

ES704 – Instrumentação Básica

06 – Medição de pressão

Eric Fujiwara

Unicamp – FEM – DSI

Índice

- **Índice:**
 - 1) Medição de pressão;
 - 2) Medição de pressão em escoamentos;
 - Questionário;
 - Referências;
 - Exercícios.

1. Medição de pressão

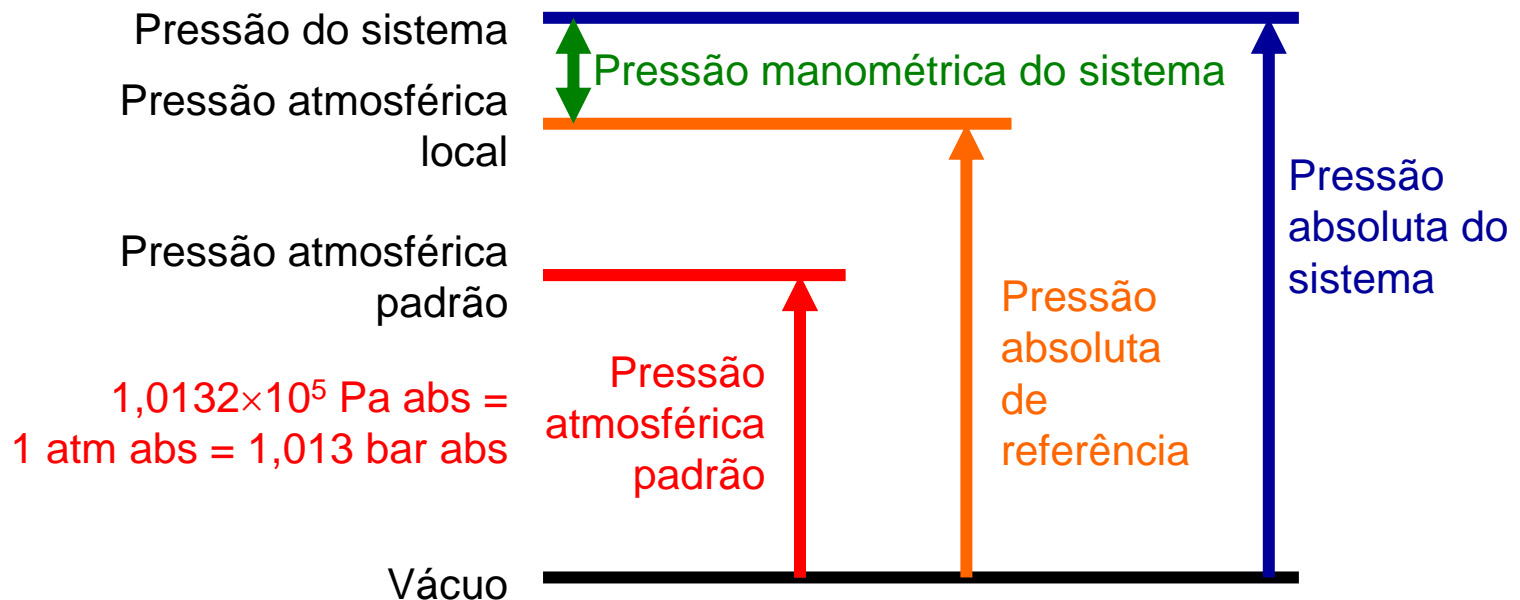
1.1. Escalas de pressão:

- Pressão manométrica:

$$p_m = p_{abs} - p_0$$

(6.1)

- Onde p_{abs} é a pressão absoluta e p_0 é a pressão de referência;



1. Medição de pressão

1.2. Pressão hidrostática:

- Pressão hidrostática:

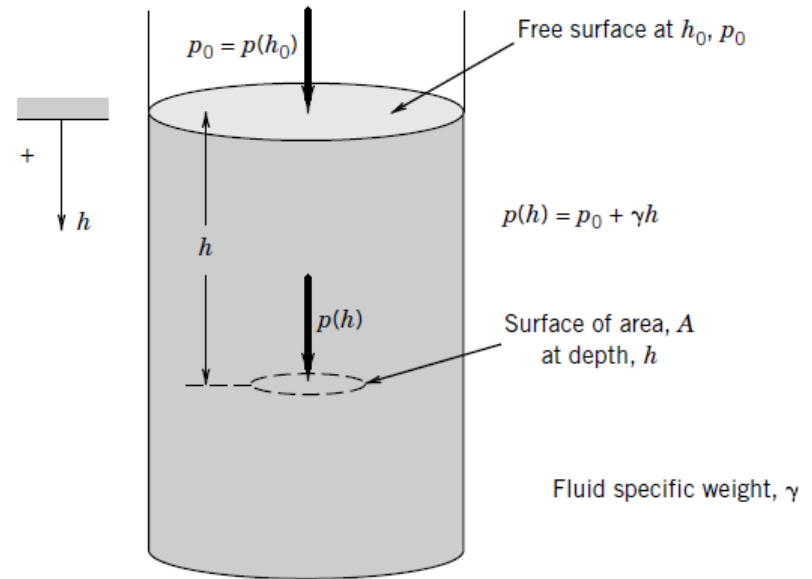
$$p(h) = p_0 + \rho gh \quad (6.2)$$

- ρ : densidade do fluido (kg/m^3);

- Altura de coluna de fluido:

$$h = \frac{p(h) - p_0}{\gamma} \quad (6.3)$$

- $\gamma = \rho g$: peso específico (N/m^3);
- 1 atm abs = 760 mmHg abs = 10350,8 mmH₂O abs.

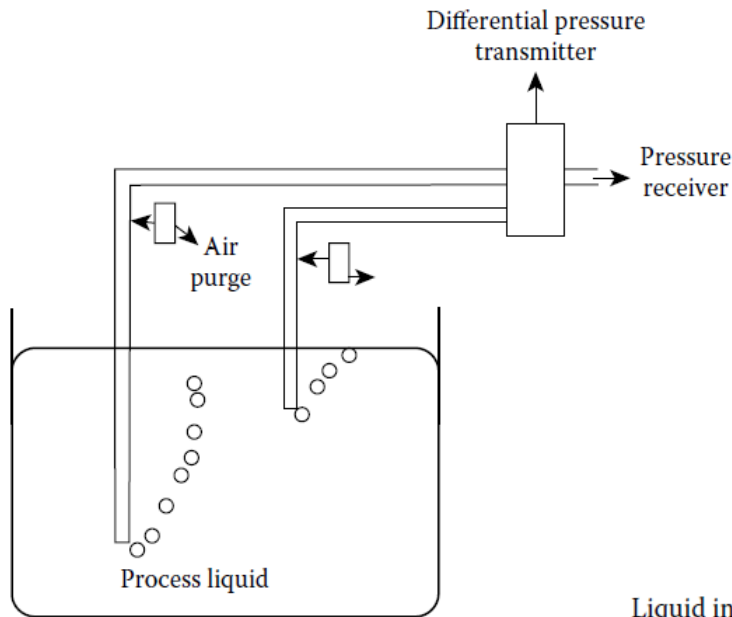


1. Medição de pressão

- **1.3. Medição de densidade de fluidos:**
 - **Picnômetro:** dispositivo preenchido com volume de fluido conhecido. A densidade é estimada pela massa;
 - **Densímetro de massa (hydrometer):** tubo com massa conhecida que flutua ao ser imerso em líquido. A densidade é indicada pelo nível suspenso;
 - **Densímetro de coluna:** baseado na diferença de pressão entre duas alturas de líquido;
 - **Densímetro de vibração:** o líquido é excitado com uma sonda de vibração mecânica. A frequência natural depende da densidade e viscosidade do fluido.

1. Medição de pressão

- 1.3. Medição de densidade de fluidos:



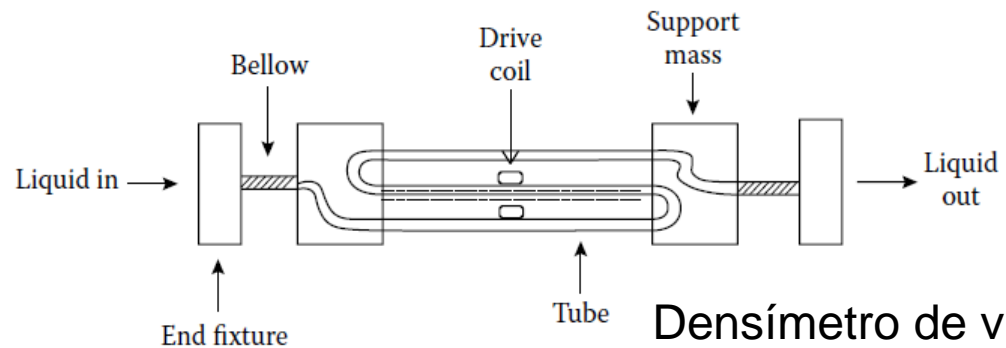
Densímetro de coluna



Picnômetro



Densímetro

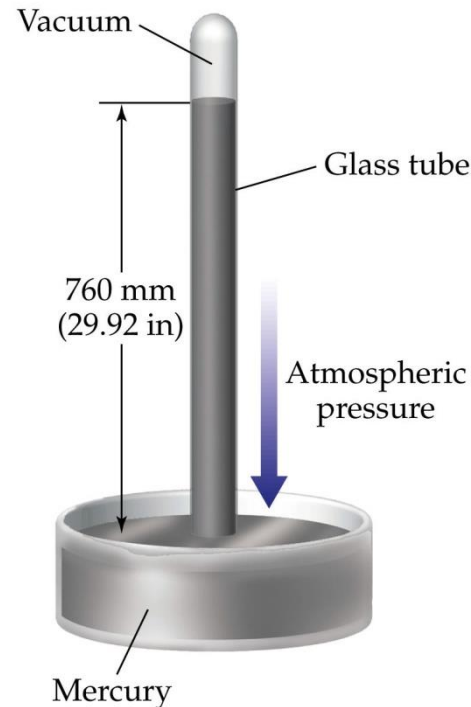


Densímetro de vibração

1. Medição de pressão

■ 1.4. Barômetro:

- **Barômetro:** tubo evacuado contendo fluido (mercúrio), mede pressão atmosférica;
- **Medidor de McLeod:** barômetro que deve ser girado para entrar em modo de medição;



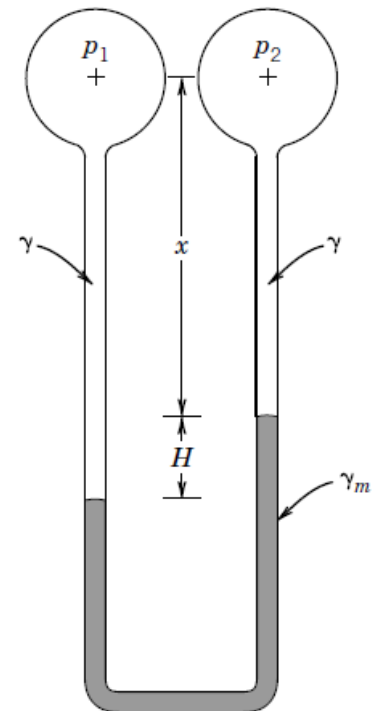
1. Medição de pressão

■ 1.5. Manômetro:

• Manômetro de tubo U:

- Tubo transparente é preenchido com líquido de peso específico γ_m . Diferença de pressão (p_1 e p_2) é aplicada por um fluido de peso específico γ nos terminais do instrumento, gerando uma deflexão H no nível de líquido.

$$p_1 - p_2 = (\gamma_m - \gamma)H \quad (6.3)$$

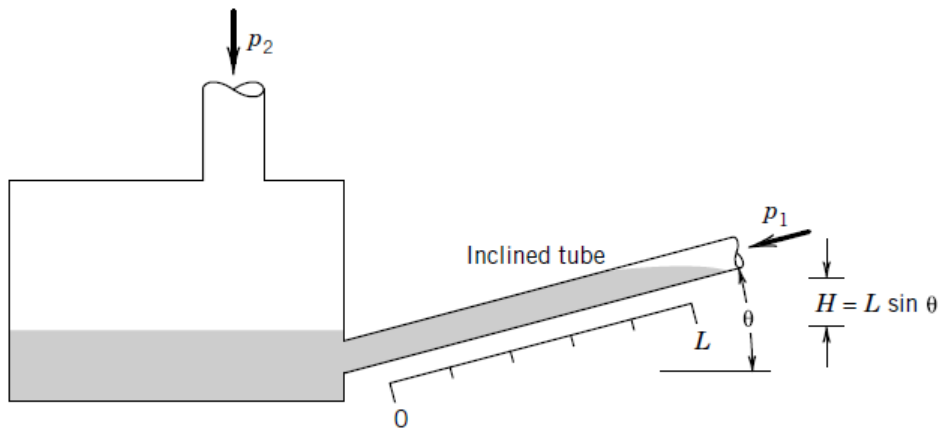


1. Medição de pressão

▪ 1.5. Manômetro:

• Manômetro de tubo inclinado:

- Manômetro com tubo inclinado de θ (10 a 30°);
- A deflexão H em relação à escala do tubo inclinado é dada por $L = H / \sin \theta$.

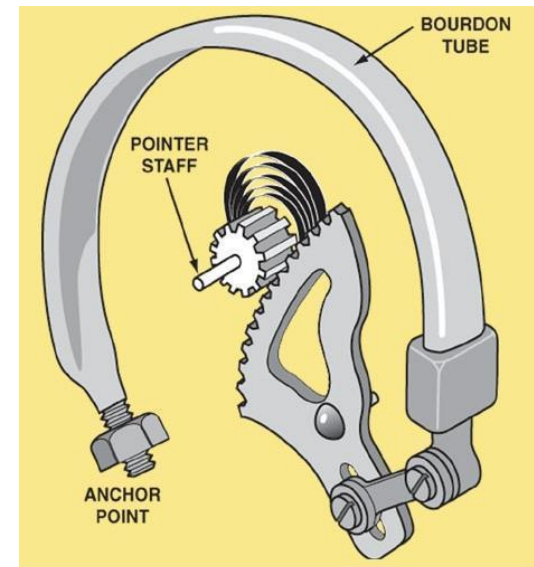
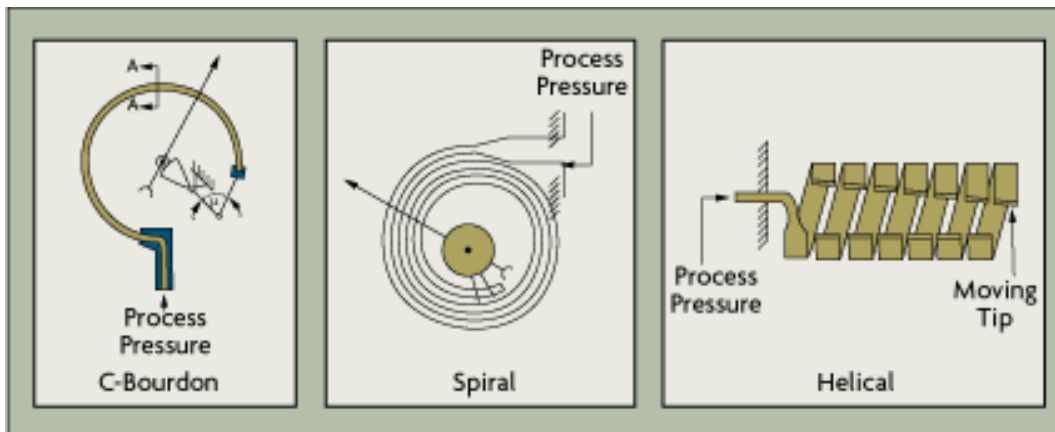


1. Medição de pressão

▪ 1.6. Tubo de Bourdon:

• Manômetro de tubo inclinado:

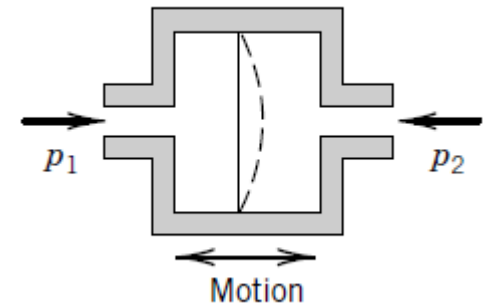
- Tubo metálico de seção elíptica que deforma com a aplicação de pressão interna, submetido externamente à pressão atmosférica;
- A magnitude da deflexão do tubo é proporcional à diferença de pressão.



1. Medição de pressão

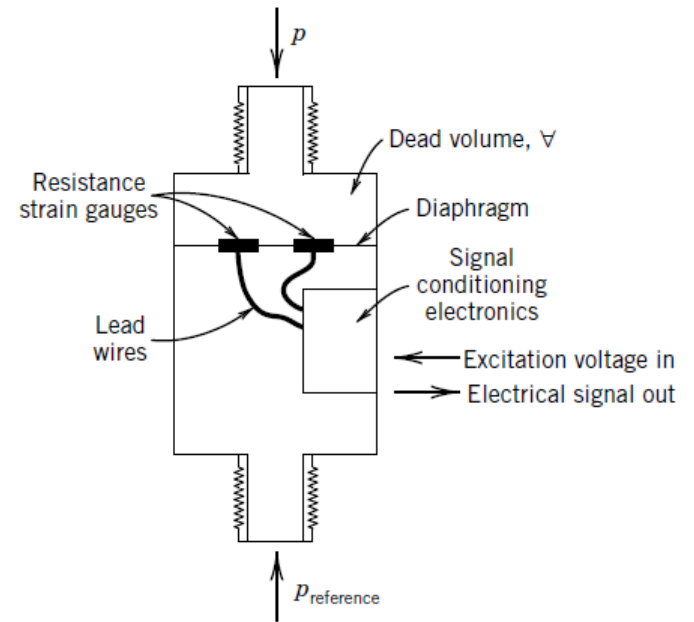
▪ 1.7. Diafragma:

- Formado por uma membrana (metálica ou polimérica) circular elástica fina suportada por sua circunferência;
- A pressão diferencial aplicada entre as faces do diafragma deformam a placa, onde a magnitude da deformação é proporcional à pressão diferencial;
- Pode medir pressões estáticas (amplitude da deflexão) e dinâmicas (frequência de vibração).



1. Medição de pressão

- 1.7. Diafragma:
 - **Diafragma piezorresistivo:** utiliza extensômetros (strain gauge) para monitorar a deflexão. Interrogado com ponte de Wheatstone.



(a) Sensing scheme

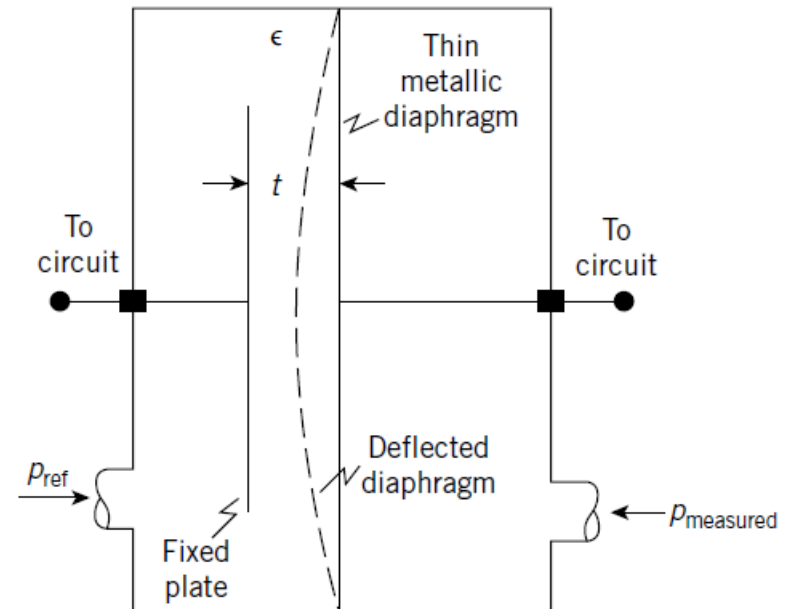
1. Medição de pressão

■ 1.7. Diafragma:

- **Diafragma capacitivo:** o diafragma metálico de área A e uma placa fixa formam o capacitor. A pressão sobre o diafragma varia o gap t entre as placas do capacitor;
- **Capacitância:**

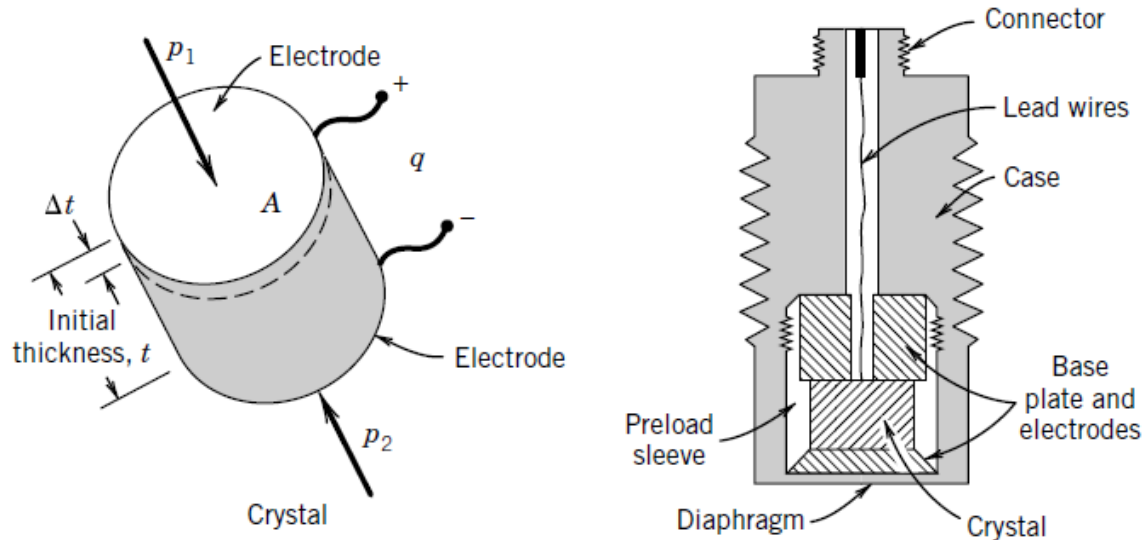
$$C = \frac{c\epsilon A}{t} \quad (6.4)$$

- c : constante dielétrica (1 para ar, 80 para água);
- ϵ : permissividade elétrica.



1. Medição de pressão

- 1.7. Diafragma:
 - **Diafragma piezelétrico:** pressão causa deformação do cristal, gerando uma carga superficial proporcional à força aplicada. O cristal é acoplado a um diafragma e um amplificador converte a carga em tensão elétrica.



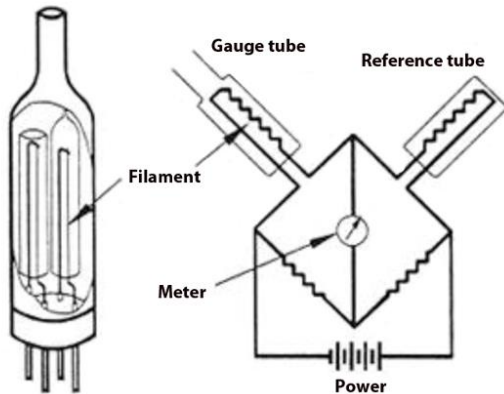
1. Medição de pressão

▪ 1.8. Medição de pressão de vácuo:

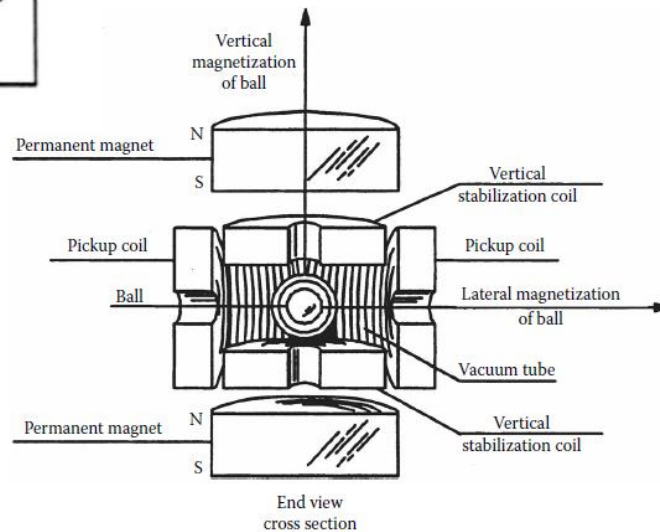
- **Medidor de Pirani:** mede pressão baseado na variação da condutividade térmica;
- **Medidor de Bayard-Alpert:** mede pressão baseado na corrente de ionização de um gás com filamento quente;
- **Medidor de filamento frio:** utiliza um detector com aplicação de campo magnético para desviar as moléculas de gás ionizado;
- **Medidor de arrasto molecular:** utiliza uma esfera com rotação constante, sendo que o atrito com as moléculas de gás afetam a velocidade da esfera.

1. Medição de pressão

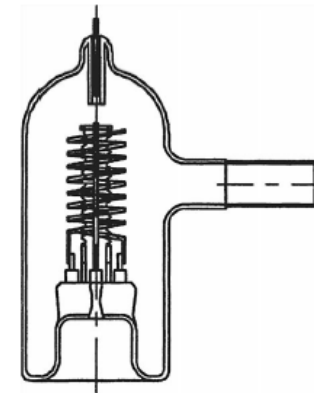
1.8. Medição de pressão de vácuo:



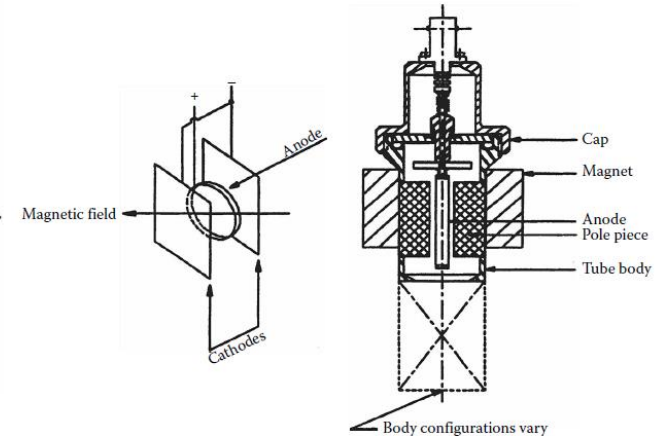
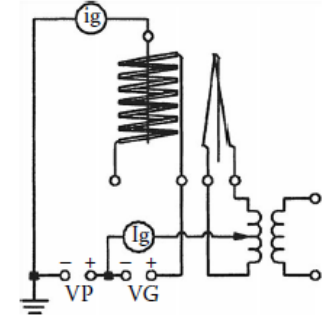
Medidor de Pirani



Medidor de arrasto molecular



Medidor de Bayard-Alpert

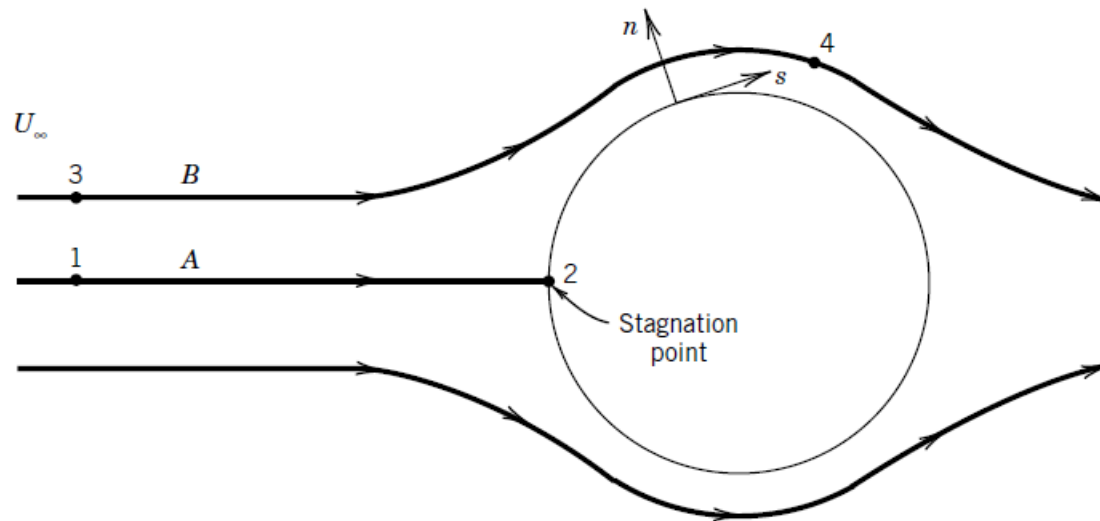


Medidor de filamento frio

2. Medição de pressão em escoamentos

▪ 2.1. Pressão em escoamentos:

- **Linha A:** fluido move com velocidade U_1 no ponto 1. O fluido é desacelerado em 2 ($U_2 = 0$) (**ponto de estagnação**);
- **Linha B:** fluido move com velocidade $U_3 = U_1$ no ponto 3. O fluido é defletido em relação ao corpo com velocidade $U_4 > U_3$.



2. Medição de pressão em escoamentos

▪ 2.1. Pressão em escoamentos:

- **Conservação de energia:**

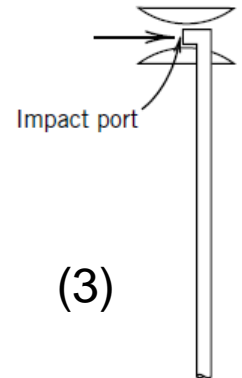
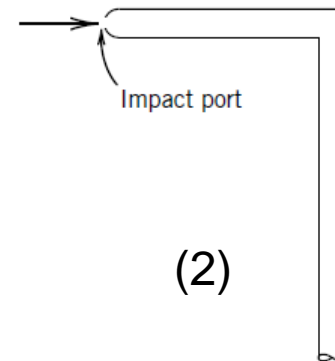
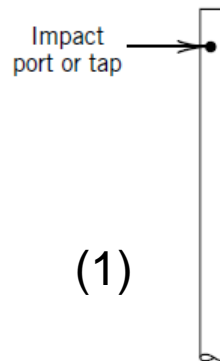
$$\boxed{p_1 + \frac{\rho U_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho U_2^2}{2}} \quad \boxed{p_1 + \frac{\rho U_1^2}{2} = p_t} \quad (6.5)$$

- **Pressão total (estagnação):** $p_t = p_2$, medida trazendo o escoamento ao repouso;
- **Pressão estática:** p_1 , medida normal ao escoamento;
- **Pressão dinâmica:** $p_v = \frac{\rho U^2}{2}$, medida pela diferença entre as pressões total e estática. É relacionada à energia cinética do fluido.

2. Medição de pressão em escoamentos

▪ 2.2. Medição de pressão total:

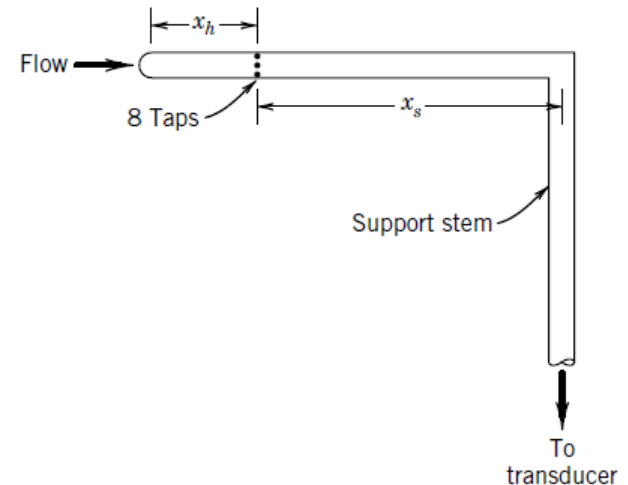
- **Sonda de impacto:** Tubos com um furo alinhado com o escoamento. O fluido é trazido ao repouso e a pressão total é medida com um transdutor de pressão.
- **Tipos de sonda de impacto:**
 - 1) Cilindro de impacto;
 - 2) Tubo de Pitot;
 - 3) Tubo de Kiel.



2. Medição de pressão em escoamentos

▪ 2.2. Medição de pressão estática:

- Medidas em furos perpendiculares ao escoamento, por sua vez conectados a transdutores de pressão;
- **Sonda de Prandtl:**
Sonda com furos distribuídos ao longo da sua circunferência, de forma a minimizar a pressão estática causada pelo escoamento defletido na extremidade da sonda.

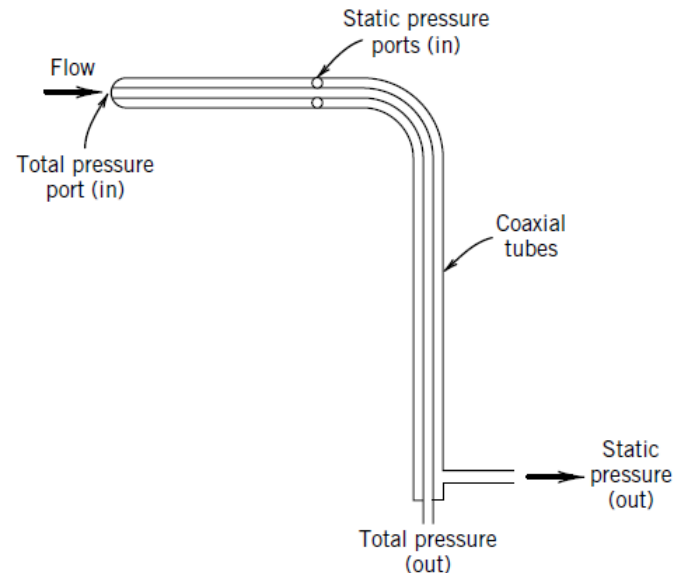


2. Medição de pressão em escoamentos

▪ 2.3. Medição de velocidade:

- **Tubo de Pitot estático:** combinação do tubo de Pitot (furo alinhado com o escoamento, medição de p_t) com um tubo de Prantl (furos normais ao escoamento, medição de p_x). As duas pressões são medidas para estimar a velocidade.

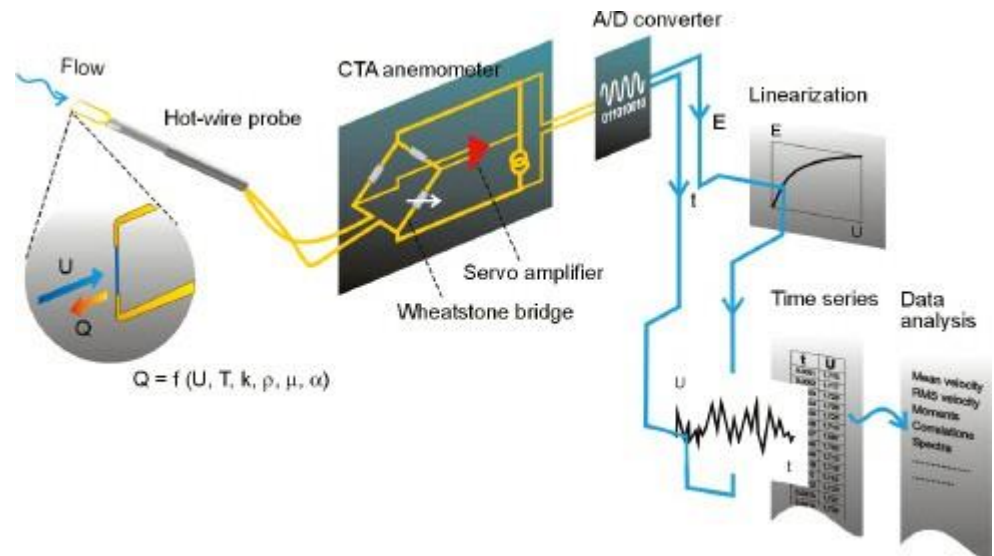
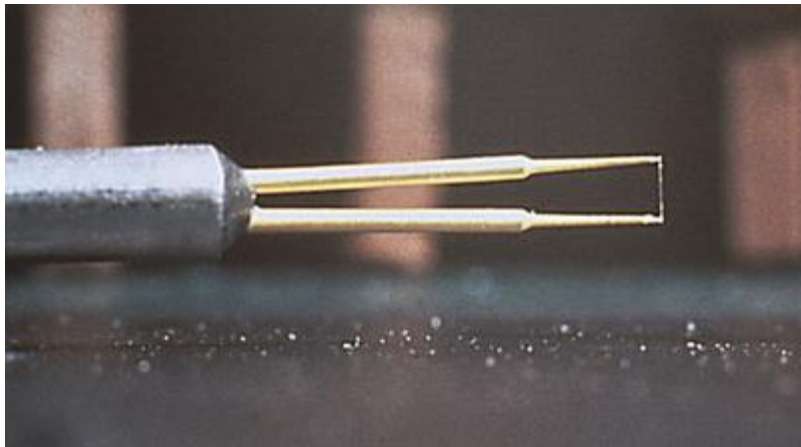
$$U = \sqrt{\frac{2p_v}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(p_t - p_1)}{\rho}} \quad (6.6)$$



2. Medição de pressão em escoamentos

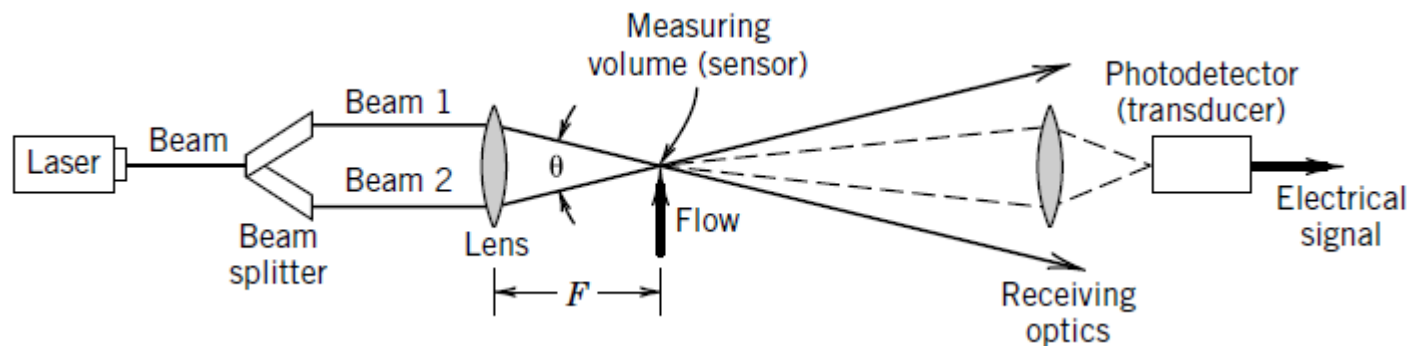
▪ 2.3. Medição de velocidade:

- **Anemômetro térmico:** filamento de Pt ou filme condutor excitado com corrente controlada e submetido ao escoamento. O fluido resfria o condutor e reduz a sua resistência. A velocidade do fluido é proporcional à variação de potência dissipada no filamento.



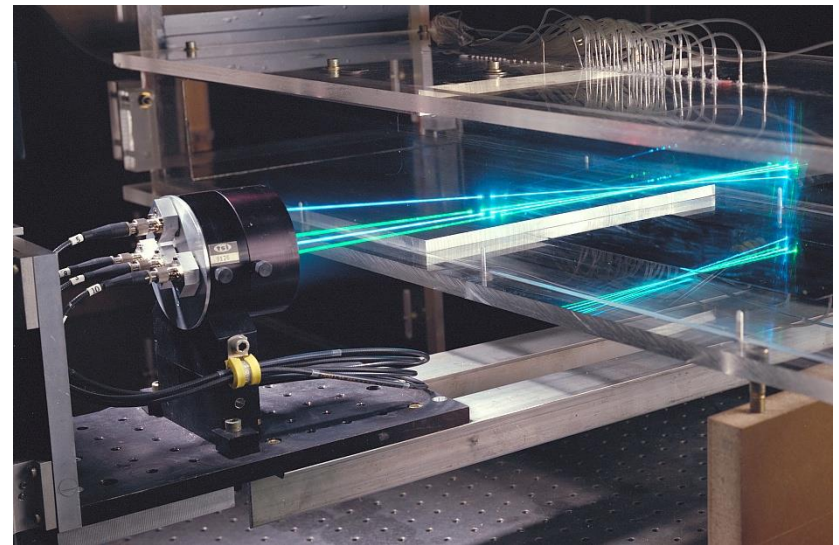
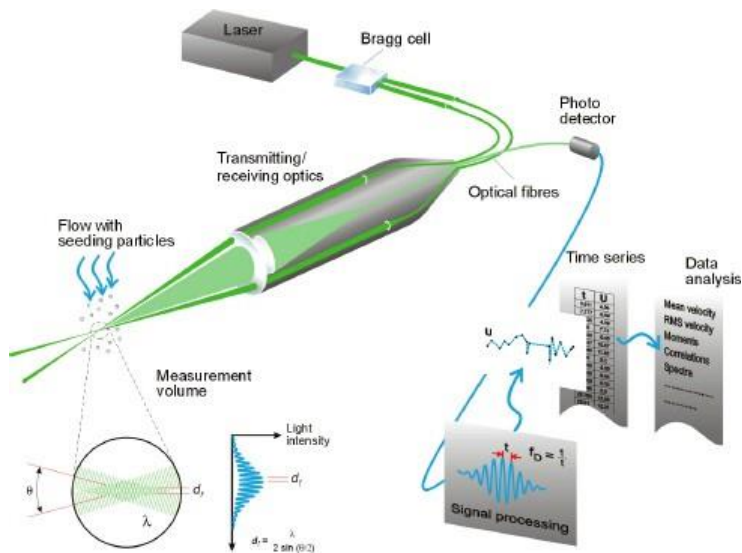
2. Medição de pressão em escoamentos

- **2.3. Medição de velocidade:**
 - **Anemômetro de efeito Doppler:** direcionamento de feixes de laser em um ponto do escoamento. O deslocamento de frequência (Doppler shift) devido à velocidade do escoamento modula a intensidade do sinal de interferência medido no fotodetector.



2. Medição de pressão em escoamentos

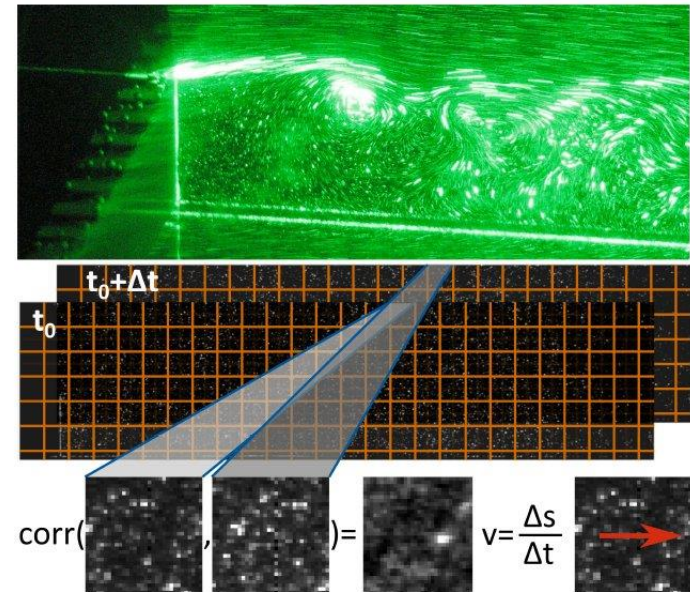
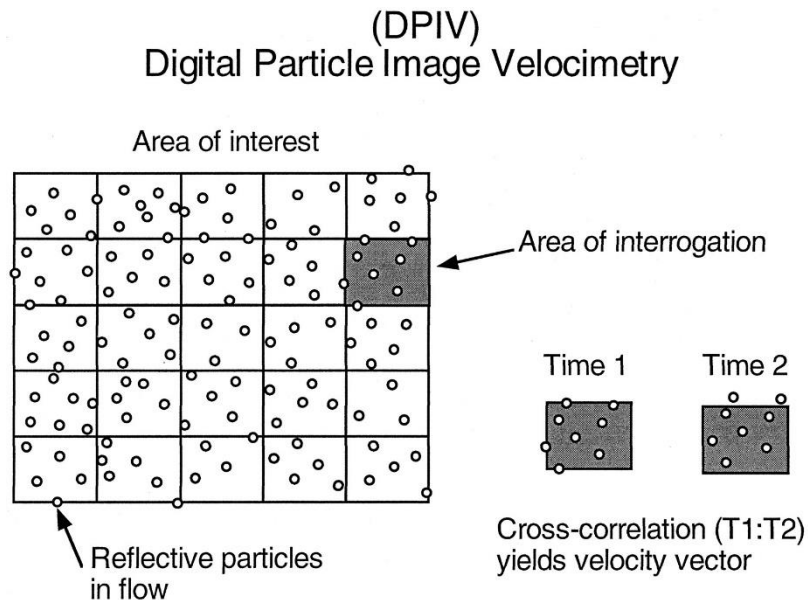
- 2.3. Medição de velocidade:
 - Anemômetro de efeito Doppler:



2. Medição de pressão em escoamentos

▪ 2.3. Medição de velocidade:

- **Velocimetria de partículas:** Mede a velocidade instantânea pelo deslocamento de partículas suspensas no fluido através de processamento de imagem.



Questionário

▪ Questionário:

- 1) Por que densímetros são utilizados para medir a conformidade de combustíveis em postos? Este método é confiável?
- 2) Descreva o circuito elétrico necessário para interrogar um diafragma. Qual é a faixa dinâmica deste sensor? A sua resposta é linear?
- 3) Qual é a função da sonda de Pitot em aeronaves?
- 4) Quais são as vantagens e desvantagens da velocimetria de partículas? É necessário utilizar métodos de processamento de imagem para identificar regiões? Explique.

Referências

■ Referências:

- R.S. Figliola, D.E. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, Wiley, 2011.
- A.S. Morris, Measurement & Instrumentation Principles, Butterworth Heinemann, 2001.
- J.G. Webster, H. Eren (Ed.) Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, CRC Press, 2014.

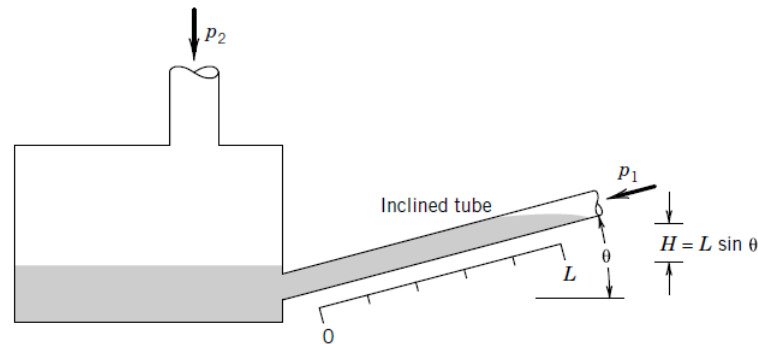
Exercícios

Exercícios

- **Ex. 6.1)** Um manômetro de tubo inclinado (30°) é utilizado para medir a pressão de ar. O instrumento é preenchido com óleo (peso específico de $9770 \text{ N/m}^3 @ 20^\circ\text{C}$). Sabendo que o deslocamento no medidor foi de 21 mm, estimar a pressão de ar (peso específico de $11,81 \text{ N/m}^3 @ 20^\circ\text{C}$) em relação à pressão ambiente.

Exercícios

■ Ex. 6.1)



- Altura de fluido manométrico:

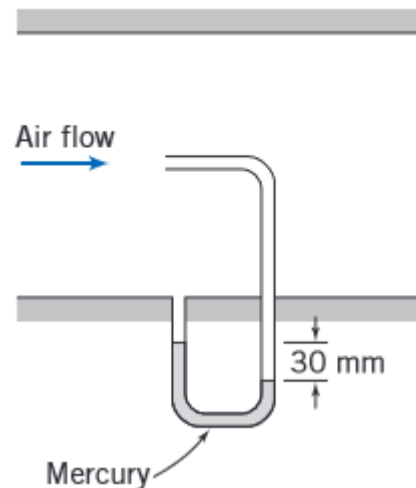
- $H = L \sin \theta = 21 \times 10^{-3} \sin(30^\circ) = 10.5 \times 10^{-3} \text{ m};$

- Pressão manométrica:

- $\Delta p = H(\gamma_m - \gamma_0) = 10.5 \times 10^{-3}(9770 - 11.81) = 102.46 \text{ Pa}.$

Exercícios

- **Ex. 6.2)** Um tubo de Pitot é acoplado a um manômetro para medir a pressão de um escoamento de ar (densidade de $1,204 \text{ kg/m}^3$ e peso específico de $11,81 \text{ N/m}^3$). O manômetro é preenchido com mercúrio (peso específico de $133,7 \text{ kN/m}^3$). Determine a velocidade do escoamento.



Exercícios

▪ Ex. 6.2)

- Manômetro de tubo U:

- $\Delta p = H(\gamma_m - \gamma_0) = 0.03(133.7 \times 10^3 - 11.81) = 4.01 \times 10^3 \text{ Pa};$

- Tubo de Pitot:

- $\Delta p = \frac{\rho U^2}{2} \Rightarrow U = \left(4.01 \times 10^3 \frac{2}{1.204}\right)^{1/2} = 81.62 \text{ m/s}.$

Exercícios

- **Ex. 6.3)** Um manômetro de tubo em U é aplicado para medir a pressão em uma linha de gás ($\gamma = 10.4 \text{ N/m}^3$). Supondo uma pressão de $\Delta p = 69 \text{ kPa}$, determine o deslocamento da coluna de líquido para os seguintes fluidos manométricos:
 - a) Água ($\gamma_m = 9800 \text{ N/m}^3$);
 - b) Óleo ($S = 0.82$);
 - c) Mercúrio ($S = 13.57$);
- Obs: S – densidade relativa à água.

Exercícios

▪ Ex. 6.3)

- a) Água ($\gamma_m = 9800 \text{ N/m}^3$):

- $H = \frac{\Delta p}{\gamma_m - \gamma} = \frac{69000}{9800 - 10.4} = 7.05 \text{ m};$

- b) Óleo ($S = 0.82 \rightarrow \gamma_m = 8036 \text{ N/m}^3$);

- $H = 8.60 \text{ m};$

- c) Mercúrio ($S = 13.57 \rightarrow \gamma_m = 13.3 \times 10^4 \text{ N/m}^3$);

- $H = 0.52 \text{ m};$

- Obs: É razoável utilizar um manômetro de tubo em U com altura de coluna de 7 m?

Exercícios

- **Ex. 6.4)** Um tubo de Pitot estático é utilizado para medir a velocidade de um fluxo de ar ($\rho = 1.16 \text{ kg/m}^3$). O manômetro de tubo em U acoplado ao transdutor de pressão acusa uma altura de 0.12 mm. Determine a velocidade do escoamento.
 - Fluido manométrico (mercúrio): $\gamma = 133.7 \text{ kN/m}^3$.

Exercícios

▪ Ex. 6.4)

- Diferença de pressão:

- $\Delta p = H(\gamma_m - \rho g) = 0.12 \times 10^{-3}(133.7 \times 10^3 - 1.16 \cdot 9.81) = 16.04 \text{ Pa};$

- Velocidade do escoamento:

- $U = \left(\frac{2\Delta p}{\rho}\right)^{1/2} = \left(\frac{2}{1.16} 16.04\right)^{1/2} = 5.26 \text{ m/s}$