



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ENGENHARIA FÍSICA

Fenômenos de Transporte A (Mecânica dos Fluidos)

Prof. Dr. Sérgio R. Montoro

sergio.montoro@usp.br

srmontoro@dequi.eel.usp.br



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

MECÂNICA DOS FLUIDOS

ENGENHARIA FÍSICA

AULA 3
PRESSÃO



PRESSÃO

Foi visto anteriormente que uma força aplicada sobre uma superfície pode ser decomposta em dois efeitos: um tangencial, que origina tensões de cisalhamento, e outro normal, que dará origem às pressões.

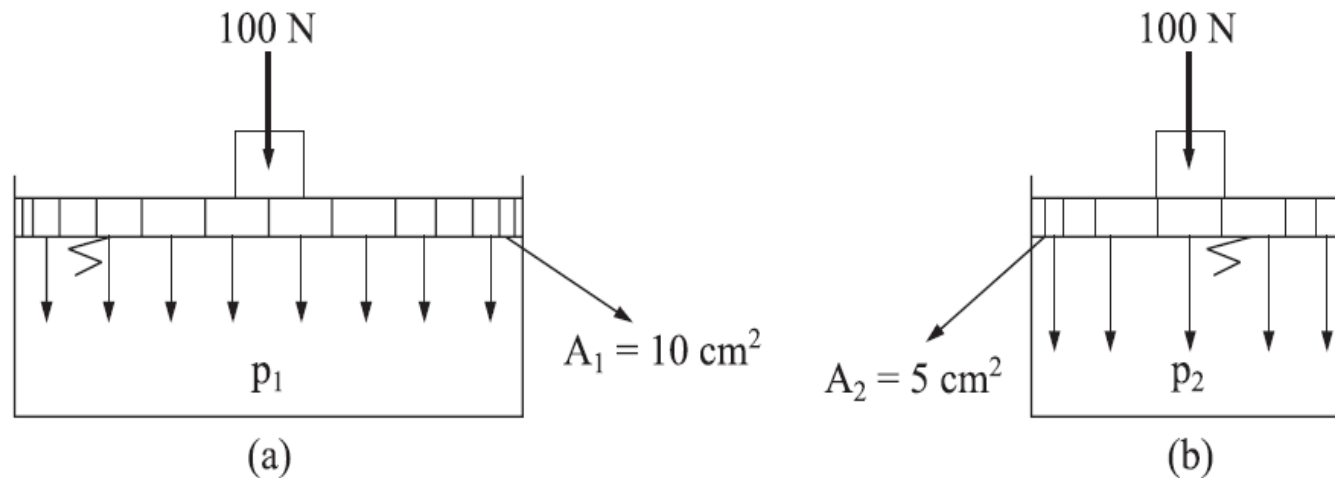
Se a pressão for uniforme, sobre toda a área, ou se o interesse for na pressão média, então:

$$p = \frac{F_n}{A}$$



PRESSÃO

Não devemos confundir pressão com força. Veja o exemplo da figura a seguir:



Note-se que a força aplicada em ambos os recipientes é a mesma; entretanto, a pressão será diferente. De fato:



PRESSÃO

Recipiente (a):

$$p_1 = \frac{F_1}{A_1} = \frac{100N}{10cm^2} = 10N / cm^2$$

Recipiente (b):

$$p_2 = \frac{F_2}{A_2} = \frac{100N}{5cm^2} = 20N / cm^2$$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

TEOREMA DE STEVIN



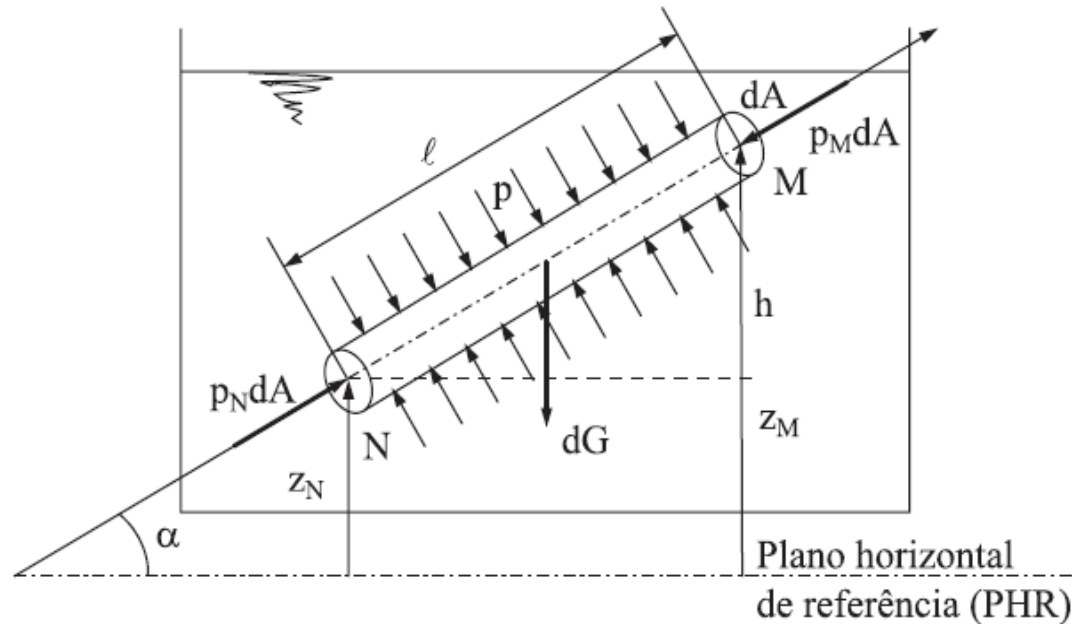
TEOREMA DE STEVIN

“A diferença de pressão entre dois pontos de um fluido em repouso é igual ao produto do peso específico do fluido pela diferença de cotas dos dois pontos.”

Sejam um recipiente que contém um fluido e dois pontos genéricos M e N. Unindo os pontos M e N constrói-se um cilindro, cuja área da base é dA , em torno do eixo MN.



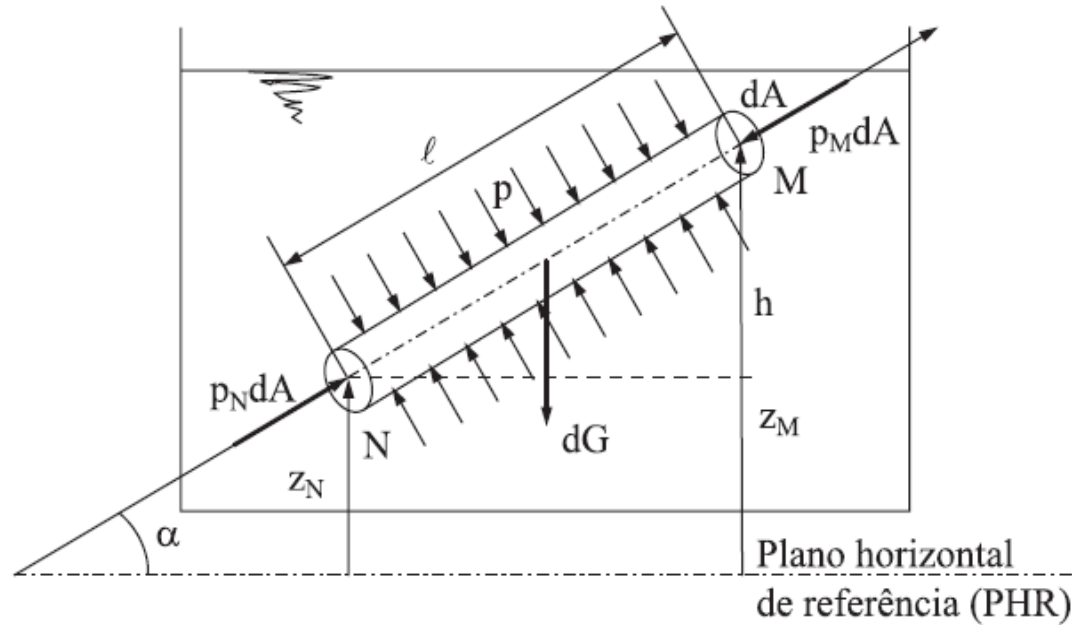
TEOREMA DE STEVIN



Orienta-se o eixo MN de N para M, e seja α o ângulo formado com a horizontal.



TEOREMA DE STEVIN



Seja h a diferença de cotas dos dois pontos, isto é, $h = z_M - z_N$.



TEOREMA DE STEVIN

Como, por hipótese, o fluido está em repouso, a resultante das forças que agem sobre o cilindro em qualquer direção deve ser nula, ou haveria um deslocamento nessa direção, contrariando a hipótese.

As forças que agem são:

$$dF_N = p_N dA \text{ no ponto N}$$

$$dF_M = p_M dA \text{ no ponto M}$$

$$F = \int p dA_L \text{ na superfície lateral}$$

$$dG = \text{peso do fluido contido no cilindro} = \text{volume de fluido} \times \text{peso específico} = L \cdot dA \cdot \gamma$$



TEOREMA DE STEVIN

Todas essas forças são projetadas na direção do eixo NM. Deve-se lembrar que, como as forças devidas à pressão são normais à superfície, então as que agem na superfície lateral terão componente nula sobre o eixo.

As outras forças projetadas, respeitando o sentido do eixo, resultam:

$$p_N dA - p_M dA - dG \sin \alpha = 0$$



TEOREMA DE STEVIN

Ou,

$$p_N dA - p_M dA - \gamma L dA \sin \alpha = 0$$

$$p_N - p_M = \gamma L \sin \alpha$$

Mas

$$L \sin \alpha = h = z_M - z_N$$

Ou,

$$p_N - p_M = \gamma h = \gamma(z_M - z_N)$$



TEOREMA DE STEVIN

Logo, a diferença de pressão entre dois pontos genéricos é igual ao produto do peso específico do fluido pela diferença de cotas entre os dois pontos, como se queria demonstrar.

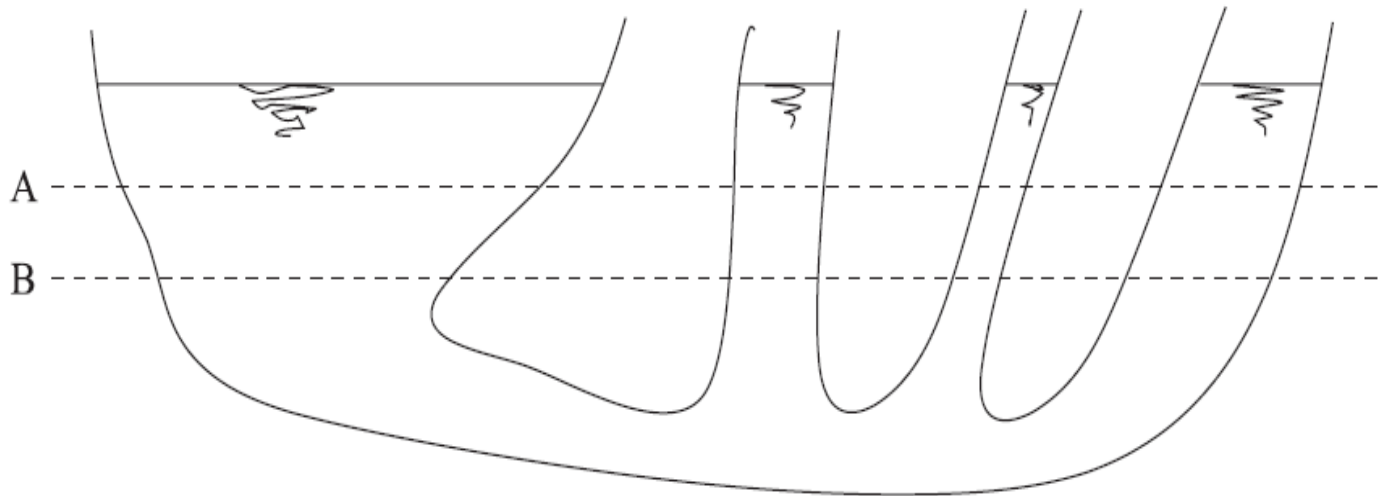
O que é importante notar ainda nesse teorema é que:

- a)** Na diferença de pressão entre dois pontos não interessa a distância entre eles, mas a diferença de cotas;
- b)** A pressão dos pontos num mesmo plano ou nível horizontal é a mesma;



TEOREMA DE STEVIN

c) O formato do recipiente não é importante para o cálculo da pressão em algum ponto. Na figura a seguir, em qualquer ponto do nível A, tem-se a mesma pressão p_A , e em qualquer ponto do nível B, tem-se a pressão p_B , desde que o fluido seja o mesmo em todos os ramos;

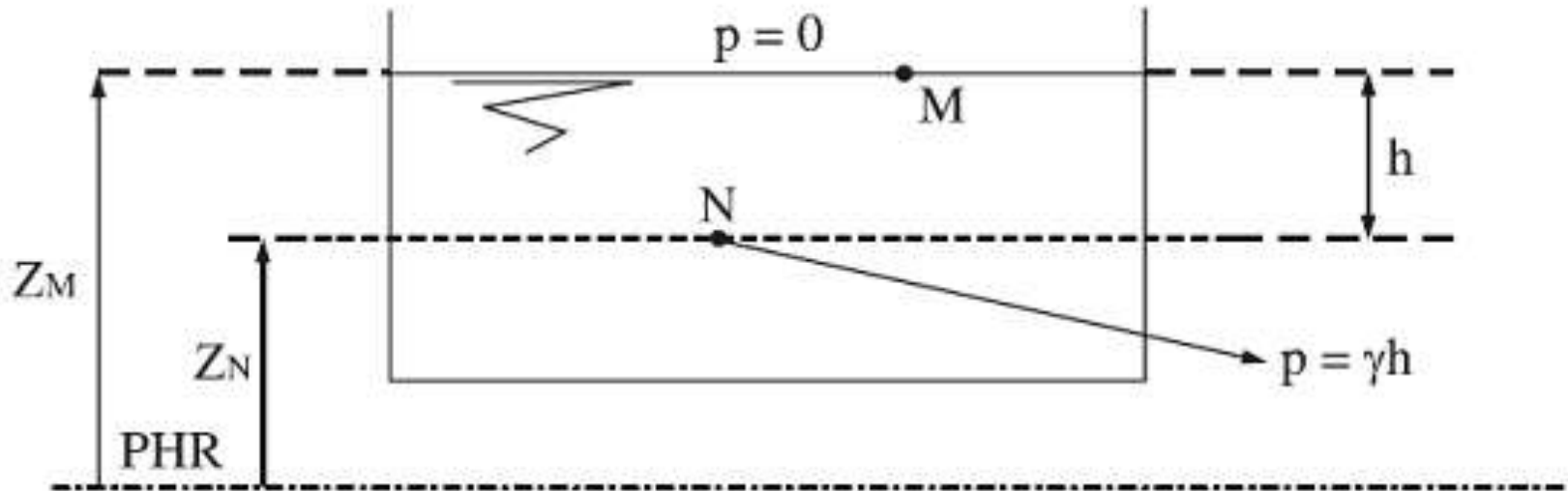




TEOREMA DE STEVIN

d) Se a pressão na superfície livre de um líquido contido num recipiente for nula, a pressão num ponto à profundidade h dentro do líquido será dada por:

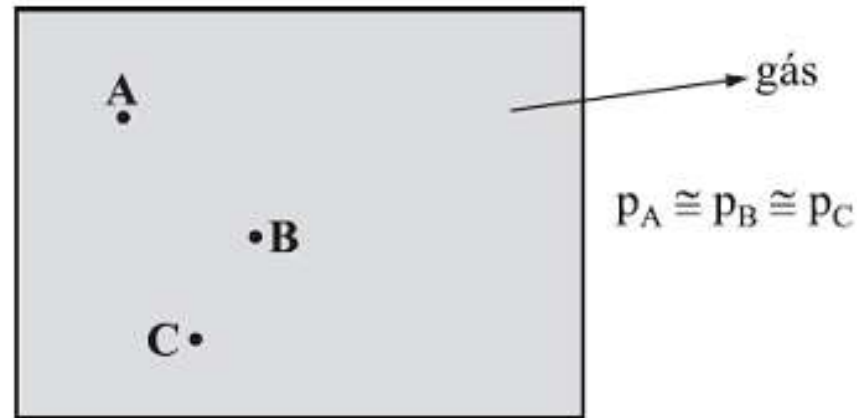
$$p = \gamma h$$





TEOREMA DE STEVIN

e) Nos gases, como o peso específico é pequeno, se a diferença de cota entre dois pontos não é muito grande, pode-se desprezar a diferença de pressão entre eles.





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

PRESSÃO EM TORNO DE UM PONTO DE UM FLUIDO EM REPOUSO



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

PRESSÃO EM TORNO DE UM PONTO DE UM FLUIDO EM REPOUSO

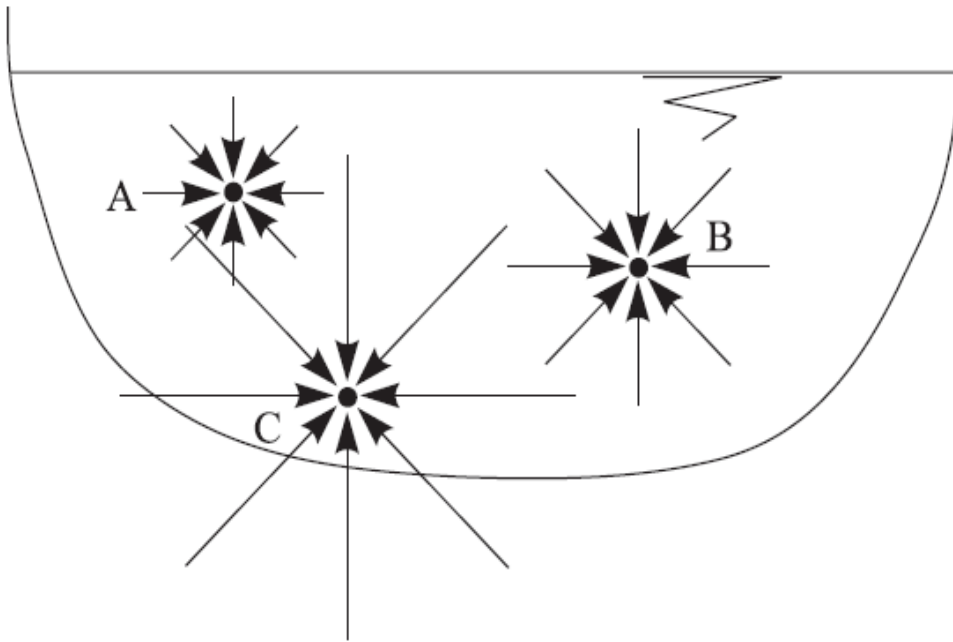
"A pressão num ponto de um fluido em repouso é a mesma em qualquer direção."

Se um fluido está em repouso, todos os seus pontos deverão estar. Se a pressão fosse diferente em alguma direção, haveria um desequilíbrio no ponto, fazendo com que este se deslocasse nessa direção, contrariando a hipótese. Logo, se o fluido está em repouso, a pressão em torno de um ponto deve ser a mesma em qualquer direção, conforme mostrado na figura a seguir.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

PRESSÃO EM TORNO DE UM PONTO DE UM FLUIDO EM REPOUSO





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

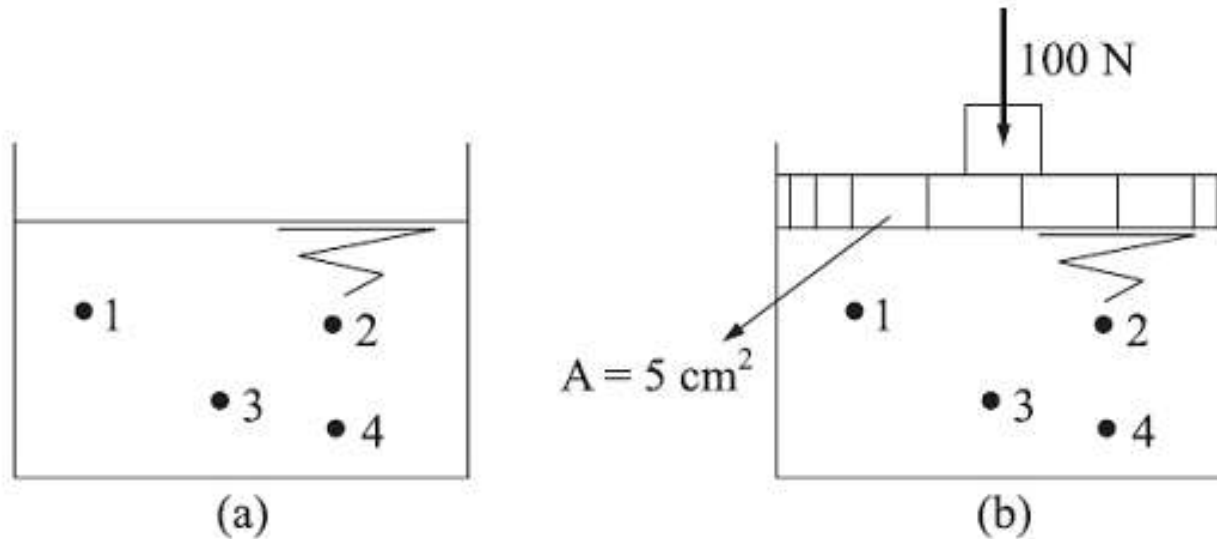
LEI DE PASCAL



LEI DE PASCAL

"A pressão aplicada num ponto de um fluido em repouso transmite-se integralmente a todos os pontos do fluido."

A figura a seguir ilustra perfeitamente tal fato.





LEI DE PASCAL

Em (a) e (b), mostra-se o mesmo recipiente cilíndrico em que foram escolhidos alguns pontos.

Em (a), o fluido apresenta uma superfície livre à atmosfera e supõe-se que as pressões nos pontos indicados sejam:

$$p_1 = 1 \text{ N/cm}^2; p_2 = 2 \text{ N/cm}^2; p_3 = 3 \text{ N/cm}^2 \text{ e } p_4 = 4 \text{ N/cm}^2$$

Ao aplicar a força de 100 N, por meio do êmbolo em (b), tem-se um acréscimo de pressão de:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{100}{5} = 20 \text{ N / cm}^2$$



LEI DE PASCAL

As pressões nos pontos indicados deverão, portanto, ter os seguintes valores:

$$p_1 = 21 \text{ N/cm}^2; p_2 = 22 \text{ N/cm}^2; p_3 = 23 \text{ N/cm}^2 \text{ e } p_4 = 24 \text{ N/cm}^2$$

Torna-se evidente, então, o significado da lei de Pascal.

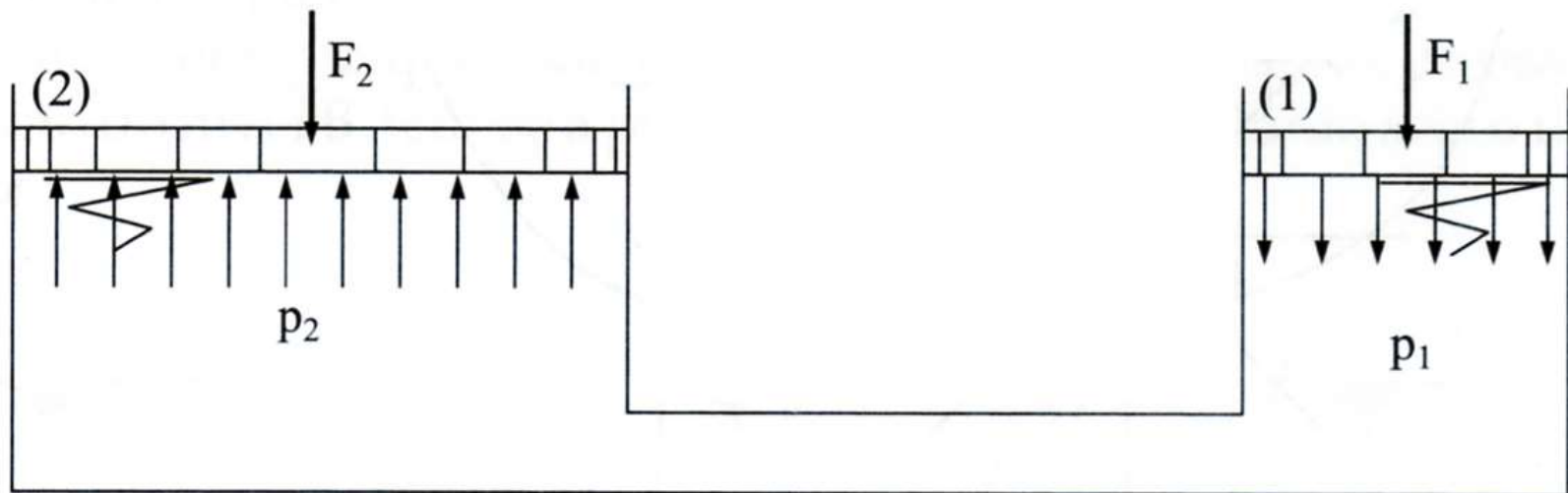
Essa lei apresenta sua maior importância em problemas de dispositivos que transmitem e ampliam uma força através da pressão aplicada num fluido.



LEI DE PASCAL

EXEMPLO: A figura mostra, esquematicamente, uma prensa hidráulica.

Os dois êmbolos têm, respectivamente, as áreas $A_1 = 10 \text{ cm}^2$ e $A_2 = 100 \text{ cm}^2$. Se for aplicada uma força de 200 N no êmbolo (1), qual será a força transmitida em (2)?





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

CARGA DE PRESSÃO



CARGA DE PRESSÃO

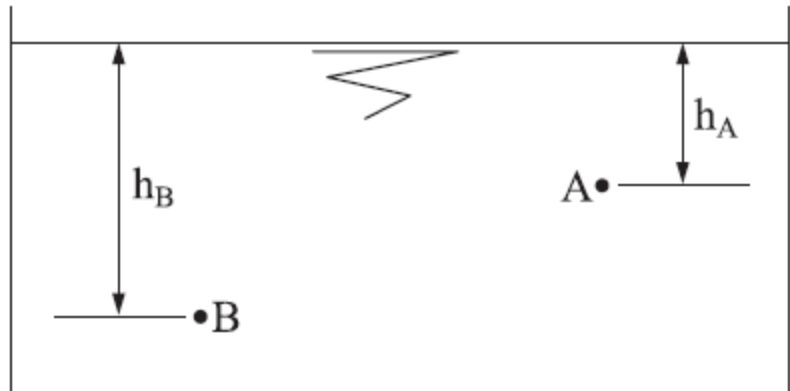
Foi visto pelo teorema de Stevin que altura e pressão mantêm uma relação constante para um mesmo fluido. É possível expressar, então, a pressão num certo fluido em unidade de comprimento, lembrando que:

$$\frac{p}{\gamma} = h$$



CARGA DE PRESSÃO

Essa altura h , que, multiplicada pelo peso específico do fluido, reproduz a pressão num certo ponto dele, será chamada '**carga de pressão**'. Essa definição torna-se evidente quando existe um recipiente em que se possa falar em profundidade ou altura h , conforme apresentado na figura a seguir.





CARGA DE PRESSÃO

A pressão no ponto A será $p_A = \gamma h_A$, enquanto a carga de pressão será h_A ; da mesma forma, no ponto B, $p_B = \gamma h_B$ e a carga de pressão será h_B .

Será que só nesses casos é que se pode falar em carga de pressão? Vejamos como seria interpretada a carga de pressão no caso de uma tubulação.

Na figura a seguir tem-se, por exemplo, um tubo por onde escoar um fluido de peso específico γ e à pressão p .



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

CARGA DE PRESSÃO

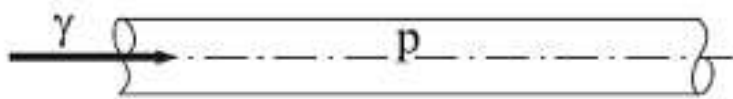
Supondo o diâmetro do tubo pequeno, a pressão do fluido em todos os pontos da seção transversal será aproximadamente a mesma. Como, porém, há uma pequena diferença, adotem-se como referência os pontos do eixo do tubo. Note-se que nesse caso existe uma pressão p , mas não há nenhuma altura h .

Será que ainda se pode falar em carga de pressão? Se possível, como deverá ser interpretada?

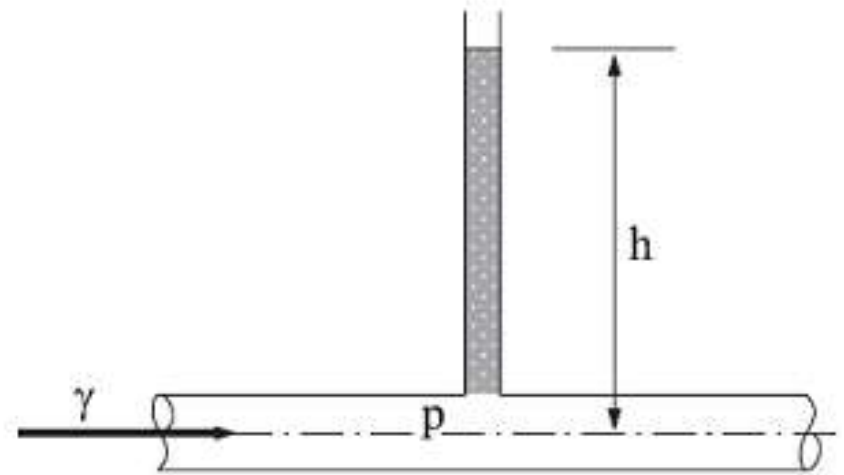


CARGA DE PRESSÃO

Abrindo-se um orifício no conduto, verifica-se que, se a pressão interna for maior que a externa, um jato de líquido será lançado para cima.



(a)



(b)



CARGA DE PRESSÃO

Se esse jato for canalizado por meio de um tubo de vidro, verifica-se que o líquido sobe até alcançar uma altura h . Essa coluna de líquido deverá, para ficar em repouso, equilibrar exatamente a pressão p do conduto.

Dessa forma, novamente,

$$\gamma_{\text{fluido}} \times h_{\text{coluna}} = p_{\text{conduto}}$$



CARGA DE PRESSÃO

Nota-se então que o h da coluna é exatamente a carga de pressão p . Logo, pode-se falar em carga de pressão independentemente da existência da profundidade h . Pode-se dizer, então, que carga de pressão é a altura à qual pode ser elevada uma coluna de fluido por uma pressão p .

Dessa forma, é sempre possível, dada uma coluna h de fluido, associar-lhe uma pressão p , dada por γh , assim como é possível, dada uma pressão p , associar-lhe uma altura h de fluido, dada por p/γ , denominada carga de pressão.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ESCALAS DE PRESSÃO



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ESCALAS DE PRESSÃO

Se a pressão é medida em relação ao vácuo ou zero absoluto, é chamada '**pressão absoluta**'; quando é medida adotando-se a pressão atmosférica como referência, é chamada '**pressão efetiva**'.

A escala de pressões efetiva é importante, pois praticamente todos os aparelhos de medida de pressão (manômetros) registram zero quando abertos à atmosfera, medindo, portanto, a diferença entre a pressão do fluido e a do meio em que se encontram.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

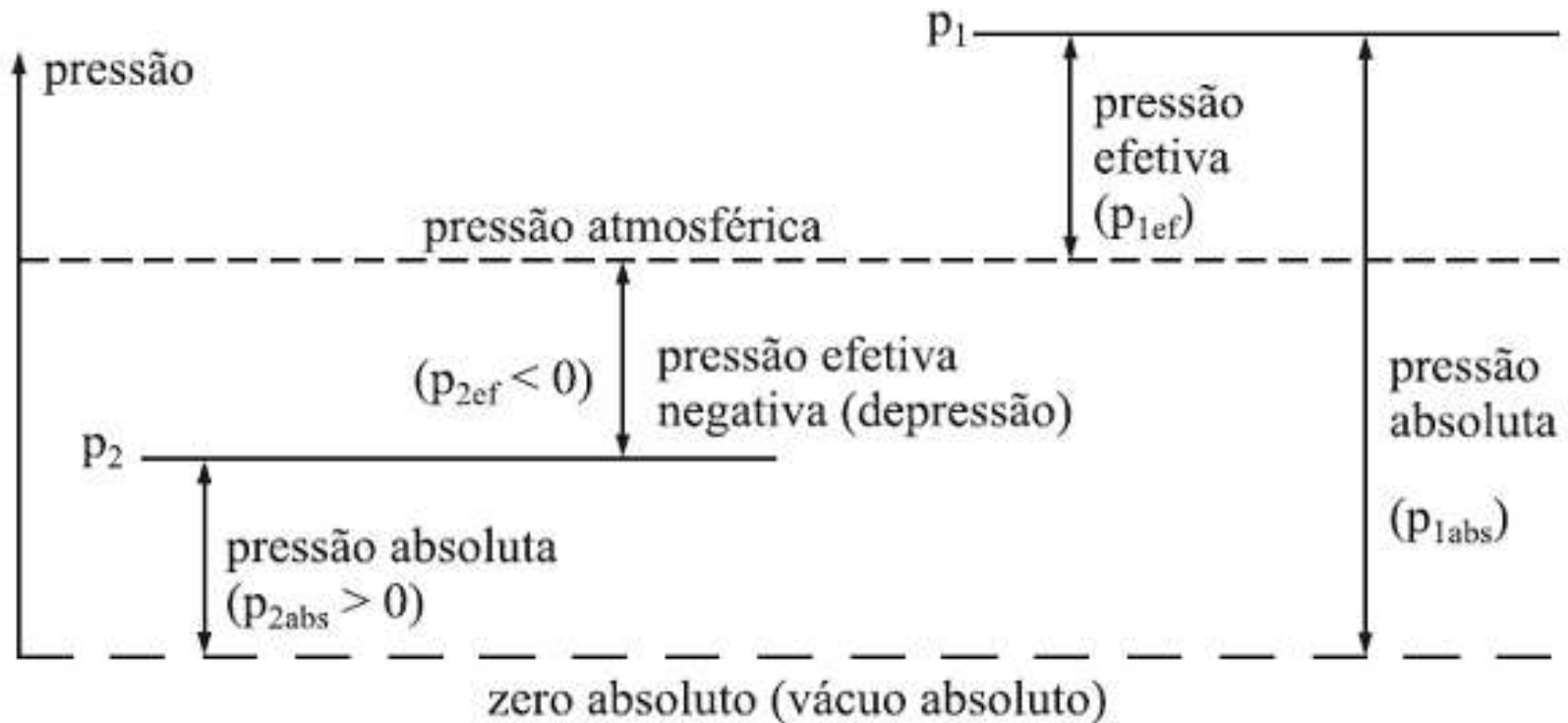
ESCALAS DE PRESSÃO

Se a pressão é menor que a atmosférica, costuma ser chamada impropriamente de vácuo e mais propriamente de depressão; é claro que uma depressão na escala efetiva terá um valor negativo. Todos os valores da pressão na escala absoluta são positivos.

A figura a seguir mostra, esquematicamente, a medida da pressão nas duas escalas, a efetiva e a absoluta.



ESCALAS DE PRESSÃO





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ESCALAS DE PRESSÃO

Da discussão anterior e da figura verifica-se que vale a seguinte relação entre as escalas:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{efet}}$$

Onde P_{efet} pode ser positiva ou negativa.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ESCALAS DE PRESSÃO

A pressão atmosférica é também chamada de pressão barométrica e varia com a altitude. Mesmo num certo local, ela varia com o tempo, dependendo das condições meteorológicas. Nos problemas que envolvem leis de estado de gases, é imprescindível o uso da escala absoluta, como já vimos anteriormente.

Em problemas envolvendo líquidos, o uso da escala efetiva é mais cômodo, pois, nas equações, a pressão atmosférica, em geral, aparece nos dois membros, podendo ser cancelada.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ESCALAS DE PRESSÃO

Sempre que for utilizada a escala absoluta, após a unidade de pressão será indicada a abreviação (abs), enquanto, ao se usar a escala efetiva, nada será indicado.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

UNIDADES DE PRESSÃO



UNIDADES DE PRESSÃO

As unidades de pressão podem ser divididas em três grupos:

A- Unidades de pressão propriamente ditas, baseadas na definição (F/A):

Entre elas, as mais utilizadas são: kgf/m^2 ; kgf/cm^2 ; $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ (pascal); $\text{daN/cm}^2 = \text{bar}$ (decanewton por centímetro quadrado); $\text{lb/pol}^2 = \text{psi}$.

A relação entre essas unidades é facilmente obtida por uma simples transformação:

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 10^4 \text{ kgf/m}^2 = 9,8 \times 10^4 \text{ Pa} = 0,98 \text{ bar} = 14,2 \text{ psi}$$



UNIDADES DE PRESSÃO

B- Unidades de carga de pressão utilizadas para indicar pressão:

Essas unidades são indicadas por uma unidade de comprimento seguida da denominação do fluido que produziria a carga de pressão (ou coluna) correspondente à pressão dada.

Vale lembrar que existe uma correspondência entre p e h através do peso específico γ do fluido. Assim, por exemplo:

mmHg (milímetros de coluna de mercúrio)

mca (metros de coluna de água)

cmca (centímetros de coluna de água)



UNIDADES DE PRESSÃO

B- Unidades de carga de pressão utilizadas para indicar pressão:

A determinação da pressão em unidades de pressão propriamente ditas é feita lembrando que $p = \gamma h$. Assim, por exemplo, 5 mca correspondem a $5 \text{ m} \times 10.000 \text{ N/m}^3 = 50.000 \text{ N/m}^2$ (onde 10.000 N/m^3 é o peso específico da água).

Ainda, por exemplo, 20 mmHg correspondem a $0,02 \text{ m} \times 136.000 \text{ N/m}^3 = 2720 \text{ N/m}^2$ (onde 136.000 N/m^3 é o peso específico do mercúrio).



UNIDADES DE PRESSÃO

B- Unidades de carga de pressão utilizadas para indicar pressão:

Assim, na prática, a representação da pressão em unidade de coluna de fluido é bastante cômoda, pois permite visualizar imediatamente a possibilidade que tem uma certa pressão de elevar um fluido a uma certa altura.



UNIDADES DE PRESSÃO

C- Unidades definidas:

Entre elas, destaca-se a unidade atmosfera (atm), que, por definição, é a pressão que poderia elevar de 760 mm uma coluna de mercúrio. Logo, $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 101230 \text{ Pa} = 101,23 \text{ kPa} = 10330 \text{ kgf/m}^2 = 1,033 \text{ kgf/cm}^2 = 1,01 \text{ bar} = 14,7 \text{ psi} = 10,33 \text{ mca}$.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

UNIDADES DE PRESSÃO

EXEMPLO:

Determinar o valor da pressão de 340 mmHg em psi e kgf/cm² na escala efetiva e em Pa e atm na escala absoluta. ($p_{\text{atm}} = 101,2 \text{ kPa}$)



UNIDADES DE PRESSÃO

RESOLUÇÃO:

1) $760 \text{ mmHg} \rightarrow 1,033 \text{ kgf/cm}^2$
 $340 \rightarrow x$

$$x = \frac{1,033 \times 340}{760} = 0,461 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

2) $760 \text{ mmHg} \rightarrow 14,7 \text{ psi}$
 $340 \rightarrow y$

$$y = \frac{340 \times 14,7}{760} = 6,6 \text{ psi}$$



UNIDADES DE PRESSÃO

RESOLUÇÃO:

3) Para determinar a pressão na escala absoluta, basta lembrar que:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{ef}} + P_{\text{atm}}$$

$$\begin{array}{l} 760 \text{ mmHg} \\ 340 \end{array} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{l} 101.230 \text{ Pa} \\ z \end{array}$$

$$z = \frac{340 \times 101.230}{760} = 45.287 \text{ Pa} = 45,3 \text{ kPa}$$

$$\text{Logo, } p_{\text{abs}} = 45,3 + 101,2 = 146,5 \text{ kPa (abs)}$$



UNIDADES DE PRESSÃO

RESOLUÇÃO:

4)
$$\begin{array}{ccc} 760 \text{ mmHg} & \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} & \begin{array}{l} 1 \text{ atm} \\ u \end{array} \\ 340 & & \end{array}$$

$$u = \frac{340 \times 1}{760} = 0,447 \text{ atm}$$

Logo, $p_{\text{abs}} = 0,447 + 1 = 1,447 \text{ atm (abs)}$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

O BARÔMETRO



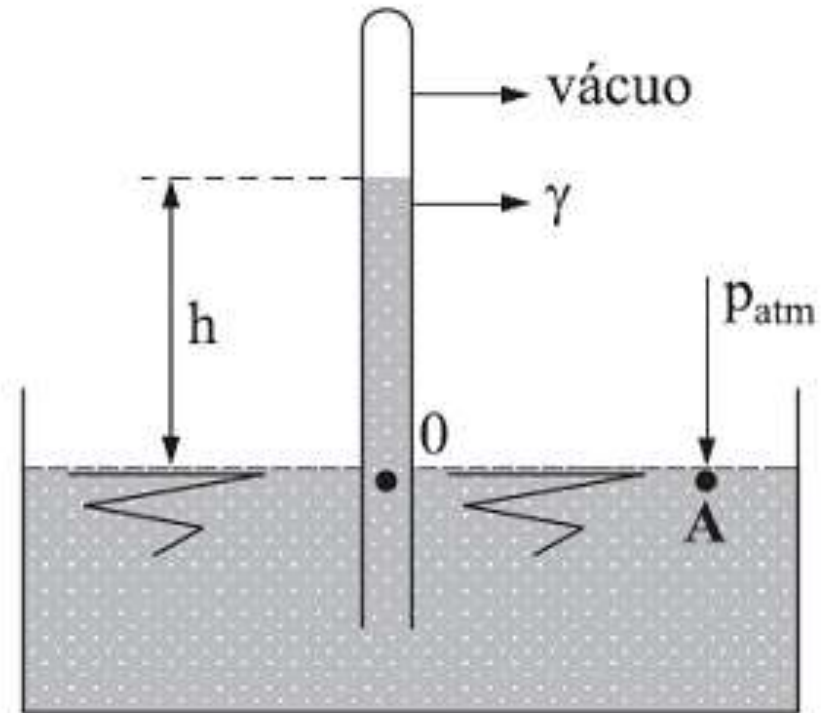
O BARÔMETRO

A pressão atmosférica é medida pelo barômetro. Se um tubo cheio de líquido, fechado na extremidade inferior e aberto na superior, for virado dentro de uma vasilha do mesmo líquido, ele descerá até uma certa posição e nela permanecerá em equilíbrio, como mostrado na figura a seguir.

Desprezando a pressão de vapor do líquido, na parte superior obtém-se, praticamente, o vácuo perfeito ou pressão zero absoluto.



O BARÔMETRO





O BARÔMETRO

Já foi visto que a pressão num mesmo nível é a mesma, logo,

$$p_o = p_A = p_{atm}$$

Dessa forma, a coluna h formada é devida à pressão atmosférica e tem-se

$$p_{atm} = \gamma h$$

O líquido utilizado é, geralmente, o mercúrio, já que seu peso específico é suficientemente elevado de maneira a formar um pequeno h e, portanto, pode ser usado um tubo de vidro relativamente curto. Como a pressão atmosférica é muito utilizada, é interessante tê-la em mente:

$$P_{atm} = 760 \text{ mmHg} = 10.333 \text{ kgf/m}^2 = 101,3 \text{ kPa}$$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

MEDIDORES DE PRESSÃO



MEDIDORES DE PRESSÃO

1- Manômetro metálico ou de Bourdon

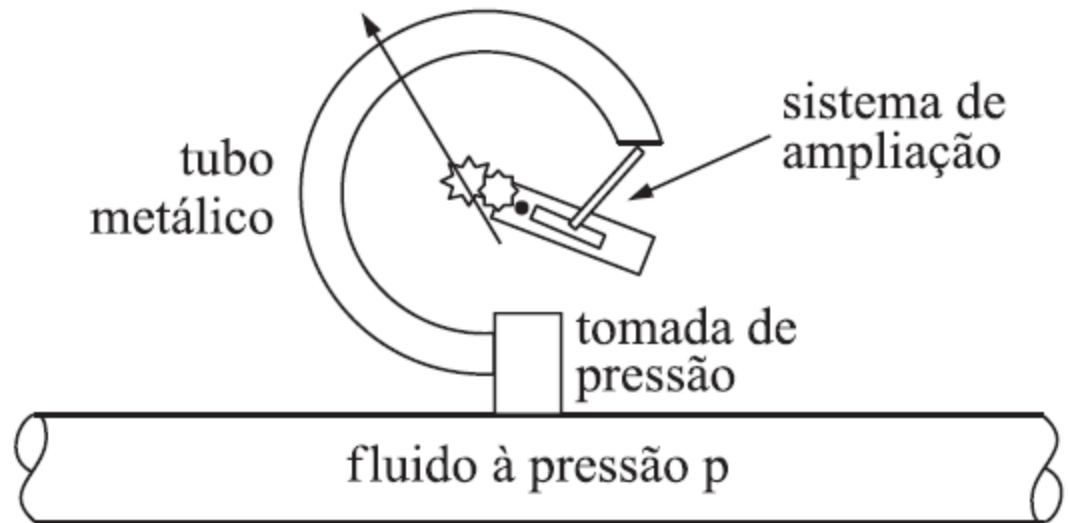
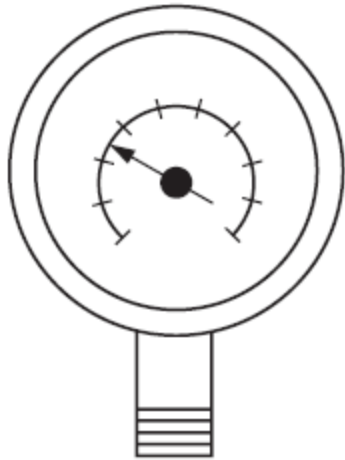
Pressões ou depressões são comumente medidas pelo manômetro metálico mostrado na figura a seguir. Esse nome provém do fato de que a pressão é medida pela deformação do tubo metálico indicado na figura.

Ao ligar o manômetro pela tomada de pressão, o tubo fica internamente submetido a uma pressão p que o deforma, havendo um deslocamento de sua extremidade que, ligada ao ponteiro por um sistema de alavancas, relacionará sua deformação com a pressão do reservatório.



MEDIDORES DE PRESSÃO

1- Manômetro metálico ou de Bourdon



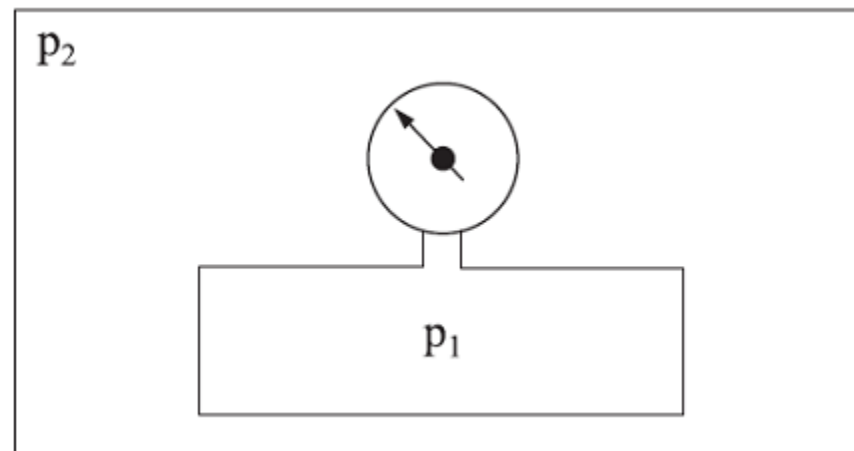


MEDIDORES DE PRESSÃO

1- Manômetro metálico ou de Bourdon

A leitura na escala de pressão na escala efetiva será feita diretamente no mostrador, quando a parte externa do manômetro estiver exposta à pressão atmosférica.

Suponha-se, agora, o caso mostrado na figura abaixo:





MEDIDORES DE PRESSÃO

1- Manômetro metálico ou de Bourdon

Nesse caso, a parte interna do tubo metálico está sujeita à pressão p_1 , e a externa, à p_2 .

Dessa forma, o manômetro indicará não a pressão p_1 , mas a diferença $p_1 - p_2$.

Logo,

$$P_{\text{manômetro}} = p_{\text{tomada de pressão}} - p_{\text{externa}}$$



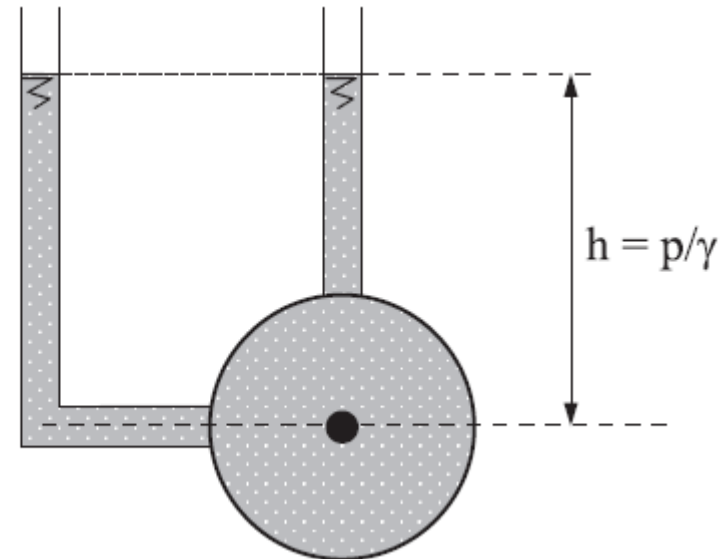
MEDIDORES DE PRESSÃO

2- Coluna piezométrica ou piezômetro

Consiste num simples tubo de vidro que, ligado ao reservatório, permite medir diretamente a carga de pressão.

Logo, dado o peso específico do fluido, pode-se determinar a pressão diretamente.

Note-se a origem da medida de h , no centro do tubo





MEDIDORES DE PRESSÃO

2- Coluna piezométrica ou piezômetro

O piezômetro apresenta três limitações que o tornam de uso limitado:

a- A altura h , para pressões elevadas e para líquidos de baixo peso específico, será muito alta. Exemplo: água com pressão de 10^5 N/m^2 e cujo peso específico é 10^4 N/m^3 formará uma coluna:

$$h = \frac{p}{\gamma} = \frac{10^5}{10^4} = 10m$$



MEDIDORES DE PRESSÃO

2- Coluna piezométrica ou piezômetro

Logo, não sendo viável a instalação de um tubo de vidro com mais de 10 m de altura, o piezômetro não pode, nesse caso, ser útil. Nota-se então que esse aparelho só serve para pequenas pressões.

b- Não se pode medir pressão de gases, pois eles escapam sem formar a coluna h .

c- Não se pode medir pressões efetivas negativas, pois nesse caso haverá entrada de ar para o reservatório, em vez de haver a formação da coluna h .



MEDIDORES DE PRESSÃO

3- Manômetro com tubo em U

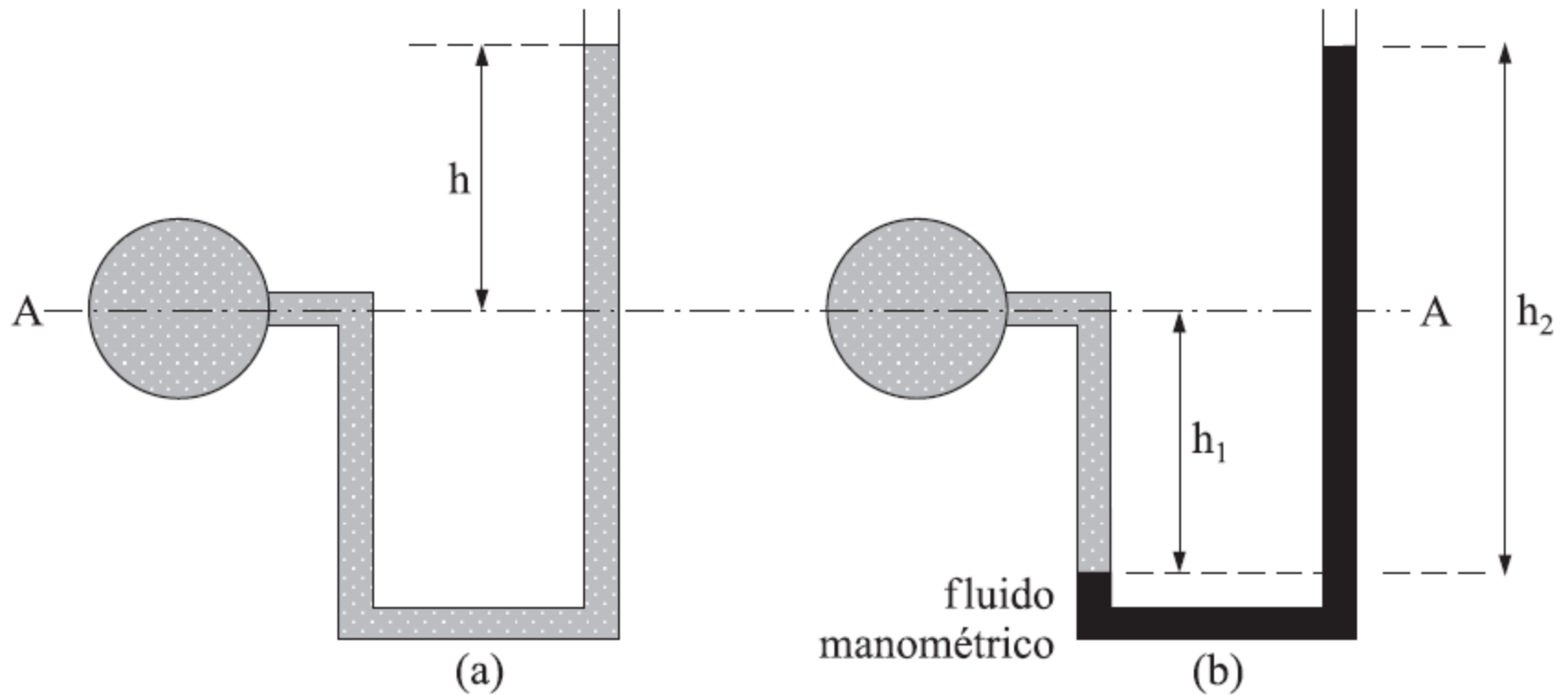
A figura a seguir mostra um manômetro de tubo em U. Nesse manômetro corrige-se o problema das pressões efetivas negativas. Se isso ocorrer, a coluna de fluido do lado direito ficará abaixo do nível A-A. A figura (b) mostra o mesmo manômetro com a inclusão de um fluido manométrico que, em geral, é mercúrio.

A presença do fluido manométrico permite a medida da pressão de gases, já que impede que estes escapem.



MEDIDORES DE PRESSÃO

3- Manômetro com tubo em U





MEDIDORES DE PRESSÃO

3- Manômetro com tubo em U

Ao mesmo tempo, utilizando um fluido manométrico de elevado peso específico, diminui-se a altura da coluna que se formaria com um líquido qualquer.

Os manômetros de tubo em U, ligados a dois reservatórios, em vez de ter um dos ramos aberto à atmosfera, chamam-se manômetros diferenciais, conforme apresentado na figura a seguir.



MEDIDORES DE PRESSÃO

3- Manômetro com tubo em U

