Escoamento Viscoso em Condutos

1 Introdução

Objeto de estudo: escoamentos viscosos e incompressíveis em tubos (circulares) e dutos (não circulares)*

Aplicações: oleodutos, sistemas de distribuição de água, sistemas vascular e respiratório, sistemas de ar condicionado

Componentes de uma tubulação: tubos (que podem ter diferentes diâmetros), conexões, dispositivos de controle de vazão, medidores, bombas, turbinas, etc.

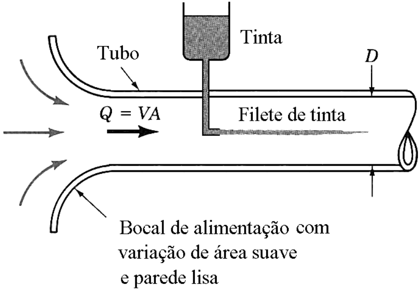
*Diferenciar de canais abertos

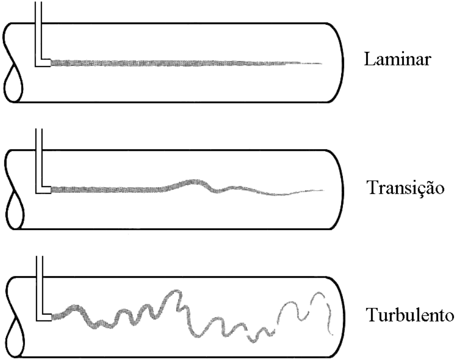

MYCOM
MYCOM
2 3:56AM


2 3:56AM

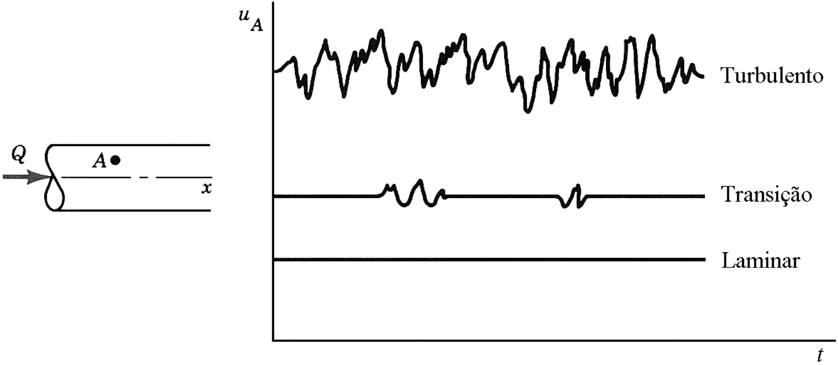
2 Características gerais

2.1 Escoamento laminar e turbulento





No escoamento turbulento, a velocidade apresenta flutuações aleatórias.



Parâmetro importante no escoamento viscoso em condutos: número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu}$$

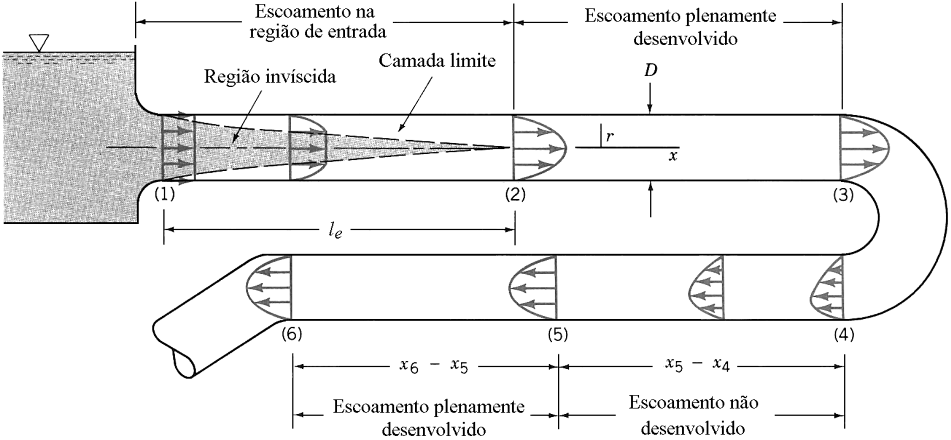
onde $\bar{V}$ é a velocidade média na seção e D o diâmetro do tubo.

Para cálculos de engenharia[†]:

$$
\begin{aligned}
Re \leq 2100 \quad & \rightarrow \text{escoamento laminar} \\
2100 < Re < 4000 \quad & \rightarrow \text{escoamento de transição} \\
Re \geq 4000 \quad & \rightarrow \text{escoamento turbulento}
\end{aligned}
$$

[†]Comentar sobre estabilidade

2.2 Região de entrada e escoamento plenamente desenvolvido



Região de entrada: região do escoamento próxima da seção de alimentação[‡].

Escoamento plenamente (ou completamente) desenvolvido (E.P.D.): perfil de velocidades não muda com a distância longitudinal (eixo x).

Comprimento da região de entrada l_e:

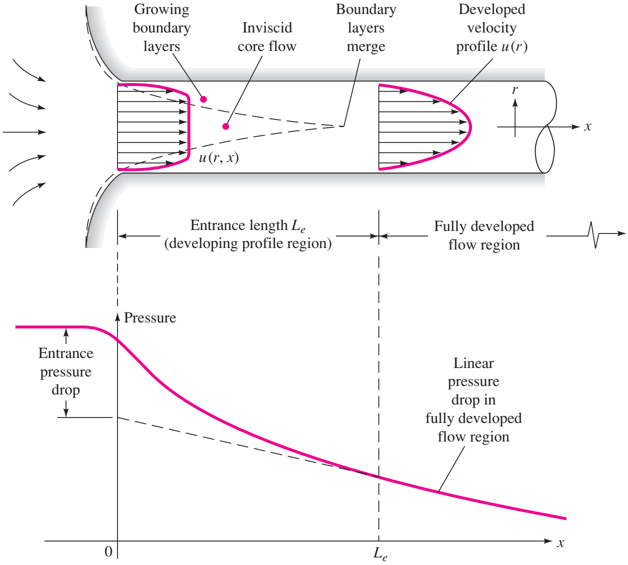
$$\frac{l_e}{D} = 0{,}06Re \qquad \text{p/ escoamento laminar}$$

$$\frac{l_e}{D} = 4{,}4(Re)^{1/6} \qquad \text{p/ escoamento turbulento}$$

[‡]A presença de outros componentes também muda o perfil de velocidades

2.3 Tensão de cisalhamento e pressão

Num escoamento plenamente desenvolvido, as forças de pressão são equilibradas pelas forças viscosas. Se o escoamento não é plenamente desenvolvido, forças de inércia também são importantes. Se o tubo não é horizontal, a força peso também é importante. Os efeitos viscosos fazem com que o gradiente de pressão não seja nulo.



3 Cálculo da perda de carga

Perda de carga total	=	Perda de carga distribuída	+	Perdas de carga localizadas

$$h_{L_T} = h_L + h_m$$

3.1 Perda de carga distribuída

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 \bar{V}_1^2}{2g} + z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 \bar{V}_2^2}{2g} + z_2\right) = h_L$$

Para tubo reto horizontal ($\bar{V}_1 = \bar{V}_2$ e $z_1 = z_2$): $\dfrac{p_1 - p_2}{\gamma} = \dfrac{\Delta p}{\gamma} = h_L \quad (1)$

3.1.1 Fator de atrito

Da análise dimensional: $\Delta p = F(D, l, \epsilon, \bar{V}, \rho, \mu)$

Em forma adimensional: $\dfrac{\Delta p}{\rho \bar{V}^2} = \phi\left(Re, \dfrac{l}{D}, \dfrac{\epsilon}{D}\right)$

Combinando com a eq. (1): $\dfrac{h_L g}{\bar{V}^2} = \phi\left(Re, \dfrac{l}{D}, \dfrac{\epsilon}{D}\right)$

Experiências mostram que $h_L \propto \dfrac{l}{D} \quad \Rightarrow \quad \dfrac{h_L g}{\bar{V}^2} = \dfrac{l}{D}\phi_1\left(Re, \dfrac{\epsilon}{D}\right)$

Dividindo os dois lados por 1/2: $\dfrac{h_L g}{\frac{1}{2}\bar{V}^2} = \dfrac{l}{D} \; \underbrace{\phi_2\left(Re, \dfrac{\epsilon}{D}\right)}_{\textbf{fator de atrito } (f)}$

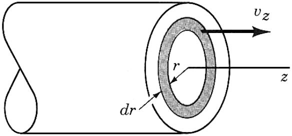
$$h_L = f\,\frac{l}{D}\,\frac{\bar{V}^2}{2g} \quad \Rightarrow \quad \text{Equação de Darcy–Weisbach}$$

Escoamento laminar

O perfil de velocidades é: $v_z = \dfrac{1}{4\mu}\left(\dfrac{\partial p}{\partial z}\right)(r^2 - R^2)$ [perfil parabólico].

Como $\partial p/\partial z$ é constante, $\partial p/\partial z = -\Delta p/l$.

Vazão: $\quad \mathrm{d}Q = v_z(2\pi r)\mathrm{d}r \quad \Rightarrow \quad Q = 2\pi \int_0^R v_z r\,\mathrm{d}r$



$$Q = \frac{\pi}{2\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)\int_0^R (r^3 - rR^2)\,\mathrm{d}r = -\frac{\pi R^4}{8\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128\mu L}$$

<u>Velocidade média:</u> $$\bar{V} = \frac{Q}{A_t} = \frac{Q}{\pi R^2} = -\frac{R^2}{8\mu}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{D^2 \Delta p}{32\mu L}$$

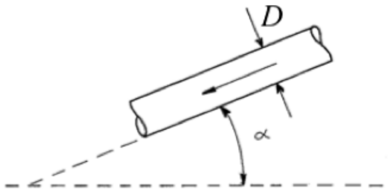
Escrevendo a eq. da energia para um tubo horizontal reto em escoamento laminar:

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = h_L = f\frac{L}{D}\frac{\bar{V}^2}{2g} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{\Delta p}{\rho \cancel{g}}\frac{D}{L}\frac{2\cancel{g}}{\bar{V}^2} = \frac{\cancel{\Delta p}}{\rho}\frac{\cancel{D}}{\cancel{L}}\frac{2}{\bar{V}}\frac{32\mu \cancel{L}}{D^{\cancel{2}}\cancel{\Delta p}} = \frac{64\mu}{\rho \bar{V} D}$$

$$f_{\mathrm{lam}} = \frac{64}{Re}$$

Exercício 1

No trecho de tubo mostrado na figura, que tem diâmetro $D = 0{,}0127\,\mathrm{m}$, escoa um óleo de peso específico $\gamma = 900\,\mathrm{kgf/m^3}$ e viscosidade cinemática $\nu = 1{,}1 \times 10^{-4}\,\mathrm{m^2/s}$ a uma vazão de $Q = 0{,}142\,\mathrm{m^3/h}$.



a) Para $\alpha = 30°$, qual seria a queda de pressão por unidade de comprimento, $\Delta p/l$?

b) Para que ângulo α a queda de pressão Δp seria nula?