

ES704 – Instrumentação Básica

07 – Medição de vazão

Eric Fujiwara

Unicamp – FEM – DSI

Índice

- **Índice:**
 - 1) Medição de vazão volumétrica;
 - 2) Medição de vazão mássica;
 - Questionário;
 - Referências;
 - Exercícios.

1. Medição de vazão volumétrica

▪ 1.1. Vazão:

- **Vazão volumétrica:** volume de fluido por tempo (m^3/s)

$$Q = \iint_A U(x, y) dA \approx \bar{U} A \quad (7.1)$$

- Integral do perfil de velocidade $U(x, y)$ pela área da seção transversal A , aproximado pela velocidade média $Q = \bar{U} A$;
- **Vazão mássica:** massa de fluido por tempo (kg/s)

$$\dot{m} = \iint_A \rho U(x, y) dA \approx \rho \bar{U} A = \rho Q \quad (7.2)$$

- A relação $\dot{m} = \rho Q$ vale se a densidade for constante (escoamento incompressível), o que não ocorre em escoamento multifásicos.

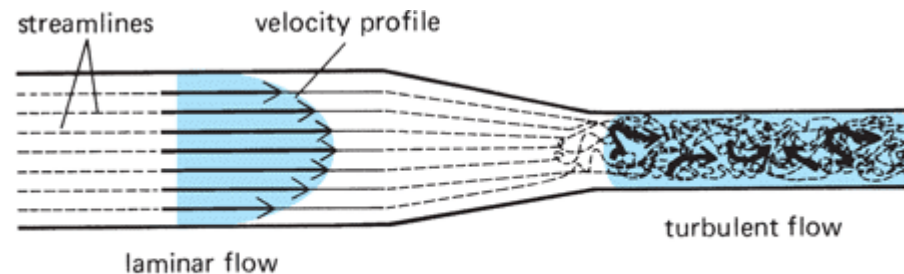
1. Medição de vazão volumétrica

1.2. Tipos de escoamento:

- **Número de Renyolds** para um duto circular:

$$\text{Re}_d = \frac{\bar{U}d}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d\nu} \quad (7.3)$$

- Onde d é o diâmetro do duto e ν é a **viscosidade cinemática** do fluido;
- $\text{Re}_d < 2000$: escoamento laminar;
- $\text{Re}_d \geq 2000$: escoamento turbulento.



Copyright ©2006 by The McGraw-Hill Companies, Inc.
All rights reserved.

1. Medição de vazão volumétrica

▪ 1.3. Medição de viscosidade:

- **Viscosidade dinâmica:** seja um fluido escoando na direção x , submetido a uma força F (tensão de cisalhamento τ_{xz}) e desenvolvendo um perfil de velocidades $U_x(z)$:

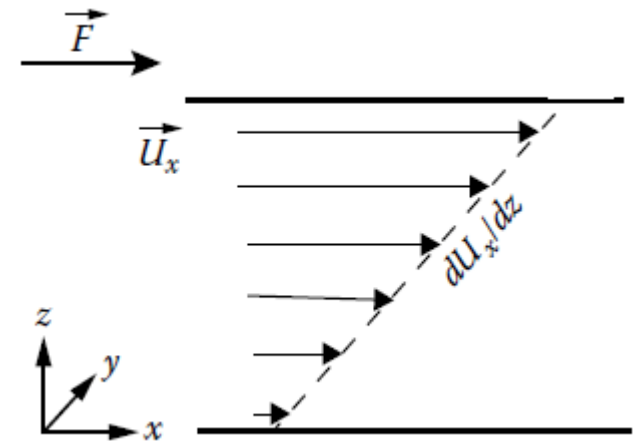
$$\tau_{xz} = \mu \frac{dU_x(z)}{dz} \quad (7.4)$$

- μ : viscosidade dinâmica (Pa.s);

- **Viscosidade cinemática:**

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (7.5)$$

- ν : (m²/s)



1. Medição de vazão volumétrica

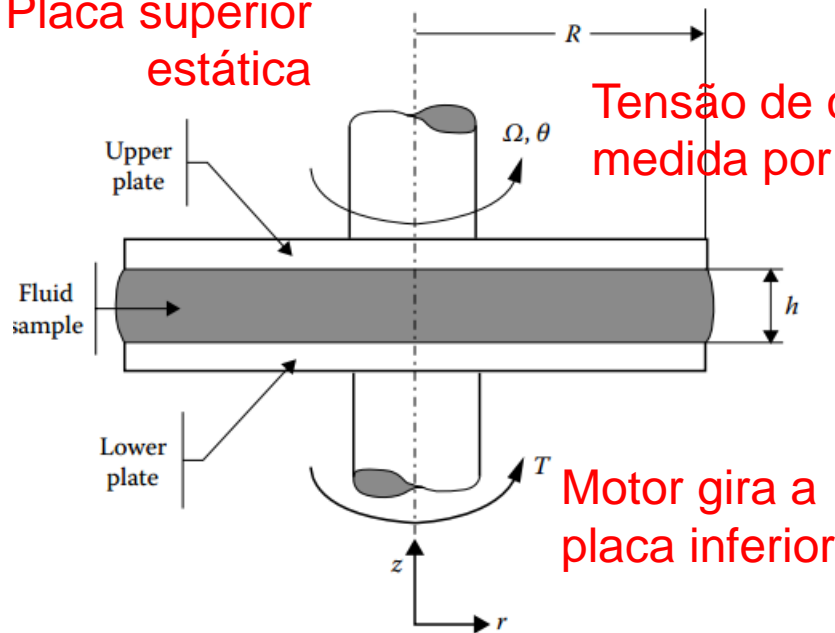
▪ 1.3. Medição de viscosidade:

- **Viscosímetro:** mede a viscosidade do fluido;
- **Reômetro:** mede a resposta do fluido à aplicação de forças quando a viscosidade varia com a condição de escoamento;
- **Tipos de viscosímetro/reômetro:**
 - **Placas paralelas:** cisalhamento com z constante;
 - **Cone-placa:** cisalhamento com gradiente de z ;
 - **Capilar:** força escoamento laminar e mede a viscosidade cinemática pelo tempo de escoamento sob ação da gravidade;
 - **Esfera:** baseado no arrasto de uma esfera na coluna de fluido;
 - **Oscilação:** excitação ultrassônica e análise da ressonância;
 - **Micro-reômetro (dynamic light scattering).**

1. Medição de vazão volumétrica

■ 1.3. Medição de viscosidade:

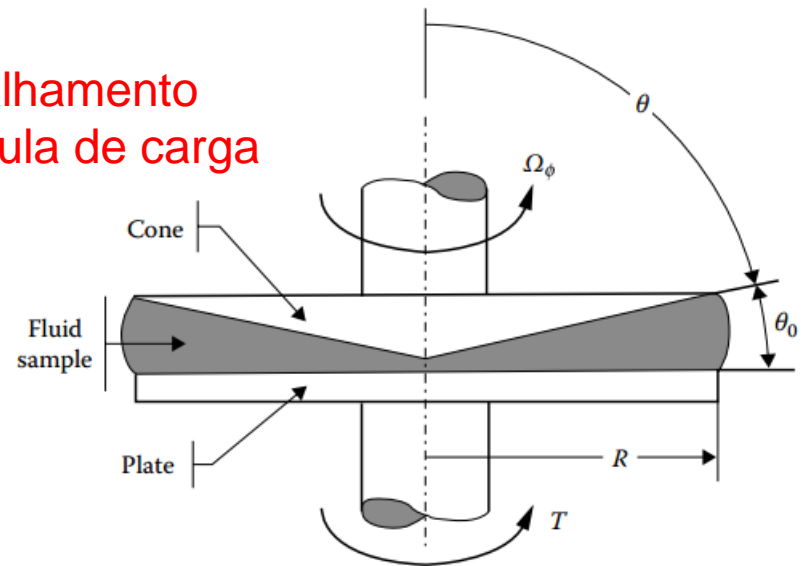
Placa superior
estática



Tensão de cisalhamento
medida por célula de carga

Motor gira a
placa inferior

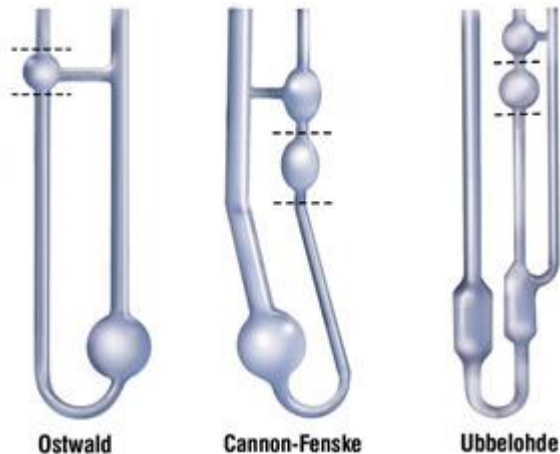
Placas paralelas



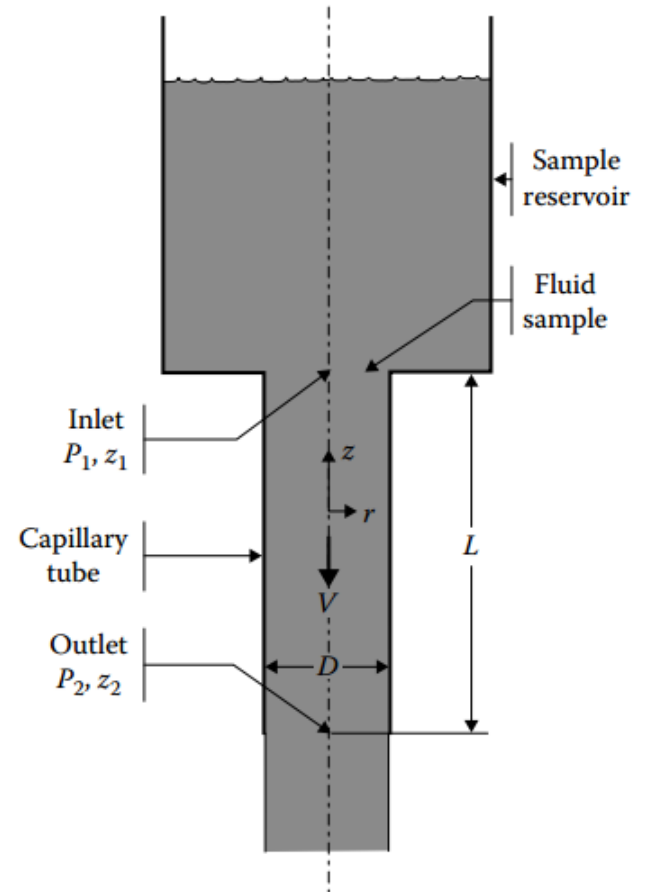
Cone-placa

1. Medição de vazão volumétrica

■ 1.3. Medição de viscosidade:



Capilar



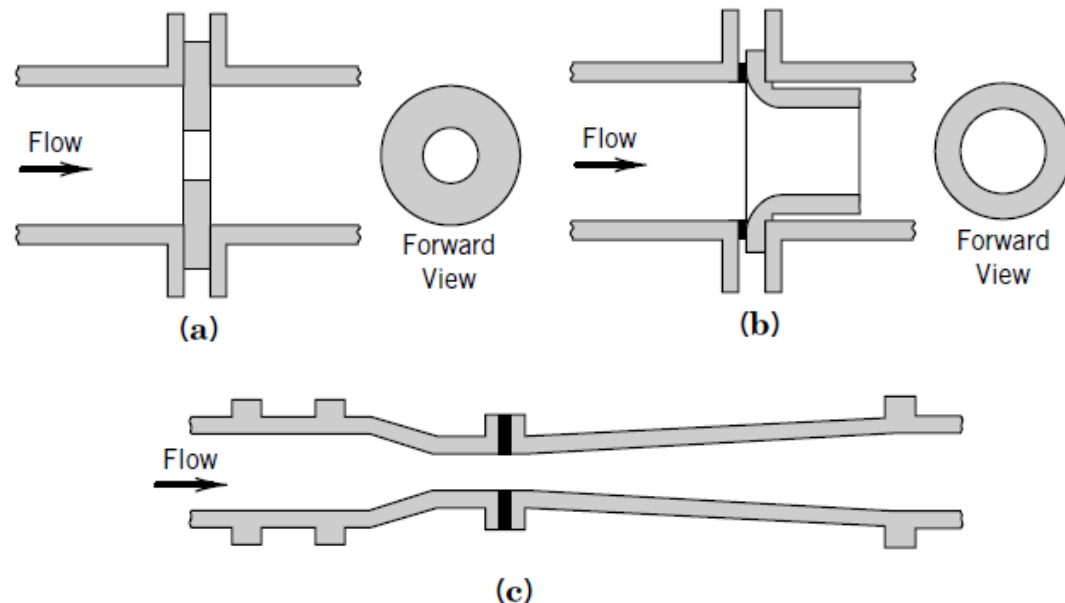
1. Medição de vazão volumétrica

▪ 1.4. Medidor de obstrução:

- Medição de vazão volumétrica baseado na diferença de pressão introduzida por uma variação controlada no diâmetro da tubulação, causando aumento da velocidade por conservação de massa (efeito Bernoulli);

- **Tipos de obstrução:**

- (a) Placa de orifício;
- (b) Bocal;
- (c) Venturi;



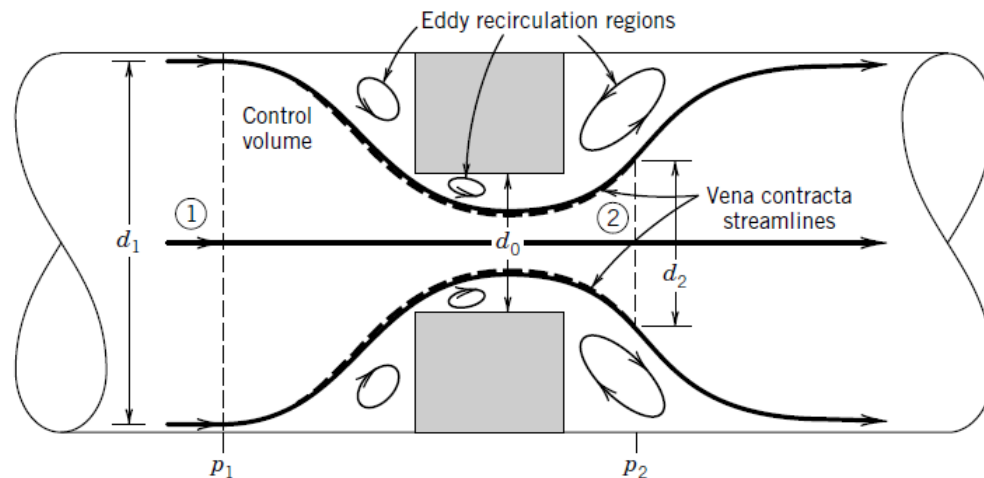
1. Medição de vazão volumétrica

▪ 1.4. Medidor de obstrução:

- Balanço de energia (equação de Bernoulli):

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\bar{U}_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\bar{U}_2^2}{2g} + h_{12} \quad (7.6)$$

- Onde $\gamma = \rho g$ e h_{12} é uma perda de pressão irreversível.



1. Medição de vazão volumétrica

▪ 1.4. Medidor de obstrução:

- Conservação de massa:

$$\bar{U}_1 A_1 = \bar{U}_2 A_2 \quad (7.7)$$

- Coeficiente de escoamento:

$$K_0 = CE = C \left[1 - \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^4 \right]^{-1/2} = C[1 - \beta^4]^{-1/2} \quad (7.8)$$

- $A_0 = \pi d_0^2/4$: área da seção da obstrução;
- E : fator de aproximação de velocidades, $\beta = d_0/d_1$;
- C : coeficiente de descarga para correção do perfil de escoamento na obstrução e regiões de recirculação.

1. Medição de vazão volumétrica

▪ 1.4. Medidor de obstrução:

- Vazão volumétrica, fluido incompressível:

$$Q_I = K_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (7.7)$$

- Vazão volumétrica, fluido compressível:

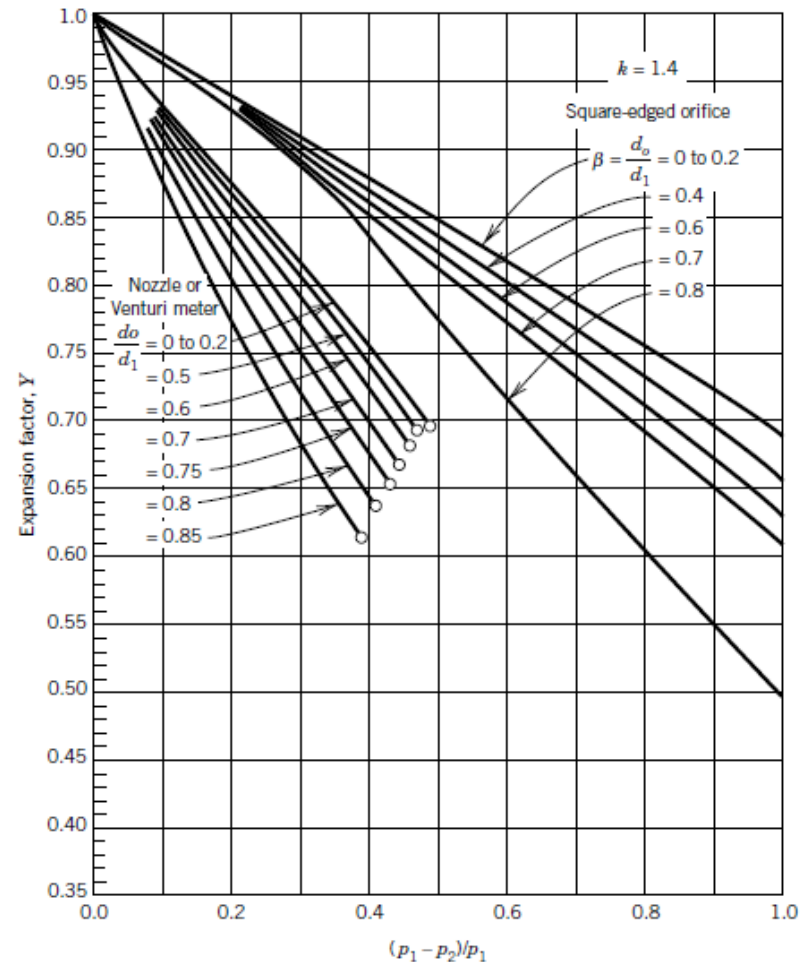
$$Q = Y K_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (7.8)$$

- Y : fator de expansão adiabática.

1. Medição de vazão volumétrica

- 1.4. Medidor de obstrução:
 - Coeficiente de expansão adiabática.

$$Q = Y K_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

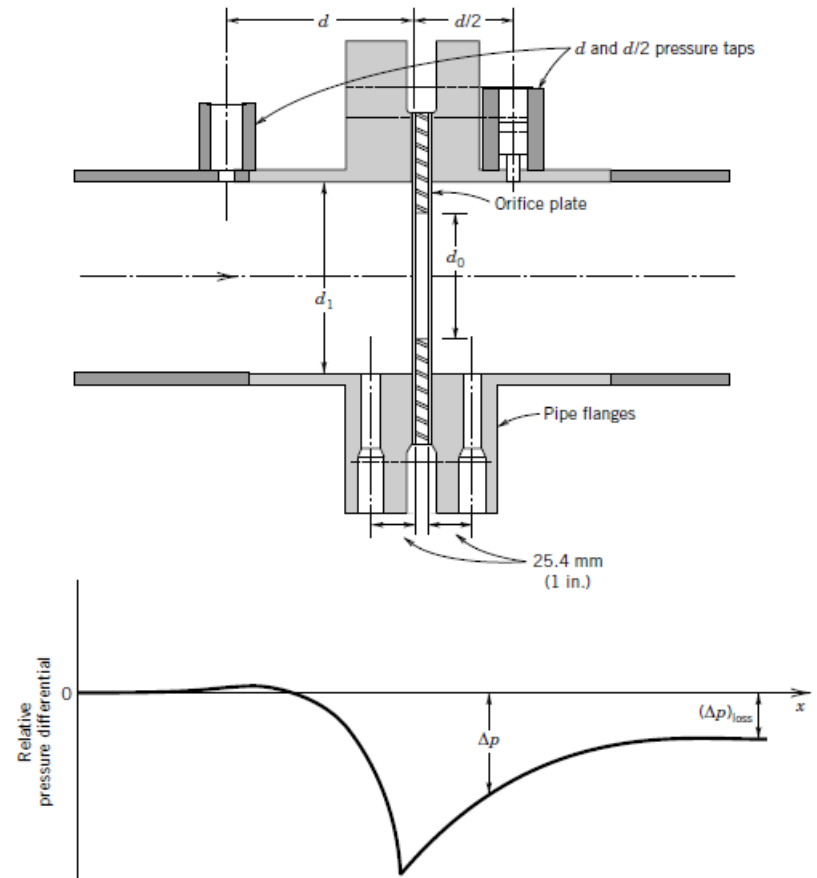
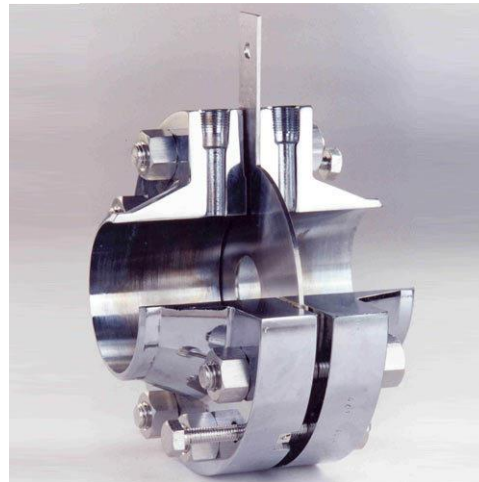


1. Medição de vazão volumétrica

■ 1.4. Medidor de obstrução:

- **Placa de orifício:**

- Instalada entre as flanges da tubulação, possui comprimento mínimo e perda de carga alta.

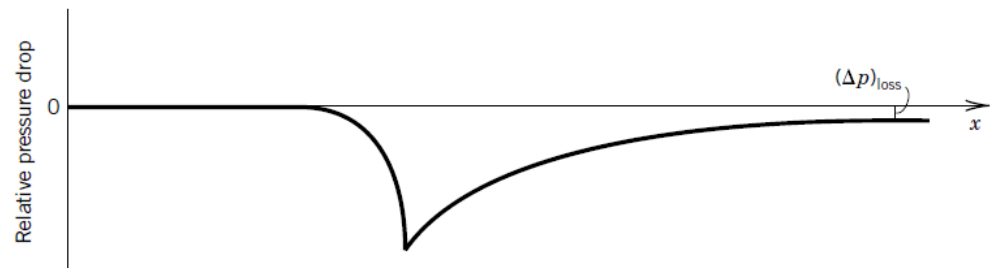
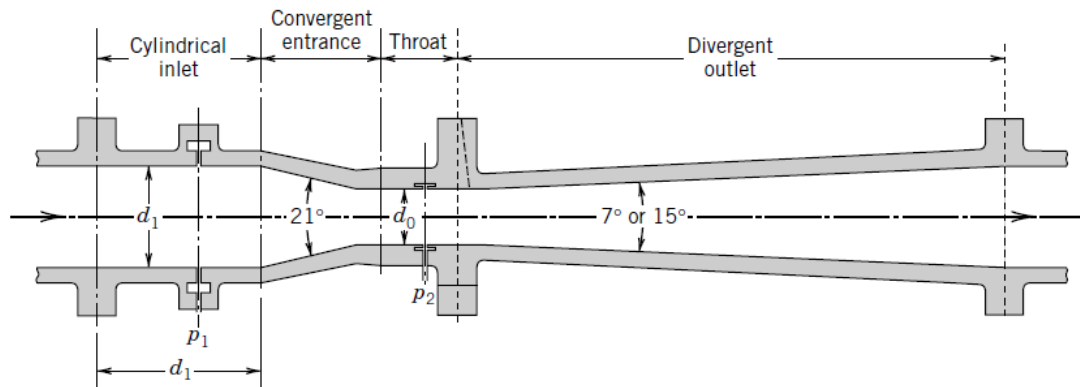


1. Medição de vazão volumétrica

▪ 1.4. Medidor de obstrução:

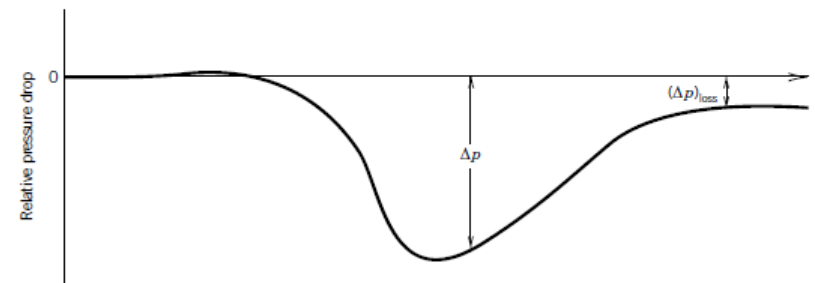
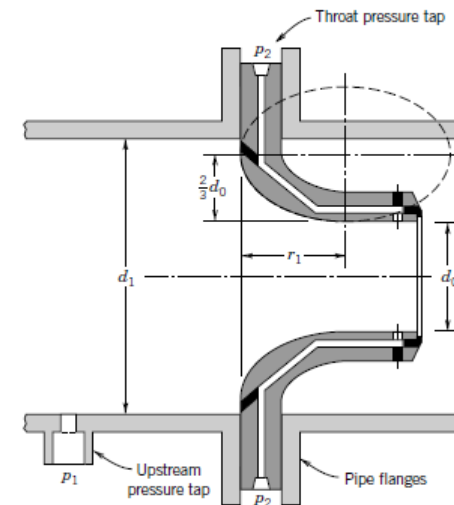
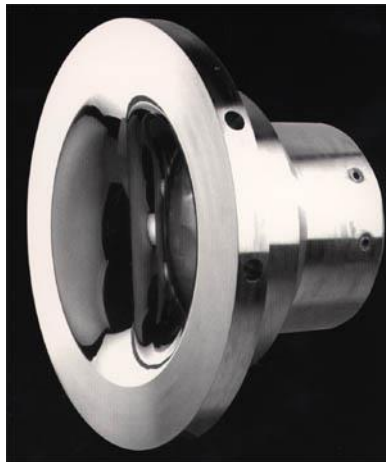
• Venturi:

- Comprimento grande e queda de pressão mínima.



1. Medição de vazão volumétrica

- 1.4. Medidor de obstrução:
 - Bocal:
 - Comprimento médio e queda de pressão média.

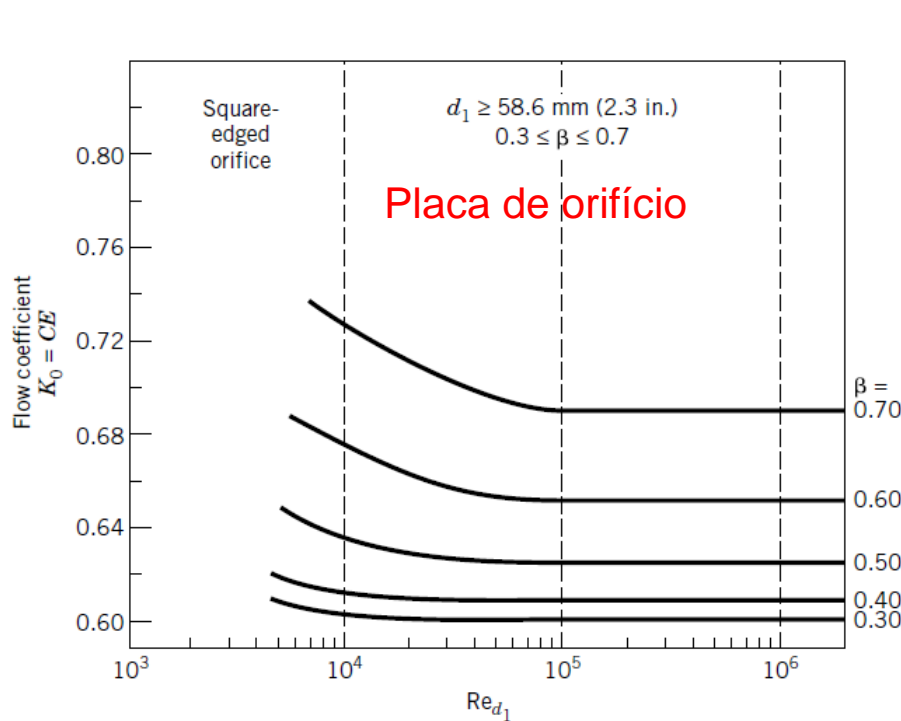


1. Medição de vazão volumétrica

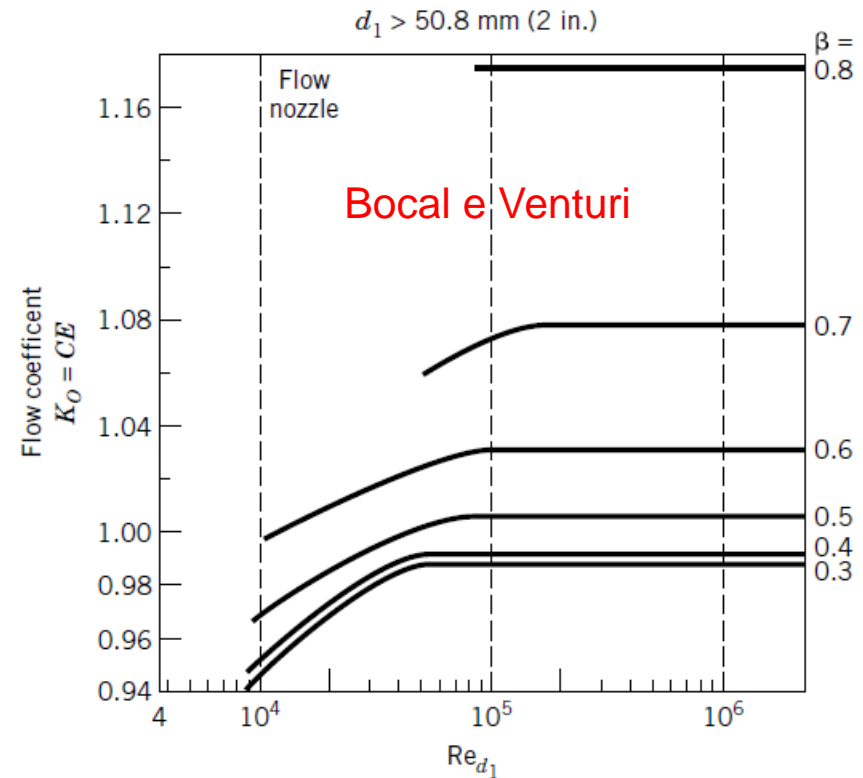
- 1.4. Medidor de obstrução:
 - Coeficiente de escoamento:

$$Re_{d_1} = \frac{4Q}{\pi d_1 \nu}$$

$$Q = Y K_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$



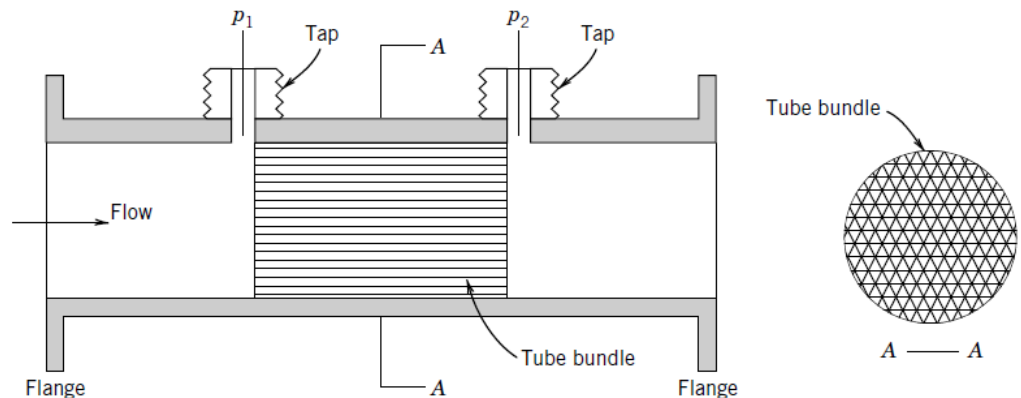
$$K_0 = \frac{1}{(1 - \beta^4)^{1/2}} (0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 91.71\beta^{2.5}Re_{d_1}^{-0.75})$$



1. Medição de vazão volumétrica

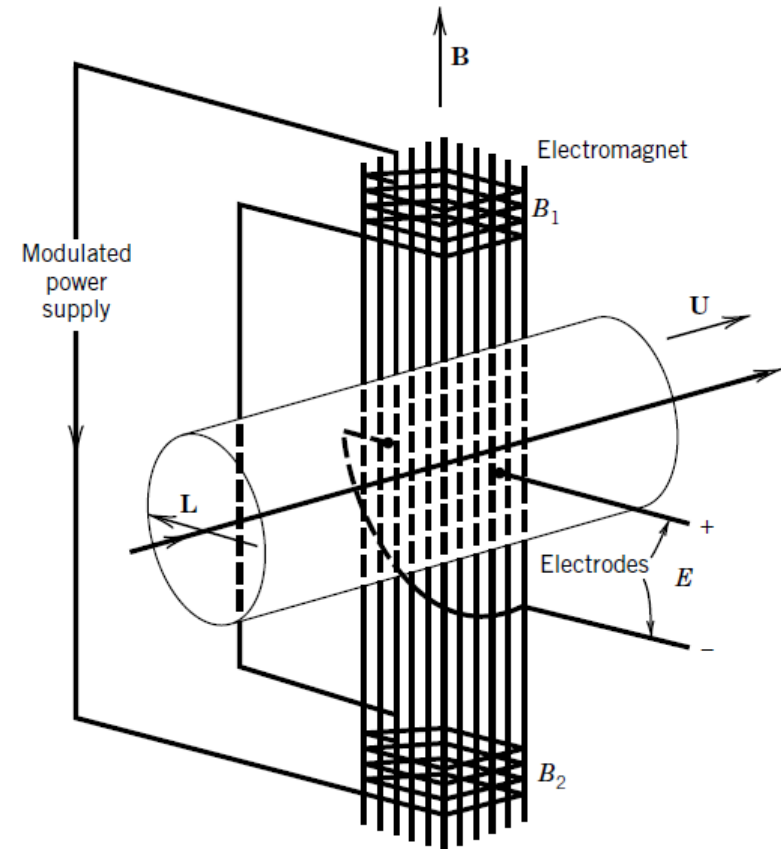
▪ 1.4. Medidor de obstrução:

- **Escoamento laminar:** no regime laminar, a relação entre vazão e pressão se torna linear, $Q = K\Delta p$. Esta condição pode ser atingida reduzindo o diâmetro da obstrução d_0 ;
- **Bocal sônico:** redução abrupta de d_0 para medição de gases;
- **Elemento laminar:** divisão do tubo em canais menores, forçando o escoamento laminar. Não aplicável em suspensões.



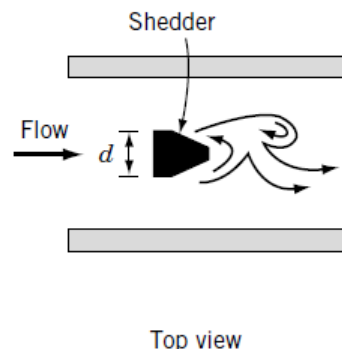
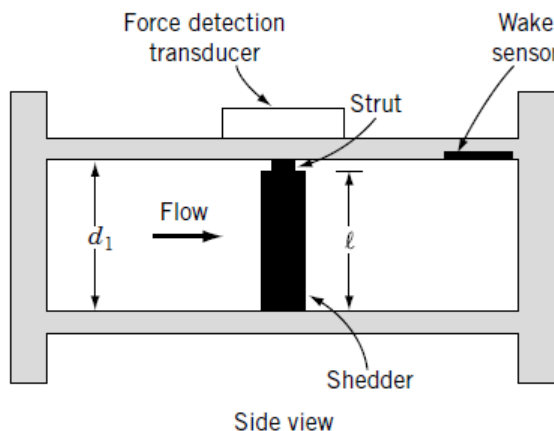
1. Medição de vazão volumétrica

- 1.5. Medidor eletromagnético:
 - Para **fluidos condutores**, a velocidade do escoamento (vazão volumétrica) é medida aplicando um campo magnético transversal B e medindo a tensão induzida E .
 - Método não-invasivo.



1. Medição de vazão volumétrica

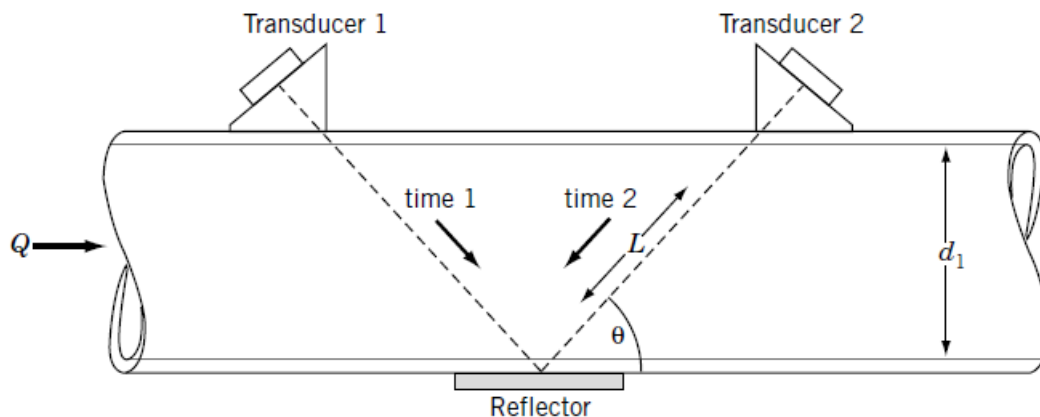
- **1.6. Vortex shedder (medidor de desprendimento de vórtices):**
 - Medição da frequência de vibração devido ao desprendimento de vórtices em um anteparo. Resposta aproximadamente linear.



1. Medição de vazão volumétrica

▪ 1.7. Medidor de tempo de trânsito:

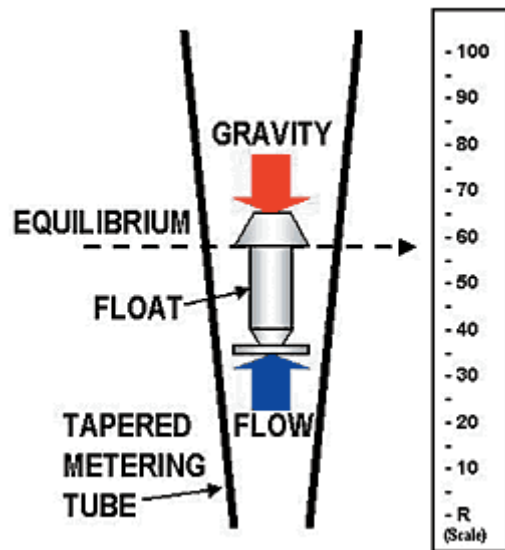
- Baseado na diferença do tempo de propagação do som através do escoamento. Utiliza pares de emissor-detector ultrassônicos instalados na parede da tubulação. Não-invasivo.



1. Medição de vazão volumétrica

▪ 1.8. Rotâmetro:

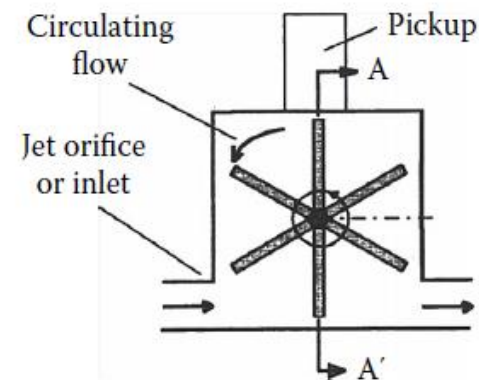
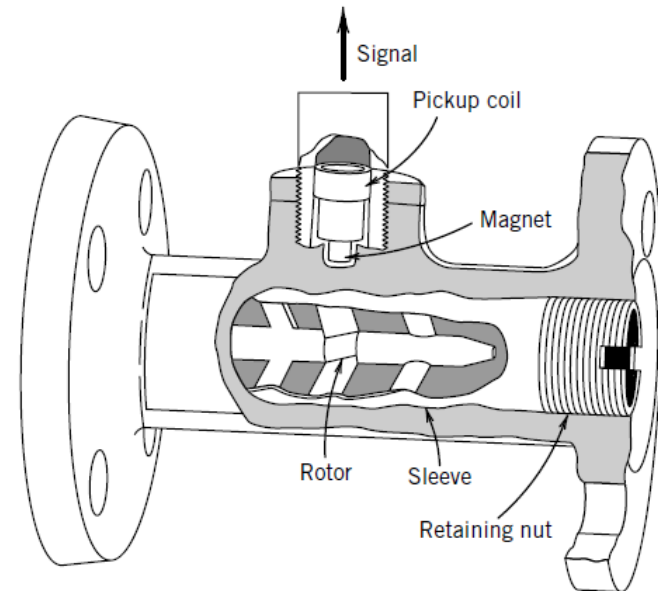
- Baseado no deslocamento vertical de um flutuador em função da vazão de fluido transversal. Utilizado para monitoramento de linha de gases.



1. Medição de vazão volumétrica

■ 1.9. Outro métodos:

- Medidor de turbina;
- Medidor de impulsor;
- Medidor de deslocamento positivo;
- Medidor de efeito Doppler.



2. Medição de vazão mássica

▪ 2.1. Medidores térmicos:

- A taxa de variação de energia \dot{E} devido à mudança da temperatura ΔT de um fluido em movimento é

$$\boxed{\dot{E} = \dot{m}c_p\Delta T} \quad (7.9)$$

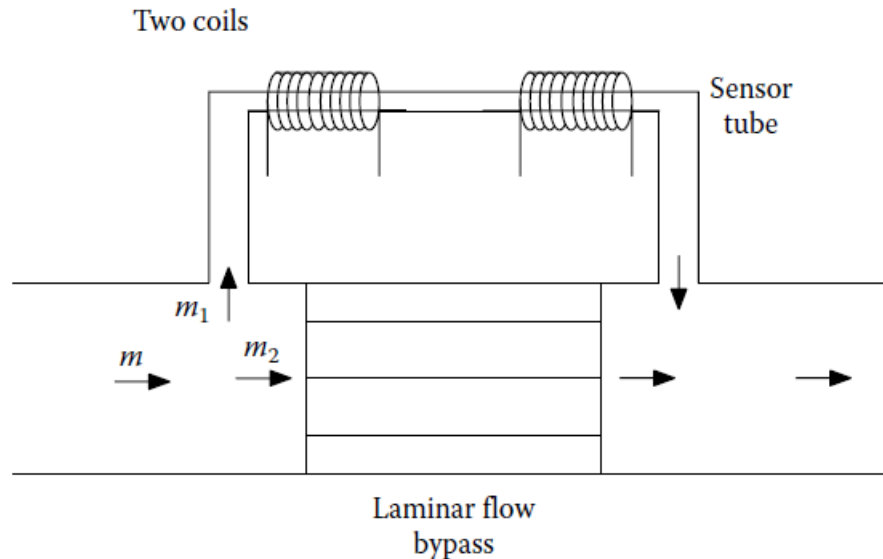
- Onde c_p é o calor específico do fluido;
- A vazão mássica \dot{m} é estimada controlando \dot{E} e medindo ΔT ;
- **Tipos de medidores:**
 - Anemômetro térmico;
 - Medidor de corrente;
 - Medidor de dispersão térmica.

2. Medição de vazão mássica

▪ 2.1. Medidores térmicos:

• Medidor de corrente:

- Uma corrente controlada é aplicada no filamentos condutores, transferindo energia ao fluido. A temperatura do fluido é medida antes e depois do sensor.

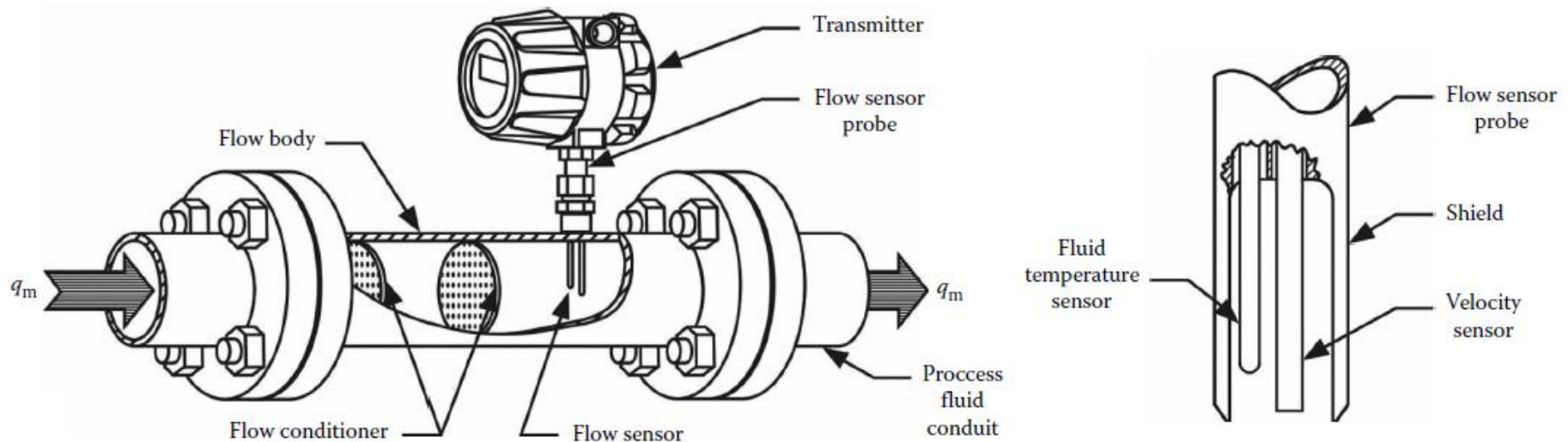


2. Medição de vazão mássica

▪ 2.1. Medidores térmicos:

- **Medidor de dispersão térmica:**

- Possui dois RTDs para detectar velocidade e temperatura. O sensor de velocidade é aquecido por uma corrente de controle, enquanto que o sensor de temperatura é utilizado apenas para monitoramento.



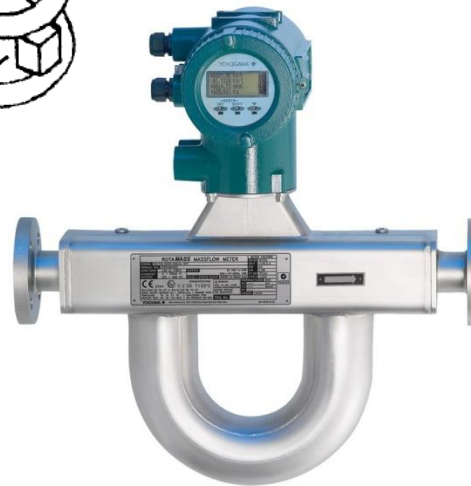
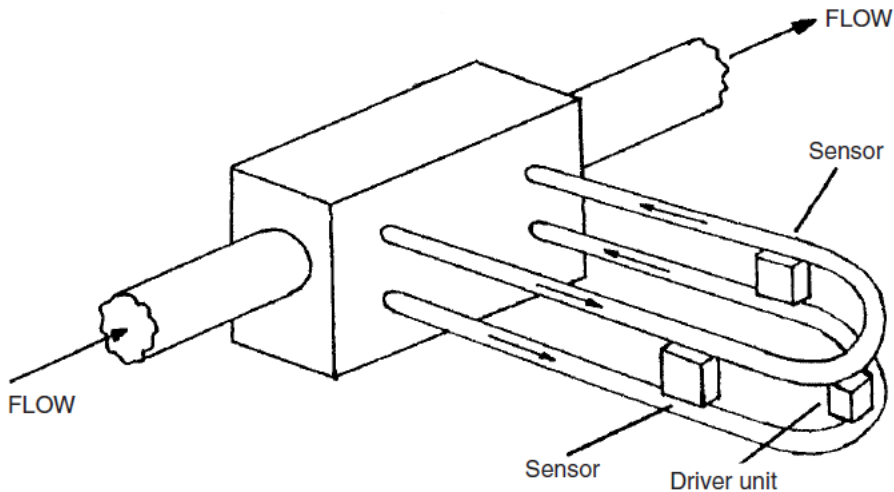
2. Medição de vazão mássica

▪ 2.2. Medidor de Coriolis:

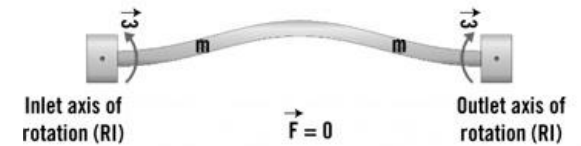
- Consiste de um par de tubos paralelos (ou um único tubo com seções paralelas) vibrantes. **Os tubos são defletidos devido ao escoamento de fluido (vazão mássica) em seu interior.**
- O par de tubos é excitado através de um transdutor eletromecânico na frequência de ressonância, com defasagem de 180° . As partículas no fluido são submetidas a forças decorrentes das vibrações, induzindo movimento na direção ortogonal ao escoamento por forças de Coriolis, que por sua vez causam deflexão dos tubos (superpostas na vibração);
- A **vazão mássica** é medida indiretamente a partir da **deflexão dos tubos** (sobreposta nas vibrações de excitação).

2. Medição de vazão mássica

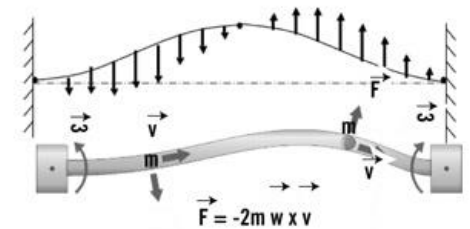
2.2. Medidor de Coriolis:



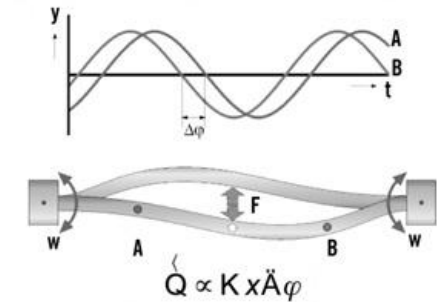
Vibrating tube that has 2 axes of rotation, no flow or twist



Distribution of forces, superimposed cause tube to deform



The resulting force will cause points A and B to be out of phase
The angle is proportional to mass flow rate



Questionário

▪ Questionário:

- 1) Do ponto de vista da aplicação, qual é a necessidade de medir a vazão mássica ao invés da vazão volumétrica, e vice-versa?
- 2) Todos os sensores de vazão podem ser empregados para medir a velocidade do escoamento?
- 3) Descreva as vantagens e desvantagens da placa de orifício, bocal e Venturi;
- 4) Como funciona um micro-reômetro?

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

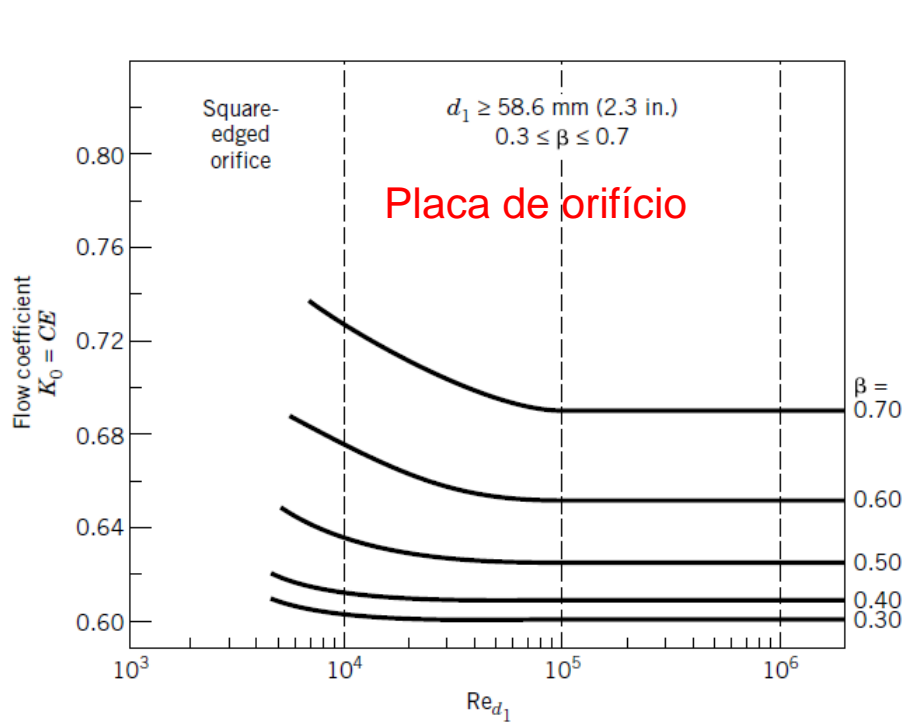
- **Ex. 7.1)** Uma placa de orifício (furo com diâmetro de 10 cm) é utilizada para medir o escoamento de água em um duto (diâmetro interno de 20 cm). Um manômetro de mercúrio é empregado para medir a queda de pressão devido ao medidor, indicando 50 cm Hg. Determinar a vazão mássica do escoamento.
 - Densidade da água: $\sim 998 \text{ kg/m}^3 @ 20^\circ\text{C}$;
 - Densidade do mercúrio: $\sim 13579 \text{ kg/m}^3 @ 20^\circ\text{C}$.

Exercícios

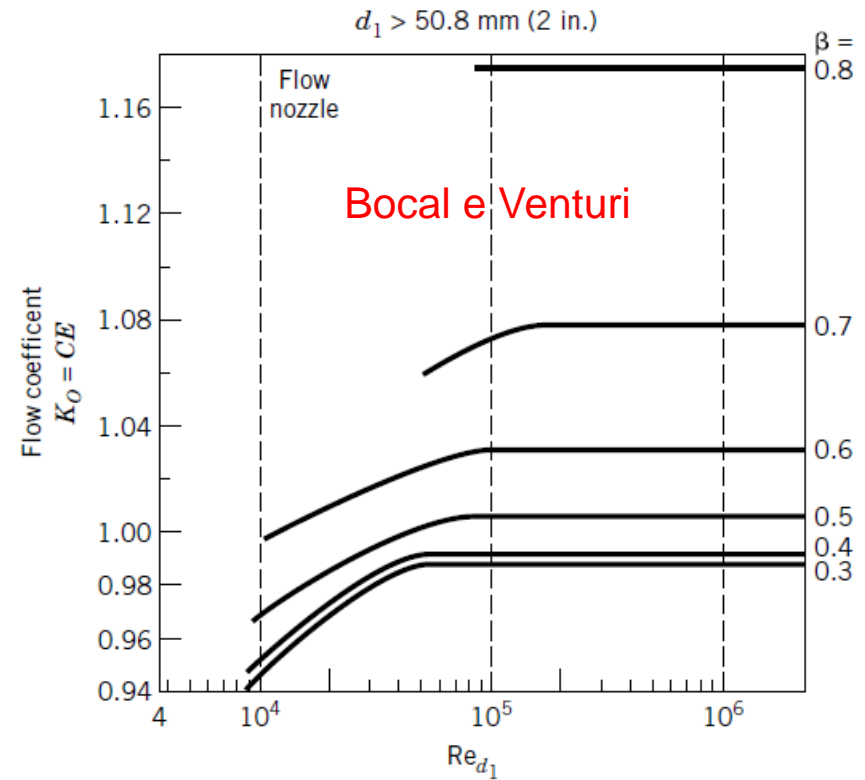
- Ex. 7.1)
 - Coeficiente de escoamento:

$$Re_{d_1} = \frac{4Q}{\pi d_1 \nu}$$

$$Q = Y K_o A_o \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$



$$K_o = \frac{1}{(1 - \beta^4)^{1/2}} (0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 91.71\beta^{2.5}Re_{d_1}^{-0.75})$$



Exercícios

▪ Ex. 7.1)

- Manômetro:

- $\Delta p = Hg(\rho_m - \rho) = 6.17 \times 10^4 \text{ Pa};$

- Placa de orifício:

- $\beta = \frac{d_0}{d_1} = 0.5;$

- Como não é possível calcular Re_d (depende de Q), estimar o fator de escoamento na região constante ($Re_d \geq 10^5$): $K_0 = 0.625;$

- $Q = K_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = 5.46 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s};$

- Verificando o regime de escoamento: $Re_d = \frac{4Q}{\pi d_0 \nu} = 6.42 \times 10^5 \text{ (OK!)}$

Exercícios

- **Ex. 7.2)** Um manômetro de tubo inclinado (30°) preenchido com fluido manométrico (1910 kg/m^3) é utilizado para medir a queda de pressão em um Venturi instalado em tubulação de água (998 kg/m^3) à temperatura ambiente.
 - **a)** Determine a queda de pressão para um deslocamento na escala do manômetro de 4,5 cm;
 - **b)** Sabendo que o tubo e a região de estrangulamento do Venturi possuem diâmetros de 25 cm e 10 cm, respectivamente, e que o coeficiente de descarga do Venturi é $\sim 0,975$, determine a vazão volumétrica e a vazão mássica do escoamento.

Exercícios

▪ Ex. 7.2)

- Manômetro:

- $\Delta p = L \sin \theta g(\rho_m - \rho) = 201.3 \text{ Pa};$

- Venturi:

- Coeficiente de escoamento: $K_0 = CE = 0.975 \cdot 1.013 = 0.988;$

- Vazão volumétrica: $Q = K_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = 4.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s};$

- Vazão mássica: assumindo ρ constante, $\dot{m} = \rho Q = 4.89 \text{ kg/s}.$

Exercícios

- **Ex. 7.3)** Considere um escoamento de ar a 38°C através de um tubo com 6 cm de diâmetro. A queda de pressão gerada por um bocal com orifício de 3 cm é de 75 cm H_2O .
 - **a)** Determine o coeficiente de expansão adiabática para uma pressão de entrada $p_1 = 94,4 \text{ kPa}$;
 - **b)** Determine a vazão volumétrica do escoamento.

Exercícios

▪ Ex. 7.3)

• a) Coeficiente de expansão adiabática:

- $\gamma_{ar} = 11.13 \text{ N/m}^3 @ 38^\circ\text{C};$
- $\gamma_{H_2O} = 9.81 \text{ kN//m}^3;$
- $\Delta p = (\gamma_{H_2O} - \gamma_{ar})H = (9.81 - 0.01) \times 10^3 \cdot 75 \times 10^{-2} = 7350 \text{ Pa};$
- $\frac{\Delta p}{p_1} = \frac{7350}{94.4 \times 10^3} = 0.08;$
- $\beta = \frac{d_0}{d_1} = \frac{3}{6} = 0.5;$
- Da tabela $\rightarrow Y \cong 0.98$

Exercícios

▪ Ex. 7.3)

- a) Vazão mássica:

- Coeficiente de escoamento: escolhendo a região constante para $\beta = 0.5 \rightarrow K_0 \cong 1$;

- $Q = YK_0A0\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = 0.98 \cdot 1 \cdot 7.01 \times 10^{-4} \sqrt{2 \frac{7350}{1.14}} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s};$

- Obs: Verificar o valor de K_0 pelo número de Reynolds.

Exercícios

- **Ex. 7.4)** A vazão de água a 15°C através de um tubo de 10 cm é $0,5 \text{ m}^3/\text{min}$.
 - **a)** Projete um Venturi que produza uma queda de pressão de 76 cm H_2O para a vazão especificada.

Exercícios

▪ Ex. 7.4)

• a) Venturi:

• Água a 15°C: $\gamma_{H_2O} = 9.81 \times 10^3 \text{ N/m}^2$, $\nu = 1.14 \text{ mm}^2/\text{s}$;

• $\Delta p \cong \gamma_{H_2O} H = 7.46 \times 10^3 \text{ Pa}$;

$$\bullet \quad Q = K_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \Rightarrow K_0 A_0 = 0.0022$$

Exercícios

▪ Ex. 7.4)

• a) Venturi:

- Para $\beta = 0.5$, $d_0 = 5 \text{ cm}$, $A_0 = 0.002 \rightarrow K_0 \cong 1$;
- Nestas condições, $Re_d = \frac{4Q}{\pi d_1 \nu} = 8 \times 10^4$
- O valor é compatível com a tabela.
- Obs: testar os outros valores de β .