Mecânica dos Fluidos

Perda de Carga no Escoamento em Tubos

Prof. Rodolfo Rodrigues
Universidade Federal do Pampa

BA000200 – Fenômenos de Transporte
Campus Bagé

10 e 17 de abril de 2017

Introdução

Introdução

- O **conduto** é qualquer estrutura sólida destinada ao transporte de fluidos;
- O **conduto forçado** é quando o fluido escoa preenchendo totalmente o conduto;
- O **contudo livre** é quando o fluido que escoa apresenta uma superfície livre. Este pode ser **aberto** ou **fechado**.

Introdução

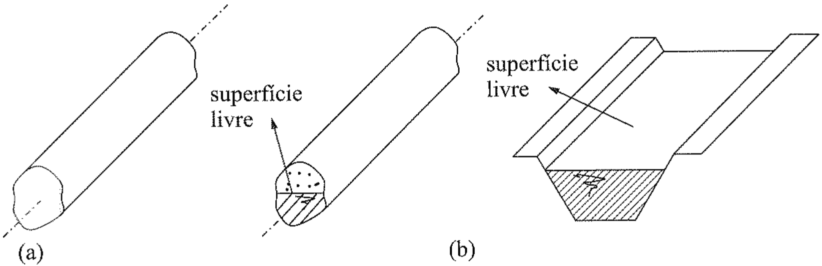


Figura 1: Classificação dos condutos: (a) **conduto forçado**; (b) **conduto livre**.

Fonte: Brunetti (2008).

Introdução

- O **tubo** é um **conduto fechado** e geralmente funciona como **conduto forçado**;
- A **tubulação** é um conjunto de tubos e seus diversos acessórios;
- Os **acessórios** de tubulações provocam mudanças de velocidade e direção do escoamento:
  Ex.: joelhos, tês, redutores/expansores, tampão, etc;
- As **válvulas** controlam a vazão ou interrompem o fluxo do escoamento de um tubo.

unipampa

Introdução

Raio e Diâmetro Hidráulicos

- Raio hidráulico, R_H, é:

$$R_H = \frac{A}{\sigma} \qquad [\mathrm{m}] \qquad (1)$$

- Diâmetro hidráulico, D_H, é:

$$D_H = 4 \cdot R_H \qquad [\mathrm{m}] \qquad (2)$$

onde A é a área transversal do escoamento do fluido e
σ é o perímetro "molhado".

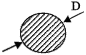
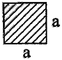
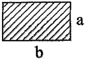
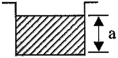
Introdução

Raio e Diâmetro Hidráulicos

- Perímetro “molhado” é o trecho do perímetro em que o fluido está em contato com a parede do conduto.
- Para um **conduto forçado circular** o diâmetro hidráulico é **igual** ao próprio **diâmetro do conduto**.

Introdução

Tabela 1: Raio e diâmetro hidráulicos para vários condutos.

	A	σ	R_H	D_H
	$\frac{\pi D^2}{4}$	πD	$\frac{D}{4}$	D
	a^2	$4a$	$\frac{a}{4}$	a
	ab	$2(a+b)$	$\frac{ab}{2(a+b)}$	$\frac{2ab}{a+b}$
	ab	$2a+b$	$\frac{ab}{2a+b}$	$\frac{4ab}{2a+b}$
	$\frac{a^2\sqrt{3}}{4}$	$3a$	$\frac{a\sqrt{3}}{12}$	$\frac{a\sqrt{3}}{3}$

Fonte: Brunetti (2008).

Perfil de Velocidade

- Para tubos circulares a **velocidade** é **zero na parede** e **máxima no centro** para escoamento laminar ou turbulento (Fig. 2);
- Neste caso, o perfil de velocidade para o **escoamento laminar** é:

$$v = v_{\max}\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \qquad [\mathrm{m/s}] \qquad (3)$$

Perfil de Velocidade

- E o perfil de velocidade para o **escoamento turbulento** é:

$$v = v_{\max}\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7} \qquad [\text{m/s}] \qquad (4)$$

- Para Engenharia uma relação importante é de $v_{\text{média}}$ a partir de $v_{\text{máx}}$ uma vez que somente esta última é medida:
  1. **Laminar:** $v_{\text{m}} = 0{,}5 \cdot v_{\text{máx}}$ e
  2. **Turbulento:** $v_{\text{m}} = 0{,}8167 \cdot v_{\text{máx}}$.

Perfil de Velocidade

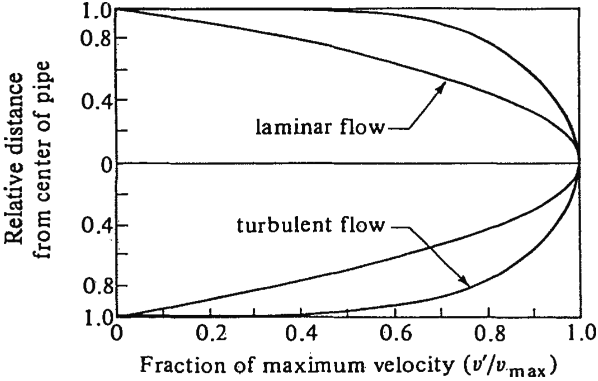


Figura 2: Distribuição de velocidade de um fluido em um tubo circular onde v' é a velocidade local e v_{max} é a velocidade máxima.

Fonte: Geankoplis (2003).

Camada Limite

Camada Limite em Placa Plana

- Seja uma **placa plana** de espessura pequena introduzida paralelamente a um escoamento uniforme e em regime permanente (Fig. 3);
- Seja a velocidade do fluido, ao longe da placa, uniforme v_0;
- Suponha-se que sejam medidas as velocidades ao longo de uma seção vertical (1) a (3);
- Verifica-se que junto à placa a velocidade é nula;

Camada Limite em Placa Plana

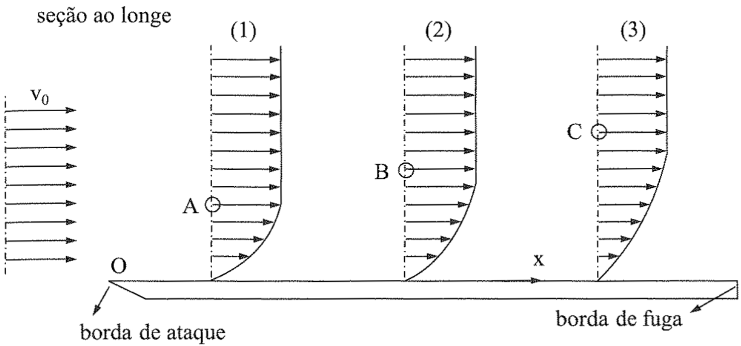


Figura 3: Perfis de velocidade de um escoamento paralelo a uma placa plana (1) a (3) e desenvolvimento de uma camada limite O, A, B e C.

Fonte: Brunetti (2008).

Camada Limite em Placa Plana

- Quando se percorre a vertical, v é crescente até em A coincide com v_0 e se mantém para os demais pontos;
- Para (2) e (3) verifica-se que os pontos (B) e (C) estão mais afastados da placa;
- Os pontos (O), (A), (B) e (C) pertencem a uma linha a partir da qual v passa a ter valor v_0;
- No escoamento o fluido fica dividido em 2 regiões (Fig. 4):
  - **Camada limite (CL):** $v > v_0$ devido à presença da placa e
  - **Fluido livre:** $v = v_0$, não sendo influenciado pela placa.

Camada Limite em Placa Plana

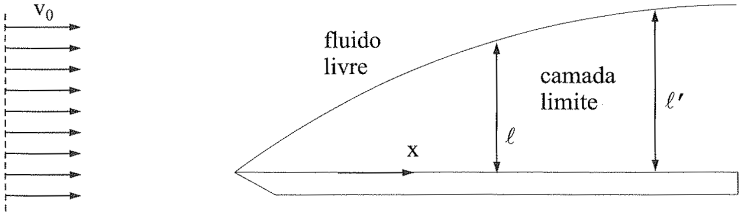


Figura 4: Representação das regiões de **camada limite (CL)** e de **fluido livre** no escoamento em uma placa plana.

Fonte: Brunetti (2008).

Camada Limite em Placa Plana

- A espessura ℓ' da camada limite (CL) é crescente ao longo da placa;
- O comprimento x_{cr} indica a transição da CL laminar para turbulenta (Fig. 5);
- A transição é observada pelo crescimento repentino da espessura da CL;
- A **subcamada limite laminar** é uma região de espessura δ muito pequena devido às baixas v junto à placa.

Camada Limite em Placa Plana

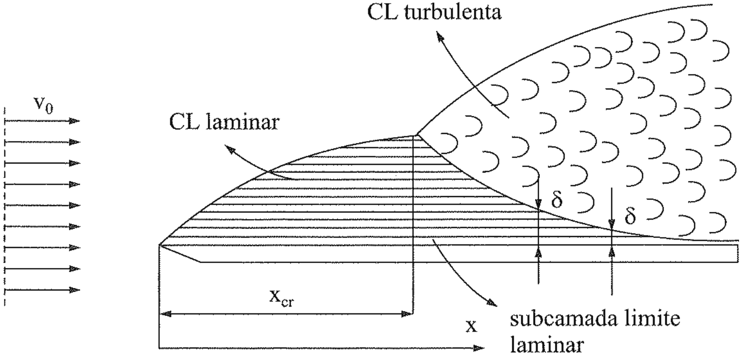


Figura 5: Transição da **camada limite (CL) laminar** para a **camada limite (CL) turbulenta**.

Fonte: Brunetti (2008).

Camada Limite em Conduto Forçado

- Seja o tubo de descarga de um tanque (Fig. 6);
- O fluido ao escoar no tubo forma uma CL crescente até preenchê-lo completamente para $\bar{x}$;
- O **regime dinamicamente estabelecido** é definido a partir deste ponto quando o perfil de v tem um formato constante em qualquer seção;

Camada Limite em Conduto Forçado

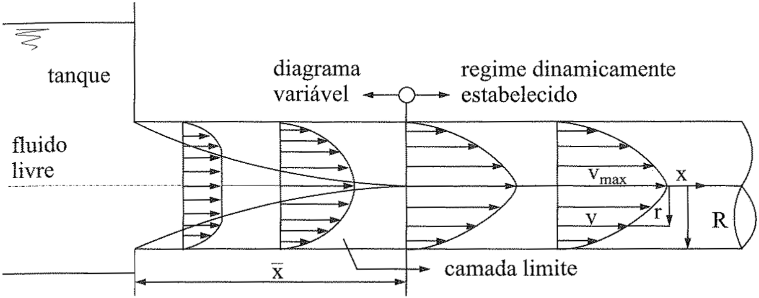


Figura 6: Diagrama de velocidades em um conduto de descarga de um tanque para **escoamento laminar**.

Fonte: Brunetti (2008).

Camada Limite em Conduto Forçado

- Se o preenchimento do tubo pela CL acontecer enquanto é **laminar**, então, daí para a frente, o escoamento será laminar;
- É mais frequente a CL acontecer enquanto já é **turbulento** e o escoamento será turbulento a partir do **regime dinamicamente estabelecido** (Fig. 7);
- Exceto junto às paredes onde ocorrerá o **filme (subcamada) laminar** de espessura δ.

Camada Limite em Conduto Forçado

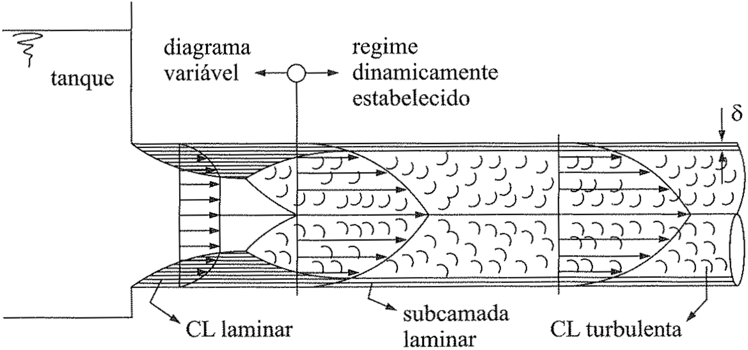


Figura 7: Diagrama de velocidades em um conduto de descarga de um tanque para **escoamento turbulento**.

Fonte: Brunetti (2008).

Perda de Carga

Perda de Carga

- A **perda de carga** é a energia perdida por unidade de peso do fluido quando este escoa;
- Há 2 tipos de perdas de carga:
  1. **Perda de carga distribuída** ou **contínua**:
     Acontece ao longo de tubos retos e de seção constante devido ao atrito das próprias partículas do fluido;
  2. **Perda de carga localizada** ou **singular**:
     Acontece em locais das instalações em que o fluido sofre perturbações bruscas no escoamento devido a acessórios e válvulas.
- A perda de carga total é a soma das perdas de carga distribuída e localizada.

Perda de Carga

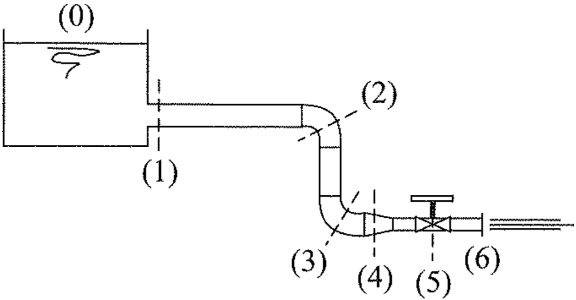


Figura 8: Indicação de tipos de perdas de carga em uma instalação: **perdas de carga distribuída** em (1 e 2), (2 e 3), (3 e 4), (4 e 5) e (5 e 6) e **perdas de carga localizada** em (1) estreitamento brusco, (2) e (3) cotovelos, (4) estreitamento e (5) válvula.

Fonte: Brunetti (2008).

Rugosidade Relativa

- Os condutos apresentam **asperezas** nas **paredes internas** que influem no escoamento;
- Estas asperezas apresentam uma distribuição aleatória em altura e disposição;
- Uma hipótese simplificadora é assumir altura e distribuição uniforme;
- Esta altura uniforme é denominada ε também chamada de **rugosidade uniforme** ou **absoluta** (Fig. 9);
- A relação ε/D_H é chamada **rugosidade relativa**.

Rugosidade Relativa

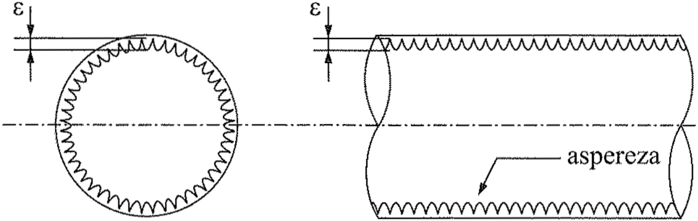


Figura 9: Rugosidade uniforme. Altura uniforme de asperezas, ε, nas paredes internas de condutos.

Fonte: Brunetti (2008).

Perda de Carga Distribuída

- A **perda de carga distribuída** pode ser expressa em termos de **perda de carga** h_f, **queda de pressão** Δp_f e **perdas por atrito** F_f:

$$h_f = f\frac{L}{D_H}\frac{v^2}{2g} \qquad [\mathrm{m}] \qquad (5)$$

$$\Delta p_f = 4f\rho\frac{L}{D_H}\frac{v^2}{2} \qquad [\mathrm{Pa}] \qquad (6)$$

$$F_f = \frac{\Delta p_f}{\rho} = 4f\frac{L}{D_H}\frac{v^2}{2} \qquad [\mathrm{J/kg}] \qquad (7)$$

onde f é o fator de atrito de *Fanning*.

Perda de Carga Distribuída

- O **fator de atrito de *Fanning***, f, é uma função de Re e de ε/D_H;
- Este parâmetro pode ser obtido por expressões diversas ou graficamente a partir do **diagrama de Moody** (Fig. 10);
- Para um **escoamento laminar**:

$$f = \frac{16}{Re} \tag{8}$$

- Para um **escoamento turbulento**:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon/D_H}{3{,}7} + \frac{2{,}51}{Re\sqrt{f}}\right) \tag{9}$$

que é conhecida como **equação de Colebrook**.

Perda de Carga Distribuída

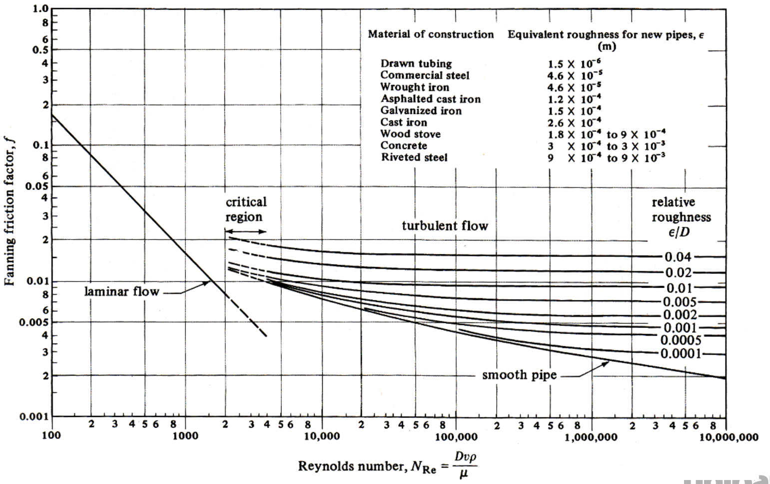


Figura 10: Diagrama de Moody. Fator de atrito para escoamento no interior de tubos.

Fonte: Geankoplis (2003).