MECÂNICA DOS FLUÍDOS
Revisão

Ricardo de Aragão
Departamento de Engenharia Civil
UFS

- MECÂNICA - Ciência que tem por objetivo o estudo do movimento e das causas que o produzem;

- MECÂNICA RACIONAL –
    - ESTÁTICA – estuda as forças em equilíbrio
    - CINEMÁTICA – estuda o movimento sem considerar a ação das forças;
    - DINÂMICA – estuda o movimento e ação das forças.

- MECÂNICA DOS FLUIDOS –
- - Ocupa-se do movimento e do equilíbrio dos fluidos
- - Aplicação das leis da mecânica para o estudo dos fluidos;

- MECÂNICA DOS FLUIDOS + TERMODINÂMICA
    - Aspectos teóricos – Hidrodinâmica
    - Aspectos práticos – Hidráulica
    - Hidrologia
    - Dinâmica dos gases

- FLUIDO – Compreende as fases líquidas e gasosas que a matéria existe

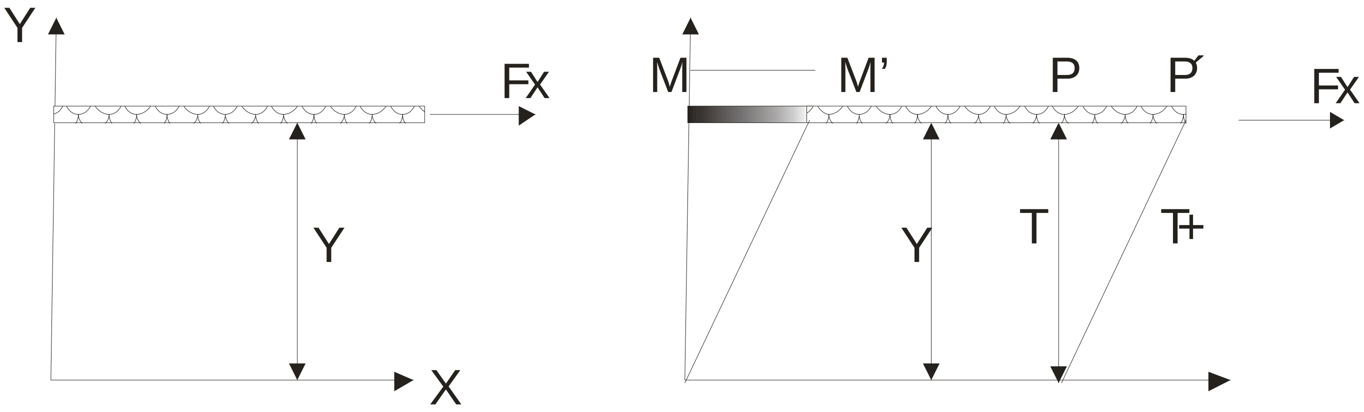
- Conceito de Fluido – é uma substância que se deforma continuamente quando submetida a uma tensão de cisalhamento não importando o quanto pequena possa ser essa tensão

- QUAL A DIFERENÇA ENTRE UM SÓLIDO E UM FLUIDO?

- Os sólidos quando submetidos a ação de uma tensão de cisalhamento, sofre uma deformação reversível até que o seu limite de elasticidade seja alcançado. A partir deste limite, o sólido não mais retorna ao formato anterior.

- IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA MECÂNICA DOS FLUIDOS
- O conhecimento e a compreensão dos princípios básicos da mecânica dos fluidos são essenciais para qualquer sistema no qual um fluido é o meio operante.

COMPORTAMENTO DOS FLUIDOS



Para Fx=Cte → Ux=Cte $\therefore \tau_{yx}$=lim δFx/δS = dFx/dS

τ=F/A -→ F∝A

δS – área do elemento fluido em contato com a placa

δFx – força exercida sobre o elemento pela placa

δyx – (taxa de deformação) = lim δαyx/δt = dαyx/dt

Visto que αyx é difícil de ser medido

δx = (entre MM´) = δuδt

- ou
- Para αyx <<< $\rightarrow \delta l = \delta y \delta \alpha yx$

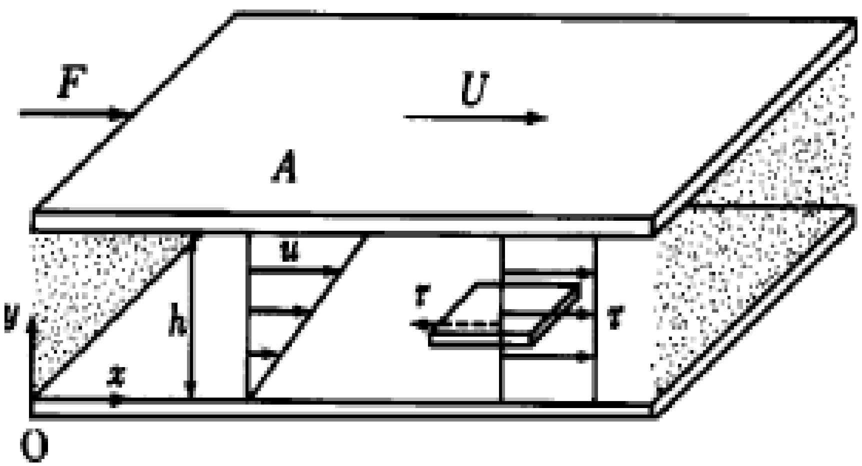
- $\delta u \delta t = \delta y \delta \alpha yx \rightarrow \delta u/\delta y = \delta \alpha yx/\delta t$

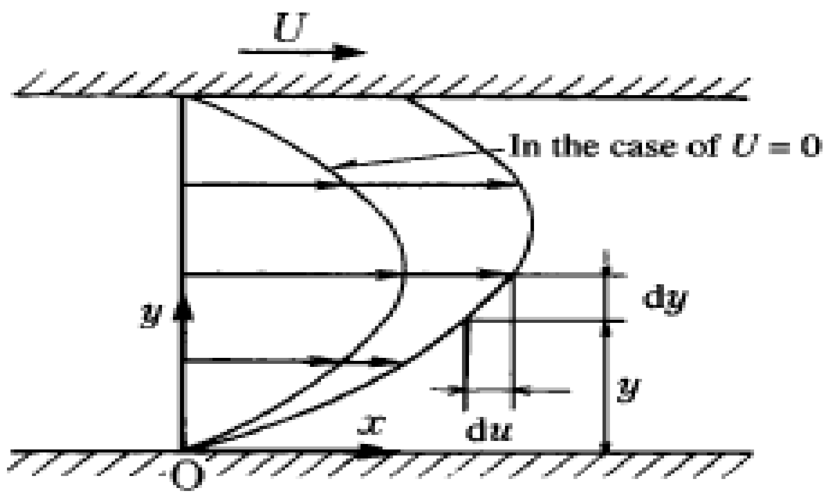
- Então para um dado Fx $\rightarrow \tau yx$
- O elemento fluido experimenta uma deformação

- $\delta u/\delta y \rightarrow \tau yx \propto du/dy$

- Então:
- Os fluidos onde τ_{yx} é proporcional a du/dy são chamados **FLUIDOS NEWTONIANOS**;

- Para os fluidos onde τ_{yx} não é proporcional a du/dy chamamos de **FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS**;





Para os fluidos onde $\tau yx \propto du/dy$, a igualdade é alcançada através de uma constante de proporcionalidade, que neste caso é chamada de **VISCOSIDADE ABSOLUTA OU DINÂMICA,** μ.

Daí, τ_{yx} **= μdu/dy** $\rightarrow$

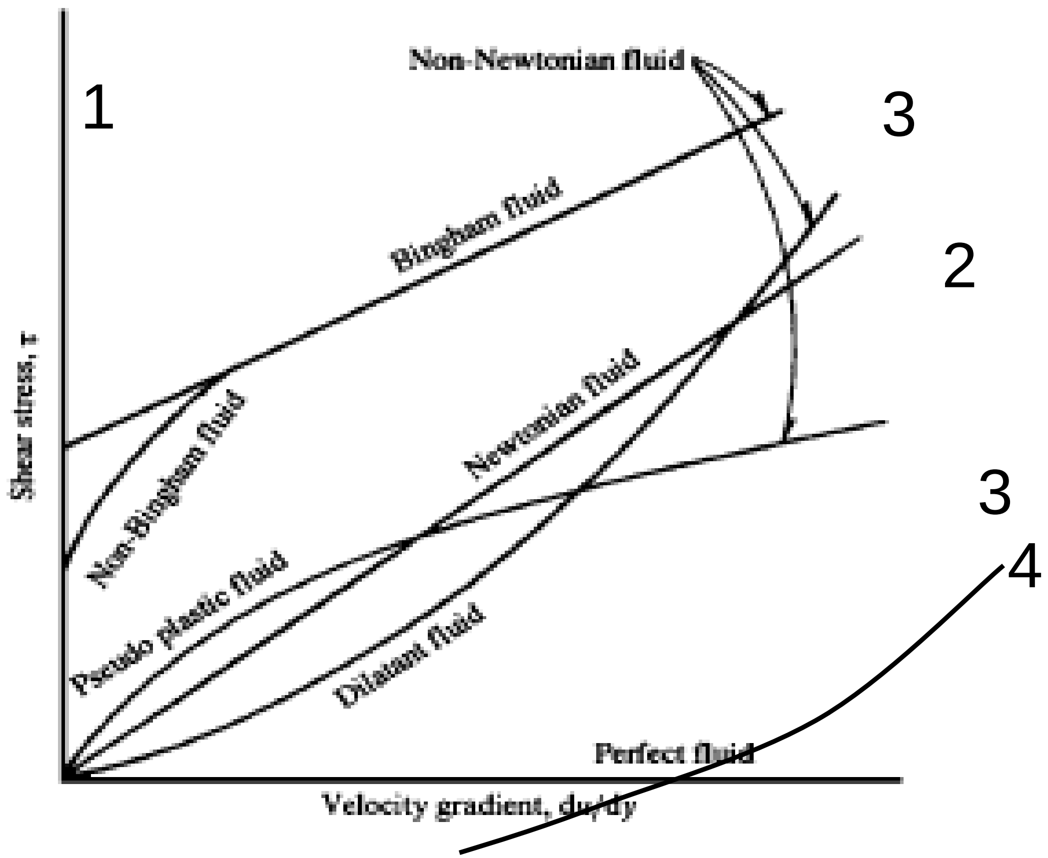
Para τyx [F/L^2] e du/dy [1/T] → **μ[F.T/L^2] ou [m/LT]**

No sistema SI -→ μ [kg/m.s] ou Pa.s

No sistema inglês → lbf.s/ft^2 ou slug/ft.s

- Reologia
- É a ciência que estuda os fluidos não newtonianos

- O que é um fluido newtonianos? São fluidos onde a tensão de cisalhamento, τ, é proporcional ao gradiente de velocidade dv/dy



Fluido
1- Não apresenta viscosidade;
2- Relação linear entre tensão e deformação
3- Relação não-linear entre a tensão e deformação;
4- O fluido tende a endurecer quando em repouso (tinta de impressão);
5- Fluido newtoniano com viscosidade menor que 2.

PROPRIEDADES DA VISCOSIDADE

- μ=f(1/temperatura) $\rightarrow$ a viscosidade para os líquidos diminui com o aumento da temperatura, devido a diminuição da coesão que é a causa predominante da viscosidade;

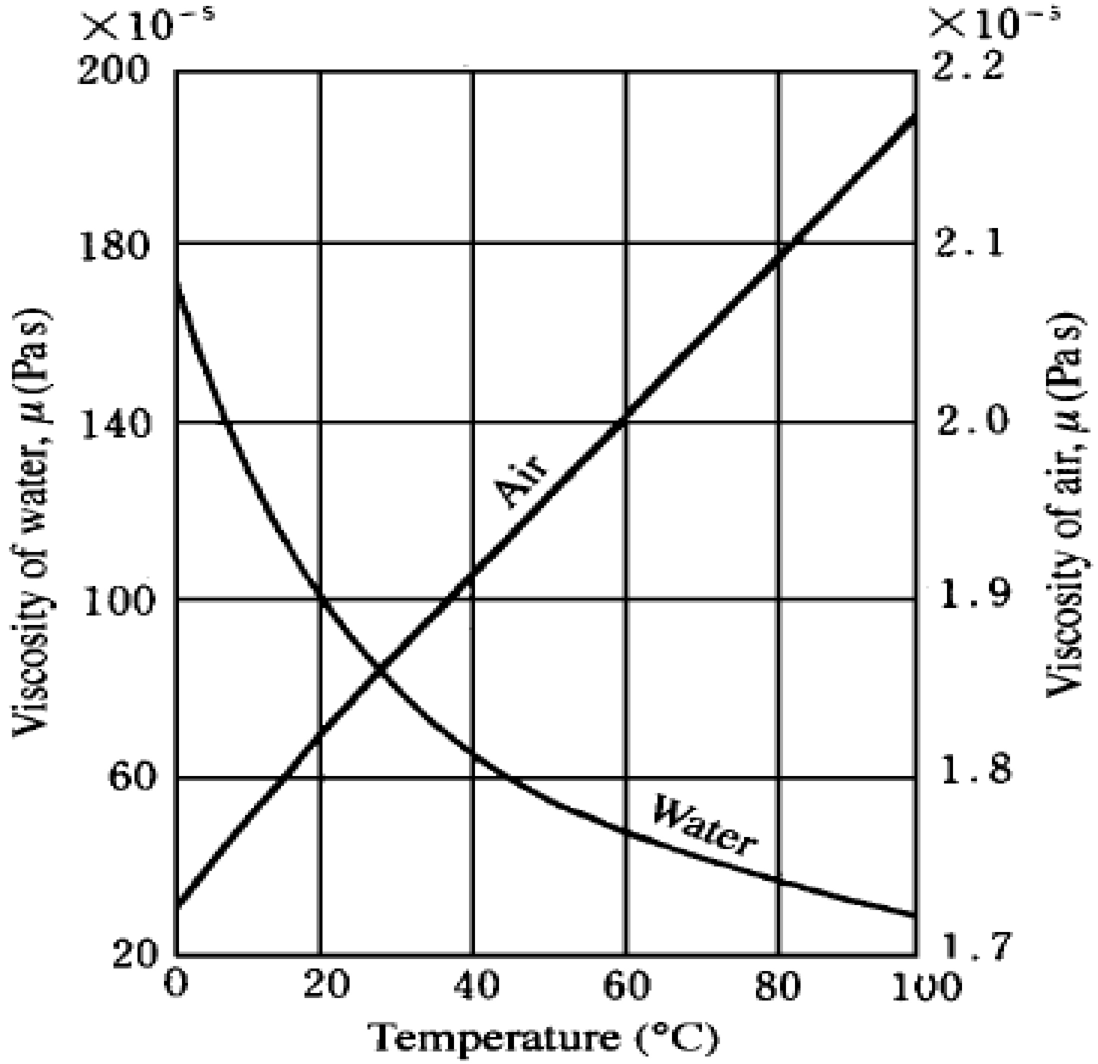
- μ=f(temperatura) $\rightarrow$ a viscosidade para os gases aumenta com a temperatura, devido ao aumento da transferência da quantidade de movimento;

- o μ de uma mistura não é dado pela regra da aditividade, ou seja, $\mu3=\mu1+\mu2+\mu3$;

- o μ dos fluidos é praticamente independente;

- A lei de Newton da viscosidade se aplica a casos de fluxo lamina.

- A velocidade na fronteira sólida é zero e, portanto, não ocorre deslizamento entre fluido e sólido.



- Variação da viscosidade dinâmica do ar e da água para uma pressão de 1 atm

Propriedades

- VISCOSIDADE
- Propriedade pela qual um fluido oferece resistência ao cisalhamento.
- Ocorre devido a coesão e a transferência de movimento entre as moléculas ou entre camadas do fluido.
- Coesão – força que une entre si as moléculas das substâncias.

Propriedades

- VISCOSIDADE DINÂMICA
- $\tau \propto du/dy \rightarrow \propto = \mu$
- μ = coeficiente de viscosidade absoluta ou dinâmica (movimento dos fluidos e as causas dos movimentos);
- $\tau_{yx} = \mu du/dy \rightarrow$ CGS $\rightarrow$ g/cm.s = 1 poise; MKS $\rightarrow$ kg/m.s; N.s/m^2;
  - Inglês $\rightarrow$ Lb.s/ft^2 $\rightarrow$ Mais indicado ou Lbm/ft.s; Slug/ft.s
- VISCOSIDADE CINEMÁTICA
- Surge com freqüência em muitas aplicações, por exemplo, no número de Reynolds. **O QUE É O NÚMERO DE REYNOLDS?**
- $\nu = \mu/\rho = [L^2/T] \rightarrow [m^2/s]$ ou $[ft^2/s]$ = Stokes $[cm^2/s]$

Viscosidade dinâmica e viscosidade cinemática da água e do ar

	Water		Air	
Temp. (°C)	**Viscosity, μ (Pa s $\times 10^5$)**	**Kinematic viscosity, ν ($m^2/s \times 10^6$)**	**Viscosity, μ (Pa s $\times 10^5$)**	**Kinematic viscosity, ν ($m^2/s \times 10^6$)**
0	179.2	1.792	1.724	13.33
10	130.7	1.307	1.773	14.21
20	100.2	1.004	1.822	15.12
30	79.7	0.801	1.869	16.04
40	65.3	0.658	1.915	16.98

Propriedades

- MASSA ESPECÍFICA (densidade)
- Quantidade de matéria contida em uma unidade de volume
- $\rho = M/L^3 \rightarrow \rho = \lim (\delta M/\delta V)$
- $\delta v \rightarrow 0$
- ρ = g/cm³ ou ρ = kg/m³ ou lbm/ft³ ou Slug/ft³
- d = densidade relativa ou gravidade específica
- $d = \rho_{Subst.}/\rho\ H_2O$
- $\rho = d \times \rho\ H_2O$
- ρH_2O = 1000 kg/m³; 1,94 Slug/ft³;

Propriedades

- PESO ESPECÍFICO
- Peso – força de atração gravitacional agindo sobre a matéria na unidade de volume.
- $P = m \times g \rightarrow P = \rho \times g \times Vol. \rightarrow \gamma = P/Vol. \rightarrow \rho * g * Vol/Vol.$
- $\rightarrow \gamma = \rho \times g$
- $\gamma = [N/m^3]$ ou $[lb/ft^3]$ ou $\gamma = d * \gamma H_2O$
- $d = \gamma Sub/\gamma H_2O$ → Densidade relativa

Propriedades

- PRESSÃO DE VAPOR

- Pressão na qual o liquido, e o seu vapor, pode existir em equilíbrio a uma dada temperatura, também chamada de pressão de vapor ou de saturação;

- Quando o ar esta saturado, a pressão parcial de vapor iguala-se a pressão de saturação;

- Os líquidos evaporam por causa de moléculas que escapam pela superfície livre. As moléculas de vapor exercem uma pressão parcial no espaço, conhecida como pressão de vapor.
- Se a pressão sobre o liquido alcança a pressão de vapor do líquido, ocorrerá a ebulição. Por exemplo, se a pressão for reduzida suficientemente, a ebulição pode ocorrer a temperatura ambiente.
- A pressão de saturação da água a 20°C é $2{,}45 \times 10^3$ N/m^2

Propriedades

- CAVITAÇÃO

- Em um conduto onde a pressão de entrada é superior a pressão que observa-se no seu interior ou no seu extremo ocorre a liberação de bolhas de ar contidas na massa líquida que se desprendem do líquido, quando a pressão é reduzida a pressão de vapor. Ocorre a separação da coluna liquida e a obstrução do escoamento.

- Quando estas bolhas são carreadas para uma região de alta pressão ocorre à implosão causando choques entre as partículas fluidas e danificam as paredes do conduto através de golpes (golpe de aríete), reduzindo a sua capacidade de escoamento.

- O fenômeno acima é denominado de cavitação, devida a formação de cavas ou bolhas no liquido.

Propriedades

- TENSÃO SUPERFICIAL
- Força de coesão necessária para forma uma película sobre a superfície.
- A película se forma através do conceito de energia da superfície ou trabalho por unidade de área necessária para trazer a molécula à superfície
- *Coesão – força de atração entre as moléculas semelhantes;
- *Adesão – força de atração entre as moléculas diferentes;
- **A tensão superficial é afetada pelo grau de pureza do material!!!!

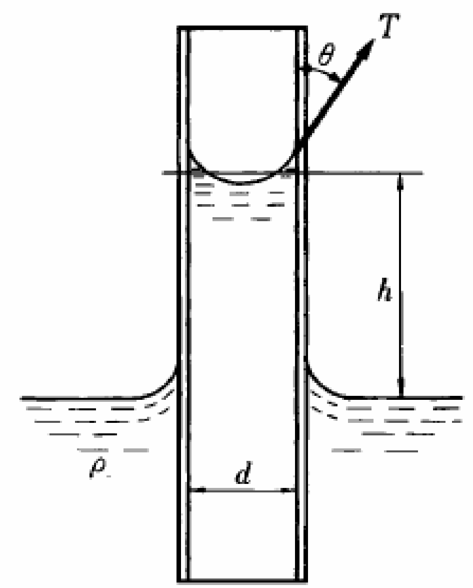
Tensão superficial de alguns líquidos

Liquid	Surface liquid	N/m
Water	Air	0.0728
Mercury	Air	0.476
Mercury	Water	0.373
Methyl alcohol	Air	0.023

Propriedade

- CAPILARIDADE

- A altura capilar que o líquido atinge acima da superfície é devido ao efeito da tensão superficial e depende da magnitude relativa da coesão do liquido e da aderência do líquido as paredes.



- *Ocorrem para tubos menores do que D=10 mm
- Fr = W
- $\sigma\pi D\cos\theta = (\pi d^2/4 \times hc)\gamma$

  $\Sigma Fy = W \rightarrow \gamma\pi D\cos\theta - \rho g\Delta Vol.$
- $\Delta Vol = \pi D^2/4 \times \Delta h \rightarrow \sigma\pi D\cos\theta - \rho g\pi D^2/4 \times \Delta h = 0$
- $\Delta h = 4\sigma\cos\theta/D\rho g$ ou $4\sigma\cos\theta/D\gamma$
- $Dh = 4\sigma\cos\theta/D\gamma \rightarrow \sigma H_2O = 72{,}8$ mN/m $\rightarrow \theta \approx 0^o$
- $\sigma Hg = 375$ mN/m $\rightarrow \theta \approx 140^o$

Propriedade

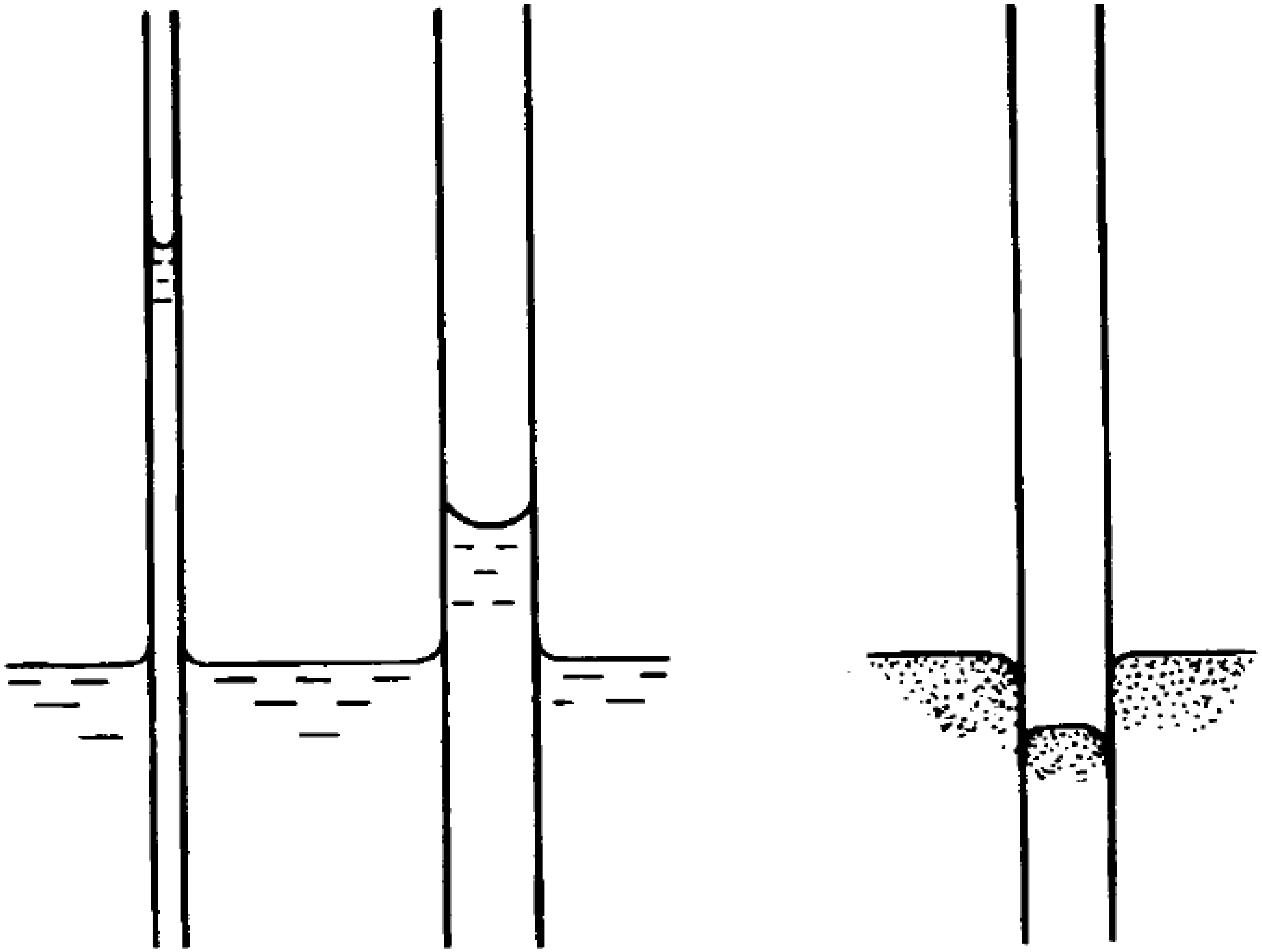
- CAPILARIDADE

- **Ângulo de contato – depende da limpeza da superfície e da pureza do liquido

- Para $\theta < 90^o$ – O líquido tende a molhar a superfície do sólido. A tensão de tração devido à tensão superficial tende a puxar para cima a superfície livre do liquido próximo do sólido;

- Para $\theta > 90^o$ – O líquido não molha a superfície. A tensão superficial tende a puxar para baixo a superfície livre do líquido ao longo do sólido.

Mudança na superfície do liquido devido a capilaridade



(a) Water (b) Mercury

Propriedades Físicas da Água em Unidades Si (Streeter e Wylie, 1982 – Mecânica dos Fluidos)

Para 25 ºC

γ = 9.779 N/m^3 (peso específico)

ρ = 997,1 kg/m^3 (massa específica)

μ = 0,894 x 10^{-3} N.s/m^2 (viscosidade dinâmica)

ν = 0,897 x 10^{-6} m^2/s (viscosidade cinemática)

σ = 7,26 x 10^{-2} N/m(tensão superficial)

Para 77 ºF

γ = 62,22 lb/ft^3 (peso específico)

ρ = 1,934 slug/ft^3 (massa específica)

μ = 1,799 x 10-5 lb.s/ft^2 (viscosidade dinâmica)

ν = 0,930 x 10-5 ft^2/s (viscosidade cinemática)

σ = 0,492 x 10-2 lb/ft (tensão superficial)

Propriedades Físicas da Água em Unidades Si (Streeter e Wylie, 1982 – Mecânica dos Fluidos)

CONVERTER

- 25ft em cm → 1ft = 30,48 cm = 762 cm
- 1 ton em slug → 1 slug = 14,6 kg →1000 kg = 68,49 slug
- 20 lbf/ft^2 em psi → 20 lbf/ft^2 em psi= lbf/in^2

1 ft = 12 in → 1ft^2 = 144 in^2

20 lbf/ft^2 = 20 lbf/144 in^2 = 0,139 lbf/in^2

- 13 psi em lb/ft^3 →13 lbf/in^2 x 144 in^2/1 ft^2 =1.872,0 lbf/ft^2

50 m^3/h em l/min →

Exercício

Uma placa infinita é movimentada sobre uma segunda placa numa camada de liquido. Para um espaçamento h, pequeno entre as placas, supõe-se uma distribuição linear de velocidade no líquido.

Dados :μ = 0,65 cp (centésima parte do poise – centipoise); d = 0,88;

Calcular: μ em $lbf.s/ft^2$; ν em m^2/s → = μ/ρ; τ na placa superior em lbf/ft^2

1 cp = 0,01p

0,65 cp → x

μ = 0,0065 poise

$1 lbf.s/ft^2$ = 478,7 poise

daí μ = 0,0065 poise == $1,356 \times 10^{-5}\ lbf.s/ft^2$

$\nu = \mu/\rho$

$d = \rho/\rho H_2O$ → $\rho H_2O = 1 g/cm^2$ → $\rho = d \times \rho H_2O = 0.88 \times 1 = 0,88\ g/cm^3$

$\nu = \mu/\rho = 0,0065\ g/cm.s \times (1/0,88\ g/cm^3) \times 1\ m2/10^4\ cm^2 = 7,386 \times 10^{-7}$

$\nu = 7,386 \times 10^{-7}\ m^2/s$

$\tau = \mu du/dy = \mu \times u/h$

$\tau = 1,35 \times 10\text{-}5\ lbf.s/ft^2 \times 0,3\ m/s \times 1/0,3 \times 10^{-3}\ m$

$\tau = 1,356 \times 10^{-2}\ lbf.s/ft^2$

ESTÁTICA DOS FLUIDOS

Forças a serem aplicadas a um fluido

a)forças de corpo ou de campo (gravidade)

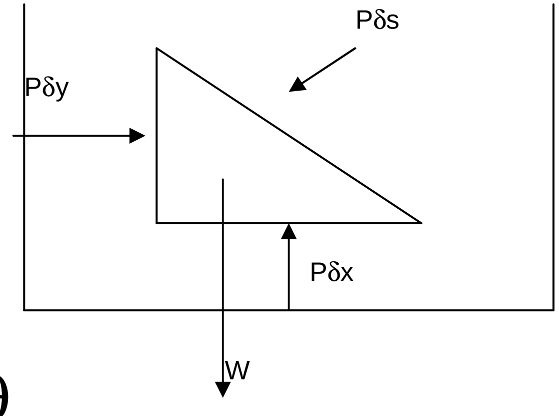
b)forças de superfície (Peso)

Para um elemento de volume $\Delta V = \delta x \delta y \delta z$

$dFb = = g \times dm = g\rho\delta x\delta y\delta z$

*Para um fluido estático – força de superfície = pressão → $P = p(x,y,z)$;

Para um elemento prismático



Forças normais a superfície

$\sum F_x = 0 \rightarrow P_x\delta y - P_s\delta s \sin\theta = 0 \rightarrow P_x\delta y = P_s\delta s \sin\theta$

$\sum F_y = 0 \rightarrow P_y\delta x - P_s\delta s \cos\theta - (\gamma\delta y\delta x/2) = 0 \rightarrow P_y\delta x = P_s\delta s \cos\theta$

Infinitesimal

$P_x\delta y = P_s\delta s \sin\theta$

$P_y\delta x = P_s\delta s \cos\theta$

Para $\delta x\delta y = 0$; $\delta s \sin\theta = \delta y$; $\delta s \cos\theta = \delta x$

ESTÁTICA DOS FLUIDOS

Forças a serem aplicadas a um fluido

a)forças de corpo ou de campo (gravidade)

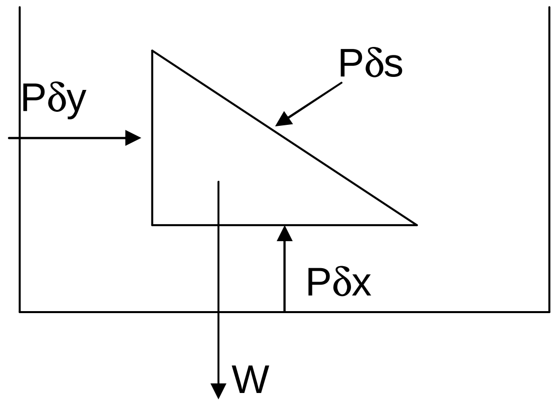
b)forças de superfície (Peso)

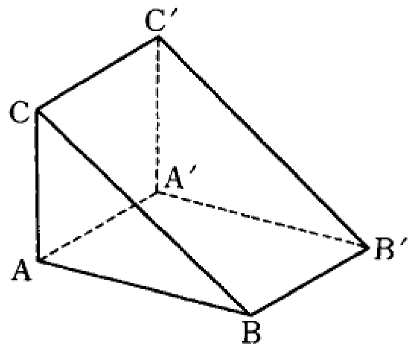
Para um elemento de volume $\Delta V = \delta x \delta y \delta z$

$dFb = = g \times dm = g\rho\delta x\delta y\delta z$

*Para um fluido estático – força de superfície = pressão → $P = p(x,y,z)$;

Para um elemento prismático





Dai temos que:

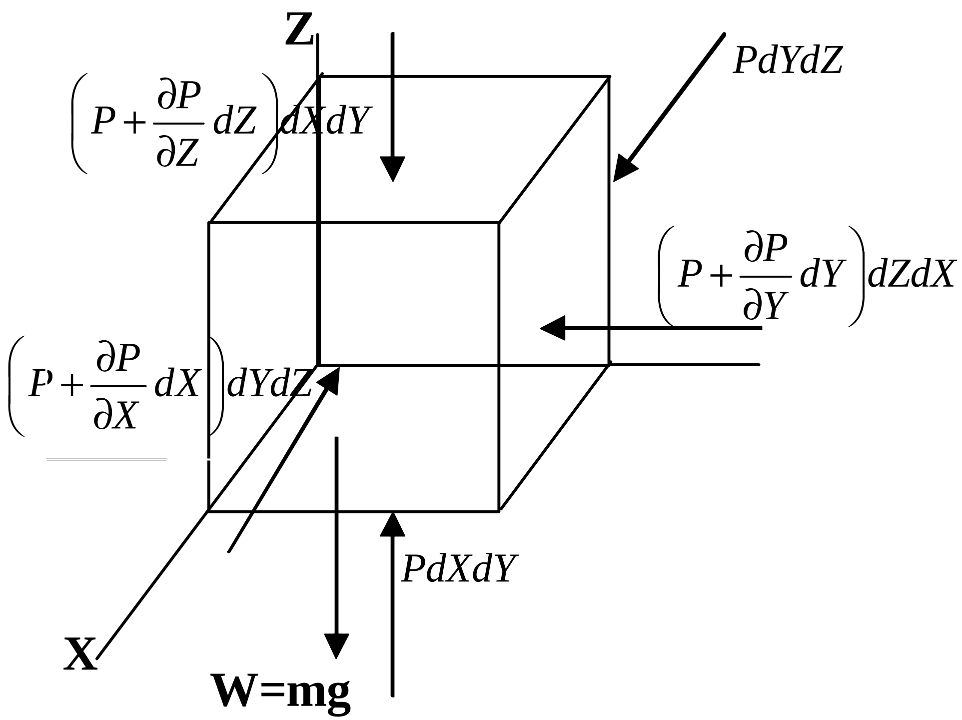
$P_y\delta x = P_s\delta x$; $P_x\delta y = P_s\delta y$

Então → $P_y = P_s$; $P_x = P_s$, do que pode-se concluir que →

$$\mathbf{P_y = P_x = P_s}$$

ESTÁTICA DOS FLUIDOS

Equação Fundamental da Estática dos Fluidos



Para repouso ou velocidade constante → $\sum F = 0$

$$\left[P-\left(P+\frac{\partial P}{\partial X}dX\right)\right]dYdZex+\left[P-\left(P+\frac{\partial P}{\partial Y}dY\right)\right]dXdZey+\left[P-\left(P+\frac{\partial P}{\partial Z}dZ\right)\right]dXdYez-mg=0 \quad (1)$$

onde ex, ey, ez → vetores unitários

Para m = massa = ρdZdYdX
E dividindo por dZdYdX

$$\left[-\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)dX\right]dYdZex+\left[-\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)dY\right]dXdZey+\left[-\left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)dZ\right]dXdYez-mg=0 \quad (2)$$

ESTÁTICA DOS FLUIDOS

Equação Fundamental da Estática dos Fluidos

$$\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)ex - \left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)ey - \left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)ez - \rho gez = 0 \quad (3)$$

→ Equação geral da estática!!

Para o equilíbrio $\sum Fx = 0$; $\sum Fy = 0$; $\sum Fz = 0$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)ex = 0; --> -\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)ey = 0 --> -\left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)ez - \rho gez = 0 \quad (4)$$

Pela lei de Pascal, no plano horizontal as pressões são iguais, logo P=P(X,Y,Z)
P(z) só depende de Z

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)ez - \rho g = 0 \longrightarrow -\left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)ez - \gamma = 0 \longrightarrow -\frac{\partial P}{\partial Z} = \gamma \quad (5)$$

→ Como P(z) só depende de Z $\longrightarrow -\dfrac{dP}{dZ} = \gamma \quad (6)$

ESTÁTICA DOS FLUIDOS

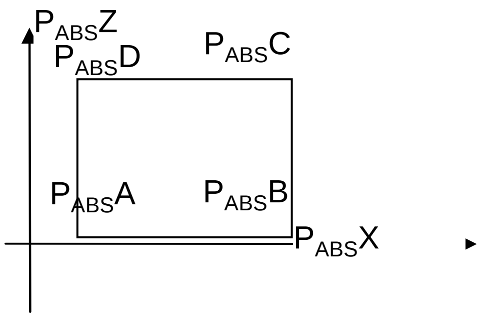
Equação Fundamental da Estática dos Fluidos

→ Integrando → **$P = \gamma Z + C$**

Restrinções→Fluido estático; A gravidade é uma força de campo;

A partir da equação, conclui-se que a pressão não varia com a distância horizontal. Sendo assim, P é função apenas de Z, permitindo passar de derivada parcial para derivada ordinária.

Para fluidos incompressíveis (γ e ρ = cte) a integração da equação acima fornece a seguinte solução



$$\int_C^B dP = -\gamma \int_C^B dZ \quad \text{ou,} \quad P\Big|_C^B = -\gamma Z\Big|_C^B$$

→ $P_B - P_C = -\gamma(Z_B - Z_C)$, logo → $P_B - P_C = \gamma(Z_C - Z_B)$, contudo $Z_B - Z_C = h$ → Logo, $P_B - P_C = \gamma h$ → $P_B = P_C + \gamma h$

Princípios básicos:

Lei de Stevin (Eq. Fundamental da fluidoestática) – A diferença de pressão entre dois pontos, no interior da massa fluida (em equilíbrio estático e sujeita a gravidade) é igual ao peso da coluna de fluido tendo por base a unidade de área e por altura a distância vertical entre os dois pontos.

Lei de Pascal – No interior de um fluido em repouso, a pressão é constante em cada ponto, ou seja, em dada profundidade, a pressão é a mesma que o elemento da superfície seja vertical, horizontal ou inclinado.

Como conseqüência: a pressão sobre a superfície da massa fluida é transmitida ao seu interior, integralmente e em todas as direções.

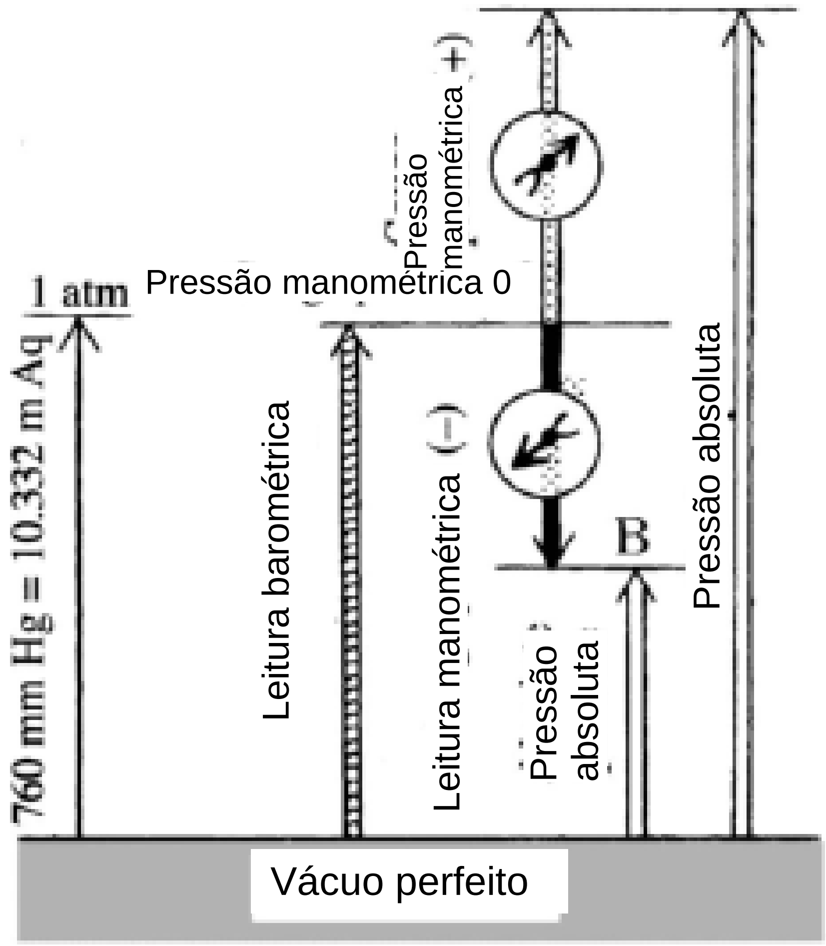
Aplicação: freio de automóveis, prensas hidráulicas, macacos hidráulicos.

OS VALORES DE PRESSÃO DEVEM SER ESTABELECIDOS EM RELAÇÃO A UM NÍVEL DE REFERÊNCIA

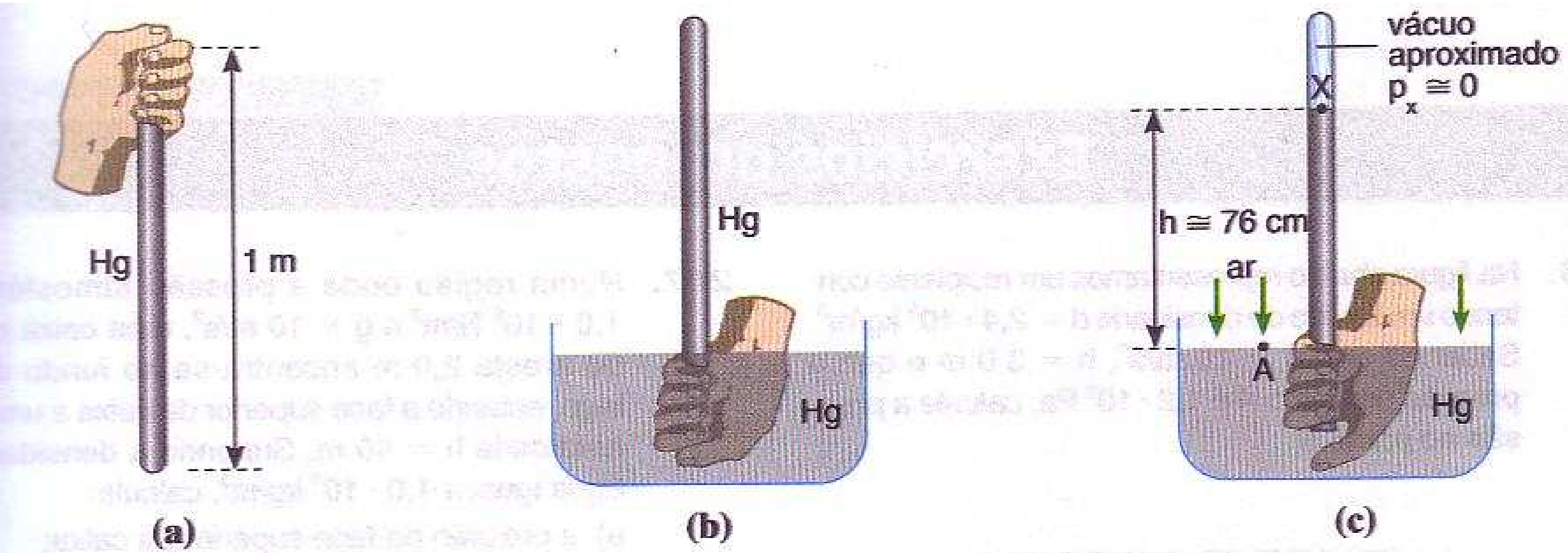
Existem dois métodos para exprimir a pressão: um é baseado no vácuo perfeito e o outro na pressão atmosférica;
A primeira é chamada pressão absoluta e a segunda pressão monométrica

Pressão manométrica
=pressão absoluta-pressão atmosférica

Pressão atmosférica ao nível do mar
101,3 KPa = 14,696 Psi = 14,69 lbf/in2 =
1,03 Bar = 2116 lbf/ft2 = 29,92 pol.Hg; 33,91
ft H2O = 1 atm = 760 mmHg = 10,34 mH2O



Experiência de Torricelli para determinação da pressão atmosférica



1. A experiência foi realizada ao nível do mar
2. Um tubo de vidro de aproximadamente 1m foi preenchido com mercúrio (Hg);
3. Mantendo fechado o tubo, inverteu-o e mergulhou-o num recipiente que também continha mercúrio;
4. Uma vez aberta a extremidade do tubo, a coluna de mercúrio desceu até 76 cm acima da superfície livre do mercúrio;
5. Na parte superior, que ficou vazia, foi gerada uma ausência de ar (vácuo), que na verdade não é um vácuo perfeito visto que um pouco de mercúrio se evaporou;
6. Conclusão: o que mantinha a coluna nessa altura era a pressão atmosférica

OS VALORES DE PRESSÃO DEVEM SER ESTABELECIDOS EM RELAÇÃO A UM NÍVEL DE REFERÊNCIA

Pressão atmosférica ao nível do mar
101,3 KPa = 14,696 Psi = 14,69 lbf/in^2 = 1,03 Bar = 2116 lbf/ft^2 = 29,92 pol.Hg; 33,91 ft H_2O = 1 atm = 760 mmHg = 10,34 mH_2O

Exemplo:
Para Y=1500 m → P=0,847 Bar_{abs}
Para Y=300 m → P=0,975 Bar_{abs}

Definições:
Pressão absoluta: Pressão cujo nível de referência é o vácuo
$P_{manométrica} = P_{absoluta} - P_{atmosférica}$

*as pressões absolutas devem ser empregadas em cálculos com gases ideais ou com outras equações de estado

INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE PRESSÃO

A pressão atmosférica é medida por um barômetro de mercúrio ou um barômetro aneróide:

$P_{vp}Hg \approx 0;$

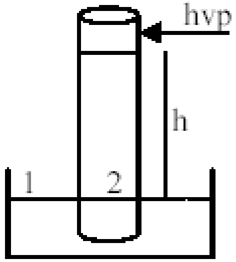
$P2 = Pv + h\gamma Hg$

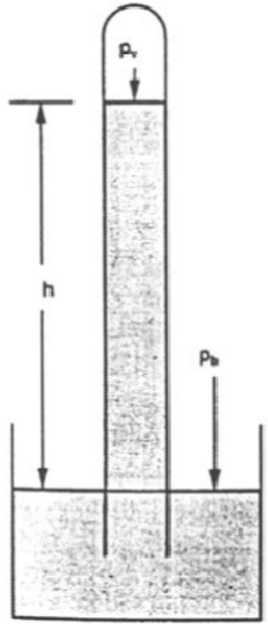
$P2 = P1 = Patm = h\gamma Hg$

$dHg = 13{,}6$

$T = 20oC$

$P2 = 760\ mmHg = 29{,}92\ pol.Hg$





Obs:

a) correções de temperatura e altitude devem ser aplicadas ao nível medido;

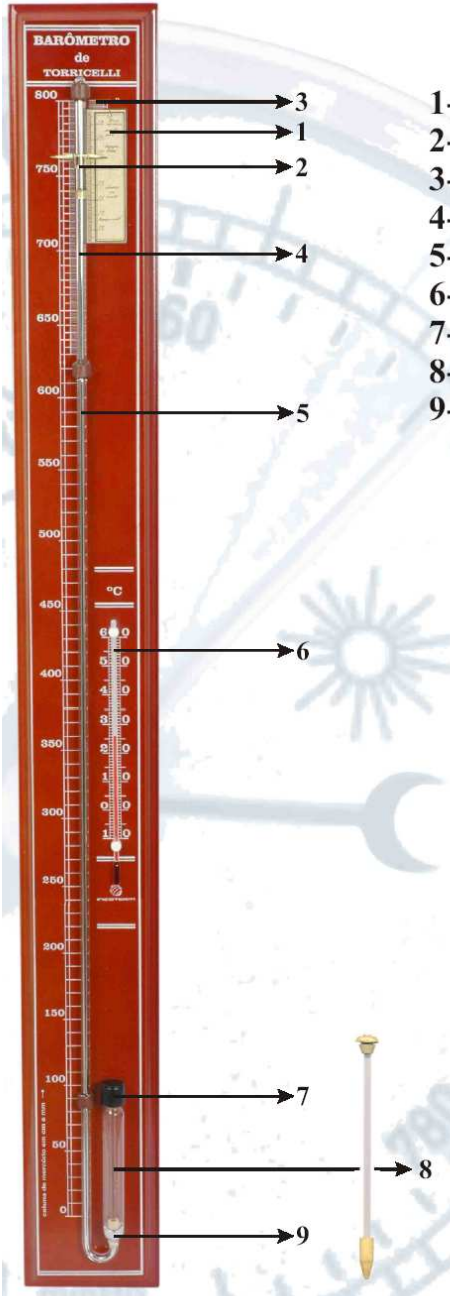
b) tensão superficial deve ser levada em conta;

UNIDADES E ESCALAS PARA MEDIR A PRESSÃO

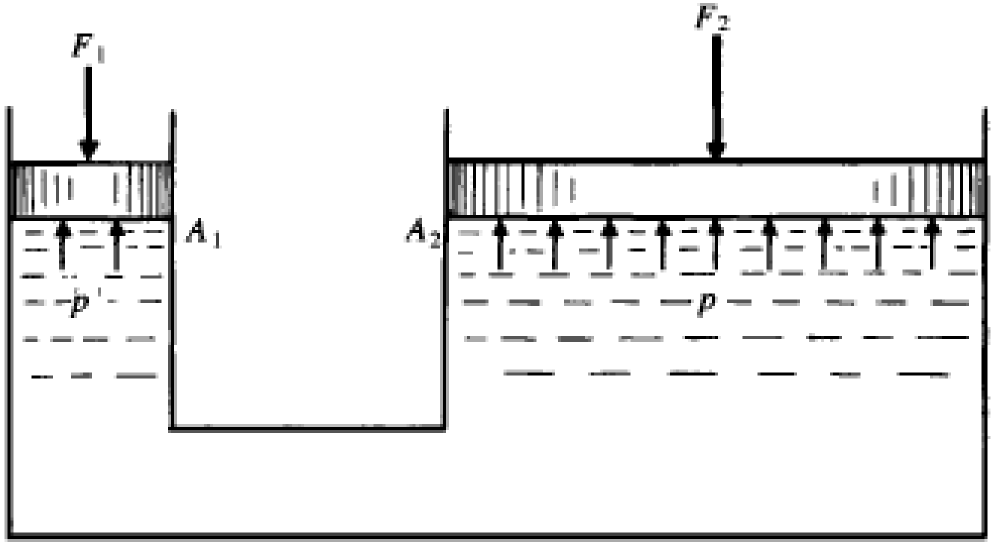
- Pressão absoluta = P – vácuo absoluto;
- Pressão efetiva = P – Patmosférica local;
- Pressão atmosférica normal ou padrão = pressão média ao nível do mar
- = 759,96 mmHg ou 29,92 Pol Hg =101,3 kPa = 10,34 mH2O
- Pressão atmosférica local: medida por um barômetro de mercúrio
- Pressão em metros: força por unidade de área na base da coluna

UNIDADE DE PRESSÃO

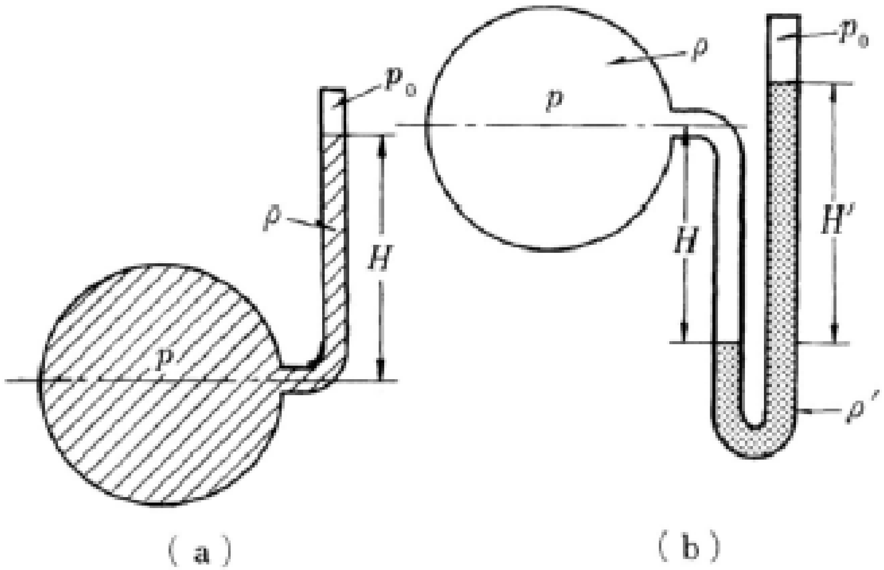
P =
lb/ft2;
kgf/m2
N/m2
Ppsi=62,4/144 x d x h,
onde 1 ft2 = 144 in2
γH2O = 62,4 lbf/ft3 = 9.806 N/m3
d = densidade relativa;
h = altura da coluna de líquido



1- Escala Auxiliar
2- Ponteiro Regulável
3- Escala de Altitude
4- Tubo de Vidro
5- Coluna de Mercúrio
6- Termômetro
7- Tampa
8- Dispositivo de Segurança
9- Recipiente de Mercúrio

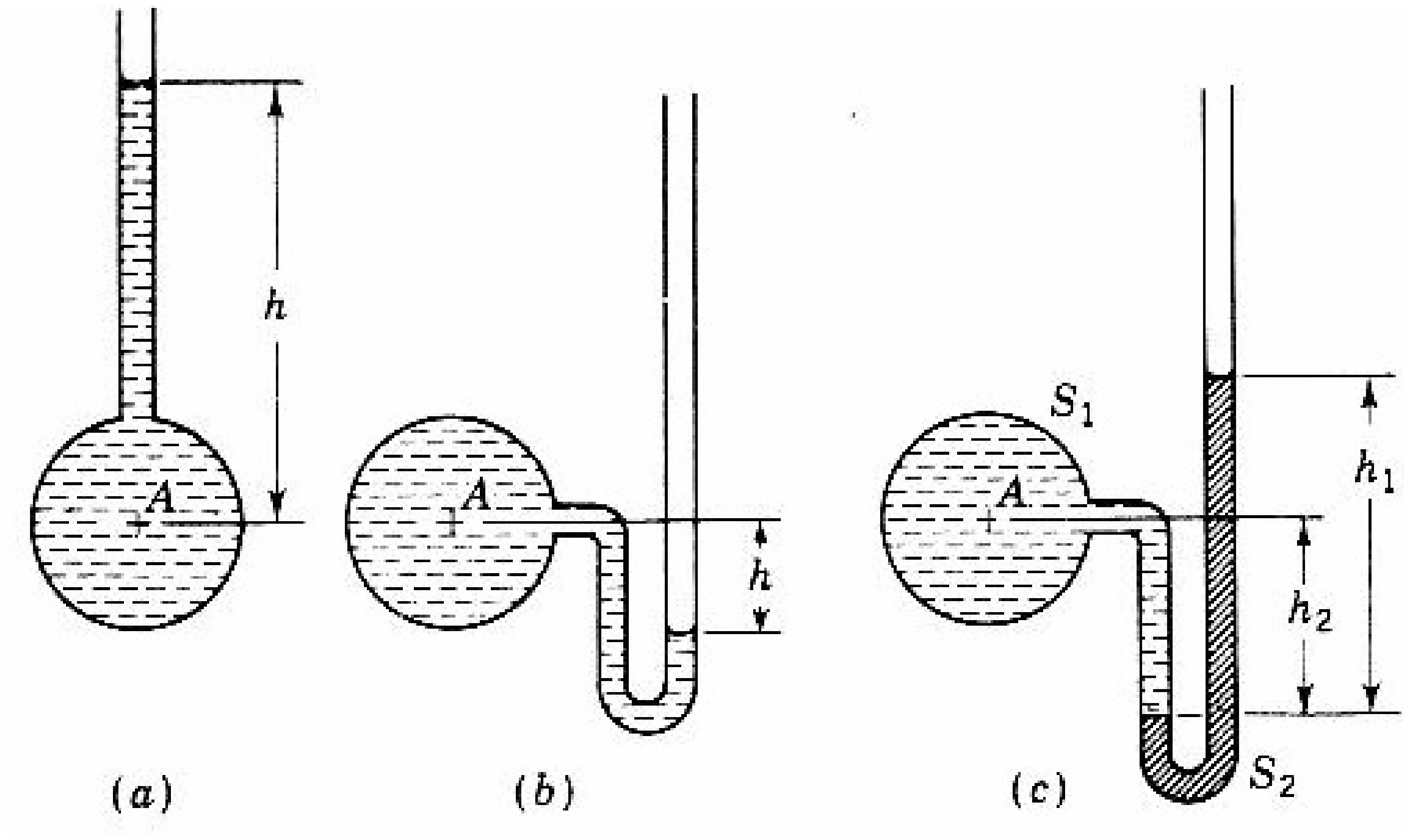


PRESSÃO RELATIVA (com relação à atmosfera)



- Manômetro: dispositivo formado por uma coluna de líquido e usados para determinar a diferença de pressão. São utilizados para medidas de precisão.

Manômetro diferencial

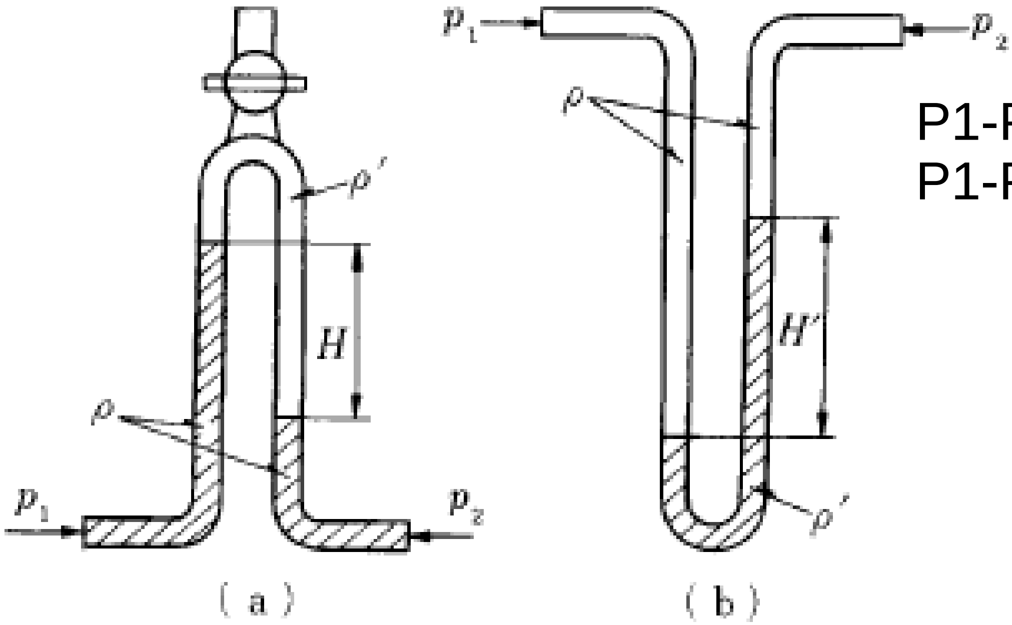


$PA = \gamma h \rightarrow PA/\gamma = h \rightarrow hA = -h \times d_{rel}$

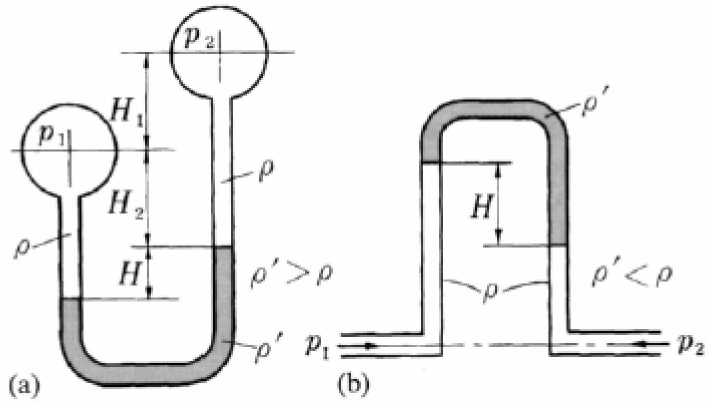
*Utilizado para medir pressões sempre acima do zero efetivo;

**Não serve para medir pressões elevadas em A;

Manômetro diferencial



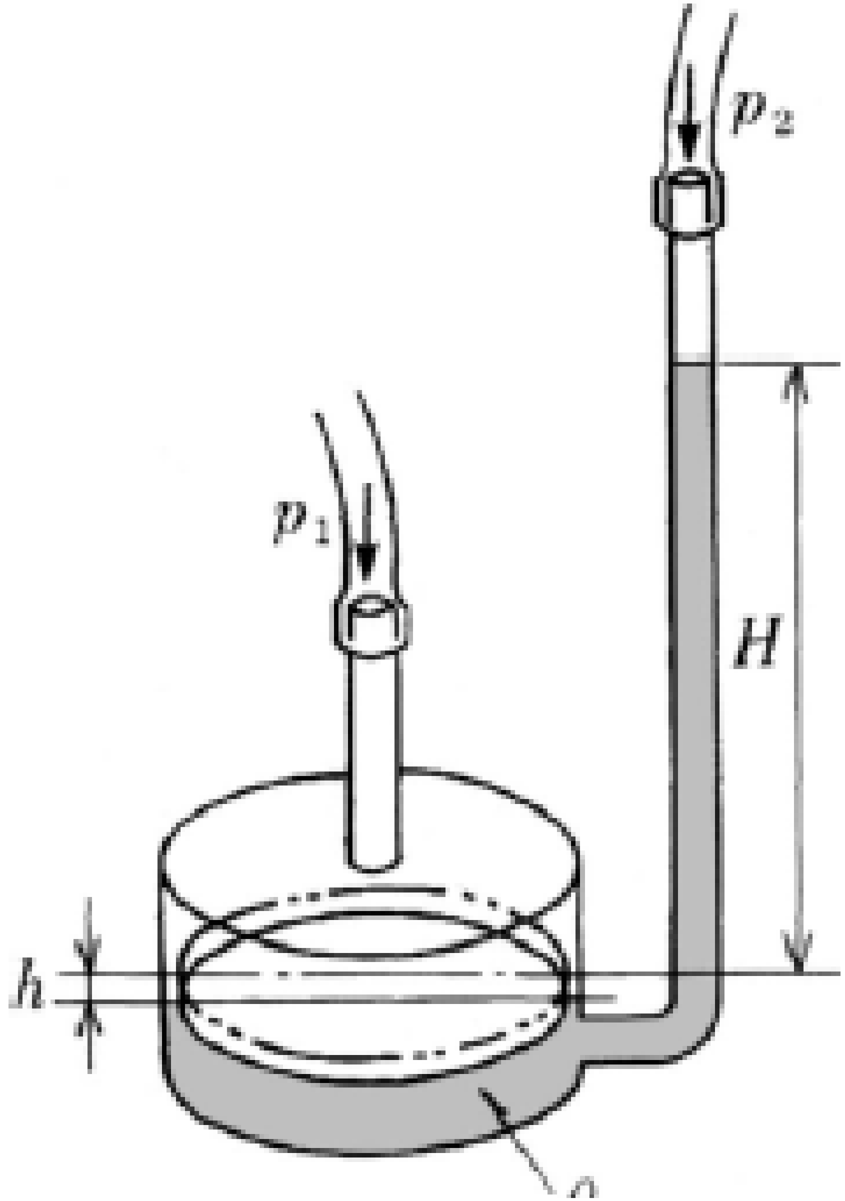
$P1-P2=(\rho- \rho')gH$ para uma condição geral
$P1-P2=(\rho)gH$ para a condição com gás



1) Quando a pressão diferencial do líquido é pequena, a medida é efetuada preenchendo-se a seção superior do medidor com um líquido de menor densidade ou com gás (a).
2) Para pressões maiores, utiliza-se o manômetro da letra b

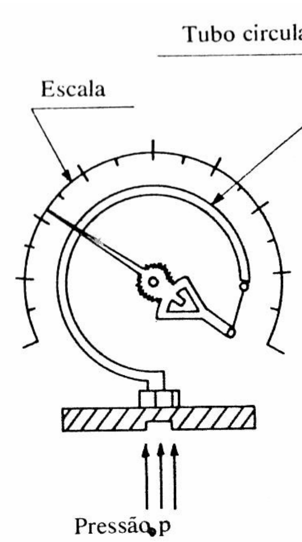
Manômetro diferencial

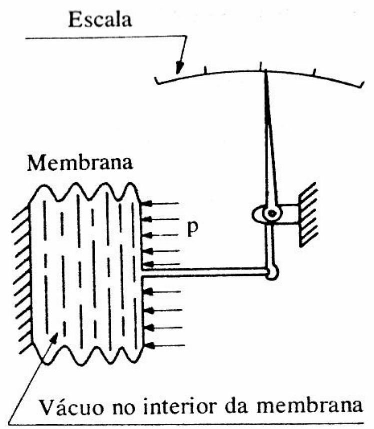
1) Fazendo a seção de um tubo grande o suficiente a coluna de água de altura H poderá ser medida, bastando para tanto, ler o nível do líquido no outro tubo, visto que a flutuação da superfície no tubo maior pode ser ignorada!



Manômetro diferencial para alta pressão

PRESSÃO RELATIVA (com relação à atmosfera)





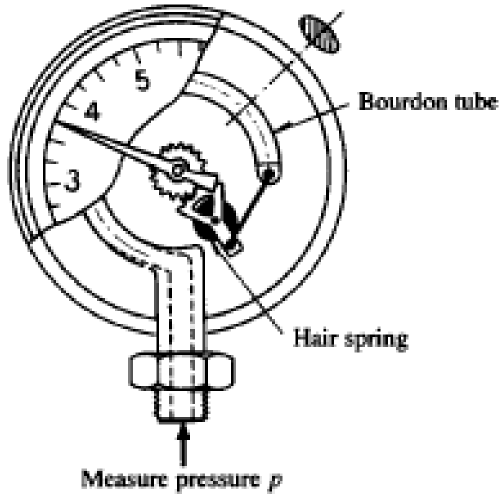


Fig. 3.10 Bourdon tube pressure gauge

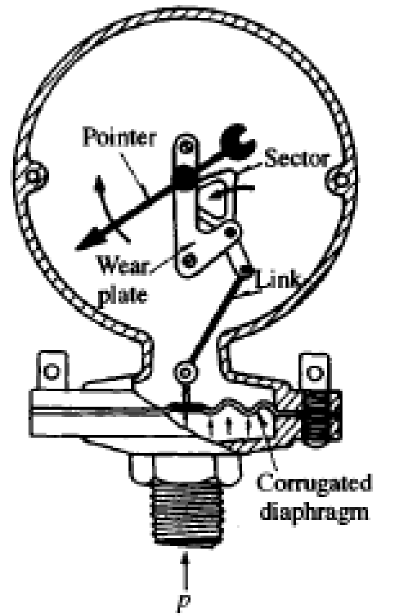


Fig. 3.11 Diaphragm pressure gauge

- Manômetro: dispositivo formado por uma coluna de líquido e usados para determinar a diferença de pressão. São utilizados para medidas de precisão.

- Manômetro de Bourdon: dispositivo composto de um tubo metálico curvado, fechado em um local e que tende a alongar quando a pressão interna aumenta. A referência é a pressão atmosférica.

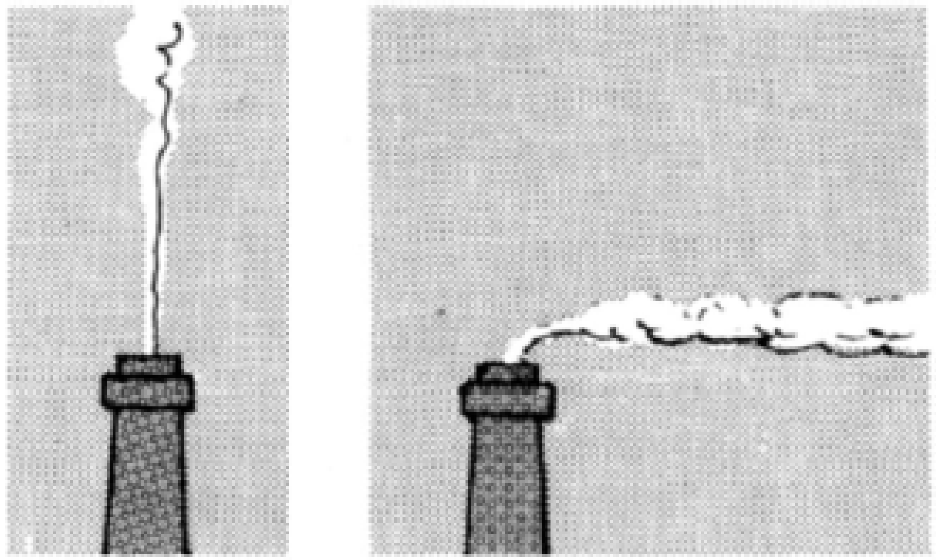
Exercícios

CONCEITOS RELACIONADOS AO ESCOAMENTO DOS FLUIDOS E EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

- Qual a diferenças entre estática dos fluidos e a natureza do escoamento?
- Diferente da estática dos fluidos, onde não temos movimento e os efeitos devido à viscosidade poderão ser desprezados, o escoamento de um fluido real é complexo e de difícil formulação.

CONCEITOS RELACIONADOS AO ESCOAMENTO DOS FLUIDOS E EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

- CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO
  - **QUANTO À TRAJETÓRIA**



(a) (b)

Laminar: as partículas de fluido (pequenas massas) movem-se ao longo de trajetórias suaves, em lâminas ou camadas.
* acontece a baixas velocidades!!
- Cada uma destas deslizando suavemente sobre a outra adjacente;
- É governado pela lei de Newton da viscosidade

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

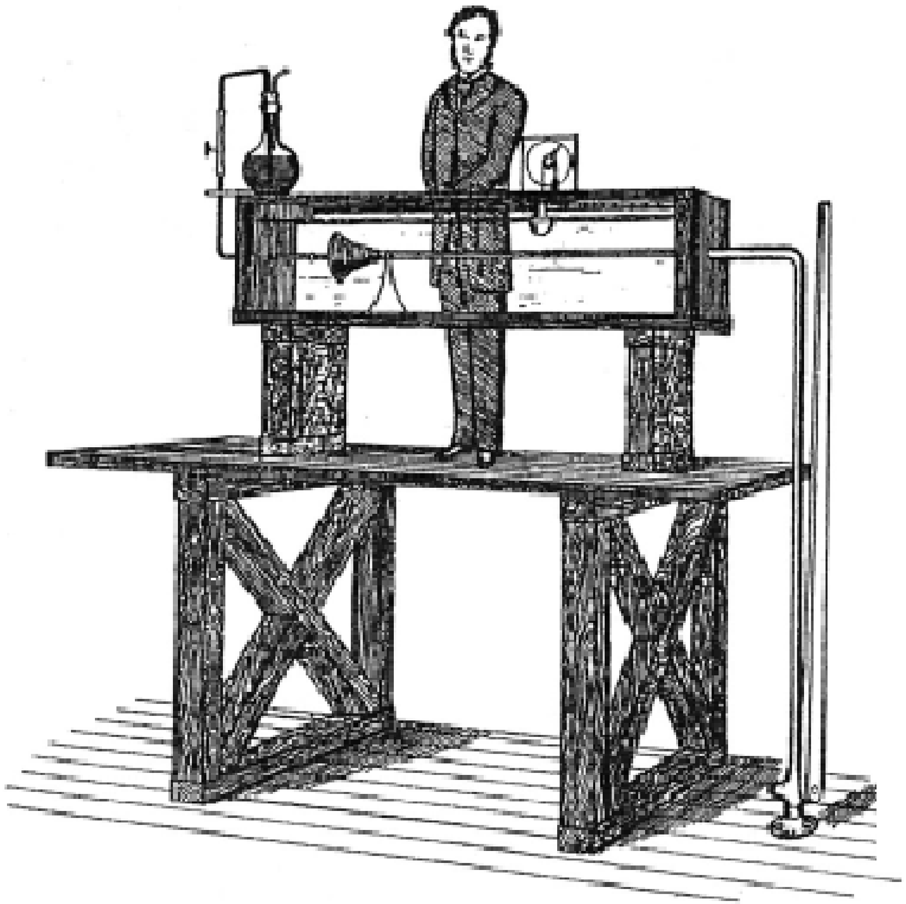
- As perdas são diretamente proporcionais a velocidade média → Re≤2000
- A ação da viscosidade é amortecer a tendência de aparecimento de turbulência

CONCEITOS RELACIONADOS AO ESCOAMENTO DOS FLUIDOS E EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

- CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO
  - **QUANTO À TRAJETÓRIA**

Turbulento:
*****A viscosidade da água é baixa – são as mais freqüentes na natureza.
- Ocorrem em altas velocidades
- As partículas movem-se em trajetórias irregulares causando uma transferência de quantidade de movimento de uma porção de fluido para outra Re>4000 (O QUE SIGNIFICA Re?)
- Geram maiores tensões de cisalhamento
- As perdas são proporcionais a uma potência da velocidade $\Delta h \propto u^k$
- A tensão de cisalhamento não é uma propriedade do fluido somente - $\tau = \eta \frac{du}{dy}$ Na prática $\tau = \eta + \mu \frac{du}{dy}$

Experimento de Osborne Reynolds



(a) Laminar flow

(b) Turbulent flow

(c) Turbulent flow (observed by electric spark)

Experimento de Osborne Reynolds

1. Reynolds conduziu vários experimentos usando tubos de vidro de diferentes diâmetros e com água a temperatura entre 4 e 44oC;
2. Descobriu que um fluxo passa de laminar para turbulento quando o valor de uma grandeza adimensional ρVD/μ atinge um certo valor;
3. Posteriormente, à este número adimensional foi dado o nome de número de Reynolds

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

4. Onde ρ/ μ=ν → viscosidade cinemática [m²/s]

CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO

- **QUANTO AO TEMPO**
- Permanente: o tempo é o fator determinante.
- Neste tipo de escoamento, as condições em qualquer ponto do fluido não variam no tempo →

$$\frac{\partial u}{\partial t}=0;\frac{\partial \rho}{\partial t}=0;\frac{\partial P}{\partial t}=0;\frac{\partial T}{\partial t}=0;$$

- Variado: as condições variam em qualquer ponto com o tempo $\frac{\partial u}{\partial t}\neq 0$

- Exemplo:
- - a água bombeada por um sistema onde Q=cte, o escoamento é permanente;
- - a água bombeada por um sistema onde Q é crescente o escoamento é variado.

- **QUANTO AO ESPAÇO**
- Uniforme:O espaço é o fator determinante, $\frac{\partial u}{\partial s}=0$ significando que o vetor velocidade é idêntico em todos os pontos (módulo, direção e sentido). Daí, quando o conduto for prismático (seção constante) e a velocidade média em todas as seções, num certo instante for a mesma, o escoamento é dito **Uniforme.**

- Não uniforme: o vetor velocidade varia de um local para outro em um instante qualquer,

Equação da Continuidade

- Fluido Ideal
- Incompressível
- Sem atrito
- Sem viscosidade
- Sem resistência

Simplificação para a análise matemática

- Fluido real - Compressível; viscoso

- O número de **REYNOLDS:** Re – é a relação entre forças de inércia e forças viscosas. Este número diferencia os regimes de escoamento laminar e turbulento
- ,
- onde ν - viscosidade cinemática (m^2/s); V – velocidade média (m/s); D – diâmetro.

Equação da Continuidade

- **CONCEITOS RELACIONADOS À EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE**

- **LINHA DE CORRENTE**:é uma linha contínua, traçada no fluido, tangente em todos os pontos aos vetores da velocidade.
- *Não há escoamento através de uma linha de corrente;
- * No escoamento permanente, a trajetória de uma partícula é uma linha de corrente que passam por uma pequena curva fechada.

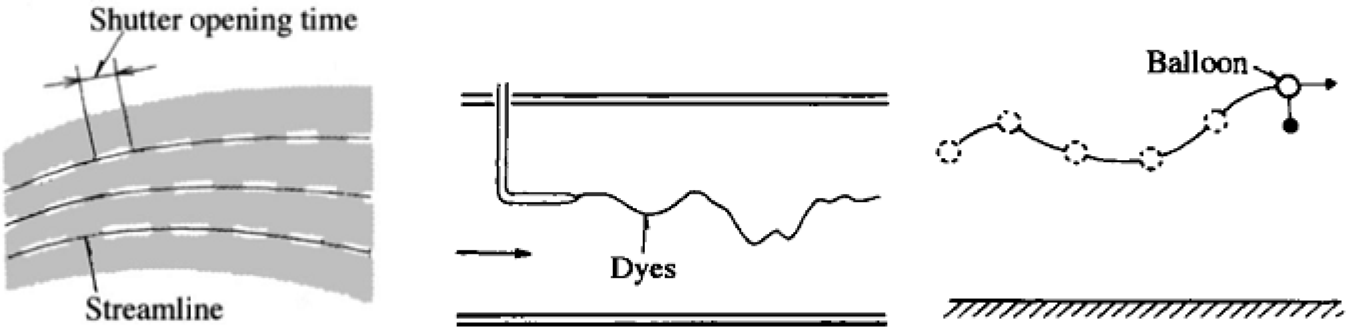
- **TUBO DE CORRENTE**: tubo formado por todas as linhas de corrente que passam por uma pequena curva fechada.

- **SISTEMA:** uma massa definida de matéria distinta de todo o restante da mesma.

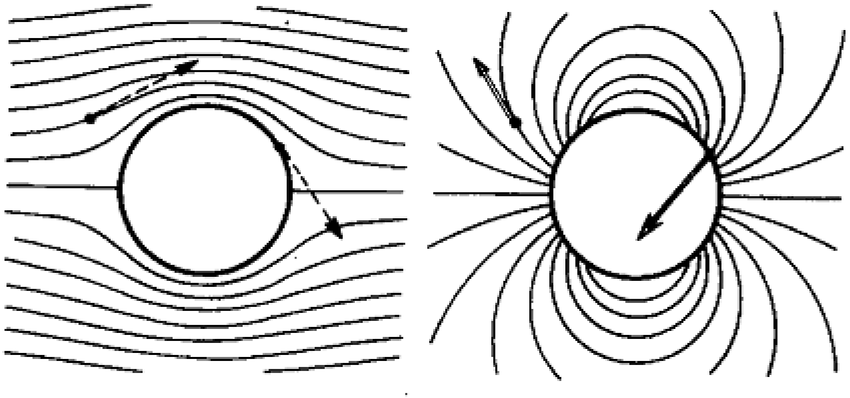
- **VOLUME DE CONTROLE:** refere-se a uma região do espaço cuja fronteira é a superfície de controle.

- **VAZÃO –**
- Em volume → volume do fluido que atravessa uma seção de escoamento
- Em massa → quantidade de massa fluida que atravessa uma seção

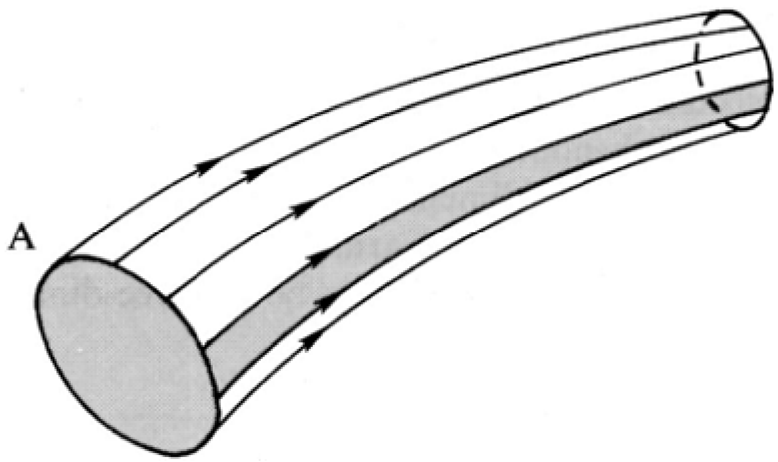
Exemplos



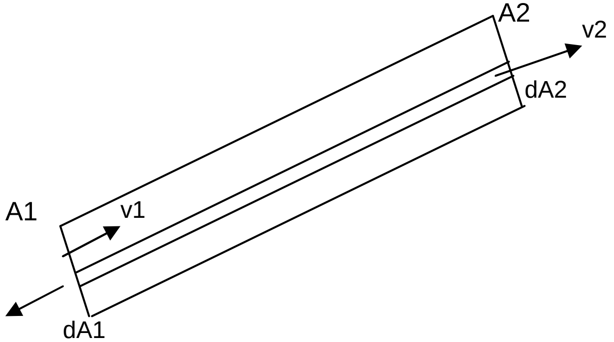
(a) Streamline (b) Streak line (c) Path line



(a) Relative streamlines (b) Absolute streamlines



Lei de conservação de massa Equação da Continuidade



Para $\frac{dm}{dt} = 0$

Seção 1: $\rho_1 v_1 dA_1$

Seção 2: $\rho_2 v_2 dA_2$

Como não há escoamento através das paredes de um tubo de corrente

$\rho_1 V_1 dA_1 = \rho_2 V_2 dA_2$ (Equação da continuidade para escoamento permanente)

Para velocidade média **V**

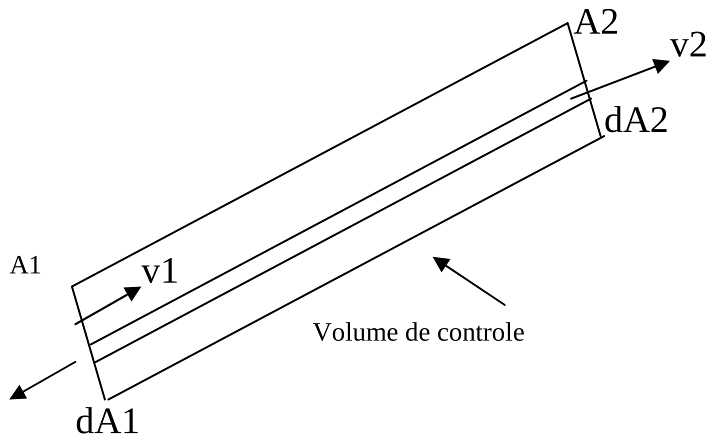
Vazão em massa $m = \rho_1 v_1 dA_1 = \rho_2 v_2 dA_2$

Para vazão = $Q = A \times V \rightarrow \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2$

Para o escoamento permanente de fluido incompressível $\rho_1 = \rho_2$

Daí: $Q1 = Q2 \rightarrow V_1 A_1 = V_2 A_2$ onde $V = \frac{1}{A}\int v dA$

Demonstração



Em fluidos incompressíveis e em regime permanente, a vazão em volume, que passa através de um tubo de corrente é constante.

Δm = é a diferença entre a vazão que entra no volume de controle e a que sai

Como para um fluxo permanente a massa não pode mudar com relação ao tempo, e o fluxo não pode passar através das fronteiras do tubo de corrente, a massa fluindo através do tubo de corrente é constante

Para Δm = 0 → conservação de massa $0 = \int_{A1} \rho_1 v_1 dA - \int_{A2} \rho_2 v_2 dA --> \int_{A1} \rho_1 v_1 dA = \int_{A2} \rho_2 v_2 dA$

Para fluidos não compressíveis ρ1 = ρ2 = ρ

$$\int_{A1} v_1 dA = \int_{A2} v_2 dA = Q \qquad \Delta m = \rho \Delta V = \int_{A1} \rho_1 v_1 dA - \int_{A2} \rho_2 v_2 dA$$

(Equação da continuidade)

- Velocidade média no tubo de corrente

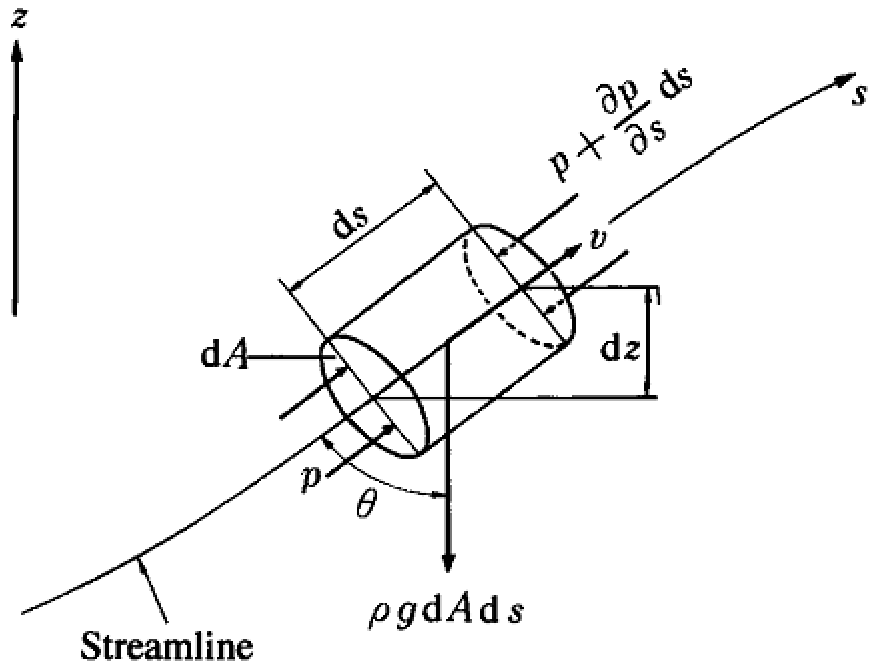
$$V_1 = \frac{1}{A_1}\int v_1 dA \qquad V_2 = \frac{1}{A_2}\int v_2 dA$$

- A1($V_1 = \frac{1}{A_1}\int v_1 dA$)=A2($V_2 = \frac{1}{A_2}\int v_2 dA$)

Velocidade média Velocidade média

- **A1V1=A2V2=Q → Q=AV**

EQUAÇÃO DE EULER AO LONGO DE UMA LINHA DE CORRENTE



Considerando:

- Cosθ=dz/ds →u é tangente a linha de corrente ¨s¨;
- o volume de controle sofre ação da pressão P e de seu peso W.
- um volume de controle prismático, muito pequeno;
- Escoamento ideal, sem viscosidade
- Ao longo de uma linha de corrente (unidimensional);
- Em regime permanente

- Massa= dm
- Forças agindo sobre os corpos são:
- - Pressão P nos extremos
- - O peso W
- - Forças cisalhantes (dFs) devido às partículas adjacentes

Para a equação de movimento: $\Sigma Fx = M.ax$

Daí: $$\left(+PdA-(P+dP)dA-\gamma dAdl\sin\theta-dFx\right)=\left(\frac{\gamma dAdl}{g}\right)\left(\frac{dv}{dt}\right) \qquad (1)$$

Dividindo por γdA e substituindo dl/dt por *v*

$$\left(\frac{P}{\gamma}-\frac{P}{\gamma}-\frac{dP}{\gamma}-dl\sin\theta x-\frac{dFs}{\gamma dA}\right)=\frac{vdv}{g} \qquad (2)$$

$\frac{dFs}{\gamma dA}$ é a resistência ao fluxo ao longo de dl

dFs=τdPdl→ $\frac{dFs}{\gamma dA}=\frac{\tau dPdl}{\gamma dA}=\frac{\tau dl}{\gamma R}$ onde R= raio hidráulico=A/P

A soma de todas as forças cisalhantes é igual a perda de energia devido ao fluxo

$$dhl=\frac{\tau dl}{\gamma R}\therefore\tau=\gamma R\left(\frac{dhl}{dl}\right) \qquad (3)$$

Visto que $dl \sin\theta x = dz$

$$\left(\frac{dP}{\gamma}+\frac{vdv}{g}+dz+dhl\right)=0 \qquad (4)$$

Equação de Euler quando aplicada a um fluido ideal →dhl=0
Para fluidos de densidade constante, ou seja, fluidos incompressíveis

$$\int_{P1}^{P2}\frac{dP}{\gamma}+\int_{v1}^{v2}\frac{vdv}{g}+\int_{z1}^{z2}dz+\int_{1}^{2}\frac{dhl}{\gamma}=0 \qquad (5)$$

Os métodos para avaliar $\int_{1}^{2}\frac{dhl}{\gamma}=0$ serão discutidos posteriormente e aqui será chamado de Hl

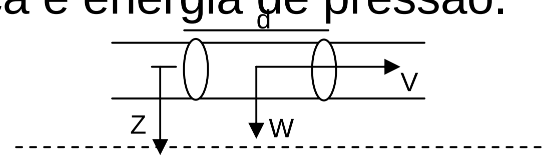
$$\left(\frac{P_2}{\gamma}-\frac{P_1}{\gamma}\right)+\left(\frac{V_2^2}{2g}-\frac{V_1^2}{2g}\right)+(Z_2-Z_1)+Hl=0 \qquad (6)$$

$$\left(\frac{P_1}{\gamma}\right)+\left(\frac{V_1^2}{2g}\right)+(Z_1)-Hl=\frac{P_2}{\gamma}+\frac{V_2^2}{2g}+Z_2 \qquad (7)$$

Os termos podem ser interpretados como energia por unidade de peso em metro Newton por Newton
Onde:

$\left(\frac{P_1}{\gamma}\right)$ = energia de pressão $\left(\frac{V_1^2}{2g}\right)$ energia cinética (Z_1) =energia de posição

Um Fluido em movimento possui energia e, para analisar os problemas de fluido em movimento, três formas de energia devem ser consideradas: energia potencial, energia cinética e energia de pressão.



Energia potencial: refere-se a energia que o elemento de fluido possui devido a sua elevação acima do nível de referência. Em termos quantitativos energia potencial (Ep) é igual ao produto do peso do elemento (W) pela distância do elemento ao nível de referência

$$(Ep=W.z) \quad (8)$$

Energia cinética é a energia que o elemento de fluido possui devido a sua velocidade. Em termos quantitativos (Ec) é igual ao produto da massa (m) do elemento pelo quadrado da velocidade x ½

$$Ec = m \times v^2/2 \quad (9)$$

$m=W/g \rightarrow W$ = peso; g= aceleração da gravidade (10)

Energia de pressão ou energia de fluxo: é a quantidade de trabalho necessário para movimentar um elemento de fluido a uma certa distância contra a pressão. Daí segue que a energia de pressão (EPr) é igual ao resultado do trabalho efetuado pelo elemento de fluido quando deslocado de d. A força é o produto da pressão P e a seção A

$$Epr = P \times A \times d \quad (11)$$

Ad é o volume do elemento = P/γ, onde γ é o peso específico do fluido t

$$Epr = W \times P/\gamma \quad (12)$$

A energia total é a soma das energias

E = Wz + m x (V^2/2g) + P x A x d (13)

$$E = Wz + W\frac{V^2}{2g} + W\frac{P}{\gamma} \qquad (14)$$

Cada termo pode ser expresso em termos de N.m

Em mecânica dos fluidos é comum se trabalhar com a energia em termos de carga, ou seja, a quantidade de energia por unidade de peso do fluido, suja unidade seria N.m/N.

Daí, dividindo 14 por W, o peso do fuido,

$$H = z + \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma}$$

, onde z – carga ou potencial de elevação

$V^2/2g$ – carga ou potencial de vel

P/γ - carga de pressão

Casos particulares:

1. quando todas as linhas de corrente têm origem num reservatório no qual a energia é a mesma em todos os pontos, os pontos de referência 1 e 2 podem ser escolhidos arbitrariamente (não necessariamente na mesma linha de corrente);
2. No escoamento de um sistema de ventilação de gás, onde a variação na pressão é apenas uma pequena variação da pressão observada, o gás pode ser considerado incompressível e 7 pode ser aplicado;
3. Para o escoamento variado, onde as grandezas variam gradativamente, a Equação 7 pode ser aplicado

1. Para fluidos reais, onde as tensões viscosas podem ser desprezadas, resultados teóricos podem ser obtidos sem problemas. A equação resultante pode ser corrigido por um coeficiente determinado experimentalmente

EQUAÇÃO DE EQUAÇÃO DE BERNOULLI

Fluidos ideais

$$H(cte) = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$$

<u>(Equação de Bernoulli para os fluidos ideais)</u>

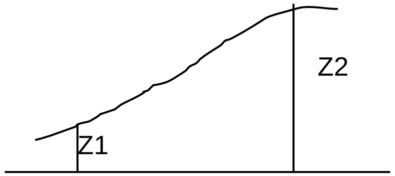
Onde z = energia de posição;

P/γ = energia de pressão;

$V^2/2g$ = energia cinética;

H = He = energia total

Para uma linha de corrente



$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \qquad \therefore \; z + \frac{P}{\gamma}$$

(é chamada de energia potencial)

Interpretação geométrica da Equação de Bernoulli

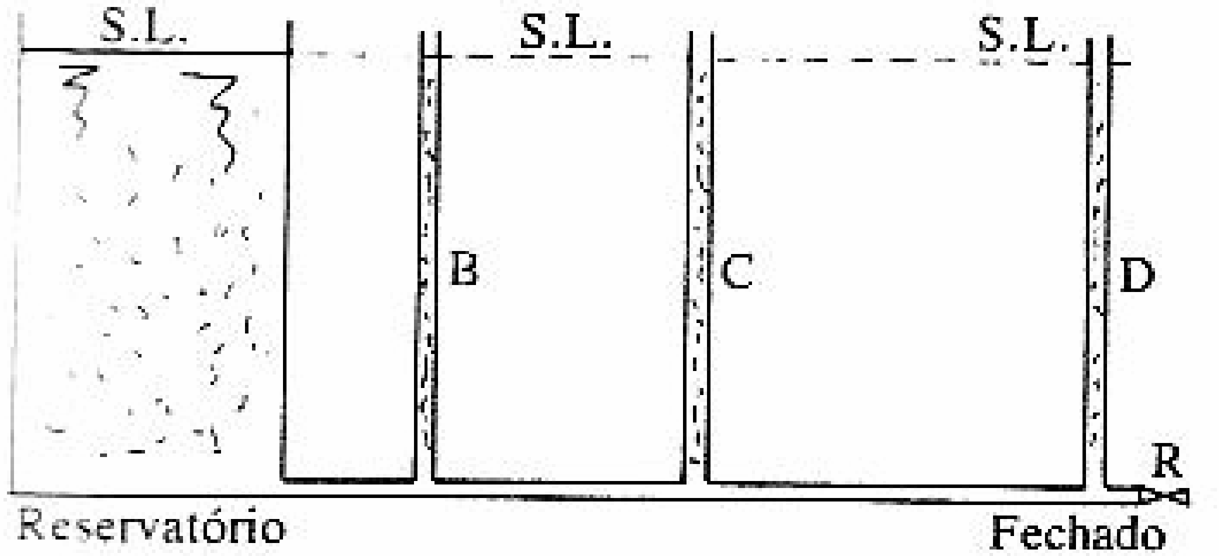
- No interior da massa fluida, em escoamento permanente, tomemos os pontos A,B,C, pertencentes ao mesmo filamento de corrente. Nos prolongamentos das cotas (z1,z2,z3), tomemos segmentos de reta, cada um deles igual à respectiva altura piezométrica ($P1/\gamma$, $P2/\gamma$, $P3/\gamma$).

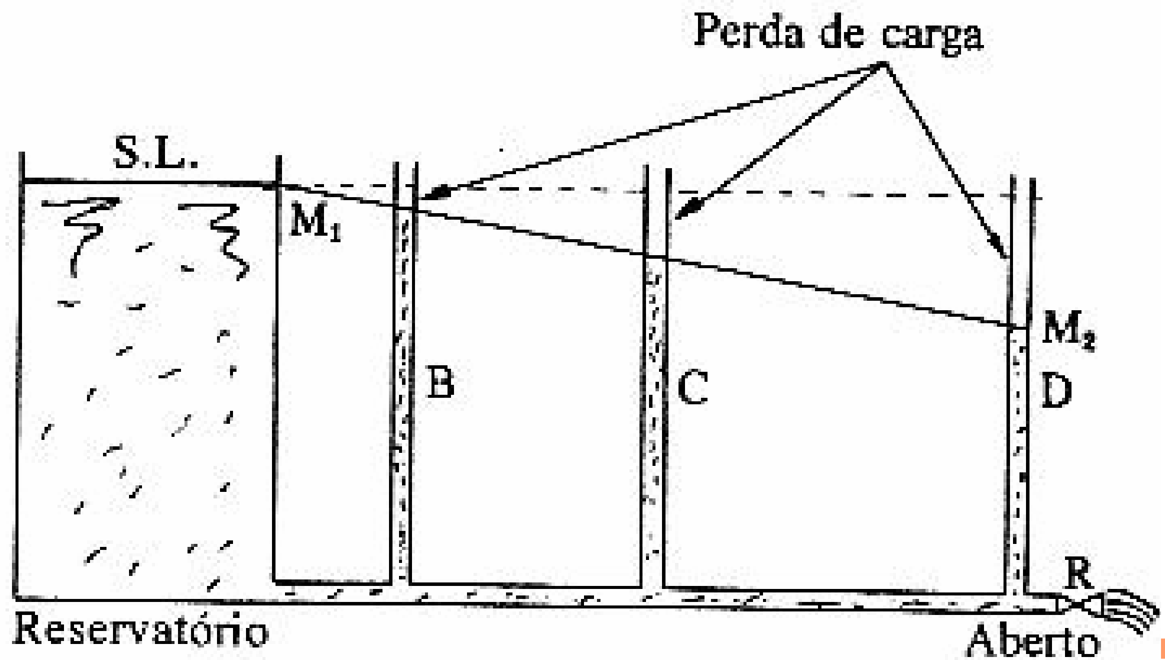
- A curva MNO é chamada de linha piezométrica ou linha das pressões. Em seguida, acrescentamos no gráfico os segmentos de reta representativos da energia cinética em cada ponto (v12/2g, v22/2g, v32/2g).

- Cada cota z é chamada de carga de posição; a respectiva altura de pressão é a carga piezométrica; a correspondente energia cinética é a carga cinética. Então, a altura H é a carga total.

- O plano cujo traçado indicamos na figura abaixo recebe o nome de plano de carga dinâmico (PCD) ou, simplesmente, plano de carga.

Origem da Perda de Carga

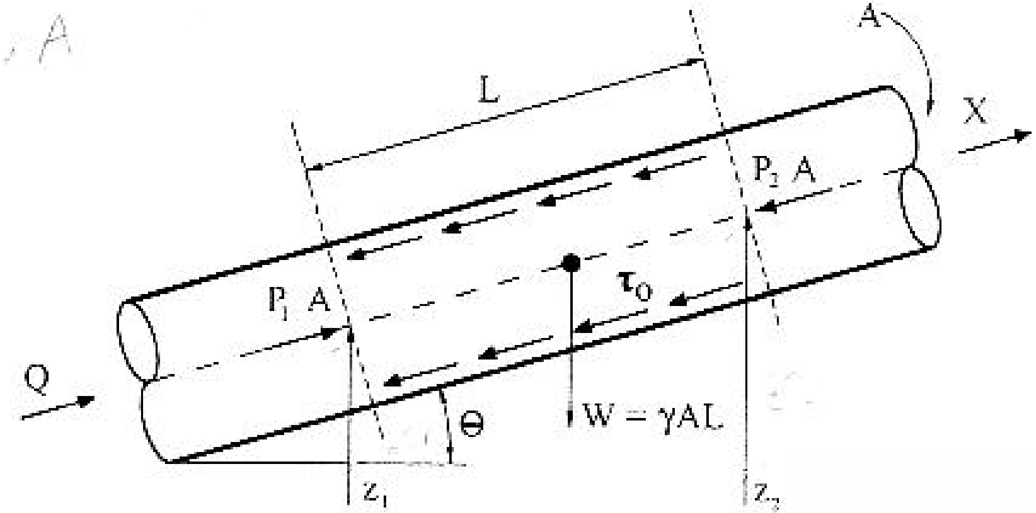


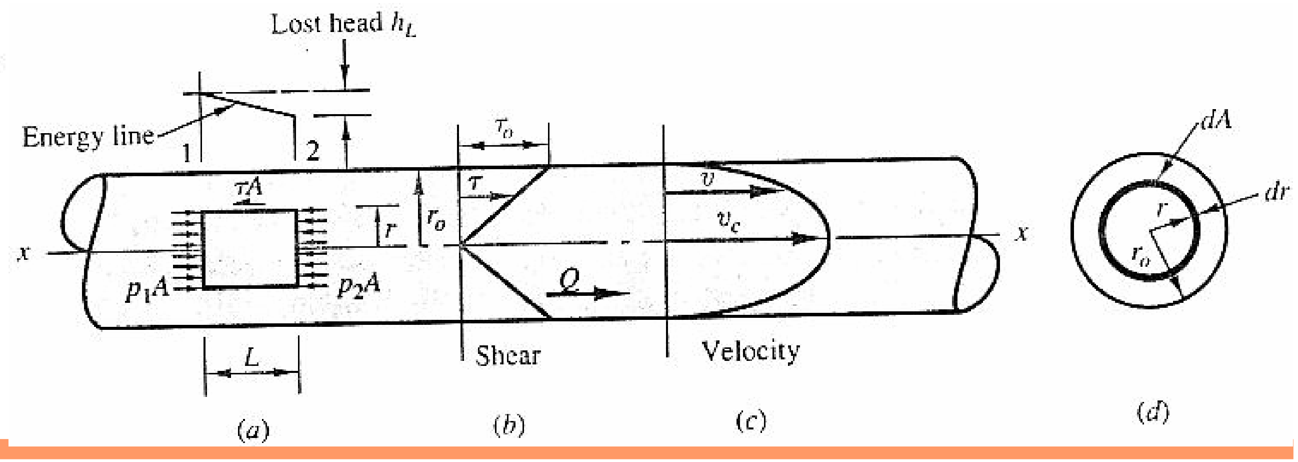


Origem da Perda de Carga

1. A perda de carga é o resultante da perda de energia (carga piezométrica) devido ao atrito viscoso entre as camadas que compõe o fluido e entre o fluido e a fronteira sólida. Sendo assim, o agente contribuinte para este processo é a viscosidade do fluido.

1. Considere as seguintes condições: fluido real, incompressível, em regime permanente, tubulação circular de diâmetro constante, forças de pressão, gravidade e cisalhamento.





Pelo diagrama de corpo livre mostrado nas Figuras 1b e na condição de equilíbrio dinâmico

$$\sum Fx = P_1 A - P_2 A - \tau_o P L - W \sin\theta = 0 \qquad (1)$$

onde τ_o= tensão média de cisalhamento (tensão trativa média ou tensão tangencial média).

Para

$$\sin\theta = \frac{z_2 - z_1}{L} \quad \text{e} \quad W = \gamma A L \qquad (2)$$

Substituindo 2 em 1

$$(P_1 - P_2)A - \tau_o P L - \gamma A(z_2 - z_1) = 0 --> \left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2\right) = \frac{\tau_o}{\gamma}\frac{P}{A}L \qquad (3)$$

Mas, a diferença entre os dois termos é a perda de energia entre as seções em questão

$$\left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2\right) = \Delta H \qquad (4)$$

Sendo assim denominada de PERDA DE CARGA ou perda de energia