

Pressão

Hidroestática

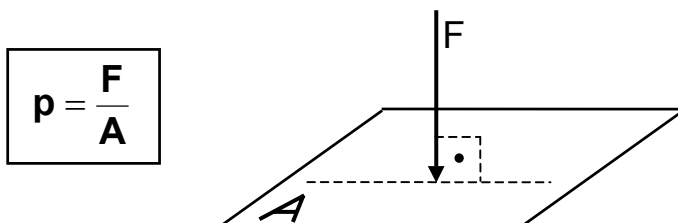
A hidroestática estuda as propriedades dos fluidos em repouso. A hidrodinâmica estuda os fluidos em movimento. Fluido é uma substância que pode escoar e, dessa forma, o termo inclui líquidos, gases e vapores, que se diferenciam profundamente quanto à compressibilidade: um gás ou um vapor podem ser facilmente comprimidos, enquanto os líquidos são praticamente incompressíveis. Portanto, as principais características dos líquidos são:

- a) não possuem forma própria;
- b) são incompressíveis.

Conceito e definição de pressão

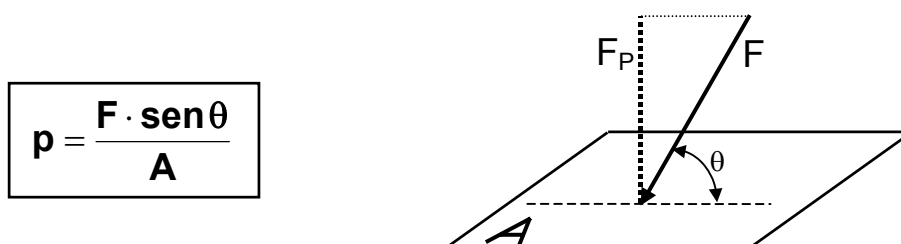
Quando uma força é aplicada de forma distribuída sobre uma superfície, dizemos que existe uma pressão exercida nessa superfície.

A pressão **p** exercida sobre uma superfície é igual ao quociente da força **F** aplicada perpendicularmente a área **A** da superfície:



Caso a força aplicada não seja perpendicular a superfície, é preciso calcular a força equivalente **F_p** aplicada perpendicularmente. **F_p** será igual ao produto da força **F** pelo seno do ângulo de inclinação **θ** entre a superfície e a direção da força **F** aplicada, ou seja: **F_p = F · sen θ**. Portanto, a fórmula para calcular a pressão nesse caso é:

A pressão de um líquido ou um gás sobre uma superfície é a força que este fluido exerce perpendicularmente sobre a unidade de área dessa superfície.



Pressão Atmosférica

Imaginando, por exemplo, um mergulhador a uma dada profundidade, a pressão exercida pela água sobre ele é a mesma seja qual for a direção em que nade. Entretanto, se ele mergulhar mais fundo, seu corpo sofrerá uma compressão maior porque aumenta o peso da coluna de água acima dele.

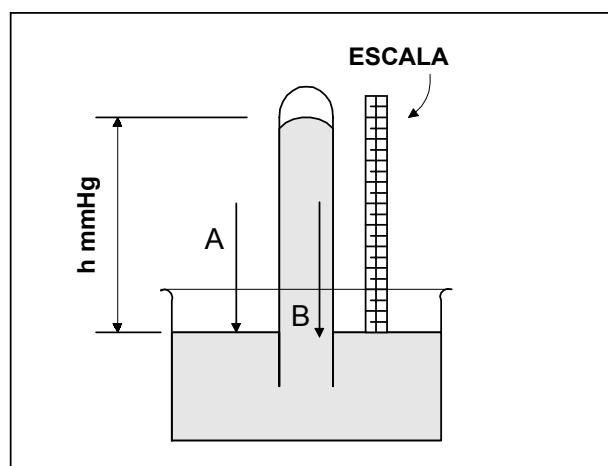
A palavra atmosfera designa a camada gasosa que envolve o globo terrestre. Considerando que o globo é envolvido por uma camada de ar com uma espessura considerável de 50km, podemos afirmar que vivemos submersos em um fluido que exerce uma força em toda superfície da terra.

Esta pressão é chamada de pressão atmosférica ou barométrica. A pressão atmosférica normal, medida ao nível do mar a uma latitude de 45° sob a ação de uma aceleração da gravidade de $9,80665 \text{ m/s}^2$, é a pressão capaz de equilibrar uma coluna de mercúrio de 760 mm, quando o mercúrio está a uma temperatura de 0°C .

Medição da Pressão Atmosférica

Em 1643, Torricelli inventou o primeiro barômetro, que permitiu medir a pressão exercida sobre a terra pelas camadas gasosas que a envolvem.

Para realizar esse aparelho, usa-se um tubo de vidro (figura) com o comprimento em torno de 90cm, fechado em uma das extremidades. O tubo deve ser lavado com ácido e secado em vácuo, após o que, é cheio de mercúrio puro e seco.



Princípio do Barômetro de Mercúrio

Emborcando o tubo de vidro, com o polegar obstruindo a extremidade aberta, e colocando-o num vasilhame contendo mercúrio puro, nota-se que o mercúrio desce no tubo e se estabiliza a uma certa altura. Através de uma régua graduada em milímetros,

tendo a parte inferior pontiaguda tocando na superfície do mercúrio contido no vasilhame, mede-se a pressão atmosférica em milímetros de mercúrio.

As pressões exercidas em A e B são iguais, pois estão no mesmo nível, no mercúrio. A pressão em A é a pressão atmosférica; a pressão em B é a pressão da coluna de mercúrio. Desde que as pressões em A e B são iguais, a pressão atmosférica é igual à pressão exercida pela coluna de mercúrio.

Ao lado do barômetro, coloca-se um termômetro para eliminar o erro devido à dilatação do mercúrio sob a ação da leitura exata. É necessário conhecer outras influências de ordem local, tais como latitude, altitude e aquela própria de cada instrumento, proveniente da depressão capilar.

Unidades de Medida de Pressão

Basicamente, a unidade de medida de pressão será uma unidade de força sobre uma unidade de área. Desse modo, podemos ter:

- N/m^2 (newton por metro quadrado), chamada de pascal [Pa]; $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$;
- Múltiplos do pascal, como kPa (quilopascal) e MPa (megapascal);
- kgf/cm^2 (quilograma força por centímetro quadrado);
- kgf/m^2 (quilograma força por metro quadrado);
- lbf/in^2 (libra força por polegada quadrada) = psi (Pound Square Inch);
- dyn/cm^2 (dina por centímetro quadrado), chamada de bária;
- Bar, equivalente a 10^5 bárias.

No entanto, a pressão pode ser medida pela altura de uma coluna de líquido necessária para equilibrar a pressão aplicada. Dessa forma, podemos ter:

- mmHg (milímetros de mercúrio);
- cmHg (centímetros de mercúrio);
- inHg (polegadas de mercúrio);
- péHg (pés de mercúrio);
- mmca (milímetros de coluna de água);
- mca (metros de coluna de água);
- inca (polegadas de coluna de água).

A pressão também pode ser medida tomando-se como referência a pressão atmosférica, onde uma atmosfera (1atm) equivale a pressão atmosférica ao nível do mar na latitude 45° .

Pressão Efetiva ou Pressão Relativa ou Pressão Manométrica

É a pressão medida em relação à pressão atmosférica existente no local, podendo ser positiva ou negativa. A pressão efetiva recebe ainda o nome de pressão relativa ou pressão manométrica. Quando se fala em pressão relativa ou efetiva, subentende-se que a pressão é medida tomando-se por referência a pressão atmosférica; e o VÁCUO, como sendo uma pressão negativa em relação à pressão atmosférica.

Quando aplicamos uma pressão de 20psi no pneu de um automóvel, chamamos essa pressão de relativa, porque ela é medida em relação à pressão atmosférica.

Esvaziando o pneu, teremos, no mesmo, a pressão atmosférica, isto é, zero de pressão relativa ou efetiva. Convencionou-se que toda medição de pressão indique simplesmente o seu valor, ficando implícito que se trata de relativa.

Pressão Absoluta

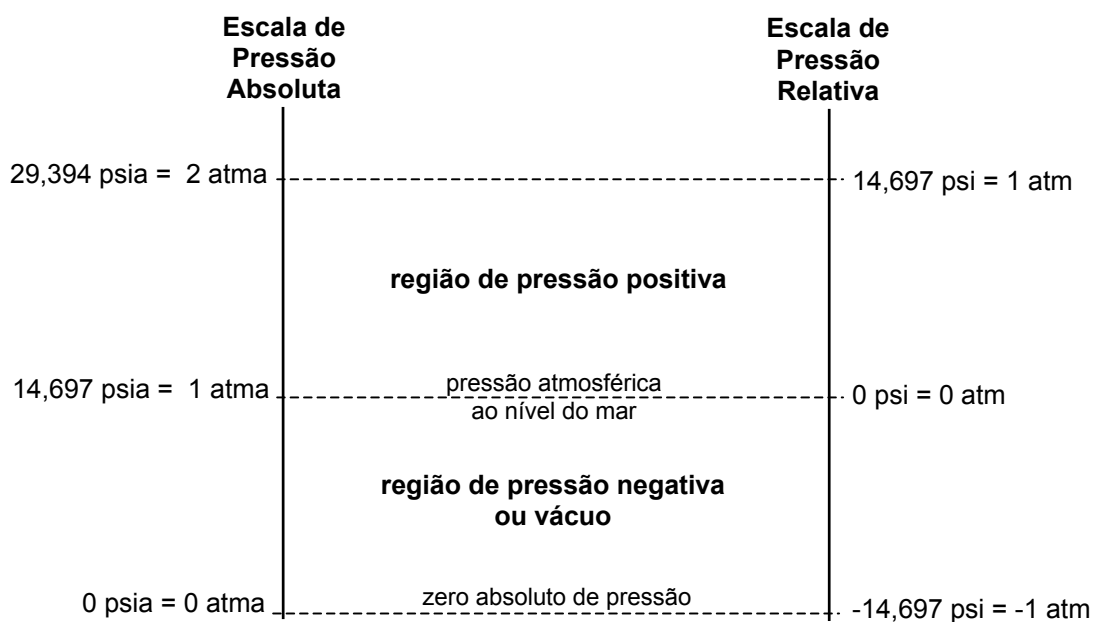
É a pressão medida a partir do vácuo perfeito, ou seja, a partir do zero absoluto de pressão. Para se diferenciar a unidade de medida de pressão absoluta, adiciona-se um índice "a" ou "ABS" a unidade de medida de pressão. Exemplo;

Pressão relativa: 2 atm, 5 psi, 14 kgf/cm²

Pressão absoluta: 2 atma, 5 psia, 14 kgf/cm²a, 25 Bar_{ABS}

Diagrama Comparativo entre as Escalas Relativa e Absoluta

O diagrama a seguir mostra claramente que, para cada pressão, podem ser atribuídas duas medidas diferentes, dependendo da escala escolhida.



A pressão absoluta é a soma da pressão relativa com uma pressão equivalente a 1 atm, ou seja:

$$p_{\text{ABS}} = p_{\text{REL}} + 1 \text{ atm}$$

Exemplos: $3 \text{ atma} = 2 \text{ atm} + 1 \text{ atm}$
 $54,697 \text{ psia} = 40 \text{ psi} + 14,697 \text{ psi}$, pois $1 \text{ atm} = 14,697 \text{ psi}$

O que é importante observar é que, na escala relativa, poderemos ter pressões negativas, isto é, inferiores à pressão atmosférica. Tais pressões como vimos, chamaremos de vácuo. Nunca teremos, porém, pressões absolutas negativas, pois a menor pressão absoluta que se pode alcançar é o zero absoluto, indicador do vácuo perfeito.

TABELA DE FATORES DE CONVERSÃO DE PRESSÃO

DE ↓ PARA →	Pa	kPa	mca	mmca	inca	Bar	mmHg	inHg	atm	psi	kgf/cm ²
Pa	1	10 ⁻³	1,01972 x 10 ⁻⁴	1,01972 x 10 ⁻¹	4,01463 x 10 ⁻³	10 ⁻⁵	7,50063 x 10 ⁻³	2,95300 x 10 ⁻⁴	9,86925 x 10 ⁻⁶	1,45038 x 10 ⁻⁴	1,01972 x 10 ⁻⁵
kPa	10 ³	1	1,01972 x 10 ⁻¹	1,01972 x 10 ²	4,01463	10 ⁻²	7,50063	2,95300 x 10 ⁻¹	9,86925 x 10 ⁻³	1,45038 x 10 ⁻¹	1,01972 x 10 ⁻²
mca (4°C)	9,80665 x 10 ³	9,80665	1	10 ³	3,93701 x 10 ¹	9,80665 x 10 ⁻²	7,35560 x 10 ¹	2,89590	9,67842 x 10 ⁻²	1,42233	10 ⁻¹
mmca (4°C)	9,80665	9,80665 x 10 ⁻³	10 ⁻³	1	3,93701 x 10 ⁻²	9,80665 x 10 ⁻⁵	7,35560 x 10 ⁻²	2,89590 x 10 ⁻³	9,67842 x 10 ⁻⁵	1,42233 x 10 ⁻³	10 ⁻⁴
inca (4°C)	2,49089 x 10 ²	2,49089 x 10 ⁻¹	2,54000 x 10 ⁻²	2,54000 x 10 ⁻¹	1	2,49089 x 10 ⁻³	1,86832	7,35560 x 10 ⁻²	2,45832 x 10 ⁻³	3,61273 x 10 ⁻²	2,54000 x 10 ⁻³
Bar	10 ⁵	10 ²	1,01972 x 10 ⁻¹	1,01972 x 10 ⁻⁴	4,01463 x 10 ⁻²	1	7,50063 x 10 ⁻²	2,95301 x 10 ⁻¹	9,86925 x 10 ⁻¹	1,45038 x 10 ⁻¹	1,01972
mmHg (0°C)	1,33322 x 10 ²	1,33322 x 10 ⁻¹	1,35951 x 10 ⁻²	1,35951 x 10 ⁻¹	5,35239 x 10 ⁻¹	1,33322 x 10 ⁻³	1	3,93701 x 10 ⁻²	1,31579 x 10 ⁻³	1,93367 x 10 ⁻²	1,35951 x 10 ⁻³
inHg (0°C)	3,38638 x 10 ³	3,38638	3,45316 x 10 ⁻¹	3,45316 x 10 ⁻²	1,35951 x 10 ¹	3,38638 x 10 ⁻²	2,54000 x 10 ⁻¹	1	3,34211 x 10 ⁻²	4,91153 x 10 ⁻¹	3,45315 x 10 ⁻²
atm	1,01325 x 10 ⁵	1,01325 x 10 ²	1,03323 x 10 ⁻¹	1,03323 x 10 ⁻⁴	4,06782 x 10 ⁻²	1,01325	760	2,99213 x 10 ⁻¹	1	1,46959 x 10 ⁻¹	1,03323
psi	6,89476 x 10 ³	6,89476	7,03070 x 10 ⁻¹	7,03070 x 10 ⁻²	2,76799 x 10 ⁻¹	6,89476 x 10 ⁻²	5,17150 x 10 ⁻¹	2,03602	6,80461 x 10 ⁻²	1	7,03070 x 10 ⁻²
kgf/cm ²	9,80665 x 10 ⁴	9,80665 x 10 ¹	10	10 ⁴	3,93701 x 10 ⁻²	9,80665 x 10 ⁻¹	7,35560 x 10 ⁻²	2,89591 x 10 ⁻¹	9,67842 x 10 ⁻¹	1,42233 x 10 ⁻¹	1

Condições de Referência:

1 atm = 760 mmHg (0°C) ao nível do mar e a latitude de 45°

 $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ $\gamma_{\text{Hg}} (0^\circ\text{C}) = 13595,08 \text{ kgf/m}^3$ $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} (4^\circ\text{C}) = 1000 \text{ kgf/m}^3$

1 libra = 0,4535924 kg

Densidade e Peso Específico dos Fluidos

Densidade Absoluta ou Massa Específica

Massa Específica ou Densidade Absoluta é a massa contida numa unidade de volume do fluido.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

onde: ρ : massa específica (rô - letra grega minúscula)
 m: massa
 V: volume

As unidades principais da massa específica são:

- CGS: g/cm³
- MKS: kg/m³

Peso específico

Peso específico de um líquido é o peso da unidade de volume desse líquido.

$$\gamma = \frac{P}{V}$$

onde: γ : peso específico (gama - letra graga minúscula)
 P: peso (força peso)
 V: volume

P=mg (definição de peso, onde **m** é a massa do corpo e **g** é a aceleração da gravidade)

As unidades principais do peso específico são:

- CGS: dina/cm³
- MKS: N/m³
- MK*S: kgf/m³

Relação entre massa específica e peso específico

Sabemos que :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{definição de massa específica})$$

$$\gamma = \frac{P}{V} \quad (\text{definição de peso específico})$$

$$\gamma = \frac{P}{V} = \frac{(m.g)}{V} = \frac{m}{V} . g \Rightarrow \boxed{\gamma = \rho . g}$$

Densidade Relativa

A densidade relativa de um líquido é a comparação que se faz entre o peso deste líquido e o peso de igual volume de água destilada a 4°C. A densidade é adimensional, ou seja, não apresenta unidade de medida. A densidade relativa indicada por "**dr**", podendo também ser definida como a razão entre as massas específicas.

$$dr = \frac{(\text{massa específica do corpo})}{(\text{massa específica da água})} \quad \text{ou} \quad dr = \frac{(\text{peso específico do corpo})}{(\text{peso específico da água})}$$

Exemplos:

Calcule a densidade relativa e a massa específica da glicerina, sabendo que seu peso específico vale 1280 kgf/cm³.

$$\gamma_{\text{glicerina}} = 1280 \text{ kgf/cm}^3; \quad \rho_{\text{glicerina}} = 1280 \text{ kg/cm}^3; \quad dr = \frac{\rho_{\text{glicerina}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{1280 \text{ kg/cm}^3}{1000 \text{ kg/cm}^3} = 1,28$$

Ou seja, a glicerina é 1,28 vezes mais densa que a água destilada a 4°C.

A densidade do mercúrio é 13,6, isto significa que um certo volume de mercúrio é 13,6 vezes mais pesado que o igual volume de água destilada a 4°C.

Influência da Temperatura

A variação de temperatura provoca alterações no volume dos fluidos, fazendo com que uma dada unidade de volume apresente diferentes massa de fluido em diferentes temperaturas. Portanto, a massa específica, o peso específico e a densidade relativa variam com mudança de temperatura do fluido.

Tabela de massa específica para água, mercúrio e álcool etílico

MASSA ESPECÍFICA (ρ) - kg / m ³			
Temperatura (°C)	Água (H ₂ O)	Mercúrio (Hg)	Álcool Etílico (96%)
0	999,78	13595,08	--
4	1000	13585,17	--
10	999,75	13570,33	809,91
15,56	999,08	13556,61	--
20	998,28	13545,68	801,38
25	997,12	13533,38	797,06

Peso específico de alguns líquidos

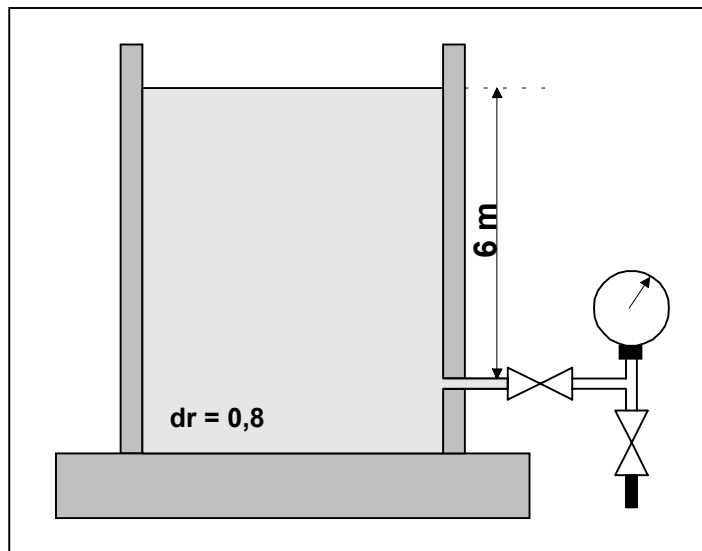
Líquido	$\gamma(\text{kgf/m}^3)$	Líquido	$\gamma(\text{kgf/m}^3)$
Ácido clorídrico	1190	Éter etílico 0°C	740
Ácido nítrico	1520	Glicerina	1280
Ácido sulfúrico	1850	Gasolina (15°C)	680 a 760
Acetona (20°C)	790	Leite (15°C)	1030
Álcool Etílico (15°C)	790	Mercúrio (15°C)	13600
álcool metílico (4°C)	810	Óleo de oliva	910
água destilada (4°C)	1000	Óleo lubrificante	900 a 930
Água do mar	1027	Óleo de cânfora	910
Águas residuais	1001 a 1005	Óleo de algodão (15°C)	920
Azeite	840 a 941	Óleo de rícino	970
Resina (0°C)	900	Petróleo (20°C)	930
Clorofórmio	1520	Querosene	790 a 820
Cerveja	1020 a 1040	Vinho	2450 a 2650
Essência de terebintina	870	-----	-----

Tipos de Pressão

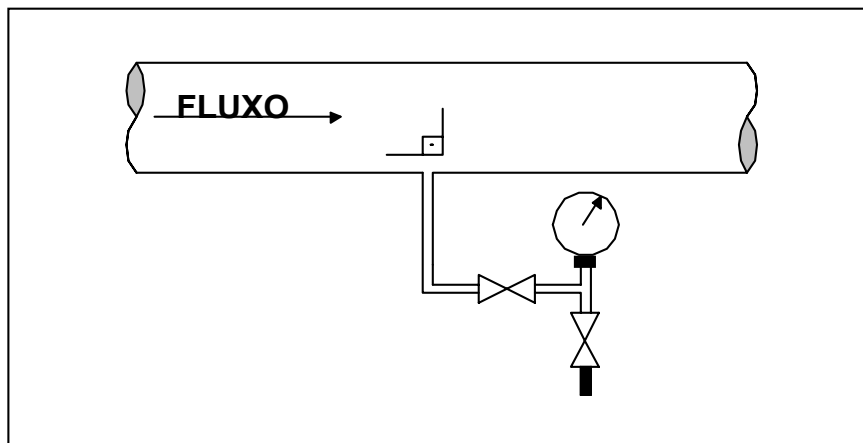
Toda vez que tivermos um fluido escoando em um duto, devido à ação de um ventilador, bomba, exaustor etc., devemos considerar três tipos de pressão:

Pressão Estática

É o peso por unidade de área exercido por um fluido em repouso ou que esteja fluindo perpendicularmente à tomada de impulso.



Fluido em Repouso



Fluido em Movimento

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. A expressão resultante da força viva do fluido pode ser calculada pela fórmula:

$$Pd = \rho \frac{V^2}{2} = N/m^2$$

$$Pd = \gamma \frac{V^2}{2g} = kgf/m^2$$

Pd = pressão dinâmica

ρ = massa específica do fluido

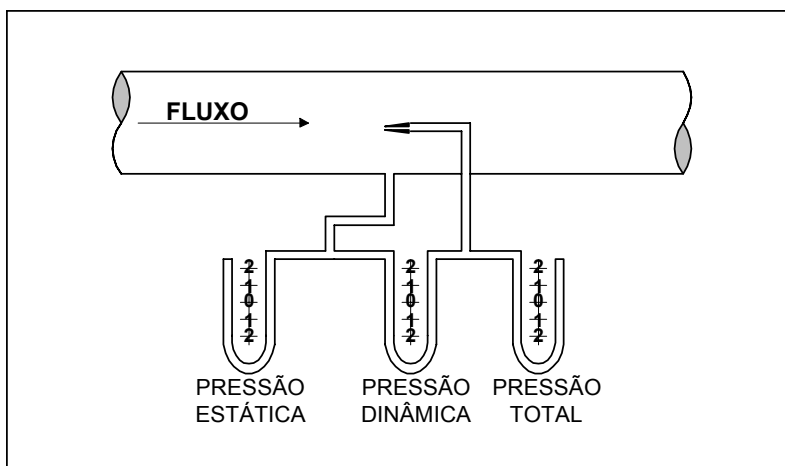
V = velocidade do fluido

Υ = peso específico do fluido

g = aceleração da gravidade

Pressão Total

É a soma das pressões estática e dinâmica. O instrumento que mede as pressões estática, dinâmica e total é o tubo de Pitot.



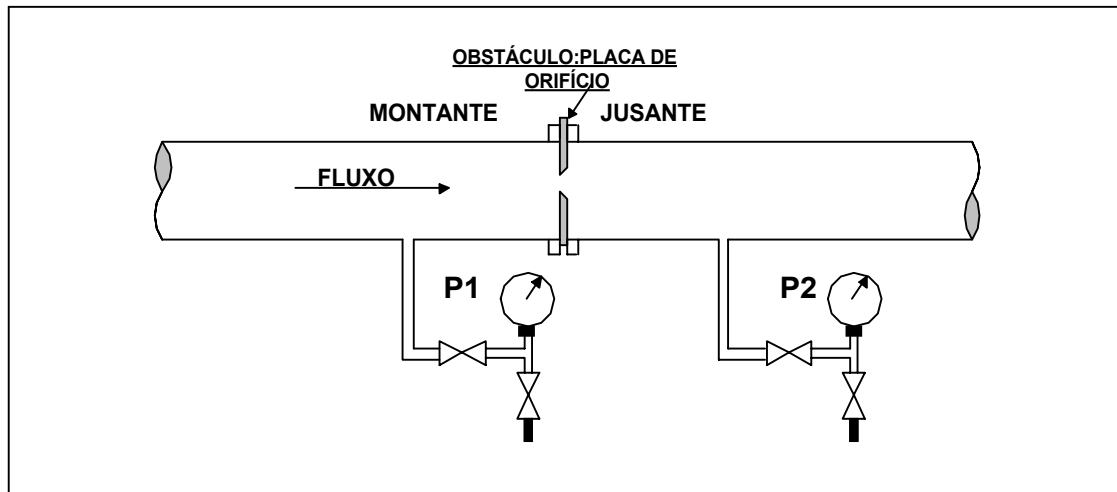
Pressão Estática, Dinâmica e Total

Pressão Diferencial

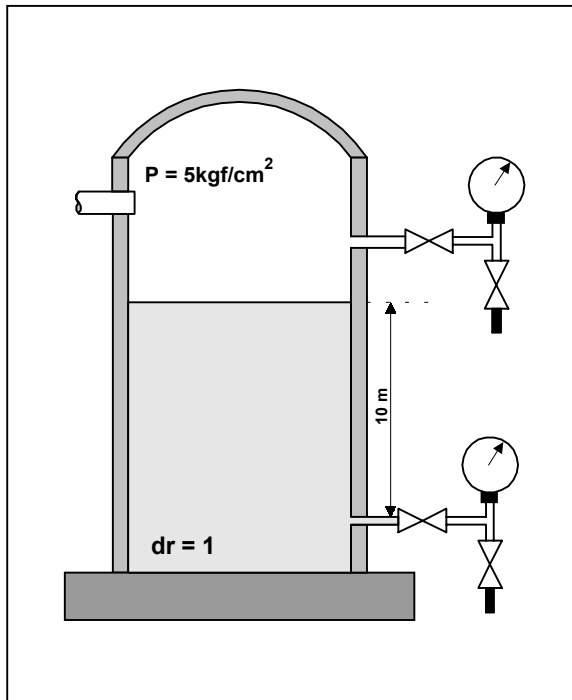
É a diferença entre duas pressões, também chamada de Δp (delta p). A diferença entre duas pressões p_1 e p_2 equivale à pressão diferencial Δp :

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

Criando-se um obstáculo à passagem do fluido, pode-se obter um diferencial de pressão.

***Pressão Diferencial em uma Restrição***

No caso da figura anterior, existe uma diferença entre a pressão na entrada da placa de orifício e a pressão na saída. Já no exemplo que se segue, tem-se o Δp obtido da diferença entre dois pontos tomados em um tanque.



Pressão Diferencial em um Reservatório

Manômetros

O instrumento mais simples para se medir pressão é o manômetro, que pode ter vários elementos sensíveis e que podem ser utilizados também por transmissores e controladores.

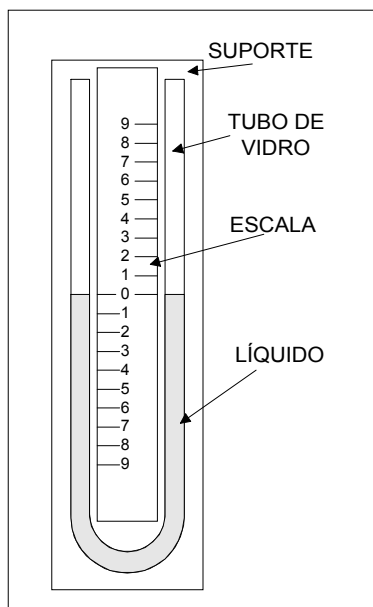
Manômetros de Coluna de Líquido

Um manômetro de coluna de líquido é constituído por um tubo de vidro, de seção circular e uniforme, contendo um líquido de densidade conhecida. A coluna se apresenta sempre associada a uma escala, cuja graduação aparece em milímetros em milésimos de polegada.

Tipos: Existem três tipos de colunas:

- coluna em "U"
- coluna reta
- coluna inclinada

Os manômetros de coluna podem ser utilizados para medir pressão positiva, pressão negativa (vácuo) ou pressão diferencial.



Manômetro de Coluna em U

Princípio de Funcionamento

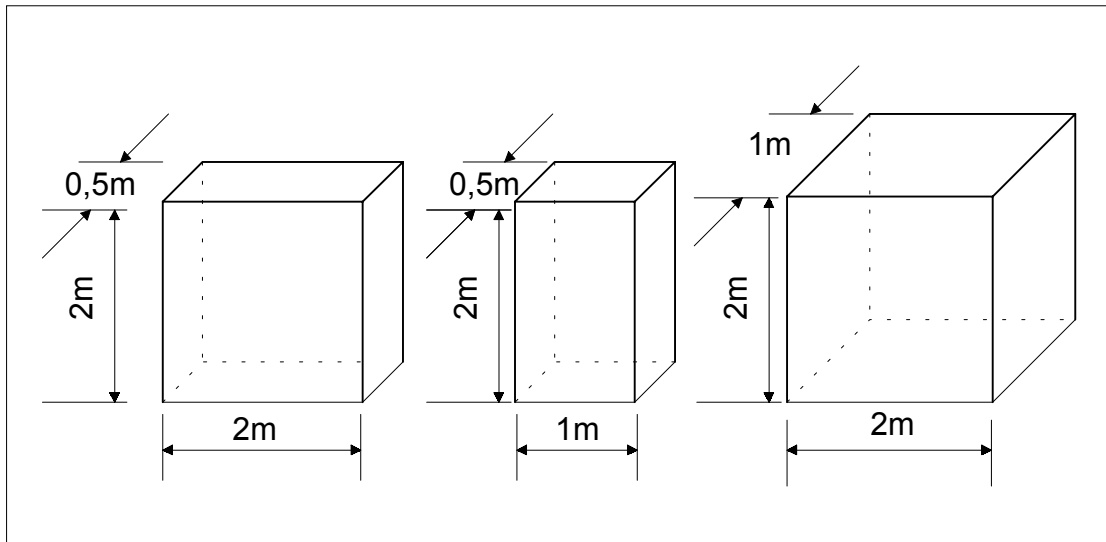
Teorema de Stevin

Enunciado do Teorema do Stevin:

"A diferença de pressão entre dois pontos de um fluido em repouso é igual ao produto do peso específico do fluido pela diferença de cota entre os dois pontos".

$$\Delta p = \gamma \cdot h$$

Segue então que todos os pontos situados na profundidade "h", em um recipiente, estão submetidos a uma igual pressão. Temos então planos paralelos na superfície livre do líquido, cujos pontos têm, todos, a mesma pressão. Consideremos os tanques abaixo cheios de água:



Volume do tanque A = 2m^3

Volume do tanque B = 1m^3

Volume do tanque c = 4m^3

Peso da água no tanque A: $\frac{1000\text{kgf}}{\text{m}^3} \cdot 2\text{m}^3 = 2000\text{kgf}$

Peso da água no tanque B: $\frac{1000\text{kgf}}{\text{m}^3} \cdot 1\text{m}^3 = 1000\text{kgf}$

$$\text{Peso da água no tanque C: } \frac{1000\text{kgf}}{\text{m}^3} \cdot 4\text{m}^3 = 4000\text{kgf}$$

Pressão no fundo dos tanques:

$$\text{Pressão} = \frac{p}{A}$$

$$\text{Tanque A: } p_A = \frac{2000\text{kgf}}{1\text{m}^2} = 2000\text{kgf/m}^2$$

$$\text{Tanque B: } p_B = \frac{1000\text{kgf}}{0,5\text{m}^2} = 2000\text{kgf/m}^2$$

$$\text{Tanque C: } p_C = \frac{4000\text{kgf}}{2\text{m}^2} = 2000\text{kgf/m}^2$$

Conclui-se, portanto, que a pressão no fundo dos tanques possui o mesmo valor.

Em seguida, temos a demonstração matemática do conceito do Teorema de Stevin:

$$\text{Pressão} = \frac{\text{Força}}{\text{Área}} = \frac{\text{Peso}}{\text{Área}} = \frac{p}{A}$$

$$\text{Peso} = \text{Peso específico} \cdot \text{volume} = \gamma \cdot V$$

Então:

$$p = \frac{P}{A} = \frac{\gamma \cdot V}{A}$$

Mas, $V = \text{área} \cdot \text{altura} = A \cdot h$, resultando:

$$P = \frac{\gamma \cdot A \cdot h}{A} = \gamma \cdot h$$

$$\text{Pressão no fundo do tanque} = \gamma \cdot h$$

Conclui-se, portanto, que a pressão no fundo dos tanques possui o mesmo valor. Esta expressão é chamada de carga de pressão, sendo dada pelo Teorema de Stevin.

A expressão $p = \gamma \cdot h$ é muito importante em instrumentação, na medição de nível de tanques. Ela simplifica os cálculos, porque, para determinar-se a pressão, basta apenas o peso específico do líquido e da altura da coluna líquida.

Uma variação do Teorema de Stevin é a seguinte:

$$\Delta p = \gamma_r \cdot h$$

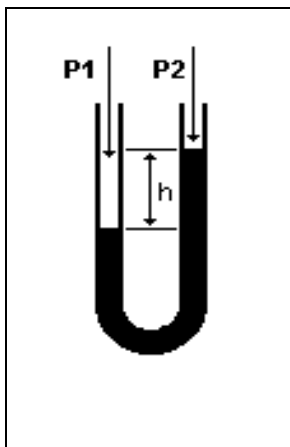
onde: γ_r é a densidade relativa. No entanto, a unidade de medida de pressão quando se usa essa fórmula é a unidade de medida da altura h em coluna de água (ca), independente do líquido ou do valor de seu peso específico. Ou seja:

Se h for em metros, a unidade de pressão será metro de coluna de água (mca); se h for em polegadas, a unidade de pressão será a polegada de coluna de água (inca).

Manômetro de Coluna em U

A pressão medida em um manômetro de coluna em U é dada pelo Teorema de Stevin:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad \text{e} \quad \Delta p = \gamma \cdot h \quad \text{portanto:} \quad p_1 - p_2 = \gamma \cdot h$$



Se p_1 for igual a p_2 , então $\Delta p = 0$ e o nível nos dois ramos da coluna será o mesmo. Quando p_1 for diferente de p_2 , então o nível nos dois ramos da coluna será diferente. Como os diâmetros dos ramos da coluna são iguais, o volume de líquido que sai de um ramo é igual ao volume de líquido que entra no outro ramo, de modo que a variação do nível num dos ramos da coluna é proporcional ao Δp aplicado à coluna. Isto permite que uma escala seja montada para medir a pressão na coluna diretamente por meio da variação de nível em apenas um dos ramos, não sendo necessário medir a altura entre os níveis nos dois ramos. Se o peso específico do líquido for constante, então a pressão medida será diretamente proporcional à variação do nível do líquido num dos ramos, o que permite que a escala da coluna seja graduada em unidades de pressão,

possibilitando a leitura direta da pressão medida, sem a necessidade de se fazer cálculos para se obter a pressão. O zero da escala de pressão assim construída será o ponto onde os níveis nos ramos sejam iguais.

A pressão medida diretamente por meio da variação do nível em um único ramo de uma coluna em U com ramos de mesmo diâmetro é dada por:

$p_1 - p_2 = 2 \cdot \gamma \cdot x$, onde x é o nível de um dos ramos da coluna.

Manômetro de Coluna Reta

Nesse manômetro, os ramos da coluna possuem diâmetros diferentes, e o ramo maior, onde se faz a leitura do nível, normalmente é aberto para a atmosfera, enquanto que a pressão é aplicada no ramo menor. A pressão medida pela variação da altura no ramo maior será:

$$p = \gamma \cdot h \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]$$

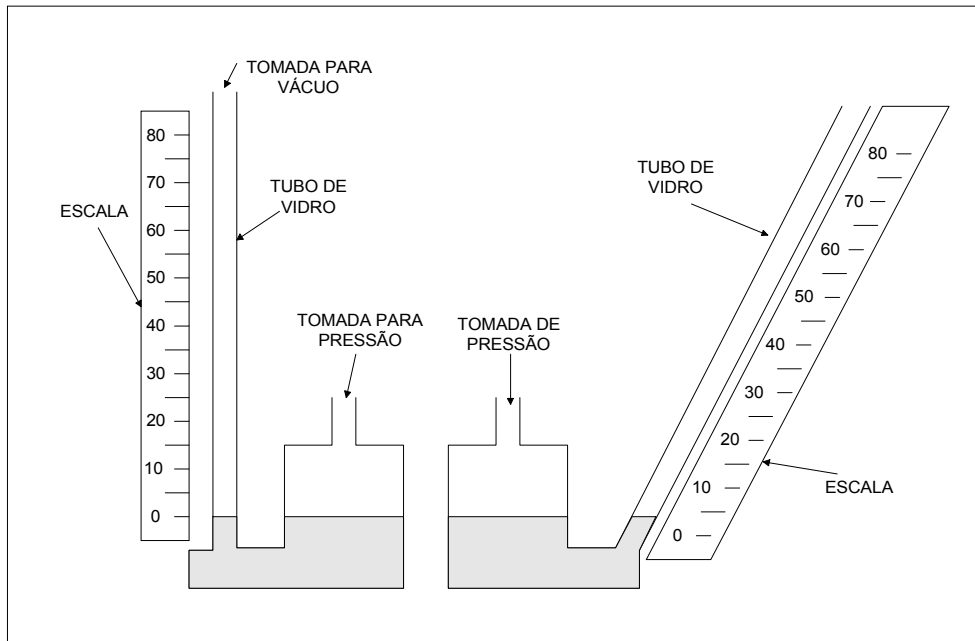
onde: d é a medida do diâmetro do ramo maior
 D é a medida do diâmetro do ramo menor

Manômetro de Coluna Inclínada

Nesse manômetro, os ramos da coluna possuem diâmetros diferentes, e o ramo maior, onde se faz a leitura do nível, é inclinado, enquanto que a pressão é aplicada no ramo menor. A pressão medida pela variação da altura no ramo maior será:

$$\Delta p = \gamma \cdot h \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] \cdot \cos \alpha$$

onde: d é a medida do diâmetro do ramo maior
 D é a medida do diâmetro do ramo menor
 α é o ângulo de inclinação entre o plano horizontal e o ramo maior

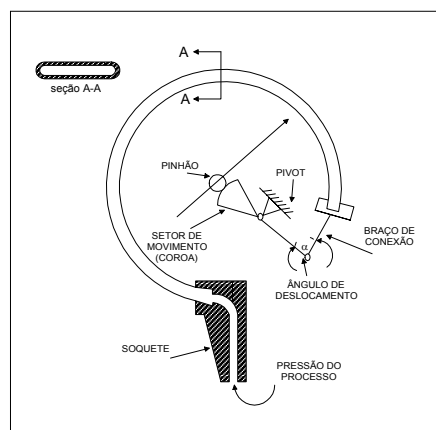


Manômetros de tubo de Bourdon

Tubo de Bourdon em C

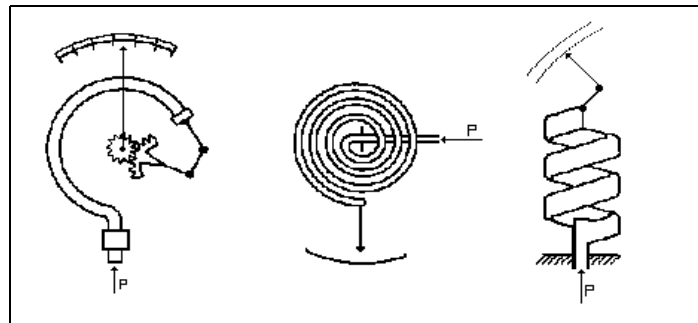
Consiste de um tubo metálico (Bourdon) de paredes finas, achatado para formar uma seção elíptica e recurvado para formar um segmento de círculo. Uma extremidade acha-se adaptada para a ligação com a fonte de pressão, a outra está selada e pode-se movimentar livremente. A pressão do tubo atua sobre a seção elíptica, forçando-a a assumir a forma circular, ao mesmo tempo em que o tubo recurvado tende a desenrolar.

Por serem estes movimentos muito pequenos, são amplificados por um dispositivo formado por uma coroa e um pinhão, o suficiente para girar o eixo de um ponteiro em redor de uma escala graduada, calibrada em unidades de pressão.



Tipos de Tubos “ Bourdon ”

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



a) Tipo C

b) Tipo Espiral

c) Tipo Helicoidal

Manômetro de Bourdon Espiral - Estes manômetros utilizam um tubo de Bourdon achatado formando uma espiral com diversas voltas. Como a pressão aplicada a extremidade aberta, a espiral tende a desenrolar transmitindo um movimento grande à extremidade livre. Por meio de uma ligação simples o movimento é transferido ao braço de um ponteiro, não havendo necessidade de coroa e de pinhão, como no caso anterior.

Manômetro de Bourdon Helicoidal - É similar ao tipo espiral, sendo que o tubo achatado de Bourdon é enrolado em forma de hélice com quatro a cinco voltas completas. O Bourdon helicoidal é usado para registradores de temperatura e pressão.

Fatores de Erro em Bourdon

Temperatura

As variações de temperatura ambiente são responsáveis pela variação na deflexão do tubo de bourdon. A maioria dos materiais tem seu módulo de elasticidade diminuído com a temperatura. O NI-SPAN é uma exceção pois possui módulo de elasticidade constante.

Existe, portanto há possibilidade de, para uma mesma pressão, o bourdon apresentar diferentes deflexões pela simples variação da temperatura ambiente. A correção deste erro é feita através de um bimetálico acoplado ao mecanismo.

Pressão atmosférica

O bourdon pode apresentar erro com a mudança da pressão atmosférica, principalmente quando ocorre a variação da temperatura ambiente.

Método de Ajuste de Manômetros (Genérico)

Objetivo

Esse método procura descrever os procedimentos básicos para o ajuste (calibração) de manômetros de tubo de bourdon. Esse método é adequado para a maioria dos manômetros encontrados em ambiente industrial e mesmo para outros tipos de instrumentos. No entanto, convém lembrar que os procedimentos para ajuste podem diferir de um fabricante para outro, sendo então de grande importância as informações obtidas de manuais, catálogos e junto ao fabricante do instrumento. É importante notar que o procedimento recomendado pelo fabricante pode até mesmo ser totalmente diferente do procedimento aqui descrito.

Procedimento

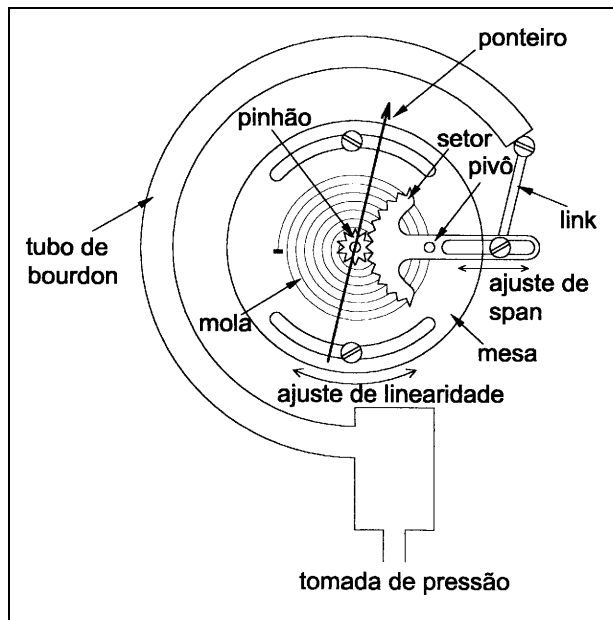
Basicamente, os manômetros possuem três ajustes: zero, span e linearidade (ou angularidade). O ajuste de zero serve para fazer com que uma pressão correspondente a 0% do span da faixa de trabalho produza uma leitura de 0% do span da faixa de medida. O ajuste de span serve para fazer com que uma pressão correspondente a 100% do span da faixa de trabalho produza uma leitura de 100% do span da faixa de medida. Já o ajuste de angularidade serve para fazer com que um valor de pressão medido entre 0% e 100% da faixa de trabalho corresponda ao valor real de pressão aplicado.

A exatidão obtida no instrumento de medição irá depender fundamentalmente da exatidão garantida pelo fabricante, das condições das peças do instrumento e do cuidado ao se efetuar o ajuste.

Para o ajuste do instrumento deve-se seguir os seguintes passos:

1. aplicar o valor de pressão de 0% da faixa de trabalho e ajustar o zero do instrumento;
2. aplicar o valor de 100% da faixa de trabalho e ajustar o span;
3. reajustar o zero;
4. reajustar o span;
5. refazer os passos 3 e 4 até que o zero e o span não saiam mais do ajuste;
6. após o ajuste de zero e de span, verificar se os valores de 25%, 50% e 75% da faixa de trabalho estão ajustados. Se esses pontos estiverem com um desvio maior do que o recomendado pelo fabricante, fazer o ajuste de angularidade e repetir todos os passos anteriores.

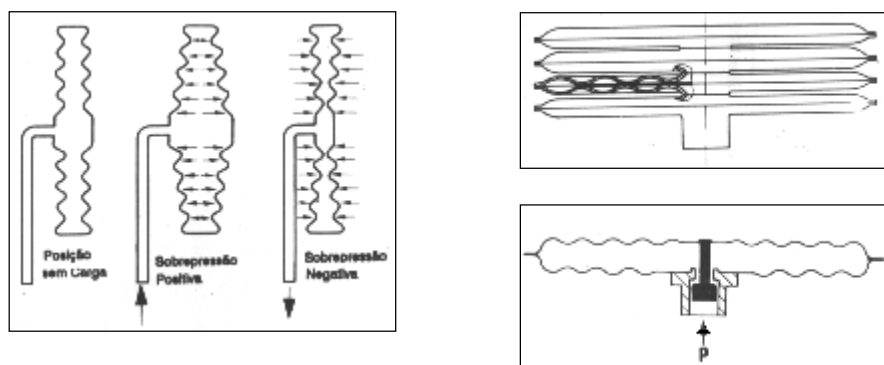
Como referência para o ajuste de angularidade, pode-se ajustar a mesa do manômetro até que o desvio obtido para o valor de 50% do span seja aumentado em cinco vezes.



Manômetros de Diafragma

O diafragma é constituído por um disco de material elástico, fixado pela borda. Uma haste fixada 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 diafragma geralmente é ondulado ou corrugado para aumentar sua área efetiva.

Os diafragmas podem ser de materiais metálicos ou não metálicos:

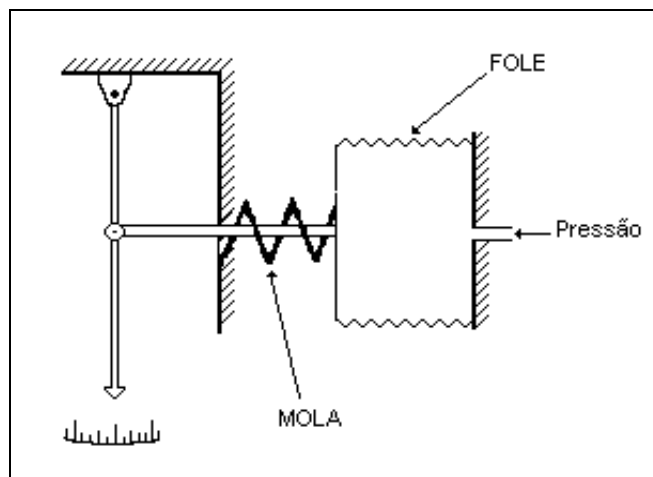
Metálicos - Estes diafragmas são feitos de uma chapa metálica lisa ou enrugada ligadas a um ponteiro por meio de haste. O movimento de deflexão do diafragma, causado pela pressão, posiciona um ponteiro indicador ao longo de uma escala de graduação constante. Os diafragmas são feitos de bronze fosforoso, cobre, berílio, latão, aço inoxidável e Monel.

Não Metálicos - São fabricados em couro, teflon, neoprene e polietileno. São empregados para pressões baixas e geralmente uma mola opõe-se ao movimento do diafragma, cuja deflexão é diretamente proporcional a pressão aplicada.

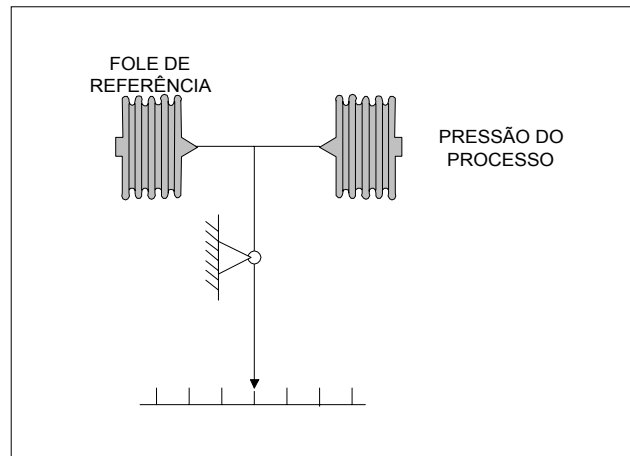
Manômetros de Fole

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

Foles com Mola Oposta - O instrumento possui um fole metálico e uma mola envolvida por uma câmara também de metal que é conectada à fonte de pressão. A pressão agindo pelo lado de fora do fole maior, comprime-o e move a sua extremidade livre contra a oposição da mola. Uma haste ligada ao fole através de um disco transmite esse movimento ao braço de um ponteiro indicador ou registrador.



Foles Opostos - Este tipo de elemento é usado para medir pressão absoluta. O instrumento possui duas sanfonas em oposição, em uma só unidade. Um dos foles, aquele que é utilizado como referência, está fechado e sob a pressão de uma atmosfera. O outro está ligado a fonte de pressão.



Emprego dos Elementos Elásticos

Para assegurar um longo período de trabalho é necessário observar os seguintes itens:

- Não ultrapassar $2 / 3$ do valor máximo (quando a pressão medida for constante);
- Não ultrapassar $1 / 2$ do valor máximo (quando a pressão medida for variável);
- O instrumento deve ser equipado com válvula de bloqueio de 3 (três) vias;
- Quando o elemento for submetido a pressões pulsantes, o mesmo deve ser protegido por um amortecedor de pulsação. Esse amortecedor pode ser uma válvula agulha, servindo também como bloqueio (possibilitando a retirada do instrumento sem parar o processo);
- O elemento não deve ser submetido a uma temperatura que não permita o toque da mão sobre a caixa do medidor, evitando desgaste prematuro do elemento e demais componentes do medidor, além de garantir a confiabilidade da calibração feita à temperatura ambiente. Para resolver este problema é utilizado um tubo sifão entre o medidor e o processo;
- O elemento deve ser isolado de fluidos corrosivos, com sólidos em suspensão, ou com possibilidade de cristalização e solidificação. Para isolar o elemento destes tipos de processos é utilizado um selo;
- Quando o processo estiver sujeito a sobrecarga, deve-se proteger o elemento com um limitador de sobrecarga;
- Devem ser tomadas precauções especiais quando se trata de medição de petróleo e oxigênio. Para a indústria de petróleo, o tubo de bourdon não deverá ser soldado com estanho. Para medidas com oxigênio, o elemento deve estar livre de óleo, graxas e outras gorduras, pois existe o risco de explosão. A calibração do instrumento pode ser feita com álcool, água ou óleo de silicone. É recomendável que seja gravado na escala do instrumento: **Petróleo e Oxigênio**.

Método para Ensaio de Manômetros

Coluna líquida: aferição de manômetros com baixa pressão;

Bomba de peso morto: aferição de manômetros de ensaio (0,1% a 0,25%).

Características dos manômetros de ensaio (padrão):

- Tolerância quatro vezes mais estreita que o manômetro a ser ensaiado;
⇒ Ex.: Padrão com tolerância 0,25% da faixa para aferir manômetro com 1% de tolerância.
- Diâmetro maior ou igual a 150 mm;
- A precisão deve estar indicada no mostrador;
- A faixa de trabalho deve ser de 1,3 a 1,6 vezes a faixa do instrumento a ser calibrado;
- Deve ter escala espelhada para evitar o erro de paralaxe e não deve possuir batente no zero da escala.

Classificação de manômetros (pela exatidão):

CLASSE	EXATIDÃO	
A4	0,10 % da faixa	
A3	0,25 % da faixa	
A2	0,50 % da faixa	
A1	1,00 % da faixa	
A	1,00 % na faixa de 25 a 75 %	2 % no restante da faixa
B	2,00 % na faixa de 25 a 75 %	3 % no restante da faixa
C	3,00 % na faixa de 25 a 75 %	4 % no restante da faixa
D	4,00 % na faixa de 25 a 75 %	5 % no restante da faixa

Máquina de Teste para Instrumento de Pressão.

É um equipamento que serve para aplicar uma pressão conhecida no instrumento sob teste para sua aferição ou calibração. Constitui-se basicamente por uma câmara fechada, cheia de óleo, um êmbolo e um manômetro padrão ou um conjunto de "contrapesos".

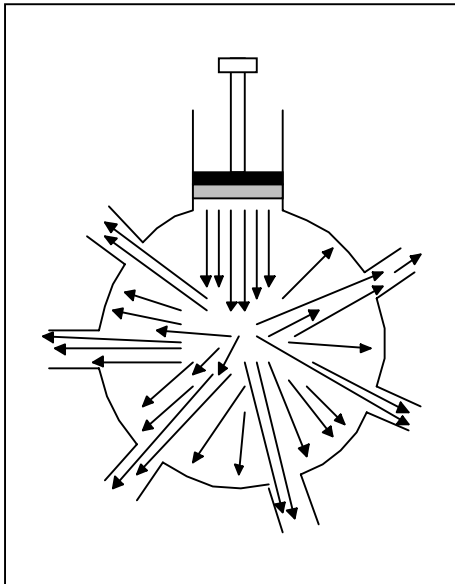
Princípio de Funcionamento

Princípio de Pascal

No século XVII, Pascal elaborou a lei que forma a base da hidráulica moderna:

"A pressão exercida em qualquer ponto por um líquido em forma estática transmite-se integralmente em todas as direções e produza mesma força em áreas iguais".

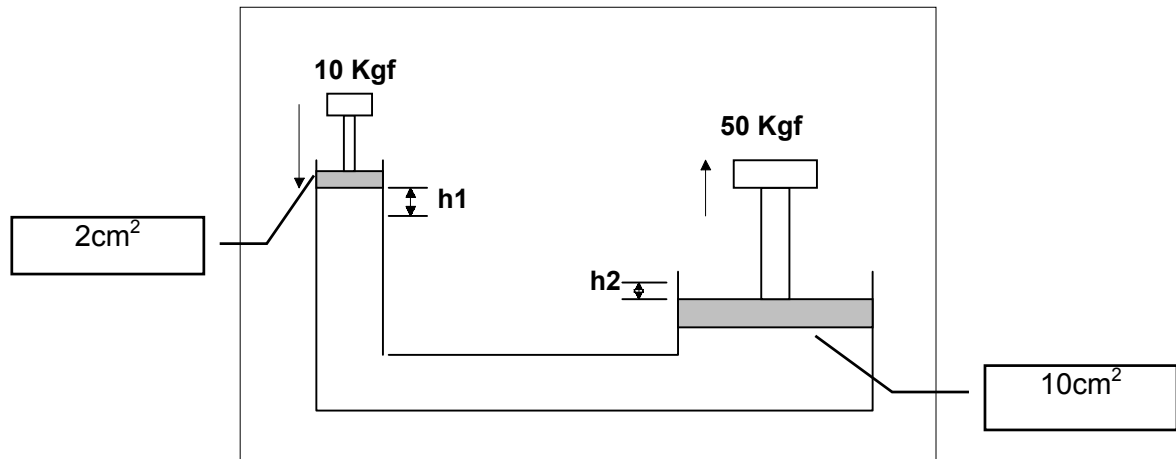
Podemos demonstrar este princípio, utilizando uma esfera oca, provida de vários orifícios, distribuídos em vários pontos de sua superfície. Em um desses orifícios, temos acoplado um cilindro, dentro do qual, podemos deslocar um Êmbolo, conforme a figura a seguir.



Transmissão de Pressão em um líquido

Exercendo-se uma pressão adequada no êmbolo, veremos que os jatos de água que saem pelos orifícios são iguais. Isso significa que a pressão exercida é igual em todos os orifícios. Podemos considerar os fluidos praticamente incompressíveis, a força mecânica desenvolvida em um fluido sob pressão pode ser transmitida, multiplicada ou controlada.

Conforme a figura a seguir, podemos verificar que, ao aplicarmos uma força de 10 kgf sobre o pistão 1 o pistão 2 levantará um peso de 50 kgf devido a ter o mesmo uma área 5 vezes maior que a área do pistão 1.



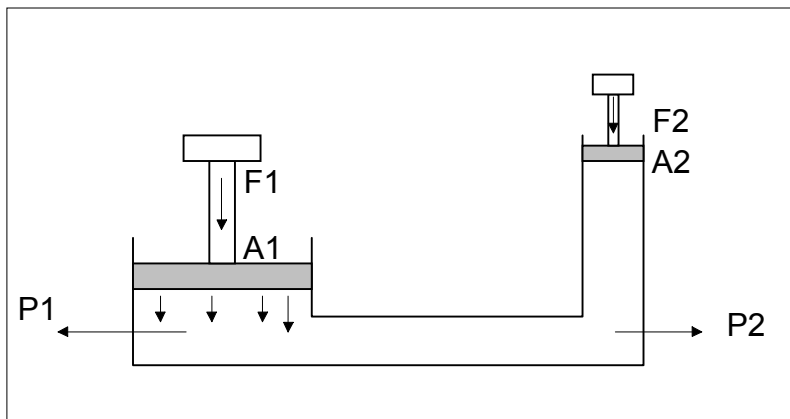
$P_1 = P_2$

$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$

$A_1 \cdot h_1 = A_2 \cdot h_2$

Na prensa hidráulica da figura anterior, que é uma aplicação do princípio de Pascal, podemos verificar que o pistão 2 se movimentará cinco vezes mais lento que o pistão 1, em razão da diferença de áreas.

É no princípio de Pascal que se baseiam as máquinas hidráulicas para calibração de instrumentos utilizados pela instrumentação, macacos hidráulicos, servo mecanismos, controles hidráulicos etc.



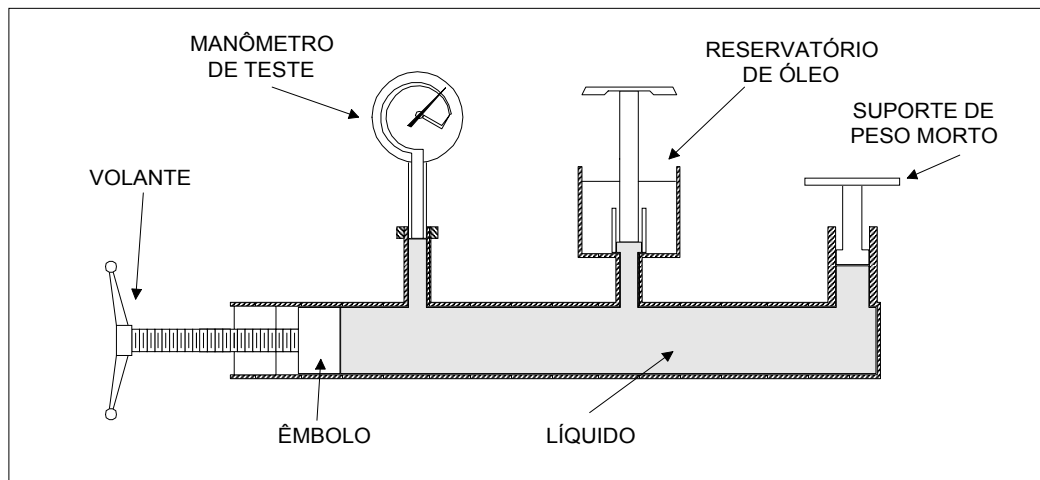
1) $P_1 = \frac{F_1}{A_1}$

2) $P_2 = \frac{F_2}{A_2}$

Fazendo-se 1 = 2, tem-se: $\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \rightarrow F_1 A_2 = F_2 A_1$

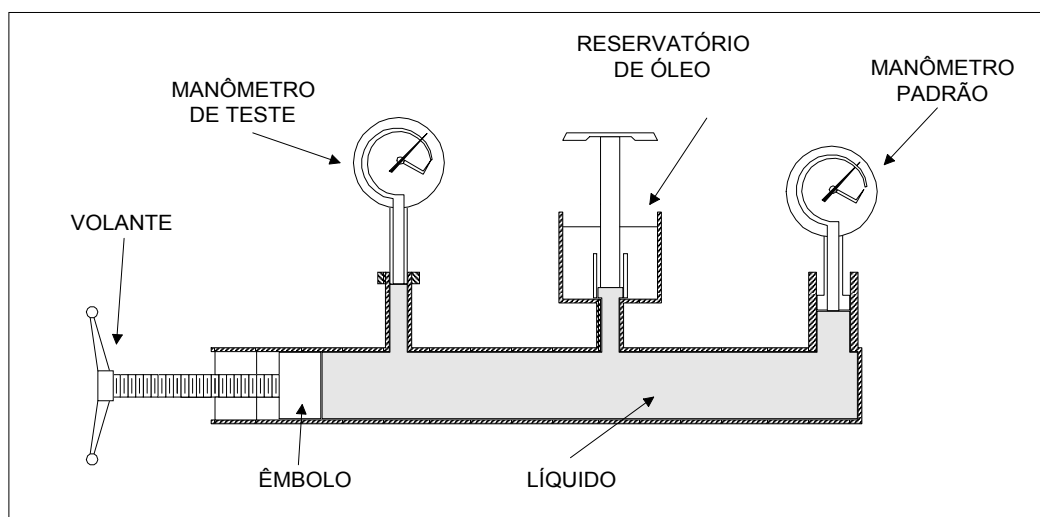
Como $A_1 > A_2 \rightarrow F_1 > F_2$

A máquina de teste para instrumentos de pressão funciona pelo princípio de Pascal. O teste pode ser feito em comparação com peso morto ou com relação a um manômetro-padrão.



Teste com peso-morto

Movimentando o êmbolo no sentido de pressionar o líquido, este transmite a pressão para o instrumento que se quer testar e para o peso morto. No momento em que a pressão do líquido deslocar o peso morto, a pressão aplicada no instrumento sob teste é igual à indicada no disco de peso morto.



Teste com manômetro-padrão

Outros Sensores de Pressão

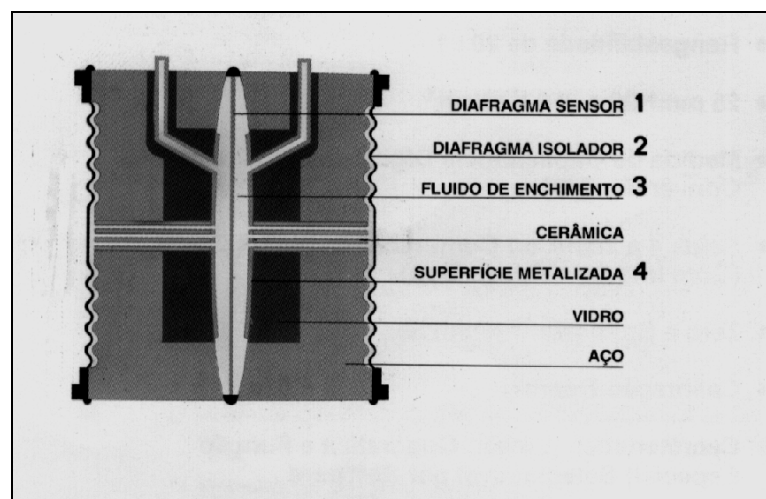
Sensor Capacitivo

A principal característica dos sensores capacitivos é a completa eliminação dos sistemas de alavancas na transferência da força / deslocamento entre o processo e o sensor.

Este tipo de sensor resume-se na deformação, diretamente pelo processo de uma das armaduras do capacitor. Tal deformação altera o valor da capacitância total que é medida por um circuito eletrônico.

Esta montagem, se por um lado, elimina os problemas mecânicos das partes móveis, expõe a célula capacitiva às rudes condições do processo, principalmente a temperatura do processo. Este inconveniente pode ser superado através de circuitos sensíveis a temperatura montados juntos ao sensor.

Outra característica inerente a montagem, é a falta de linearidade entre a capacitância e a distância das armaduras devido à deformação não linear, sendo necessário portanto, uma compensação (linearização) à cargo do circuito eletrônico.



O sensor é formado pelos seguintes componentes :

- Amaduras fixas metalizadas sobre um isolante de vidro fundido
- Dielétrico formado pelo óleo de enchimento (silicone ou fluorure)
- Armadura móvel (Diafragma sensor)

Uma diferença de pressão entre as câmaras de alta (High) e de baixa (Low) produz uma força no diafragma isolador que é transmitida pelo líquido de enchimento .

A força atinge a armadura flexível (diafragma sensor) provocando sua deformação , alterando portanto , o valor das capacitâncias formadas pelas armaduras fixas e a armadura móvel . Esta alteração é medida pelo circuito eletrônico que gera um sinal proporcional à variação de pressão aplicada à câmara da cápsula de pressão diferencial capacitiva .

Sensor Strain-Gauge

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

Para variarmos a resistência de um condutor devemos analisar a equação geral da resistência :

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

R : Resistência do condutor

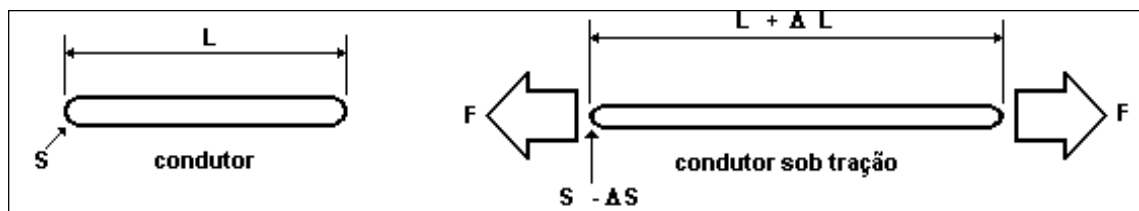
ρ : Resistividade do material

L : Comprimento do condutor

S : Área da seção transversal

A equação nos explica que a resistência elétrica de um condutor é diretamente proporcional a resistividade e ao comprimento e inversamente proporcional a área da seção transversal .

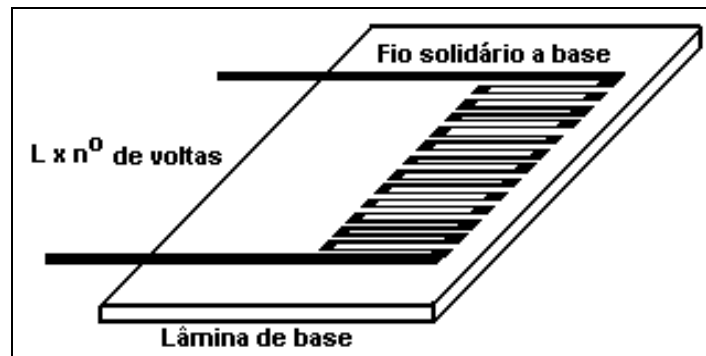
A maneira mais prática de alterarmos as dimensões de um condutor é tracionarmos o mesmo no sentido axial como mostrado a seguir :



Seguindo esta linha de raciocínio , concluímos que para um comprimento L obtivemos ΔL , então para um comprimento $10 \times L$ teríamos $10 \times \Delta L$, ou seja , quanto maior o comprimento do fio , maior será a variação da resistência obtida e maior a sensibilidade do sensor para uma mesma pressão (força) aplicada.

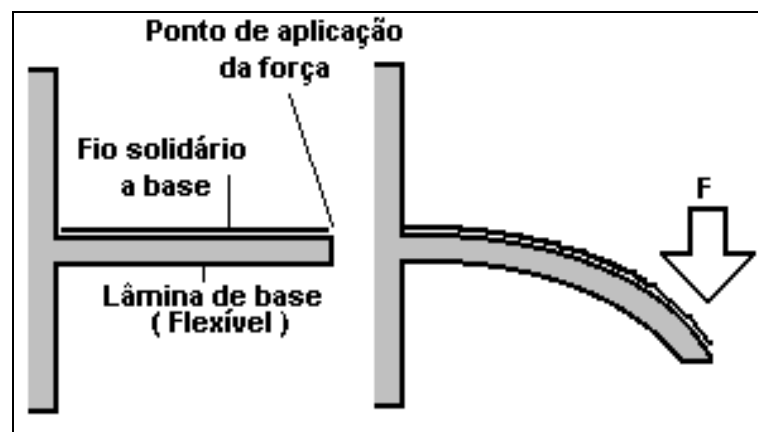
O sensor consiste de um fio firmemente colado sobre uma lâmina de base , dobrando-se tão compacto quanto possível .

Esta montagem denomina-se tira extensiométrica como vemos na figura a seguir :



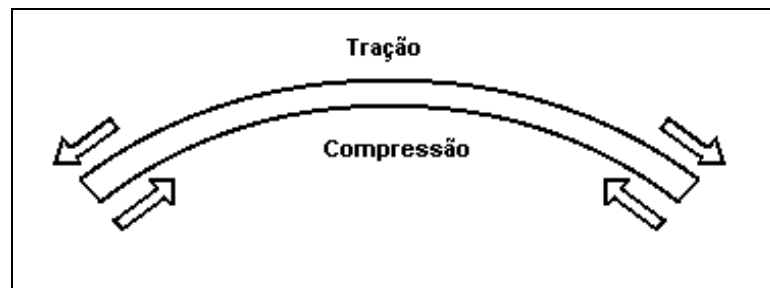
Observa-se que o fio , apesar de solidamente ligado a lâmina de base , precisa estar eletricamente isolado da mesma .

Uma das extremidades da lâmina é fixada em um ponto de apoio rígido enquanto a outra extremidade será o ponto de aplicação de força .



Um material ao sofrer uma flexão , suas fibras internas serão submetidas à dois tipos de deformação : tração e compressão .

As fibras mais externas sofrem um alongamento com a tração pois pertencem ao perímetro de maior raio de curvatura , enquanto as fibras internas sofrem uma redução de comprimento (menor raio de curvatura).



Como o fio solidário à lâmina , também sofrerá o alongamento , acompanhando a superfície externa , irá variando a resistência total, que poderá ser lida através de um circuito.