UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSSISTEMAS

LEB0472 – HIDRÁULICA

Prof. Fernando Campos Mendonça

AULA 6 – ROTEIRO

Tópicos da aula:

- Resolução das questões da 1ª prova

1) Condutos forçados
   - Conceitos
   - Experiência de Reynolds
2) Perda de carga em canalizações
   - Desenvolvimento teórico
     - Perdas de carga
       - Distribuída
       - Localizada
   - Fórmulas para o cálculo da perda de carga distribuída
     - Fórmula de Flamant
     - Fórmula de Hazen-Williams
     - Fórmula Universal
3) Exercício para entrega (Provinha 6)

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSSISTEMAS

LEB0472 – HIDRÁULICA

Prof. Fernando Campos Mendonça

Aula 6 –Hidrodinâmica – Condutos Forçados e Perdas de Carga (Parte 1)

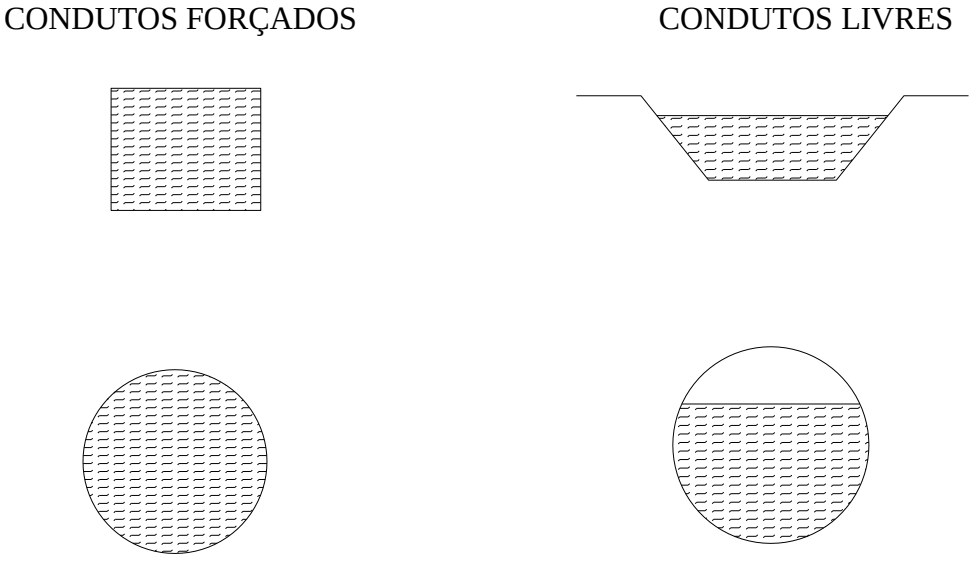
1. Condutos forçados

1.1. Definição:

- São canalizações em que o escoamento ocorre a uma pressão diferente da pressão atmosférica.
- Sempre fechados e escoamento com seção cheia

1.2. Comparação – Condutos forçados x Condutos livres

Esquema



PRESSÃO	P ≠ Patm	P = P_{atm}
ESCOAMENTO	Seção plena	Seção parcial
ENERGIA	Bomba ou gravidade	Gravidade

2. Experiência de Reynolds

2.1. Histórico - escoamento de líquidos em condutos forçados

a) Perdas de carga são proporcionais à velocidade de escoamento

- Gotthilf Heinrich Ludwig **HAGEN** (Prússia, 1830): $hf \alpha V$

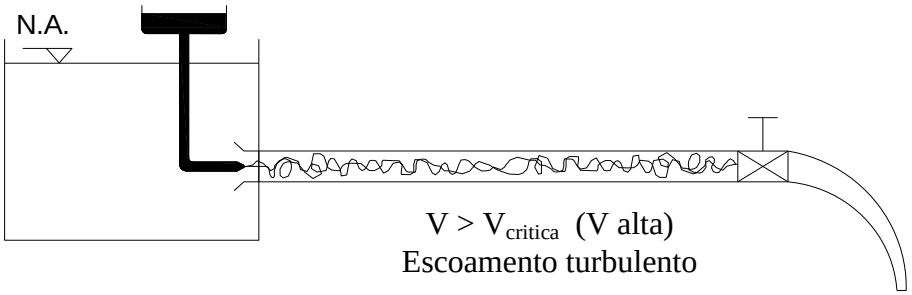
- Jean-Louis-Marie **POISEUILLE** (França, 1840): $hf \alpha V^n$; $n \approx 2$

---

b) Osborne REYNOLDS (Irlanda do Norte e Inglaterra, 1883):

- <u>Experimento em laboratório</u>

$V < V_{crítica}$ (V baixa)
Escoamento laminar



$V > V_{critica}$ (V alta)
Escoamento turbulento

<u>Observações de Reynolds</u>:

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

- Viscosidade cinemática (ν,"ni"): $\nu \uparrow \Rightarrow \downarrow$ Turbulência
  $\nu \downarrow \Rightarrow \uparrow$ Turbulência

<u>Número de Reynolds</u>: $Re = \frac{V \times D}{\nu}$

V – velocidade de escoamento, m/s
D – diâmetro do conduto, m
ν – viscosidade cinemática do líquido, m^2/s

Definição do tipo de escoamento:

Escoamento laminar:	$Re \leq 2000$
Transição:	$2000 < Re \leq 4000$
Escoamento turbulento:	$Re > 4000$

2.2. Exemplo

a) Qual o número de Reynolds para o escoamento de água a 20ºC num tubo de 50 mm de diâmetro com velocidade de escoamento de 1 m/s?

Dados:
D = 50 mm = 0,05 m
V = 1 m/s
T = 20ºC $\Rightarrow$ viscosidade cinemática da água (Tabela): $\nu = 10^{-6}$ m^2/s

Cálculo: $Re = \frac{V \times D}{\nu} = \frac{1 \times 0,05}{10^{-6}} = 50000$ (Escoamento turbulento)

b) Qual deveria ser a velocidade de escoamento do exemplo anterior para que o regime se tornasse laminar?

Regime laminar: $Re \leq 2000$

$$Re = 2000 = \frac{V \times D}{\nu}$$

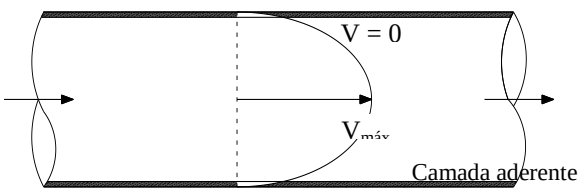
$$2000 = \frac{V \times 0,05}{10^{-6}} \Rightarrow V = 0,04 \text{ m/s}$$

Obs.: O regime de escoamento laminar ocorre quando

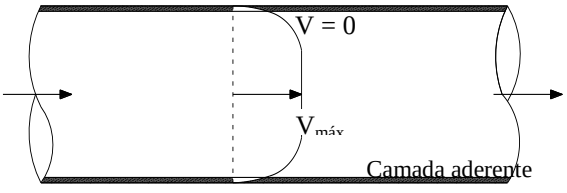
- V é muito baixa
- D é muito pequeno
- ν é muito alta

Na maioria dos casos trabalha-se com regime de escoamento turbulento.

3. Distribuição de velocidade em tubos



Escoamento laminar
$V_{max} = 2\ V_m$



Escoamento turbulento
$V_{max} = 1,1 \text{ a } 1,25\ V_m$

- Limites de velocidade em escoamento de líquidos

  - Mínimo: evita sedimentação de partículas (movimento laminar)

    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

4. Perdas de carga

4.1. Conceito

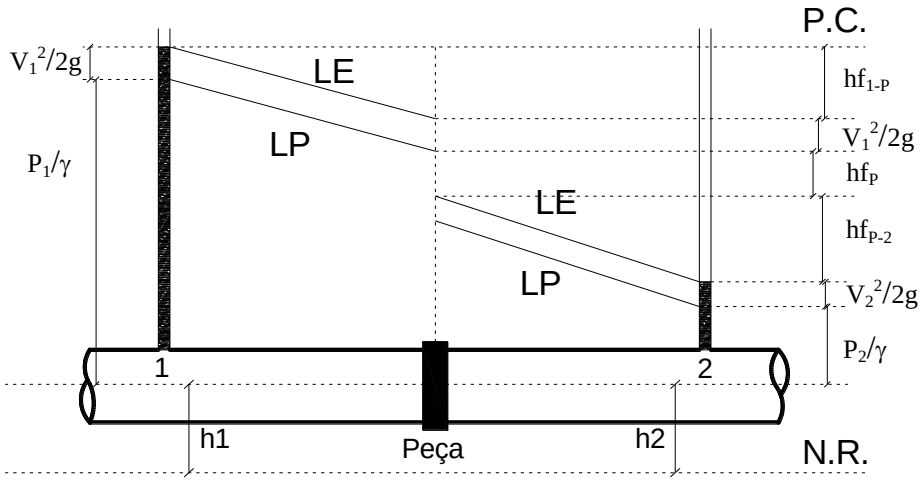
- Teorema de Bernoulli:
  - soma das energias ($P/\gamma + V^2/2g + h$) não é igual em dois pontos da tubulação
  - Perda de energia = PERDA DE CARGA
- Movimento laminar: perda devido à força de viscosidade (atrito interno)
- Movimento turbulento: perda devido à viscosidade e à inércia (atrito interno e externo)
- Princípio de Lavoisier: Perda de carga = energia transformada em calor

4.2. Classificação

Perda de carga (hf – frictional head loss)

a) Distribuída – ao longo da tubulação ($hf_{1\text{-}P}$ e $hf_{P\text{-}2}$)

b) Localizada – peça e singularidades nas tubulações (hf_P)



$hf_{1\text{-}P}$ – perda de carga no tubo (do ponto 1 até a peça)
hf_P – perda de carga na peça
$hf_{P\text{-}2}$ – perda de carga no tubo (desde a peça até o ponto 2)

4.3. Determinação da perda de carga principal (distribuída na tubulação)

a) Características do escoamento de líquidos:

A perda de carga é:

- INDEPENDENTE do material da tubulação no ESCOAMENTO LAMINAR;
- DEPENDENTE do material da tubulação no ESCOAMENTO TURBULENTO;
- diretamente proporcional a V^m (ou Q^m); m = potência de V ou de Q
- diretamente proporcional a L
- inversamente proporcional a D^n; n = potência de D
- independente da posição da canalização (no escoamento permanente)
- independente da pressão sob a qual o líquido escoa

Cálculo da perda de carga

Variáveis envolvidas:

K – coeficiente que representa a natureza do material da canalização

V – velocidade do escoamento

L – comprimento da canalização

D – diâmetro

- Formato geral das equações de perda de carga:

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

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

K – coeficiente de proporcionalidade

Movimento turbulento – K depende do material da tubulação
Movimento laminar – K não depende do material da tubulação

hf – perda de carga, em mcl (metros de coluna de líquido)

L – comprimento da tubulação, em m

D – diâmetro da tubulação, em m

V – velocidade de escoamento, em m/s

Outra apresentação: Perda de carga unitária (J)

$$J = \frac{hf}{L}$$

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

J – perda de carga em metros de coluna do líquido/metro de tubulação (ou m/m)

b) Formas de determinação

- Perda de carga em um trecho de tubulação (hf)
- Perda de carga unitária (J)

4.4. Fórmulas empíricas de perda de carga

- Obtidas em laboratório
- Válidas para condições específicas:
  - grupo de materiais
  - tipo de líquido
  - temperatura do líquido
  - faixa de diâmetros
  - geralmente regime de escoamento turbulento

Componentes:

hf – perda de carga, mca

Q – vazão, m3/s

V – velocidade, m/s

L – comprimento, m

D – diâmetro, m

4.4.1. Fórmula de Hazen-Williams

- Allan Hazen e Gardner Williams (USA, 1920)
- Aplicação:
  - Todos os materiais
  - Diâmetro: 2” a 120” (50 a 300 mm)

Apresentações:

a) **Perda de carga em tubulação de comprimento conhecido (hf):**

$$hf = 10{,}65 \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1{,}852} \cdot \frac{L}{D^{4{,}87}}$$

C – fator de atrito (depende do material)

b) Perda de carga unitária (J)

$$\mathrm{J} = \frac{\mathrm{hf}}{L} \qquad\qquad J = 10{,}65 \cdot \frac{Q^{1{,}852}}{C^{1{,}852}\, D^{4{,}87}}$$

c) Vazão:

$$Q = 0{,}2788 \cdot C \cdot D^{2{,}63} \cdot \left(\frac{hf}{L}\right)^{0{,}54} \quad \text{ou} \quad Q = 0{,}2788 \cdot C \cdot D^{2{,}63} \cdot J^{0{,}54}$$

d) Velocidade:

$$V = 0{,}355 \cdot C \cdot D^{0{,}63} \cdot \left(\frac{hf}{L}\right)^{0{,}54} \quad \text{ou} \quad V = 0{,}355 \cdot C \cdot D^{0{,}63} \cdot J^{0{,}54}$$

e) Diâmetro:

$$D = 1{,}625 \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{0{,}38} \cdot \left(\frac{L}{hf}\right)^{0{,}205} \quad \text{ou} \quad D = 1{,}625 \cdot \frac{Q^{0{,}38}}{C^{0{,}38}\, J^{0{,}205}}$$

Exemplos: uso da fórmula de Hazen-Williams

a) Diâmetro, vazão e perda de carga - Material do Prof. Tarlei

b) Vazão - Livro Geanini (Exemplos 6.10 a 6.13 - página 180 em diante)

4.4.2. Fórmula de Flamant

- Alfred-Aimé Flamant (França, 1883)

Apresentações:

a) Perda de carga em tubulação de comprimento conhecido (hf):

$$hf = 6{,}107 \cdot b \cdot \frac{L \cdot Q^{1{,}75}}{D^{4{,}75}}$$

b – fator de atrito (depende do material)

b) Perda de carga unitária (J)

$$J = \frac{hf}{L} \qquad \Rightarrow \qquad J = 6{,}107 \cdot b \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$$

c) Vazão:

$$Q = \frac{0{,}356}{b^{0,57}} \cdot D^{2,714} \cdot \left(\frac{hf}{L}\right)^{0,57} \text{ ou} \qquad Q = \frac{0{,}356}{b^{0,57}} \cdot D^{2,714} \cdot J^{0,57}$$

d) Velocidade:

$$V = \frac{0{,}453}{b^{0,57}} \cdot D^{0,714} \cdot \left(\frac{hf}{L}\right)^{0,57} \text{ ou} \qquad V = \frac{0{,}453}{b^{0,57}} \cdot D^{0,714} \cdot J^{0,57}$$

e) Diâmetro:

$$D = 1{,}464 \cdot b^{0,21} \cdot Q^{0,368} \cdot \left(\frac{L}{hf}\right)^{0,21} \qquad \text{ou} \qquad D = 1{,}464 \cdot b^{0,21} \cdot \frac{Q^{0,368}}{J^{0,21}}$$

Exemplos: uso da fórmula de Flamant

a) Livro Geanini (Exemplo 6.14 – pág. 187)
b) Material do Prof. Tarlei

4.5. Perdas de carga localizadas

- Cada peça instalada na tubulação causa perda de carga

- Perda que ocorre na peça = hf_L

- Importância:
  - Sistemas de bombeamento
  - Canalizações curtas com muitas conexões (instalações prediais)
  - Cabeçal de controle (irrigação localizada)

4.5.1. Cálculo das perdas de carga localizadas

a) Método dos coeficientes (K_P)

Cada peça tem um coeficiente K_P

$$hf_l = K_P \frac{V^2}{2g}$$

b) Método dos comprimentos equivalentes (Leq

- Acréscimo de comprimento à tubulação devido a cada peça

- Comprimento da tubulação: L

- Comprimento equivalente às peças na tubulação: Le

- Comprimento total: $L_T = L + Le$

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

TABELA A.2 - PERDA DE CARGA EM CONEXÕES - COMPRIMENTO EQUIVALENTE PARA TUBO RUGOSO (TUBO DE AÇO-CARBONO, GALVANIZADO OU NÃO)

Diâmetro Nominal (DN)	Tipo de Conexão					
	Cotovelo 90°	Cotovelo 45°	Curva 90°	Curva 45°	Tê passagem direta	Tê passagem lateral
15	0,5	0,2	0,3	0,2	0,1	0,7
20	0,4	0,3	0,5	0,3	0,1	1,0
25	0,9	0,4	0,7	0,4	0,2	1,4
32	1,2	0,5	0,8	0,5	0,2	1,7
40	1,4	0,6	1,0	0,6	0,2	2,1
50	1,9	0,9	1,4	0,8	0,3	2,7
65	2,4	1,1	1,7	1,0	0,4	3,4
80	2,8	1,3	2,0	1,2	0,5	4,1
100	3,8	1,7	2,7	--	0,7	5,5
125	4,7	2,2	--	--	0,8	6,9
150	5,6	2,6	4,0	--	1,0	8,2

TABELA A.3 - PERDA DE CARGA EM CONEXÕES - COMPRIMENTO EQUIVALENTE PARA TUBO LISO (TUBO DE PLÁSTICO, COBRE OU LIGA DE COBRE)

Diâmetro Nominal (DN)	Tipo de Conexão					
	Cotovelo 90°	Cotovelo 45°	Curva 90°	Curva 45°	Tê passagem direta	Tê passagem lateral
15	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3
20	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4
25	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1
32	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6
40	3,2	1,0	1,2	0,6	2,2	7,3
50	3,4	1,3	1,3	0,7	2,3	7,6
65	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8
80	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0
100	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3
125	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0
150	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1

Exemplo: Livro Geanini - Exemplo 6.15 – pág. 192

---

5. Exercício (Provinha 6)

Perda de carga, vazão e diâmetro com fórmulas de Hazen-Williams e de Flamant