Hidráulica 1 – SHS0409
HIDRÁULICA DOS CONDUTOS FORÇADOS

REVISÃO DOS CONCEITOS BÁSICOS DE FENÔMENOS DE TRANSPORTE

(RESUMO)

Propriedades Físicas dos Fluidos

1. Massa específica

MASSA ESPECÍFICA (ρ)

massa do corpo por unidade de volume (T e P).

$$\rho = \frac{massa}{volume}$$

Dimensões: $[\rho] = \frac{M}{L^3}$ ou $[\rho] = \frac{FT^2}{L^4}$

Unidades no SI: $\frac{kg}{m^3}$

ρH_2O = 1.000 kg/m³ (SI)

$a\ 5^oC : \rho_{H_2O} = 1000 \frac{kg}{m^3}\ ou$ $\rho_{H_2O} = 102 \frac{utm}{m^3}$

1 utm = 9,8 kg

2. Peso específico

PESO ESPECÍFICO (γ)

Peso por unidade de volume (P e T).

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

Dimensões: $[\gamma] = \frac{M}{L^2 T^2}$ ou $[\gamma] = \frac{F}{L^3}$

Unidades no SI: $\frac{N}{m^3}$

γ H_2O = 1.000 kgf/m³ = 9.810 N/m³(SI)

$$\gamma_{H_2O} = 1000 \frac{kgf}{m^3} \approx 9810 \frac{N}{m^3} \quad a\ 5^o C$$

RELAÇÃO (γ e ρ)

as duas propriedades anteriores possuem uma relação

$$\gamma = \rho \cdot g$$

3.Compressibilidade

- Propriedade que possuem os fluidos de sofrerem redução do volume, quando sujeitos à pressão, com conseqüente aumento de ρ. Nos líquidos é muito pequena.

Caracterizada pelo Módulo de compressibilidade cúbica ou elasticidade, K

Aumento de pressão

$$K = -\frac{\Delta p}{\frac{\Delta \forall}{\forall}} = \frac{\Delta p}{\frac{\Delta \rho}{\rho}}$$

Redução de volume

líquidos→ K alto e praticamente independe da temperatura e da pressão (K constante)

4. Viscosidade absoluta

- caracteriza a resistência oferecida pelas partículas ao escoamento. Primeiro observada por Newton. Símbolo μ

Fluido em repouso → resistência zero

Fluido em escoamento → esforço de atrito entre as partículas → esforços tangenciais → tensões de cisalhamento

Fluidos perfeitos (invíscidos)→ mesmo durante o escoamento podem-se desprezar os efeitos da viscosidade

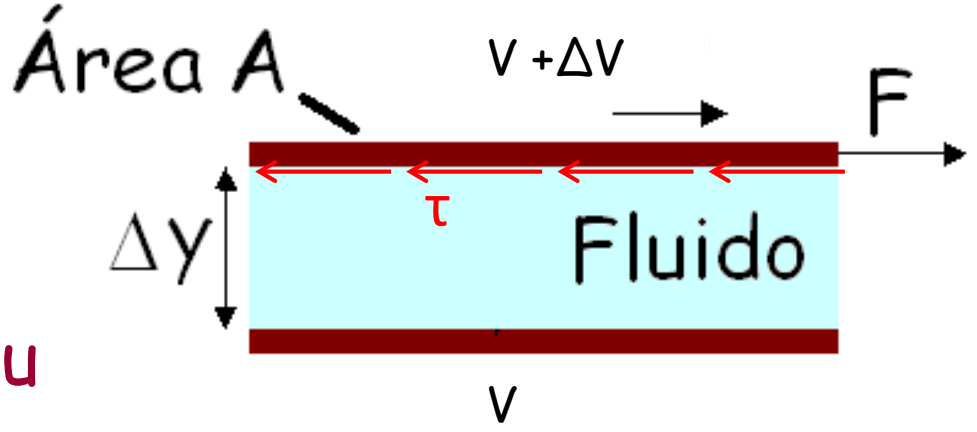
viscosidade [N.s/m2] ou [Pa/s];

4. Viscosidade absoluta (cont.) experimento de Newton

Fluidos newtonianos → tensão de cisalhamento diretamente proporcional à taxa de cisalhamento

$$\tau = \mu \frac{\Delta V}{\Delta y}$$

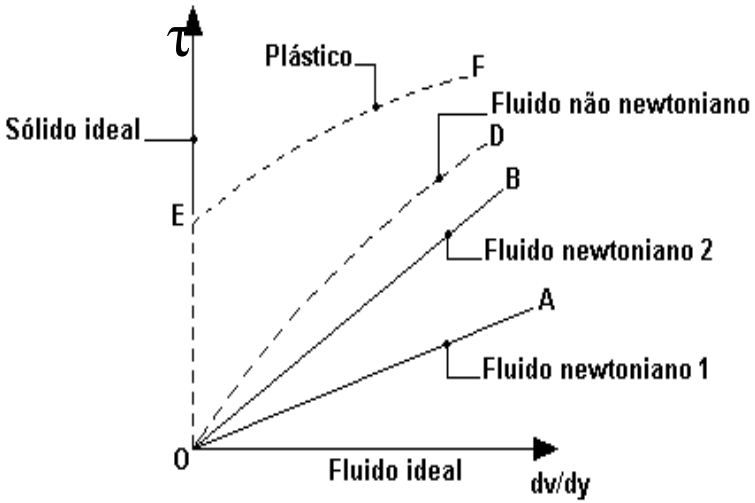
Viscosidade absoluta ou dinâmica



Dimensão: $[\mu] = \frac{FT}{L^2}$

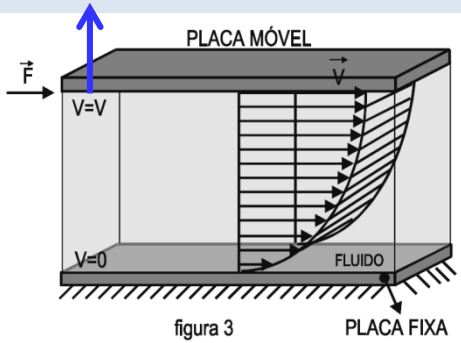
Unidade no SI: $\frac{N.s}{m^2}$

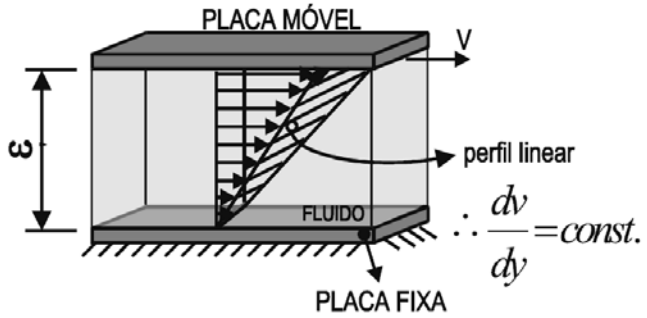
4. Viscosidade absoluta (cont.) experimento de Newton



Um fluido ideal não tem viscosidade: escoa sem que seja necessário submetê-lo a uma tensão de cisalhamento

Princípio da Aderência:"Os pontos de um fluido em contato com uma superfície sólidapossuem a mesma velocidade dos pontos desta com os quais estão em contato; não há deslizamento naquelas fronteiras"





Em casos reais, como nos mancais de máquinas, motores, a distância entre as placas é bem pequena, da ordem de décimos de milímetros ou até menos. Nesses casos, admite-se um perfil linear de velocidades, tornando assim muito fácil a análise.

5.Viscosidade cinemática

Viscosidade cinemática

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Dimensão: $[\nu] = \frac{L^2}{T}$

Unidade no SI: $\frac{m^2}{s}$

Para a água:

$0^oC \rightarrow 1{,}79 \cdot 10^{-6}\ m^2/s$

$20^oC \rightarrow 1{,}01 \cdot 10^{-6}\ m^2/s$

$35^oC \rightarrow 0{,}73 \cdot 10^{-6} m^2/s$

6. Resumo das propriedades físicas da água
SI de unidades

Temperatura	Massa Específica	Peso Específico	Pressão de Vapor	Módulo de Elasticidade Volumétrico	Viscosidade Dinâmica	Viscosidade Cinemática
T °C	ρ kg/m^3	γ N/m^3	P_v^{abs} Pa	K 10^7 Pa	μ 10^{-3} kg/m.s	ν 10^{-6}m^2/s
0	999,9	9805	611	204	1,79	1,79
5	1000,0	9806	873	206	1,52	1,52
10	999,7	9803	1266	211	1,31	1,31
15	999,1	9798	1707	214	1,14	1,14
20	998,2	9789	2335	220	1,01	1,01
25	997,1	9779	3169	222	0,89	0,90
30	995,7	9767	4238	223	0,80	0,80
35	994,1	9752	5621	224	0,72	0,73
40	992,2	9737	7377	227	0,66	0,66
45	990,2	9720	9584	229	0,60	0,61
50	988,1	9697	12331	230	0,55	0,56
55	985,7	9679	15745	231	0,51	0,51
60	983,2	9658	19924	228	0,47	0,48
65	980,6	9635	25015	226	0,44	0,44
70	977,8	9600	31166	225	0,41	0,42
75	974,9	9589	38563	223	0,38	0,39
80	971,8	9557	47372	221	0,36	0,37
85	968,6	9529	57820	217	0,34	0,35
90	965,3	9499	70132	216	0,32	0,33
95	961,9	9469	84552	211	0,30	0,31
100	958,4	9438	101357	207	0,28	0,30

6. Resumo das propriedades físicas da água (cont.)
ST de unidades

Temperatura	Massa Específica	Peso Específico	Pressão de Vapor	Módulo de Elasticidade Volumétrico	Viscosidade Dinâmica	Viscosidade Cinemática
T °C	ρ kgf.s²/m⁴	γ kgf/m³	P_v^{abs} kgf/m²	K 10^8 kgf/m²	μ 10^{-4} kgf.s/m²	ν 10^{-6}m²/s
0	101,9	999,9	62	2,08	1,83	1,79
5	101,9	1000,0	89	2,10	1,55	1,52
10	101,9	999,7	129	2,15	1,33	1,31
15	101,8	999,1	174	2,18	1,16	1,14
20	101,8	998,2	238	2,24	1,03	1,01
25	101,6	997,1	323	2,26	0,91	0,90
30	101,5	995,7	432	2,27	0,82	0,80
35	101,3	994,1	573	2,28	0,74	0,73
40	101,1	992,2	752	2,31	0,67	0,66
45	100,9	990,2	977	2,33	0,61	0,61
50	100,7	988,1	1257	2,34	0,56	0,56
55	100,5	985,7	1605	2,35	0,52	0,51
60	100,2	983,2	2031	2,32	0,48	0,48
65	100,0	980,6	2550	2,30	0,44	0,44
70	99,7	977,8	3177	2,29	0,42	0,42
75	99,4	974,9	3931	2,27	0,39	0,39
80	99,1	971,8	4829	2,27	0,36	0,37
85	98,7	968,6	5894	2,21	0,34	0,35
90	98,4	965,3	7149	2,20	0,32	0,33
95	98,1	961,9	8619	2,15	0,31	0,31
100	97,7	958,4	10332	2,11	0,29	0,30

Para a transformação Kgf → N multiplica-se por 9,81

7. Pressão

- relação entre a força (componente normal) e a área sobre a qual atua.

$$p = \frac{Força}{Área}$$

Dimensões: $[p] = \frac{M}{L^2 T^2}$ ou $[p] = \frac{F}{L^3}$

Unidades no SI: $\frac{N}{m^2}$

$[p] = \frac{kgf}{m^2}$ $[p] = \frac{kgf}{cm^2}$

7.1 Pressão – leis básicas

- LEI DE PASCAL
- Segundo Pascal “em qualquer ponto no interior de um líquido em repouso, a pressão é a mesma em todas as direções”.

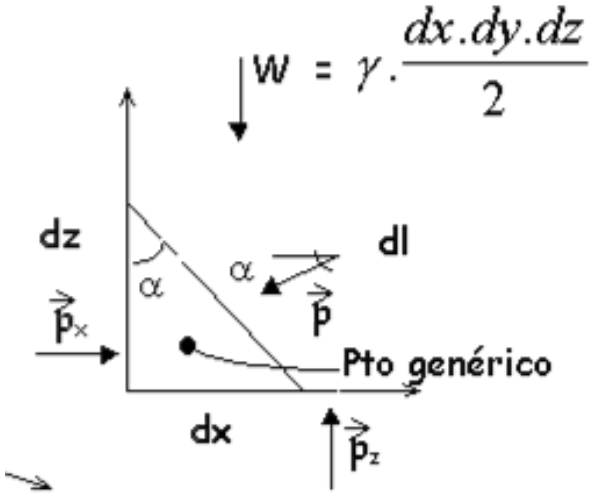
- LEI DE STEVIN
- Segundo Stevin “a diferença de pressão entre dois pontos de uma mesma massa líquida é igual à diferença de profundidade entre eles multiplicada pelo peso específico da fluído”.

Lei de Pascal

O físico e matemático francês, ***Blaise Pascal*** (1623-1662) descobriu que, se aplicarmos uma pressão em um ponto qualquer de um líquido em equilíbrio (repouso), essa pressão é a mesma em todas as direções desse ponto.

Quando o líquido está em repouso, a somatória das forças que agem sobre ele é nula.

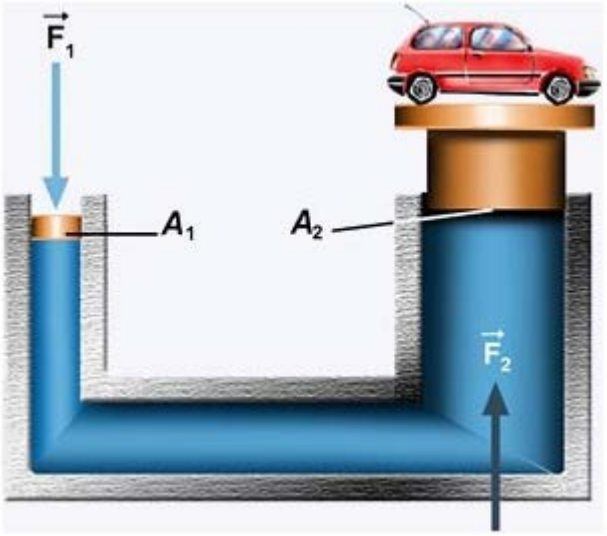
$$\therefore P_x = P_z = P$$



Lei de Pascal

Essa propriedade dos líquidos, expressa pela lei de Pascal, é utilizada em diversos dispositivos, tanto para amplificar **forças como para transmiti-las de um ponto a outro**.

Um exemplo disso é a prensa hidráulica e os freios hidráulicos dos automóveis.



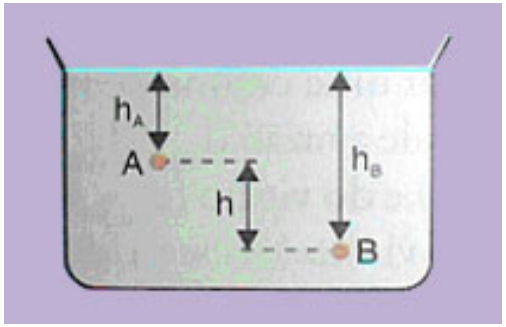
$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

Lei de Stevin

(ou Princípio Fundamental da Hidrostática)

Simon Stevin (1548-1620) foi um físico e matemático belga que concentrou suas pesquisas nos campos da estática e da hidrostática. Entre outras coisas, ele demonstrou, experimentalmente, que a **pressão exercida por um fluido depende exclusivamente da sua altura**.

A pressão hidrostática é diretamente proporcional ao peso específico do líquido e a sua profundidade.



$$\left.\begin{aligned} P_A &= \rho \cdot g \cdot h_A \\ P_B &= \rho \cdot g \cdot h_B \end{aligned}\right\} \quad P_B = P_A + \rho \cdot g \cdot h$$

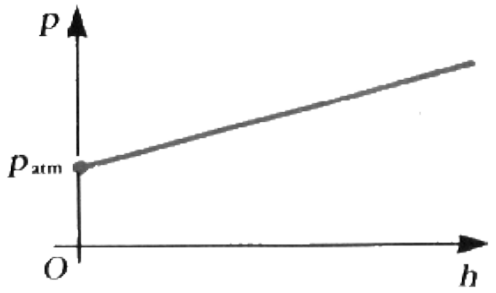
Lei de Stevin

(ou Princípio Fundamental da Hidrostática)

A partir Da Lei de Stevin podemos concluir :

• A pressão aumenta com a profundidade. Para pontos situados na superfície livre, a pressão correspondente é igual à exercida pelo gás ou ar sobre ela. Se a superfície livre estiver ao ar atmosférico, a pressão correspondente será a pressão atmosférica, p_{atm} .

• Na figura abaixo tem-se o gráfico da pressão *P* em função da profundidade *h*.



• Pontos situados em um mesmo líquido e em uma mesma horizontal ficam submetidos à mesma pressão.

7.2 Metro de coluna d´água

- **P**ressão equivalente a um metro de coluna d´água sobre a área considerada.

- Pressão hidrostática: $p = \gamma \cdot h$

- Exemplo: $se\ a\ 5^{o}C\ \ p = 1\frac{kgf}{cm^2} = 10^4\ \frac{kgf}{m^2}$

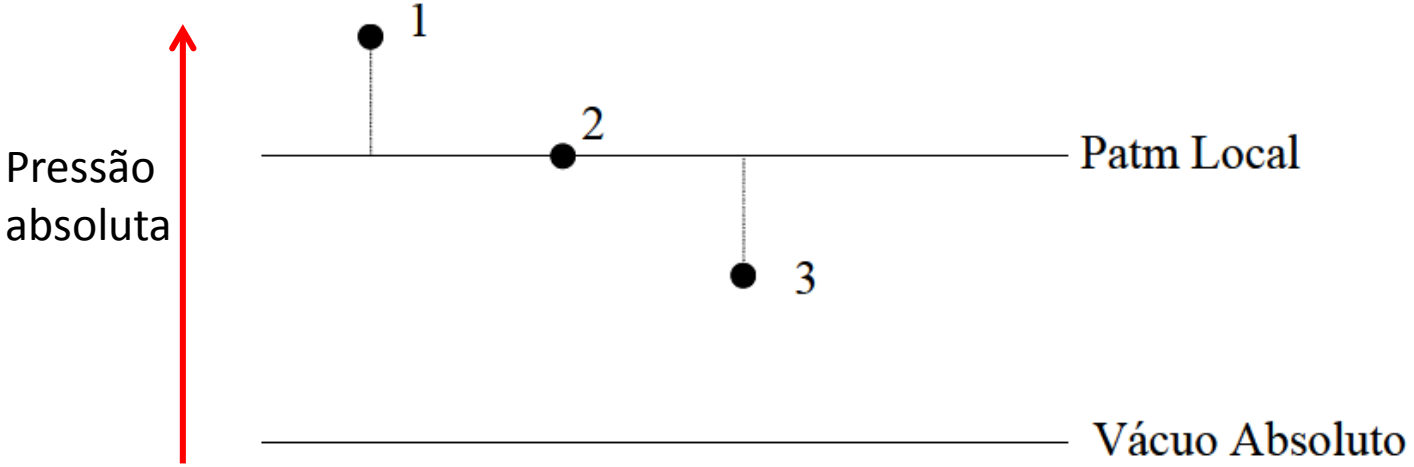
$$e\ \ p = \gamma \cdot h = 10^3\ \frac{kgf}{m^3} \cdot h$$

$$\therefore \mathrm{h} = 10\ \mathrm{m.c.a.} = 1\frac{\mathrm{kgf}}{\mathrm{cm}^2} = 9{,}81 \cdot 10^4\ \frac{N}{m^2} = 98{,}10kPa$$

7.3 Escalas de pressão

- Pressão absoluta = Pressão relativa + Pressão atmosférica

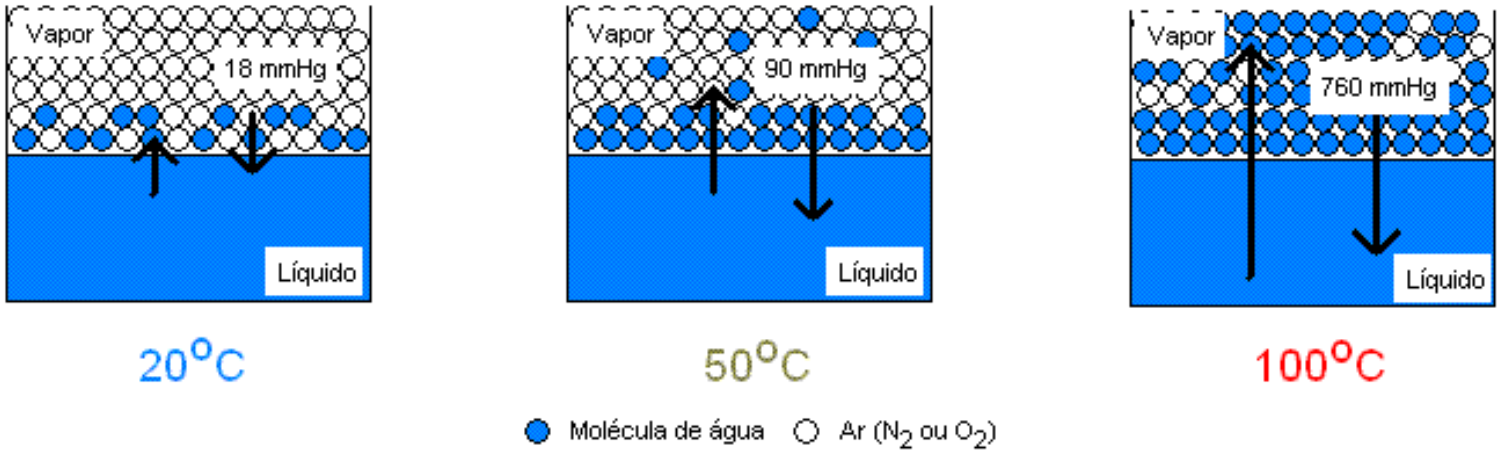
- Para expressar a pressão de um fluído podemos utilizar duas escalas:
- - Pressão manométrica: pressão em relação à pressão atmosférica
- - Pressão absoluta: pressão em relação ao vácuo absoluto



Ponto 1: Pressão manométrica positiva
Ponto 2: Pressão manométrica nula
Ponto 3: Pressão manométrica negativa

7.4 Pressão de vapor

exercida por um vapor em equilíbrio com o líquido que lhe deu origem



Temperatura	Massa Específica	Peso Específico	Pressão de Vapor	Módulo de Elasticidade Volumétrico	Viscosidade Dinâmica	Viscosidade Cinemática
T °C	ρ kg/m³	γ N/m³	P_v^{abs} Pa	K 10^7 Pa	μ 10^{-3} kg/m.s	ν 10^{-6}m²/s
0	999,9	9805	611	204	1,79	1,79
5	1000,0	9806	873	206	1,52	1,52
10	999,7	9803	1266	211	1,31	1,31
15	999,1	9798	1707	214	1,14	1,14
20	998,2	9789	2335	220	1,01	1,01
25	997,1	9779	3169	222	0,89	0,90
30	995,7	9767	4238	223	0,80	0,80
35	994,1	9752	5621	224	0,72	0,73
40	992,2	9737	7377	227	0,66	0,66
45	990,2	9720	9584	229	0,60	0,61
50	988,1	9697	12331	230	0,55	0,56
55	985,7	9679	15745	231	0,51	0,51
60	983,2	9658	19924	228	0,47	0,48
65	980,6	9635	25015	226	0,44	0,44
70	977,8	9600	31166	225	0,41	0,42
75	974,9	9589	38563	223	0,38	0,39
80	971,8	9557	47372	221	0,36	0,37
85	968,6	9529	57820	217	0,34	0,35
90	965,3	9499	70132	216	0,32	0,33
95	961,9	9469	84552	211	0,30	0,31
100	958,4	9438	101357	207	0,28	0,30

PRESSÃO DE VAPOR (P_v)

Quando a pressão de um líquido cai abaixo da *pressão de vapor* (P_v), resulta em uma vaporização desse líquido.

As bolhas de vapor, chamadas de bolhas de cavitação (pois formam cavidades nos líquidos) quebram-se à medida que são afastadas das regiões de baixa pressão, criando ondas de choque, que são destrutivas. Esse fenômeno é conhecido por CAVITAÇÃO e será abordado, posteriormente, com mais detalhes.

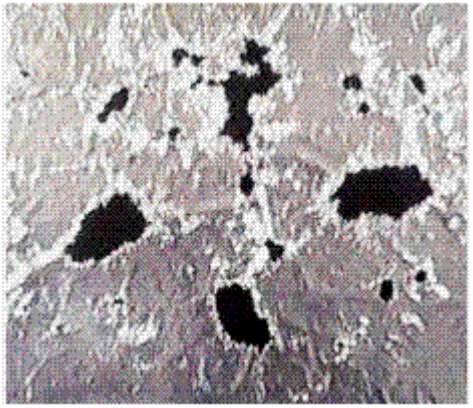


Figura: avaria por cavitação em uma amostra de aluminio.

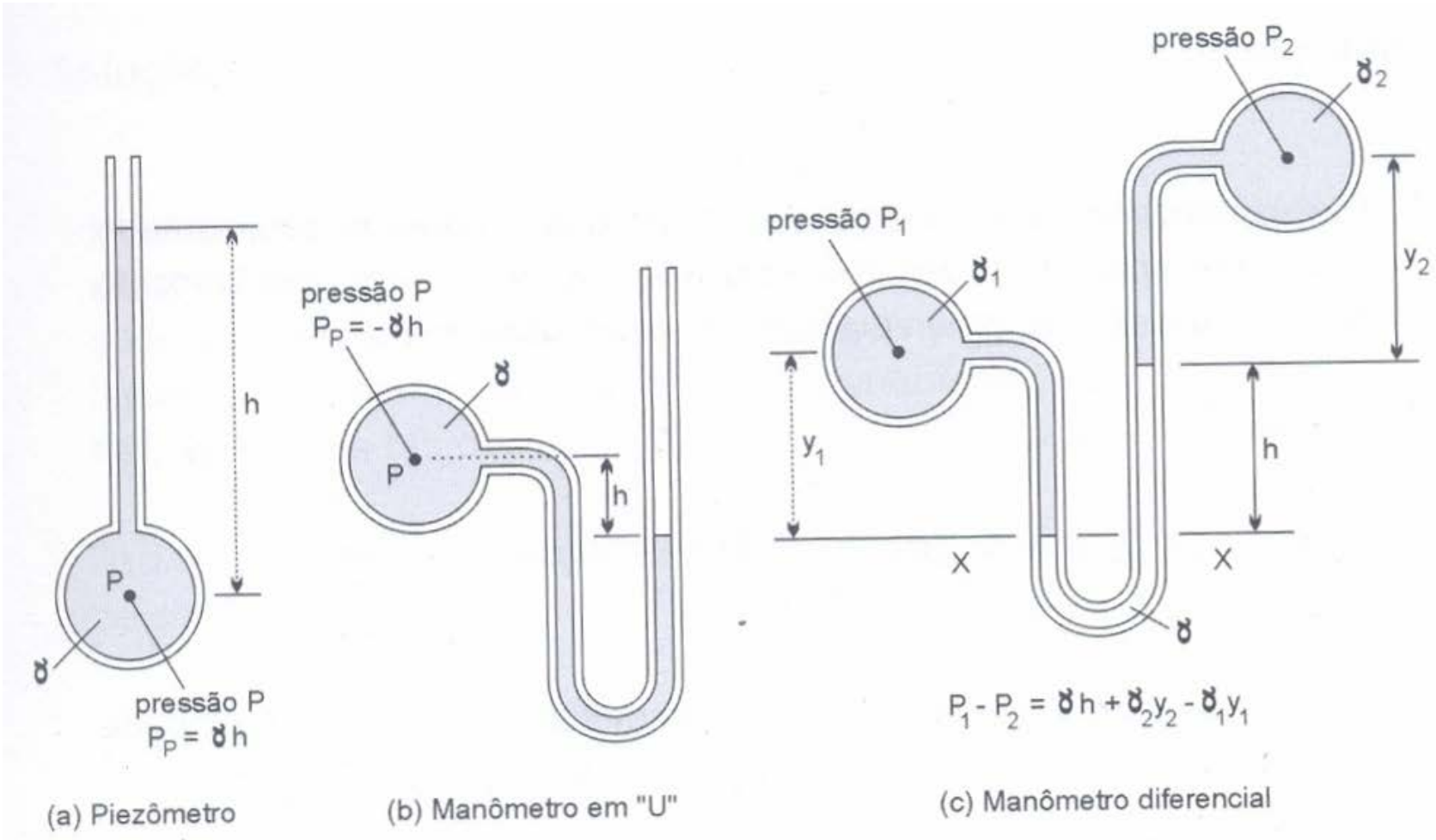
Figura: avarias no rotor de uma bomba centrífuga provocadas por cavitação.

7.5 Medidas de pressão

Manometria

Método de medição de pressões a partir de deslocamentos produzidos numa coluna contendo um ou mais fluidos

- piezômetro
- Manômetro em U
- Manômetro diferencial
- Manômetro inclinado,...



(a) Piezômetro

(b) Manômetro em "U"

(c) Manômetro diferencial

Piezômetro

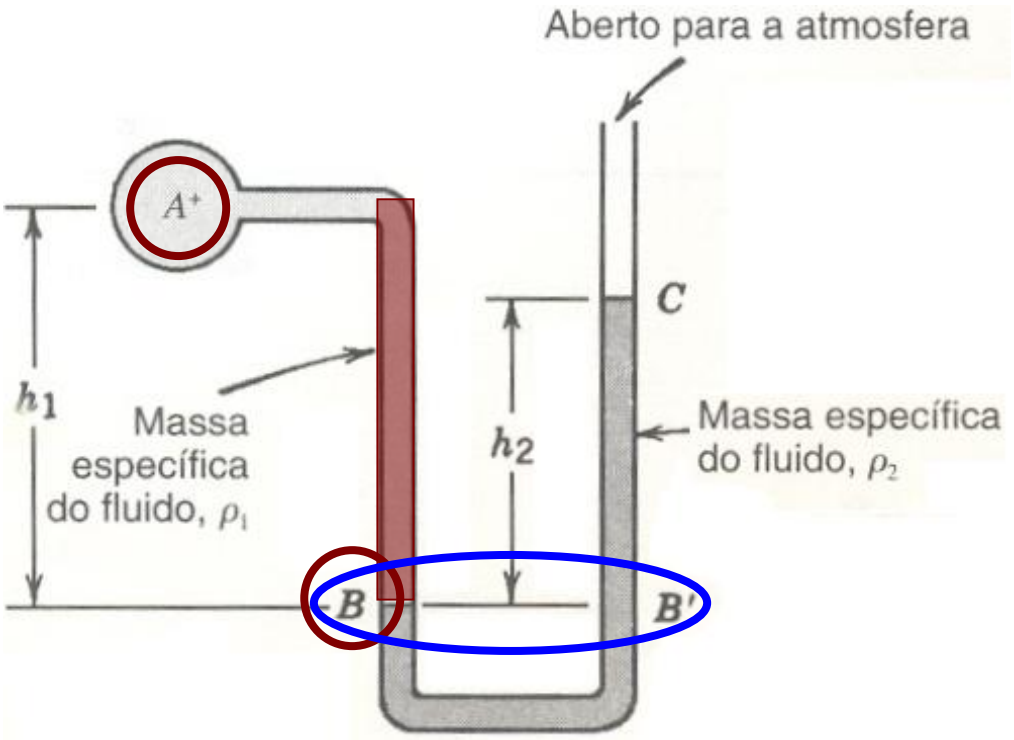
- é o mais simples dos manômetros
- consiste em um tubo transparente (plástico ou vidro) inserido no ponto onde se quer medir a pressão. A altura da água no tubo corresponde à pressão, e o líquido indicador é o próprio fluído da tubulação onde está sendo medida a pressão. Quando o fluído é a água só pode ser utilizado para medir pressões baixas (a limitação é a altura do piezômetro).

Tubo em U

- Serve para determinar pressões mais elevadas na água
- Neste manômetro utiliza-se um líquido de grande massa específica, normalmente mercúrio, que deve ser imiscível com o fluído da tubulação onde será medida a pressão. A pressão na tubulação provoca um deslocamento do fluído indicador. Esta diferença de altura é utilizada para a determinação da Pressão. Um lado do manômetro fica conectado no ponto onde se deseja medir a pressão e o outro lado fica em contato com a pressão atmosférica. Para calcular a pressão utilizando a carga hidráulica utiliza-se a expressão da Lei de Stevin:

Tubo em U (cont.)

Princípio: a pressão em B é a soma da pressão em A com a pressão da coluna h_1



A pressão em B' é a mesma que em B, pois estão no mesmo nível em um mesmo fluido

Tubo em U (cont.)

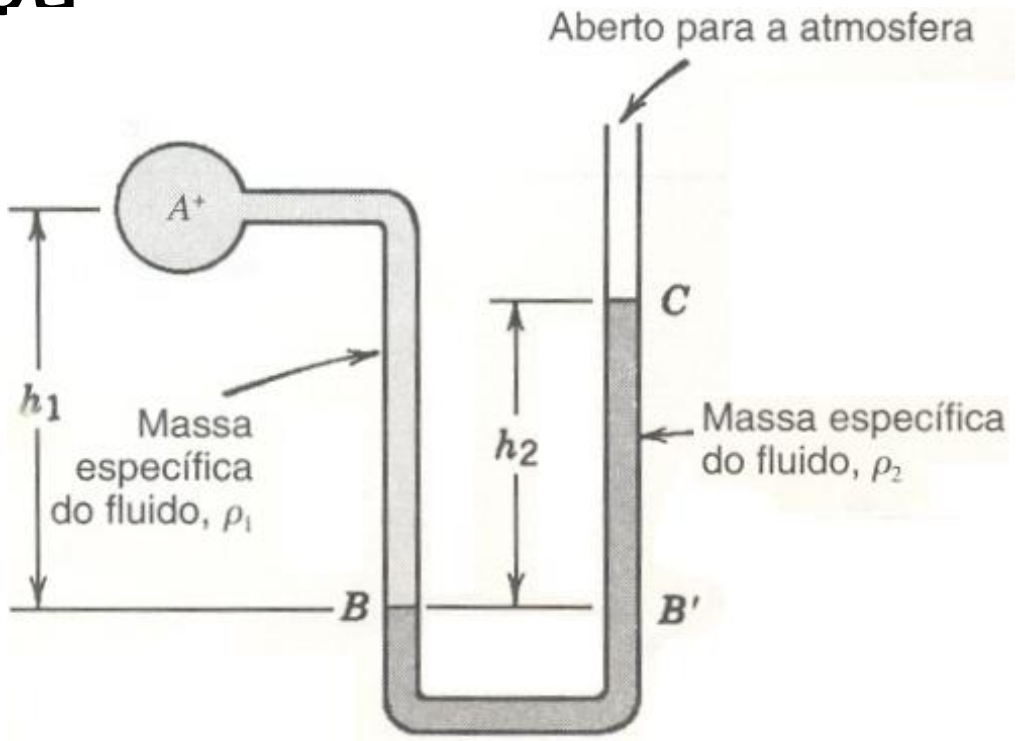
Cálculo da pressão em B

$p_B - p_A = \rho_1 g h_1$ ou

$p_B = \gamma_1 h_1 + p_A$

Por outro lado

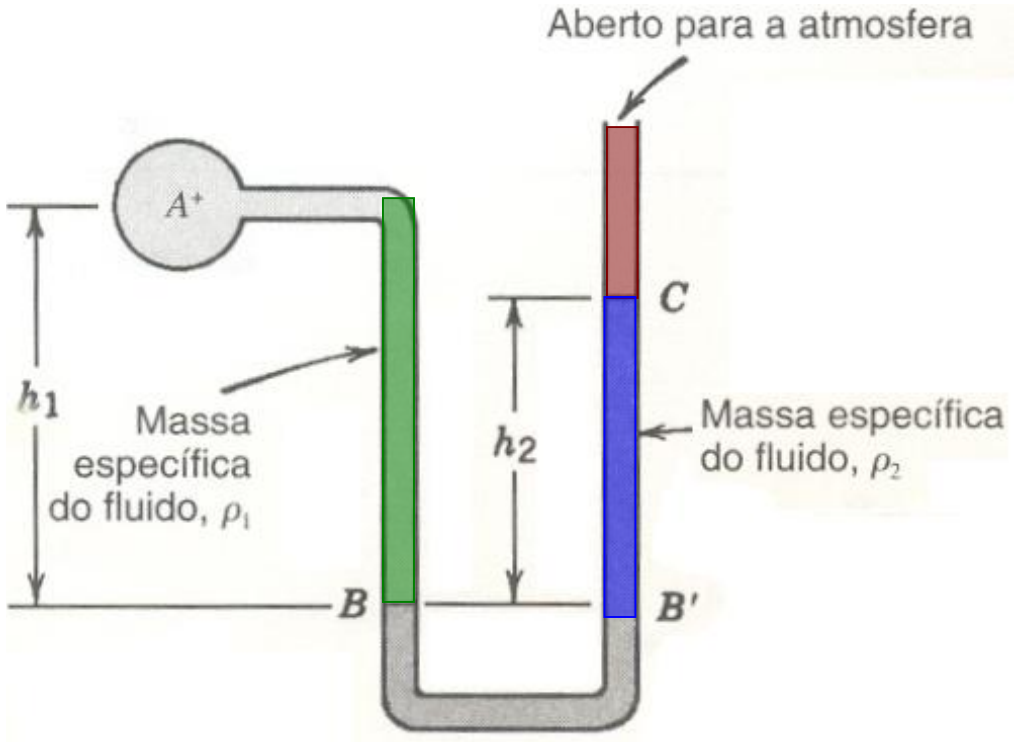
$p_B = \gamma_2 h_2 + p_c$



Tubo em U (cont.)

Isto resulta em

$$p_A = p_{atm} + \gamma_2 h_2 - \gamma_1 h_1$$



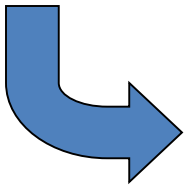
Se desprezarmos p_{atm}, calcularemos somente pressões manométricas

Tubo em U (cont.)

Surgem então as regras práticas

1) Quaisquer 2 ptos na mesma elevação, num trecho contínuo do mesmo líquido, estão à mesma pressão

2) A pressão aumenta à medida que se caminha líquido, para baixo

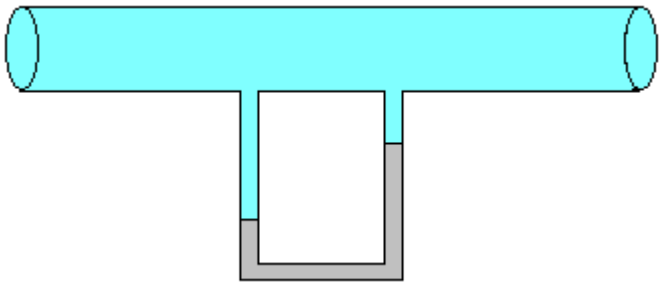


Lembrar da variação de pressão ao mergulhar numa piscina

Manômetro diferencial

- O manômetro do tipo Tubo em U, quando utilizado para medir a diferença de pressão entre dois pontos, passa a ser chamado de manômetro diferencial. Os dois lados do manômetro estão conectados com os pontos onde se deseja medir a diferença de pressão. Para calcular a pressão utilizando a carga hidráulica utiliza-se a expressão da Lei de Stevin:

- Quando o manômetro diferencial é utilizado para medir a diferença de pressão entre dois pontos que estão no mesmo nível:



- Classificação dos escoamentos

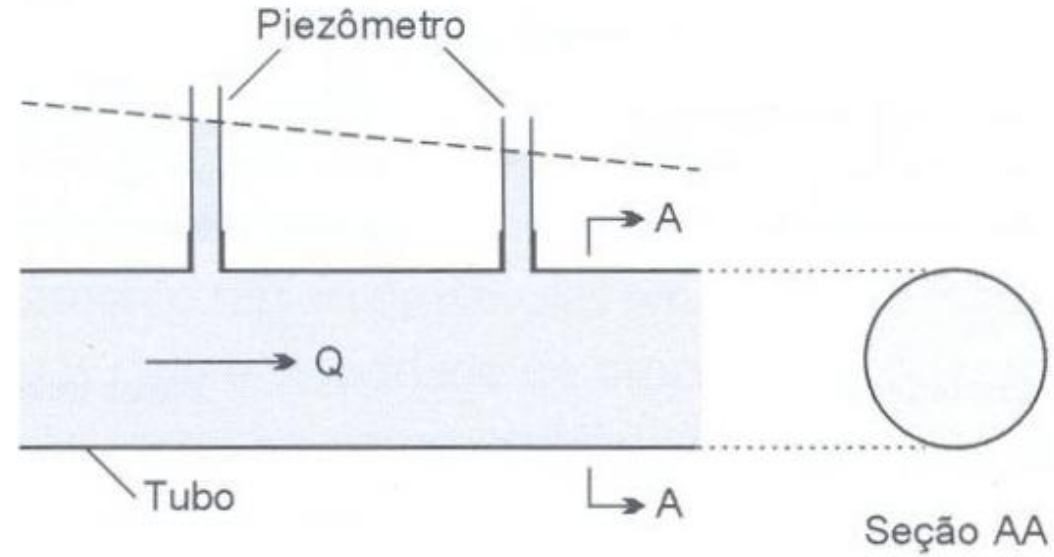
Tipos de escoamento critérios

- $\vec{v} = \vec{v}(R, t),$ função do espaço e do tempo

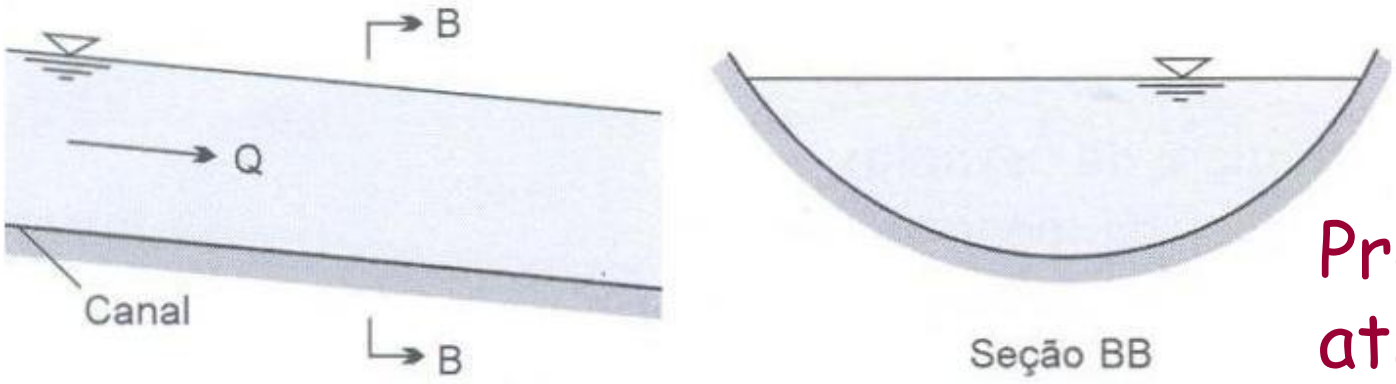
$$
\textit{critério}\begin{cases}
\textit{pressão a que está sujeito}\begin{cases}\textit{livre}\\ \textit{forçado}\end{cases} \leftarrow \\
\textit{tempo}\begin{cases}\textit{permanente}\\ \textit{não permanente}\end{cases} \\
\textit{espaço}\begin{cases}\textit{uniforme}\\ \textit{variado}\end{cases} \\
\textit{direção da trajetória das partítulas}\begin{cases}\textit{laminar}\\ \textit{transição}\end{cases}
\end{cases}
$$

Tipos de escoamento

Critério: pressão a que está sujeito: forçado ou livre



Pressão maior que a atmosférica

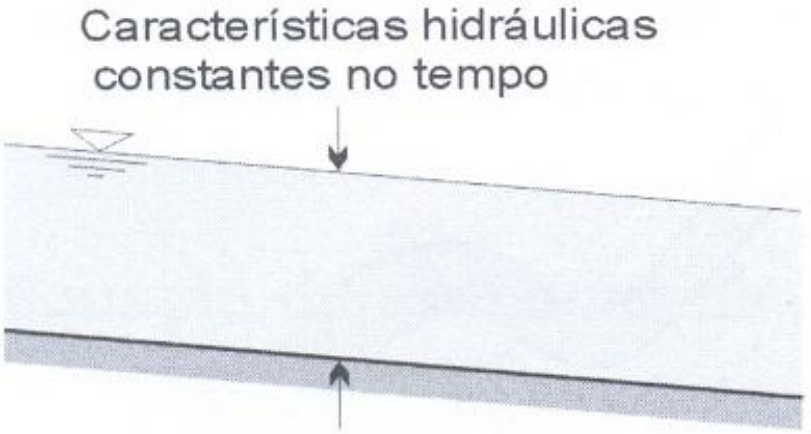


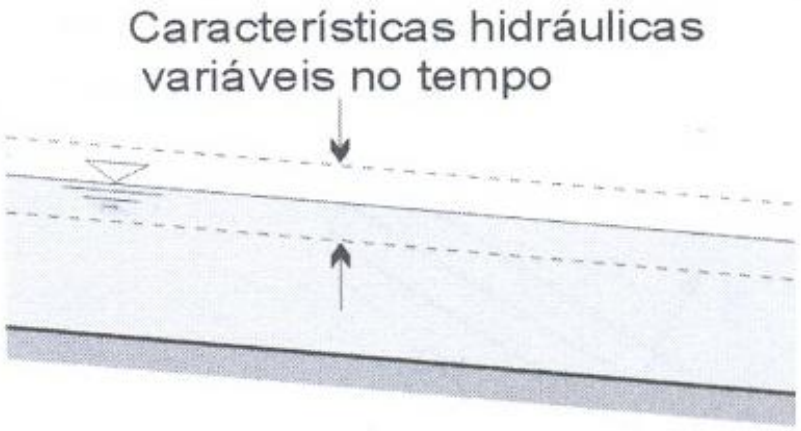
Pressão igual à atmosférica

Conduto livre

Tipos de escoamento (cont.)

Critério: tempo -permanentes ou não permanentes (transitórios)





Escoamentos permanentes: características hidráulicas podem variar de ponto para ponto, mas não no tempo em cada ponto

Escoamentos transitórios: características hidráulicas variam no tempo
mudança lenta: compressibilidade desprezada
e
mudança brusca: compressibilidade importante

Tipos de escoamento (cont.)

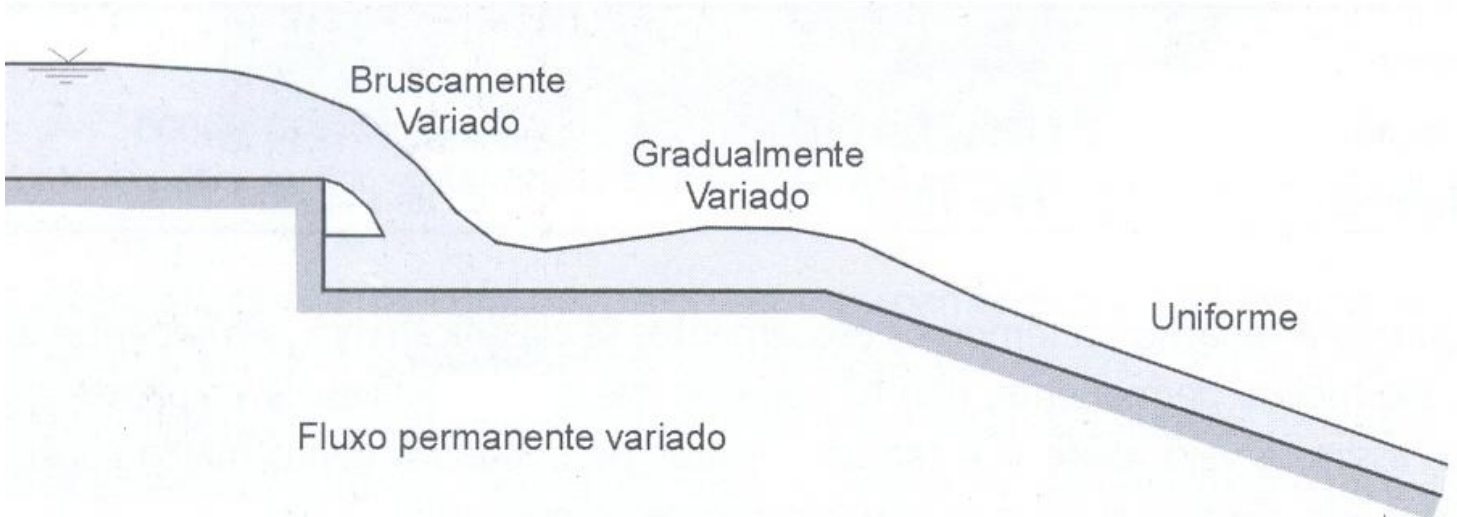
Critério: espaço - uniforme e variado

Uniforme: $\frac{\partial \vec{V}}{\partial s} = 0$

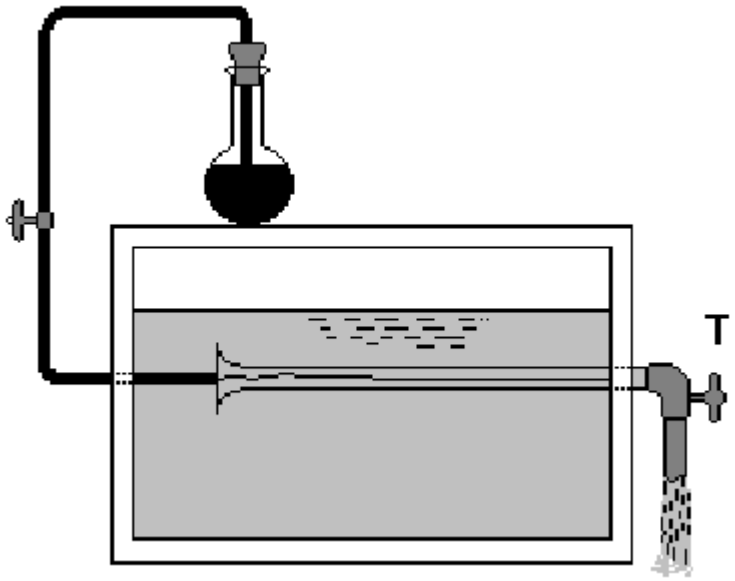
Constante em módulo, direção e sentido, em todos os pontos, em qualquer instante

espaço

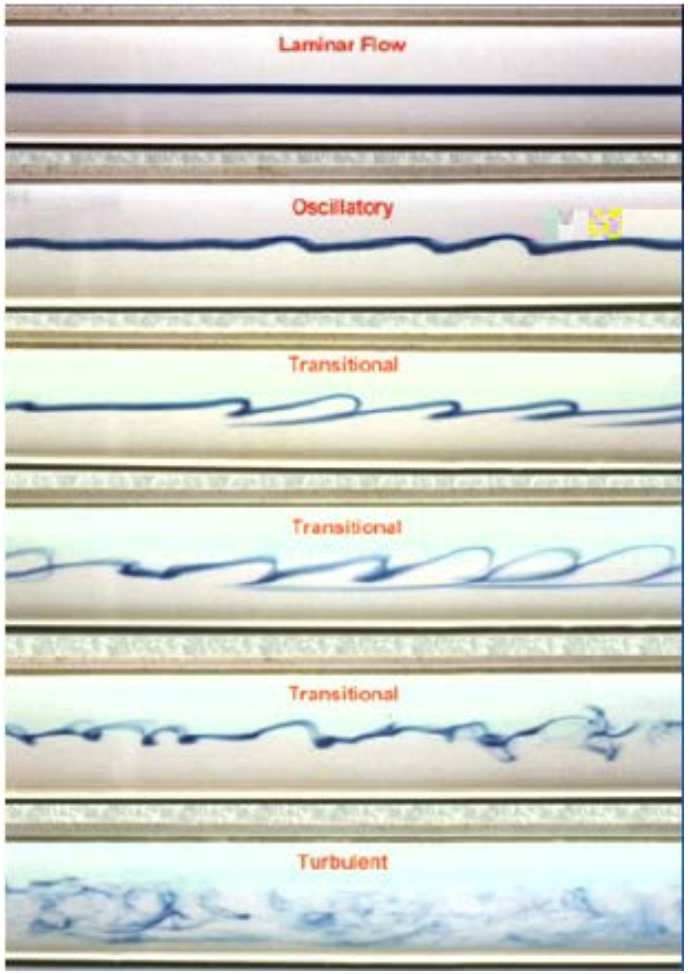
Exemplo: escoamento permanente, uniforme e variado



Tipos de escoamento (cont.)
Critério: direção na trajetória das partículas- laminar, de transição ou turbulento



Experimento de Reynolds



REGIME DE ESCOAMENTO

- Regime Laminar: a trajetória da partícula é bem definida
- Regime Turbulento: as partículas se deslocam desordenadamente
- Regime de Transição: instável

Tipos de escoamento (cont.)

Critério: direção na trajetória das partículas- laminar, de transição ou turbulento

U =v → Velocidade média

Quadro 2.5 – Regime de escoamento e o número de Reynolds

Regime	Condutos Livres $Re = U R_h / \nu$	Condutos Forçados $Re = U D / \nu$
Laminar	Re < 500	Re < 2000
Transição	500 < Re <1000	2000 < Re <4000
Turbulento	Re > 1000	Re > 4000

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\nu}$$ → Grandeza adimensional característica

- Equação da Continuidade

Maneiras de expressar a continuidade

- Vazão em volume: $Q = \int_A \vec{V} \cdot d\vec{A}$
- [Q]=m3/s; L/s;m3/h
- Vazão em massa: $G = \int_A \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$

[Q]=utm/s; kg/s;kg/h

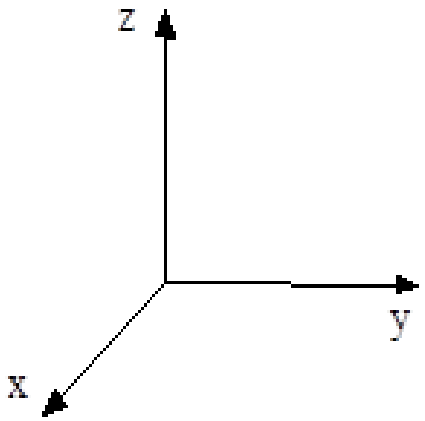
- Quantidade de movimento

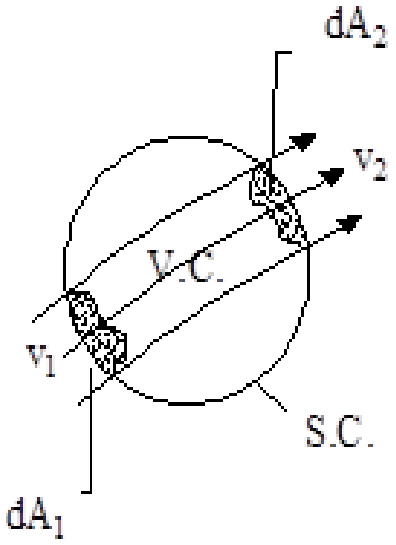
Equação da quantidade de movimento (escoamento permanente)

$$F_x = \int_{S.C} v_x (\rho.\vec{v}.d\vec{A})$$

$$F_y = \int_{S.C} v_y (\rho.\vec{v}.d\vec{A})$$

$$F_z = \int_{S.C} v_z (\rho.\vec{v}.d\vec{A})$$

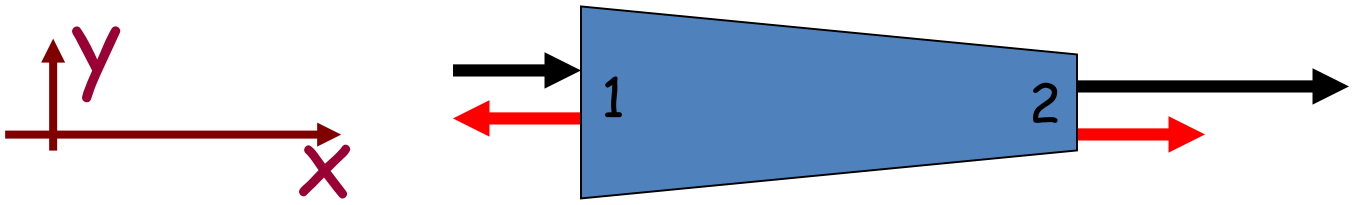




Equação da quantidade de movimento (cont.)

caso mais simples → Q constante

$$\vec{V}\cdot\vec{n} = V_1\vec{i}\cdot(-1)\vec{i} = -V_1$$

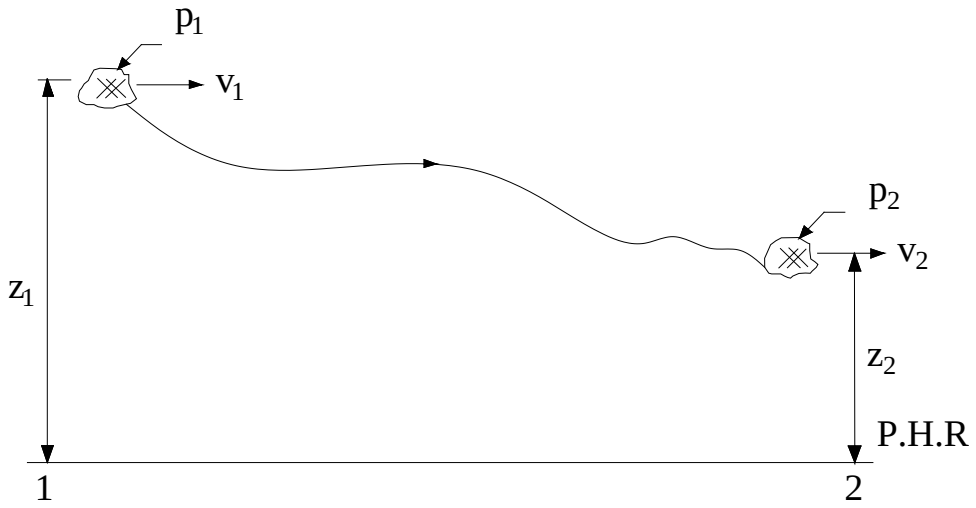


$$\vec{V}\cdot\vec{n} = V_2\vec{i}\cdot(+1)\vec{i} = V_2$$

$$F_x = \rho Q(V_2 - V_1)$$

Equação da Energia

Equação da energia: componentes



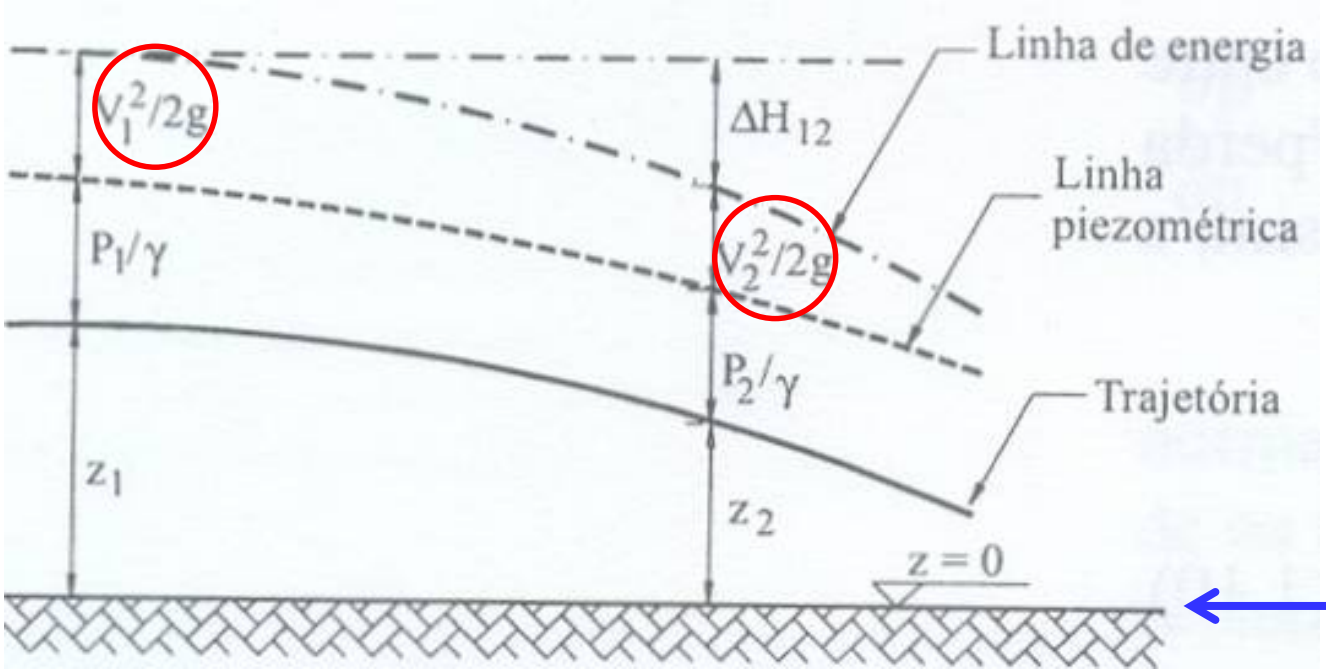
- Energia cinética: $E_c = \frac{1}{2} m.v^2$
- Energia potencial de posição: $E_z = m.g.Z$
- Energia potencial de pressão: $E_p = m.g.\frac{p}{\gamma}$
- Energia total: (por unidade de massa) $H = \frac{v^2}{2} + g.Z + \frac{p}{\rho} \left(\frac{m^2}{s^2} \right)$
- (por unidade de peso) $H = \frac{v^2}{2.g} + Z + \frac{p}{\gamma} \ (m)$

Bernoulli

fluidos perfeitos
$H_1 = H_2 = cte$

fluidos reais
$H_1 = H_2 + \Delta_{1-2}$

Conceito das linhas piezométrica e de energia



?

Plano horizontal de referência

linha piezométrica (LP): Lugar geométrico dos pontos de cota $p/\gamma+z$ (carga piezométrica)

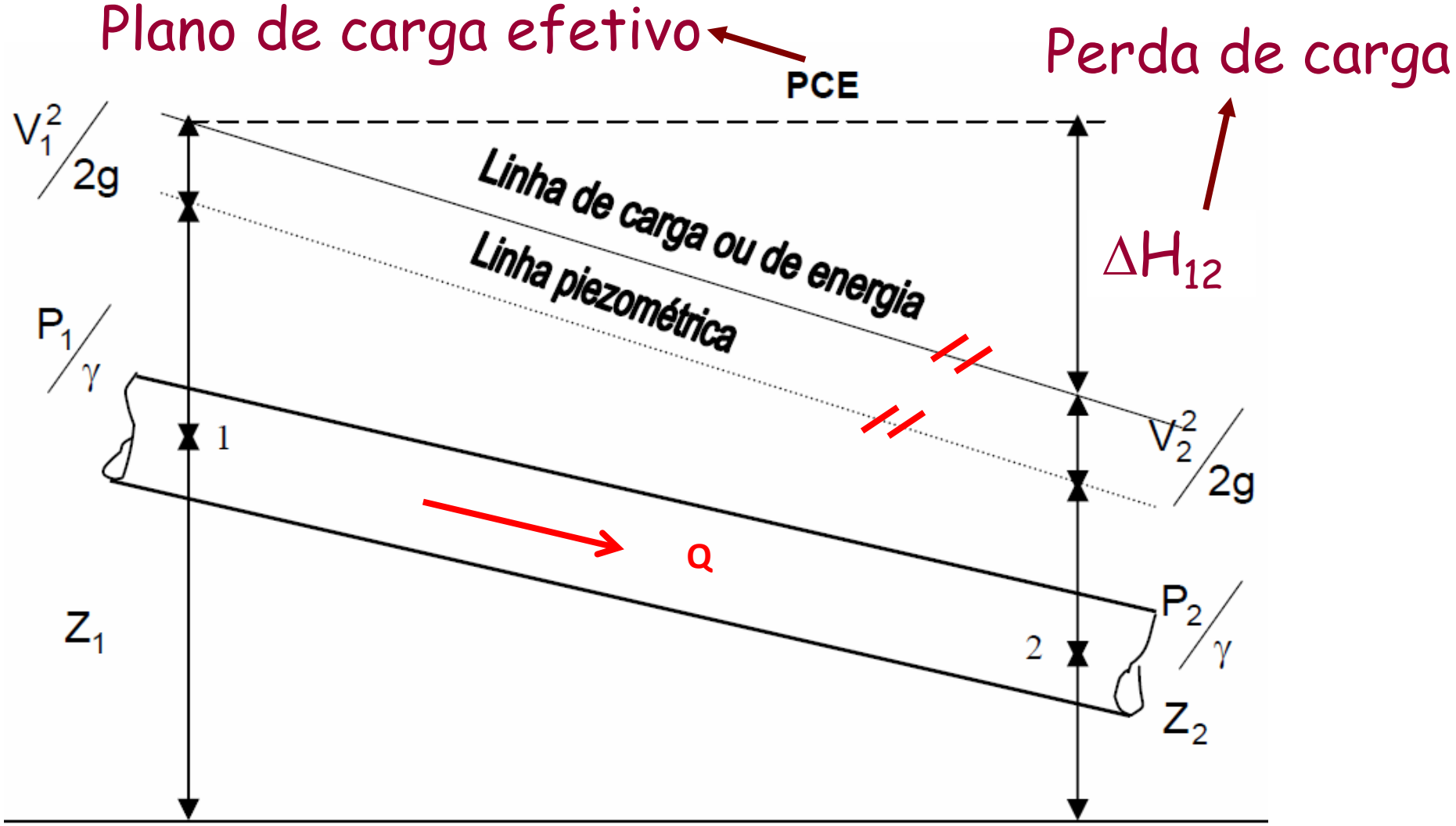
Acrescentando $V^2/2g$ acima a CP, obtém-se a linha de carga total ou linha de energia (LE)

Termo ΔH: perda de carga ou energia.

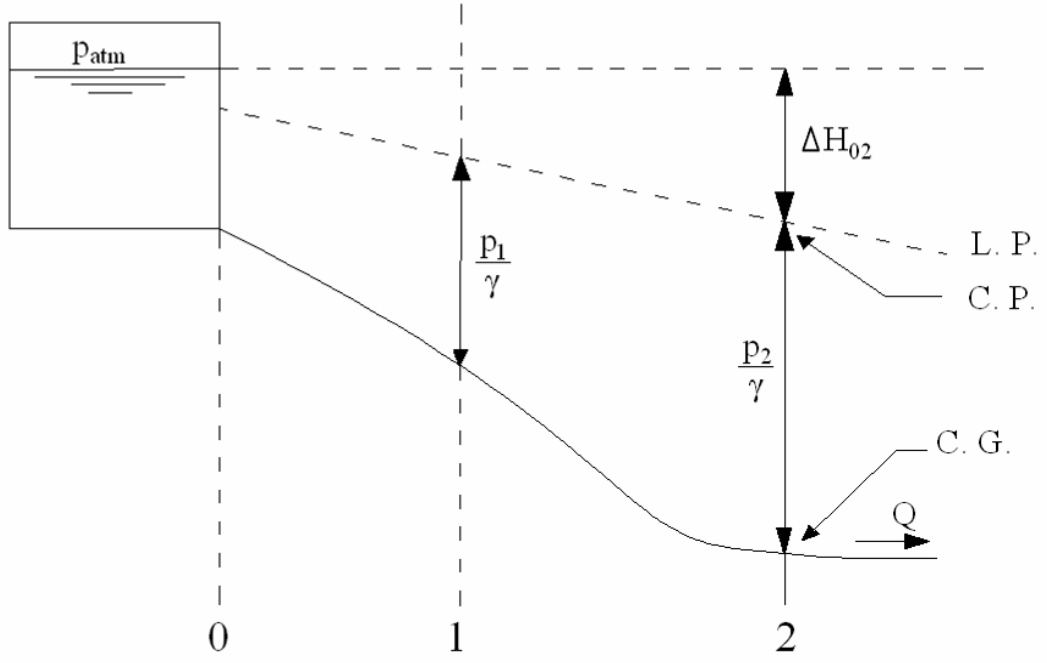
Líquidos reais → H decresce ao longo da trajetória, nos sentido do escoamento (trabalho realizado pelas forças resistentes)

Carga total H = carga piezométrica + carga cinética + perdas

Conceito das linhas piezométrica e de energia (cont.)



Conceito das linhas piezométrica e de energia (cont.)



Perda de carga unitária

$$J = \frac{\Delta H}{L_{total}}$$

$$[J] = \frac{m}{m}; \frac{m}{km}; \frac{m}{100m}$$

CG = cota geométrica

CP = cota piezométrica

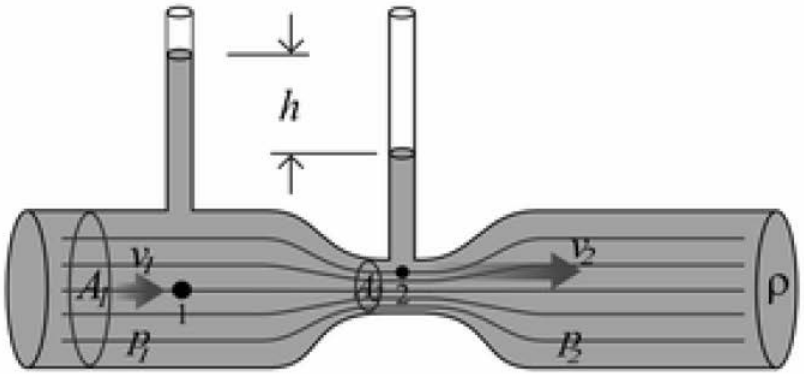
Pressão disponível: P/γ (m) = CP – CG; pode ser **positiva, negativa ou nula.**

De forma geral, a perda de carga entre as duas seções é igual à diferença entre as cotas da linha de energia.

Se Q=cte e D=cte, a perda de carga entre duas seções é igual à diferença de cotas piezométricas

Equação de Bernoulli - aplicação

<u>Tubo Venturi</u> (Venturímetro): Aparelho Medidor de Vazão.



$$V_1 = \sqrt{\frac{2g\frac{P_1 - P_2}{\gamma}}{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 1}}$$

$$Q = K \cdot A_1 \sqrt{2g\frac{P_1 - P_2}{\gamma}}$$

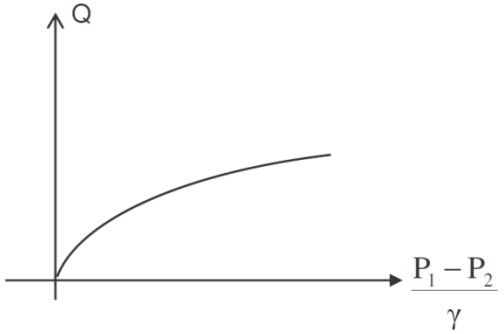
$$K = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 1}}$$

Princípio:

Equação de Bernoulli **(1) – (2)**

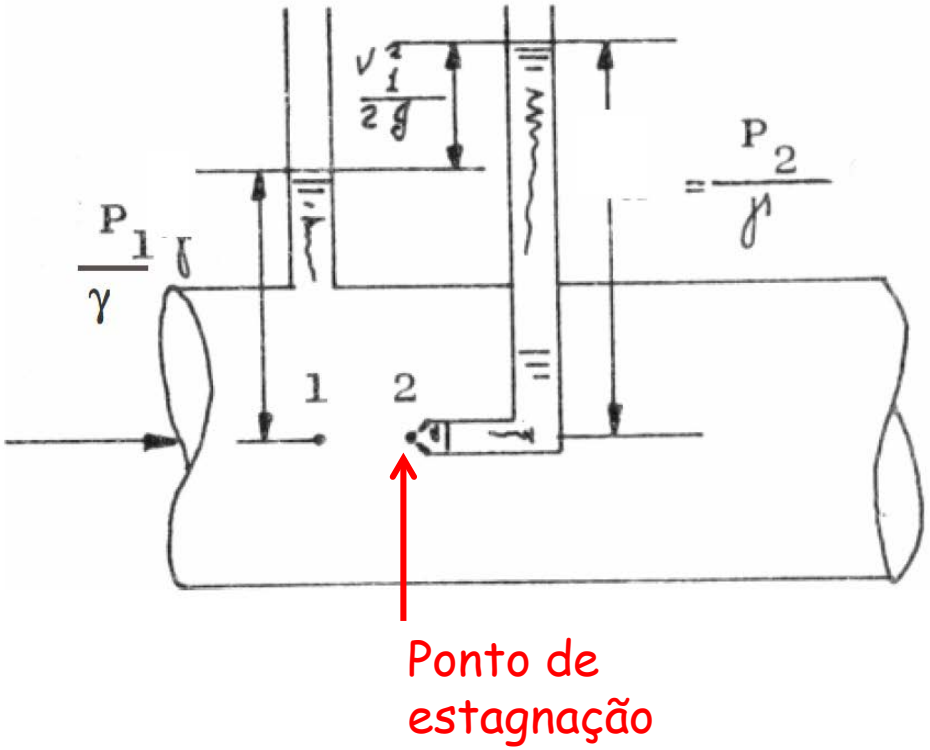
$$H_1 = H_2 + H_{P_{1,2}} \quad (H_{P_{1,2}} \approx 0)$$

<u>Curva de calibração</u>



Equação de Bernoulli – aplicação (cont.)

Tubo de Pitot: Aparelho de Medida de Velocidade



Equação de Bernoulli **(1) – (2):**

$H_1 = H_2$

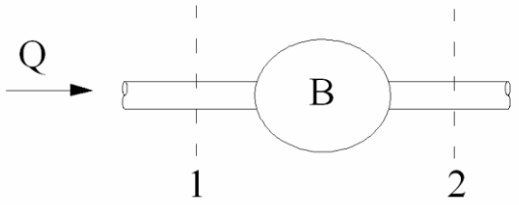
$$\cancel{Z_1} + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \cancel{Z_2} + \frac{P_2}{\gamma} + \cancel{\frac{V_2^2}{2g}}^{\,0}$$

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} \Rightarrow V_1 = \sqrt{2g \cdot \frac{P_2 - P_1}{\gamma}}$$

Potência fornecida por uma bomba

$$Pot = \frac{\gamma \cdot Q \cdot \Delta e}{75\eta}(CV)$$, em que η é o rendimento da bomba.

$$[Pot] = \frac{kgf}{m^3} \times \frac{m^3}{s} \times m = \frac{kgf \times m}{s} = \frac{kgm}{s}$$



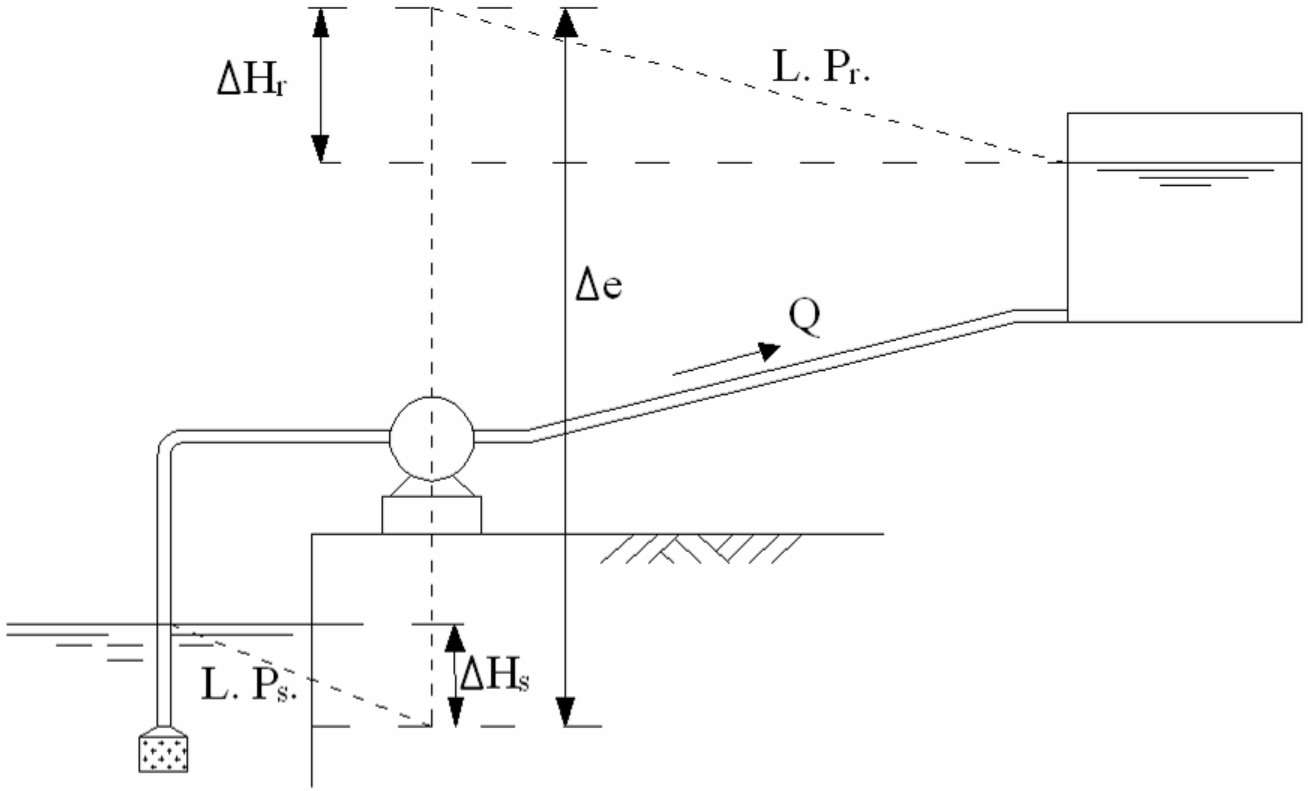
- **Equação da energia**

$E_1 + E_{bomba} = E_2$ ⇒ $E_{bomba} = E_2 - E_1$

$$e = \frac{E}{peso} = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z$$

E_{bomba} = Peso .($e_2 - e_1$) = Peso . Δe = Pot.Δt ⇒ $Pot = \frac{Peso}{\Delta t}\Delta e$

Linha piezométrica em uma instalação de bombeamento



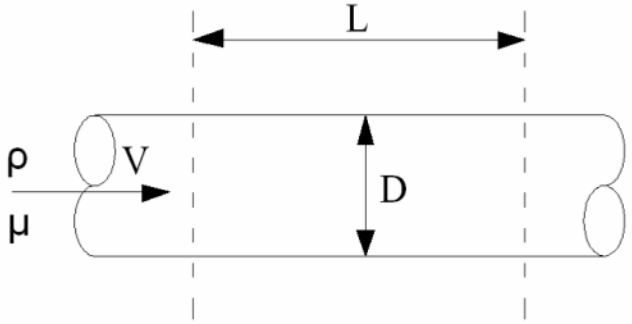
Equação universal de perda de carga (Equação de Darcy-Weisbach)

- Δp = função (D, V, μ, ρ, L, ε)
- Análise dimensional

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho.v^2} = F\left(\frac{L}{D}; \mathrm{Re}\, y; \frac{\varepsilon}{D}\right)$$

$$\Pi_2 = \mathrm{Eu} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho.v^2} \qquad \Pi_3 = \frac{L}{D} \qquad \Pi_4 = \frac{\varepsilon}{D}$$

$$\Pi_1 = \mathrm{Re}\, y = \frac{\rho.v.D}{\mu}$$



- adimensionais envolvidos no fenômeno.

Equação universal de perda de carga (Equação de Darcy-Weisbach)

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho.v^2} = F\left(\frac{L}{D}; Re\,y; \frac{\varepsilon}{D}\right) = \frac{L}{D}.F^*\left(Re\,y, \frac{\varepsilon}{D}\right)$$

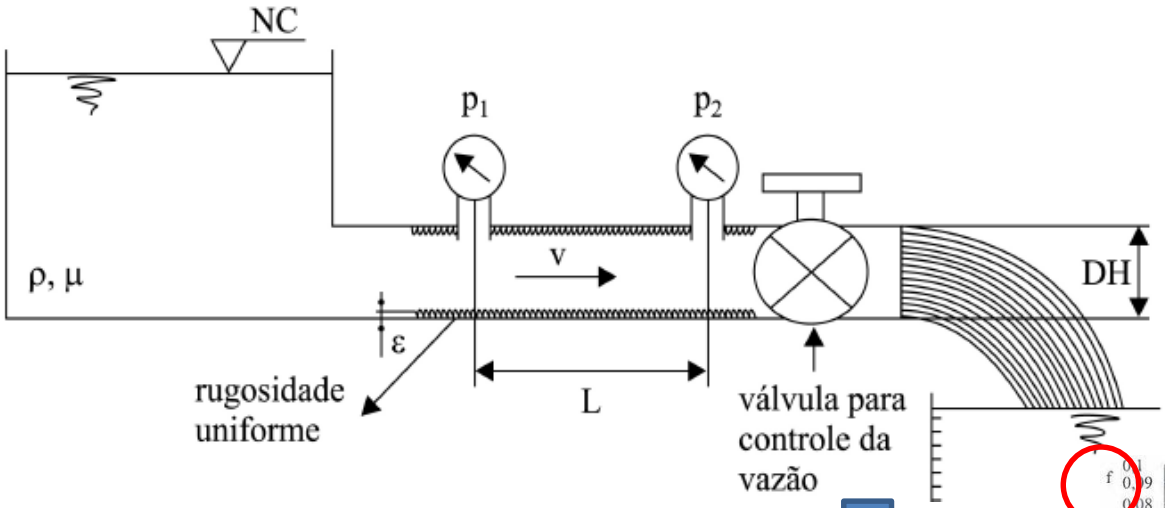
- Johann Nikuradse → $f = F^*\left(Re\,y; \frac{\varepsilon}{D}\right)$ = coef. de atrito ou fator de resistência.

$$\therefore \Delta p = \frac{1}{2}\rho v^2 \frac{L}{D} f \qquad \therefore \Delta H = \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{1}{2}\frac{\rho}{\gamma} v^2 \frac{L}{D} f$$

$$\boxed{\therefore \Delta H = \frac{\Delta p}{\gamma} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} (m)}$$

Experimento de Nikuradse

Ele utilizou tubos lisos cuja parede interna esteve revestida com grãos de areia esféricos



Harpa de Nikuradse

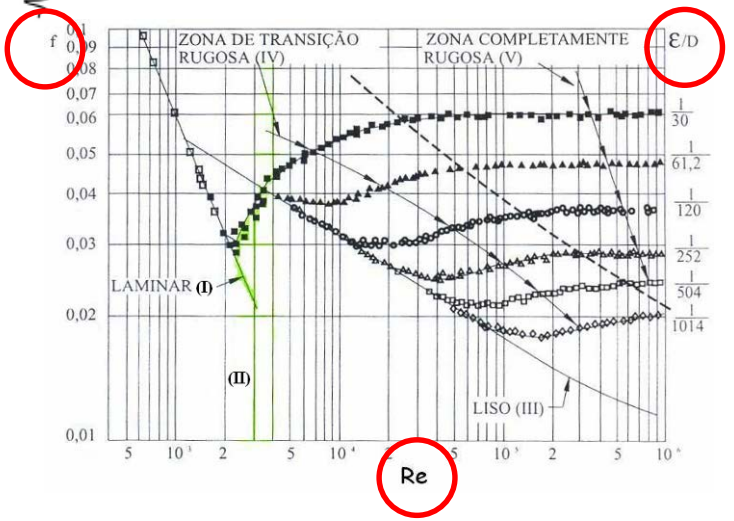


Diagrama de Moody-Stanton e suas regiões

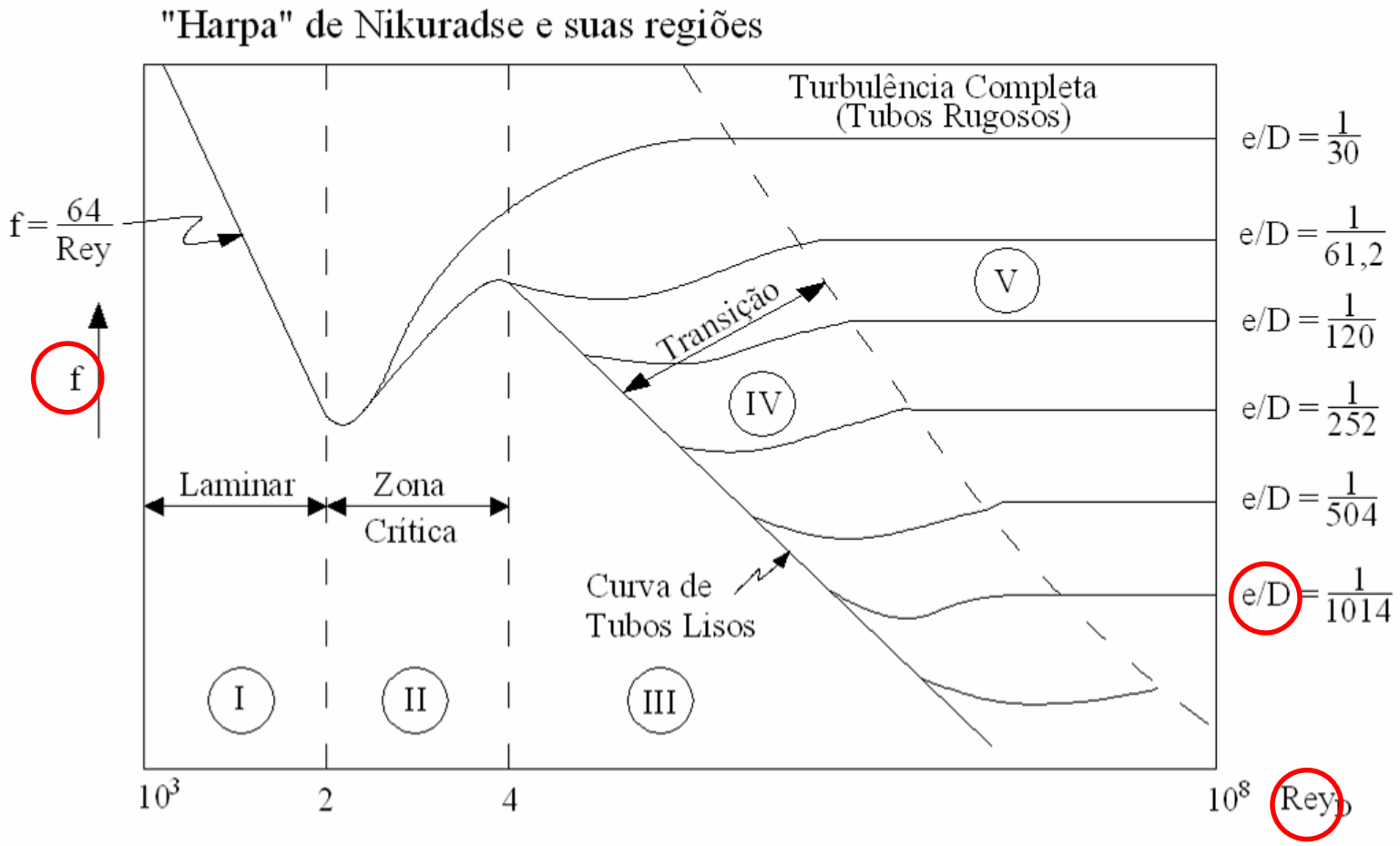


Diagrama de Moody-Stanton e suas regiões (cont.)

- Região I : Rey < 2000 → F independe da rugosidade, só depende de Rey → **f = 64/Rey.**

- Região II : 2000 < Rey < 4000 → região crítica, o valor de f não fica caracterizado.

- Região III : Influência de sub-camada limite laminar, f só depende de Rey. **Escoamento turbulento hidraulicamente liso.**

- Região IV : Transição entre o escoamento turbulento hidraulicamente liso e hidraulicamente rugoso, f depende de Rey e da rugosidade relativa, simultaneamente.

- Região V : Turbulência completa, **escoamento hidraulicamente rugoso**, f só depende da rugosidade e independe de Rey.

Verificação dos conceitos básicos

- 1.Uma pressão de 1,2 kgf/cm² corresponde a quantos metros de coluna d´água? E a quantos kgf/m² e a quantos N/m²?

- 2.A equação da energia (equação de Bernoulli) é a expressão de três formas de energia. Quais são elas?

- 3.Em um escoamento a pressão, em um conduto, a distância vertical entre as linhas de energia e piezométrica é igual a que?

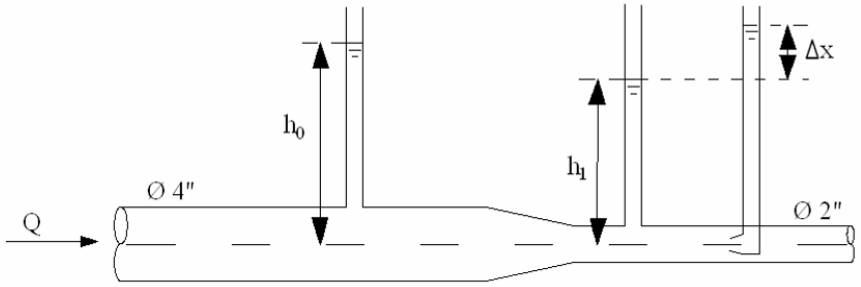
- 4.O escoamento em um conduto circular é tal que o número de Reynolds vale 10^6 e o escoamento é francamente turbulento (conduto hidraulicamente rugoso, turbulência completa). Se aumentarmos a vazão, o coeficiente de atrito f, aumenta, diminui ou permanece constante? Por quê?

- 5.O escoamento de água em uma tubulação cujo diâmetro cresce linearmente com o comprimento pode ser permanente? E uniforme?

Verificação dos conceitos básicos (cont.)

- 6.Para se determinar a perda de carga localizada em uma redução concêntrica de 4 polegadas para 2 polegadas foram instalados na canalização dois piezômetros e um tubo de Pitot, como na figura. Com os dados do esquema, mostre que essa perda de carga é dada por:

$$\Delta h = (h_0 - h_1) - \frac{15}{16}\Delta x$$



- Obrigada!