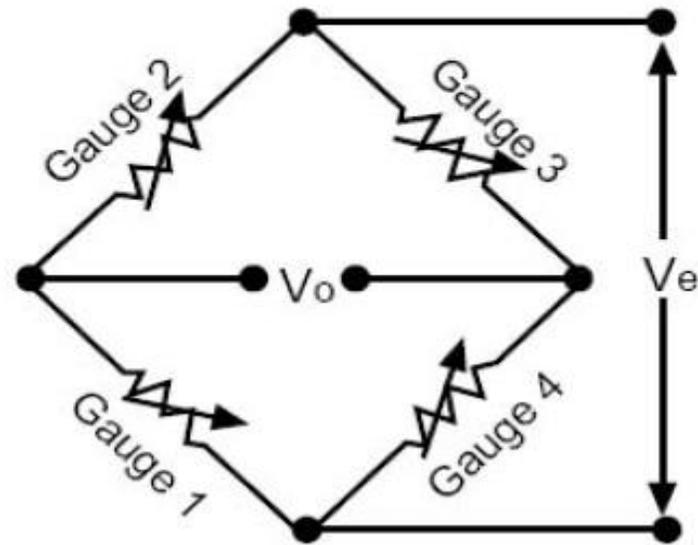
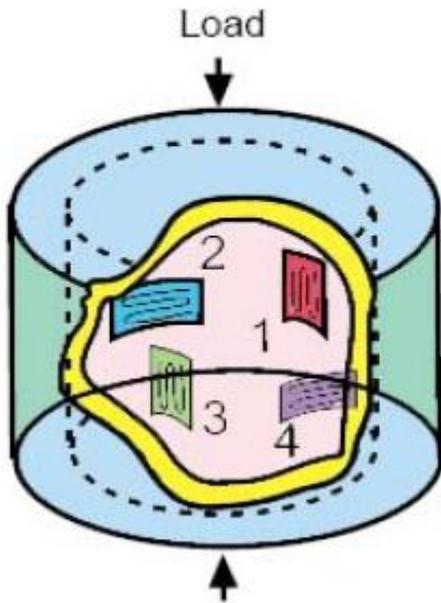


Célula de carga tipo coluna



Célula de carga para compressão

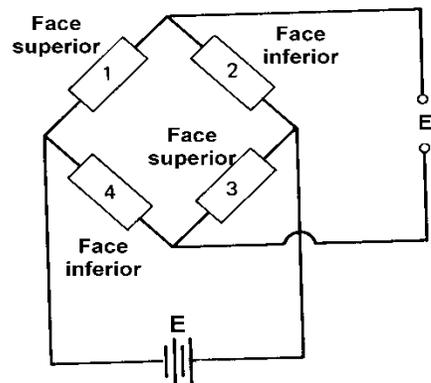
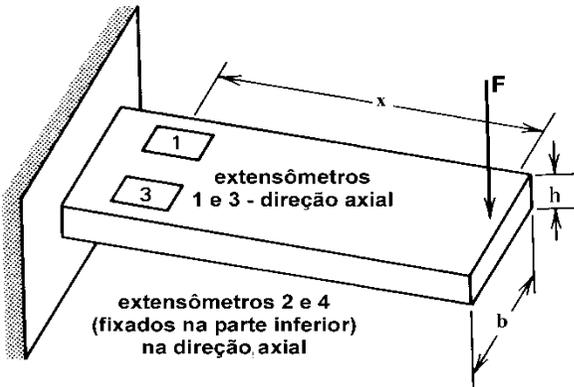
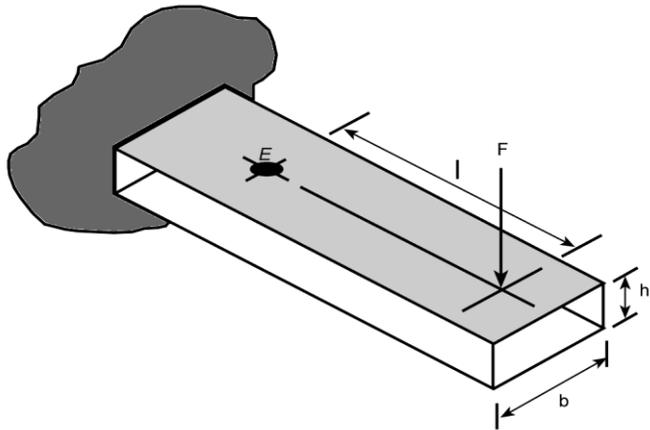
Compressive Load Transducer



Transdutor do tipo lâmina engastada

desprezando o efeito de Poisson, $\sigma_2 = -\nu\sigma_1$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} \quad \sigma = \frac{6l}{bh^2} F \quad \varepsilon_1 = \frac{6l}{bh^2 E} F$$

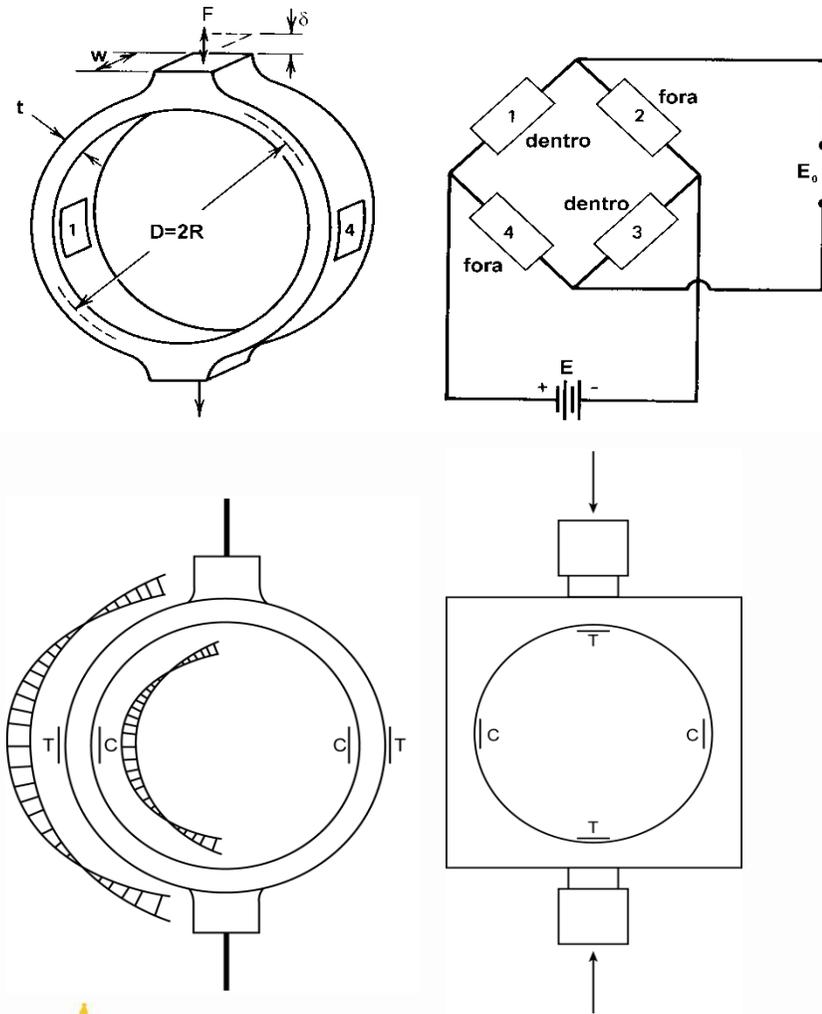


$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \frac{6l}{bh^2 E} F$$

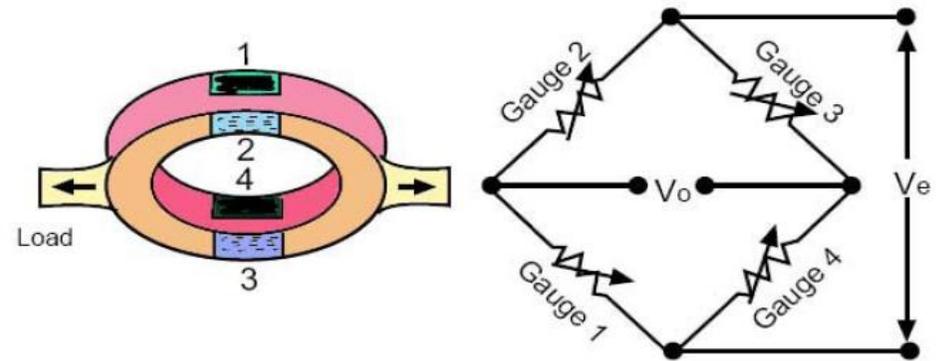
$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{6Kl}{Ebh^2} F$$

$$F = \frac{Ebh^2}{6KlE_{Fonte}} \quad \frac{E_0}{E_{Fonte}} = \frac{6Kl}{Ebh^2} F$$

Célula de carga do tipo Anel

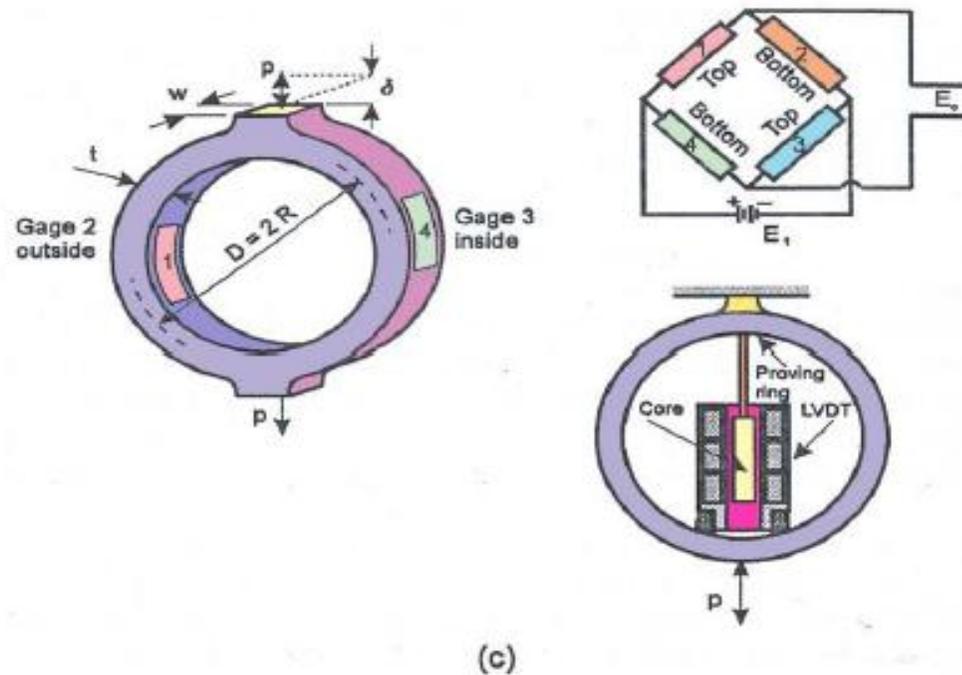


Tensile Load Transducer



Célula tipo anel

Ring-Type Load Cell

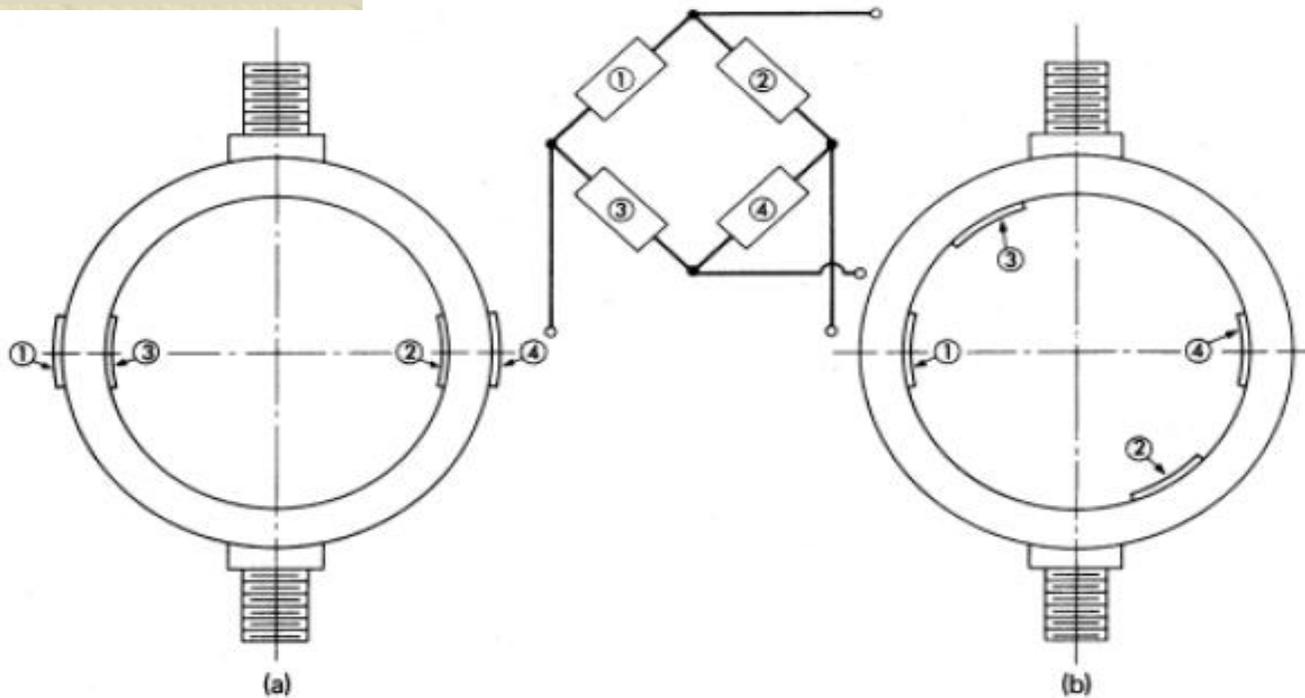


- Ring-type load cells: (a) elastic element with strain-gauge sensors; (b) gauge positions in the Wheatstone bridge; and (c) elastic element with an LVDT sensor

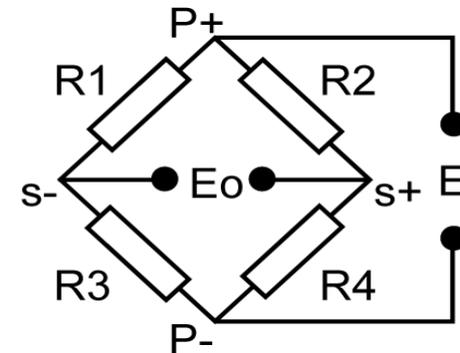
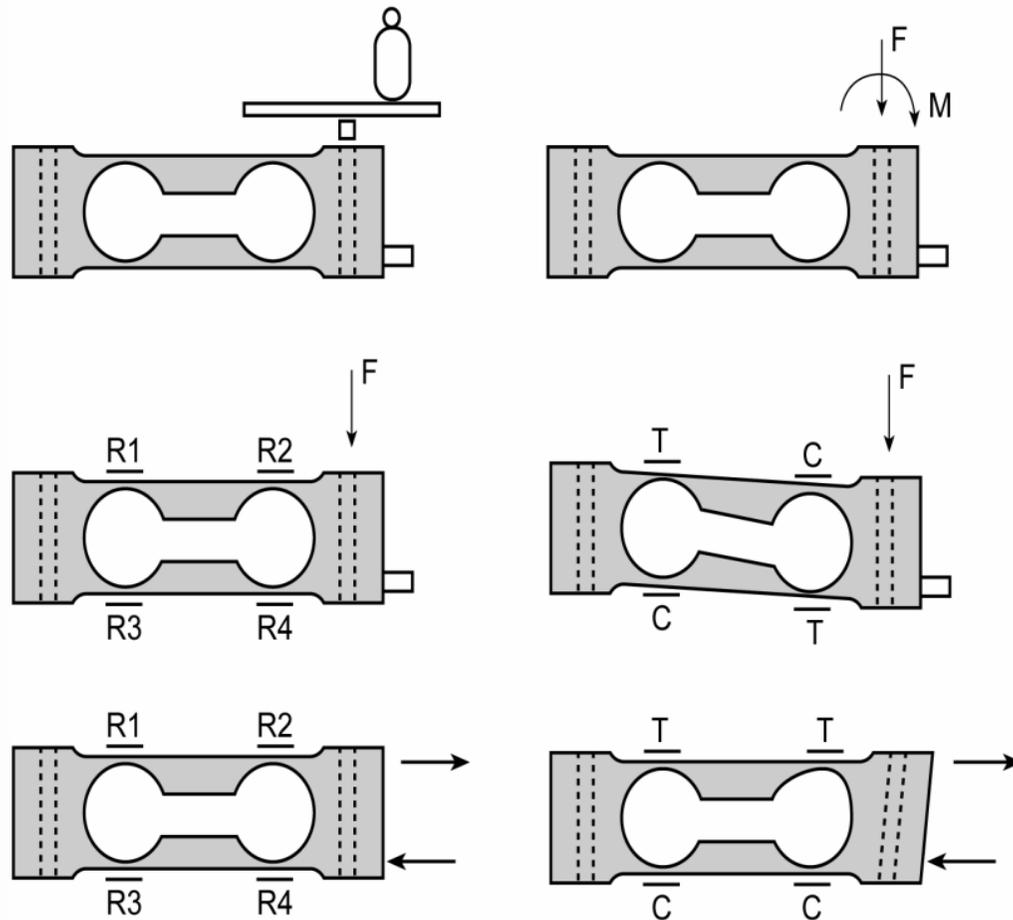
Célula tipo anel

(a) The bridge output is a function of the bending strains only, the axial components being canceled in the bridge arrangement

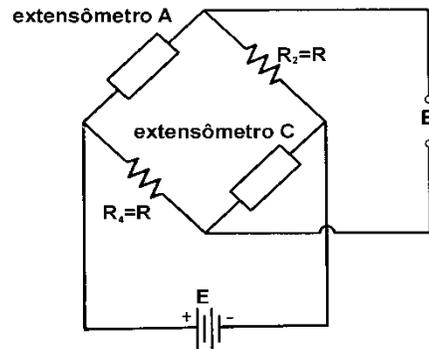
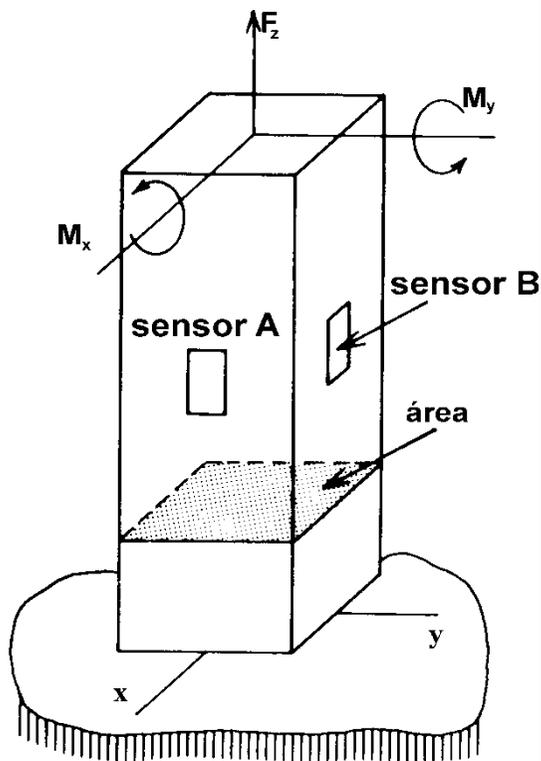
(b) Greater sensitivity may be obtained because the output includes both the bending and the axial components sensed by gages 1 and 4



Transdutor de força tipo vigas bi-engastadas

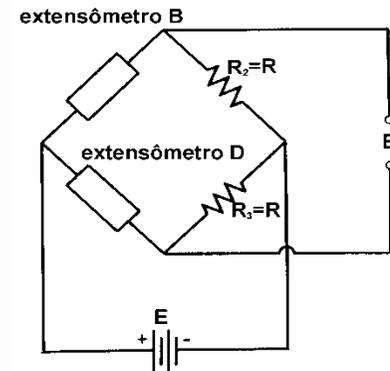


Medida de Força e Momento

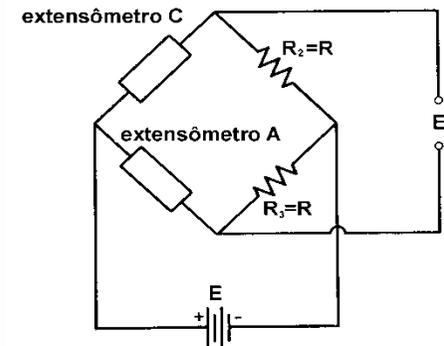


$$E_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) E_{Fonte}$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = K\varepsilon = \frac{6KM_x}{Eh^3}$$



$$E_0 = \frac{3KE_{Fonte}}{Eh^3} M_x$$

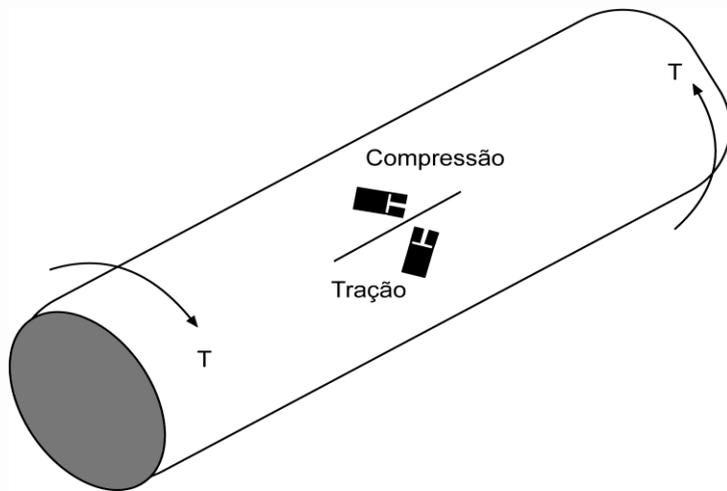
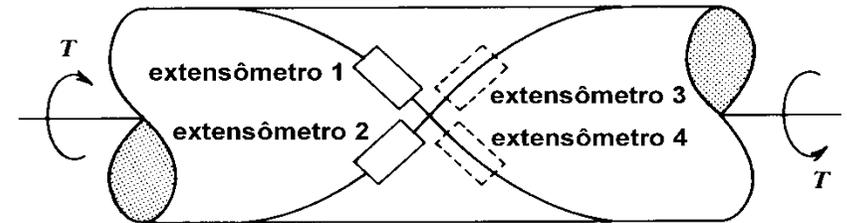


$$E_0 = \frac{3KE_{Fonte}}{Eh^3} M_y$$

Arranjos para medir momento ou força. (a) arranjo para medir força axial (b) Arranjo para medir momento e (c) Arranjo para medir momento

Transdutor de torque

- Tensão máxima a 45°



$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{xz} = \frac{16T}{\pi D^3} \quad \varepsilon_1 = \frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\gamma}{E} \right)$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\gamma}{E} \right)$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\gamma}{E} \right) K$$

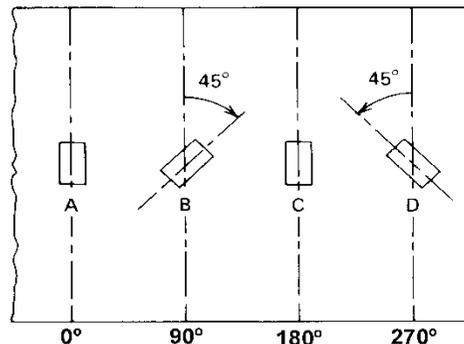
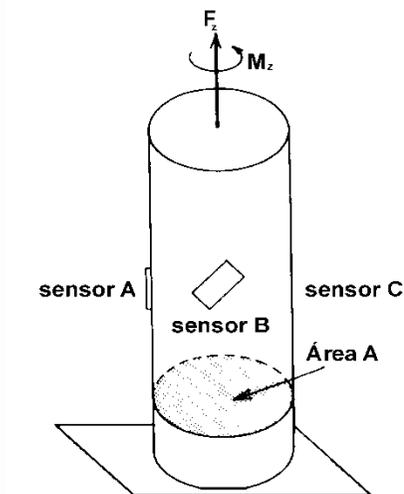
$$E_0 = \frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\gamma}{E} \right) K E_{Fonte}$$

$$T = \frac{\pi D^3 E}{16K(1+\gamma) E_{Fonte}} E_0 = C E_0$$

Torque e força axial

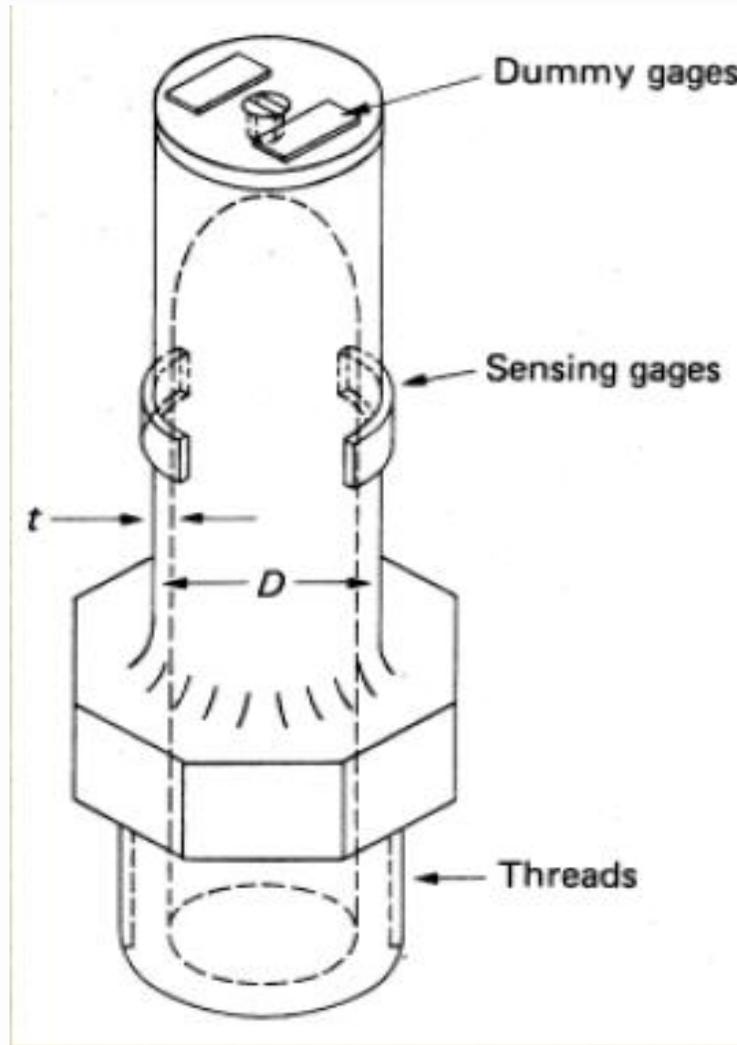
- Força axial: $E_0 = \frac{KV_{Fonte}}{2AE} E_z$

■ Torque: $\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = K\varepsilon = \frac{16(1+\gamma)KM_z}{\pi D^3 E}$

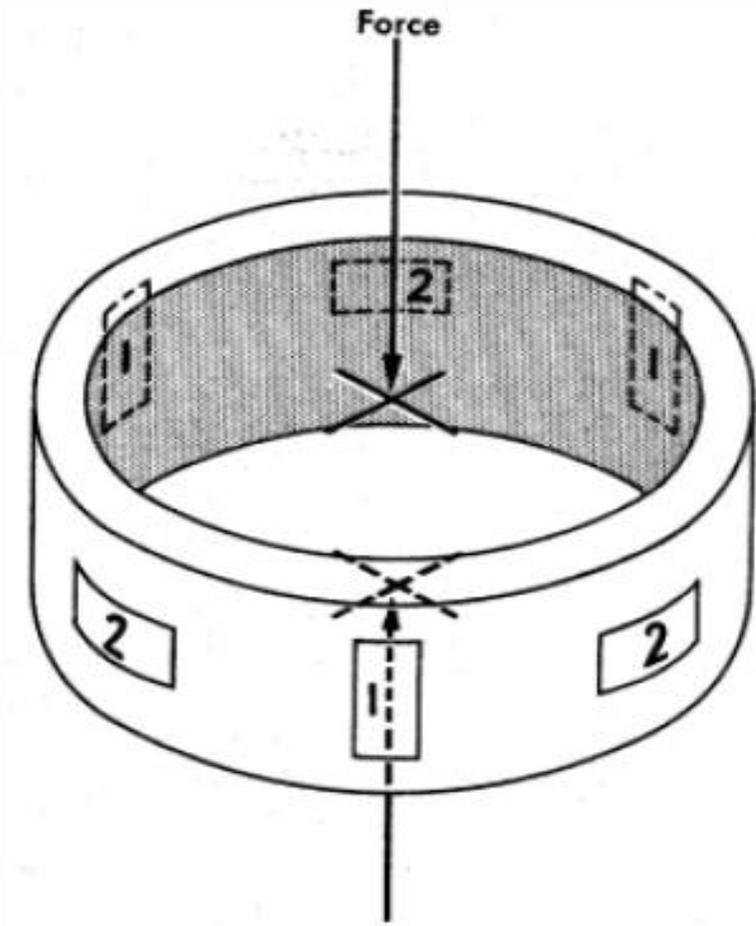


$$E_0 = \left[\frac{8(1+\gamma)KE_{Fonte}}{\pi D^3 E} \right] M_z$$

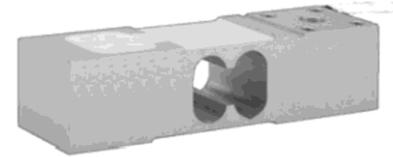
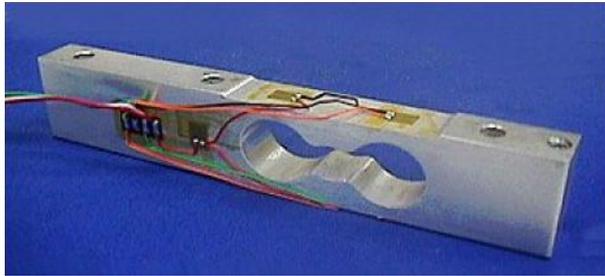
Transdutor de pressão



Extensômetros em série (3 axiais e 3 poisson)



Exemplos



Exemplos

- **Torquímetros**
 - Alguns Tipos



Transdutores Extensométricos

- Calibração - Força / Torque



Transdutores Extensométricos

■ Calibração - Força / Torque



Capacidade
5 kN
incerteza: 0,002%



Capacidade
4,448 MN
incerteza: 0,0005 %

Capacidade
600 kN
incerteza: 0,002%

Transdutores Extensométricos

■ Calibração - Força / Torque

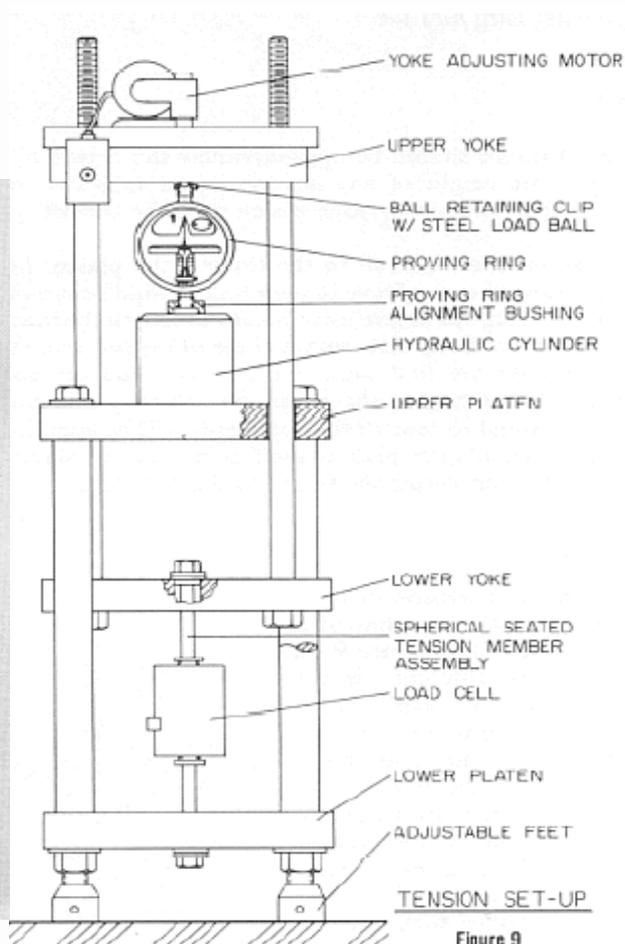
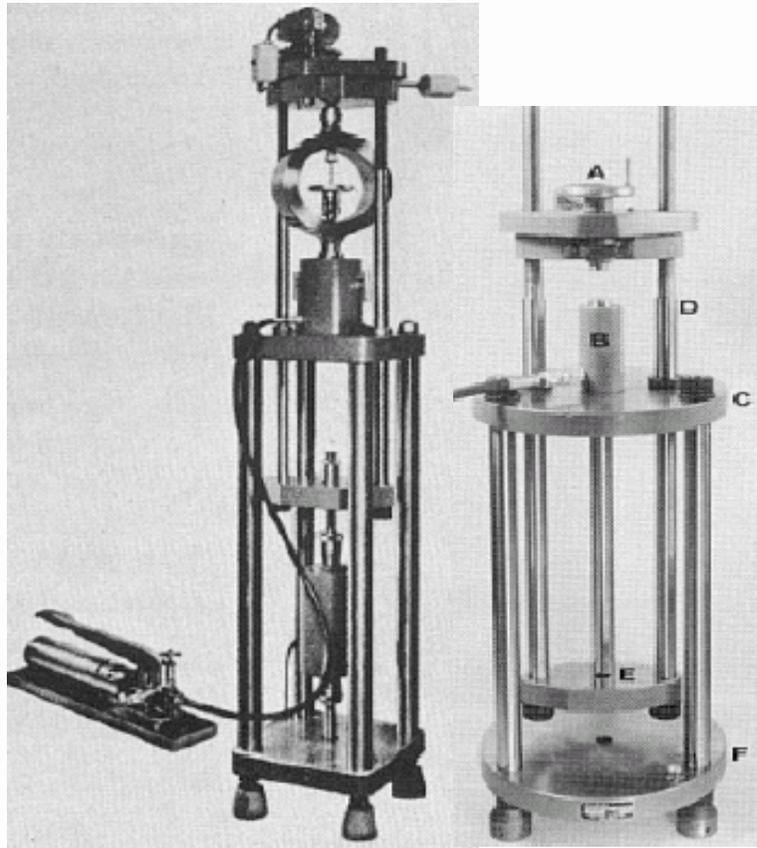
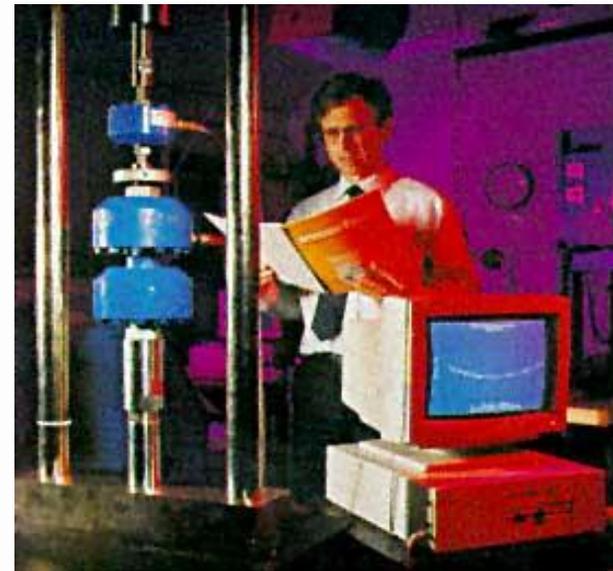


Figure 9

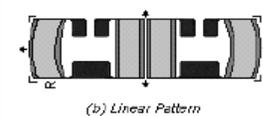
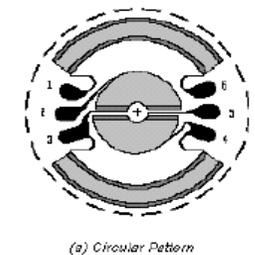
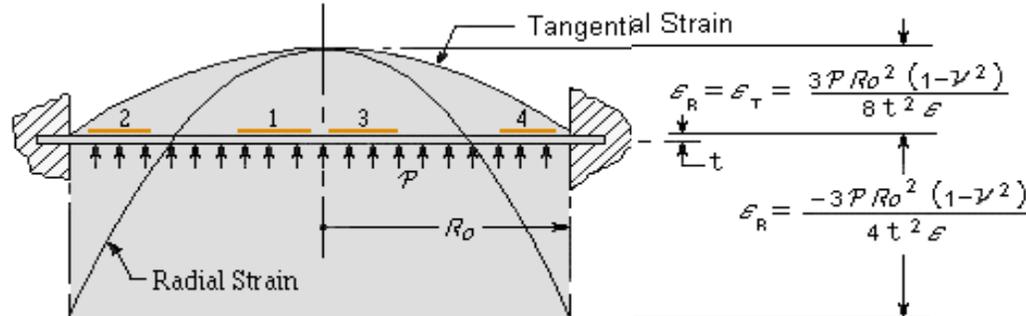
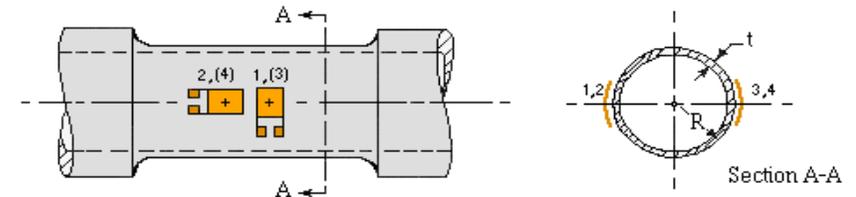
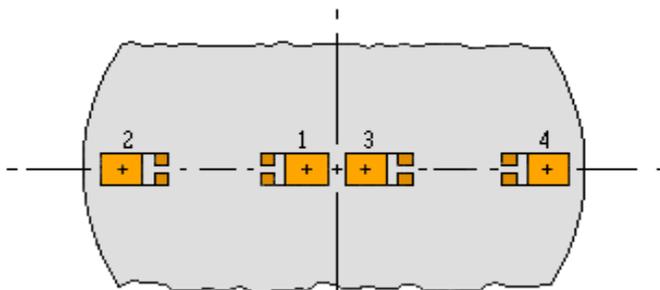
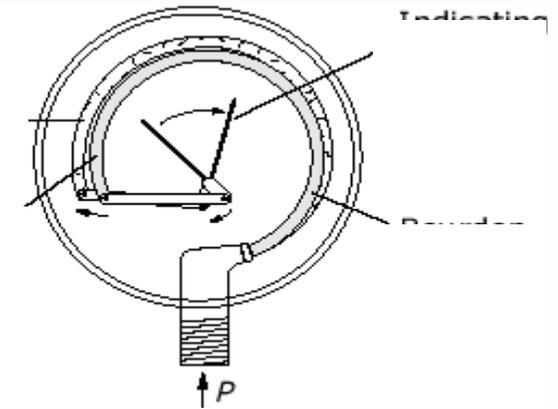


Transdutores Extensométricos

■ Aplicações

■ Transdutor de Pressão

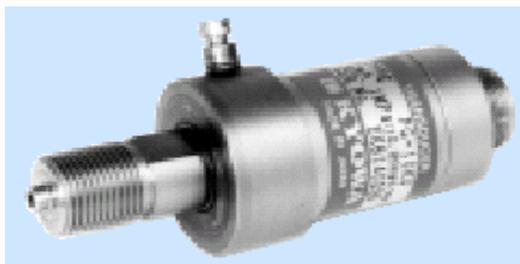
- Tubo de Bourdon
- Deformação de Membrana fixa



Transdutores Extensométricos

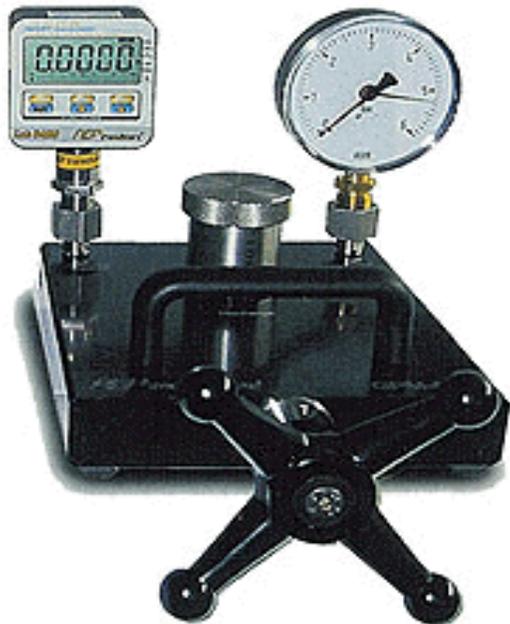
■ Transdutor de Pressão

□ Alguns Tipos



Transdutores Extensométricos

- Calibração - Pressão
 - Exemplo



Transdutores Extensométricos

- Calibração - Pressão
 - Exemplo



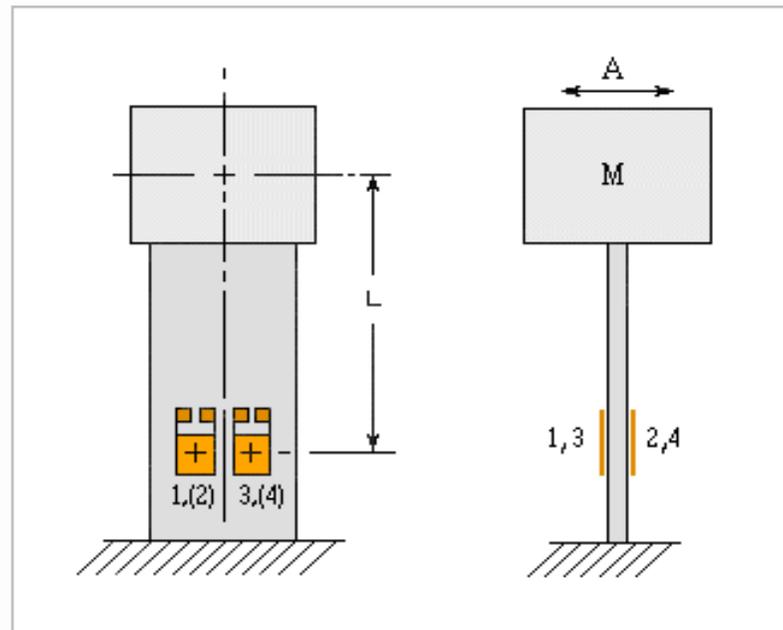
Transdutores Extensométricos

- Aplicações

- **Transdutor de Aceleração**

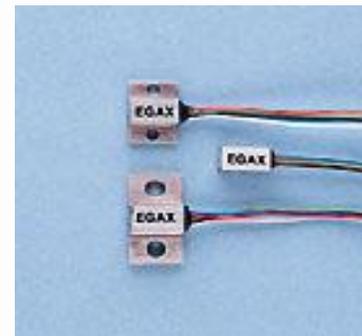
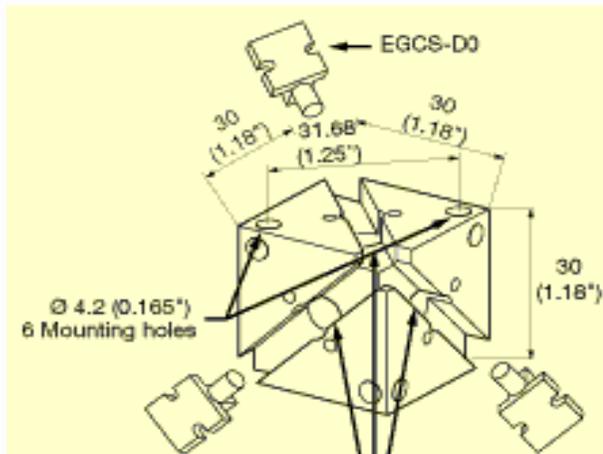
- Princípio de Funcionamento

- Mede-se a força exercida sobre uma massa quando acelerada



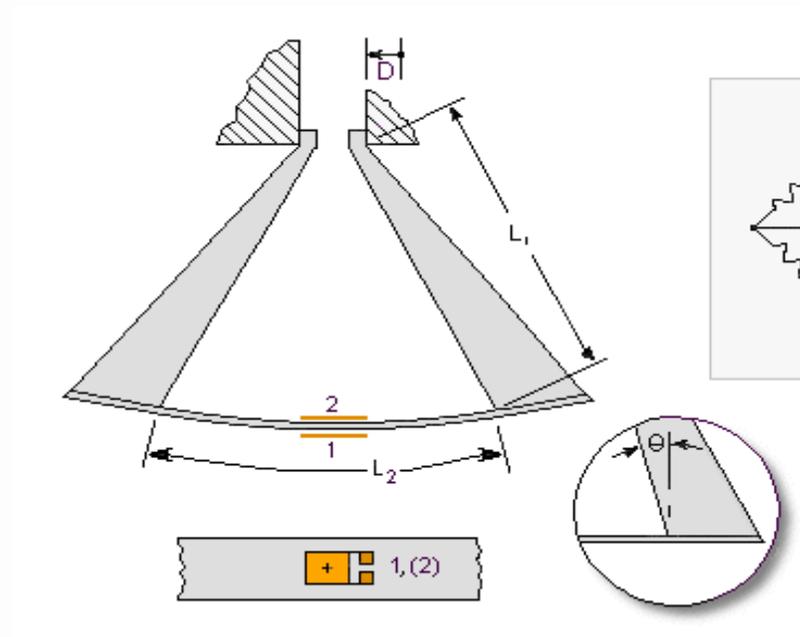
Transdutores Extensométricos

- **Transdutor de Aceleração**
 - Alguns Tipos



Transdutores Extensométricos

- Aplicações
 - **Transdutor de Distância**
 - Via força exercida sobre uma lâmina



Transdutores Extensométricos

- **Transdutor de Distância**
 - Alguns Tipos

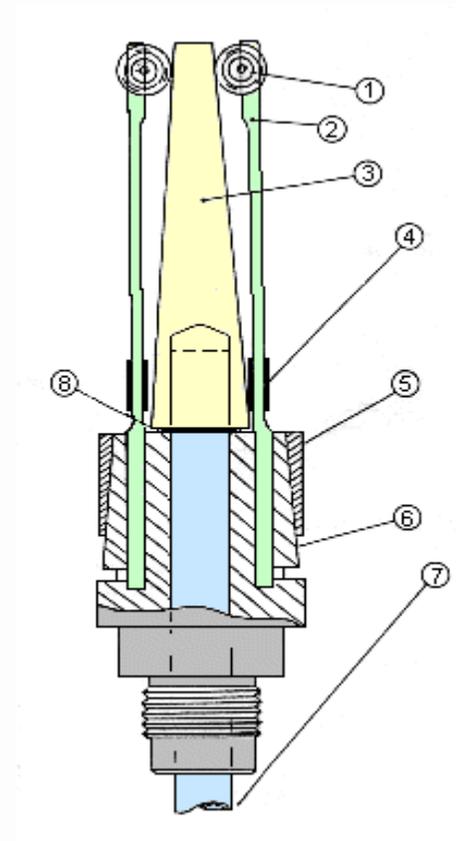


Curso de 6 mm



Transdutores Extensométricos

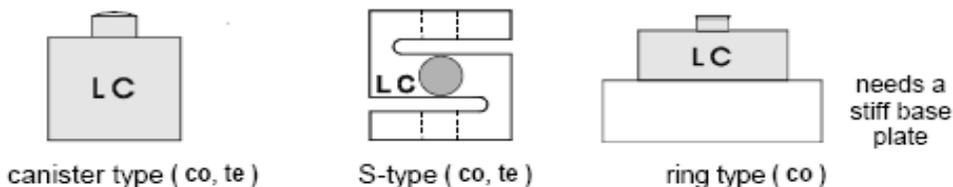
- **Transdutor de Distância**
 - Exemplo - Detalhe Construtivo



Boas práticas de acomodação e transmissão de força

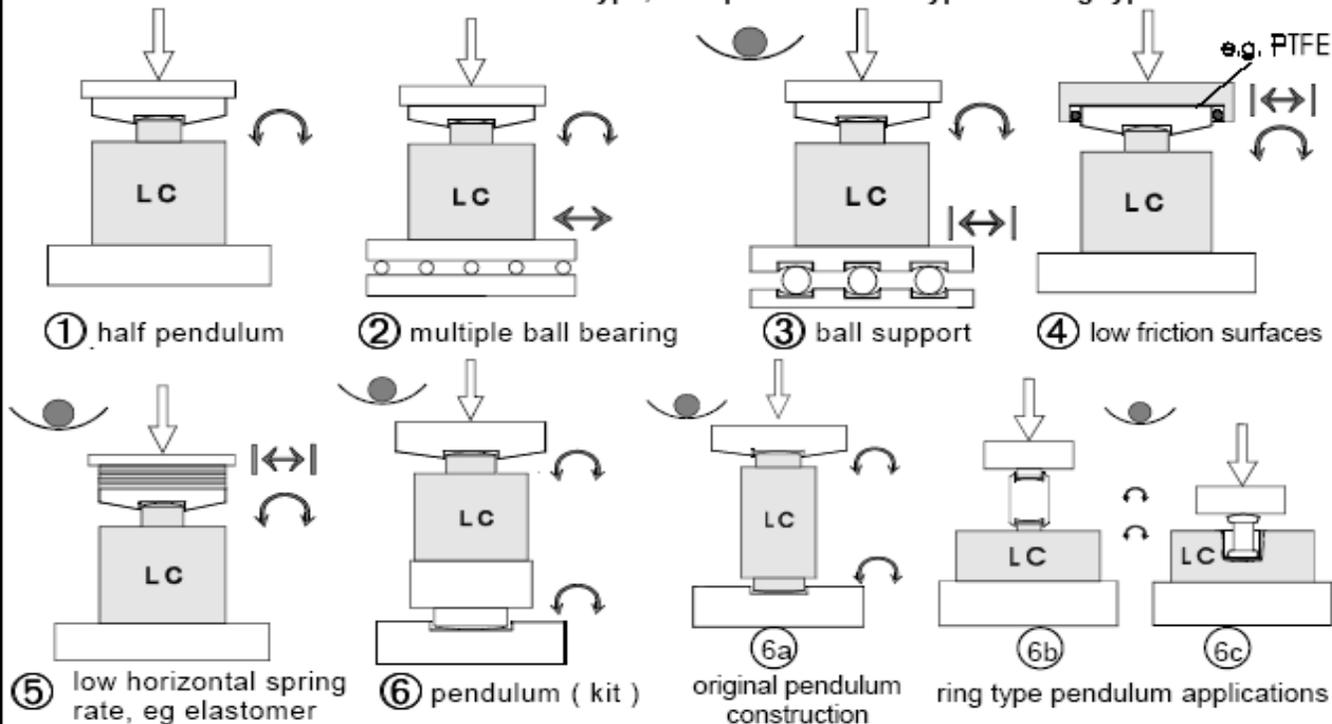
Load cell construction and load transmission device

Basic construction principles for compression or tension

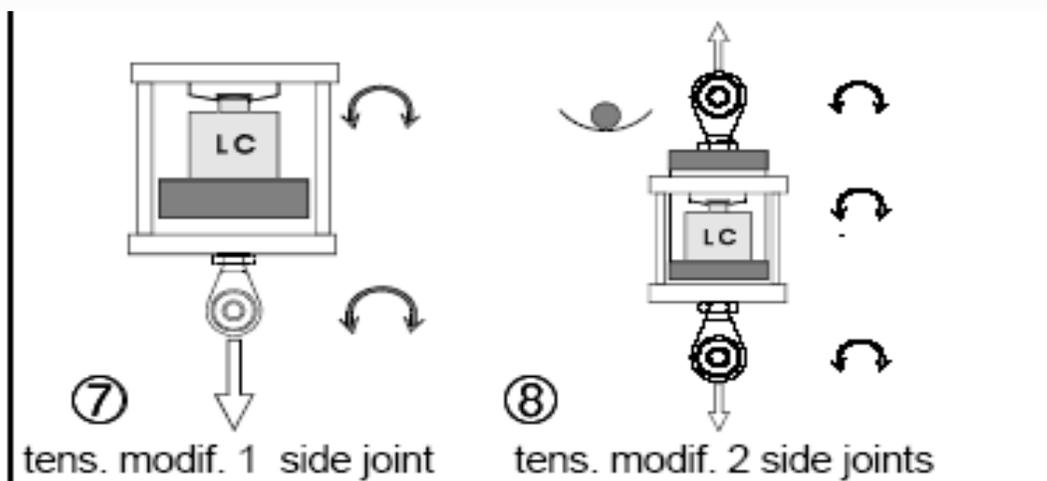


Compression LC

load transmissions shown for canister type, also possible for S-type and ring type

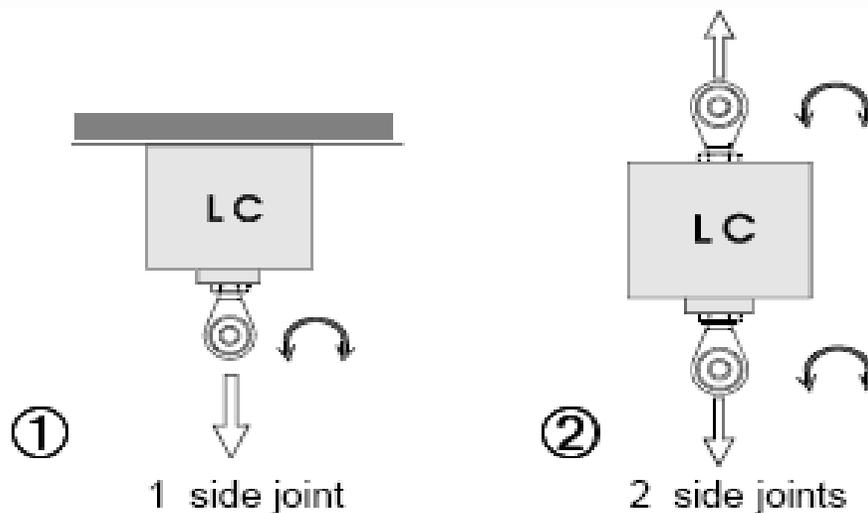


Boas práticas de acomodação e transmissão de força



Tension LC

shown for canister type, also suitable for S-type



further elements for all tension constructions for joints:

hook,
rope wire,
flexure strips

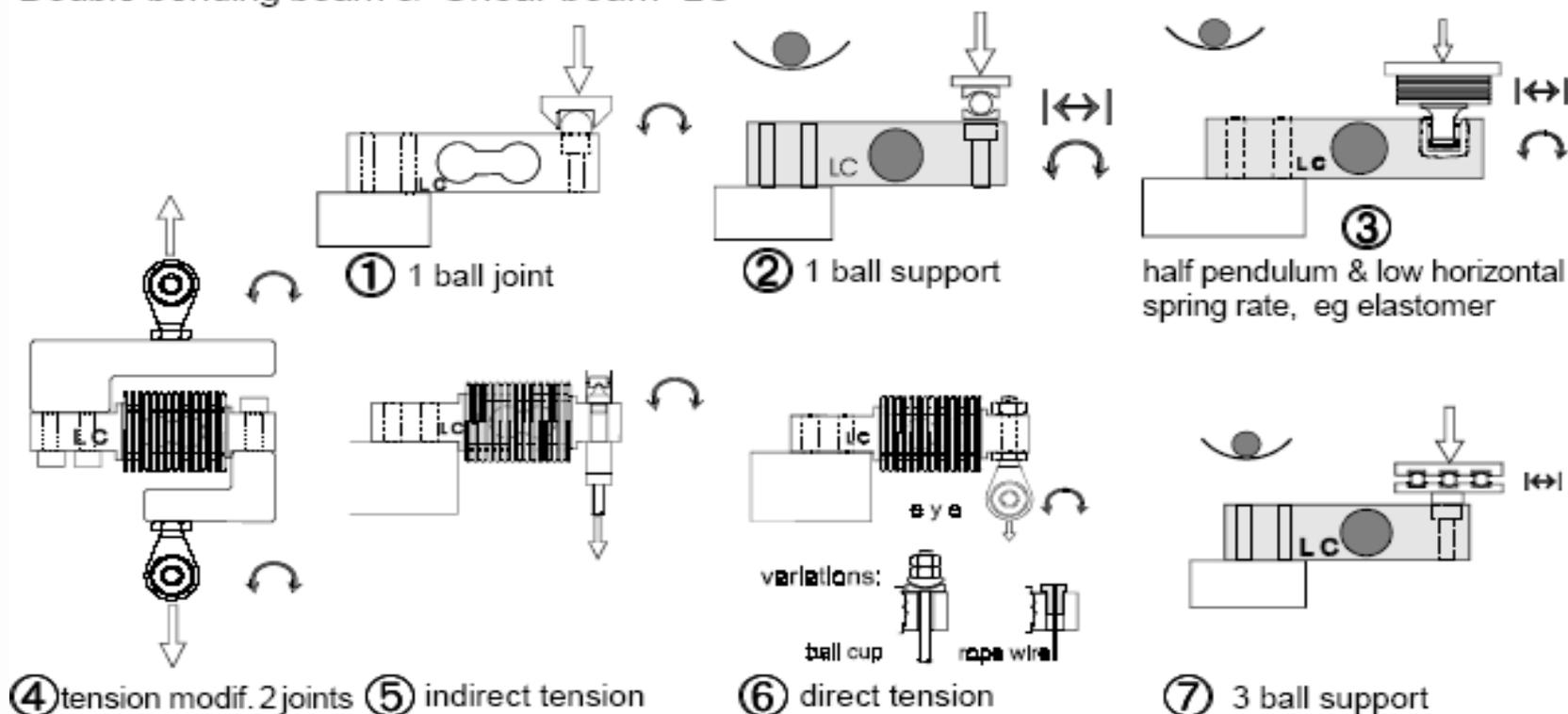
Boas práticas de acomodação e transmissão de força

Load cell construction and load transmission device

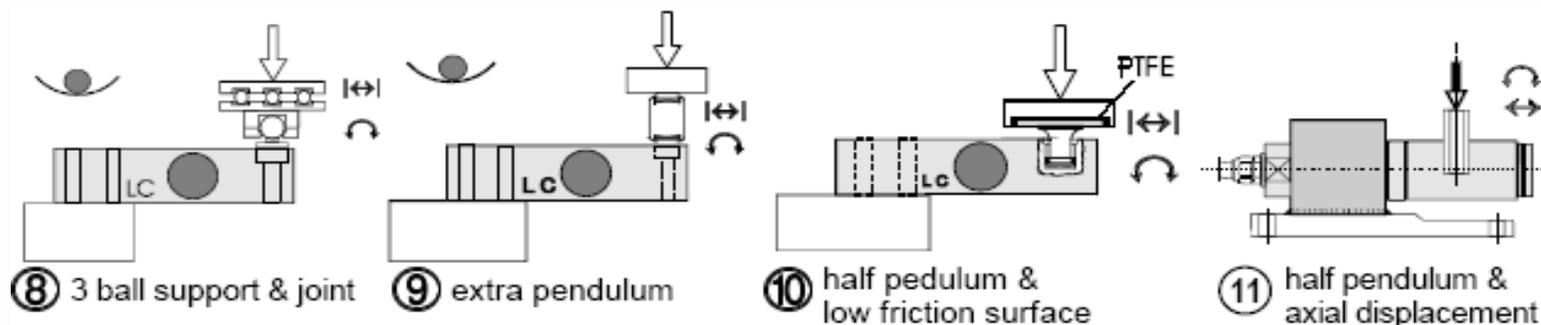
The load transmission device is independent of the encapsulation, potting or housing and the mounting at the fixed end shown below

Beam LC - Cantilever beam

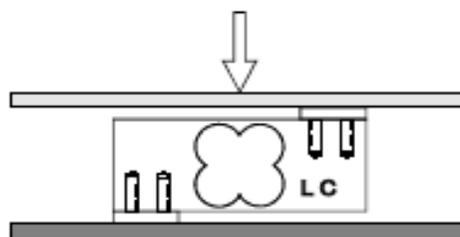
Double bending beam & Shear beam LC



Boas práticas de acomodação e transmissão de força



Single point LC

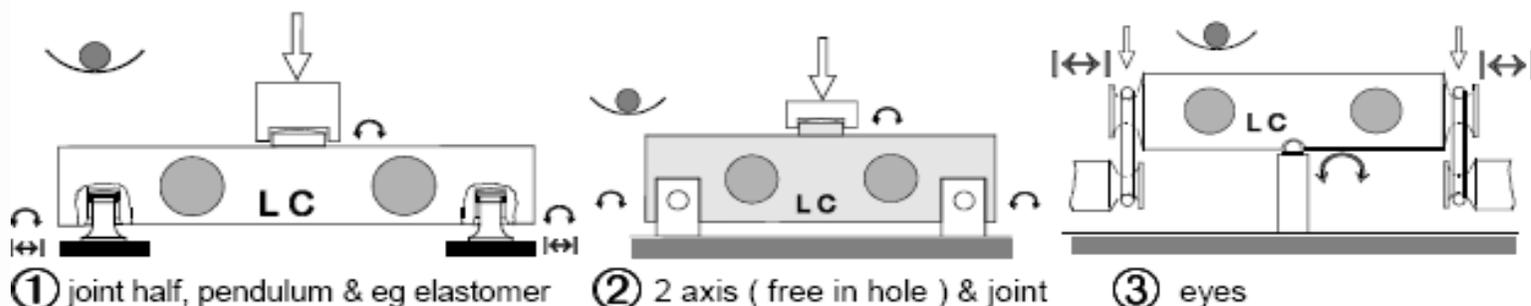


The single point LC has no degree of freedom for horizontal displacement or inclination, using more than one LC in a load receptor discoupling elements are necessary.

The load transmissions 1 to 10 for the beam LCs may be applied.

Max. platform dimensions may be mentioned in the TC or the TAC.

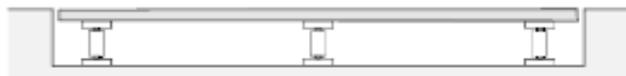
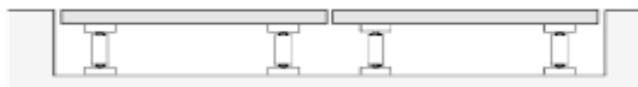
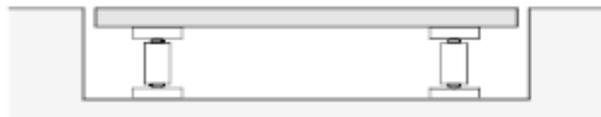
Double ended beam LC



Constructions with fixed clamping at the two ends need for minimum displacement and inclination some elasticity of the supporting construction.

Boas práticas de acomodação e transmissão de força

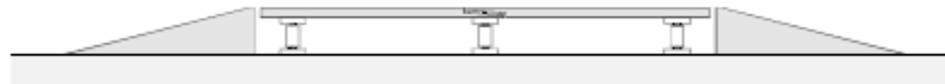
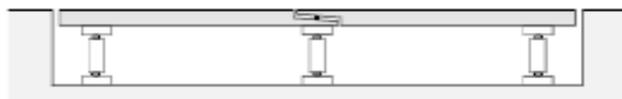
in floor



over floor



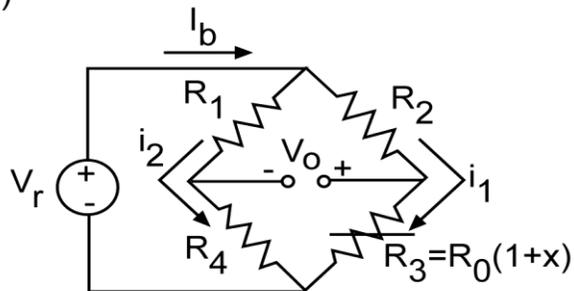
double platform with joint



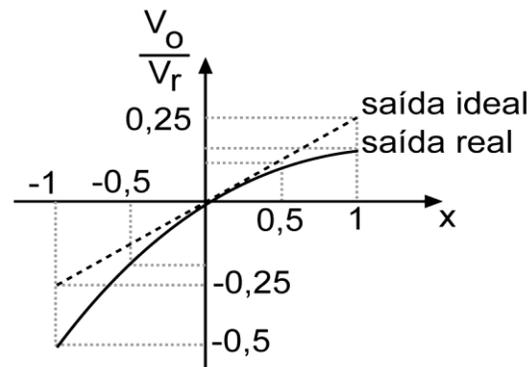
Condicionamento analógico

- Circuitos para linearização analógica (com um sensor apenas a saída não é linear)
- Para obter uma tensão proporcional a qualquer mudança em uma das resistências da Ponte de Wheatstone, pode-se aplicar uma corrente constante.
- Forçando uma corrente constante em (a) uma ponte resistiva com 5 terminais e (b) uma ponte comum com 4 terminais.

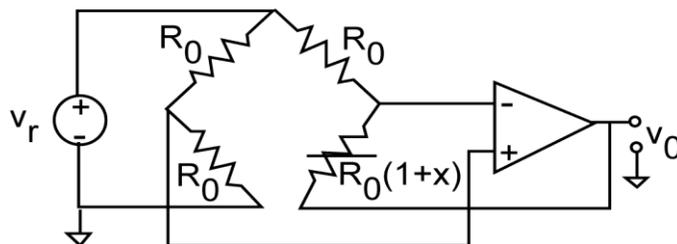
(a)



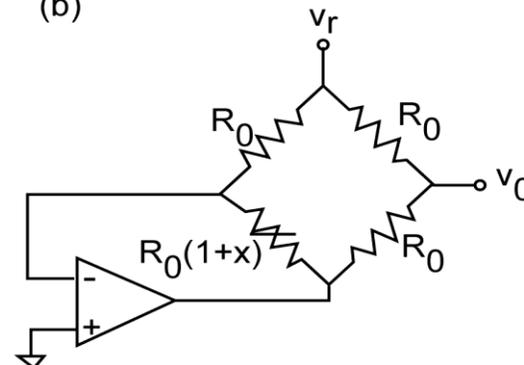
(b)



(a)

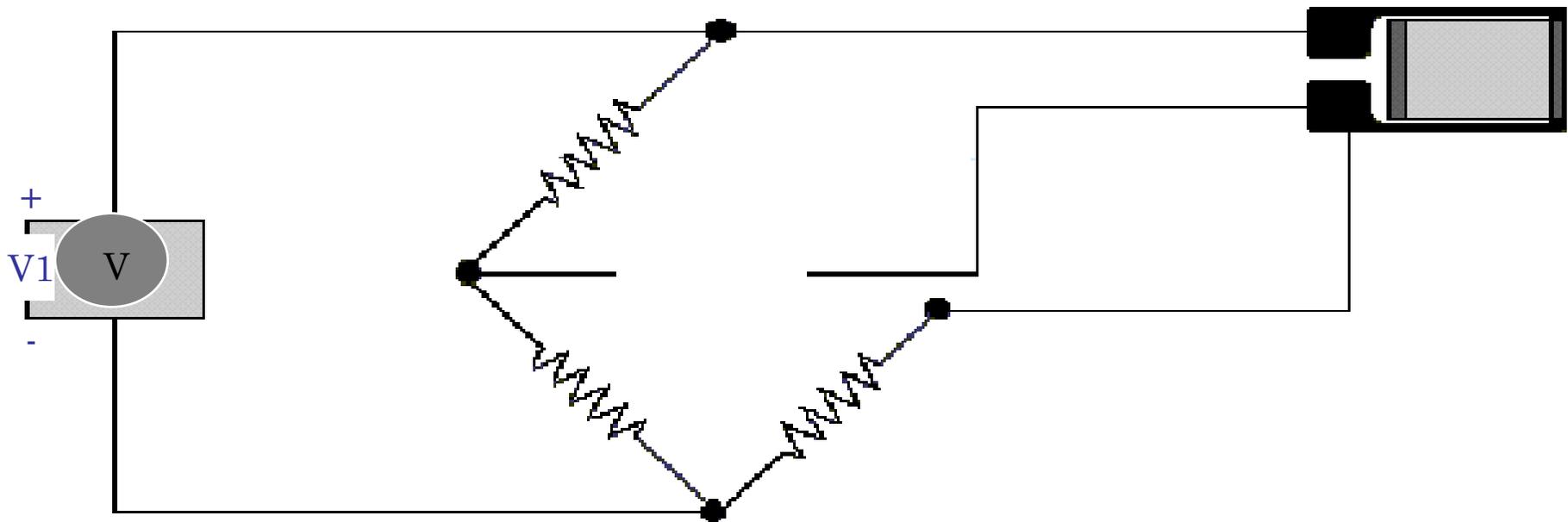


(b)



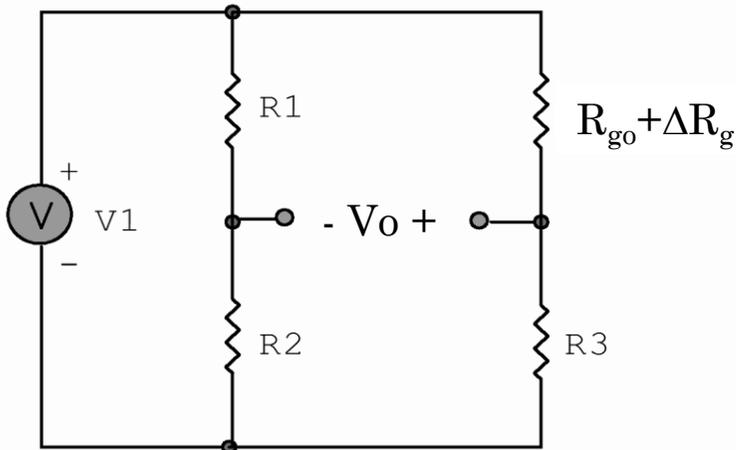
Transdutores Extensométricos

- Condicionamento - 1/4 de Ponte - Excitação em Tensão



Transdutores Extensométricos

- Condicionamento - 1/4 de Ponte - Excitação em Tensão



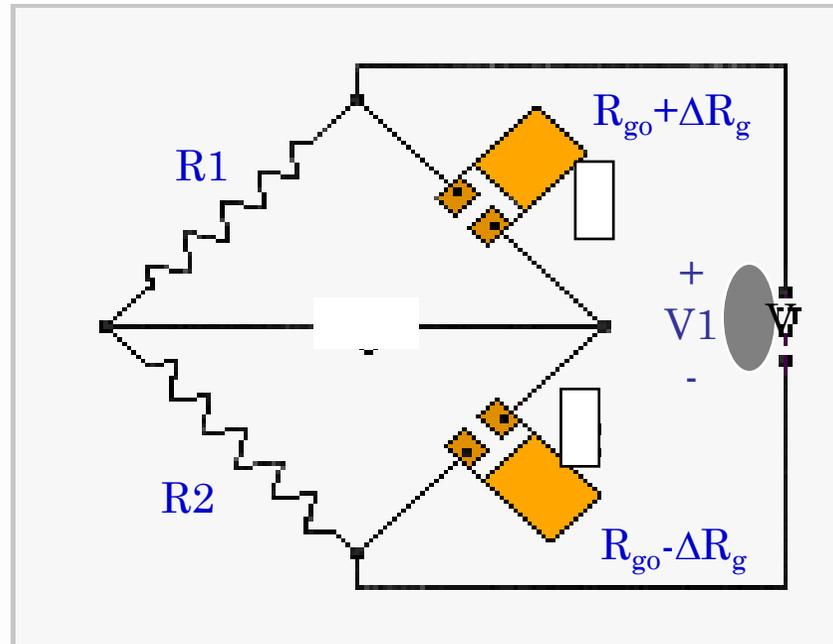
$$V_o = V1 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_{g0} + \Delta R_g} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right)$$

Se $R_1=R_2$ e $R_3=R_{g0}$

$$V_o = V1 \frac{1}{2} \left(\frac{-\Delta R_g}{2R_{g0} + \Delta R_g} \right)$$

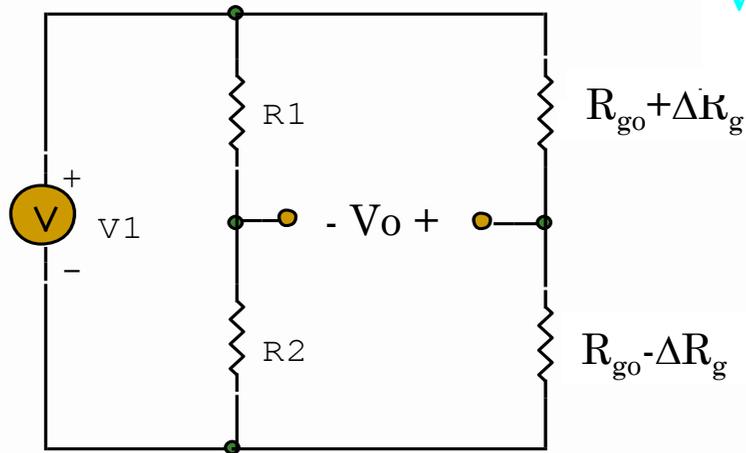
$$V_o \cong -\frac{V1}{4} \frac{\Delta R_g}{R_{g0}}$$

✧ Condicionamento - 1/2 de Ponte - Excitação em Tensão



Transdutores Extensométricos

- Condicionamento - 1/2 de Ponte - Excitação em Tensão



$$V_o = V_1 \left(\frac{R_{go} - \Delta R_g}{R_{go} - \Delta R_g + R_{go} + \Delta R_g} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right)$$

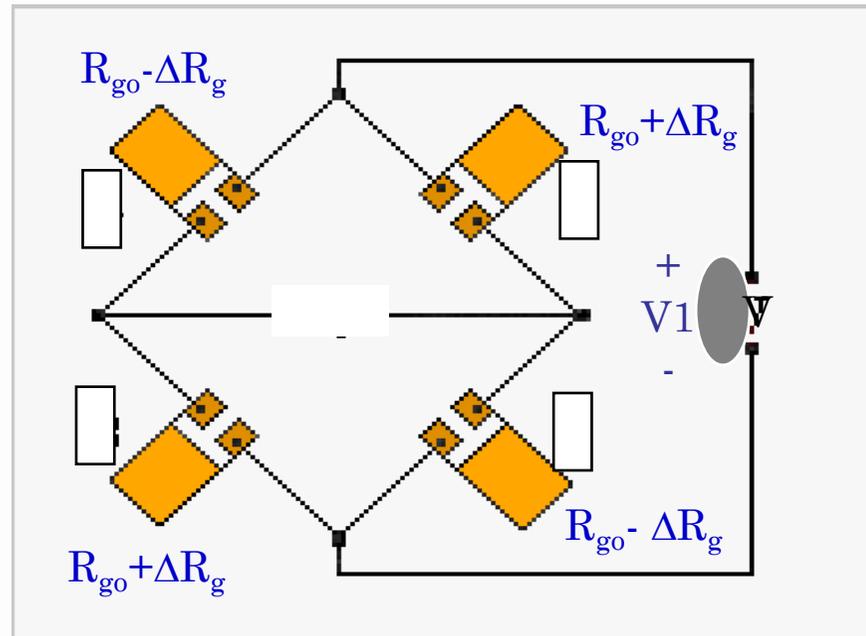
Se $R_1 = R_2$

$$V_o = V_1 \left(\frac{R_{go} - \Delta R_g}{2R_{go}} - \frac{1}{2} \right)$$

$$V_o = -\frac{V_1}{2} \frac{\Delta R_g}{R_{go}}$$

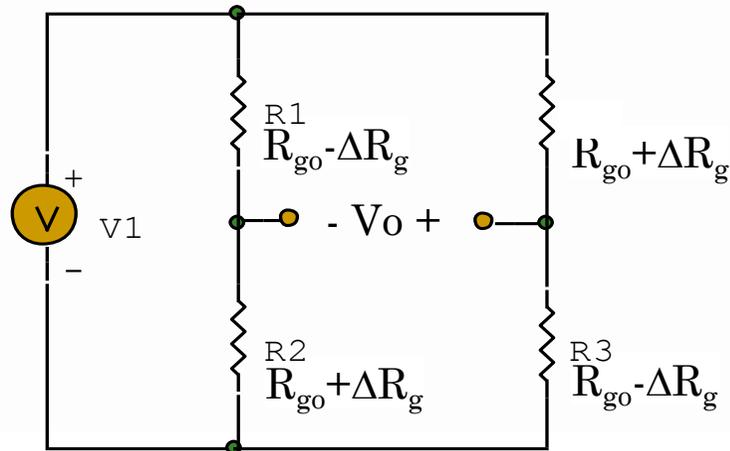
Transdutores Extensométricos

- Condicionamento - Ponte Completa - Excitação em Tensão



Transdutores Extensométricos

- Condicionamento - Ponte Completa - Excitação em Tensão



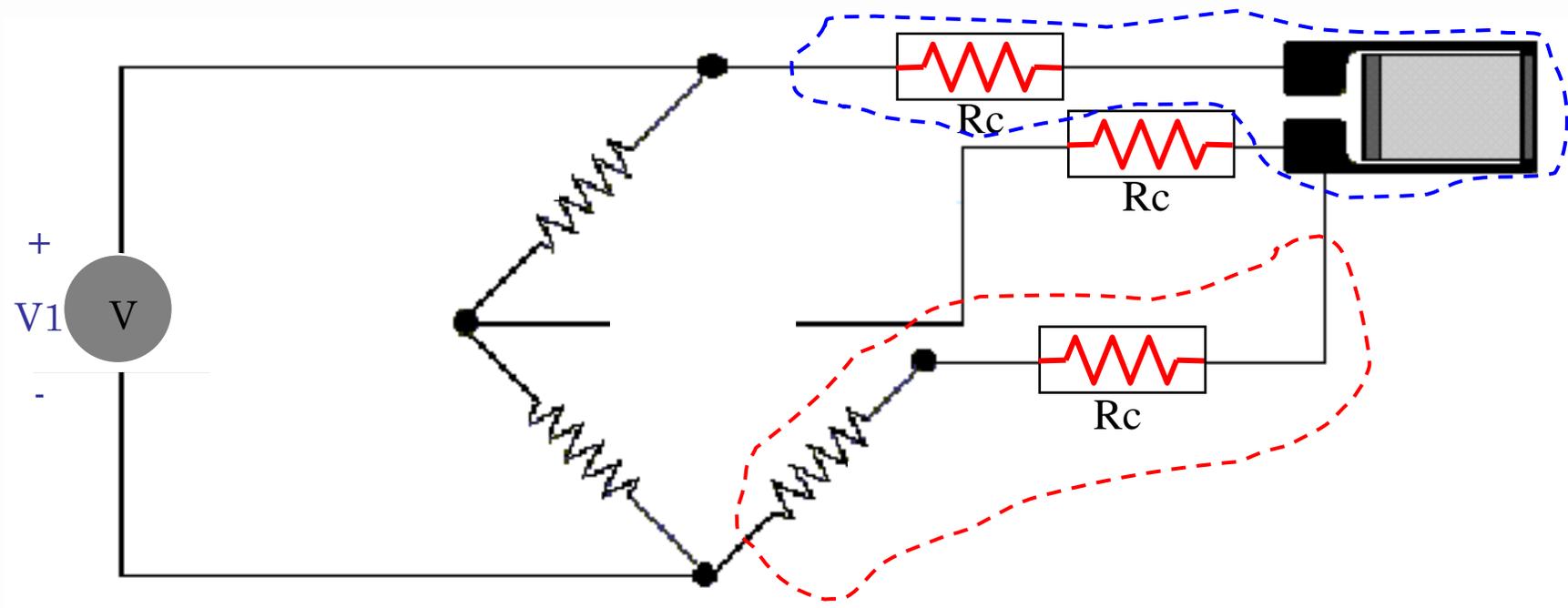
$$V_o = V_1 \left(\frac{R_{g_0} - \Delta R_g}{R_{g_0} - \Delta R_g + R_{g_0} + \Delta R_g} - \frac{R_{g_0} + \Delta R_g}{R_{g_0} + \Delta R_g + R_{g_0} - \Delta R_g} \right)$$

$$V_o = V_1 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) \quad V_o = V_1 \left(\frac{-2\Delta R_g}{2R_{g_0}} \right)$$

$$V_o = -V_1 \frac{\Delta R_g}{R_{g_0}}$$

Transdutores Extensométricos

- Variáveis Espúrias
 - Resistência dos Cabos e Conectores – ¼ Ponte

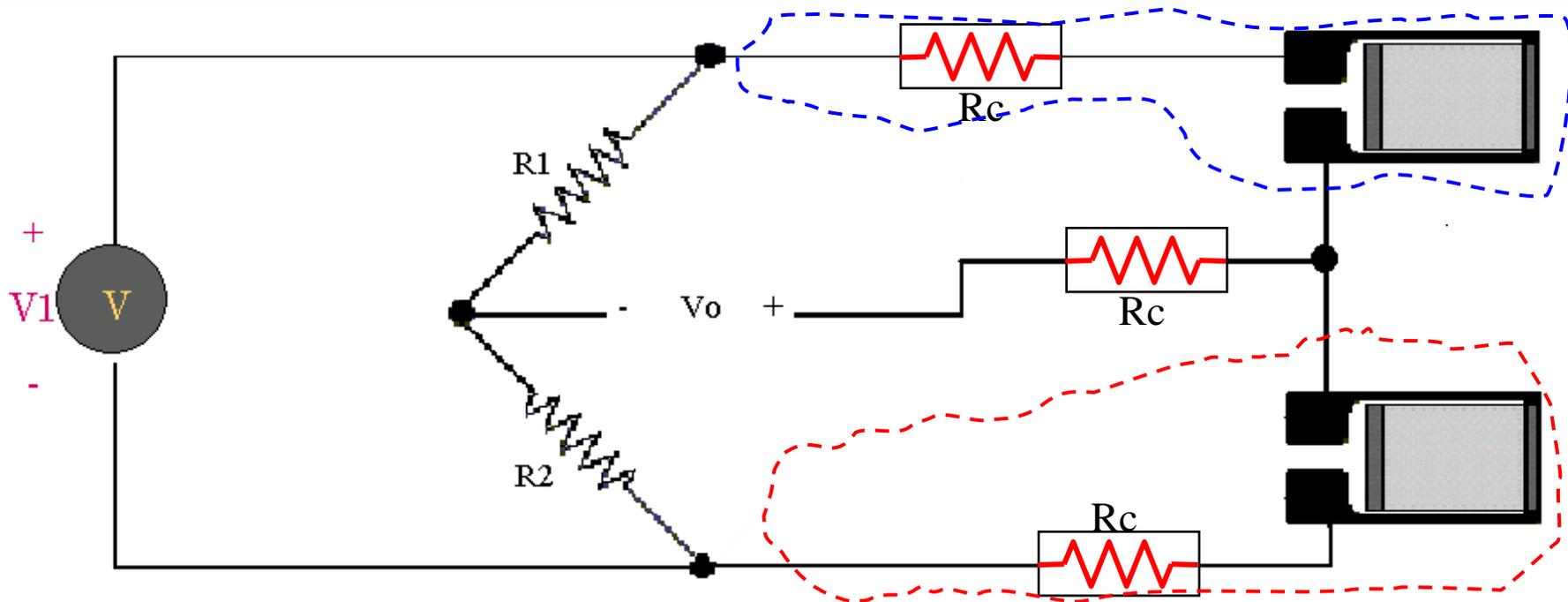


Conexão a três fios minimiza efeito da resistência dos cabos cabos

Transdutores Extensométricos

- Variáveis Espúrias

- Resistência dos Cabos e Conectores – ½ Ponte

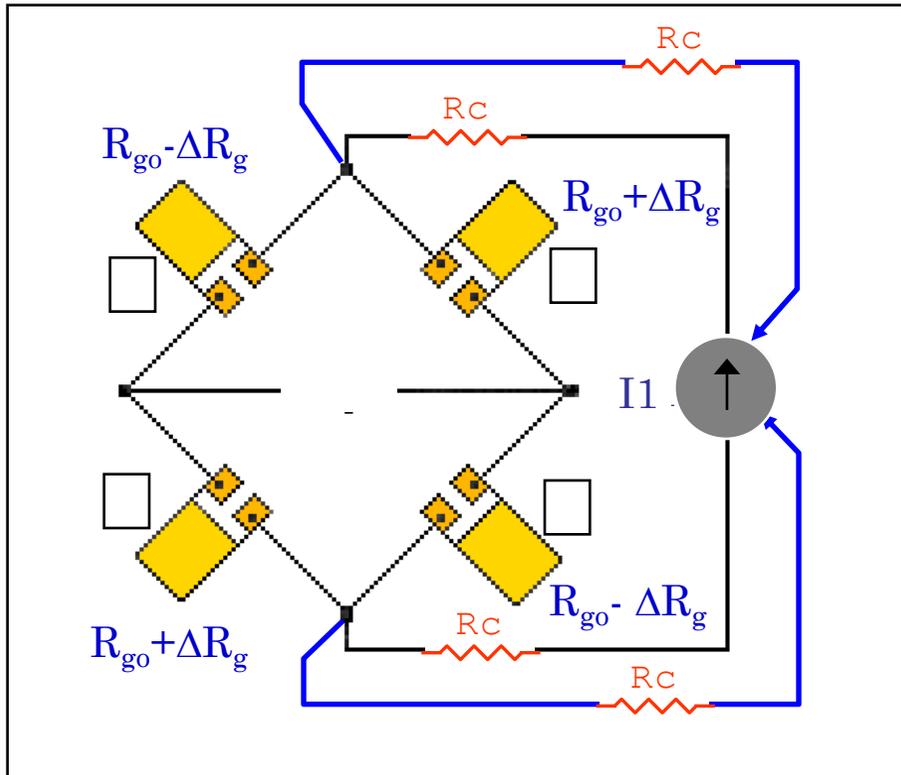


Obrigatoriamente tem-se a ligação a três fios

Transdutores Extensométricos

■ Variáveis Espúrias

▣ Resistência dos Cabos e Conectores – Ponte Completa



✧ Fonte de Tensão

* 4 fios

– Resistência do cabo afeta a tensão sobre a ponte

* 6 fios

– **Realimentação** a partir da ponte **compensa queda** de tensão nos cabos

✧ Fonte de Corrente

* 4 fios

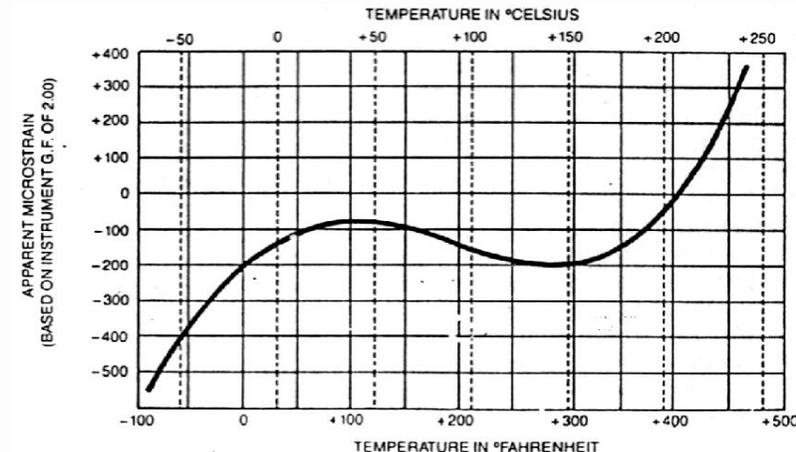
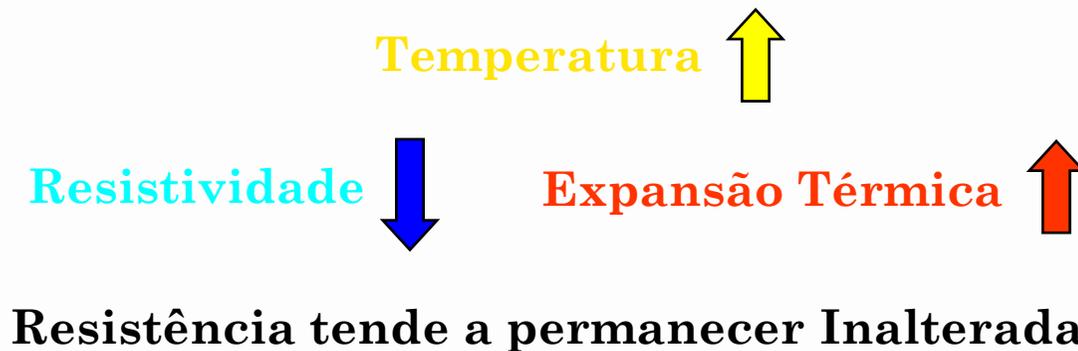
– Resistência do cabo **não afeta** a tensão sobre a ponte

Transdutores Extensométricos

Variáveis Espúrias

*Temperatura

- Altera a Resistência dos Cabos
 - Efeitos: mudança do ponto de zero e da sensibilidade
 - Ligação à 3, 4 ou 6 fios minimizam o efeito
- Altera a Resistência dos Elementos da Ponte
 - Dilata Strain Gauges e Elemento Mola– (*Apparent strain*)
 - Meia Ponte ou Ponte completa minimizam o efeito
 - $\frac{1}{4}$ Ponte - Strain-Gauges casados com o Elemento Mola



Alumínio	23
Magnésio	26

Transdutores Extensométricos

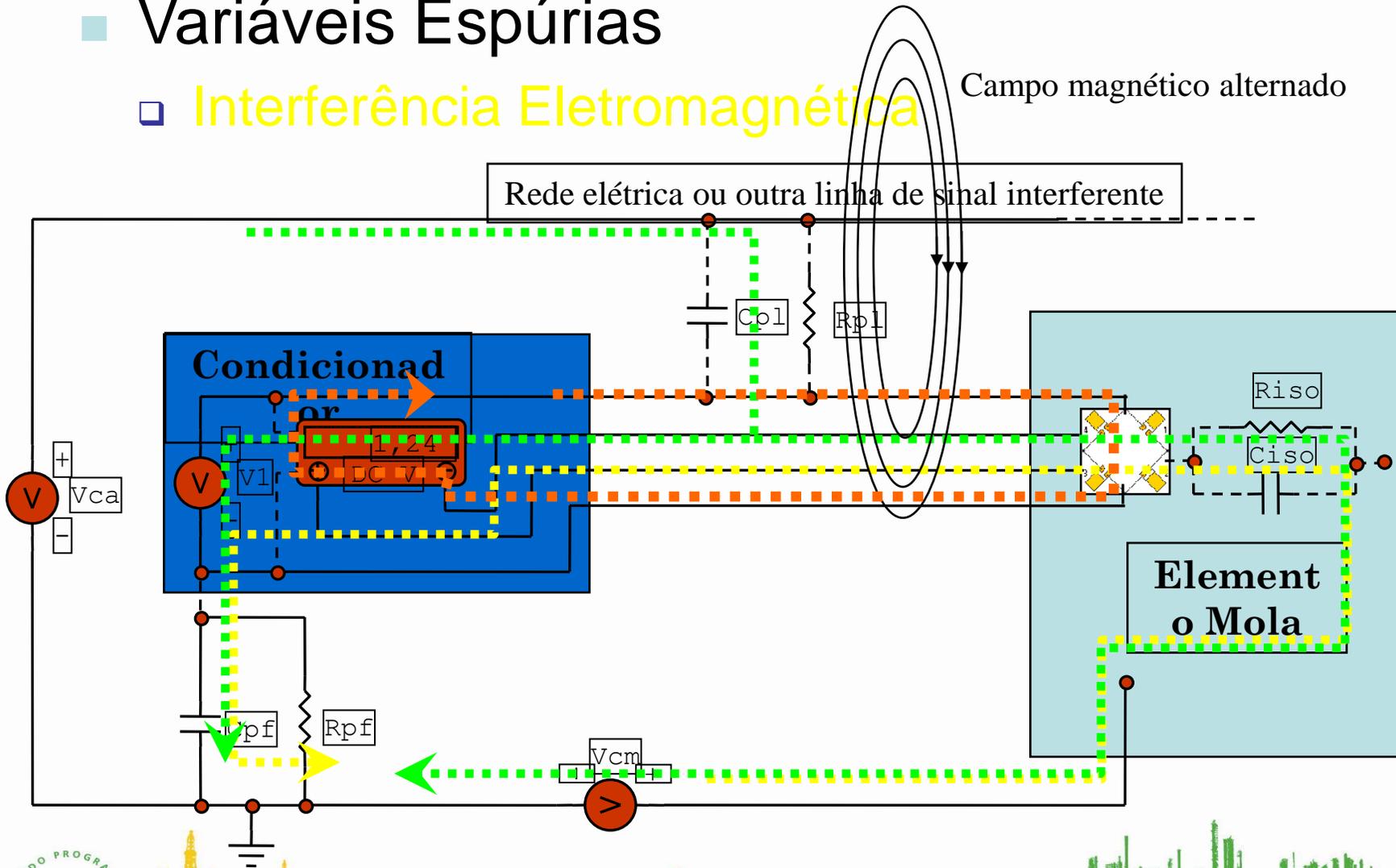
- $\frac{1}{4}$ Ponte
 - Afeta resistores e strain-gage de forma diferenciada
 - Desbalanço da Ponte = mudança do ponto de zero
 - Altera a sensibilidade
- $\frac{1}{2}$ Ponte
 - Afeta resistores de um braço e strain-gages do outro braço de forma diferenciada
 - Desbalanço da Ponte = mudança do ponto de zero
 - Altera a Sensibilidade
- **Ponte Completa**
 - Strain-gages estão praticamente a mesma temperatura
 - Cada braço da ponte é afetado praticamente da mesma forma
 - Minimiza o desbalanço da ponte por temperatura
- **Afeta a Fonte de Excitação**
 - Altera a Sensibilidade
- **Afeta a Resistência dos cabos**
 - Dependendo da configuração, pode implicar na mudança do ponto de zero

Transdutores Extensométricos

■ Variáveis Espúrias

□ Interferência Eletromagnética

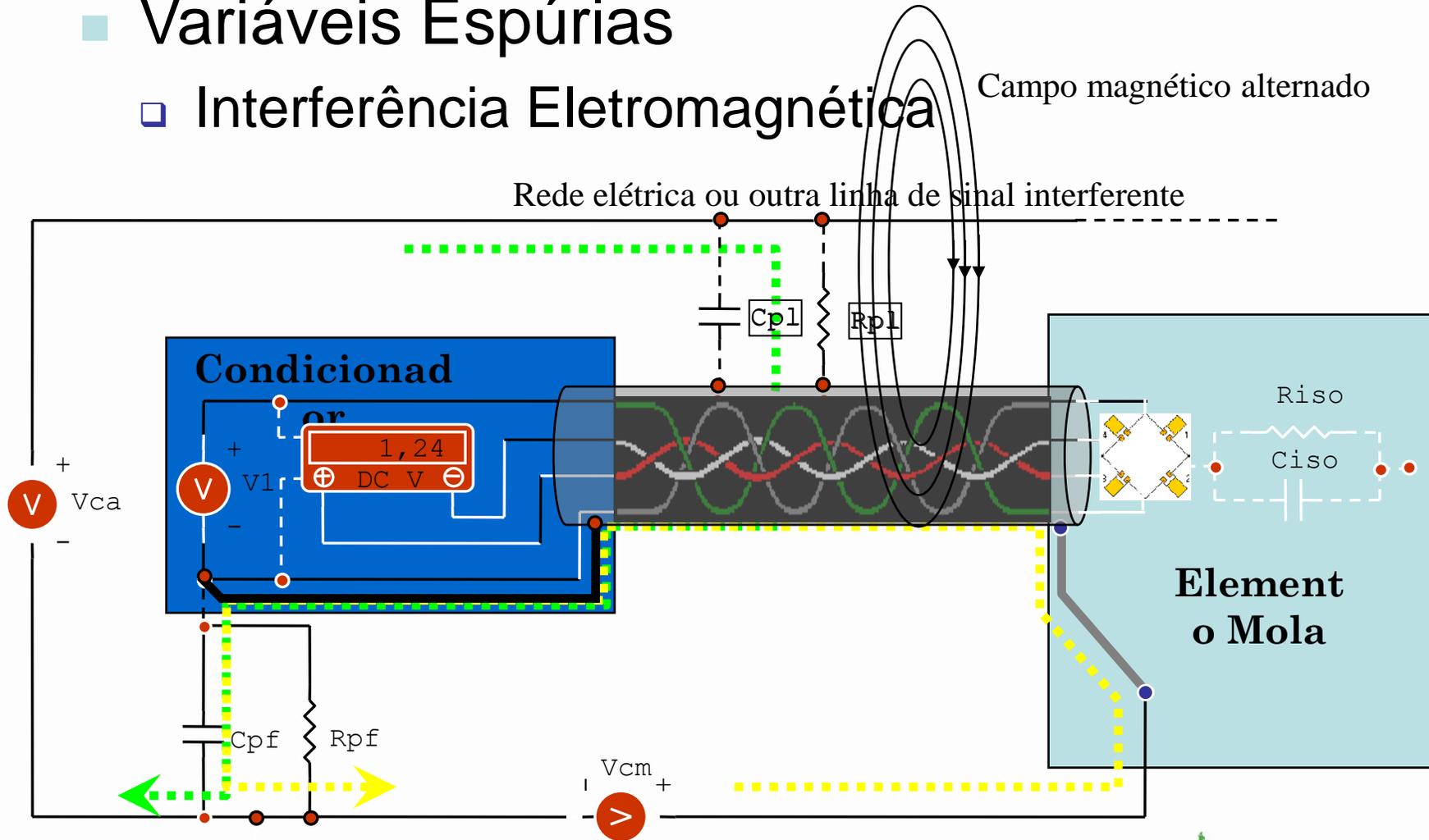
Campo magnético alternado



Transdutores Extensométricos

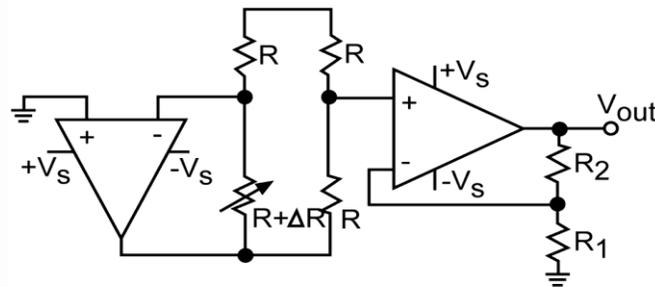
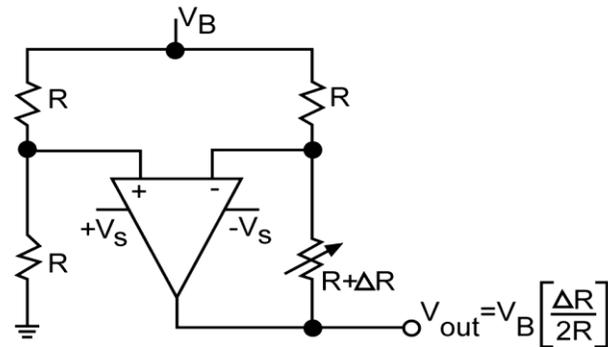
■ Variáveis Espúrias

□ Interferência Eletromagnética



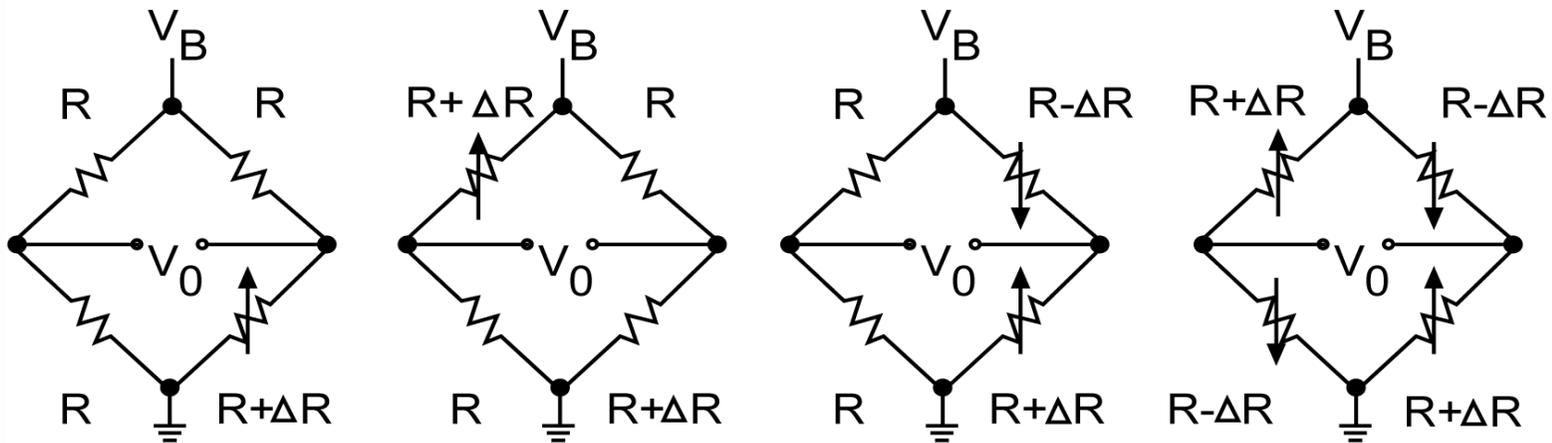
Condicionamento analógico

- Circuitos para linearização analógica



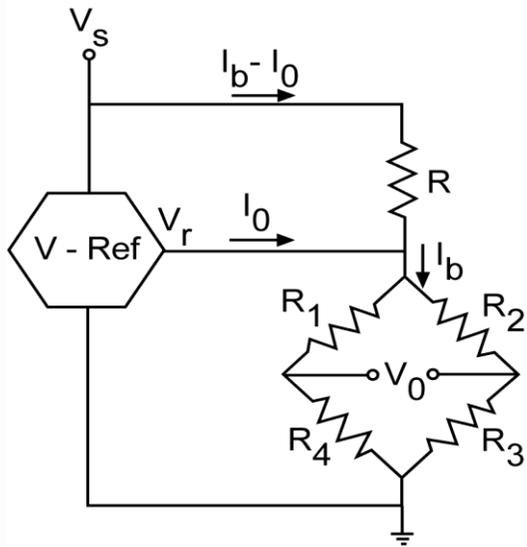
$$V_{out} = \frac{V_B}{2} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \left[1 + \frac{R_2}{R_1} \right]$$

Excitação: Fonte de tensão



V_0	$\frac{V_B}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$	$\frac{V_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$	$\frac{V_B}{2} \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$	$V_B \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$
Erro de linearidade	0,5%/%	0,5%/%	0	0
	1 elemento simples	Dois elementos	Dois elementos	Quatro elementos

Excitação: Fonte de corrente: exemplos de CIs

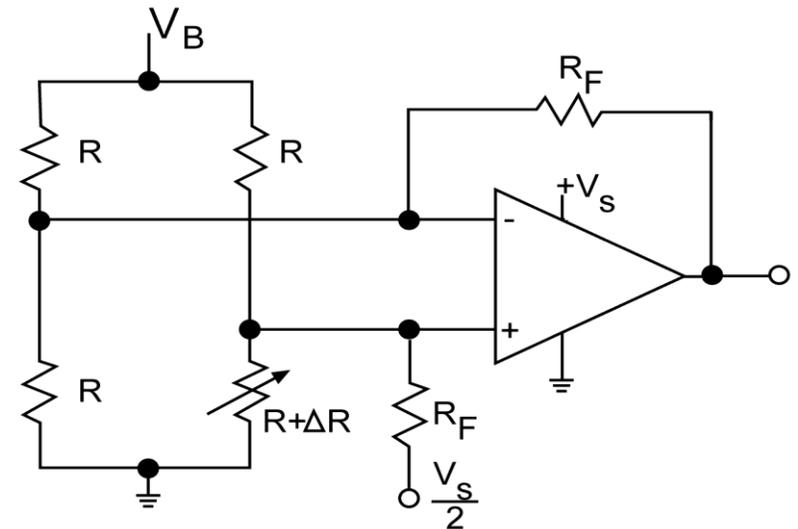


Parâmetro	AD581L	LM399A	LT1021A	MAX671C	REF10A	REF102C
Saída (V/mA)	10/10	6,95/10	10/10	10/10	10/20	10/10
Drift tempo ($10^{-6}/100h$)	25	20	15	50	50	5
Drift térmico ($10^{-6}/K$)	5	0,6	2	1	8,5	2,5



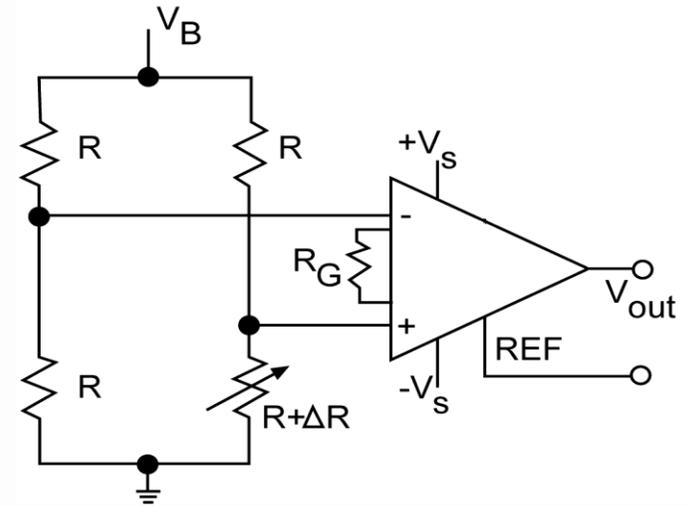
Circuitos Amplificadores e de linearização

- A saída de uma ponte com um elemento variando, pode ser ligada em um amplificador operacional de precisão como mostra a Figura
- Este circuito, apesar de simples tem uma confiabilidade de ganho pobre e também causa um desbalanço na ponte devido ao caminho de correntes pelo resistores R_F , além da corrente de entrada do amplificador operacional.
- O resistor R_F deve ser cuidadosamente escolhido para maximizar a rejeição de modo comum. Além desses problemas, a saída é não-linear.
- A única característica favorável deste circuito, é que o mesmo é capaz de trabalhar com alimentação simples, sem necessidade de fonte simétrica, além da simplicidade do esquema.



Circuitos Amplificadores e de linearização

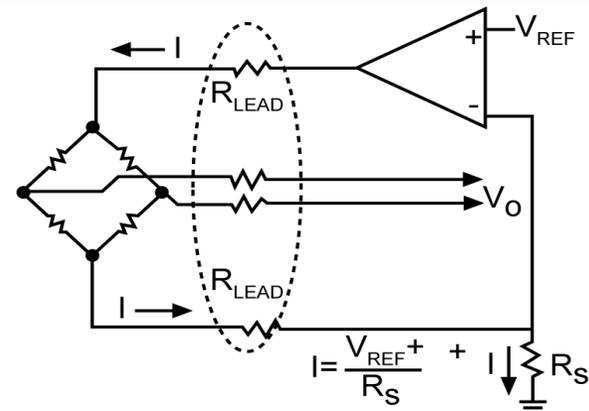
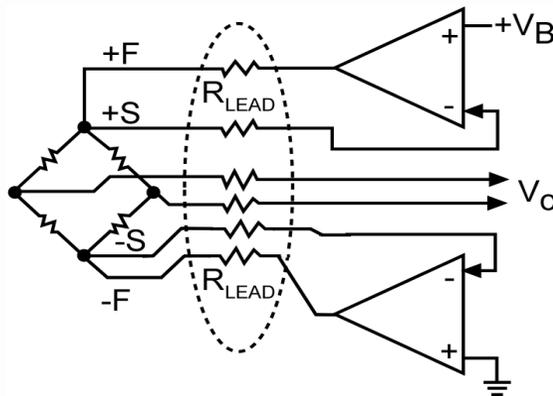
- Um circuito muito mais adequado se faz com um amplificador operacional de instrumentação.
- Esse circuito tem o ganho ajustado com o resistor R_G e evita o desbalanço da ponte.
- Essa configuração também garante ótimas características de CMRR (razão de rejeição de modo comum) e a altíssima impedância de entrada garante que a corrente de entrada do amplificador seja desprezível.



$$V_{out} = \frac{V_B}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right] [Ganho]$$

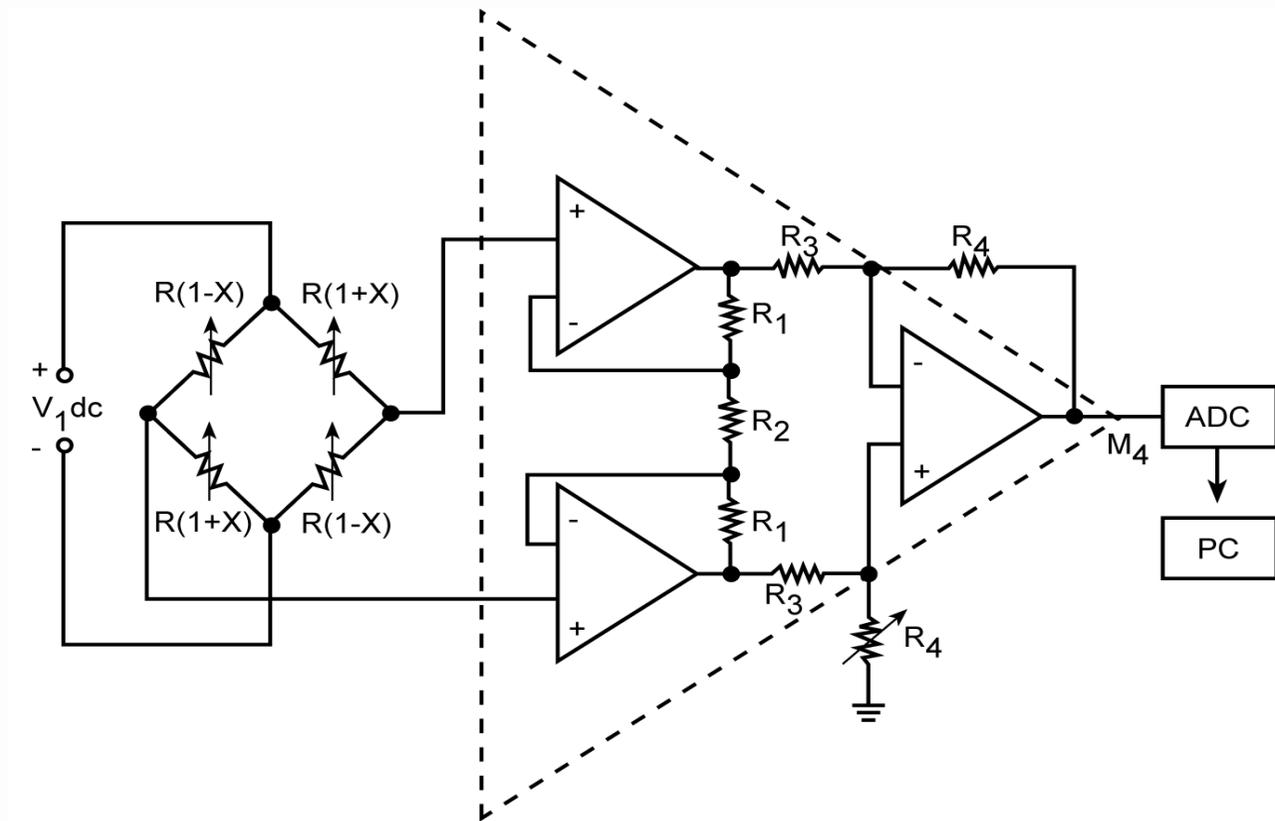
Circuitos Amplificadores e de linearização

- Muitas células de carga com ponte completa utilizam 6 cabos para garantir a estabilidade: dois cabos para a saída da ponte, dois cabos para a excitação e dois cabos de *sense*. Este método é mostrado na Figura (a) e é conhecido como método de Kelvin.
- As linhas de *sense* são ligadas nas entradas de alta impedância dos amplificadores operacionais, o que garante uma minimização do erro devido à queda de tensão sobre a resistência dos cabos.
- Os OPAMPs mantêm a tensão de excitação sempre igual a (observa-se que esta fonte deve ser extremamente estável).
- A utilização de uma excitação por corrente como mostrado na Figura (b) consiste em outro método para minimizar os erros devido à resistência dos cabos.
- Deve ser observado, entretanto que a variação da tensão de referência, do resistor e do amplificador operacional influencia em todo o sistema.



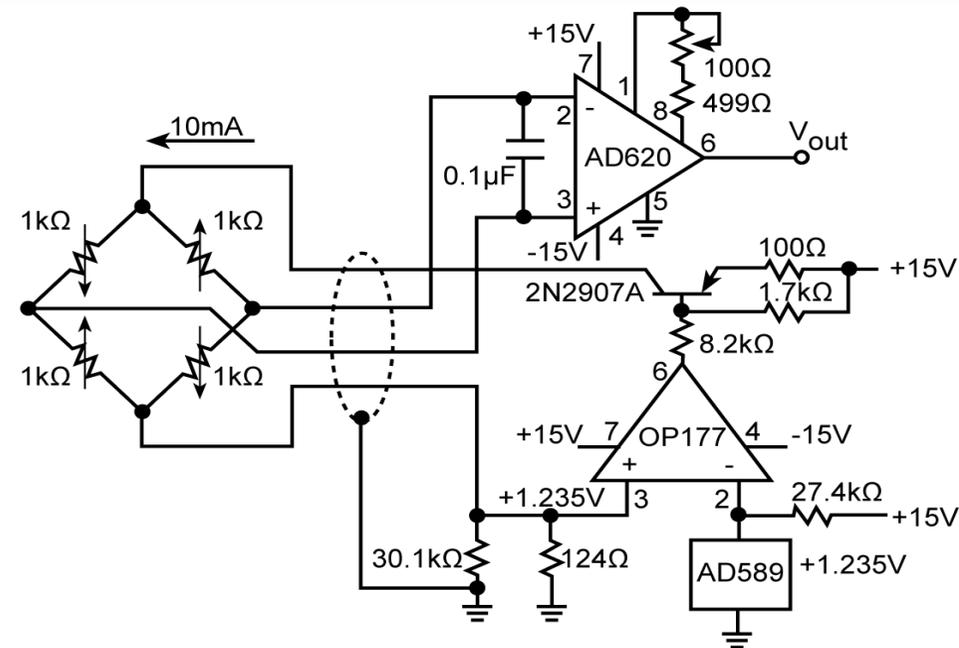
Circuitos amplificadores

- Amplificador de Instrumentação com componentes discretos (3 OPAMPs)



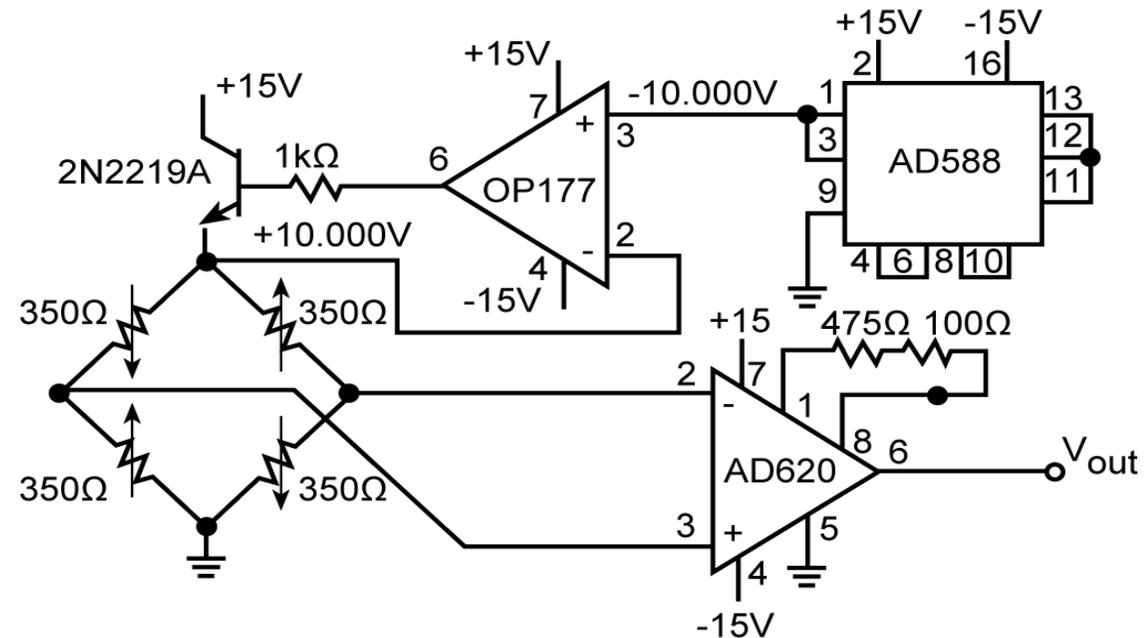
Circuitos Amplificadores e de linearização

- No circuito da Figura é utilizada uma excitação por corrente. O OP177 fornece uma corrente de 10 mA, com uma tensão de referência de 1,235 V.
- O extensômetro produz uma saída de $\frac{10,25mV}{1000 \frac{\mu m}{m}}$.
- O sinal é amplificado por um OPAMP de instrumentação AD620 configurado com um ganho de 100.
- Ajustando o potenciômetro de ganho de , pode-se ajustar uma saída de para a deformação relativa de .
- O capacitor de na entrada do AD620 serve como filtro para interferências externas.



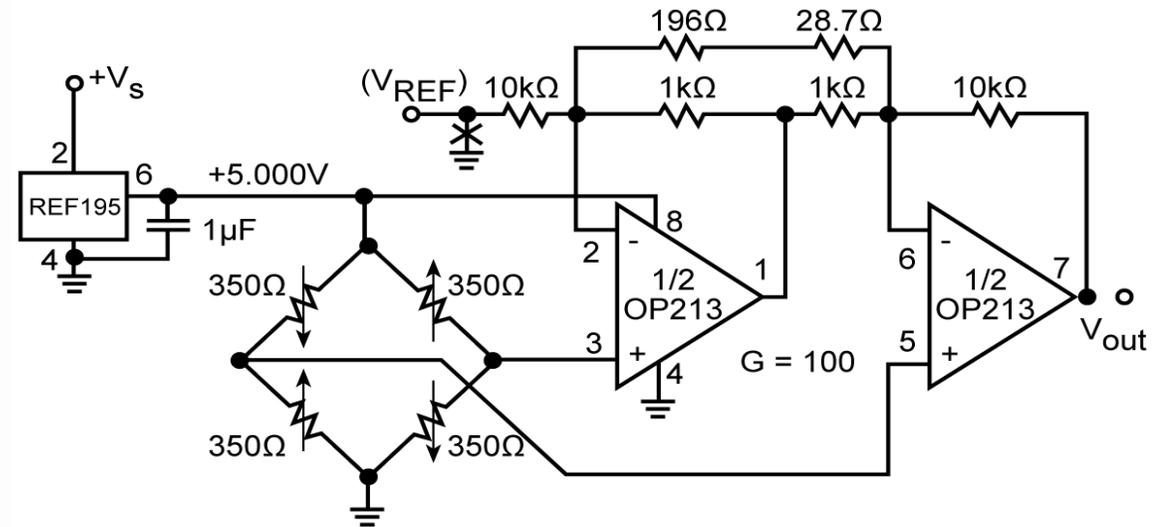
Circuitos Amplificadores e de linearização

- Outro exemplo de condicionador para uma célula de carga para extensômetros de pode ser observado na Figura ao lado.
- Uma tensão de excitação de é feita com uma referência (OP177) e um *buffer* 2N2219A para garantir uma corrente de 28,57 mA.
- As únicas recomendações desse circuito é que o resistor de 475 e o potenciômetro de 100 tenham baixos coeficientes de temperatura para evitar problemas de *drift*.



Circuitos Amplificadores e de linearização

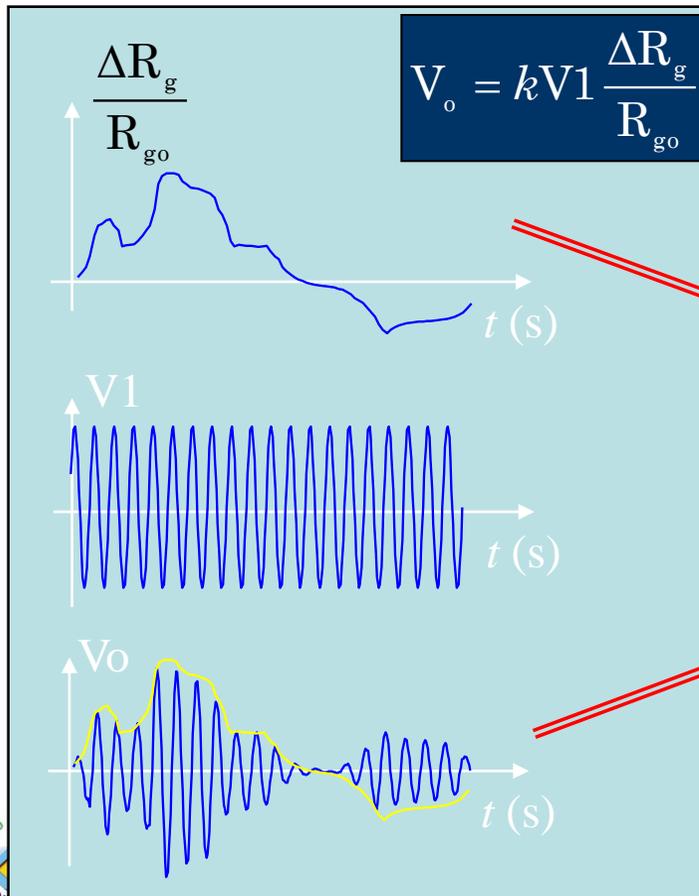
- A Figura ao lado mostra um circuito condicionador implementado com uma fonte de alimentação simples.
- Neste circuito é utilizada uma fonte de tensão de referência de 5 V (REF195). Como este CI pode suprir uma corrente de até 30 mA, não é necessário nenhum *buffer* de corrente.
- Um OP213 é configurado com um ganho de 100:



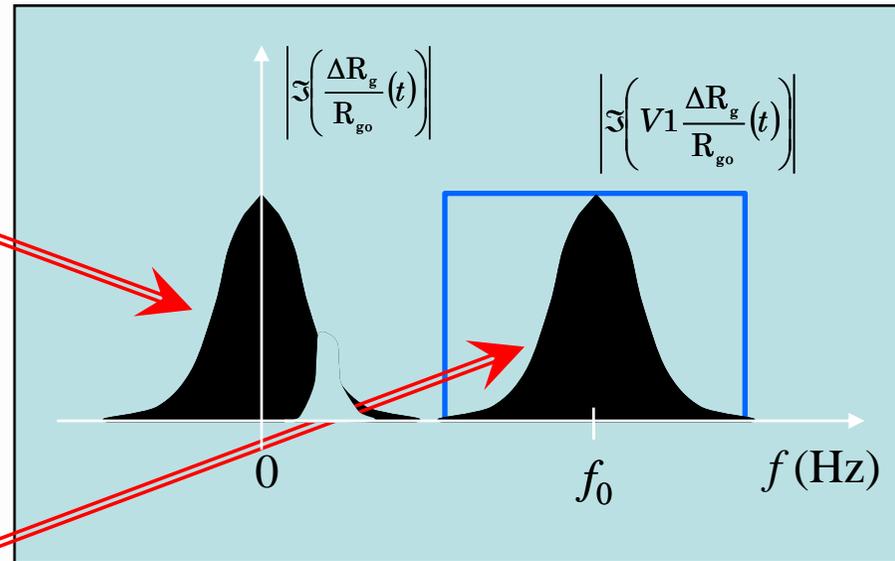
$$G = 1 + \frac{10k\Omega}{1k\Omega} + \frac{20k\Omega}{196\Omega + 28.7\Omega} = 100$$

Transdutores Extensométricos

- Excitação da Ponte com Fonte Alternada Senoidal
 - O sinal sensoriado modula em amplitude o sinal de excitação



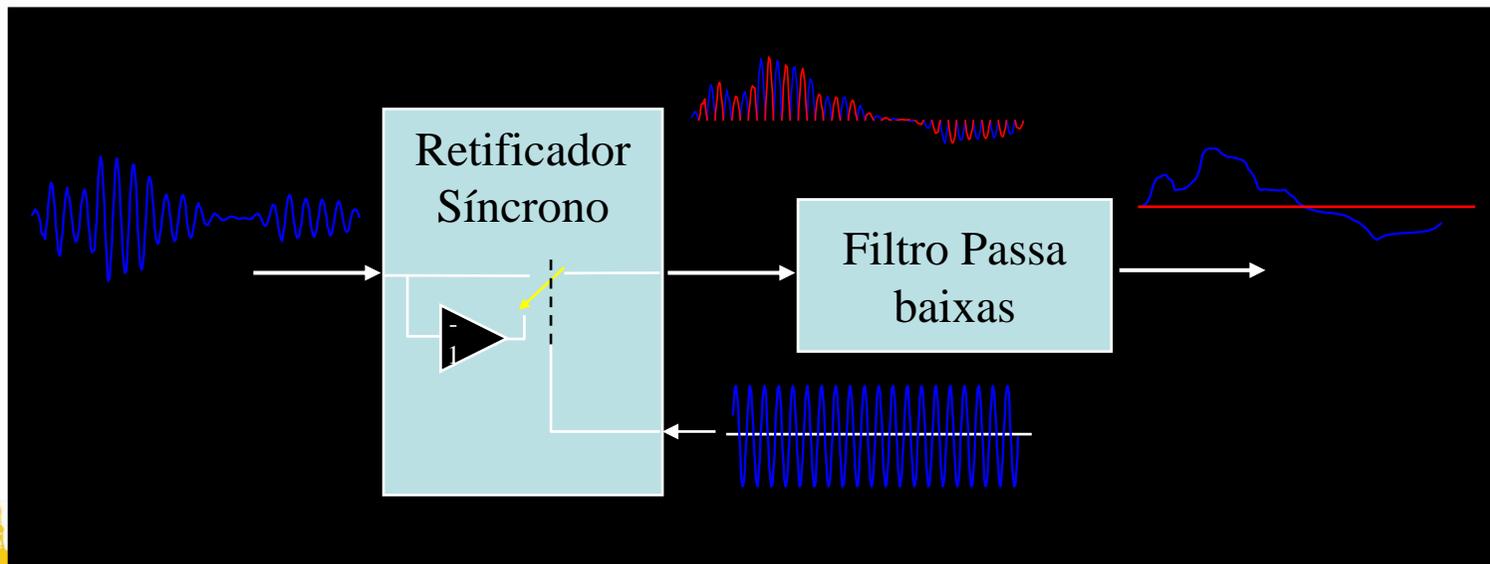
- Desloca a banda de frequências do sinal do sensor



- Pode-se evitar sinais interferentes com frequências fora da banda do sinal modulado (filtro passa-banda)

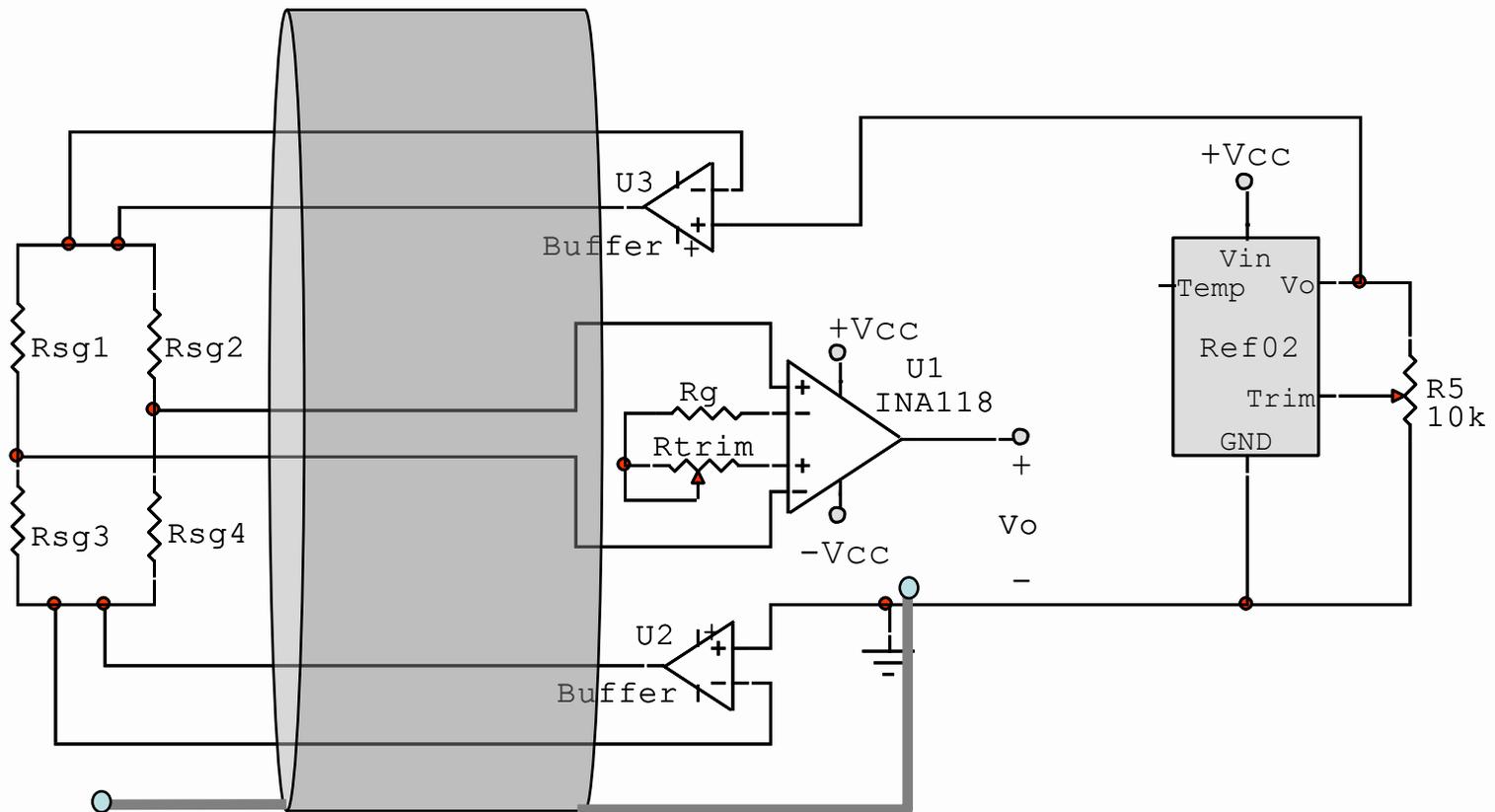
Transdutores Extensométricos

- Excitação da Ponte com Fonte Alternada Senoidal
 - Filtragem com **Retificadores Síncronos**
 - **Elimina sinais interferentes não síncronos com a excitação**
 - Permite acoplamento magnético dos sinais
 - Empregado em torquímetros rotativos (transformador rotativo)
 - **Banda limitada de passagem de sinal**
 - **Influência das capacitâncias dos cabos**



Transdutores Extensométricos

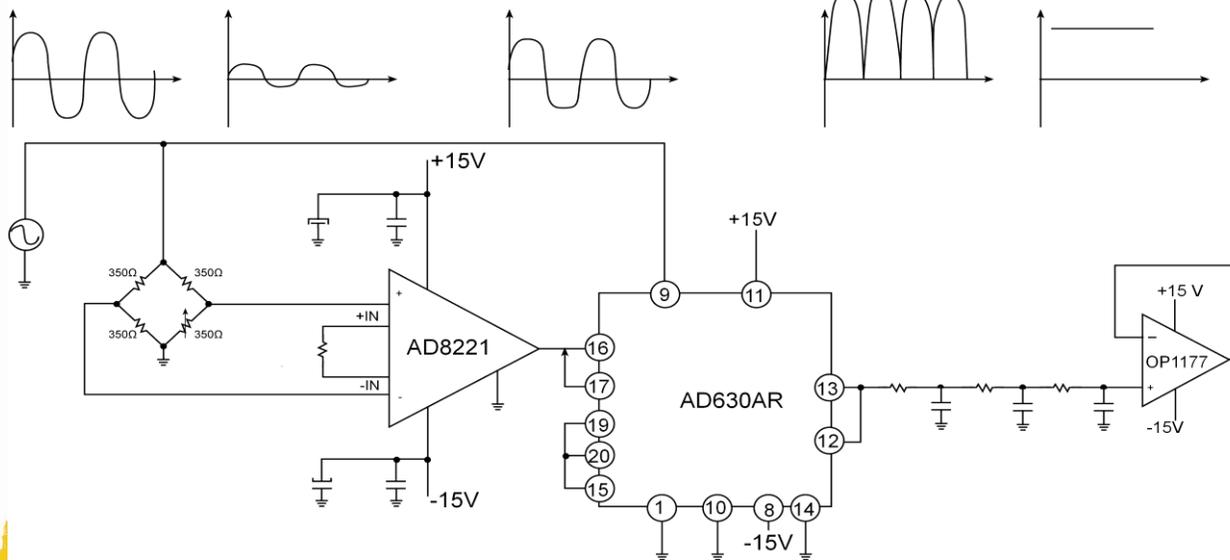
- Condicionamento
 - Excitação por fonte de tensão contínua com realimentação
 - Amplificador de Instrumentação



Conectado ao
Elemento Mola

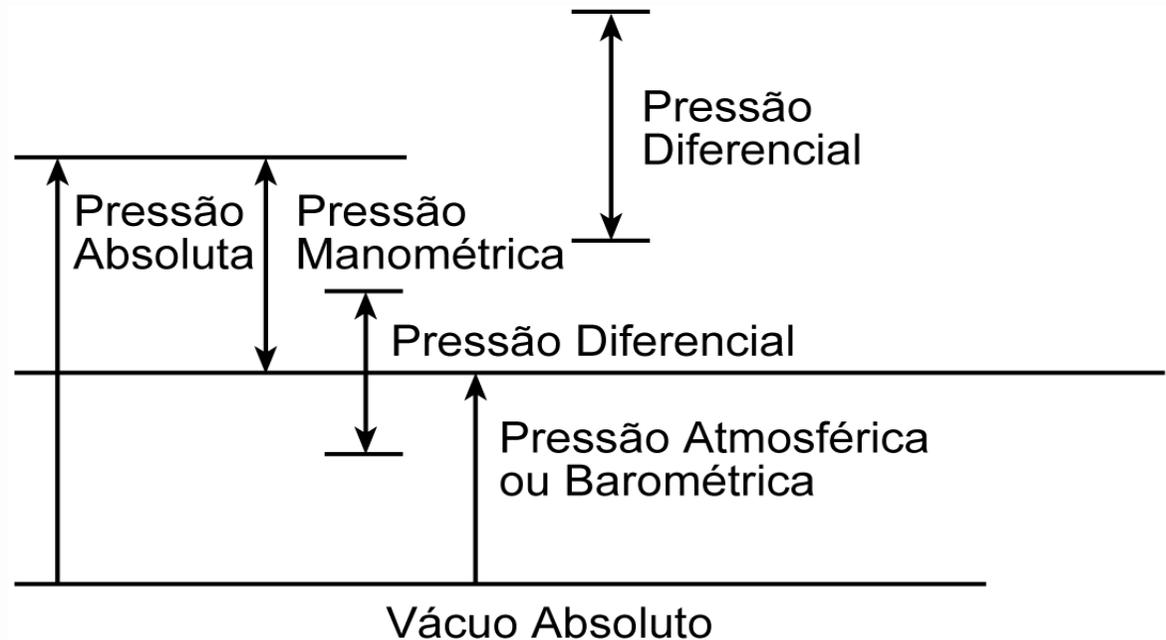
Circuitos Amplificadores –excitação AC

- Um AD8221 é responsável pelo ganho, enquanto que um AD630AR faz a demodulação síncrona da forma de onda.
- Isso resulta em uma saída DC proporcional à variação da ponte livre de interferências DC como o *offset* da tensão de saída.
- Neste circuito, a excitação é feita com um sinal de 400 Hz, desta forma o sinal na entrada do AD8221, assim como no AD630 é uma tensão AC.
- Este sinal torna-se DC apenas na saída do passa baixas.
- O sinal de 400 Hz é retificado e então é feita a média e os erros DC são convertidos em um sinal AC e removidos na demodulação (nesta etapa ocorre uma subtração do sinal de entrada sintonizada em 400Hz).
- Nesse tipo de aplicação, se uma fonte AC não é disponibilizada, alternativamente pode-se implementar uma fonte com sinal quadrado, chaveando as fontes.

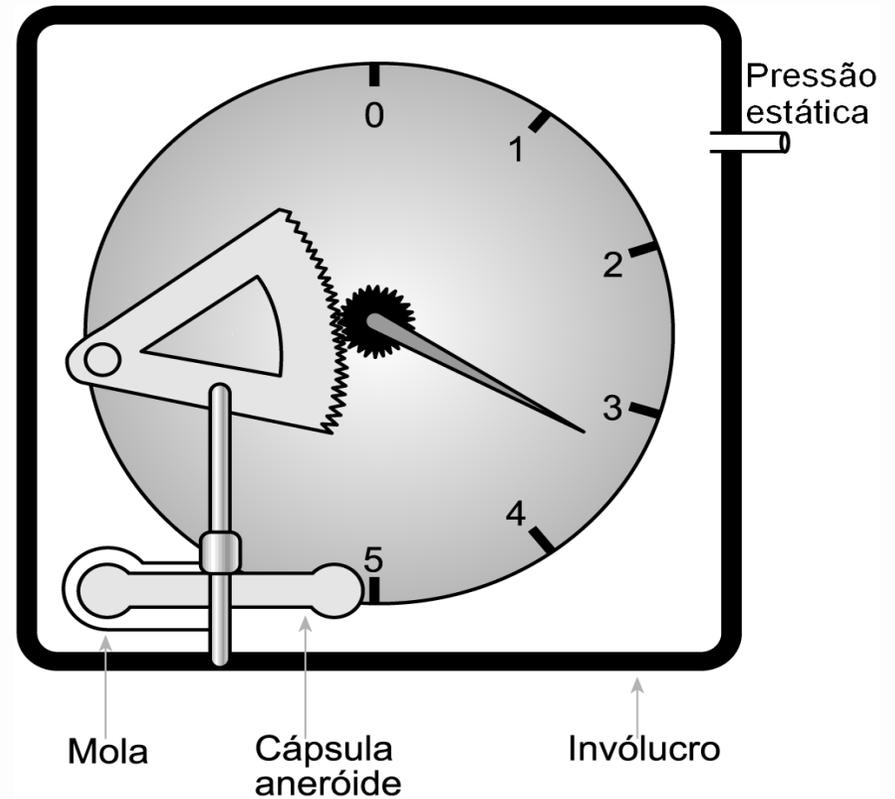
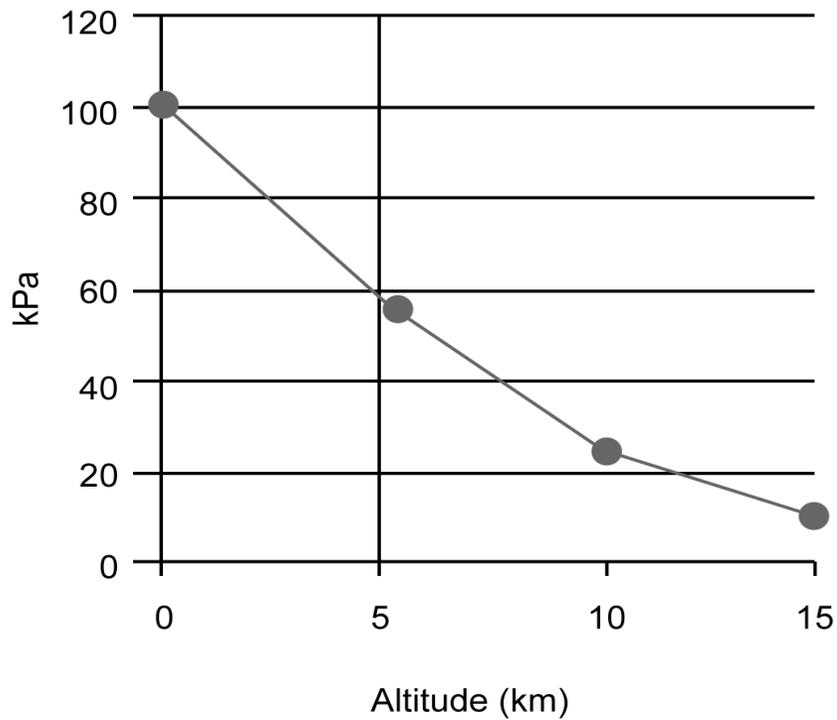


Medição de pressão

- A pressão é geralmente definida como força normal por unidade de área e é geralmente representada por unidades como psi (libras/polegada quadrada), bar, atmosfera, Pascal e mm de Hg. No sistema internacional (SI), onde a força é expressa em N e a área em m^2 , a unidade é o Pa .

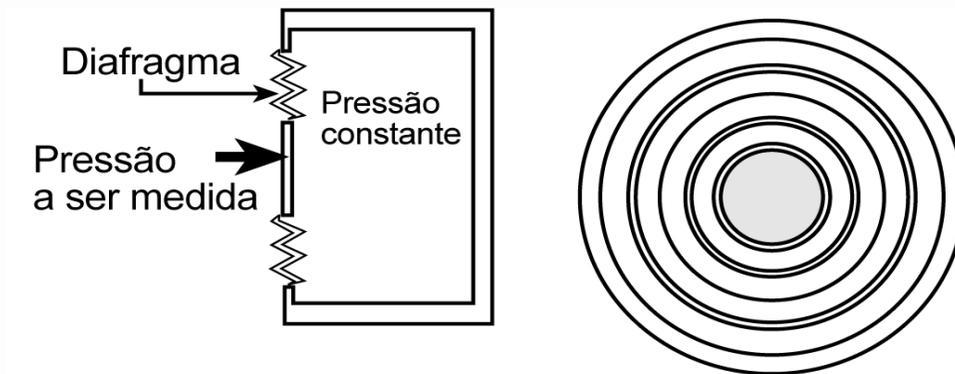


Altímetro



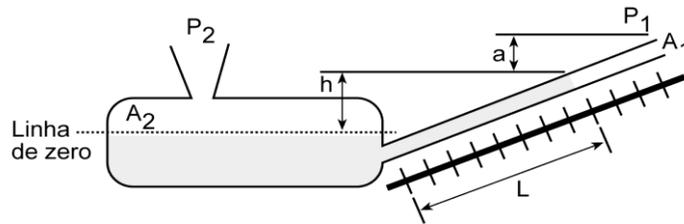
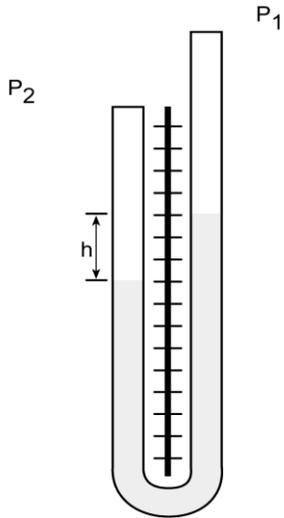
Aneróides

- Cápsulas, seladas com um gás com pressão conhecida. Se a pressão externa muda, muda a forma do aneróide, produzindo um movimento mecânico.



Medidores mecânicos

- Tubos de vidro



$$P_2 - P_1 = \rho g L \sin \theta$$

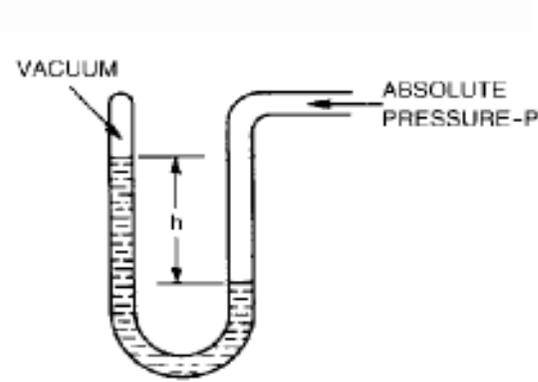


FIGURE 6 Absolute-pressure gage (manometer).

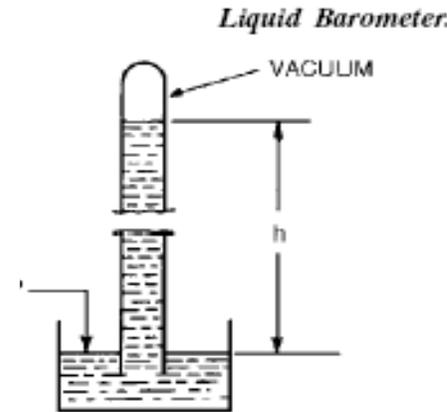
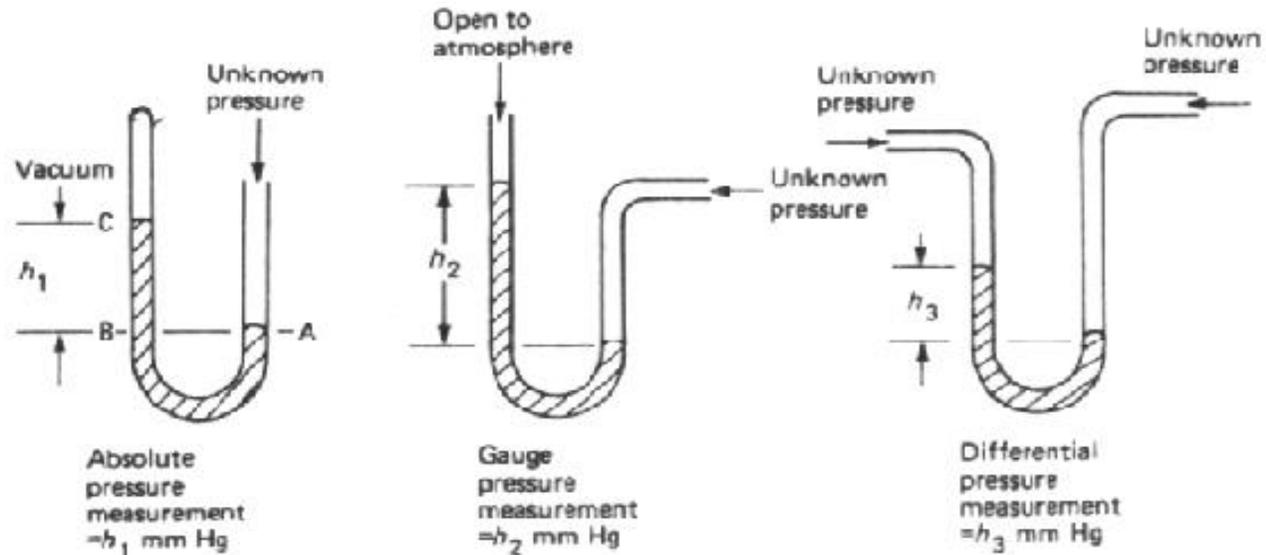


FIGURE 5 Liquid barometer.

- Barômetro

onde g é a gravidade local, ρ a densidade do fluido e p_1 e p_2 as pressões nas extremidades do tubo.

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$$

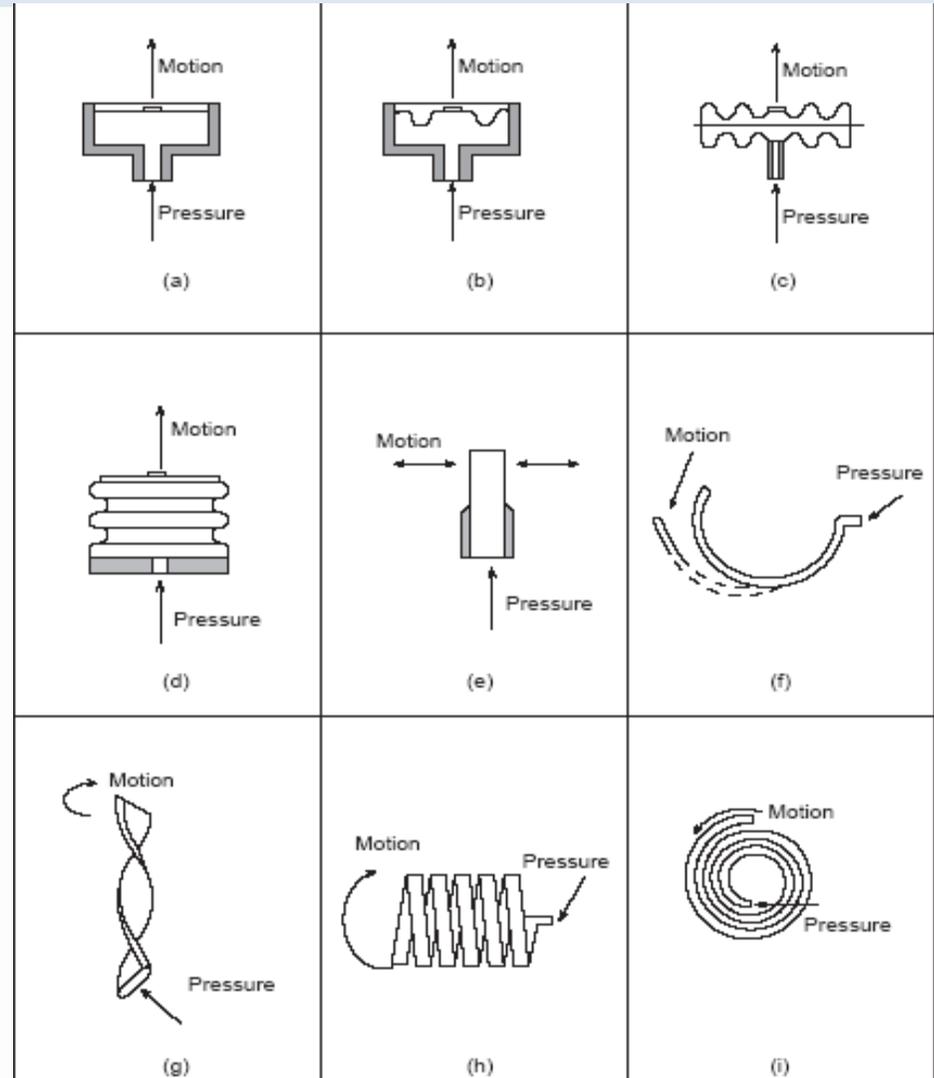


Medidores mecânicos – Elementos de deformação

- Tubos de Bourdon, Diafragmas e Foles.

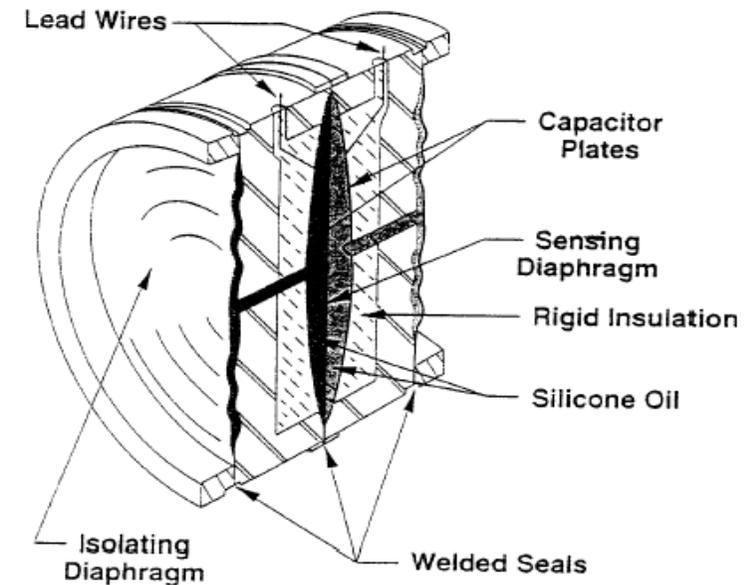
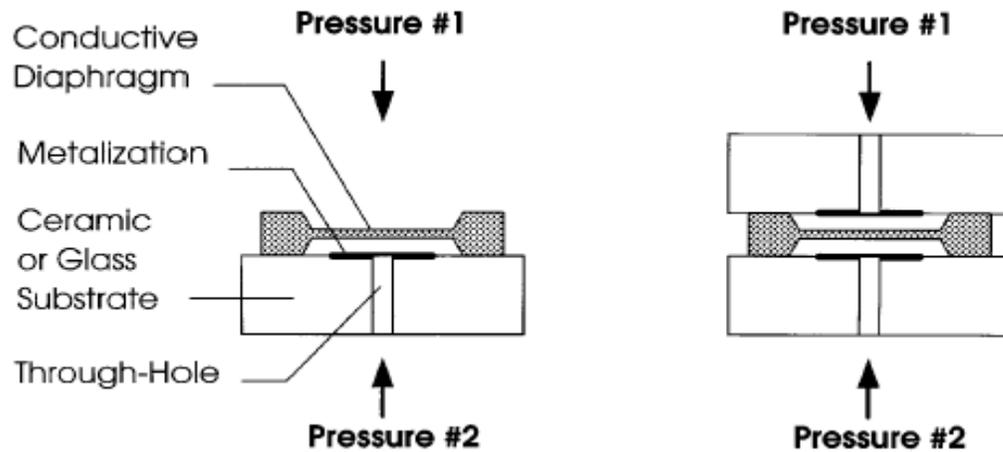


- Tubo de Bourdon tipo C.



Sensores de Pressão – Micro-fabricados em Si

- Capacitivos



Sensores de Pressão – Micro-fabricados em Si

- Piezo-resistivo – Possui sensores implantados no Si em ponte de Wheatstone

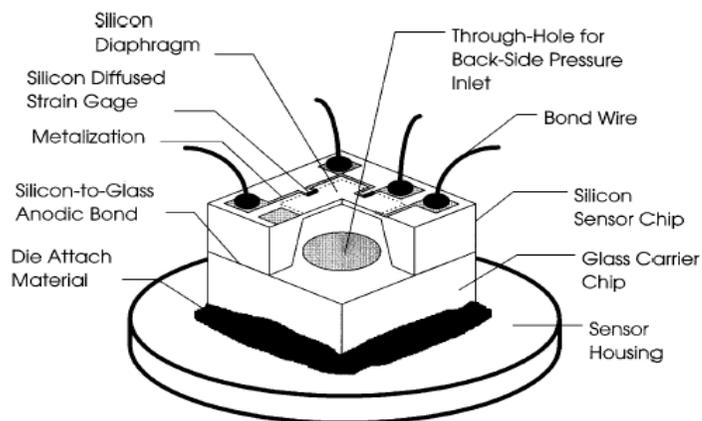
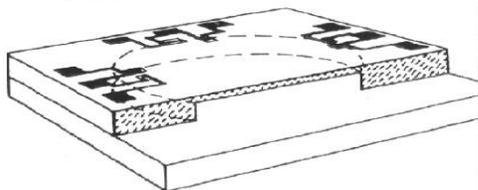


Figure 9.25 Piezo-resistive pressure transducer. Courtesy, Kistler Instruments Ltd.



Sensores de Pressão – Micro-fabricados em Si

- Piezoelétricos – Utilizam pastilhas feitas com material que ao ser deformado, produz uma tensão elétrica (o efeito é reversível) – Este material é extensamente utilizado em sensores de ultra-som, buzzers, etc

■ Piezoelétricos – Principal desvantagem: Sua saída é dependente da variação do estímulo no tempo. Uma carga estática gera uma saída de 0V. No entanto frequência muito baixas são alcançadas.

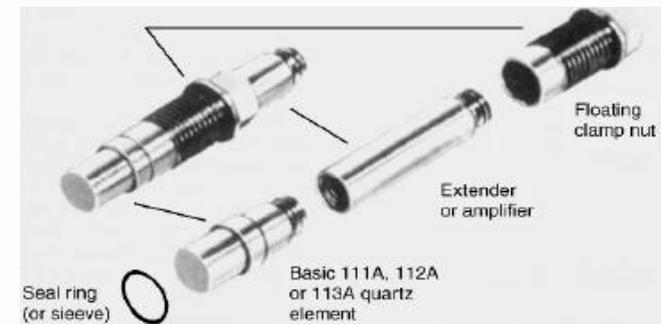
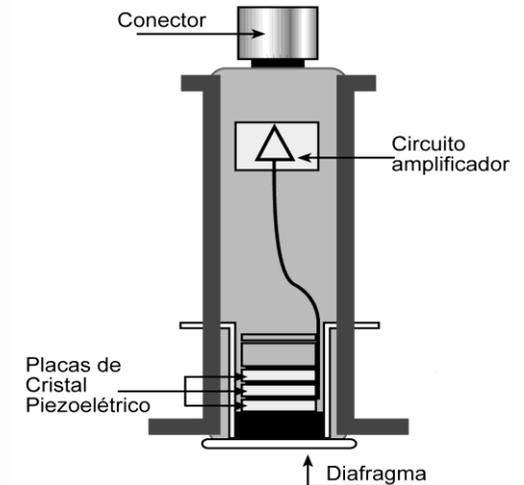
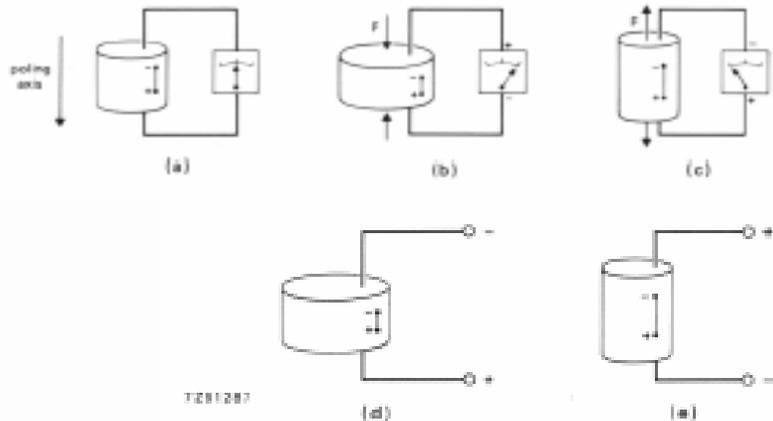
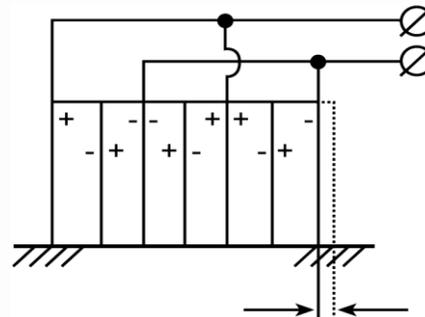


FIGURE 33 Modular assembly of piezoelectric dynamic pressure transducer. (PCB Piezotronics, Inc.)

Efeito Piezoelétrico e aplicações diversas

- Piezoelétricos – Este efeito pode ser utilizado para medir força e suas grandezas secundárias. Também é utilizado em acelerômetros para medir vibração, velocidade e etc. Como transdutor é utilizado em sistemas emissor e receptor de ultra-som. Como atuador é utilizado em banhos de limpeza via ultra-som, buzzers, transdutores de micro-deslocamento, entre outros

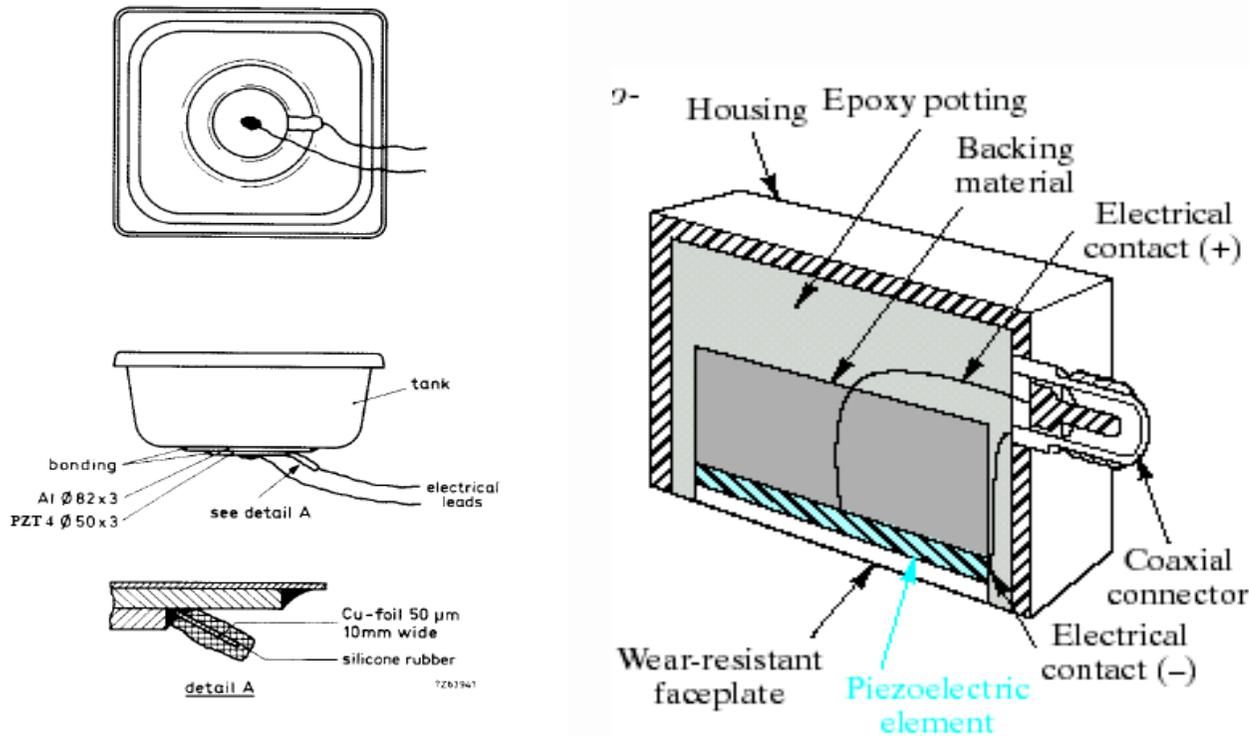


Fig.6.10 Disc resonator bonded to an aluminium disc and the cleaning tank. The connecting foil and stranded wire are protected from fatigue by an acoustic damping material (e.g. silicone paste, Silastic 731 RTV)

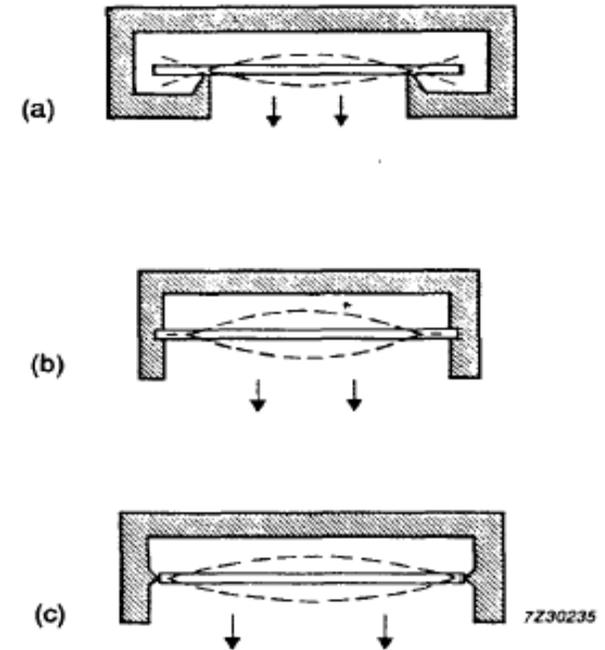


Fig.6.37 Three basic buzzer constructions.
 (a) nodal support
 (b) edge clamping
 (c) flexible edge support