1ª e 2ª Lei Combinadas → Limite Trabalho

O trabalho de eixo passa a ser:

$$w_{shaft} = \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s\right)_{IN} - \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s\right)_{OUT} - T_0 S_{gen}$$

mas, como T_0Sgen ≥ 0, a 2ª lei estabelece um limite superior para o trabalho:

$$w_{shaft} \leq \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s\right)_{IN} - \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s\right)_{OUT}$$

Ou, se preferirmos podemos definir o trabalho reversível (Sgen = 0) como:

$$w_{rev} = \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s\right)_{IN} - \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} - T_0 s\right)_{OUT}$$

BERNOULLI: *UM CASO ESPECIAL*

$$\mathbf{0} = \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} \right)_{IN} - \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} \right)_{OUT}$$

Considere um processo:

- ***Reversível*** $\rightarrow s_{gen} = 0$
- ***Sem Transf. de Calor*** $\rightarrow s_{in} = s_{out}$
- ***Sem realização de trabalho*** $\rightarrow w_{shaft} = 0$

O que restou da Equação da Energia?

$$\left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} \right)_{IN} - \left(\frac{V_I^2}{2} + gz + u + \frac{P}{\rho} \right)_{OUT} = 0$$

A equação é válida para escoamentos incompressíveis ou compressíveis.

BERNOULLI:
Compressível x Incompressível

1. Um escoamento incompressível, ‘u’ constante
2. Um escoamento compressível, $u+Pv+V^2/2$ const.
3. Um fluido pode ter densidade variável (gás ideal) e ainda ter seu escoamento se comportando como incompressível.
4. O número de Mach indica se os efeitos de compressibilidade estão presentes ou não.

Vamos utilizar hipótese de escoamento incompressível para desenvolver Bernoulli, note porém que ele poderá ser empregado para gases.

EQUAÇÃO DE BERNOULLI

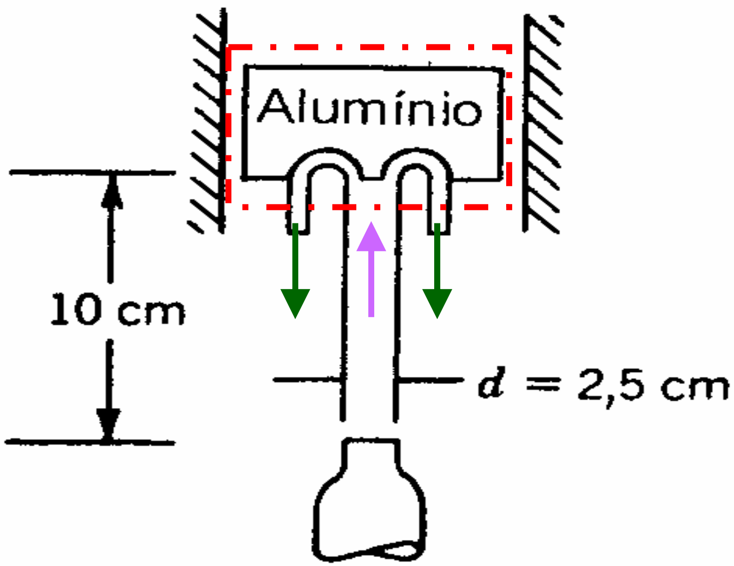
Primeira solução que relaciona campo de velocidade com campo de pressão.

$$\left(\frac{V_I^2}{2}+gz+\frac{P}{\rho}\right)_1=\left(\frac{V_I^2}{2}+gz+\frac{P}{\rho}\right)_2$$

- Ela estabelece a conservação da energia mecânica entre dois pontos do escoamento.

- Há uma conversão reversível entre os termos de energia potencial, de campo e de pressão

5-24 Um bloco de alumínio pesa 10 N e está contido em um canal circular, como mostrado na Fig. P5-24. Um jato de água o atinge na direção vertical a partir de um bocal de diâmetro de 2,5 cm. Qual deve ser a velocidade vertical do jato para manter o bloco a 10 cm do bocal? A temperatura da água é de 283 K.



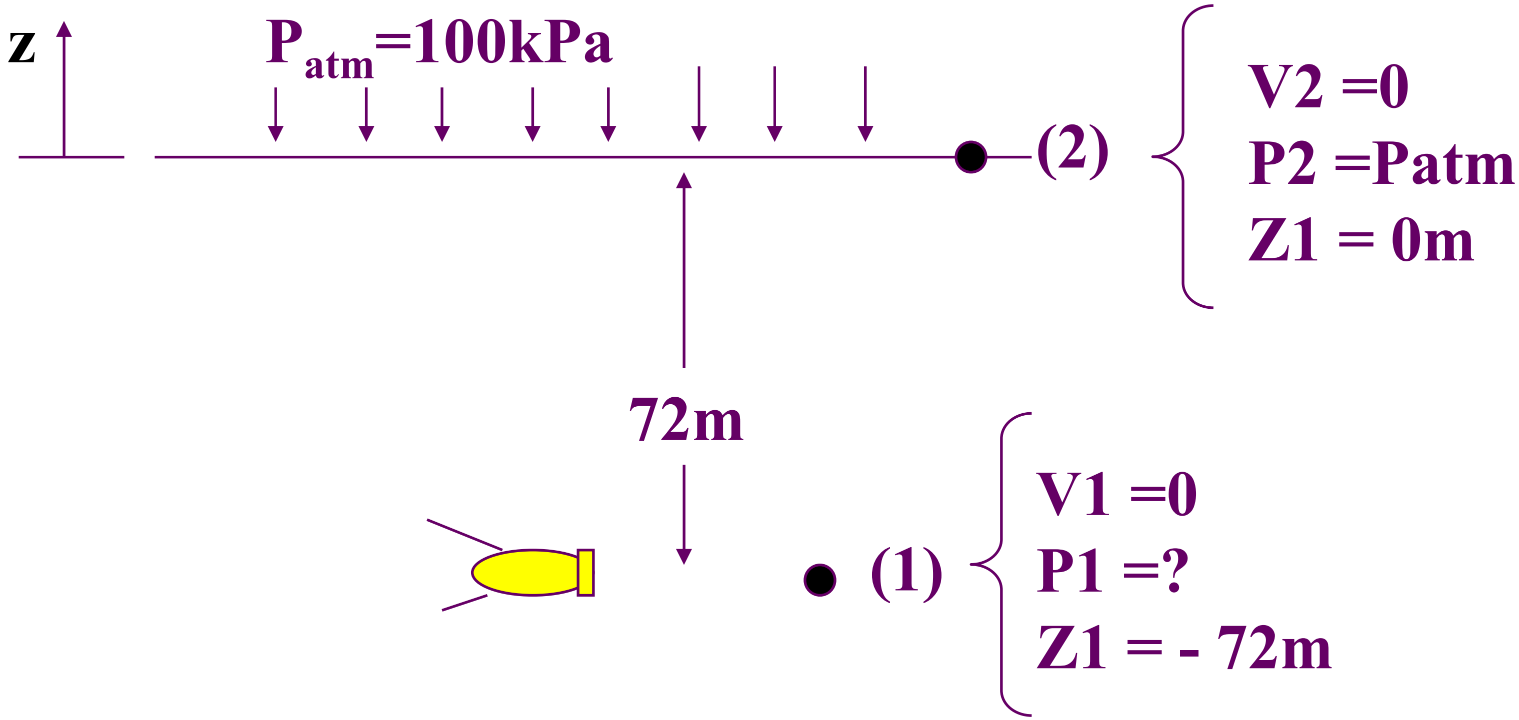
a variação de quantidade de movimento do jato é igual a força peso:

$$F_Y = +2\dot{m}V_j$$

Se o jato estiver a 10 cm do bloco, então a velocidade de descarga do bocal deverá ser:

$$\left(\frac{V_0^2}{2} + g0 + \frac{P_{atm}}{\rho}\right)_0 = \left(\frac{V_j^2}{2} + gh + \frac{P_{atm}}{\rho}\right)_j \rightarrow V_0 = \sqrt{V_j^2 + 2gh}$$

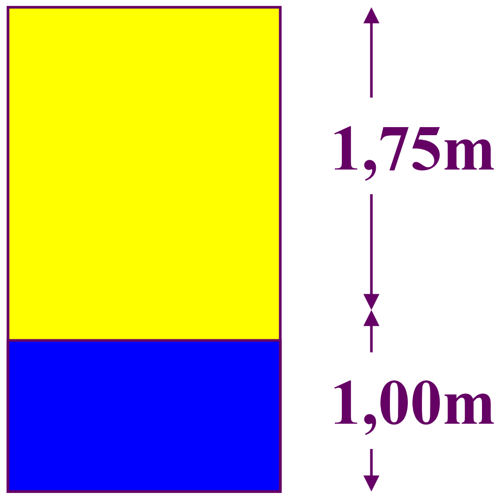
Ex. 5.33 Um mergulhador se encontra a 72 m de profundidade numa região onde a temperatura é de 5ºC. Qual é a pressão absoluta nesta profundidade?



Quando não há velocidade se chama um caso HIDROSTÁTICO.
A pressão hidrostática varia somente com a altura!

$$P = P_{REF} + \rho g h$$

Ex. 5.39 **Um cilindro de 0,5 cm de diâmetro contém dois líquidos: água e outro com densidade relativa S=0.88. Determine a força líquida no fundo do cilindro**

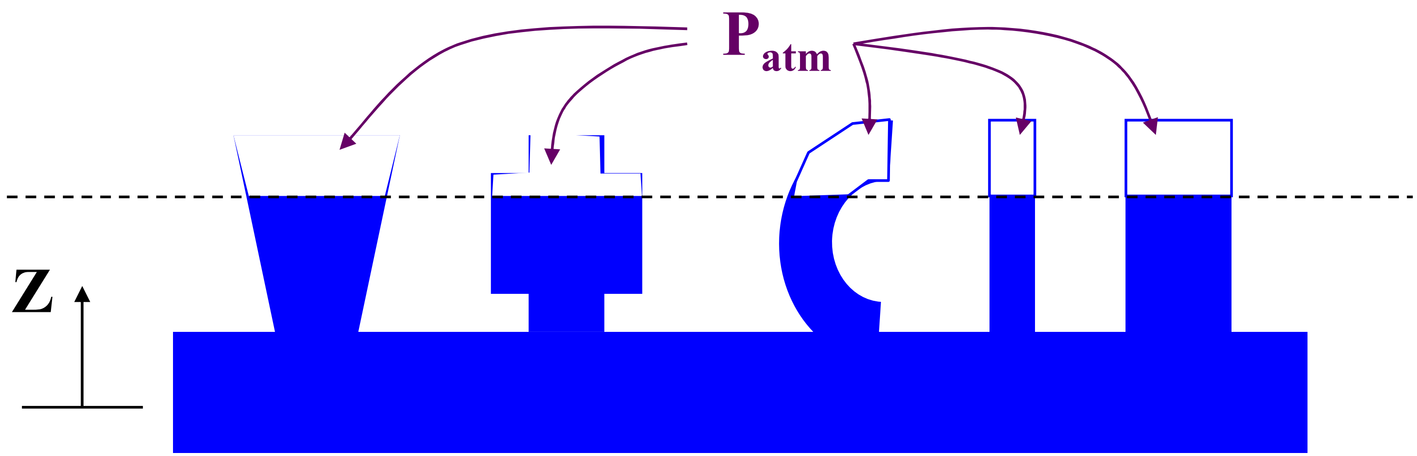


MANOMETROS

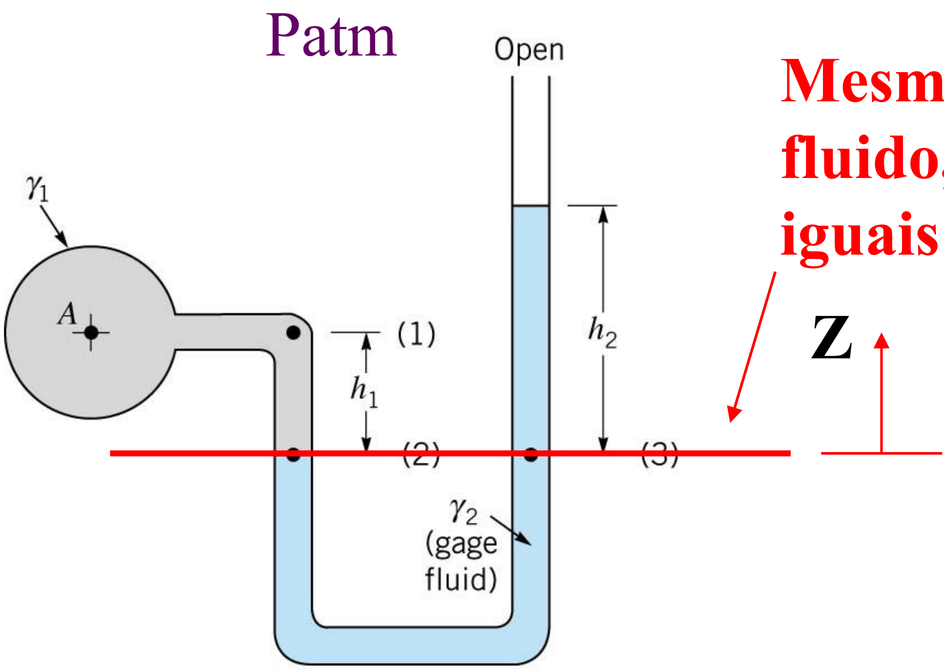
- São medidores de pressão que operam em condições HIDROSTÁTICAS.

$$\left(gz + \frac{P}{\rho}\right)_1 = \left(gz + \frac{P}{\rho}\right)_2$$

- <u>Regra:</u> *mesmo fluido e mesma altura apresentam mesma pressão*. Porque?
- A pressão só varia com z.



MEDIÇÃO DA PRESSÃO: MANOMETROS TUBO U



Mesma altura e mesmo fluido, portanto pressões iguais

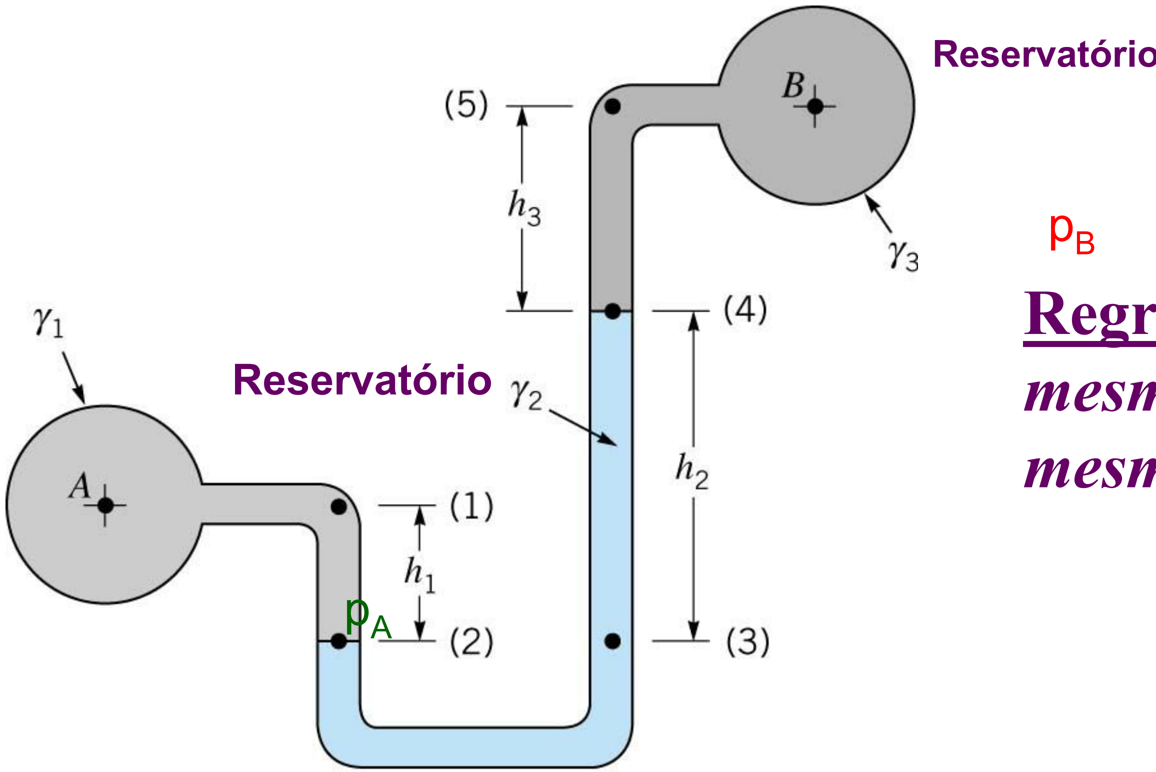
$$P_2 = P_A + \rho_A \cdot g \cdot h_1$$

$$P_2 = P_3$$

$$P_3 = P_{Atm} + \rho_m \cdot g \cdot h_2$$

$$P_A - P_{Atm} = g \cdot (\rho_m h_2 - \rho_A h_1)$$

MEDIÇÃO DA PRESSÃO: MANOMETRO DIFERENCIAL



Regra: ***mesmo fluido e mesma altura apresentam mesma pressão.***

$$P_2 = P_3 \quad \rightarrow \quad P_A - P_B = \rho_B g h_3 + \rho_M g h_2 - \rho_A g h_1$$

Medidor de Pressão tipo Bourdon

EQUAÇÃO DE BERNOULLI

Primeira solução que relaciona campo de velocidade com campo de pressão.

P_T é constante em (1) e (2)

$$V_2 = [\ 2\ (P_T - P_2)/\rho\ ]^{0.5}$$

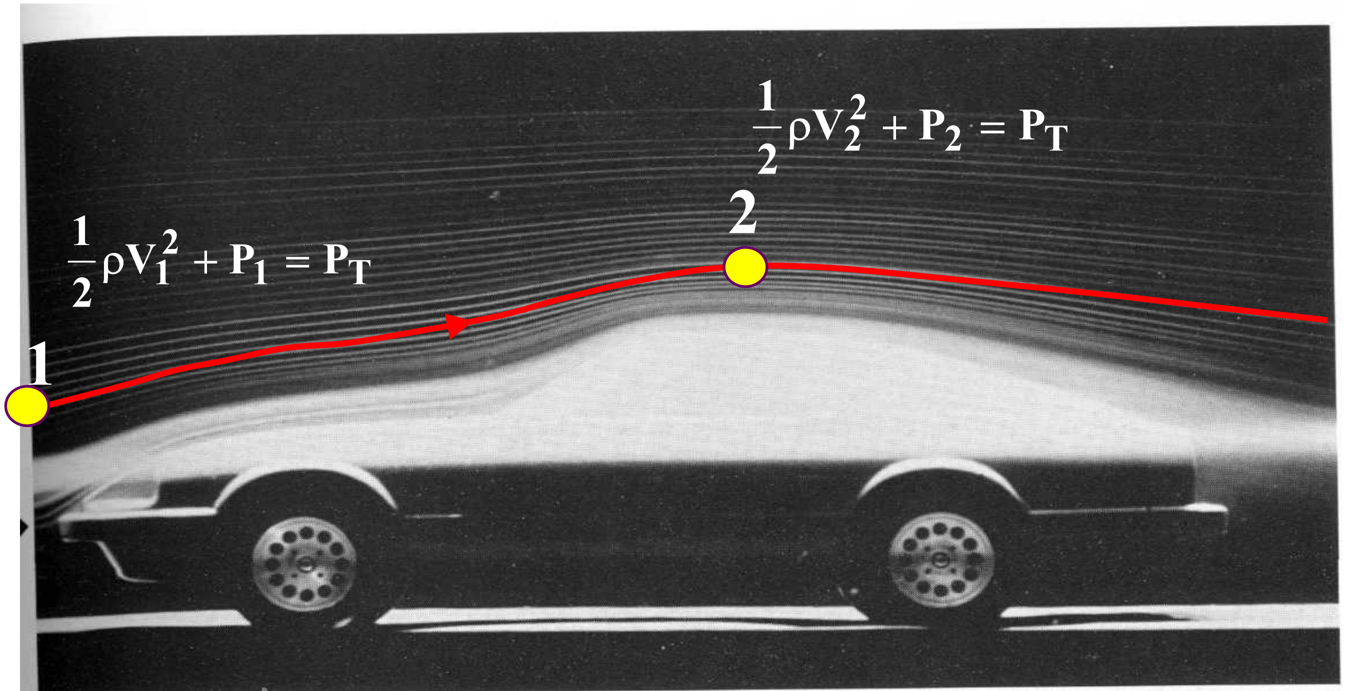


Fig. 96. Flow around a streamlined car model (air, flow speed 4 m/s, wheel base 500 mm, $Re = 1.3 \times 10^5$, three-dimensional smoke tunnel).

Tubos de Pitot (1732)

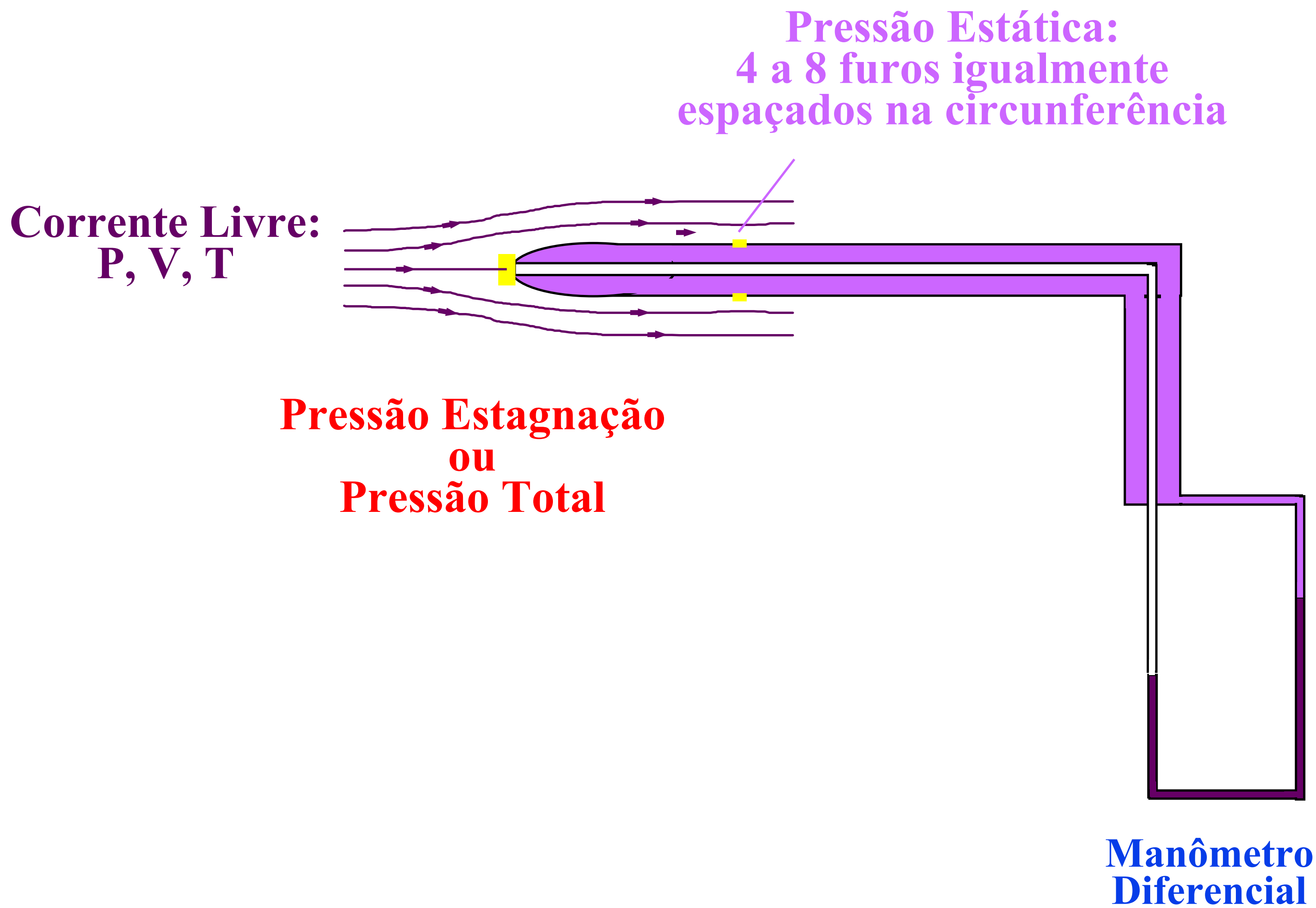
- Foi desenvolvido em 1732 por Henry Pitot para realizar medidas locais da velocidade de correntezas em rios.

- Até hoje muito utilizado na indústria aeronáutica, em instalações indústriais (linhas de vapor, gases e líquidos) em sistemas de ventilação e laboratórios de pesquisa.

- Realiza uma medida local da velocidade do escoamento

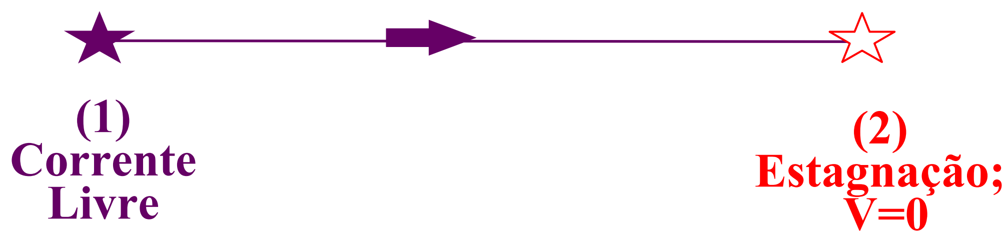
- Pode ser empregados tanto para fluidos compressíveis como para incompressíveis.

Tubos de Pitot (1732)



Princípio Básico dos Pitots

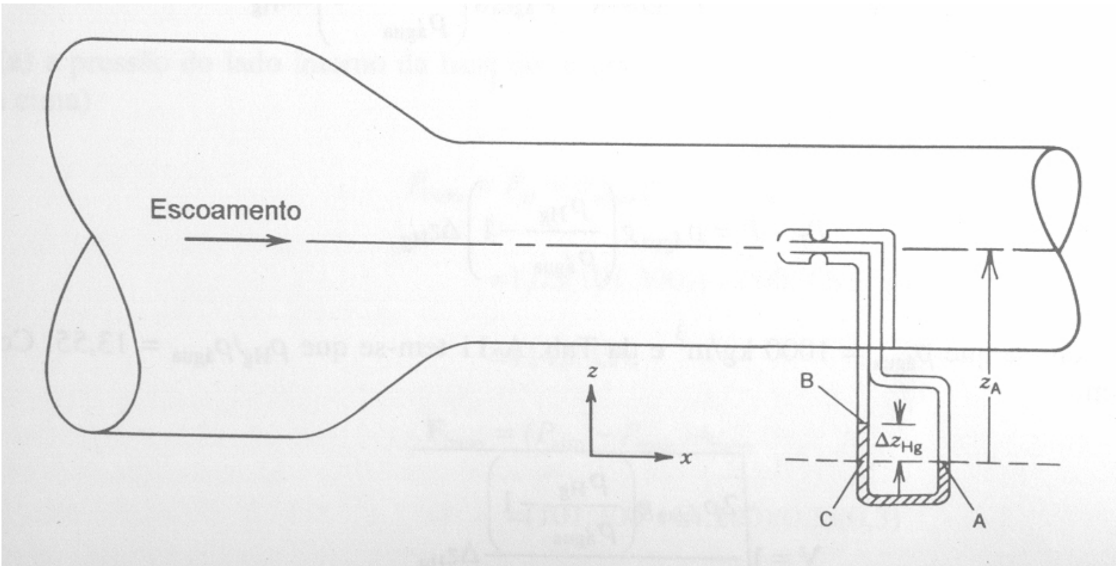
- O escoamento livre é desacelerado de modo reversível até a estagnação, a Energia total se conserva



$$\underbrace{P_1}_{\text{P. Estat}} + \underbrace{\frac{1}{2}\rho_1 V_1^2}_{\text{P. Din}} = \underbrace{P_2}_{\text{P. Estag.}} + \underbrace{\frac{1}{2}\rho_2 V_2^2}_{=0}$$

$$\Rightarrow P_2 - P_1 = \frac{1}{2}\rho \cdot V_1^2 \quad \text{ou} \quad \boxed{V_1 = \sqrt{\frac{2(P_2 - P1)}{\rho}}}$$

Ex. 5.44 **Um tubo de Pitot é conectado a um manômetro U contendo alcool (S=0.8). O Pitot é colocado numa corrente de ar (Patm = 101.3 kPa e T = 30ºC). Se a coluna de líquido for de 10.3 cm, qual deve ser a velocidade do ar?**



Ar -> gas perfeito, R = 287 J/K, $\rho = 1.165 kg/m^3$

$$V = \sqrt{\frac{2\rho_m g h}{\rho_{ar}}} = 37.33 \ \ m/s$$

5-37 Considere o escoamento de água a 10 °C por um bocal de um túnel de água, Fig. P5-37. Um tubo de Pitot (P) com tomada de pressão estática (S) está conectado a um manômetro em U contendo mercúrio (densidade relativa = 13,55, Tabela A-11). Determine o desnível da coluna de mercúrio, z_m:

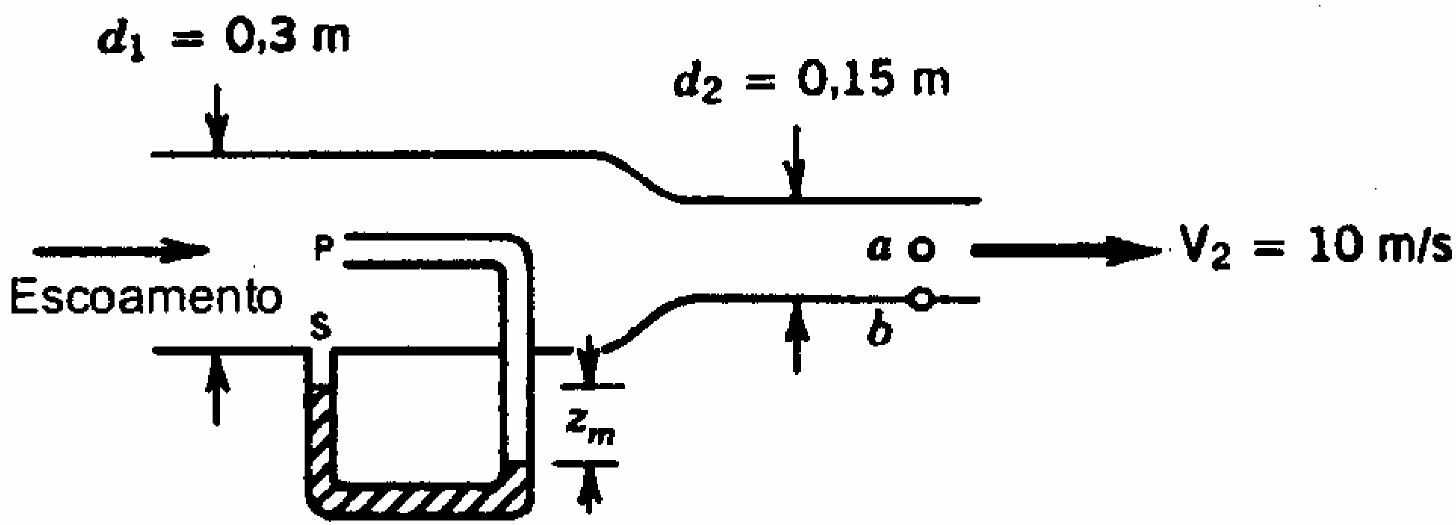
(a) Quando P e S estão localizados como mostrado.

(b) Quando P é colocado na posição (*a*) e S permanece na posição mostrada.

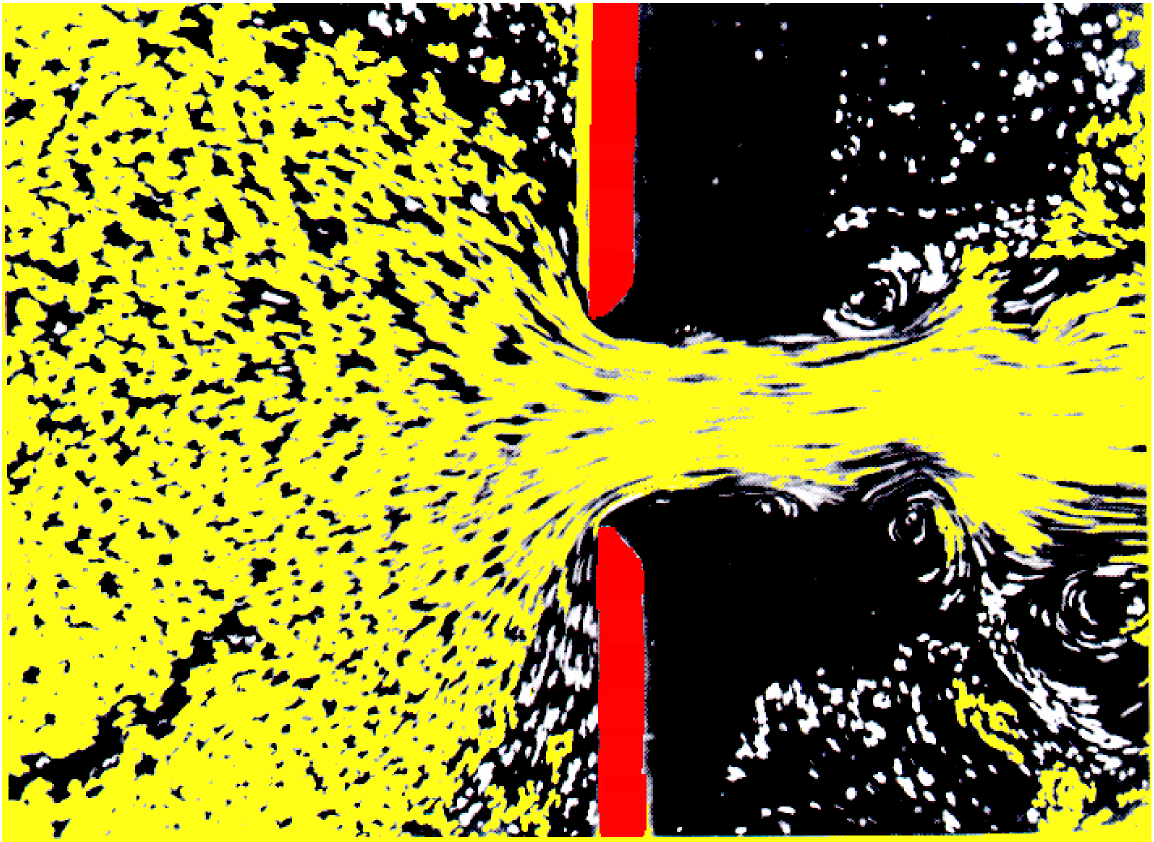
(c) Quando S é colocado na posição (*b*) e P permanece na posição mostrada.

(d) Quando P é colocado na posição (*a*) e S na posição (*b*).

Note que o tubo de Pitot está fora da camada limite e a tomada estática não é afetada por efeitos viscosos.

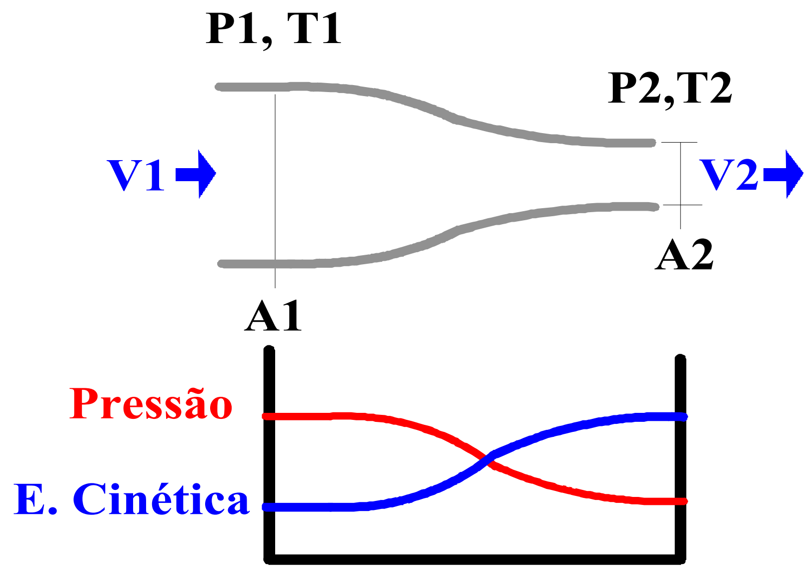


Aplicação em Medidores de Vazão: Escoamento numa Obstrução



Vazão Teórica Incompressível: Tubo Venturi

- *Escoamento Unidimensional*
- *Regime Permanente*
- *Fluido Incompressível*
- *Sem viscosidade (esc. reversível)*



- **Equação Continuidade seções (1) - (2)**

$$\dot{m} = (\rho \cdot V \cdot A)_1 = (\rho \cdot V \cdot A)_2$$

- **Equação Energia seções (1) - (2)**

$$\left(P + \frac{1}{2}\rho \cdot V^2\right)_1 = \left(P + \frac{1}{2}\rho \cdot V^2\right)_2$$

$$\dot{m}_{T,i} = \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta P}; \qquad \beta = \frac{d}{D}$$

Medição Real

- **A vazão real é determinada por meio da vazão teórica incompressível multiplicada por constantes, Cd e Y, que levam ao modelo teórico os efeitos de viscosidade e compressibilidade do escoamento**

$$m_{REAL} = C_d \cdot \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \sqrt{2\rho_1 \Delta P}$$

- **O coef. de descarga corrige os efeitos de viscosidade e turbulência. Ele é determinado experimentalmente como:**

$$C_d = \frac{m_{Real,incomp}}{m_{Teo,incomp}} = f(\beta, Re) < 1$$

Jatos de Água (filme)

- **Velocidade de Descarga: $v_d = (2gH)^{1/2}$**
- **Tragetória do Jato:**

$$v_0 = \sqrt{\underbrace{v_d^2}_{v_x^2} + \underbrace{2gz_0}_{v_z^2}}$$

$$\left.\begin{array}{l} x = v_d \cdot t \\ z = -g\dfrac{t^2}{2} \end{array}\right\} z = -\left(\frac{g}{2 \cdot v_0^2}\right)x^2$$