

# Escoamento em dutos

J. L. Baliño

Departamento de Engenharia Mecânica  
Escola Politécnica - Universidade de São Paulo

Apostila de aula



# Sumário

**1** Regimes de escoamento em tubos

**2** Perda de carga em tubos

**3** Perdas singulares

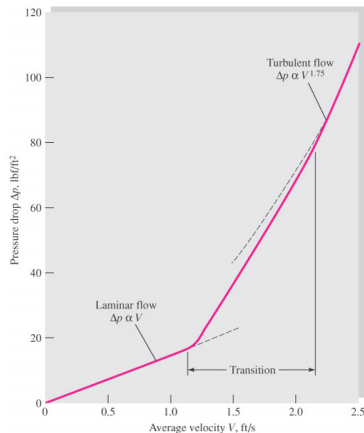
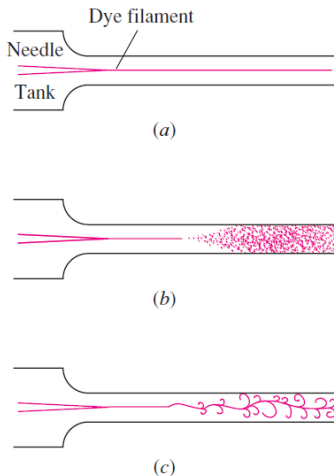


# Introdução

- Dois regimes de escoamento, dependendo do número de Reynolds  $Re_D = \frac{\rho V D}{\mu}$ .
- Uma análise de ordens de grandeza mostra que  $Re_D$  mede a razão de força de inércia a força viscosa. Para baixos Reynolds o escoamento é laminar, para Reynolds grandes o escoamento é turbulento.
- Transição a turbulência acontece para  $Re_D \approx 2100 - 2300$  para tubos.



# Transição a turbulência

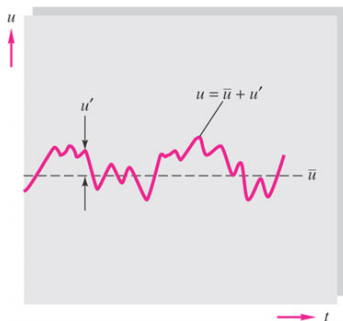


(água, tubo liso,  $D = 1/4$  in,  $L = 10$  ft)



# Flutuações estatísticas turbulentas

Tratamento da turbulência em termos de valores médios e flutuações.



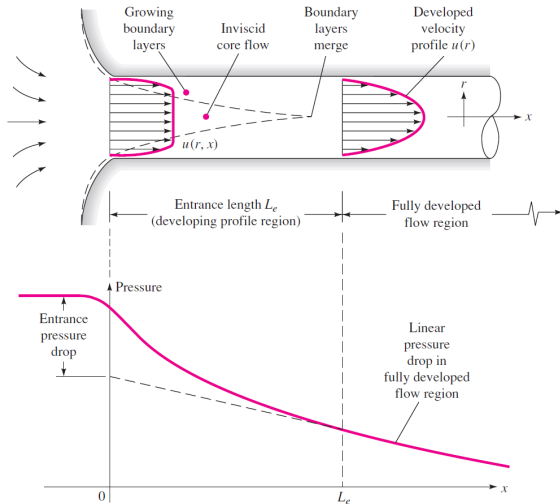
(a)



(b)

As flutuações geram uma grande mistura e aumentam o transporte de propriedades (massa, momento e energia).

# Comprimento de entrada hidráulico



# Comprimento de entrada hidráulico

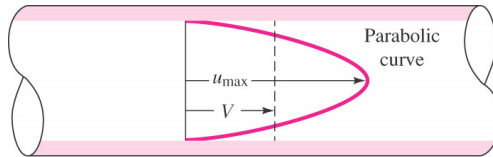
- Para regime laminar,  $\frac{L_e}{D} = 0,06 Re_D$ . Para  $Re_D = 2300$ ,  $\left(\frac{L_e}{D}\right)_{max} = 138$ .
- Para regime turbulento,  $\frac{L_e}{D} = 4,4 Re_D^{1/6}$ .

$Re_d$	4000	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$
$L_e/d$	18	20	30	44	65	95

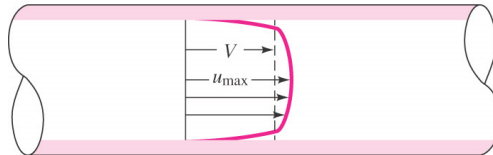
O comprimento de entrada é normalmente desprezado para tubulações longas.



# Perfil de velocidade



(a)



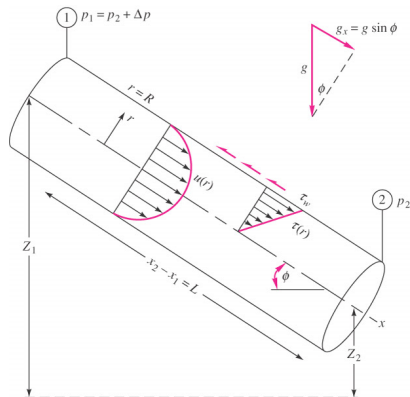
(b)

Perfil de velocidade para a mesma vazão: (a) laminar, (b) turbulento.  
Para a mesma vazão, a perda de carga em regime turbulento é maior.





# Balço de momento



Para perfil de velocidade desenvolvido:

$$(p_1 - p_2) A + \rho g_x A L - \tau_w \mathcal{P}_m L = 0$$

$$g_x = g \sin \phi = g \frac{z_1 - z_2}{L}$$

$$\left( \frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right) = \tau_w \frac{\mathcal{P}_m L}{\rho g A}$$

$$\frac{\mathcal{P}_m}{A} = \frac{4 \pi D}{\pi D^2} = \frac{4}{D}$$

Como o perfil de velocidade é o mesmo ( $V_1 = V_2$ ), a perda de altura de energia  $h_f$  resulta:

$$h_f = H_{E1} - H_{E2} = 4 \frac{\tau_w}{\rho g} \frac{L}{D}$$

A perda de altura está relacionada com os efeitos viscosos (tensão de cisalhamento).

## Fator de atrito de Darcy

Aplicando análise dimensional,  $\tau_w = \tau_w(\rho, \mu, V, D, \epsilon)$ .

Adimensionalizando a tensão de cisalhamento, definimos o fator de atrito de Darcy  $f$ :

$$f = \frac{8 \tau_w}{\rho V^2} = f\left(Re_D, \frac{\epsilon}{D}\right)$$

Substituindo, resulta a equação de Darcy-Weissbach:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Para regime laminar,  $f = \frac{64}{Re_D}$  (independente da rugosidade).

Para regime turbulento, dados experimentais foram correlacionados por Colebrook (1939):

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2,0 \log \left( \frac{\epsilon}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re_D f^{1/2}} \right)$$



# Rugosidade

Material	Condition	ε		Uncertainty, %
		ft	mm	
Steel	Sheet metal, new	0.00016	0.05	±60
	Stainless, new	0.000007	0.002	±50
	Commercial, new	0.00015	0.046	±30
	Riveted	0.01	3.0	±70
	Rusted	0.007	2.0	±50
Iron	Cast, new	0.00085	0.26	±50
	Wrought, new	0.00015	0.046	±20
	Galvanized, new	0.0005	0.15	±40
	Asphalted cast	0.0004	0.12	±50
Brass	Drawn, new	0.000007	0.002	±50
Plastic	Drawn tubing	0.000005	0.0015	±60
Glass	—	Smooth	Smooth	
Concrete	Smoothed	0.00013	0.04	±60
	Rough	0.007	2.0	±50
Rubber	Smoothed	0.000033	0.01	±60
Wood	Stave	0.0016	0.5	±40



## Perdas em dutos não circulares

Para dutos não circulares, podemos usar como aproximação as correlações para dutos circulares, definindo um diâmetro hidráulico  $D_h$ :

$$D_h = \frac{4A}{\mathcal{P}_m}$$

Para dutos circulares,  $D_h \equiv D$ . Os erros na perda de carga são apreciáveis em escoamento laminar (aprox. 40%), mas são menores em escoamento turbulento (aprox. 15%).



## Perdas singulares

As perdas de carga em tubos são perdas distribuídas no comprimento  $L$ . Instalações de recalque (entradas e saídas dos tubos, expansões e contrações, curvas, cotovelos, têes, válvulas, etc.) provocam perdas de carga em curtas distâncias, que devem ser também consideradas. As perdas singulares  $h_s$  são modeladas como proporcionais à altura de energia cinética:

$$h_s = H_{E1} - H_{E2} = k_s \frac{V^2}{2g}$$

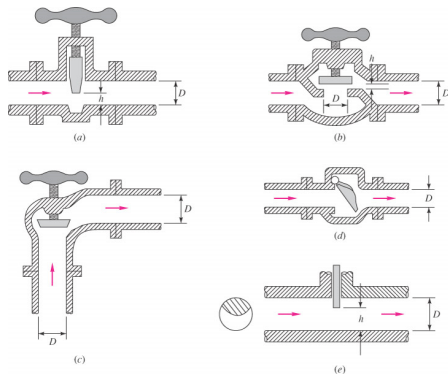
onde  $k_s$  é a constante de perda.

As perdas singulares podem ser enxergadas como comprimentos equivalentes de tubulação  $L_e$ :

$$k_s \frac{V^2}{2g} = f \frac{L_e}{D} \frac{V^2}{2g} \Rightarrow k_s = f \frac{L_e}{D} \Rightarrow L_e = \frac{k_s}{f} D$$

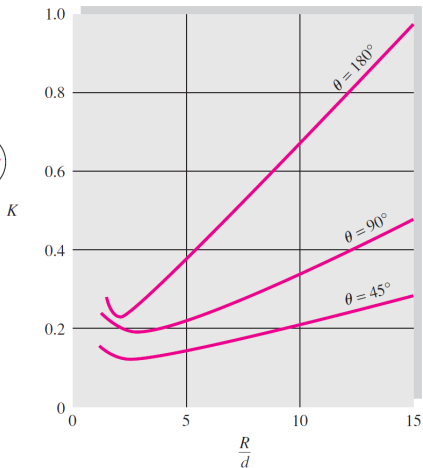
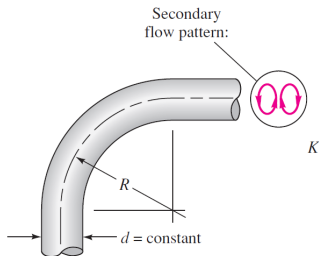


# Válvulas



	Nominal diameter, in								
	Screwed				Flanged				
	½	1	2	4	1	2	4	8	20
Valves (fully open):									
Globe	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5
Gate	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03
Swing check	5.1	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Angle	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0
Elbows:									
45° regular	0.39	0.32	0.30	0.29					
45° long radius					0.21	0.20	0.19	0.16	0.14
90° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21
90° long radius	1.0	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10
180° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20
180° long radius					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10
Tees:									
Line flow	0.90	0.90	0.90	0.90	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07
Branch flow	2.4	1.8	1.4	1.1	1.0	0.80	0.64	0.58	0.41

# Cotovelos

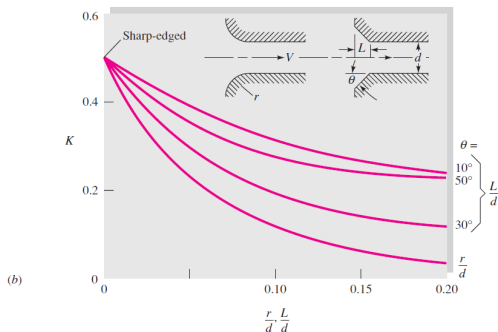
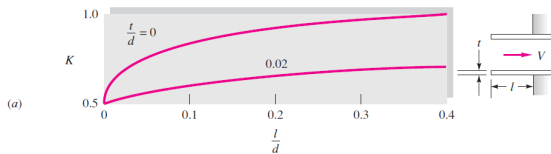


( $Re_D = 2 \times 10^5$ )

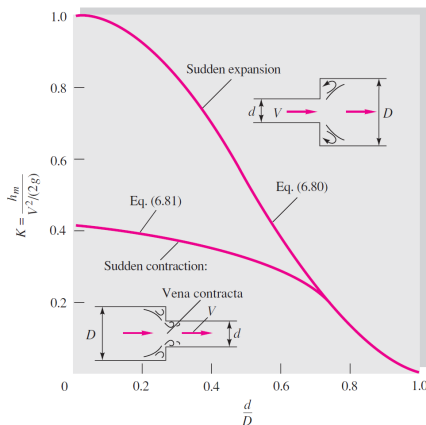




# Entradas



# Expansões/contrações bruscas



Expansão:

$$k_{se} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2$$

Contração:

$$k_{sc} = \begin{cases} 0,42 \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) & \frac{d}{D} \leq 0,76 \\ k_{se} & \frac{d}{D} > 0,76 \end{cases}$$

