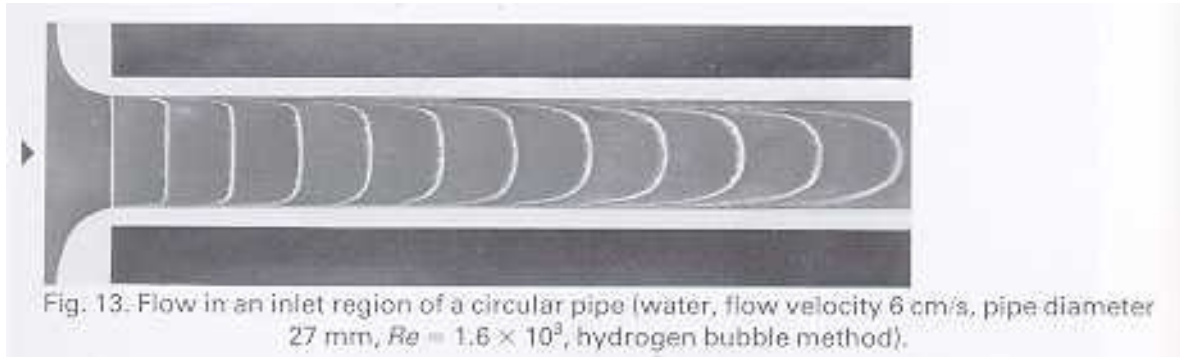


Escoamentos Internos

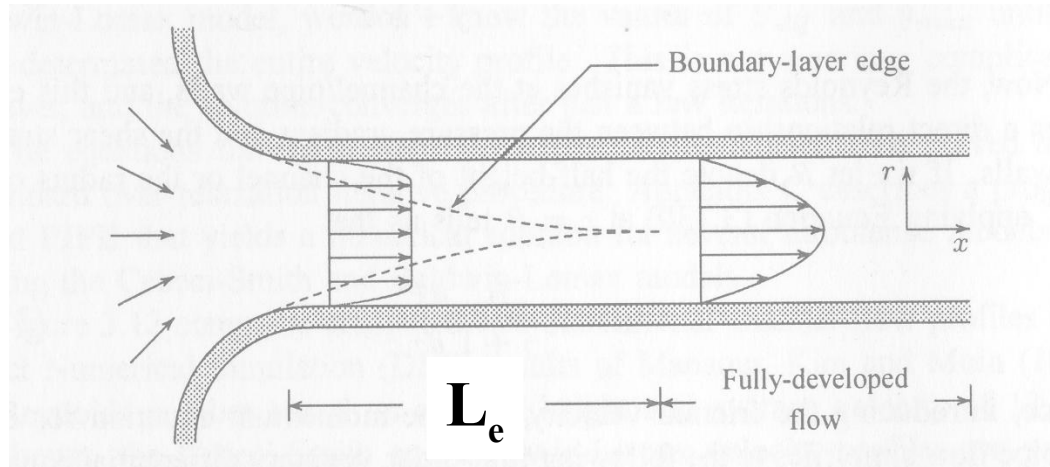
Escoamento Interno

- Perfil de velocidades e transição laminar/turbulenta
- Perfil de temperaturas
- Perda de carga em tubulações
- Determinação da perda de carga distribuída
- Determinação da perda de carga localizada
- Transferência de Calor em Dutos: fluxo calor constante e temperatura constante
- Número de Nusselt Laminar (Transferência de calor)
- Número de Nusselt Turbulento (Transferência de calor)

Região de Desenvolvimento Hidrodinâmico



- O perfil de velocidades encontra-se hidrodinamicamente desenvolvido quando ele cessa de variar ao longo da direção axial do tubo.



$$L_e \cong 0,06(d)Re \quad - \text{Laminar}$$

$$L_e \cong 4,40(d)Re^{(1/6)} \quad - \text{Turbulento}$$

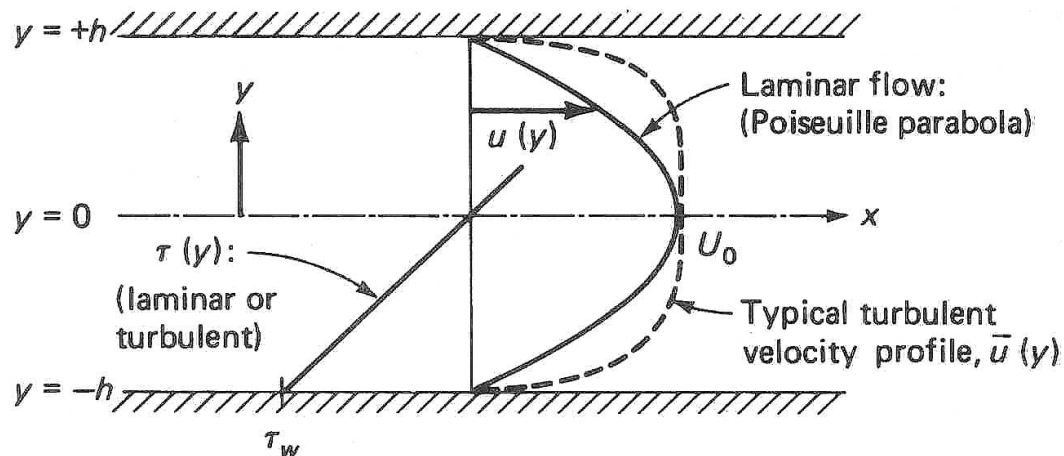
- Na região de desenvolvimento o núcleo do escoamento é acelerado e o fluido próximo da parede é retardado pela ação da viscosidade.

Perfil de Velocidades Desenvolvido e Transição

- A transição entre o regime laminar e turbulento em dutos é sinalizada pelo número de Reynolds:

$$\mathbf{Re}_D = \frac{VD_h}{\nu} < 2300 \quad \text{LAMINAR} \quad \mathbf{Re}_D > 2300 \quad \text{TURBULENTO}$$

- O perfil de velocidades Laminar é parabólico. O perfil de velocidades em regime turbulento é proporcional a potência de (1/7) e apresenta um gradiente próximo a parede mais elevado que o laminar



$$\mathbf{Re}_D < 2300 \quad U/U_0 = \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)$$

$$\mathbf{Re}_D > 2300 \quad U/U_0 = \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{1/7}\right)$$

- onde U_0 é a velocidade máx. no centro do tubo, r é a posição radial, $0 < r < R$ e R é o raio do tubo.

Recapitulação da 1ª e 2ª leis aplicadas em tubos.

1ª Lei em Tubulações

- Em regime permanente a equação da energia para um processo isotérmico é dada acima. A seção (1) é a entrada e (2) a saída.

$$\dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_s - \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_e = \dot{Q} - \dot{W}$$

- Reconhecendo-se que $h = u + p/\rho$, que $u_s = u_e$ e dividindo ambos os lados por mg , chega-se a eq. Energia expressa em termos de alturas:

$$\left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_s - \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_e = \frac{q}{g} - \frac{w}{g}$$

2ª Lei em Tubulações

- O calor pode ser expresso em termos da entropia e de sua geração de entropia, $q = T_0(s_s - s_e) - T_0 s_{gen}$, (veja aula 12!)
- Como o processo é isotérmico, $(s_s - s_e) = 0$, logo todo fluxo de calor vem da geração de entropia ou irreversibilidades do escoamento. Subst. definição na equação da energia:

$$\left(\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \right)_s - \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \right)_e = -\frac{T_0 s_{gen}}{g} - \frac{w}{g}$$

- O Termo $T_0 s_{gen}/g$ é sempre positivo! Ele é frequentemente denominado por perda de altura de elevação, h_L (o índice L vem do inglês – head loss)

$$\left(\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \right)_s - \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \right)_e = -h_L - \frac{w}{g}$$

Modelo com fluxo de Trabalho Mecânico

- O V.C. pode envolver tubulação, reservatórios e também bombas ou turbinas que consomem ou geram trabalho de eixo.
- Uma relação geral para a variação das alturas num V.C. isotérmico passa a ser:

$$\left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z \right)_e - \left\{ \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z \right)_s + h_L \right\} = \frac{w}{g}$$

- se $w > 0 \Rightarrow$ turbina, se $w < 0 \Rightarrow$ bomba

O trabalho realizado pelas forças de atrito é convertido em calor de modo irreversível. A perda de carga h_L representa estas irreversibilidades.

Perda de Carga em Tubulações

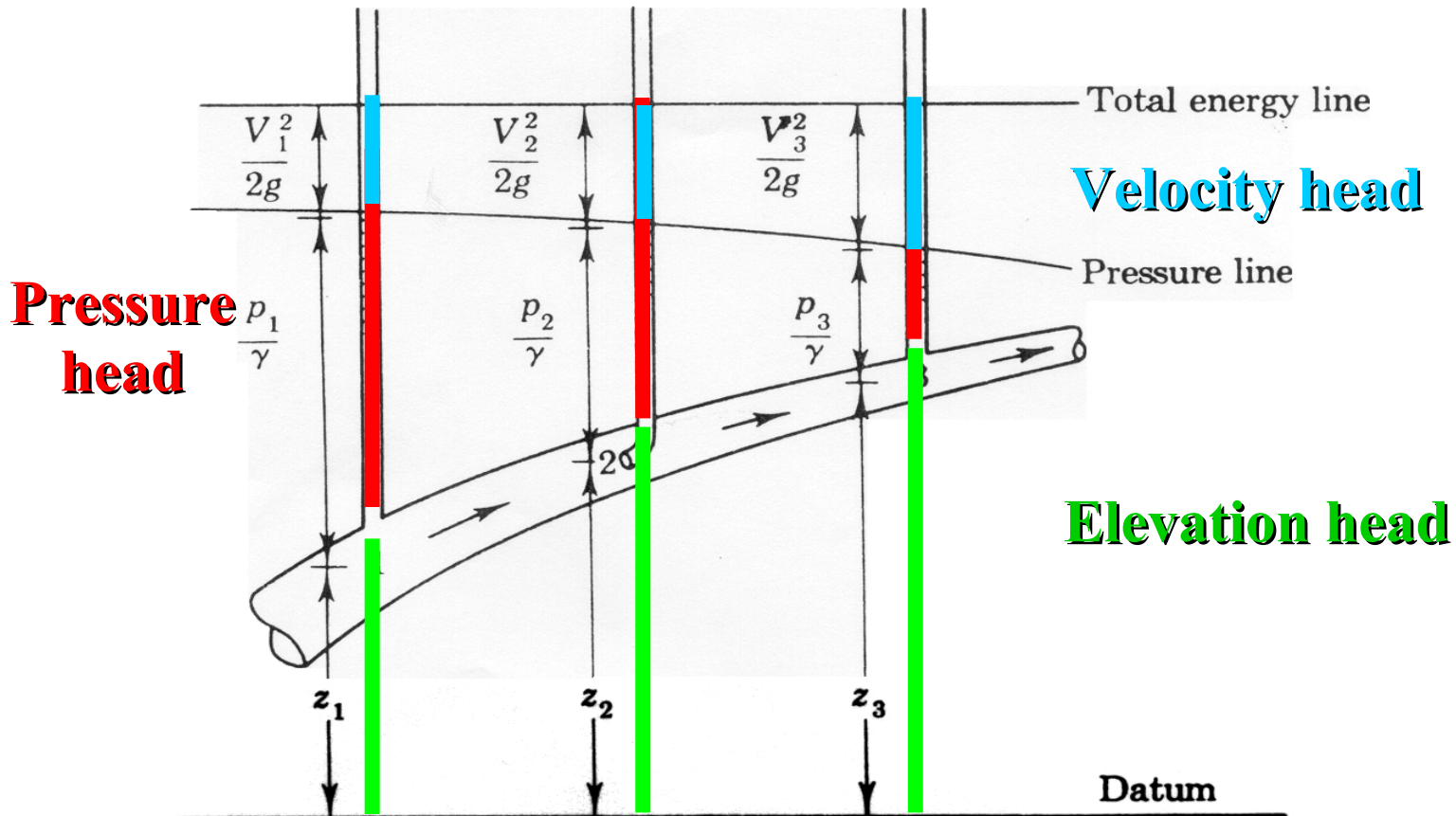
$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

- Em regime permanente a equação da energia para um processo isotérmico sem adição ou remoção de trabalho é dada acima. A seção (1) é a entrada e (2) a saída.
- O termo h_L refere-se as perdas irreversíveis que ocorrem de (1) para (2). Ele também é denominado por perda de carga. Sua origem deve-se ao atrito que a parede exerce no fluido.
- A perda de carga pode estar *distribuída* (h_f) ao longo de toda tubulação e/ou *localizada* (h_m) em um acessório (curva, restrição, válvula, etc).

$$h_L = h_f + \sum h_m$$

Uma Representação das Alturas (Não há perdas na Representação)

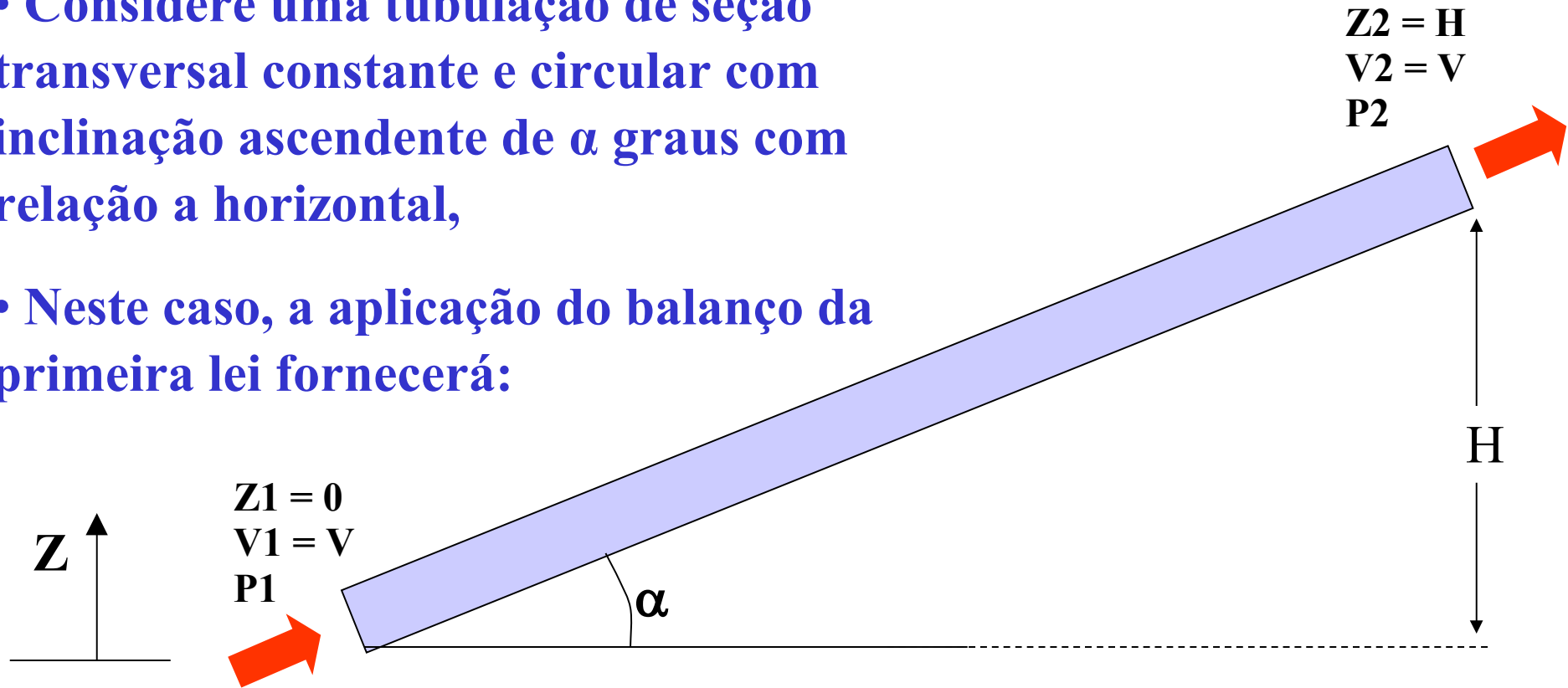
$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \text{constante}$$



Exemplo com perdas

- Considere uma tubulação de seção transversal constante e circular com inclinação ascendente de α graus com relação a horizontal,

- Neste caso, a aplicação do balanço da primeira lei fornecerá:



$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + 0 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + H + h_L$$

Exemplo (cont.)

- Como a tubulação possui seção transversal constante, a velocidade média na seção (1) e (2) é a mesma, isto é uma consequência da conservação da massa,
- A diferença de pressão entre a entrada e a saída é dada em função de:

$$(P_1 - P_2) = \rho g H + \rho g h_L$$

- onde ρ é a densidade do líquido. Note que a diferença de pressão é composta por uma parcela devido a coluna hidrostática de altura H e outra devido ao atrito.
- *A função de uma bomba no circuito é suprir a diferença de pressão dada pela altura hidrostática e pelo atrito.*

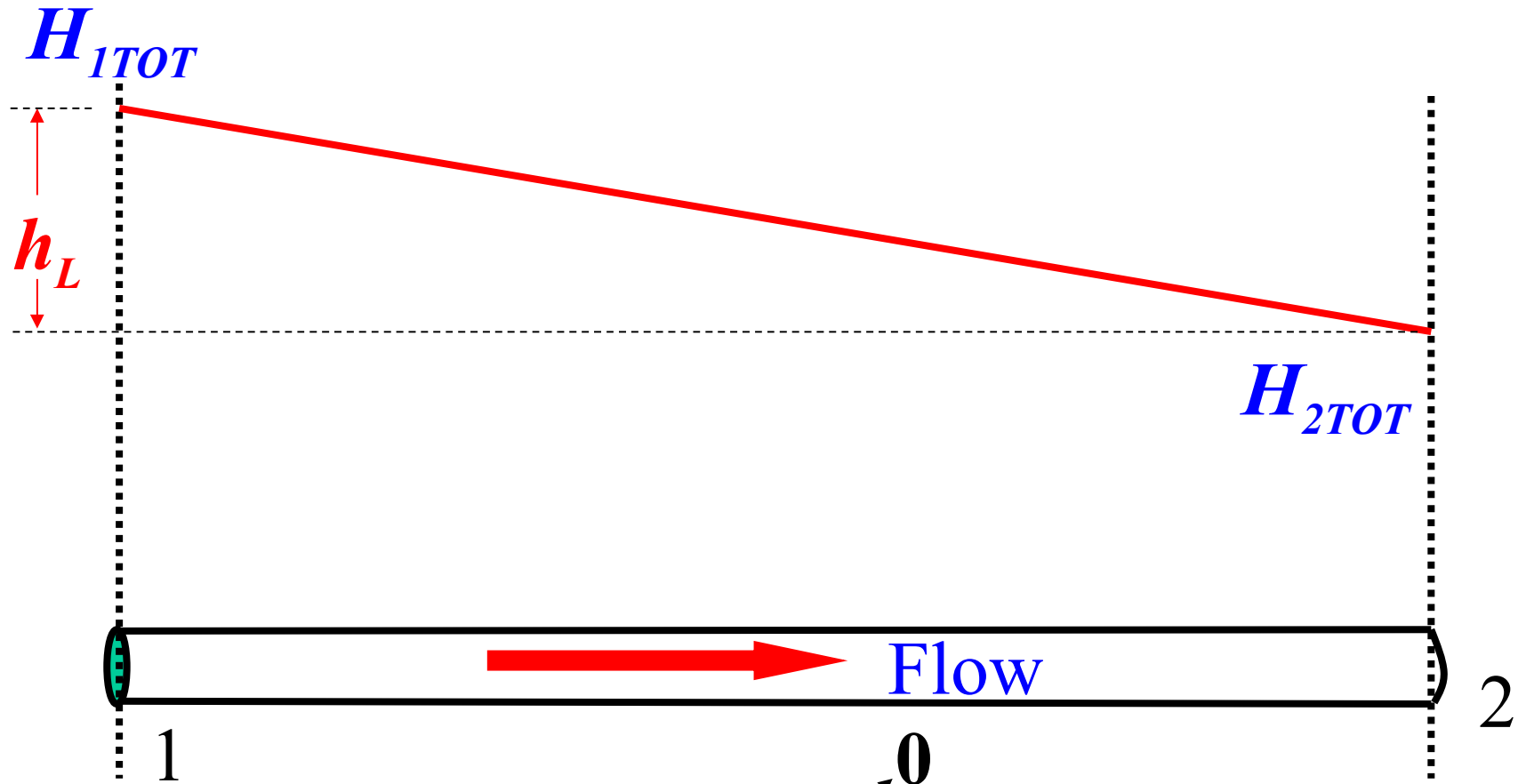
IMPORTANTE

- A queda de pressão (entrada – saída) para escoamento hidrodinamicamente desenvolvido em dutos de qualquer seção transversal (circular, quadrada, triangular, etc) é apenas função da diferença de altura e da perda de carga:

$$(P_1 - P_2) = \rho g H + \rho g h_L$$

- Objetivo desta aula é como calcular h_L .

Tubulação Horizontal: queda de pressão devido ao atrito, h_L

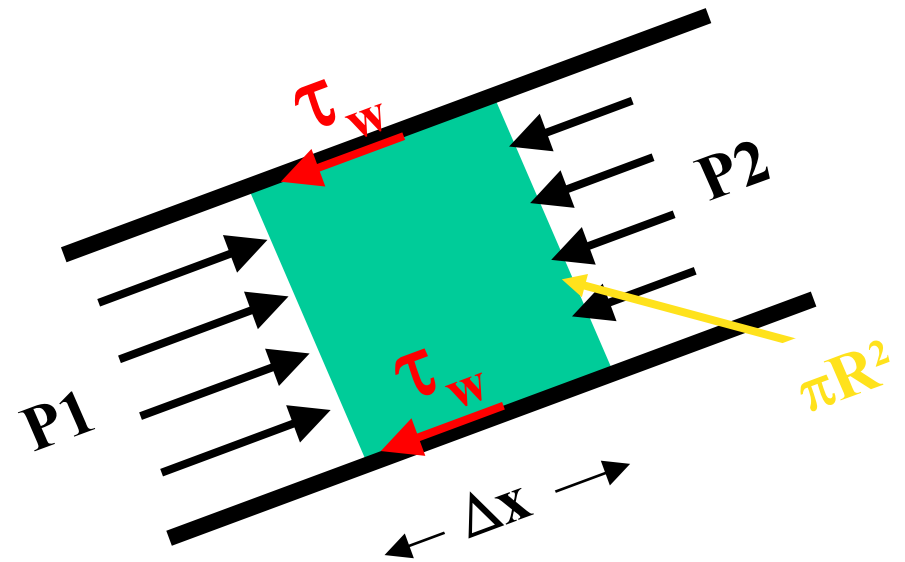


$$(P_1 - P_2) = \rho g H + \rho g h_L$$

Perdas distribuídas

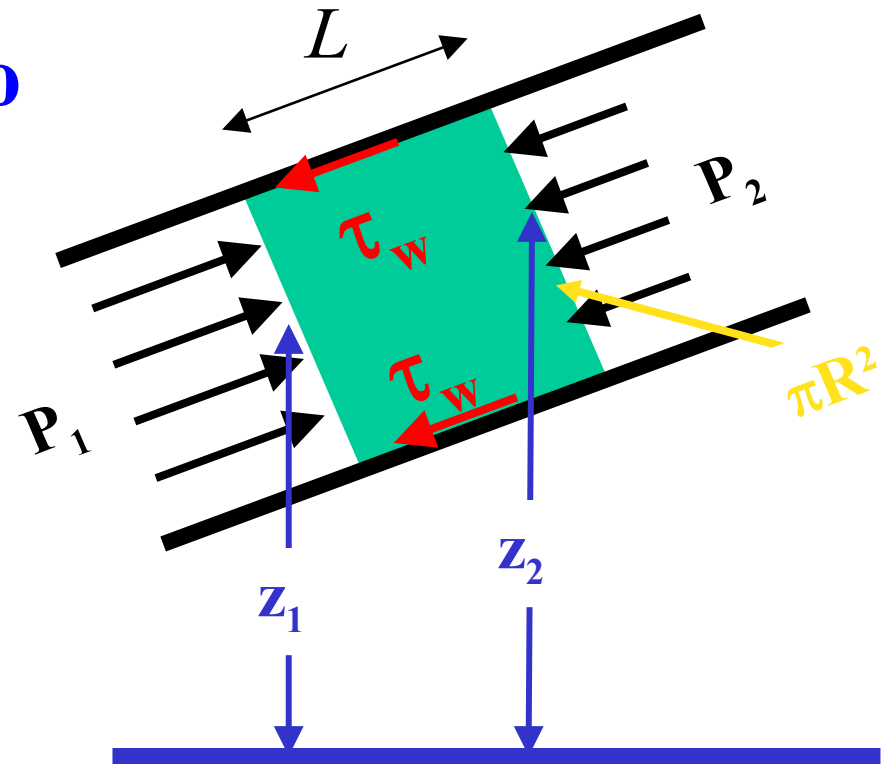
Relação entre h_f e τ_w

- Escoamento desenvolvido,
- Regime laminar ou turbulento,
- S.C. envolve uma ‘fatia’ do tubo sendo representada por um cilindro,



Forças atuantes: força de pressão; força de atrito com a parede e força peso do fluido.

Balanço de Forças num Tubo



Balanço forças, 2ª lei Newton

$$(P_1 - P_2) \frac{\pi D^2}{4} = \rho g \frac{\pi D^2}{4} (z_2 - z_1) + \tau_w \pi D L$$

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\rho g} + z_2 \right) = \frac{4 \tau_w L}{\rho g D} = h_f$$

Balanço de Forças em um Tubo

Relação entre h_f e τ_w

A perda de altura e a tensão de cisalhamento estão relacionadas pela relação:

$$h_f = \frac{4 \tau_w L}{\rho g D}$$

Onde L é o comprimento da tubulação e D é o seu diâmetro.

Como determinar a tensão na parede, τ_w ?

Fator de Atrito

- *Similar ao escoamento externo, a tensão na parede p/ escoamento interna é também expressa em termos dos adimensionais: Reynolds e rugosidade relativa*

$$\frac{\tau_w}{\left(\rho V^2/2\right)} = f\left(\frac{\rho VD}{\mu}, \frac{e}{D}\right)$$

$\tau/(\rho V^2/2)$ = *fator de atrito*

VD/ν = *Reynolds*

e/D = *rugosidade relativa*

Fator de Atrito

- *Fator de Atrito de Fanno (freqüentemente usado em transf. calor):*

$$C_f = \frac{2 \tau_w}{\rho V^2}$$

- *Fator de atrito de Darcy (freqüentemente usado em perda de carga):*

$$f = 4 C_f = \frac{8 \tau_w}{\rho V^2}$$

Perda de Carga (Darcy)

- *Substituindo a definição de τ (fator de atrito) na definição da perda de carga (h_f)*

$$h_f = \frac{4\tau_w L}{\rho g D} \qquad f = \frac{8\tau_w}{\rho V^2}$$

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

- **onde o fator de atrito de Darcy, f , é dado no diagrama de Moody:**

$$h_L = h_f + \sum h_m \quad \text{Como determinar } h_f \text{ e } h_m???$$

• Perda de carga **DISTRIBUÍDA** h_f

$$h_f = f \cdot \left(\frac{L}{d} \right) \cdot \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad \text{e} \quad f = f \left(\text{Re}_d, \frac{h_r}{d} \right) = \frac{8\tau_w}{\rho V^2}$$

onde L é o comprimento da tubulação, d o seu diâmetro, V a velocidade média do escoamento e f o fator de atrito.

f é o fator de atrito de Darcy, ele depende Re_d e da rugosidade relativa.

Sua leitura é feita no diagrama de Moody.

• Perda de carga **LOCALIZADA** h_m

$$h_m = K \cdot \frac{V_A^2}{2g}$$

onde K é uma constante tabelada para cada acessório da linha e V_A é uma velocidade de referência especificada juntamente com a definição de K .

Como Determinar h_f Rugosidade de Tubulações

Tabela 7-1 Rugosidade média superficial de tubos rugosos

Material(novo)	h_r mm	h_r in.
Aço rebitado	0,9-9,0	0,035-0,35
Concreto	0,3-3,0	0,012-0,12
Madeira arqueada	0,18-0,9	0,007-0,035
Ferro fundido	0,26	0,01
Ferro galvanizado	0,15	0,006
Ferro fundido asfaltado	0,12	0,005
Aço comum ou ferro batido	0,046	0,002
Aço trefilado	0,0015	0,0001
Vidro	"liso"	"liso"

$$[\text{rugosidade relativa}] = \frac{h_r}{d} = \frac{[\text{rugosidade mm}]}{[\text{diâmetro mm}]}$$

Como Determinar h_f ? Diagrama de Moody e o fator de Atrito f

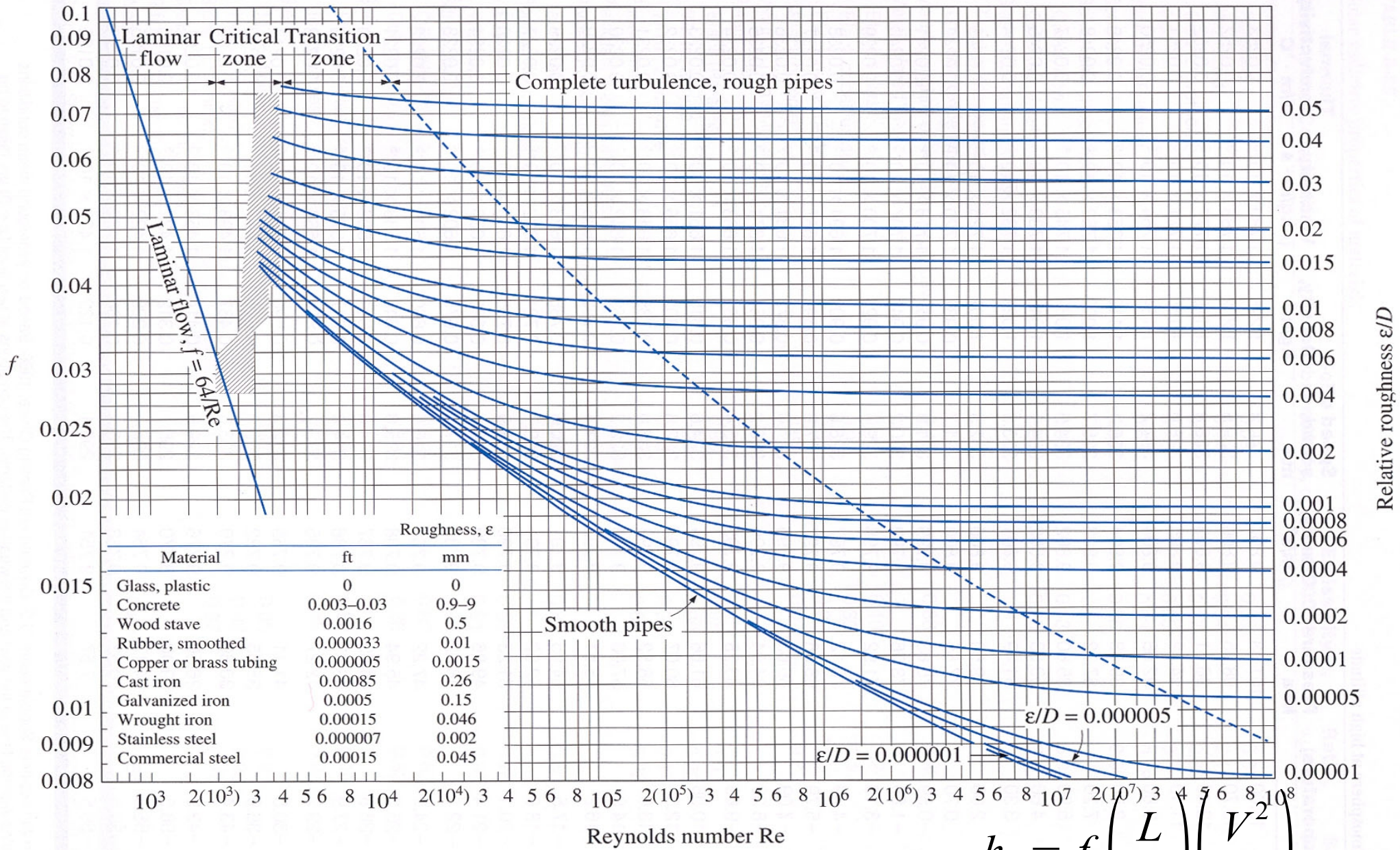


FIGURE A-27

The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Equação de Colebrook-White

- O diagrama de Moody é uma representação gráfica da eq. De Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{e}{3.7 D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right]$$

- **Note:** $f = 64/\text{Re}$ para escoamento laminar
- Formula explicita de S.E. Haaland

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -1.8 \log \left[\frac{6.9}{\text{Re}} + \left(\frac{\varepsilon / D}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

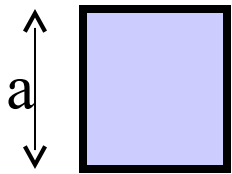
Desvio de 2% da eq.
Colebrook

Como Determinar h_f Tubos de Seção Não-Circular

O fator de atrito e o diagrama de Moody podem ser utilizados para tubos de seção não circular introduzindo-se o conceito de diâmetro hidráulico:

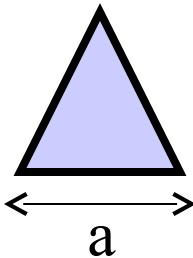
$$d_h = \frac{4 \cdot \text{Área}}{\text{Perímetro}}$$

Canal seção quadrada 'a'



$$d_h = a$$

Canal seção triangular 'a'



$$d_h = a / (48)^{0.5}$$

Duas placas paralelas espaçadas 'a'



$$d_h = 2a$$

Como Determinar h_m a constante K

Tabela 7-2 Coeficiente de perda de carga, $K = \frac{h_m}{V_A^2 / 2g}$ para válvulas abertas, cotovelos e tês.

Diâmetro nominal, cm (in.)	Conexão com rosca				Conexão com flange				
	1,3 (0,5)	2,5 (1,0)	5,0 (2,0)	10 (4,0)	2,5 (1,0)	5 (2,0)	10 (4,0)	20 (8,0)	50 (20)
Válvulas (totalmente abertas):									
Globo	14,0	8,2	6,9	5,7	13,0	8,5	6,0	5,8	5,5
Gaveta	0,30	0,24	0,16	0,11	0,80	0,35	0,16	0,07	0,03
Giratória	5,1	2,9	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Ângulo	9,0	4,7	2,0	1,0	4,5	2,4	2,0	2,0	2,0
Cotovelos:									
45° comum	0,39	0,32	0,30	0,29					
45° raio longo					0,21	0,20	0,19	0,16	0,14
90° comum	2,0	1,5	0,95	0,64	0,50	0,39	0,30	0,26	0,21
90° raio longo	1,0	0,72	0,41	0,23	0,40	0,30	0,19	0,15	0,10
180° comum	2,0	1,5	0,95	0,64	0,41	0,35	0,30	0,25	0,20
180° raio longo					0,40	0,30	0,21	0,15	0,10
Tês:									
Em linha	0,90	0,90	0,90	0,90	0,24	0,19	0,14	0,10	0,07
Perpendicular	2,4	1,8	1,4	1,1	1,0	0,80	0,64	0,58	0,41

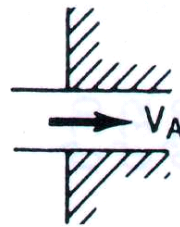
Como Determinar h_m , a constante K

Tabela 7-3 Perdas de válvulas parcialmente abertas.

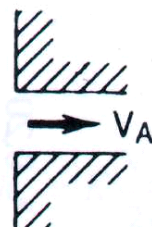
Condição	Razão K/K (condição aberta)	
	Válvula da porta	Válvula Globo
Aberta	1,0	1,0
Fechada, 25%	3,0-5,0	1,5-2,0
50%	12-22	2,0-3,0
75%	70-120	6,0-8,0

Entradas

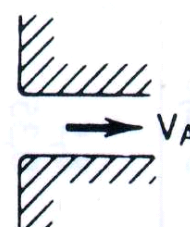
$$K \equiv \frac{h_m}{V_A^2/2g}$$



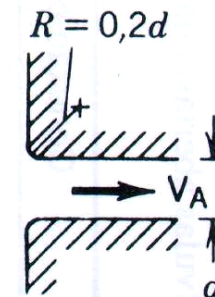
Saliente:
 $K = 0,78$



Canto vivo:
 $K = 0,45$



Levemente
arredondada:
 $K = 0,2$



Bem
Arredondada:
 $K = 0,05$

Saídas

$K = 1,0$ Para todas as saídas

Como Determinar h_m , a constante K

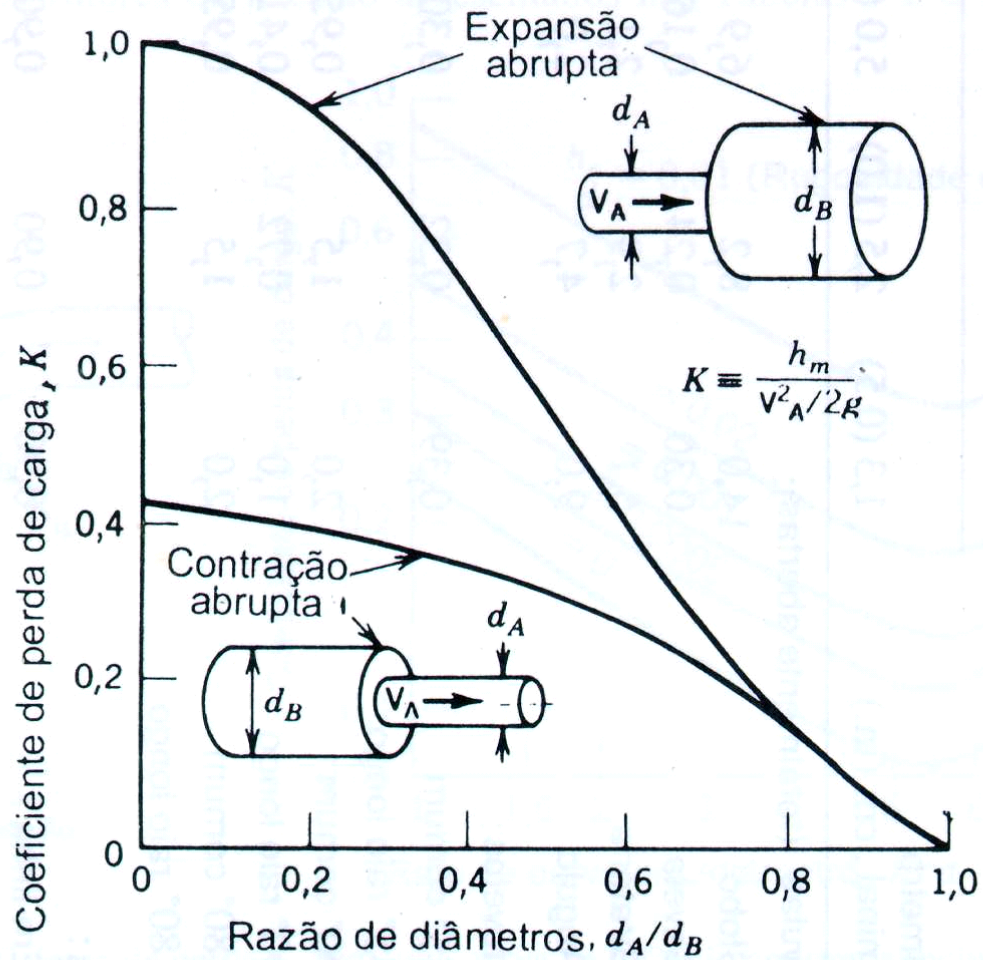
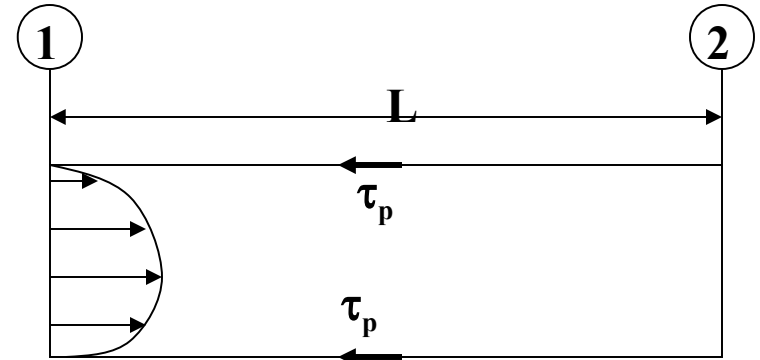


Figura 7-7 Coeficiente de perda K para contrações e expansões abruptas.

Fluxograma Perda de Carga

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

$$h_L = h_f + \sum h_m$$



$$p_1 - p_2 = \rho g h_L$$

Perda Carga Distribuída

$$h_f = f \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad e$$

$$f = f\left(\text{Re}_d, \frac{h_r}{d}\right) = \frac{8\tau_w}{\rho V^2}$$

f - diagrama Moody
Laminar & Turbulento

Perda Carga Localizada

$$h_m = K \cdot \frac{V_A^2}{2g}$$

Tabs. 7.2 e 7.3 e Fig. 7.6

Como Determinar h_f ? Diagrama de Moody e o fator de Atrito f

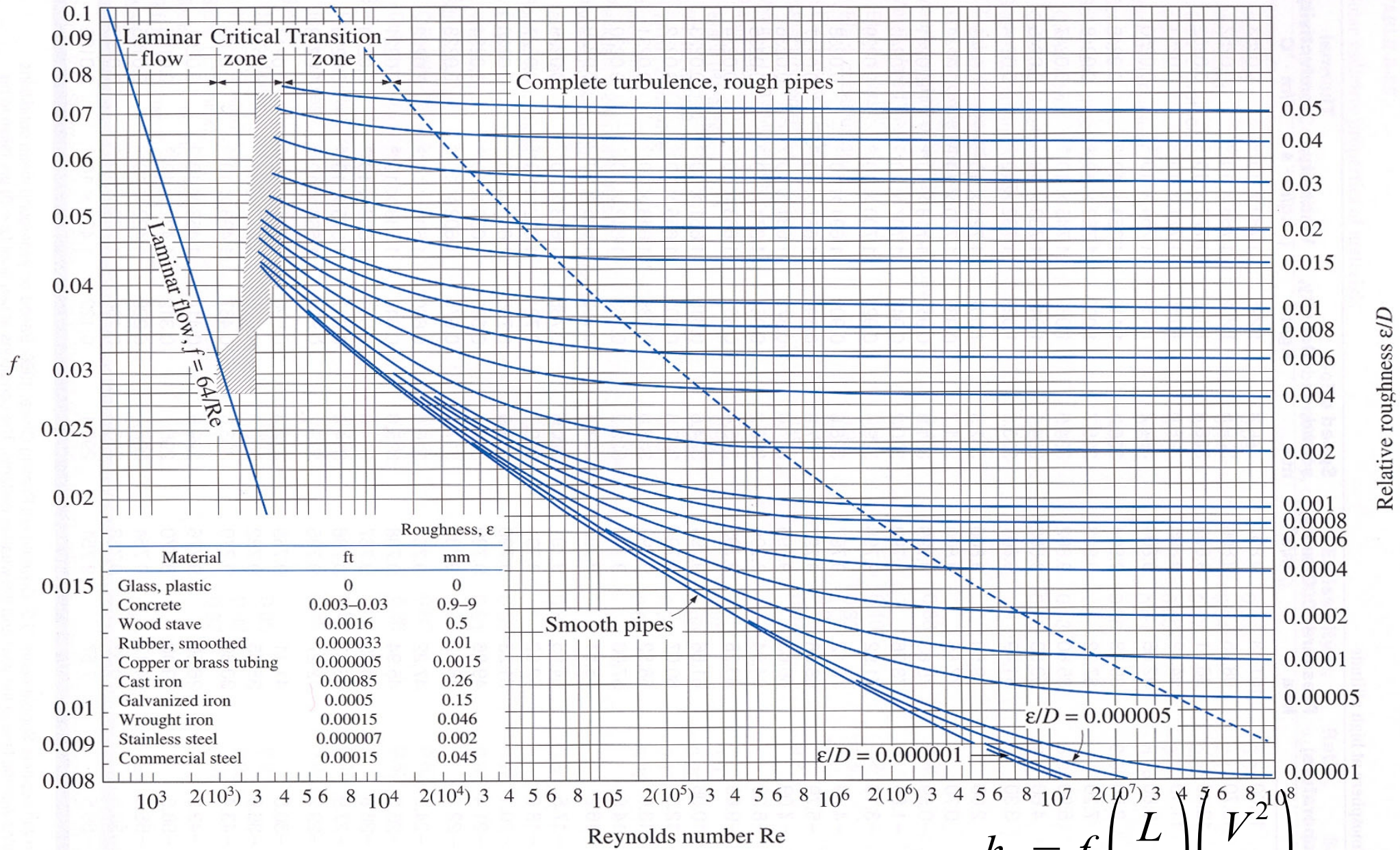


FIGURE A-27

The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Questão

- Se o escoamento de um tubo de diâmetro d for laminar, o que vai acontecer com a vazão se o diâmetro for aumentado para $2d$ enquanto se mantém a perda de carga h_L constante,?