

# SUMÁRIO

<b>1 - PRESSÃO .....</b>	<b>1</b>
2.1 - MEDIÇÃO DE PRESSÃO .....	1
2.2 - PRESSÃO ABSOLUTA .....	1
2.3 - PRESSÃO MANOMÉTRICA OU RELATIVA .....	1
2.4 - PRESSÃO DIFERENCIAL.....	2
2.6 - DIAGRAMA COMPARATIVO.....	2
2.8 - DENSIDADE DE MASSA.....	3
2.9 - PRESSÃO HIDROSTÁTICA .....	3
2.10 – UNIDADES PRÁTICAS DE PRESSÃO.....	4
2.10.1 – mmHg.....	4
2.10.2 – atm .....	5
2.10.3 – mmH <sub>2</sub> O.....	5
2.10.4 – Kg/cm <sup>2</sup> .....	5
2.10.5 – Libra-força por polegada quadrada (psi).....	5
2.11 – PRESSÃO NO INTERIOR DE UM LÍQUIDO EM EQUILÍBRIO.....	6
2.12 – TEOREMA DE STEVIN .....	7
2.12 – MEDIÇÃO DE PRESSÃO COM MANÔMETRO EM U .....	7
2.13 – MEDIÇÃO DE NÍVEL COM MANÔMETRO EM U.....	8
2.14 – EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE .....	9
2.15 – EQUAÇÃO DE BERNOULLI .....	11
2.16 - PRESSÃO DINÂMICA OU CINÉTICA.....	12
2.17- DISPOSITIVOS PARA MEDIÇÃO DE PRESSÃO.....	13
2.17.1 - Tubo de Bourdon .....	13
2.17.2 - Membrana ou Diafragma .....	13
2.17.3 - Fole.....	14
2.11.4 - Coluna de Líquido .....	14
2.11.5 - Tipo Célula Capacitiva.....	16
2.11.6 - Tipo Strain Gauge .....	17
2.11.7 - Tipo Piezoelétrico.....	18
2.11.7 - Sensor por silício ressonante .....	19
<b>EXERCÍCIOS.....</b>	<b>23</b>

# 1 - PRESSÃO

## 2.1 - MEDIÇÃO DE PRESSÃO

A pressão é uma grandeza largamente utilizada na medição de vazão por elementos deprimogênios, de nível, densidade e da própria variável pressão.

É definida como a relação entre a força que atua perpendicularmente à uma superfície e sua área. Pode-se entender a grandeza pressão, a grosso modo, como sendo a densidade superficial de força.

$$P = \frac{F}{A}$$

onde:

P = Pressão [ pascal = Pa ou N/m<sup>2</sup> ]

F = Força [ newton = N ]

A = Área [ m<sup>2</sup> ]

A medição de qualquer grandeza física sempre passa por um subtração, ou seja, sempre toma-se um determinado ponto como referência e se compara os demais em relação a ele. Assim sendo, em função na referência pode-se classificar a medição de pressão como: manométrica, absoluta e diferencial ou relativa.

## 2.2 - PRESSÃO ABSOLUTA

É o resultado da medição da pressão tomando-se o vácuo como referência, ou seja, é a diferença da pressão em um determinado ponto de medição pela pressão do vácuo (zero absoluto). Normalmente quando se indica esta grandeza usa-se a notação ABS. Ex. a pressão absoluta que a atmosfera exerce ao nível do mar é de 760mmHg.

Nota: embora mm seja unidade de comprimento, a notação em mmHg é uma unidade de medição de pressão que equivale à pressão exercida em sua base por um coluna de mercúrio (Hg) com altura de 760mm.

## 2.3 - PRESSÃO MANOMÉTRICA OU RELATIVA

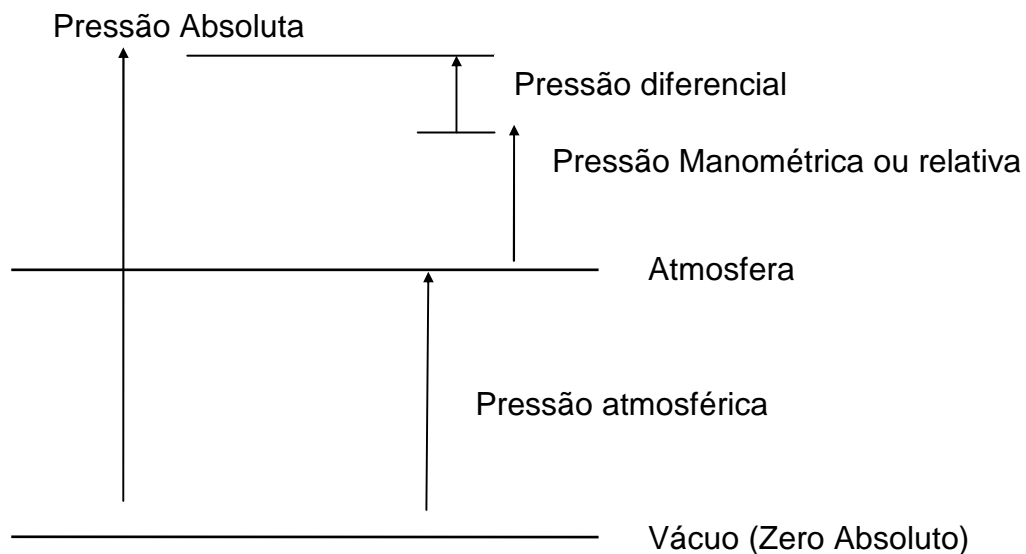
Toma-se a atmosfera como referência. Ou seja, é a diferença entre a pressão absoluta medida em um ponto qualquer e a pressão atmosférica. É sempre importante registrar na notação que a medição é relativa. Ex.: 10Kgf/cm<sup>2</sup> Pressão Relativa.

## 2.4 - PRESSÃO DIFERENCIAL

Quando qualquer ponto diferente do vácuo ou atmosfera é tomado como referência diz-se medir pressão diferencial. Logo, pressão diferencial é a diferença de pressões entre dois pontos quaisquer. Por exemplo, a pressão diferencial encontrada numa placa de orifício.

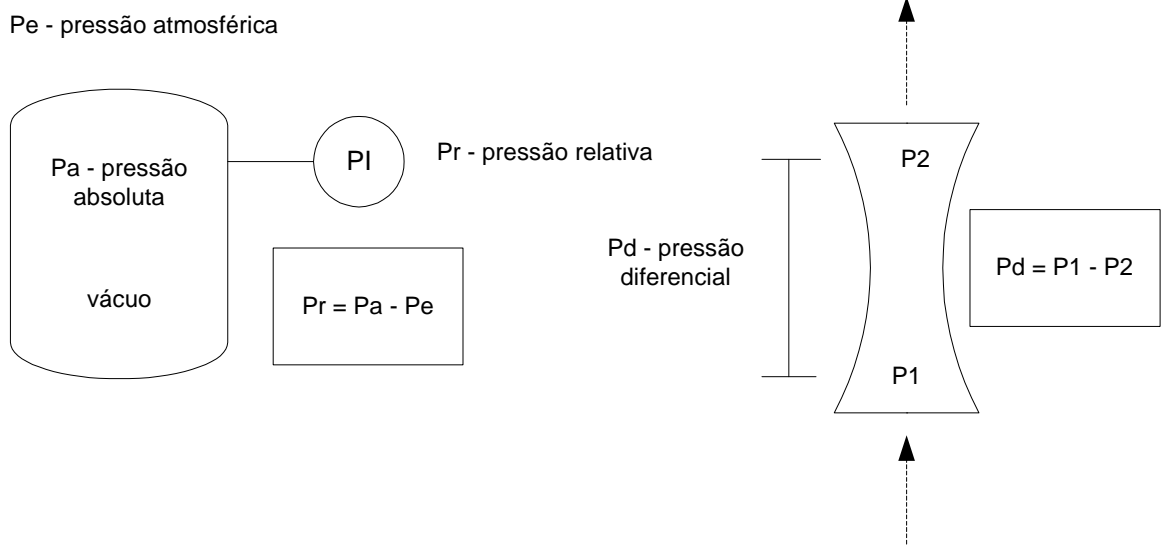
## 2.6 - DIAGRAMA COMPARATIVO

O diagrama abaixo ilustra os conceitos tratados anteriormente. Nota-se que a seta sempre aponta para o ponto medido e a base para o ponto tomado como referência.



Nota-se que a pressão manométrica é dada pela diferença entre a absoluta com a atmosférica.

A seguir, outro diagrama para melhor ilustrar estes conceitos.



## 2.8 – DENSIDADE DE MASSA

Densidade ( $\rho$ ) é a grandeza escalar dada pela relação entre uma massa  $m$  e seu volume  $V$ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

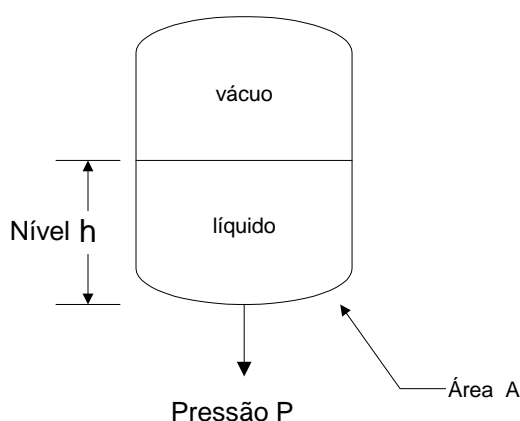
Quando um corpo é constituído por uma única substância (homogêneo) o termo massa específica ( $\mu$ ) é utilizado em lugar de densidade. Assim, a massa específica é uma característica da substância que constitui um corpo. Exemplo:  $\rho_{H_2O} = 1\text{g/cm}^3$  ou  $1000\text{Kg/m}^3$   $\rho_{Hg} = 13.600\text{Kg/m}^3$

É comum confundir peso específico com massa específica. O peso específico é igual ao produto da massa específica pela aceleração da gravidade ( $g$ ).

## 2.9 - PRESSÃO HIDROSTÁTICA

É a pressão exercida na sua base por uma coluna de fluido em repouso, ou que esteja fluindo perpendicularmente a tomada de impulso, em virtude do seu peso.

Veja o diagrama seguinte.



O fluido contido no tanque exerce um peso  $W$  sobre a base, logo a pressão  $P$  é:

$$P = \frac{W}{A}, \quad \text{mas} \quad W = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g$$

e, como o volume  $V = A \cdot h$ , logo  $W = \rho \cdot h \cdot A \cdot g$ . Substituindo  $W$  na fórmula de  $P$ , temos:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Considerando o produto  $\rho \cdot g$  constante, nota-se que a variável nível é uma função da pressão no fundo do tanque, logo, basta medir-se a pressão para se conhecer a altura da coluna do fluido dentro do tanque.

Outra observação importante é que a pressão no fundo do tanque não depende da área da base, mas apenas da altura da coluna do líquido.

## 2.10 – UNIDADES PRÁTICAS DE PRESSÃO

No final deste trabalho apresenta-se uma tabela de conversão de unidades para ser consultada. É comum haver alguma discrepância entre os valores calculados e os tabelados. Esta diferença se deve ao fato do arredondamento considerado nos cálculos, por exemplo, a aceleração da gravidade pode ser utilizada como  $9,8\text{m/s}^2$  ou  $9,81\text{m/s}^2$ , ou mais exatamente como  $9,80665\text{m/s}^2$ .

### 2.10.1 – mmHg

É a pressão exercida na base de uma coluna de Hg com altura de 1 milímetro e aceleração da gravidade local igual a  $9,81\text{ m/s}^2$  a

0°C, onde a densidade do mercúrio é de 13.600Kg/m<sup>3</sup>. Logo, quanto vale 1mmHg?

$$1mmHg = \rho \cdot g \cdot h$$

$$1mmHg = 13.600 \frac{Kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,0001m$$

$$1mmHg = 133,32 \frac{Kg}{m \cdot s^2} = 133,32Pa$$

Então,  $1mmHg = 133,32Pa$

### 2.10.2 – atm

Um atmosfera ou simplesmente 1atm é equivalente à pressão exercida na base de uma coluna de Hg com altura de 760mm, onde  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  e a densidade do mercúrio de 13.600Kg/m<sup>3</sup>.

Assim,

$$1atm = \rho \cdot g \cdot h = 13.600 \cdot 9,81 \cdot 0,76$$

$$1atm = 1,013 \cdot 10^5 Pa$$

### 2.10.3 – mmH2O

É a pressão medida na base de uma coluna de água com altura de 1mm considerando a densidade da água igual a 1000Kg/m<sup>3</sup>.

Logo,

$$1mmH2O = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,0001 = 9,81Pa$$

$$1mmH2O = 9,81Pa$$

### 2.10.4 – Kgf/cm<sup>2</sup>

É a pressão exercida pelo peso de uma massa com 1Kg em uma superfície com área de 1cm<sup>2</sup>. Importante lembrar que 1Kgf equivale a 9,81N. Assim,

$$1 \frac{Kgf}{cm^2} = \frac{9,81N}{0,0001m^2} = 9,81 \cdot 10^4 Pa = 98.100Pa$$

### 2.10.5 – Libra-força por polegada quadrada (psi)

A pressão é calculada pela razão entre a força em unidade inglesa libra-força (lb) pela área em polegada quadrada (in<sup>2</sup>), ou seja,

“pound force per square inch (psi)”. No módulo anterior foi visto que uma libra (l) é igual a 453,592 gramas, logo:

$$1\text{ lbf} = 453,592\text{ g} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

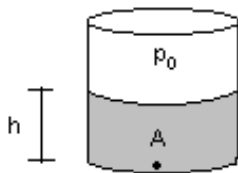
$$1\text{ lbf} = 4,45\text{ N}$$

Então,

$$1\text{ psi} = 1 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = \frac{4,45}{0,00064516} = 6897,51\text{ Pa}$$

$$1\text{ psi} = 6,89\text{ KPa}$$

## 2.11 – PRESSÃO NO INTERIOR DE UM LÍQUIDO EM EQUILÍBRIO

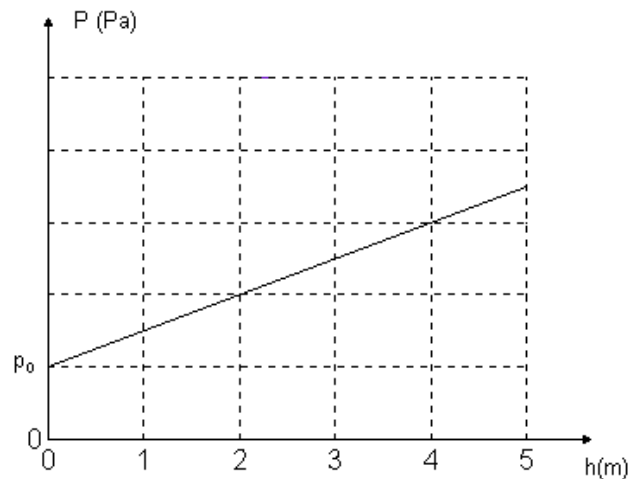


A pressão no ponto A, situado a uma profundidade  $h$  em relação à superfície livre é:

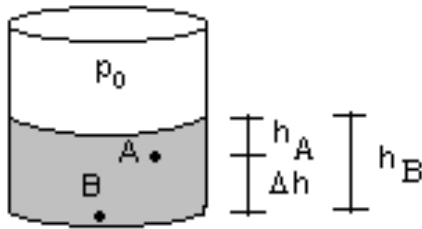
$$P_A = p_0 + \rho \cdot g \cdot h$$

Onde:  $p_0 =$  é a pressão acima da superfície do fluido. Se o tanque estiver aberto para atmosfera pode-se afirmar que  $p_0$  é igual a 1atm.

Observe-se que a pressão é proporcional a altura  $h$ , assim podemos traçar um gráfico para melhor representar esta equação.



## 2.12 – TEOREMA DE STEVIN

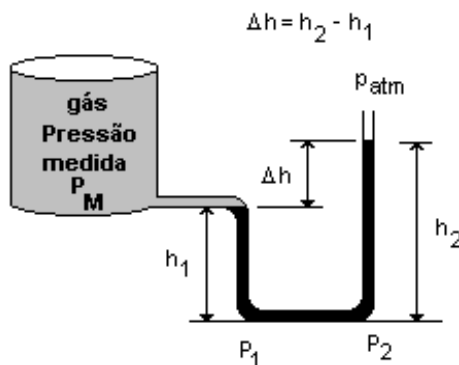


A diferença de pressão entre dois pontos num líquido homogêneo em equilíbrio é dada pela pressão hidrostática da coluna líquida entre estes pontos. Ou seja, pela diferença de altura  $\Delta h$ .

$$P_{BA} = P_B - P_A = \rho \cdot g \cdot h_B - \rho \cdot g \cdot h_A$$

$$P_{BA} = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

## 2.12 – MEDIÇÃO DE PRESSÃO COM MANÔMETRO EM U



A maioria dos manômetros usa a pressão atmosférica como referência e mede a diferença entre a pressão absoluta no ponto de medição e a pressão atmosférica, ou seja:  $P_M - p_{atm}$ . Por isto, denomina-se o resultado da medida como pressão manométrica ou relativa

Na figura acima deseja-se medir a pressão manométrica ( $P_M - p_{atm}$ ) dentro do reservatório de gás com um manômetro em U com mercúrio. Nota-se que quando o sistema está em equilíbrio (estático) existe uma diferença  $\Delta h$  na coluna de mercúrio. Para medir a pressão interna no reservatório, utiliza-se do conceito de pressão hidrostática que foi mencionado anteriormente. Uma vez em equilíbrio, afirma-se que o somatório das pressões à esquerda ( $P_e$ ) da coluna em U deve ser igual ao somatório das pressões à direita ( $P_d$ ). Assim,

$$\sum P_e = \sum P_d$$

$$\sum P_e = P_1 + P_M$$

onde:  $P_M$  é a pressão medida

$$\sum P_e = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_1 + P_M$$

onde:  $\rho_{Hg} = 13600 \text{ Kg/m}^3$  e  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$$\sum P_d = P_2 + p_{atm}$$



$$\sum P_d = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_2 + p_{atm}$$

$$\rho_{Hg} \cdot g \cdot h_1 + P_M = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_2 + p_{atm}$$

Logo:  $P_M - p_{atm} = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_2 - \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_1$

$$P_M - p_{atm} = \rho_{Hg} \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

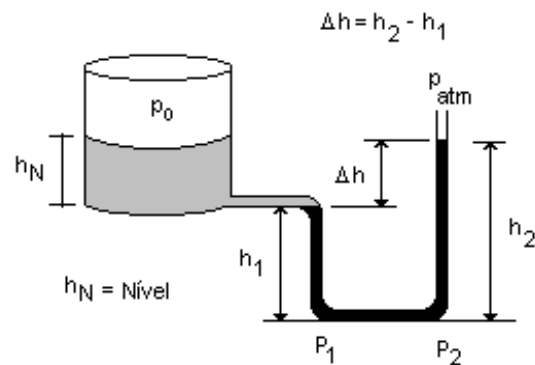
$$P_M - p_{atm} = \rho_{Hg} \cdot g \cdot \Delta h$$

Assim, comprova-se que a pressão manométrica é proporcional à diferença entre as alturas das colunas do líquido nos dois ramos do tubo em U.

### 2.13 – MEDIÇÃO DE NÍVEL COM MANÔMETRO EM U

Deseja-se obter apenas a pressão ( $P_N$ ) na base do tanque produzida pelo peso do líquido, pois sabe-se que a mesma é diretamente proporcional ao nível ( $h_N$ ).

Equacionando o sistema em equilíbrio, pode-se escrever:



$$p_0 + P_N + P_1 = p_{atm} + P_2$$

onde:  $p_0$  é a pressão acima do líquido e  $P_N$  a relativa ao nível.

$$p_0 + P_N + \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_1 = p_{atm} + \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_2$$

$$P_N = p_{atm} - p_0 + \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_2 - \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_1$$

$$P_N = p_{atm} - p_0 + \rho_{Hg} \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

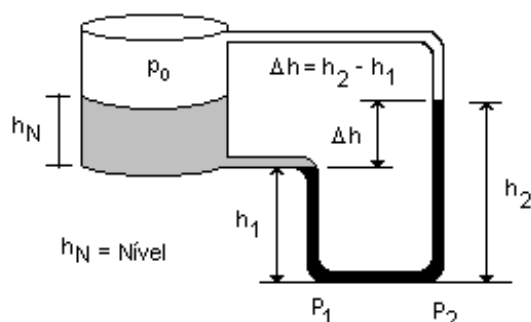
$$P_N = p_{atm} - p_0 + \rho_{Hg} \cdot g \cdot \Delta h$$

Se o tanque estiver aberto para atmosfera  $p_0$  será igual a  $p_{atm}$  ( $p_0 - p_{atm} = 0$ ) assim, a equação de  $P_N$  se resumirá em:

$$P_N = \rho_{Hg} \cdot g \cdot \Delta h$$

Mas, se as pressões  $p_0$  e  $p_{atm}$  forem diferentes implica em erro de medição, pois  $P_N$  não será função apenas do nível, mas também de  $p_{atm} - p_0$ . Este problema sempre acontece em tanque fechado e isolado da atmosfera. Para solucionar esta inconveniência basta ligar o outro lado do manômetro em U

no topo do tanque, conforme figura a seguir. Com este procedimento as pressões  $p_0$  e  $p_{atm}$  são equalizadas. Então:  $P_N = \rho_{Hg} \cdot g \cdot \Delta h$ .



Esta situação estudada é fundamental para entender o porque se liga a tomada de alta pressão do transmissor de nível na base do tanque e a de baixa no topo.

## 2.14 – EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

Baseando-se na figura abaixo, pode-se afirmar que o fluxo de massa que passa em qualquer plano transversal ao tubo deve ser sempre igual. Ou seja, o fluxo de massa no plano P tem que ser igual ao que passa pelo Q. Isto é óbvio, pois não se cria massa do nada.



A massa de fluido  $\Delta m_1$  que atravessa a seção A1 do plano P no intervalo de tempo  $\Delta t$  é igual a:

$$\Delta m_1 = \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t$$

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1$$

Onde:

$\frac{\Delta m_1}{\Delta t}$  = fluxo de massa pela seção A1 [Kg/s], normalmente

denominado por vazão mássica [massa/tempo];

$v_1$  = velocidade de escoamento pelo plano P [m/s];

$A_1$  = área da seção transversal do plano P [m<sup>2</sup>].

Considerando que o intervalo de tempo  $\Delta t$  tenda a zero, pode-se afirmar que  $v_1$  e  $A_1$  são constantes, ou seja a velocidade não varia ao longo da seção  $A_1$ . Assim, o fluxo de massa pelo plano P é igual ao fluxo de massa do plano Q.

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta t} = \frac{\Delta m_2}{\Delta t}$$
$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2$$

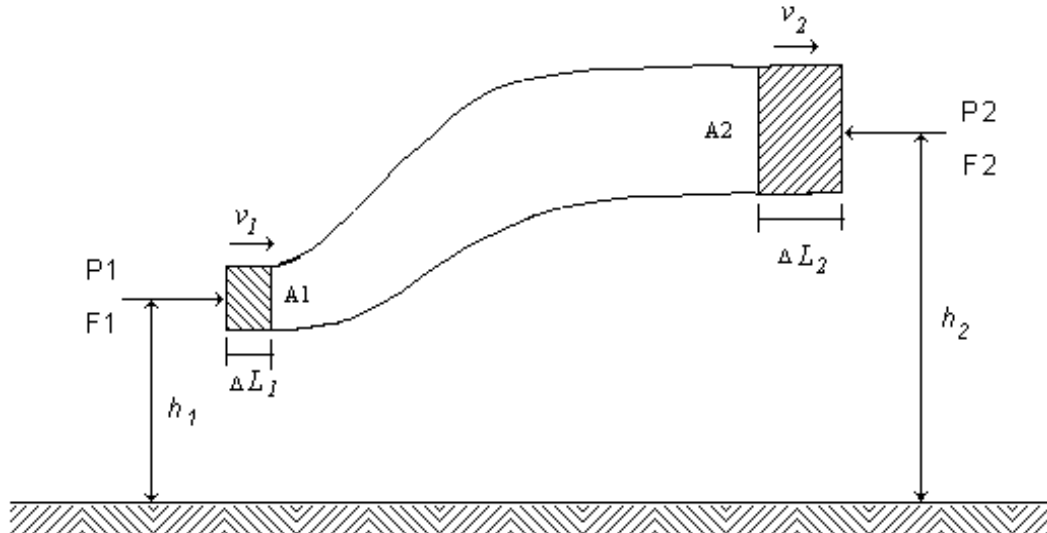
mas,  $\rho_1 = \rho_2$ , o que simplifica a expressão anterior em:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{m/s} = \text{m}^3/\text{s}]$$

Então,  $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \text{constante}$  que é denominado de fluxo volumétrico ou simplesmente de vazão volumétrica. A unidade de medição é dada em volume/tempo, por exemplo, l/h, m<sup>3</sup>/h, m<sup>3</sup>/s.

## 2.15 – EQUAÇÃO DE BERNOULLI

O trabalho realizado pela resultante das forças que atuam em um sistema é igual à variação da energia cinética – teorema trabalho-energia.



Dados:

$F_1$  = força aplicada à superfície  $A_1$

$P_1$  = razão entre  $F_1$  e  $A_1$ ;

$\Delta L_1$  = distância que o fluido deslocou;

$v_1$  = velocidade de deslocamento;

$h_1$  = altura relativa à referência gravitacional

Para o plano 2 basta atualizar os sub-índices.

O trabalho realizado por cada componente da força resultante é:

1 – Trabalho realizado pela força  $F_1$ .

$$W_1 = F_1 \cdot d_1 = P_1 \cdot A_1 \cdot \Delta L_1 \quad \text{Onde: } F_1 = P_1 \cdot A_1$$

2 – Trabalho realizado pela força  $F_2$ .

$$W_2 = -F_2 \cdot d_2 = -P_2 \cdot A_2 \cdot \Delta L_2 \quad \text{Onde: } F_2 = P_2 \cdot A_2$$

3 – Trabalho realizado pela força da gravidade.

$$W_3 = F_3 \cdot d_3 = -m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

O trabalho total realizado sobre o sistema é:  $W_T = W_1 + W_2 + W_3$

Logo: 
$$W_T = P_1 \cdot A_1 \cdot \Delta L_1 - P_2 \cdot A_2 \cdot \Delta L_2 - m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

Mas  $A_1 \cdot \Delta L_1 = A_2 \cdot \Delta L_2 = \text{volume } V$  deslocado pela ação resultante das forças. Como é de conhecimento,  $V = \frac{m}{\rho}$ . Então,  $A_1 \cdot \Delta L_1 = \frac{m}{\rho}$ . E, substituindo na equação do trabalho resultante tem-se:

$$W_T = \frac{m}{\rho}(P_1 - P_2) - m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

A variação da energia cinética neste sistema é a diferença da energia final menos a inicial, ou:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2$$

Igualando o trabalho resultante com a variação da energia cinética, tem-se:

$$W_T = \Delta E_c$$

$$\frac{m}{\rho}(P_1 - P_2) - m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2$$

simplificando,

$$\cancel{\frac{m}{\rho}}(P_1 - P_2) - \cancel{m} \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \cdot \cancel{m} \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \cancel{m} \cdot v_1^2$$

reagrupando e separando os termos,

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

Esta é a equação de Bernoulli que comprova que o somatório das pressões ao longo de um tubo é sempre constante para um sistema ideal. Nesta equação pode-se reconhecer as seguintes pressões:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

The diagram shows the equation above with three curly braces under the terms  $P_1$ ,  $\frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2$ , and  $\rho \cdot g \cdot h_1$ . Lines from these braces point to labels on the right: 'Pressão Estática' for  $P_1$ , 'Pressão Dinâmica' for  $\frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2$ , and 'Pressão aplicada' for  $\rho \cdot g \cdot h_1$ .

## 2.16 - PRESSÃO DINÂMICA OU CINÉTICA

É a pressão exercida por um fluido em movimento. É medida fazendo a tomada de impulso de tal forma que recebe o impacto do fluxo.

## 2.17- DISPOSITIVOS PARA MEDIÇÃO DE PRESSÃO

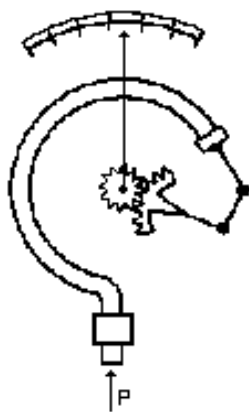
O instrumento mais simples para se medir pressão é o manômetro que pode ter vários elementos sensores e que podem ser utilizados também por transmissores e controladores. A seguir alguns tipos de elementos sensores.

### 2.17.1 - Tubo de Bourdon

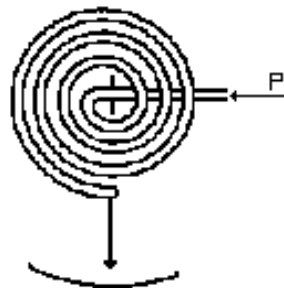
Consiste geralmente de um tubo com seção oval, disposto na forma de arco de circunferência tendo uma extremidade fechada, estando a outra aberta à pressão a ser medida. Com a pressão agindo em seu interior, o tubo tende a tomar uma seção circular resultando um movimento em sua extremidade fechada. Esse movimento através da engrenagem é transmitido a um ponteiro que vai indicar uma medida de pressão.

Quanto à forma, o tubo de bourdon pode se apresentar nas seguintes formas: tipo C, espiral e helicoidal.

#### Tipos de Tubos “ Bourdon ”



Tipo C



Tipo Espiral



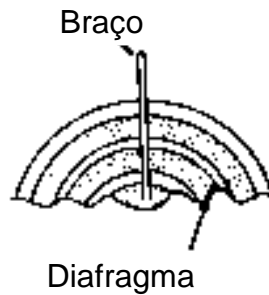
Tipo Helicoidal

### 2.17.2 - Membrana ou Diafragma

É constituído por um disco de material elástico (metálico ou não), fixo pela borda. Uma haste fixa ao centro do disco está ligada a um mecanismo de indicação.

Quando uma pressão é aplicada, a membrana se desloca e esse deslocamento é proporcional à pressão aplicada.

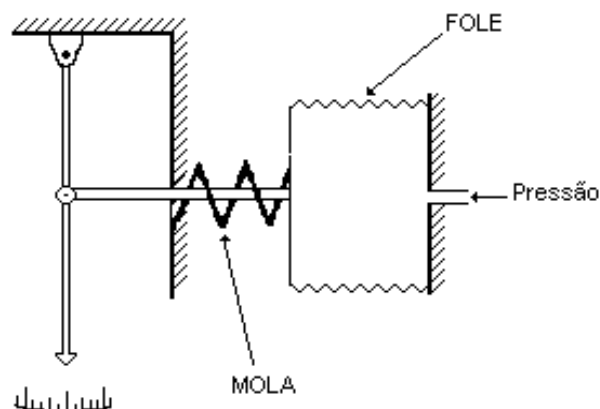
O diagrama geralmente é ondulado ou corrugado para aumentar sua área efetiva.



### 2.17.3 - Fole

O fole é também muito empregado na medição de pressão. Ele é basicamente um cilindro metálico, corrugado ou sanfonado.

Quando uma pressão é aplicada no interior do fole, provoca sua distensão, e como ela tem que vencer a flexibilidade do material, o deslocamento é proporcional à pressão aplicada à parte externa, provocará a contração do fole.



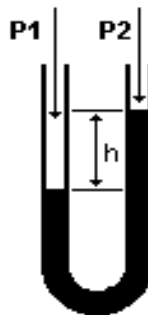
### 2.11.4 - Coluna de Líquido

Consiste, basicamente, num tubo de vidro, contendo certa quantidade de líquido, fixado a uma base com uma escala graduada.

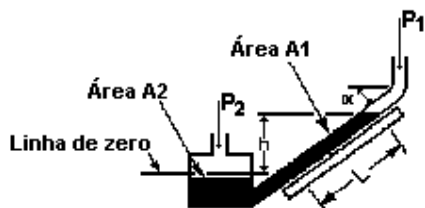
As colunas podem ser basicamente de três tipos: coluna reta vertical, reta inclinada e em forma de “U”.

Os líquidos mais utilizados nas colunas são: água (normalmente com um corante ) e mercúrio.

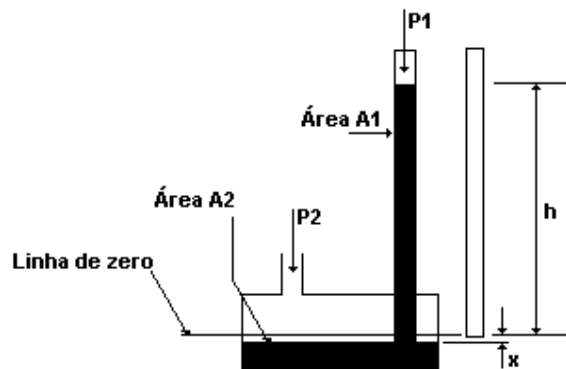
Quando se aplica uma pressão na coluna o líquido é deslocado, sendo que este deslocamento é proporcional a pressão aplicada.



Manômetro de tubo em “U “



Manômetro de tubo inclinado



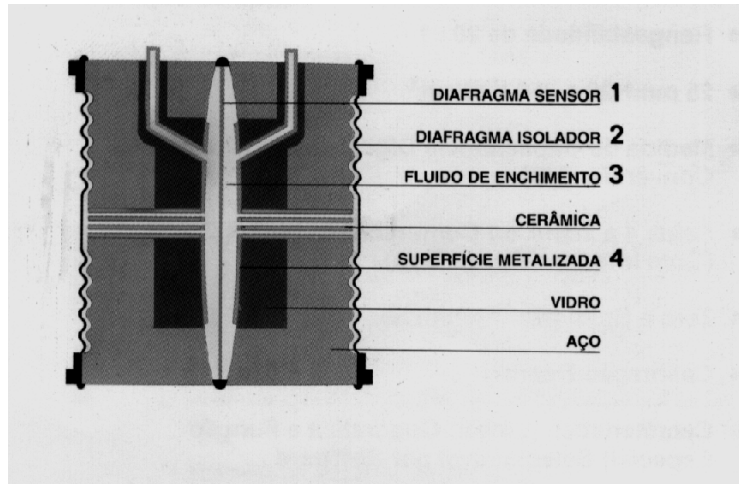
Manômetro de Reservatório



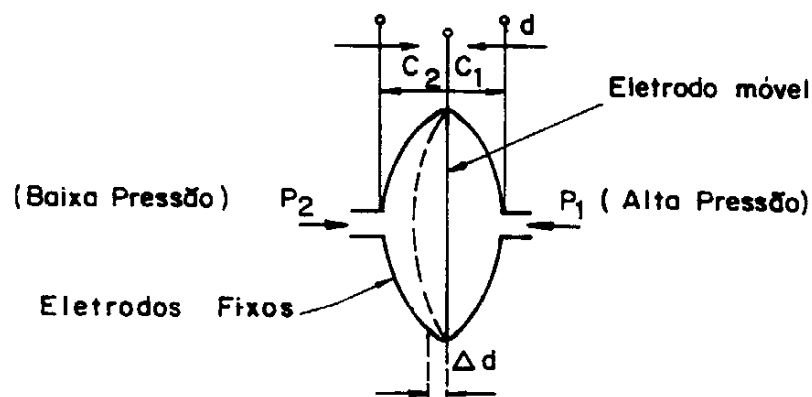
### 2.11.5 - Tipo Célula Capacitiva

Se baseia na variação de capacitância quando aplica-se uma pressão diferencial sobre o corpo da célula. Esta variação é proporcional à pressão aplicada.

A seguir um esquema simplificado da célula capacitiva.



Nota-se a existência de um diafragma móvel (1); duas superfícies metalizadas (4), uma à esquerda do diafragma sensor (1) e outra à direita; fluido isolador, dielétrico, que preenche o intervalo entre o diafragma móvel e as superfícies metalizadas; um diafragma isolador (2) com a função de isolar a célula do processo e tubos capilares de cerâmica que cumprem a missão de transmitir ao diafragma sensor as pressões aplicadas sobre os diafragmas isoladores. O desenho abaixo identifica os capacitores  $C_1$  e  $C_2$  que compõem a célula.



A saída de sinal do circuito eletrônico que mede as variações de capacitâncias é dada por:

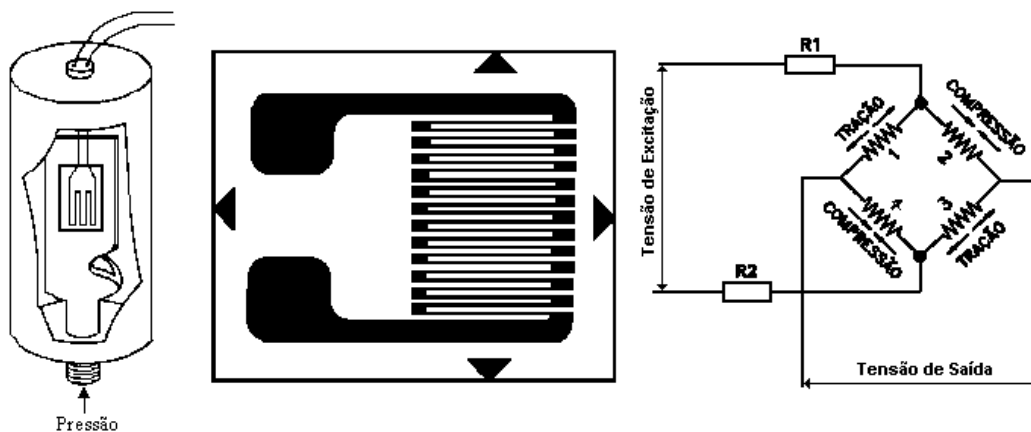
$$S = k \cdot \left( \frac{C_2 - C_1}{C_1 + C_2} \right) = k \cdot \frac{\Delta d}{d} \cdot (P_1 - P_2)$$

Algumas inconveniências nesta célula capacitiva é o fato dela introduzir erros de medição provocados pela pressão estática, sobre-pressão e variações de temperatura. Ainda, ela é facilmente destruída por erro na operação das válvulas equalizadoras de pressão nas câmaras de medição dos transmissores de vazão.

Um sistema que superou estes impecilhos, melhorando ainda mais a confiabilidade, estabilidade, durabilidade e principalmente a exatidão, é o sistema de célula capacitiva flutuante. Nesta célula a parte sensora é presa à estrutura da unidade detentora por meio de um diafragma flutuante, ao invés de estar fixada no corpo. A figura seguinte ilustra o assunto.

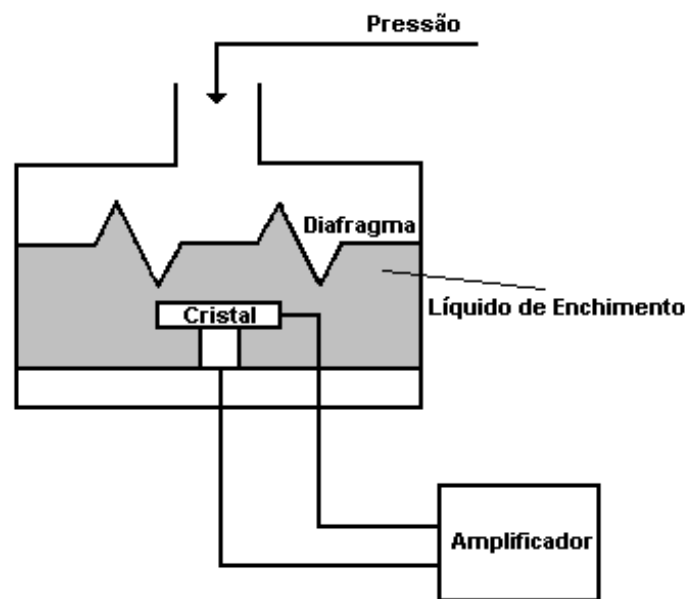
### 2.11.6 - Tipo Strain Gauge

Baseia-se no princípio de variação da resistência de um fio, mudando-se as suas dimensões.



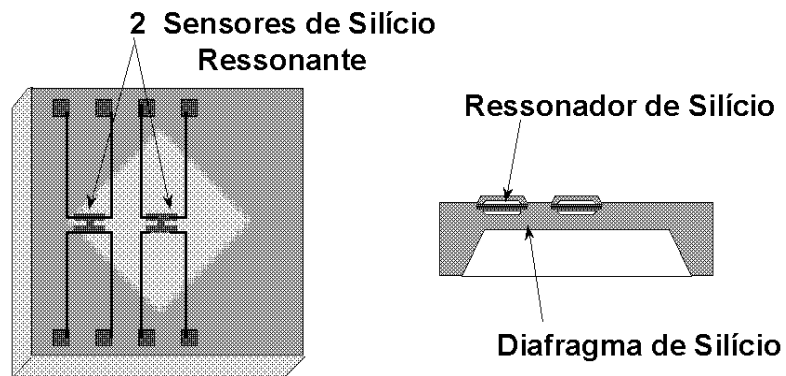
### 2.11.7 - Tipo Piezoelétrico

Os elementos piezoelétricos são cristais, como o quartzo que geram uma tensão, quando sofrem uma deformação física, por ação de uma pressão. São elementos pequenos e de construção robusta. Seu sinal de resposta é linear com a variação de pressão, são capazes de fornecer sinais de altíssimas frequências de milhões de ciclos por segundo.



### 2.11.7 – Sensor por silício ressonante

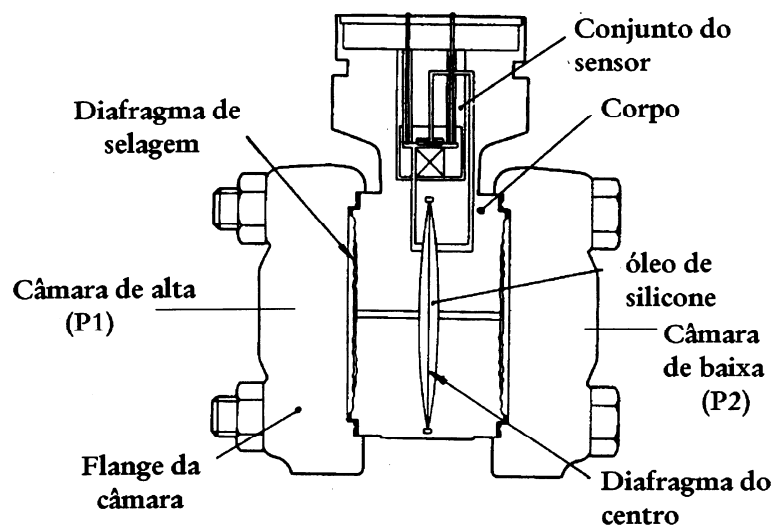
O sensor consiste de uma cápsula de silício colocada estrategicamente em um diafragma, utilizando do diferencial de pressão para vibrar em maior ou menor intensidade, afim de que essa freqüência seja proporcional a pressão aplicada.



Ressonadores em formato de “H”

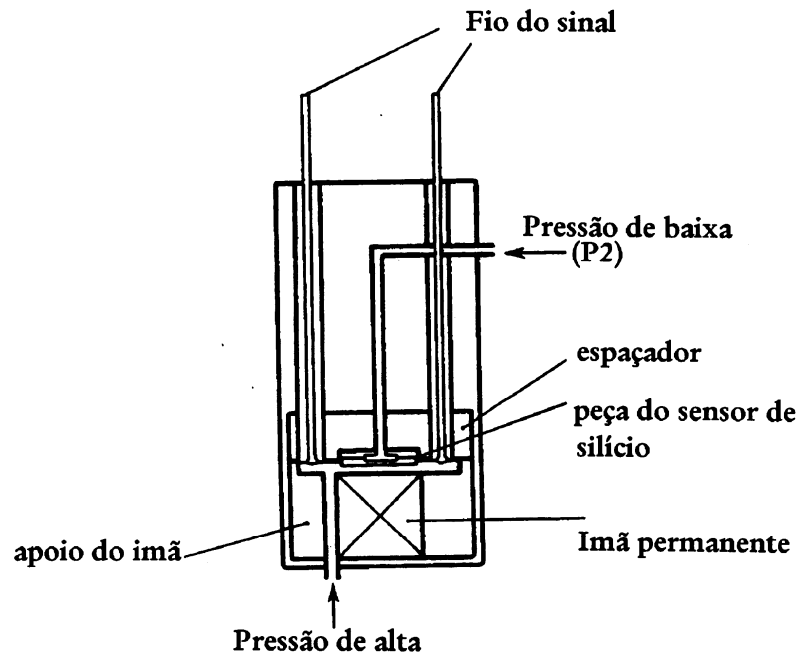
Na seqüência será exibido maiores detalhes sobre esse tipo de célula, sua construção e seu funcionamento.

#### *Construção do sensor*



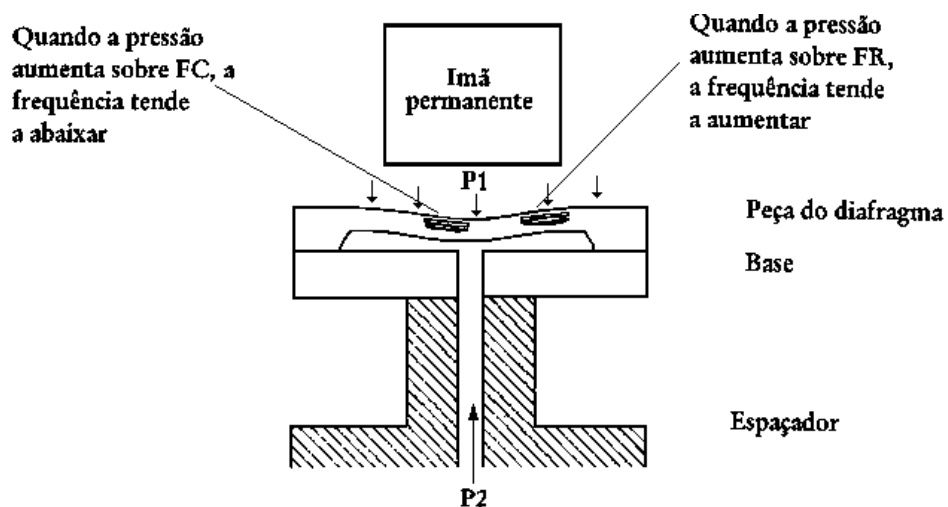
Todo o conjunto pode ser visto através da figura acima, porém, para uma melhor compreensão de funcionamento deste transmissor de pressão, faz-se necessário desmembrá-lo em algumas partes vitais.

Na figura a seguir podemos ver o conjunto do sensor. Ele possui um ímã permanente e o sensor de silício propriamente dito .



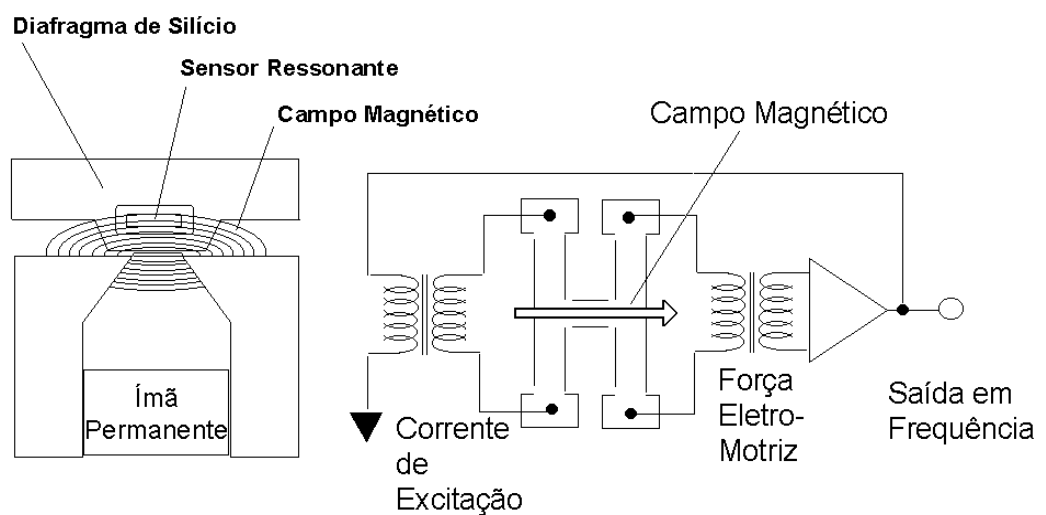
Dois fatores que irão influenciar na ressonância do sensor de silício são: o campo magnético gerado por um ímã permanente posicionado sobre o sensor; o segundo será o campo elétrico gerado por uma corrente em AC (além das pressões exercidas sobre o sensor, obviamente).

Este enfoque pode ser observado na figura abaixo.



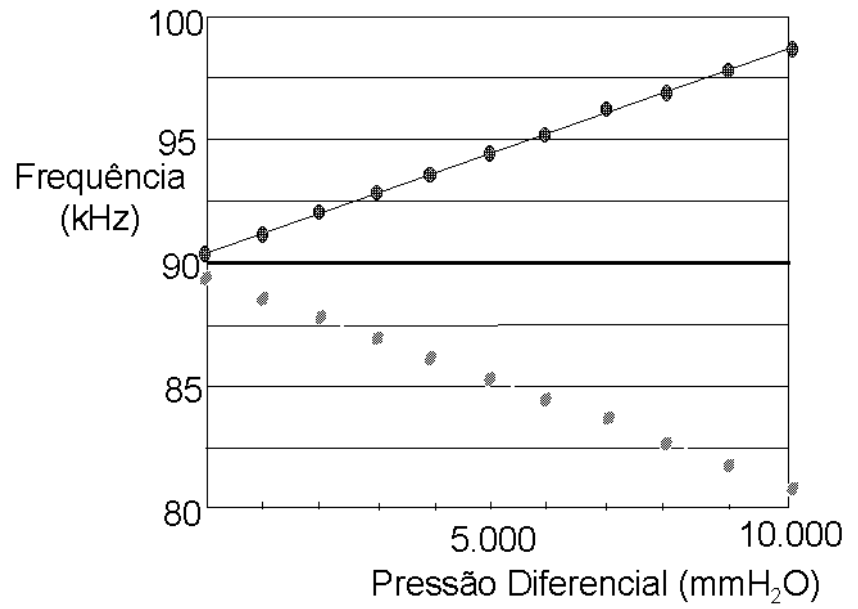
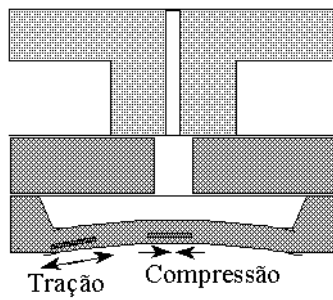
Portanto, a combinação do fator campo magnético/campo elétrico é responsável pela vibração do sensor .

Um dos sensores ficará localizado ao centro do diafragma, enquanto que o outro terá a sua disposição física mais à borda do diafragma. Por estarem localizadas em locais diferente, porém, no mesmo encapsulamento, uma sofrerá uma compressão e a outra sofrerá uma tração conforme a aplicação de pressão sentida pelo diafragma. Desta maneira, os sensores possuirão uma diferença de freqüência entre si. Esta diferença pode ser sentida por um contador de pulso, uma vez que o sinal enviado pelo sensor será pulsado. Tal diferença de freqüência será proporcional ao  $\Delta P$  aplicado. Na figura a seguir é exibido o circuito eletrônico equivalente.



Através dessas informações é possível criar um gráfico referente aos pontos de operação da frequência x pressão.

## ***Variação da Frequência com a Pressão***



## EXERCÍCIOS

- 1 - O que é pressão?
- 2 - O que é pressão atmosférica?
- 3 - O que é pressão relativa?
- 4 - O que é pressão absoluta?
- 5 - O que é vácuo?
- 6 - O que é pressão diferencial?
- 7 - O que é pressão estática?
- 8 - O que é pressão dinâmica?
- 9 - Exercícios de conversão de unidades de pressão:
  - a) 20 PSI = \_\_\_\_\_  $\text{Kgf/cm}^2$
  - b) 200  $\text{mmH}_2\text{O}$  = \_\_\_\_\_ mmHg
  - c) 10  $\text{Kgf/cm}^2$  = \_\_\_\_\_  $\text{mmH}_2\text{O}$



d) 735,5 mmHg = \_\_\_\_\_ PSI

e) 14,22 PSI = \_\_\_\_\_ mmH<sub>2</sub>O

f) 2,5 Kgf/cm<sup>2</sup> = \_\_\_\_\_ mmHg

g) 10 Kgf/cm<sup>2</sup> = \_\_\_\_\_ mmHg

10 - Determine o valor das seguintes pressões na escala absoluta:

a) 1.180 mmHg = \_\_\_\_\_ PSIA

b) 1.250 Kpa = \_\_\_\_\_ PSIA

c) 22 PSIG = \_\_\_\_\_ PSIA

d) - 450 mmHg = \_\_\_\_\_ PSIA

e) 1,5 Kgf/cm<sup>2</sup> = \_\_\_\_\_ PSIA

f) - 700 mmHg = \_\_\_\_\_ PSIA

11 - Determine o valor das pressões na escala relativa em mmHg:

a) 1.390 mmHg (Abs.) = \_\_\_\_\_ mmHg

b) 28 PSIA = \_\_\_\_\_ mmHg

c) 32 PSIA = \_\_\_\_\_ mmHg

d) 12 PSIA = \_\_\_\_\_ mmHg

e)  $0,9 \text{ Kfg/cm}^2$  (Abs.) = \_\_\_\_\_ mmHg

12 - Qual o instrumento mais simples para medir pressão?

13 - Defina o tubo de Bourdon.

14 - Cite 3 tipos de Bourdon.

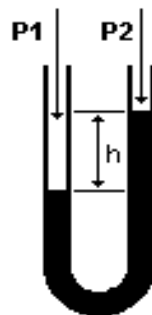
15 - Como é constituído o diafragma?

16 - Como é constituído o fole?

17 - Como funciona o fole?

18 - Cite 3 tipos de coluna líquida.

19 - Para a coluna abaixo determine :



a)  $P_1 = 500 \text{ mm Hg}$     $P_2 = ? \text{ Kgf/cm}^2$     $d_r = 1,0$     $h = 20 \text{ cm}$

b)  $P_1 = ?$  psi       $P_2 = 15$  " H<sub>2</sub>O       $d_r = 13,6$      $h = 150$  mm

c)  $P_1 = 2,5$  psi       $P_2 = \text{atm}$        $d_r = ?$        $h = 2$  "

d)  $P_1 = \text{atm}$        $P_2 = 460$  mm Hg       $d_r = 13,6$      $h = ?$  cm

e)  $P_1 = - 300$  mm Hg     $P_2 = ?$  psia       $d_r = 1,0$        $h = 10$  "

20 - Defina o sensor tipo capacitivo.

21 - Defina o sensor tipo strain-gauge.

**Tabela de Conversões**  
- Unidades de Pressão -

	<b>PSI</b>	<b>KPA</b>	<b>Polegadas s H<sub>2</sub>O</b>	<b>mmH<sub>2</sub>O</b>	<b>Polegadas s Hg</b>	<b>mmHg</b>	<b>Bars</b>	<b>m Bars</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>gf/cm<sup>2</sup></b>
PSI	1	6.8947	27.7620	705.1500	2.0360	51.7150	0,0689	68.9470	0,0703	70.3070
KPA	0.1450	1	4.0266	102.2742	0.2953	7.5007	0.0100	10.0000	0.0102	10.1972
inH <sub>2</sub> O	0.0361	0.2483	1	25.4210	0.0734	1.8650	0.0025	2.4864	0.0025	2.5355
mmH <sub>2</sub> O	0.0014	0.0098	0.0394	1	0.0028	0.0734	0.0001	0.0979	0.0001	0.0982
inHg	0.4912	3.3867	13.6200	345.9400	1	25.4000	0.0339	33.864	0.0345	34.532
mmHg	0.0193	0.1331	0.5362	13.6200	0.0394	1	0.0013	1.3332	0.0014	1.3595
Bars	14.5040	100.000	402.1800	10215.0000	29.5300	750.0600	1	1000	1.0197	1019.70
m Bars	0.0145	.1000	0.402	10.2150	0.0295	0.7501	0.001	1	0.0010	1.0197
Kg/cm <sup>2</sup>	14.2230	97.9047	394.4100	10018.0	28.9590	735.560	0.9800	980.7000	1	1000
gf/cm <sup>2</sup>	0.0142	0.0970	0.3944	10.0180	0.0290	0.7356	0.0009	0.9807	0.001	1

Temperatura °F = 32 + 9 (°C)

(Conversão) °C = (°F - 32)  $\frac{5}{9}$

Exemplo 1 mmHg = 0.5362 pol. H<sub>2</sub>O = 1.3332 mBar

97 mmHg = 97(0.5362) = 52.0114 inH<sub>2</sub>O

97 mmHg = 97(1.3332) = 129.3204 mBar