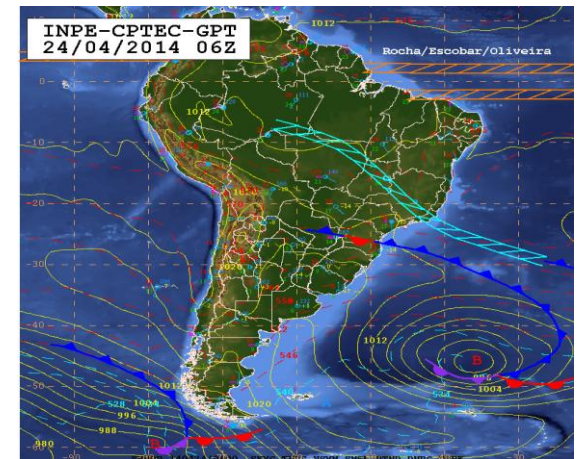


MEDIDAS DE PRESSÃO

Utilizada em inúmeras aplicações. Alguns exemplos:



Conceitos iniciais



- A pressão é dada pela razão entre duas grandezas fundamentais, sendo elas a força e a área.
- Diversas unidades são utilizadas para a medida de pressão. As mais comuns são dadas por uma medida de força por unidade de área ou por uma medida de pressão equivalente a exercida por uma altura de líquido.
- Ex.: N/m^2 (Pa), Pounds per Square Inch ($\text{PSI}=\text{lbf/in}^2$), kgf/cm^2 , bar ($1\text{bar}=10^5\text{Pa}$), mmHg (Torr), mH_2O (ou mca), etc.
- A unidade de pressão do sistema internacional é o Pascal (Pa), definido como: N/m^2

- A pressão em um ponto de um fluido estático é independente da orientação. Assim, a pressão é um escalar e representa o primeiro invariante das tensões mecânicas no fluido

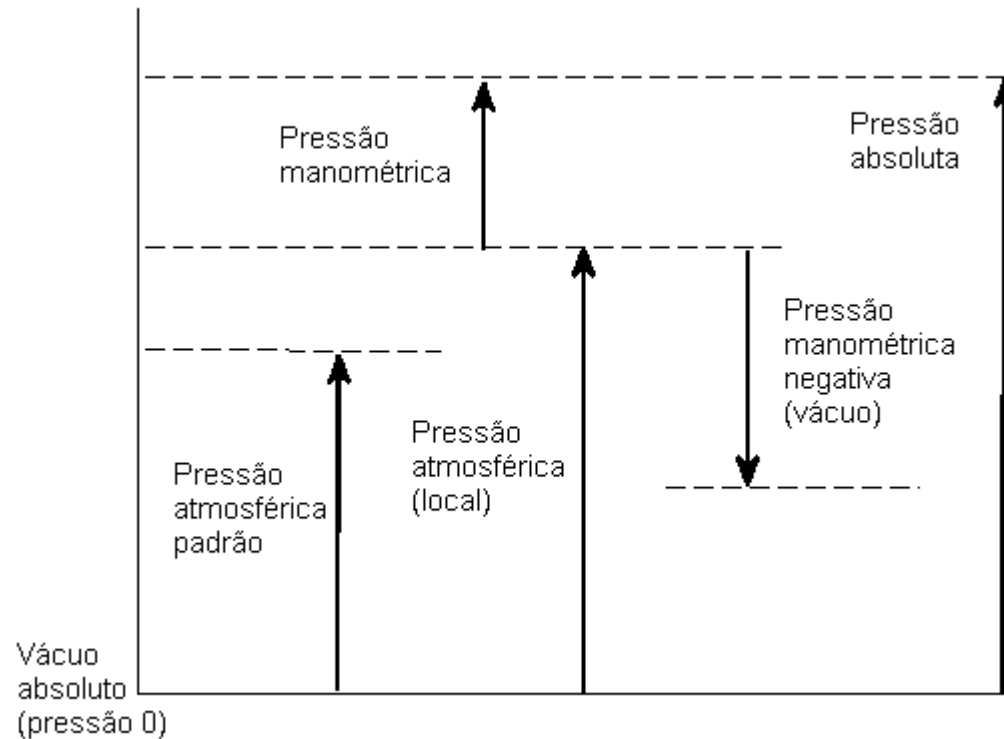
$$\begin{vmatrix} \sigma_X & \tau_{XY} & \tau_{XZ} \\ \tau_{YX} & \sigma_Y & \tau_{YZ} \\ \tau_{ZX} & \tau_{ZY} & \sigma_Z \end{vmatrix}$$

- De acordo com a hipótese de Stokes pode ser definida como sendo a média das tensões normais em um elemento fluido.

$$(\sigma_X + \sigma_Y + \sigma_Z) / 3$$

- Antes de tratarmos dos tipos existentes de medidores de pressão, é importante notar que os valores de pressão devem ser informados com relação a um nível de referência.

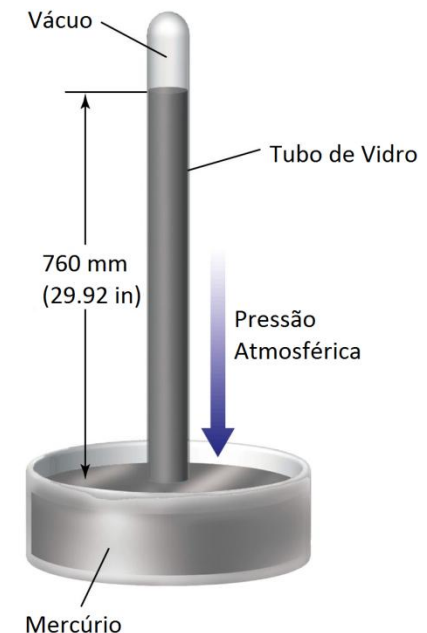
- Escalas de pressão:



- Vácuo absoluto ou pressão zero está relacionado com a ausência de qualquer atividade molecular. O vácuo absoluto não contém molécula alguma.
- Pressão atmosférica padrão: é a pressão sob condições atmosféricas padrão. É definida como sendo 101.325kPa acima do vácuo absoluto. Isso equivale a 1atm, ou 760mmHg.
- Pressão atmosférica local (pressão barométrica): é a pressão atmosférica local medida com um barômetro. Depende, por exemplo, das condições climáticas e da elevação do terreno em relação ao nível do mar.
- Pressão manométrica (positiva e vácuo): é dada em relação a pressão a uma pressão absoluta de referência. Uma pressão de referência comumente utilizada é a pressão a atmosférica local.

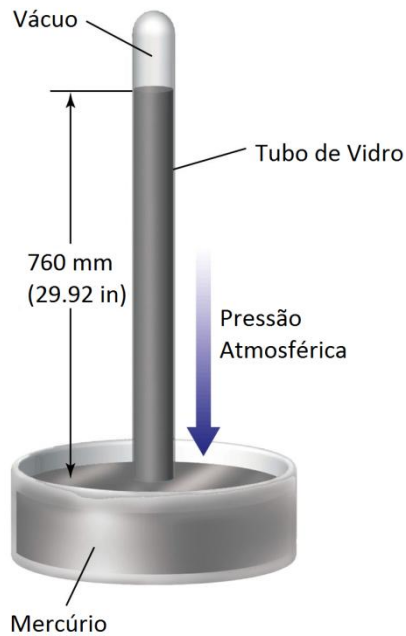
Medidores: Instrumentos de Referência

- Instrumentos de referência são construídos com baixíssima tolerância e utilizados na calibração de outros medidores
- O **barômetro** consiste em um tubo invertido contendo um fluido, e é utilizado para medir a pressão atmosférica.
- Os princípios operacionais são creditados a Torricelli (1644).
- Para criar o barômetro, o tubo é selado em uma das extremidades e evacuado até a pressão zero absoluta. O tubo é então imerso no interior de um reservatório aberto para a pressão atmosférica. Assim, o líquido é forçado a subir no tubo.



- A pressão na extremidade fechada do **barômetro** é menor do que a pressão de vaporização do fluido, de modo que existe uma região que contém vapor. Tipicamente mercúrio é utilizado devido a seu alto peso específico e sua baixa pressão de vapor.
- No equilíbrio:
$$P_{atmosférica} = \rho gh + P_{vapor\ do\ liq}$$
- Como a pressão de vapor do mercúrio é constante para uma determinada temperatura, a variação do nível de líquido está relacionada com pressão atmosférica local.
- Para uma maior exatidão é necessário fazer correções para levar em conta efeitos de temperatura e altitude que modificam a pressão de vapor e o peso específico do mercúrio.
- O alinhamento vertical do equipamento também é importante para medições corretas.

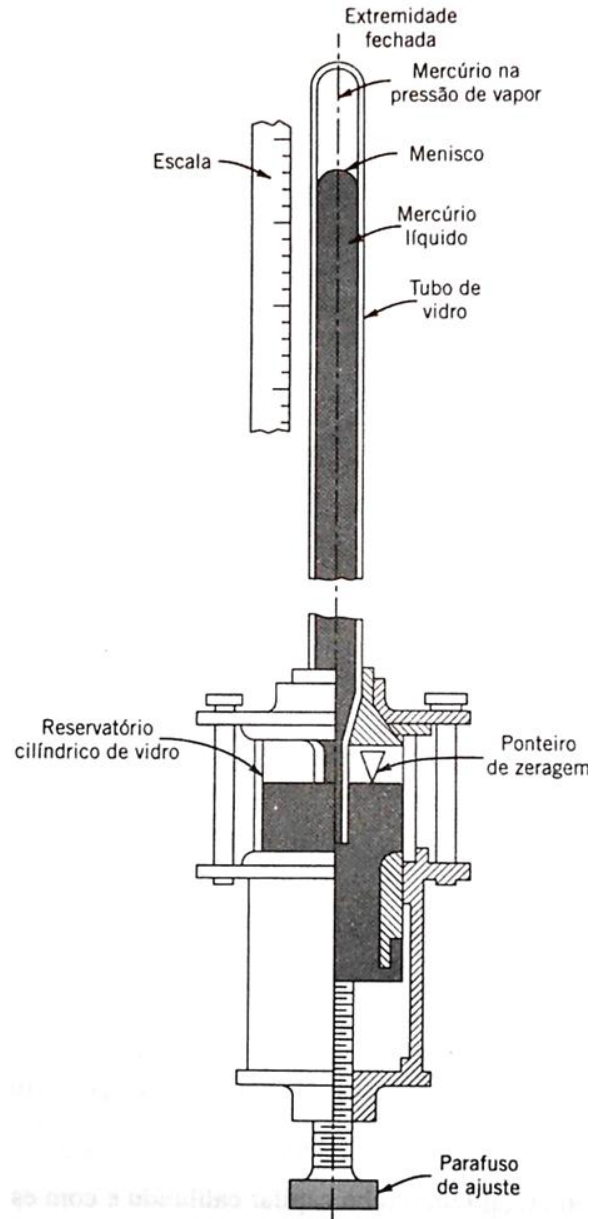
- Configurações típicas



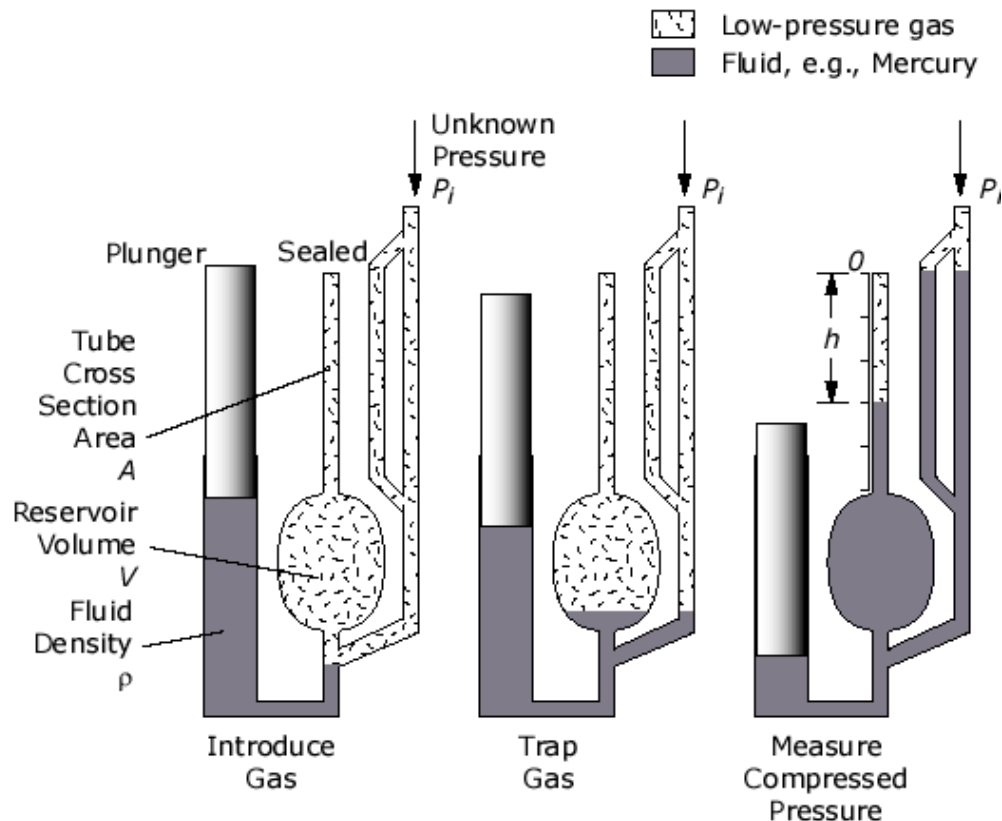
Barômetro Torricelli



Barômetro Fortin



- O manômetro McLeod é um instrumento de laboratório utilizado para estabelecer pressões de gás absolutas da ordem de 0.001 a 10Pa, com incertezas de 0.5 a 3%.



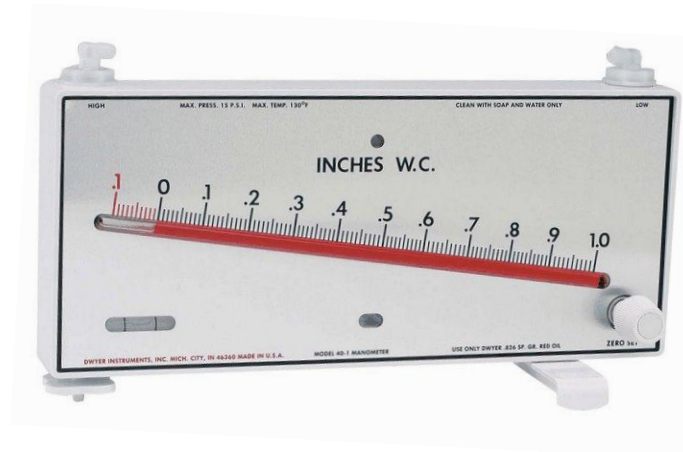
- O **manômetro McLeod** é um instrumento de laboratório utilizado para estabelecer pressões de gás absolutas da ordem de 0.001 a 10Pa.
- Quando o nível de mercúrio está abaixo do reservatório 0, a pressão do gás é p_i e o seu volume V (conhecido da construção do instrumento e igual a $V + Ah_{\text{capilar}}$).
- Quando o êmbolo desce até que o mercúrio seja levantado, atingindo a marca de referência no tubo de comparação (marca 0), o volume ocupado pelo gás no capilar fica sendo $V_2 = Ah$, e sua pressão $p_2 = p_i + \rho gh$.
- Assumindo que a compressão é isotérmica, pode-se dizer que $p_i V = p_2 V_2$.

$$p_i V = (p_i + \rho gh) Ah$$

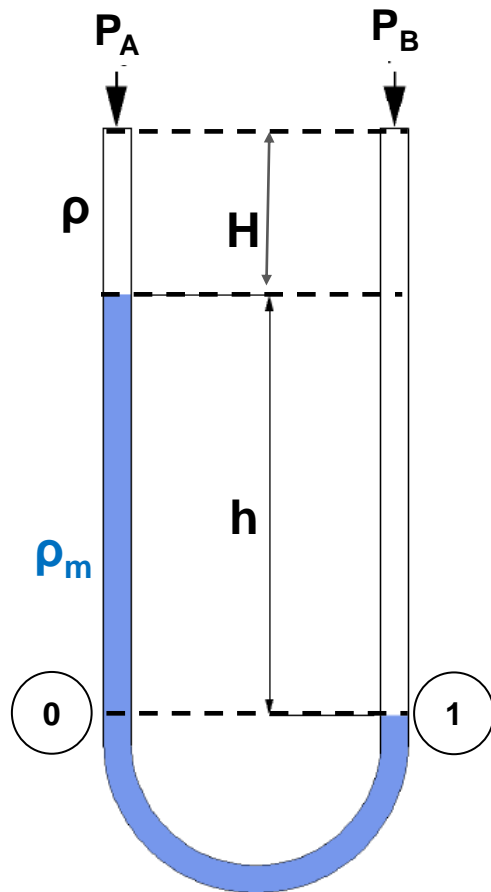
- Rearranjando,

$$p_i = \frac{\rho g Ah^2}{V - Ah}$$

- **Manômetro** é utilizado para medir diferença de pressão com base na relação entre pressão e altura de carga hidrostática equivalente de um fluido.
- Existem diferentes variações de projeto deste equipamento, permitindo medições na faixa de 0.001mm até vários metros de altura de fluido manométrico.



- **Manômetro de tubo em U** consiste em um tubo transparente, dobrado em U, cheio com um fluido indicador de massa específica ρ_m .



-As pressões P_A e P_B , aplicadas nas superfícies livres do líquido, causam um deslocamento da coluna de líquido de acordo com a diferença entre P_A e P_B .

-Utilizando conceitos de hidrostática, podemos facilmente modelar esse equipamento.

-No ponto 0) $P_0 = P_A + \rho g H + \rho_m g h$

-No ponto 1) $P_1 = P_B + \rho g H + \rho g h$

-Como a pressão nos pontos 1 e 2 são iguais, pode-se igualar as equações.

$$P_A + \rho g H + \rho_m g h = P_B + \rho g H + \rho g h$$

$$P_B - P_A = (\rho_m - \rho) g h$$

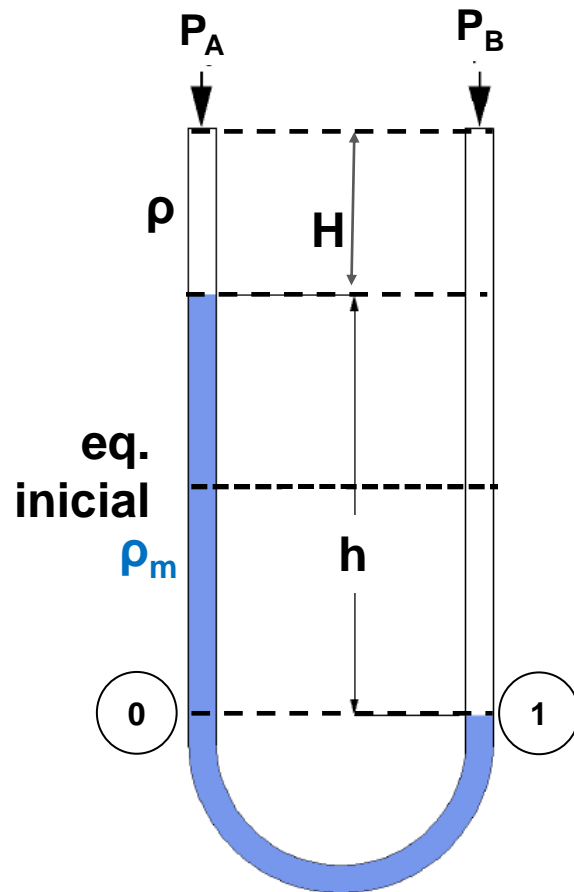
- Manômetro de tubo em U consiste em um tubo transparente, dobrado em U, cheio com um fluido indicador de massa específica ρ_m .

$$P_B - P_A = (\rho_m - \rho)gh$$

-A sensibilidade do equipamento é dada por:

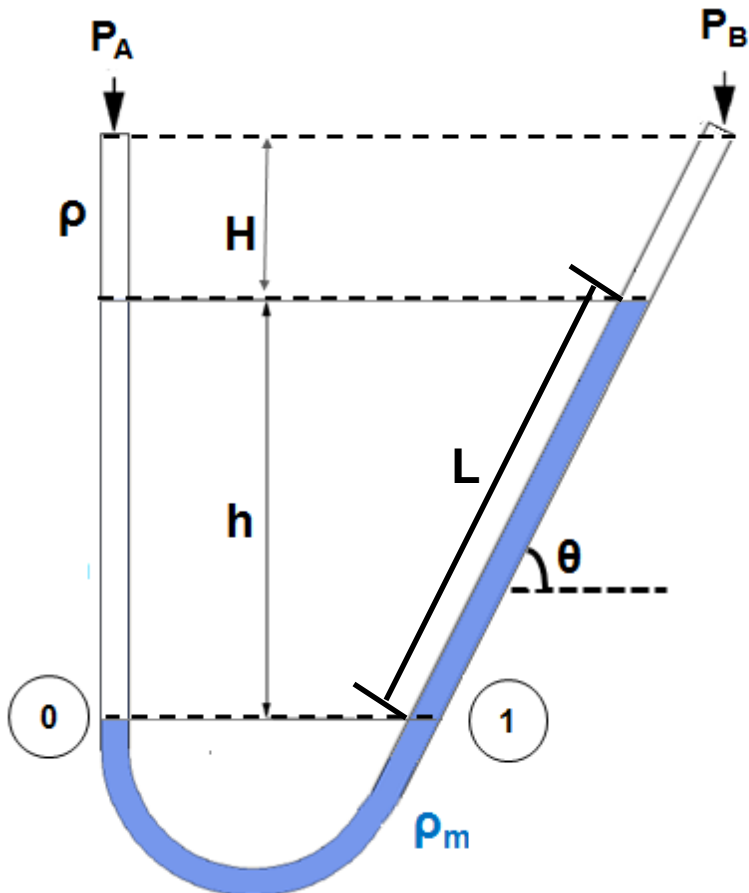
$$K = 1/(\rho_m - \rho)$$

-Logo, para maximizar a sensibilidade do equipamento deve-se escolher um fluido manométrico que minimize a diferença de massas específicas, e que não seja solvente do fluido de trabalho



- **Manômetro de tubo em U.**
- Algumas correções podem ser aplicadas às leituras dos manômetros. A variação da massa específica dos fluidos com a temperatura é uma delas.
- Efeitos de capilaridade podem ser corrigidos, mas normalmente o uso de tubos com diâmetros suficientemente grandes é suficiente para desprezar esses efeitos.
- Cuidado especial deve ser tomado com a utilização de misturas de fluidos.
- A evaporação diferenciada dos componentes da mistura pode alterar sua massa específica. Na verdade deve-se evitar misturas de fluidos nas medidas onde se espera maior exatidão.

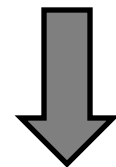
- **Manômetro de tubo em U inclinado** O manômetro de tubo em U inclinado opera de acordo com o mesmo princípio que se aplica ao manômetro em U normal. Porém, com maior sensibilidade, pela inclinação de um dos ramos do tubo, que produz um deslocamento maior para um dado valor da coluna vertical de fluido.



-sensibilidade do manômetro aumenta conforme diminui o ângulo θ .

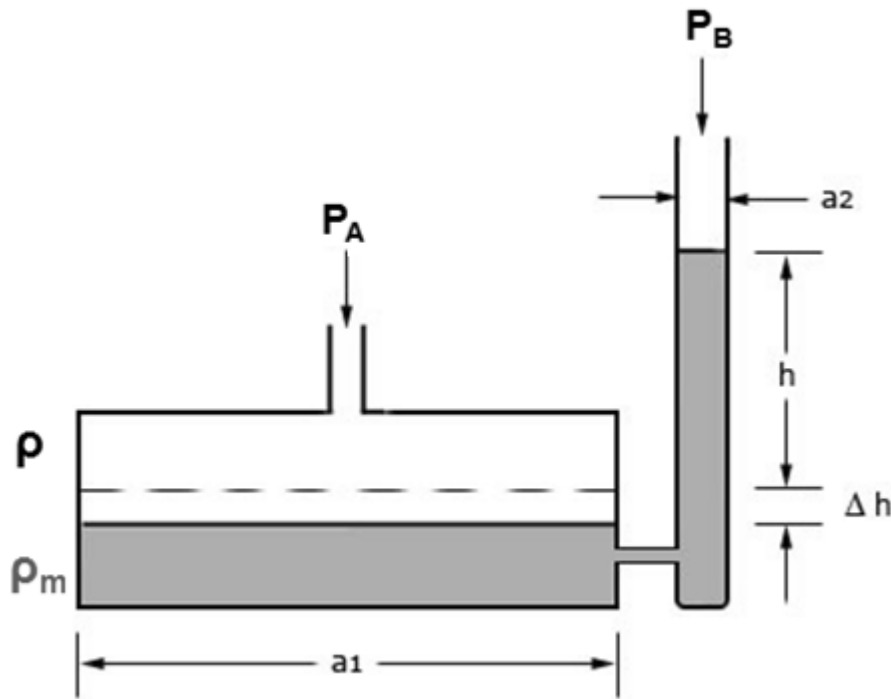
-A distância vertical h entre o nível de líquido nos dois ramos do manômetro é obtida do seguinte equacionamento:

$$P_A + \rho g H + \rho g h = P_B + \rho g H + \rho_m g [L \cdot \underbrace{\text{sen} \theta}_h]$$



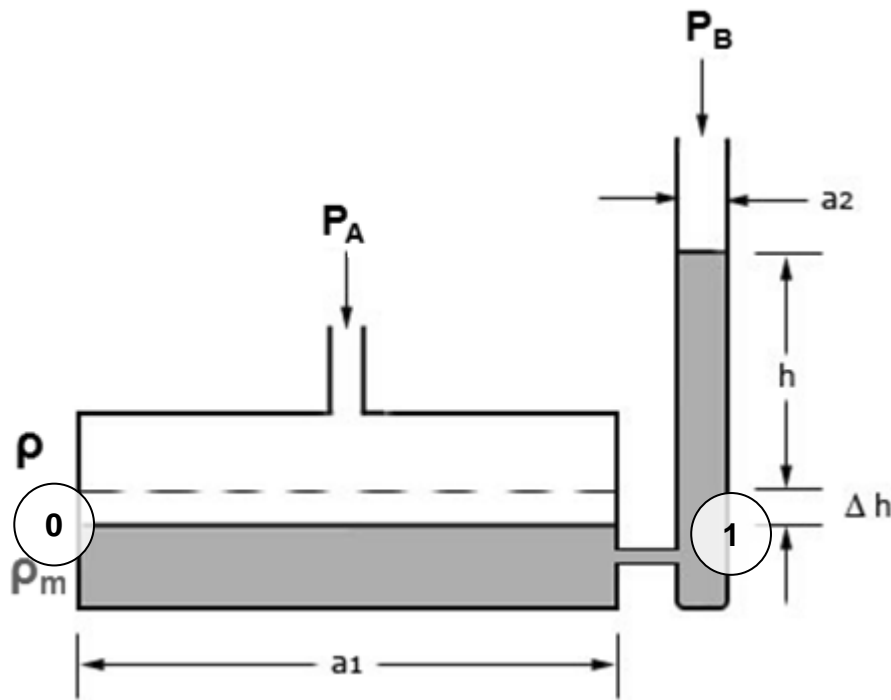
$$\Delta P = (\rho_m - \rho) g L \cdot \text{sen}(\theta)$$

- Manômetro de poço.
- O manômetro de poço funciona da mesma maneira que um manômetro tipo U. A construção é que difere um pouco de um manômetro U simples.



- Manômetro de poço.

- O manômetro de poço funciona da mesma maneira que um manômetro tipo U. A construção é que difere um pouco de um manômetro U simples.



No ponto 0)

$$P_0 = P_A + \rho g(h + \Delta h)$$

No ponto 1)

$$P_1 = P_B + \rho_m g(h + \Delta h)$$

Igualando P1 e P0, tem-se

$$P_A - P_B = g(\rho_m - \rho)(h + \Delta h)$$

Da continuidade, temos que:

$$\Delta h \cdot a_1 = h \cdot a_2 \rightarrow \Delta h = \frac{a_2}{a_1} h$$

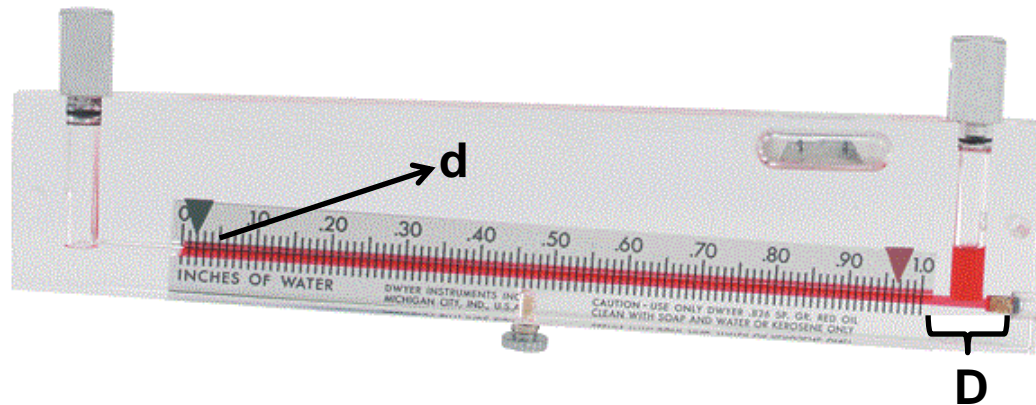
Rearranjando

$$\Delta P = gh(\rho_m - \rho) \left(1 + \frac{a_2}{a_1} \right)$$

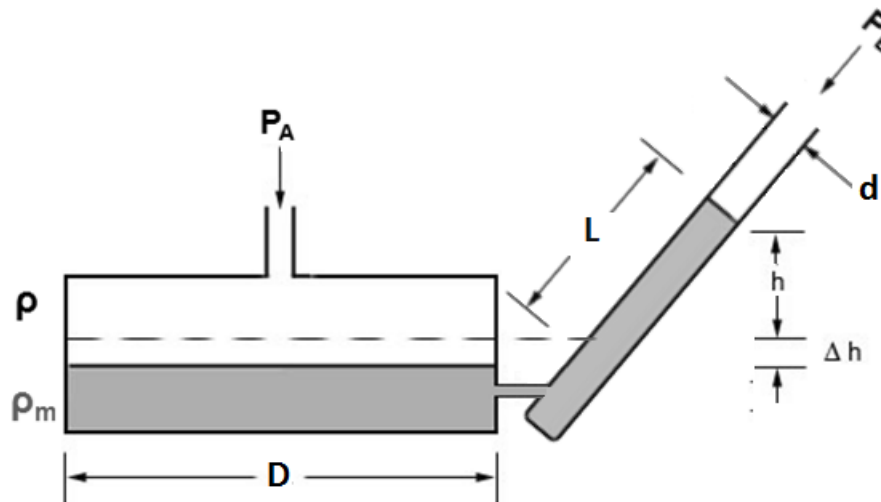
- Manômetro de poço.
- Note que este manômetro tem dependência das áreas, o que não acontece com o tubo em U convencional.
- Pode-se projetar o manômetro de tal forma que $a_2 / a_1 \ll 1$.
- A princípio, o ideal é utilizar no lado de leitura da pressão um tubo com diâmetro pequeno. No entanto, existe um limite de redução. Em tubos muito pequenos as forças de capilaridade passam a ser importantes e podem influenciar as medições.
- Os efeitos de capilaridade variam com o fluido utilizado, mas tipicamente em tubos com diâmetros internos maiores do que 5mm esses efeitos são desprezíveis.
- Em geral a incerteza desse tipo de instrumento é da ordem de 0.1% da leitura.

- Exemplo: manômetro de poço inclinado

Dados: $D=35\text{mm}$; $d=5\text{mm}$; $\theta=15^\circ$; $\rho_m=785\text{kg/m}^3$; $\rho=1.018\text{kg/m}^3$

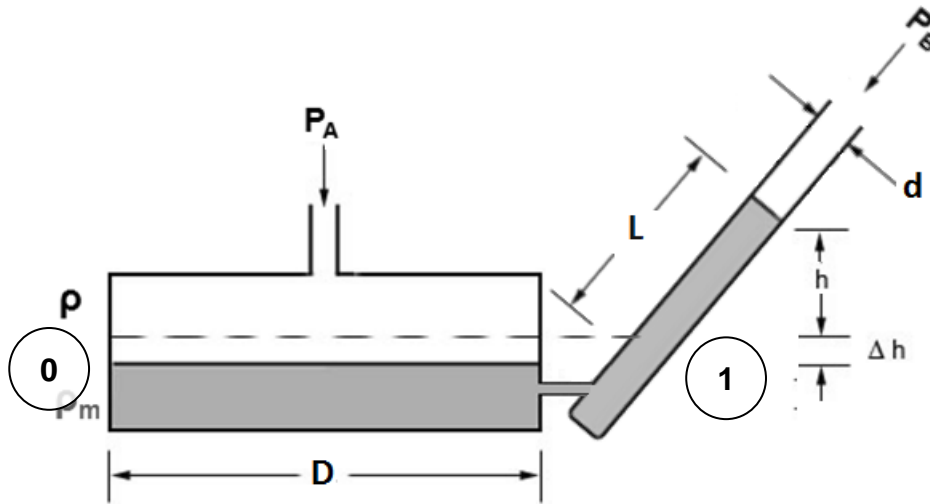


- Desenho esquemático



- Exemplo: manômetro de poço inclinado

Dados: $D=35\text{mm}$; $d=5\text{mm}$; $\theta=15^\circ$, $\rho_m=785\text{kg/m}^3$; $\rho=1.018\text{kg/m}^3$



Rearranjando

$$\Delta P = gL \text{sen} \theta (\rho_m - \rho) \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right)$$

No ponto 0)

$$P_0 = P_A + \rho g (h + \Delta h)$$

No ponto 1)

$$P_1 = P_B + \rho_m g (L \cdot \text{sen} \theta + \Delta h)$$

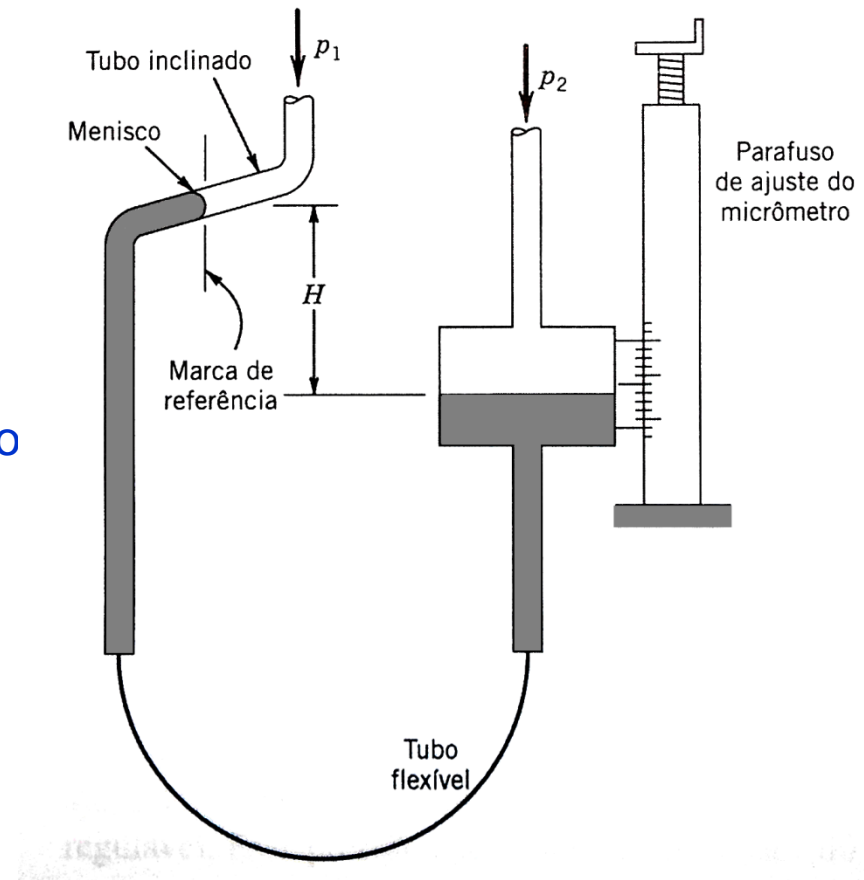
Igualando P1 e P0, tem-se

$$P_A - P_B = g (\rho_m - \rho) (L \cdot \text{sen} \theta + \Delta h)$$

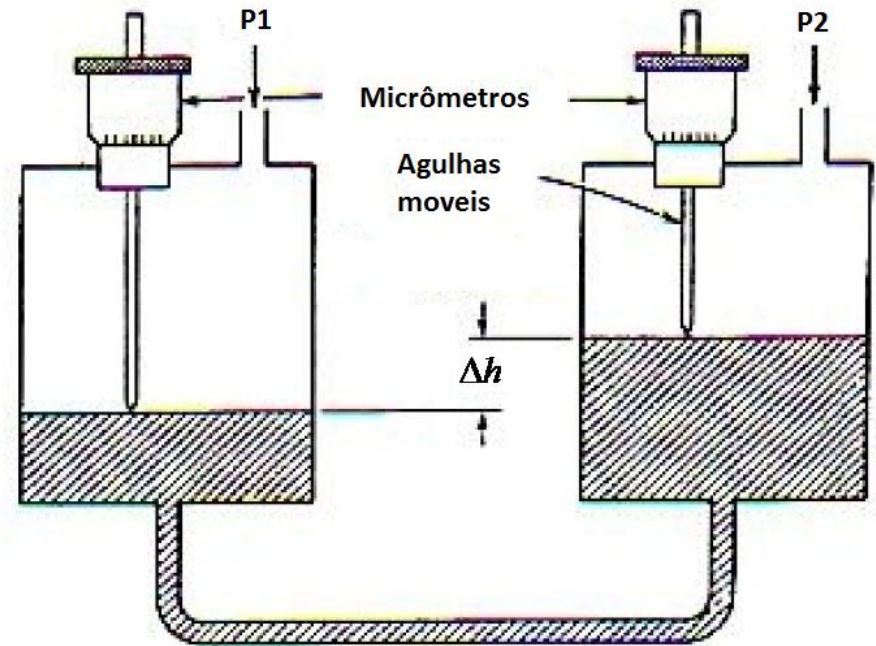
Da continuidade, temos que:

$$\Delta h \cdot \pi d^2 / 4 = h \cdot D^2 / 4 \rightarrow \Delta h = \frac{d^2}{D^2} h$$

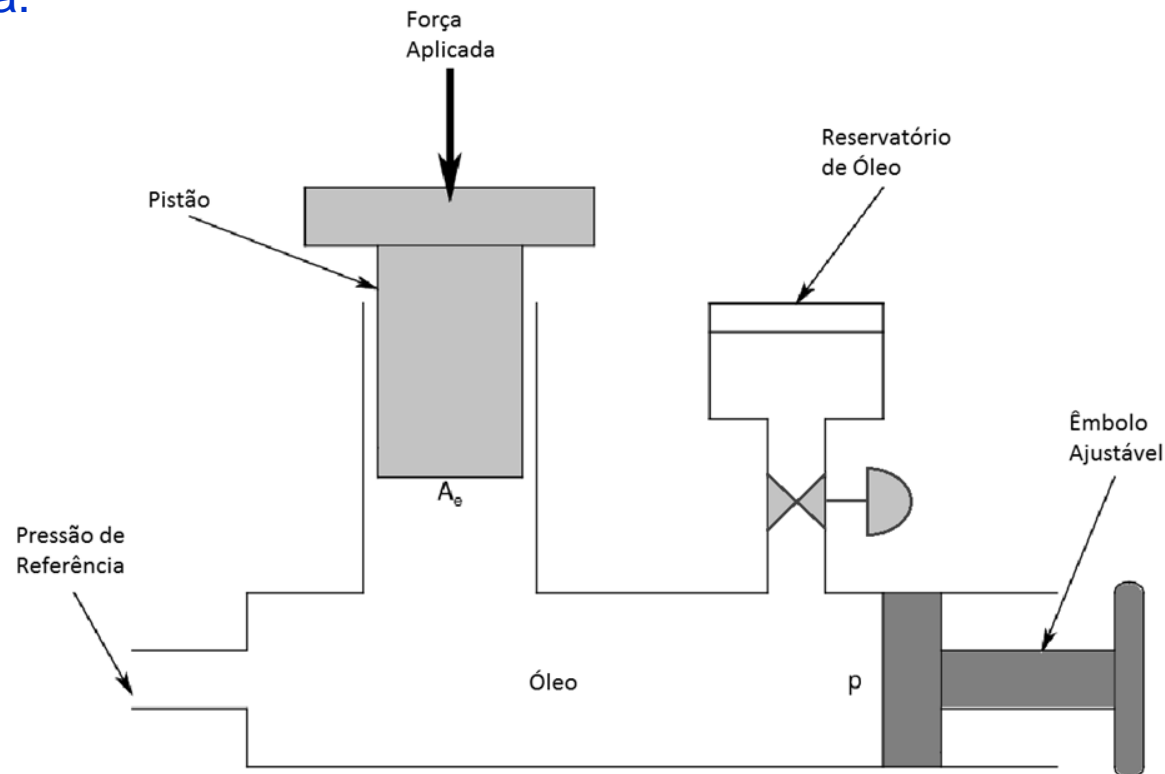
- Micromanômetro.
- São uma variação do manômetro de tubo em U.
- São utilizados para medir diferenças de pressão muito pequenas, em fração de mm de H₂O (da ordem de 10⁻²mmH₂O).
- No micromanômetro o reservatório é movido para cima e para baixo até que o nível do fluido manométrico no interior do reservatório coincida com uma marca de referência.



- Micromanômetro.
- Uma outra variação desse equipamento.
- Nesse equipamento o reservatório é fixo e agulhas movimentadas por micrometros são utilizadas para medir a variação do nível de líquido.



- No caso de medidores de pressão um calibrador muito utilizado é o **calibrador de peso morto**.
- O calibrador de peso morto utiliza a definição de pressão como força por unidade de área para gerar uma pressão conhecida em uma câmara selada.



- A pressão na câmara é dada por:

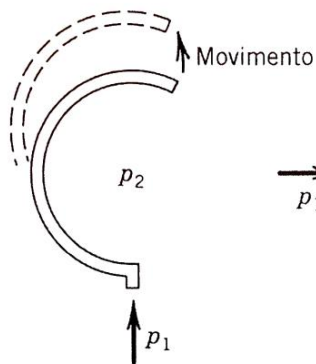
$$p = \frac{F_{Aplicada} + m_{Pistão}g}{A_{Pistão}} + \sum \text{erros}$$

- Alguns dos erros que contribuem para a pressão na câmara do calibrador são: a expansão térmica dos componentes do equipamento, a incerteza das massas e dimensões do pistão, efeitos de cisalhamento das partes móveis, dentre outros.
- Quando correções são aplicadas, a incerteza do instrumento pode ser da ordem de 0.01% da leitura.
- O calibrador de peso morto é tipicamente utilizado na faixa de 70 a 7×10^7 Pa.

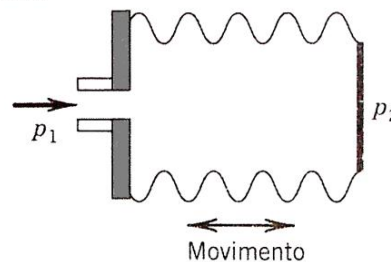
Medidores: Transdutores de pressão

- Um transdutor converte uma pressão medida em um sinal mecânico ou elétrico.
- Tipicamente os sensores de pressão se baseiam na deformação ou deflexão de algum elemento elástico.

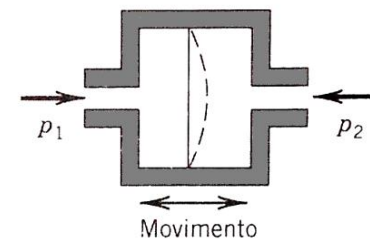
- Dentre os elementos elásticos comuns empregados em instrumentação, destacam-se:



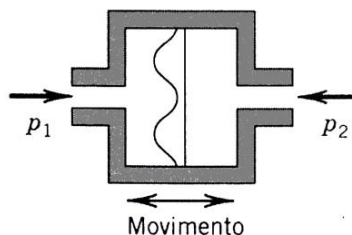
Tubo Bourdon



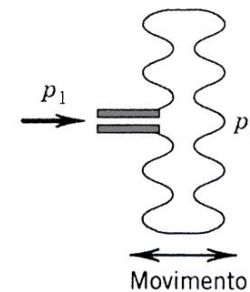
Fole



Diafragma

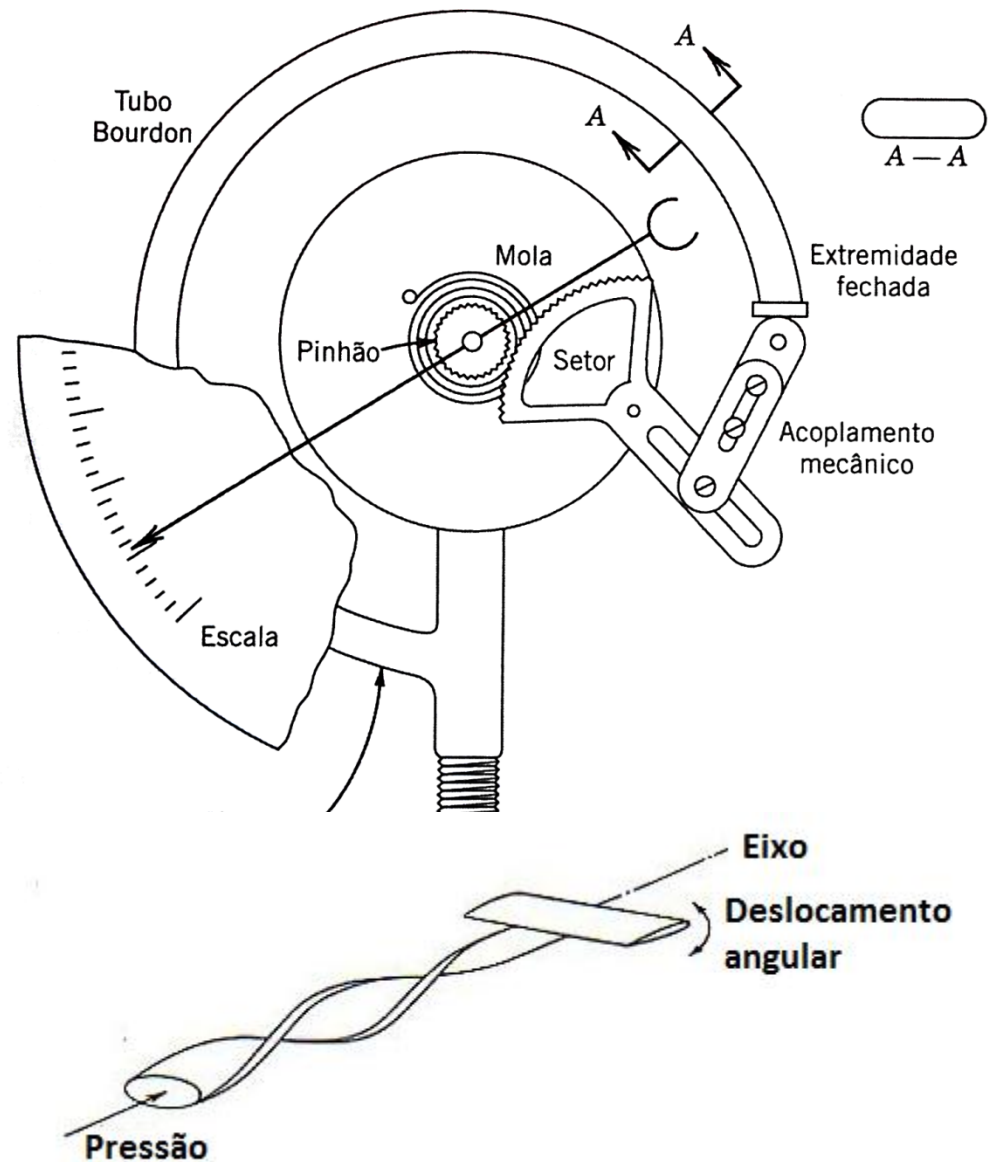


Diafragma corrugado

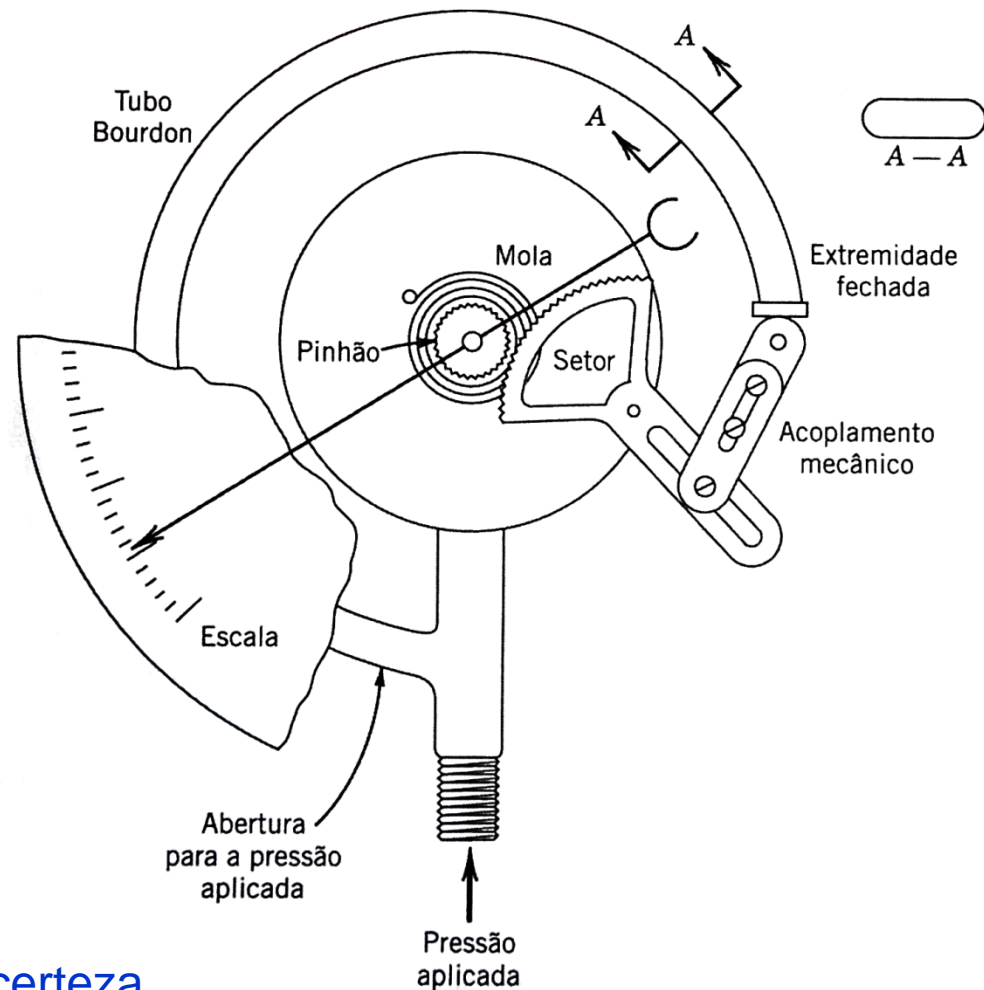


Cápsula

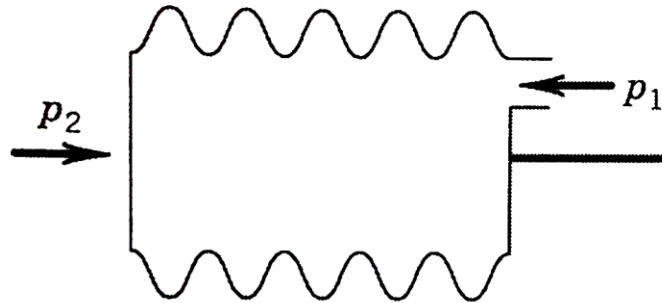
- Tubo de Bourdon
- Indicação de pressão é baseada na deformação de um tubo sujeito a diferença de pressão interna/externa.
- Juntamente com mostrador mecânico é um dos transdutores mais comuns



- Tubo de Bourdon
- O instrumento tem uma faixa em que a pressão está relacionada linearmente com a faixa de rotação do ponteiro
- Existem modelos que podem ser utilizados para pressões altas ou baixas (absoluta, manométrica e diferencial)
- As faixas tipicamente vão de 10^4 a 10^9 Pa (0.01 a 100000Psi)
- Nos melhores manômetros a incerteza pode chegar a 0.1% do fundo de escala, mas normalmente gira em torno de 0.5 a 2%.



- Fole e Cápsula



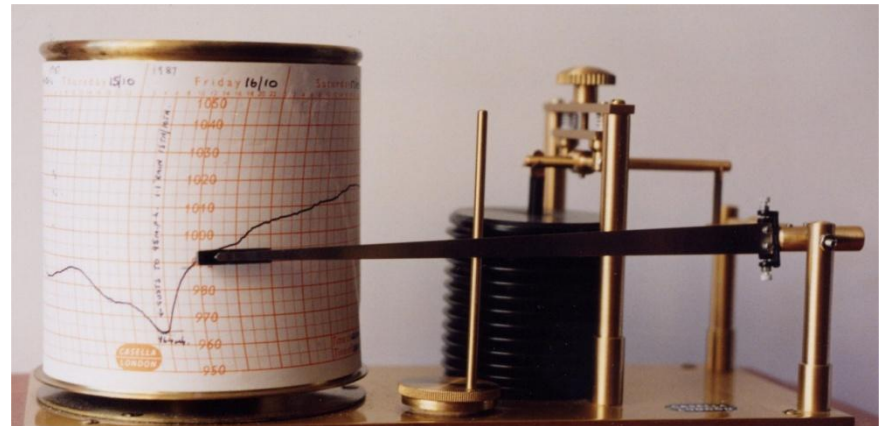
- A diferença entre a pressão externa (p_2) e a interna (p_1) provoca uma variação no comprimento do fole. No sensor de cápsula o princípio é o mesmo.
- Utilizado tipicamente para pressões na faixa de 10^3 a 10^6 Pa.
- O deslocamento do fole pode ser usado para mover um potenciômetro, por exemplo ou um LVDT (*linear variable displacement transducer*).

- Fole e Cápsula

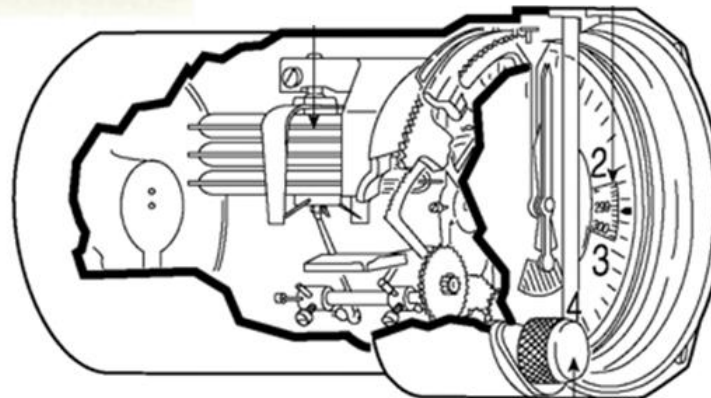
- Ex.:



Barômetro digital



Barógrafo

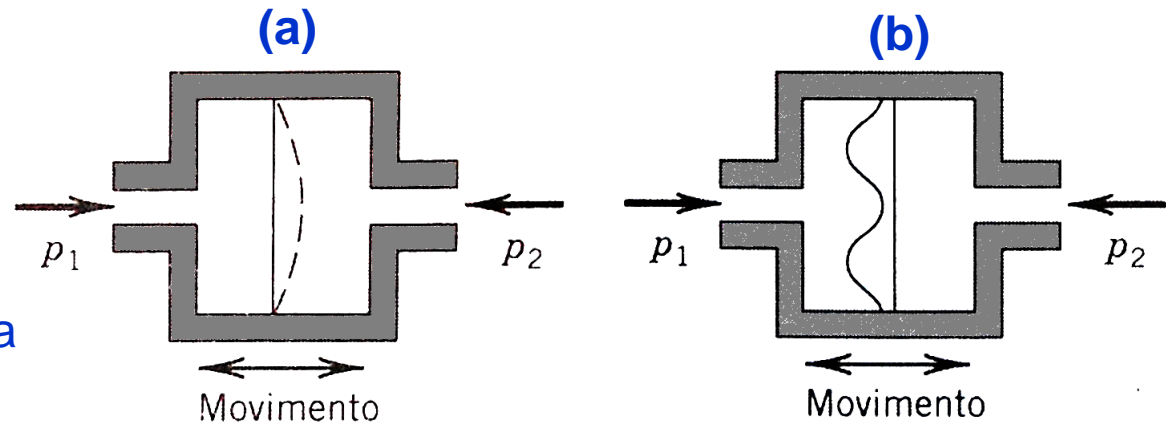


Altímetro de avião



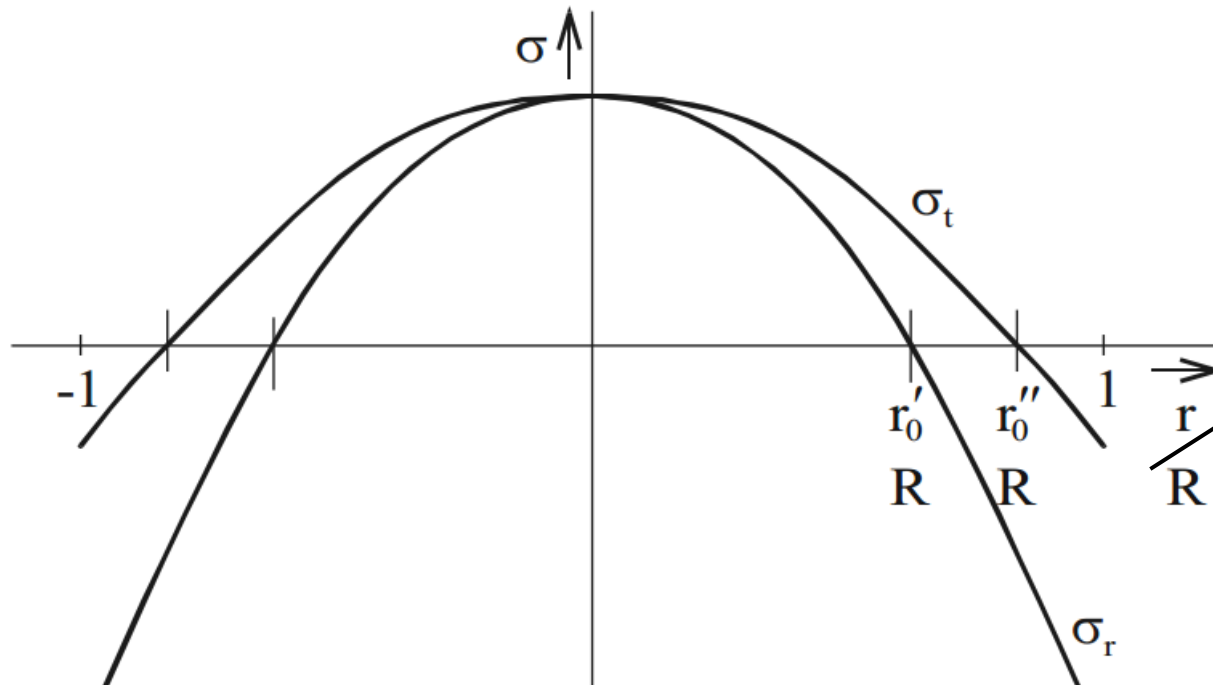
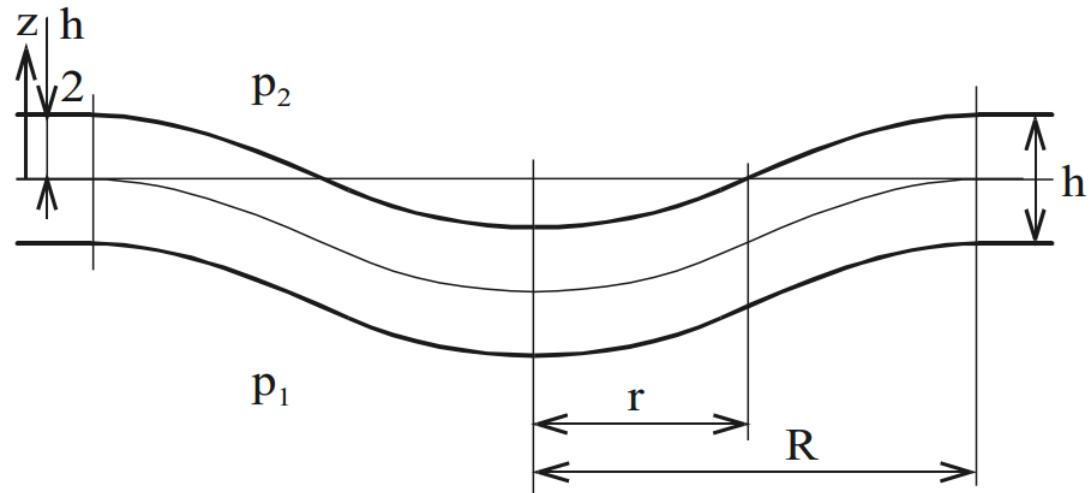
- Diafragma

- O diferencial de pressão entre os lados do diafragma causa deformação



- O valor da deformação é proporcional à diferença de pressão
- Diafragmas de membrana lisa Fig.(a) e corrugada são comuns Fig.(b). Membranas corrugadas são utilizadas para medição de pressões mais elevadas, pois possuem maior rigidez.
- São adequados para medição de pressão estática e dinâmica pois a inércia e o amortecimento das membranas são pequenos. Assim a resposta em frequência é alta.
- Utilizado tipicamente para pressões na faixa de 10^2 a 10^8 Pa

- Diafragma
- Local onde os sensores estão localizados é importante
- Medição da deformação da membrana



$$\sigma_r = f_r(r/R)$$

$$\sigma_t = f_t(r/R)$$

- Transdutores comuns utilizados para transformar a medição de deformação em sinal elétrico

-Strain gauges: Método mais comum para conversão do deslocamento do diafragma em um sinal elétrico mensurável. Se baseia na variação da resistência de sensores com a deformação. São sensíveis a variação de temperatura.

-Capacitância: Utilizado em instrumentos de alta precisão além de possuir faixa de operação alta. Também é sensível a variações de temperatura.

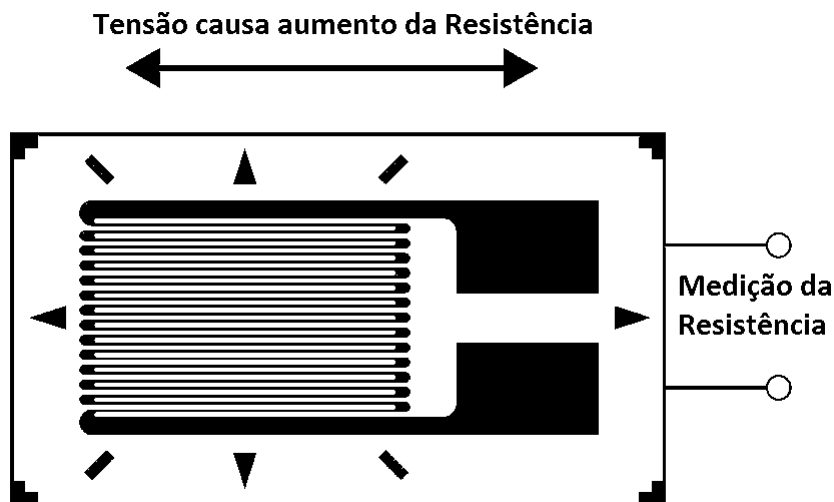
-Relutância magnética e LVDT's (*linear variable displacement transducer*): Utilizado para baixas pressões.

-Piezoelétricos: Usado para medição de transientes de pressão.

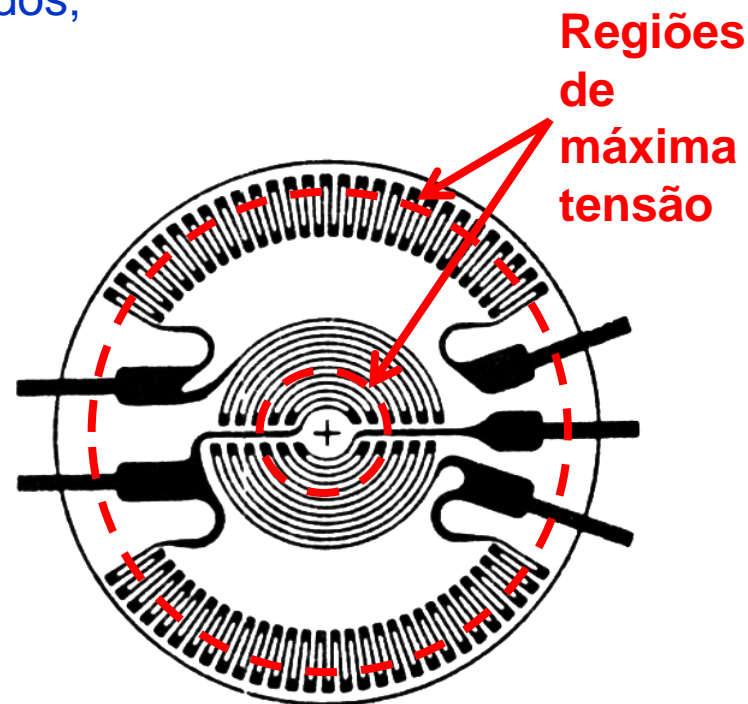
-etc.

- Sensores com Strain Gauges

- A resistência dos sensores é proporcional a deformação;
- Devem ser fixados sobre a superfície (normalmente colados);
- Pode ser usado em contato com líquidos;



Strain gauge para deformação em uma direção

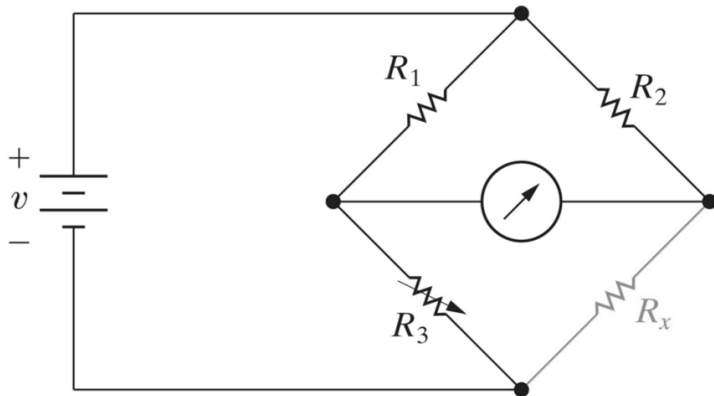


Roseta para deformação radial 37

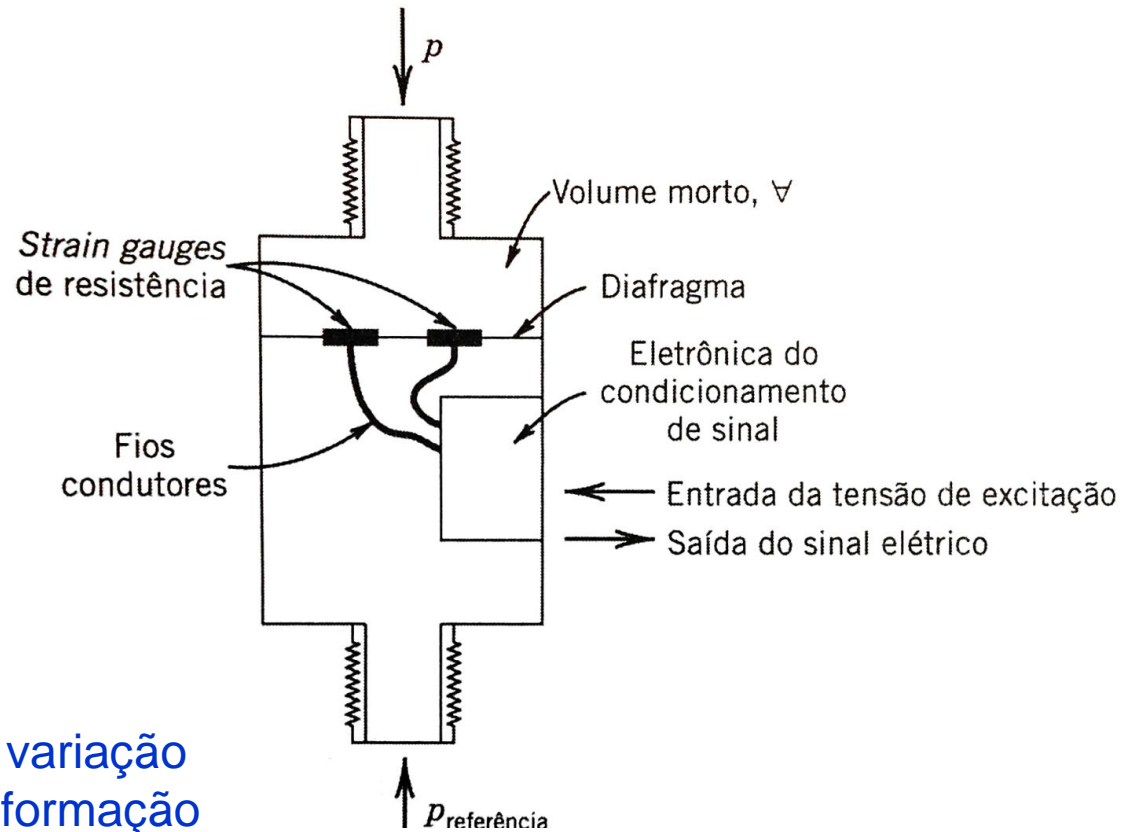
- Sensores com Strain Gauges

-Desenho esquemático de transdutor de diafragma com strain gauges

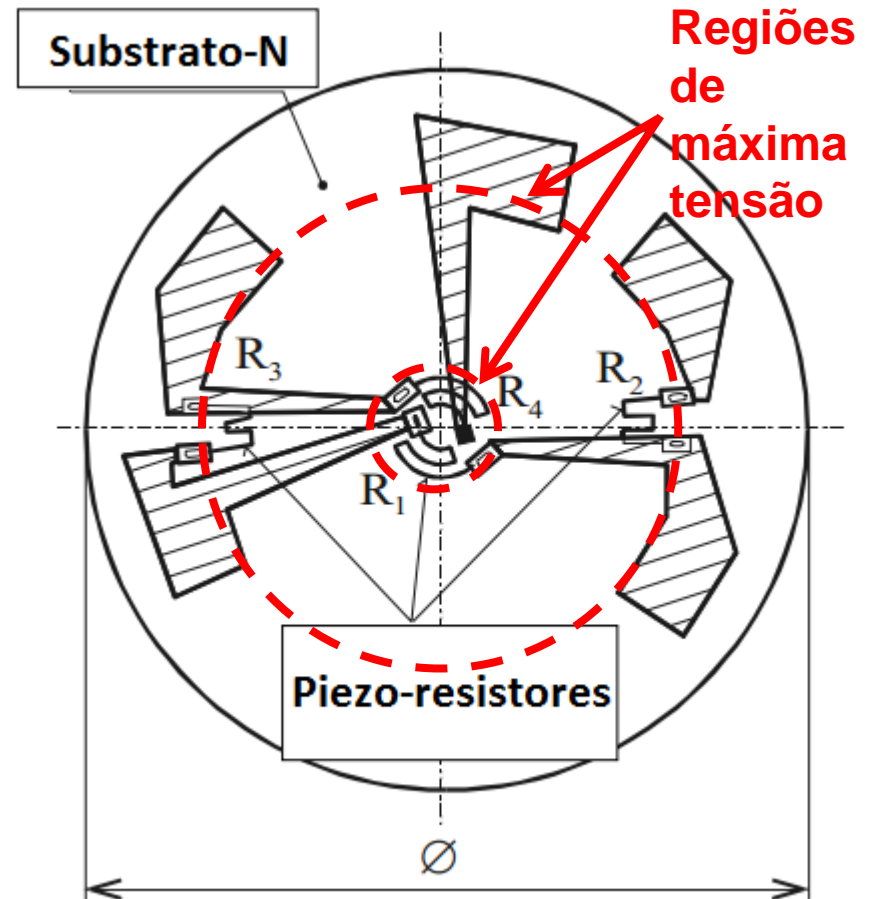
Ponte de WheatStone



-Circuito para leitura da variação de resistência com a deformação

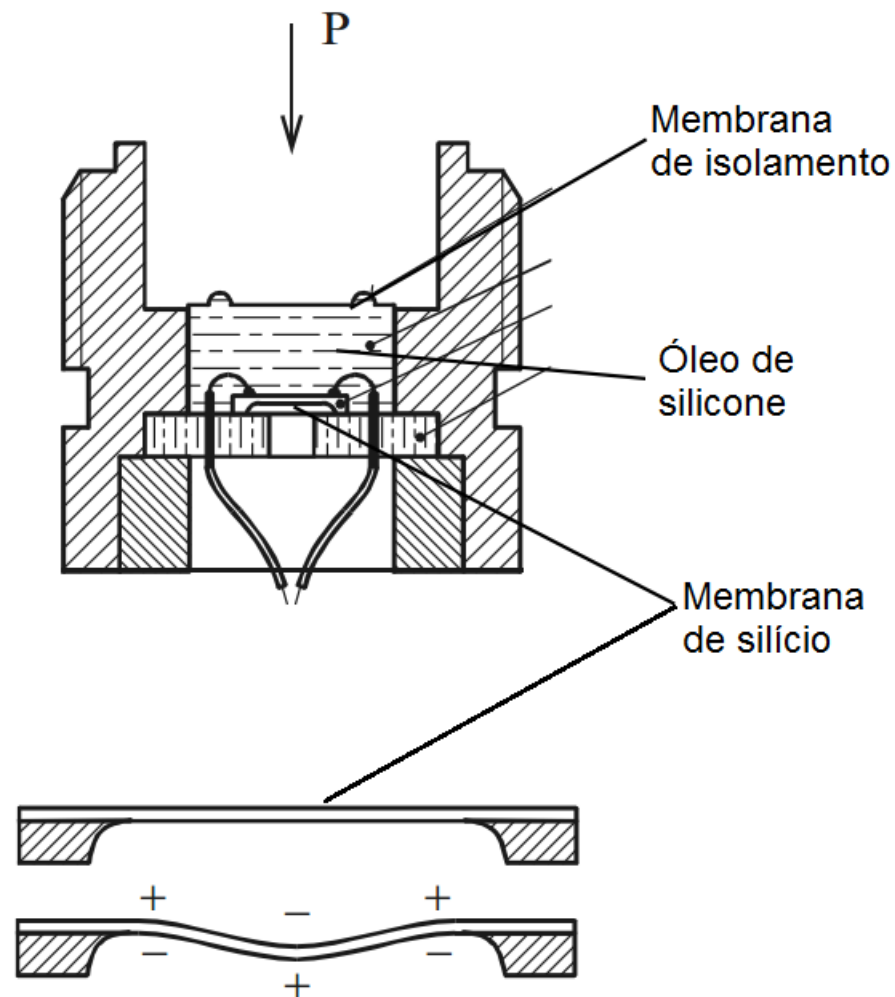


- Sensores Piezoresistivos
- Utiliza semi-condutores que possuem a propriedade de variação da resistência com a deformação.
- Construídos com tecnologia de circuitos integrados (pequenos);
- Baratos;



- Sensores Piezoresistivos Imersos em Líquidos

- Arranjo típico de sensores para medição em fluidos
- Necessário isolamento dos semicondutores
- Normalmente utiliza-se óleo de silicone como meio isolante. (transmite pressão e isola eletricamente)

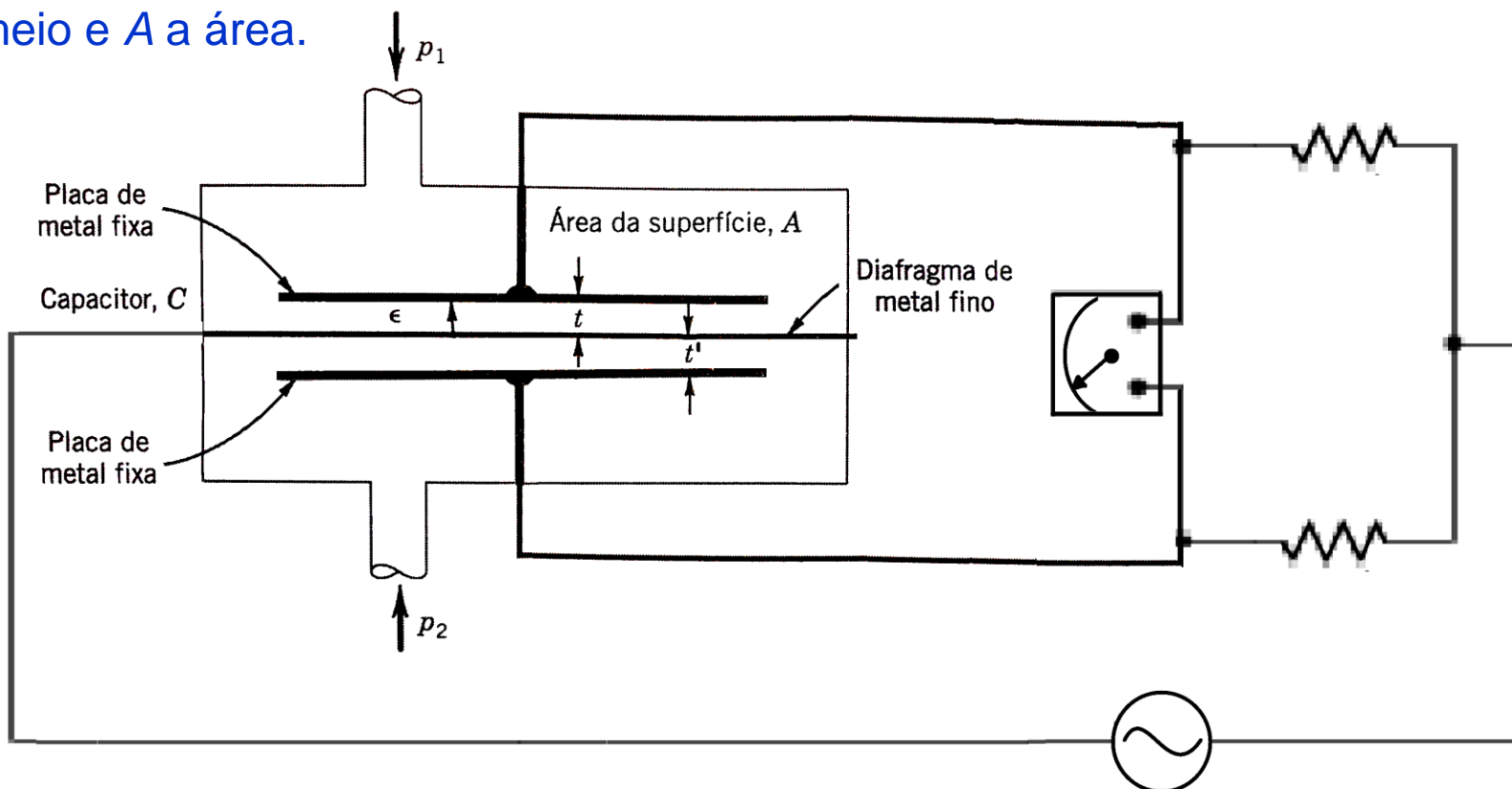


- Sensores Capacitivos

- Capacitância entre duas placas paralelas separadas por uma distância t , é dada por:

$$C = c\epsilon A/t$$

onde c é uma contante de proporcionalidade, ϵ a constante dielétrica do meio e A a área.



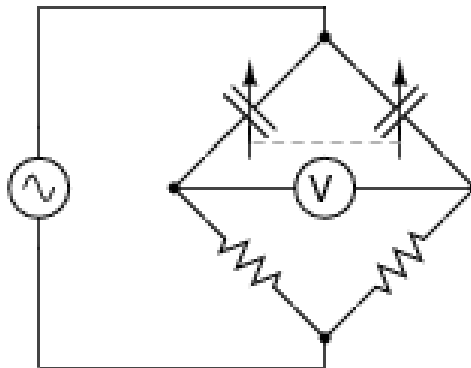
- Sensores Capacitivos

- Capacitância entre duas placas paralelas separadas por uma distância t , é dada por:

$$C = c\epsilon A / t$$

onde c é uma contante de proporcionalidade, ϵ a constante dielétrica do meio e A a área.

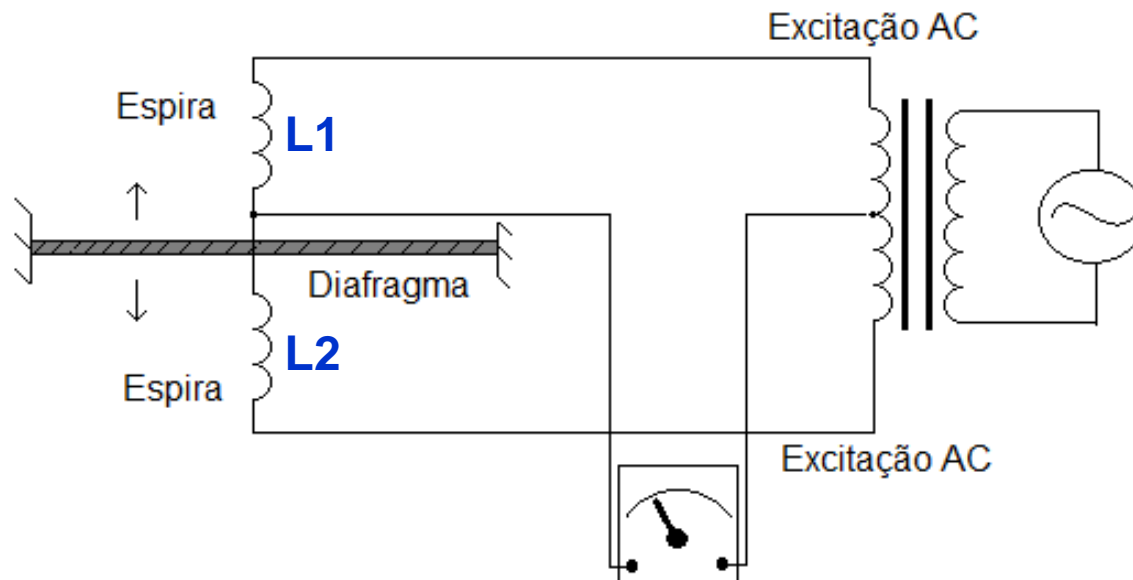
Diagrama esquemático



- Sensores de Capacitivos
- Possuem boa exatidão, linearidade, histerese, repetibilidade e estabilidade.
- Têm a desvantagem de serem sensíveis a temperatura e possuírem uma alta impedância de saída. (impedância alta -> corrente baixa, sujeito a interferência de campos magnéticos)
- Suscetíveis a variação da saída com o tempo. Devem ser recalibrados após longos períodos de utilização.

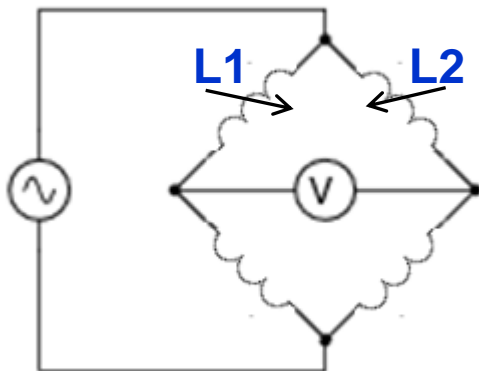


- Sensores de Relutância Magnética
- Utilizados para detectar pequenos deslocamentos folas e membranas.
- Nesse sensor, a indutância mútua de um par de espiras é afetada por mudanças na densidade de fluxo magnético causadas pela deflexão de uma mebrana metálica localizada entre as espiras.

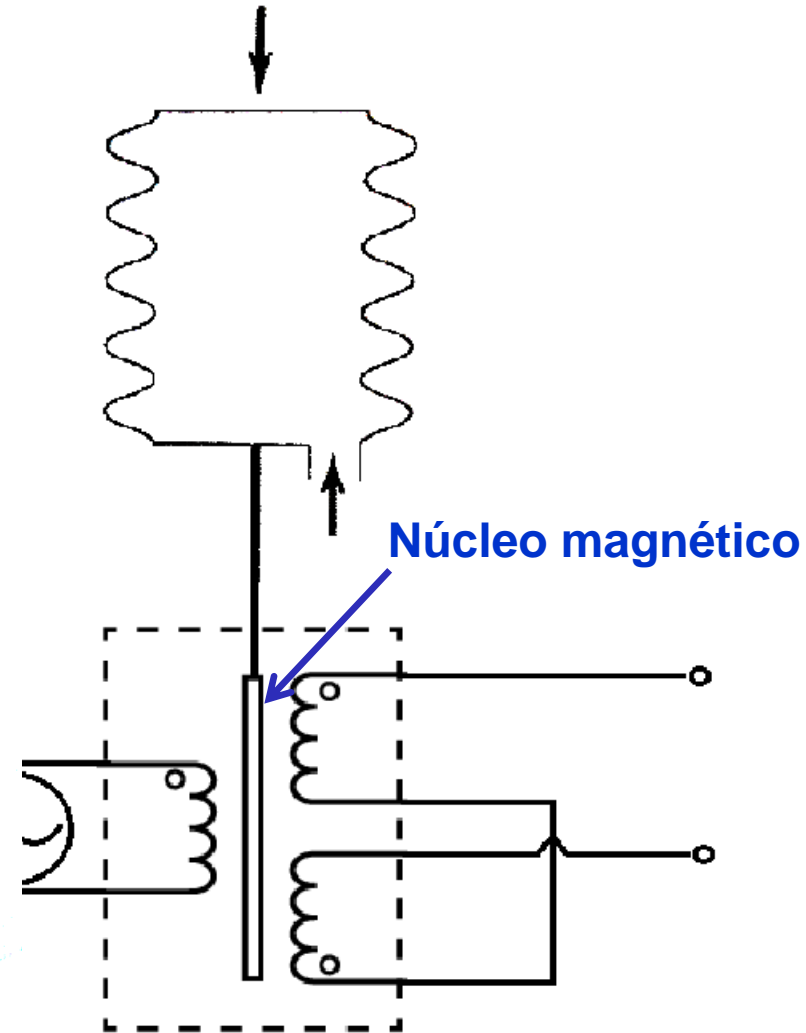
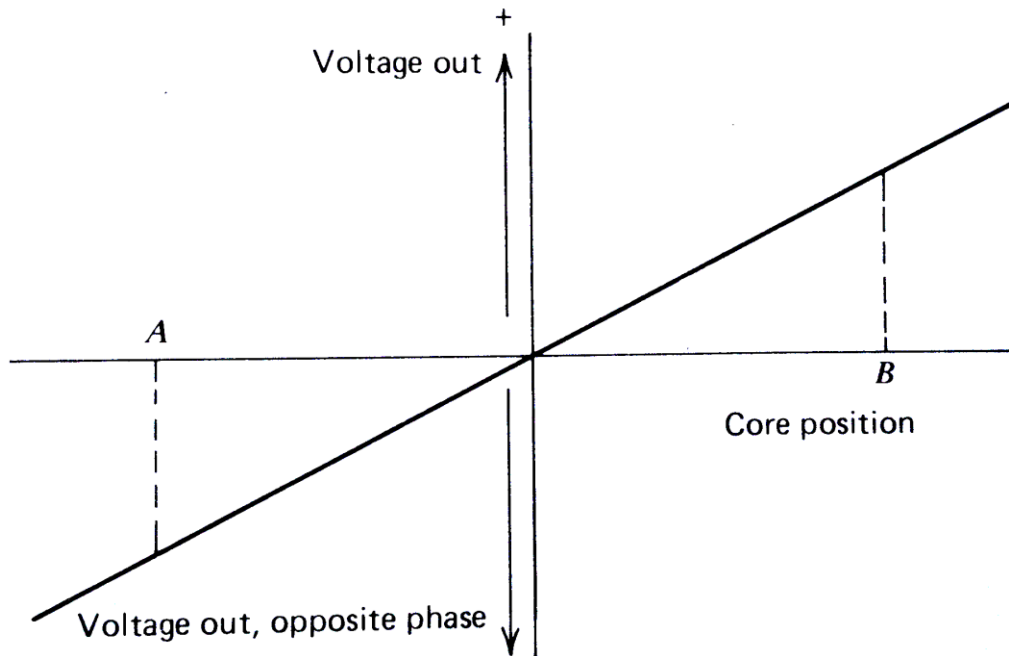


- Sensores de Relutância Magnética
- São normalmente utilizados para pressões muito baixas ou muito altas.
- Possuem uma saída elevada, o que confere uma boa resolução.
- Construção robusta.
- Não suportam sobrepressões elevadas.

Diagrama esquemático



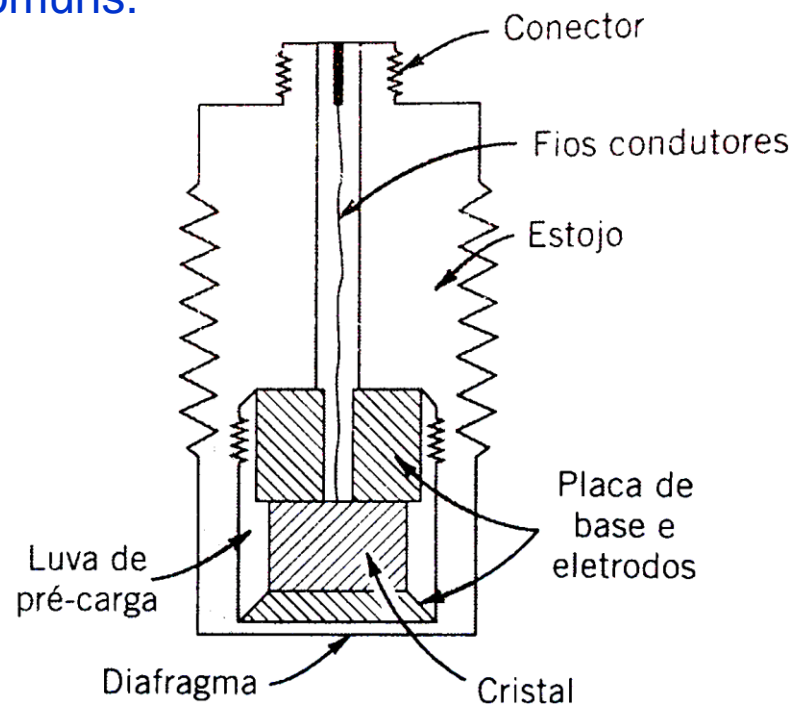
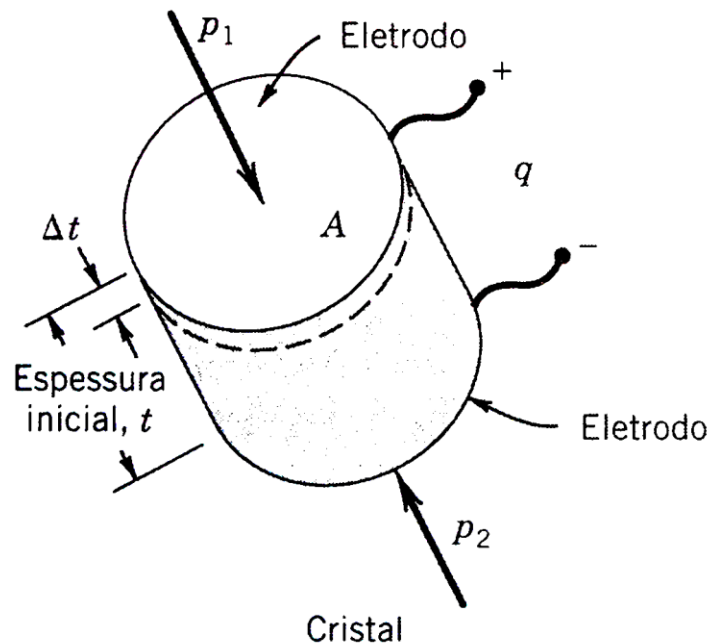
- Sensores com LVDT's



Desenho esquemático de sensor de pressão com LVDT

- Sensores Piezoelétricos

- Cristais piezoelétricos são utilizados para medições dinâmicas.
- Um cristal piezoelétrico sob tensão mecânica desenvolve uma carga superficial proporcional a força que provoca a deformação.
- Cristais de quartzo são os mais comuns.



- Tinta sensível a pressão (Pressure Sensitive Paint –PSP):
- O método é baseado na variação da irradiação de luz de algumas moléculas fluorescentes na presença de oxigênio. A razão entre a emissão de luz em diferentes partes de um modelo em túnel de vento acaba sendo uma função da concentração de oxigênio na superfície desse modelo.
- No caso convencional onde se utilizam tomadas de pressão é possível obter informação de pressão somente nos pontos onde as tomadas são colocadas, já no método da tinta sensível a pressão toda superfície do modelo pode ser resolvida.
- A fluorescência das partículas também é sujeita a variações de temperatura e concentração de oxigênio do ar, portanto fica difícil de se obter grande resolução. Por isso ele é mais aplicado em casos onde há elevadas diferenças de pressão no corpo, como no caso de escoamentos com alta velocidade.

- Tinta sensível a pressão (Pressure Sensitive Paint –PSP):

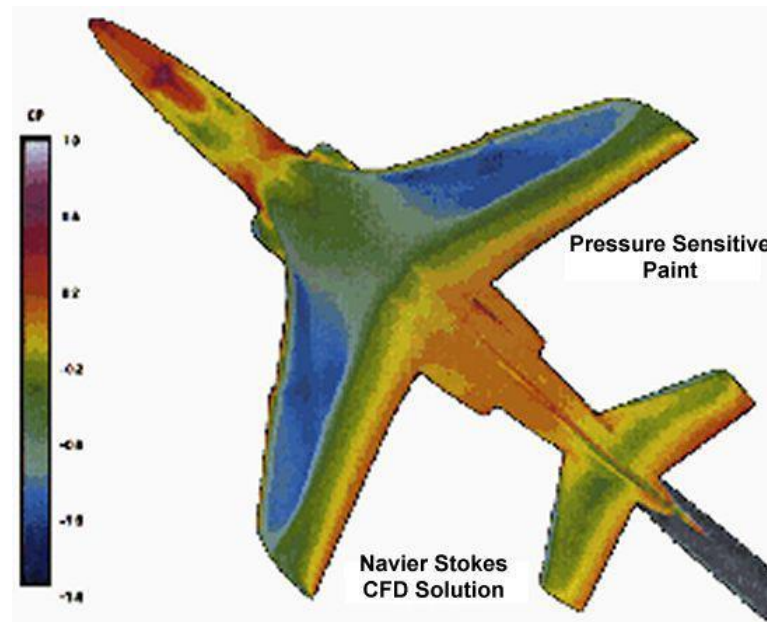


Figura: Campo de pressão em uma aeronave obtido através de simulação numérica CFD (esquerda) e modelo testado em túnel de vento com PSP (direita).

- Transdutor de Bridgman

Sabe-se que a resistência elétrica de fios finos varia com a pressão linearmente, de acordo com

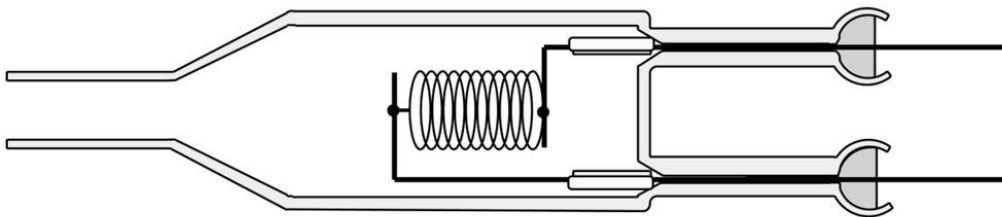
$$R = R_1 (1 + b\Delta p)$$

- Onde R_1 : resistência de 1 atm, b : coeficiente de variação da resistência com a pressão, Δp : pressão aplicada no medidor
- O transdutor baseado neste princípio é conhecido como transdutor de Bridgman e pode ser usado para medir pressões de até 100 000 atm com excepcional resposta transiente. A variação de resistência é medida com uma ponte do tipo Wheatstone.



Ex. de utilização em prensas hidráulicas para estudo de propriedades dos materiais submetidos a altíssimas pressões

- Transdutor do tipo Pirani
- Quando a pressão de um gás é baixa, o caminho livre médio entre colisões moleculares é grande.
- Nesta faixa de pressões, a teoria cinética dos gases prevê uma relação linear entre pressão e condutividade térmica do gás. O medidor tipo Pirani faz uso deste efeito, detectando a variação da resistência elétrica de um fio devido à variação de temperatura causada pela variação da condutividade do gás.



-Transdutor do tipo Pirani

- Uma fonte de calor é utilizada para que a variação da temperatura no filamento seja função somente da variação de pressão.
- Para aumentar a sensibilidade do medidor normalmente utiliza-se um medidor de referência isolado sob um pressão conhecida.
- O arranjo com ponte de WheatStone é bastante utilizado.

