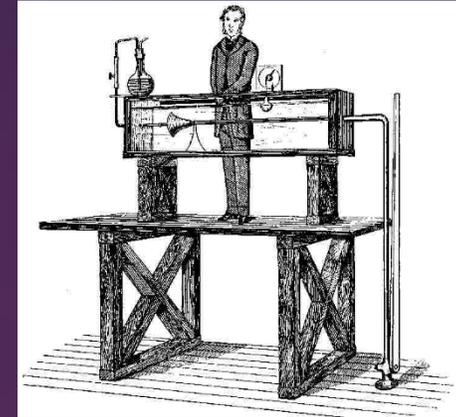


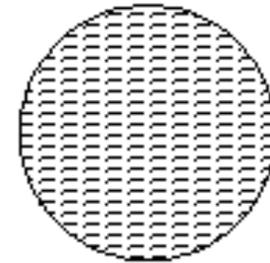
$$hf = K \cdot \frac{L \cdot V^m}{D^n}$$



# Aula 6 – Condutos Forçados e Perdas de Carga (parte 1)

# Condutores forçados

- ▶ São canalizações em que o escoamento ocorre a uma pressão diferente da pressão atmosférica.
- ▶ - Sempre fechados e escoamento com seção completamente cheia
- ▶ Escoamento por gravidade ou bombeamento



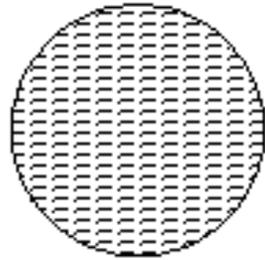
---

$P \neq P_{atm}$

Seção plena

Bomba ou gravidade

## CONDUTOS FORÇADOS

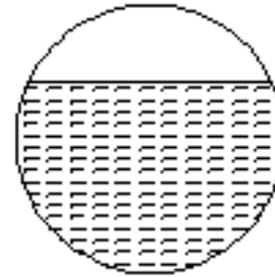


$$P \neq P_{atm}$$

Seção plena

Bomba ou gravidade

## CONDUTOS LIVRES



$$P = P_{atm}$$

Seção parcial

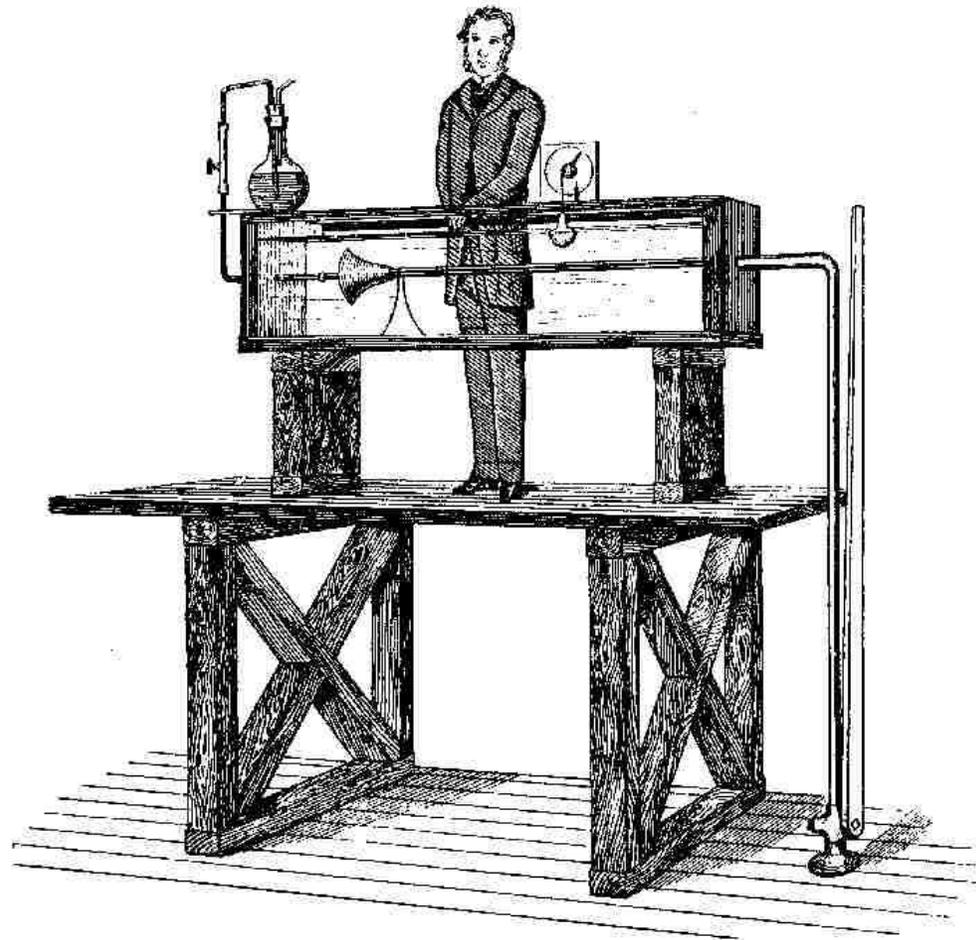
Gravidade

# Condutores forçados

## Histórico - escoamento de líquidos em condutores forçados

- ❖ Perdas de carga são proporcionais à velocidade de escoamento
  - Gotthilf Heinrich Ludwig **HAGEN** (Prússia, 1830):  $h_f \propto V$
  - Jean-Louis-Marie **POISEUILLE** (França, 1840):  $h_f \propto V^n$ ;  $n \approx 2$

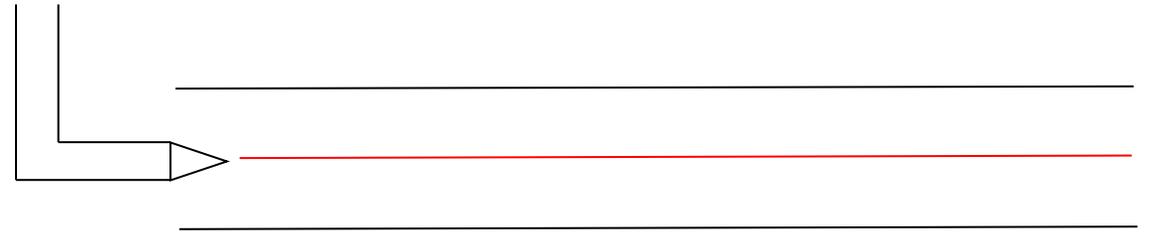
# Experimento de Osborne Reynolds (1883)



Fonte: Manchester School of Engineer  
(<http://www.mace.manchester.ac.uk>)

# Regime laminar

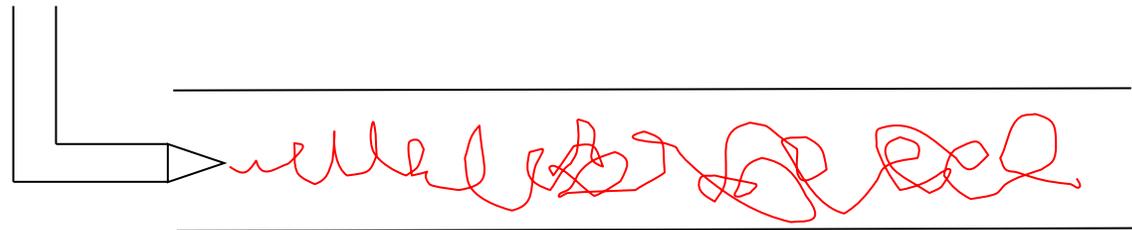
- ▶ Reynolds observou que:
- ▶  $V < V_{\text{crítica}} \rightarrow$  corante retilíneo e a trajetória das partículas não se misturava
- ▶ As partículas fluidas apresentam trajetórias bem definidas e não se cruzam



**NR < 2.000  $\rightarrow$  Regime laminar**

# REGIME TURBULENTO

- ▶  $V > V_{\text{crítica}} \rightarrow$  corrente se mistura em um movimento desordenado
- ▶ Trajetórias das partículas são desordenadas



**$NR > 4.000 \rightarrow$  Regime turbulento**

# Regimes de escoamento

$2.000 > NR > 4.000 \rightarrow$  zona crítica  $\rightarrow$  Transição

# Experimento de Osborne Reynolds (1883)

## ▶ Observações de Reynolds:

▶ - Diâmetro:  $D \downarrow \Rightarrow \downarrow$  Turbulência  
 $D \uparrow \Rightarrow \uparrow$  Turbulência

▶ Viscosidade cinemática ( $\nu$ , "ni"):

$\nu \uparrow \Rightarrow \downarrow$  Turbulência

$\nu \downarrow \Rightarrow \uparrow$  Turbulência

▶ Número de Reynolds:  $Re = \frac{V \times D}{\nu}$

# Número de Reynolds

$$Re = NR = \frac{V \text{ (m s}^{-1}\text{)} \cdot D \text{ (m)}}{\nu \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}}$$

- ▶ NR = número de Reynolds (adimensional)
- ▶ V = velocidade média (m/s)
- ▶ D = diâmetro do conduto (m)
- ▶  $\nu$  = Viscosidade cinemática do líquido (m/s<sup>2</sup>)

Tipo de escoamento:

Escoamento laminar:

$$Re \leq 2000$$

Transição:

$$2000 < Re \leq 4000$$

Escoamento turbulento:

$$Re > 4000$$

# Limites de velocidade

Limites de velocidade em escoamento de líquidos

- Mínimo: evita sedimentação de partículas

Água não tratada: 0,4 m/s

Esgoto: 0,6 m/s

Água tratada: sem limite mínimo

- Máximo: evita perda de carga excessiva e desgaste prematuro de condutos

$V \leq 2,5$  m/s

Medida prática:  $V_{\max} = 2,0$  m/s (Tubos de PVC e Polietileno)

## Exemplo:

- ▶ Qual o regime de escoamento da água a 20 °C em um conduto de  $\varnothing = 0,05$  m com uma velocidade de  $1 \text{ m s}^{-1}$  ?

$$\nu_{\text{água } 20^{\circ}\text{C}} = 10^{-6} = 0,000001 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

- ▶ Qual deveria ser a velocidade de escoamento do exemplo anterior para que o regime se tornasse laminar? (Regime laminar:  $Re \leq 2000$ )

# Exemplo 1

Qual o número de Reynolds para o escoamento de água a 20°C num tubo de 50 mm de diâmetro com velocidade de escoamento de 1 m s<sup>-1</sup>?

Dados:

$$D = 50 \text{ mm} = 0,05 \text{ m}$$

$$V = 1 \text{ m/s}$$

T = 20°C ⇒ viscosidade cinemática da água (Tabela):  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$NR = \frac{V (m s^{-1}) \cdot D (m)}{\nu (m^2 s^{-1})}$$

$$NR = \frac{1 \cdot 0,05}{10^{-6}} = 50.000$$

Escoamento turbulento

## Exemplo 2

- Qual deveria ser a velocidade de escoamento do exemplo anterior para que o regime se tornasse laminar? (Regime laminar:  $Re \leq 2000$ )

Regime laminar:  $Re \leq 2000$

Obs.: Regime laminar ocorre quando

$V$  é muito baixa

$D$  é muito pequeno

$\nu$  é muito alta

Maioria dos casos:

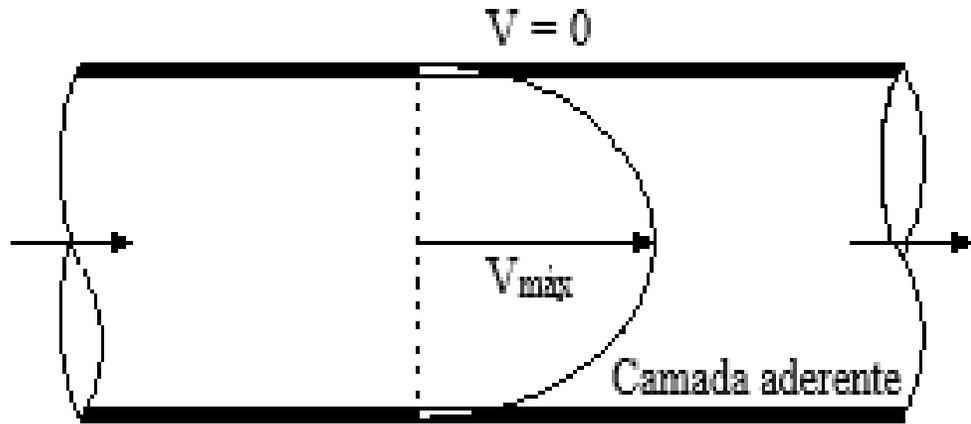
regime de ESCOAMENTO TURBULENTO

$$NR = \frac{V \text{ (m s}^{-1}\text{)} \cdot D \text{ (m)}}{\nu \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}}$$

$$2000 = \frac{V \cdot 0,05}{10^{-6}} \rightarrow V = 0,04 \text{ m/s}$$

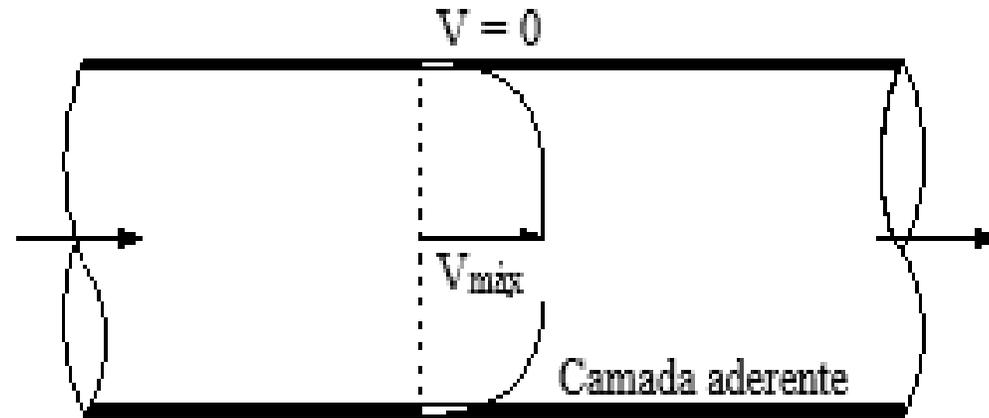
# Distribuição de velocidade em tubos

$$V_m = \text{Velocidade média} = \frac{Q}{S}$$



Escoamento Laminar

$$V_{\max} = 2 V_m$$
$$V_m \approx 0,5 V_{\max}$$



Escoamento Turbulento

$$V_{\max} = 1,1 \text{ a } 1,25 V_m$$
$$V_m \approx 0,8 \text{ a } 0,9 V_{\max}$$