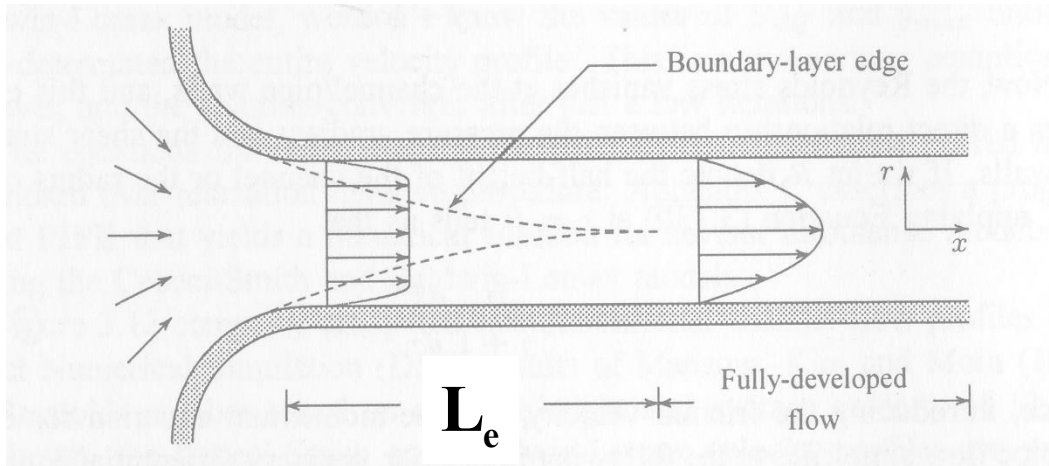
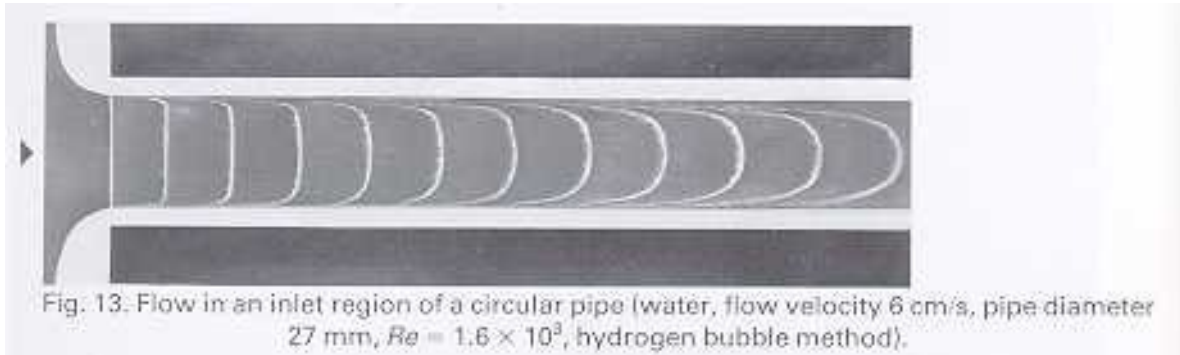


EMEI08 - Laboratório de Fenômenos de Transporte
Teoria sobre Perdas em Escoamentos

Escoamento Interno

- Perfil de velocidades e transição laminar/turbulenta
- Perda de carga em tubulações
- Determinação da perda de carga distribuída h_f
- Determinação da perda de carga localizada h_m

Região de Desenvolvimento Hidrodinâmico



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

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

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

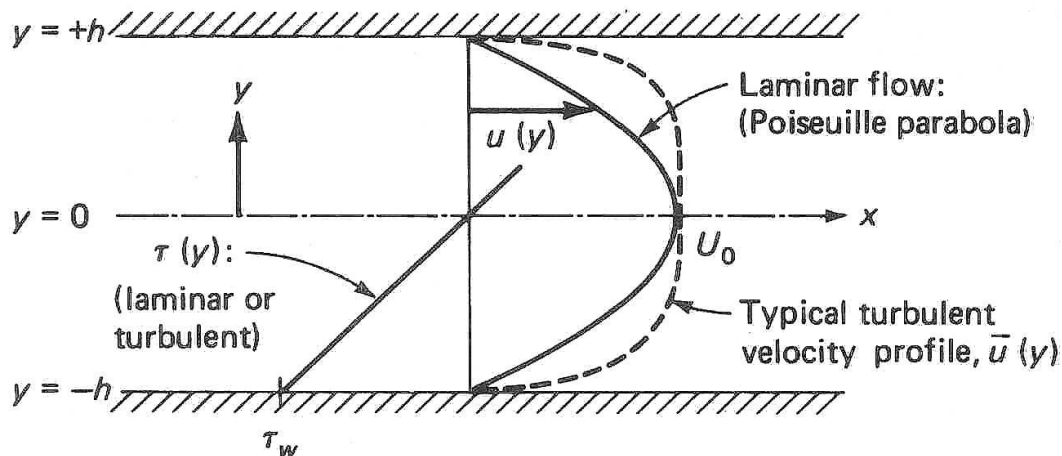
- Na região de desenvolvimento o núcleo do escoamento é acelerado e o fluido próximo da parede é retardado pela ação da viscosidade.

Perfil de Velocidades Desenvolvido e Transição

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

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

- 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 13!)
- 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

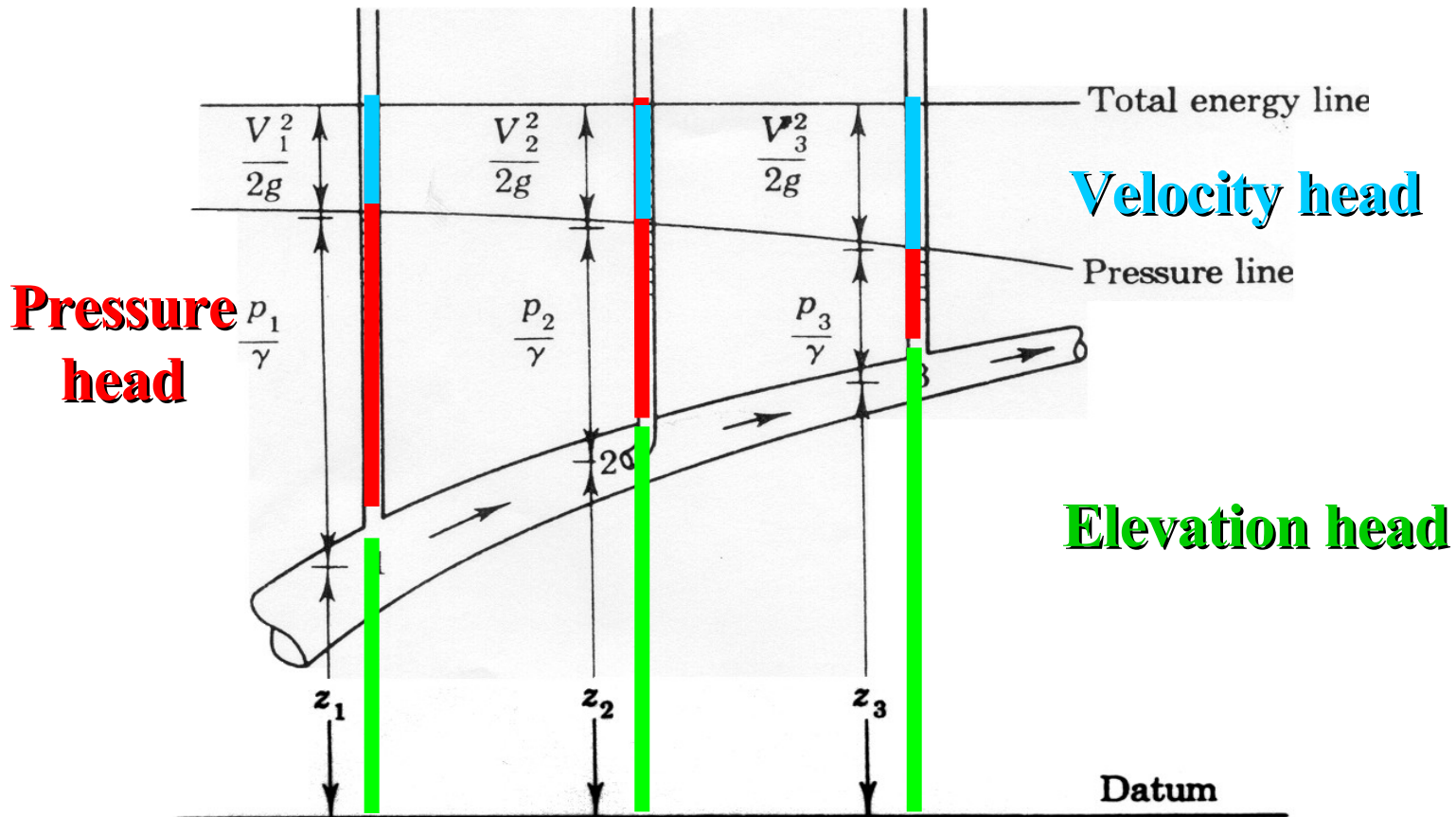
$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

- 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)

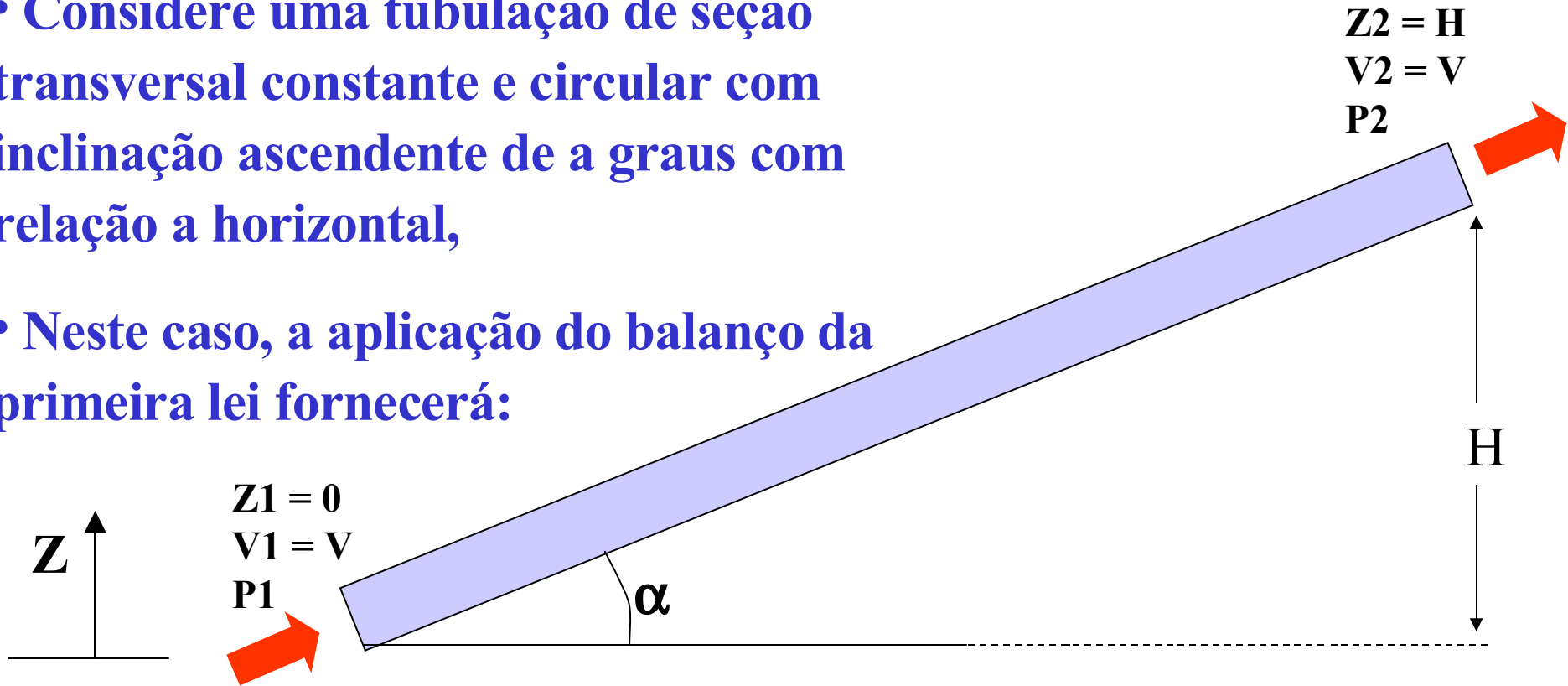
$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \text{constante}$$



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:

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

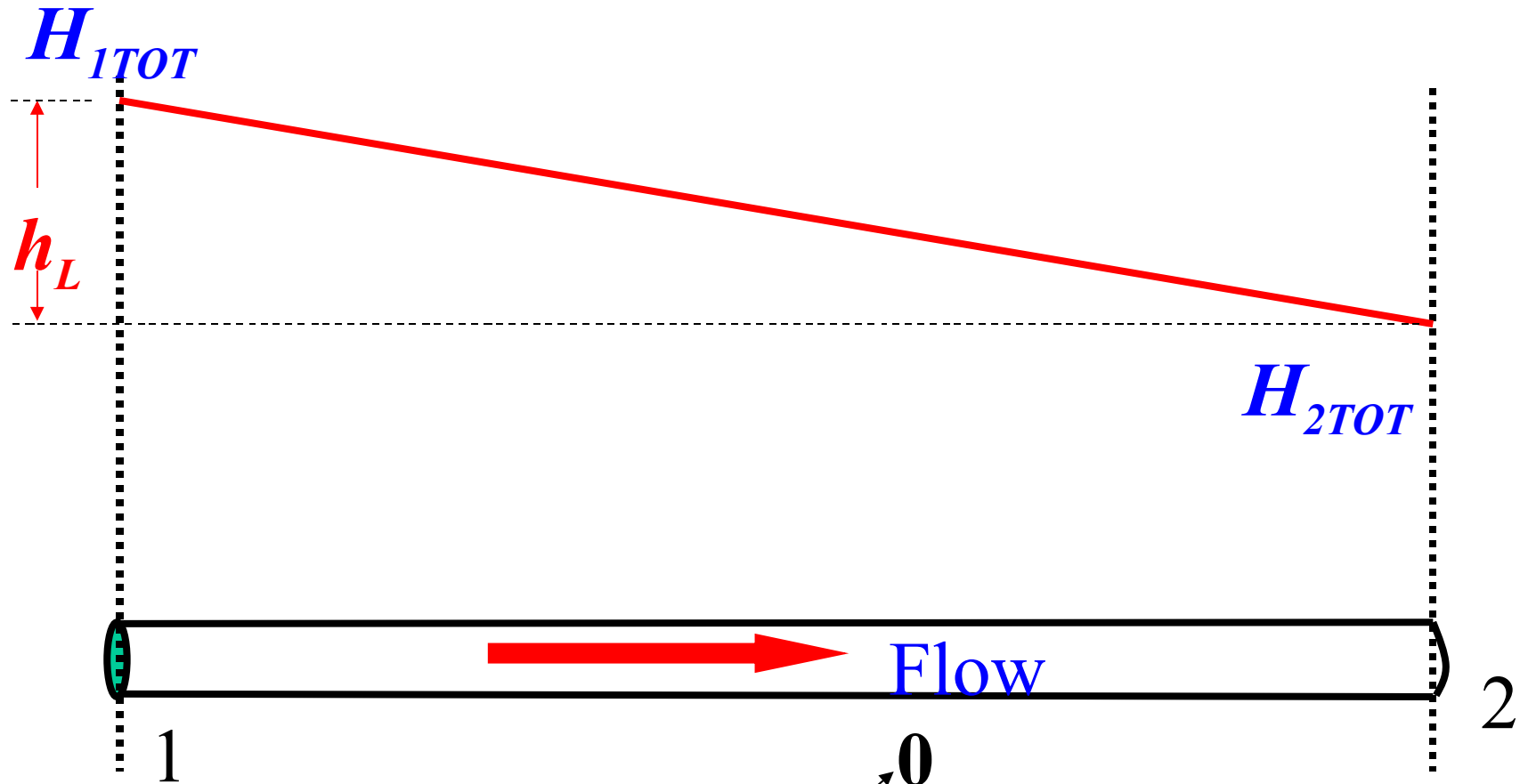
- onde ρ é a densidade do líquido. Note que a diferença de pressão é composta por uma parcela devido a coluna hidrostática de altura H e outra devido ao atrito.
- *A função de uma bomba no circuito é suprir a diferença de pressão consumida pela altura hidrostática e pelo atrito.*

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:

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

Tubulação Horizontal: queda de pressão devido ao atrito, h_L

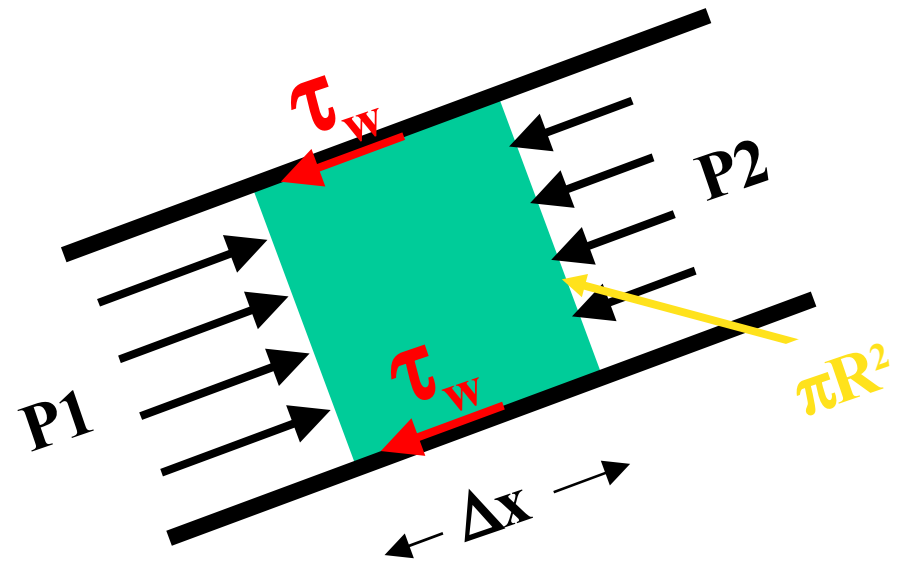


$$(P_1 - P_2) = \rho g H + \rho g h_L$$

Perdas distribuídas

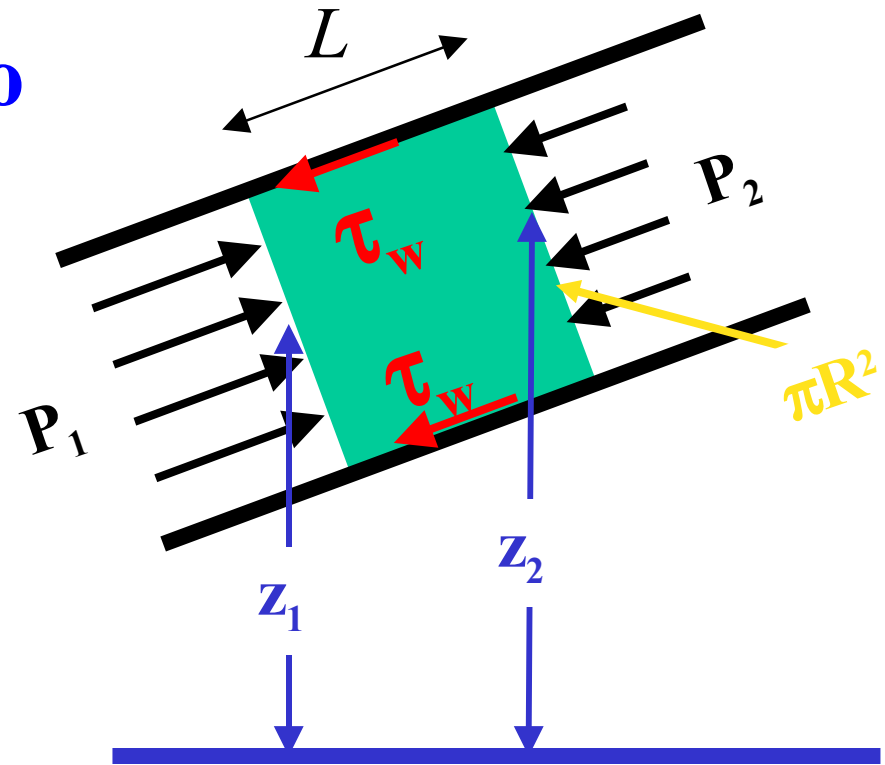
Relação entre h_f e τ_w

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

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

$\tau/(\rho V^2/2)$ = *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:**

$$h_L = h_f + \sum h_m$$

Como determinar h_f e h_m ???

• Perda de carga **DISTRIBUÍDA** h_f

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

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

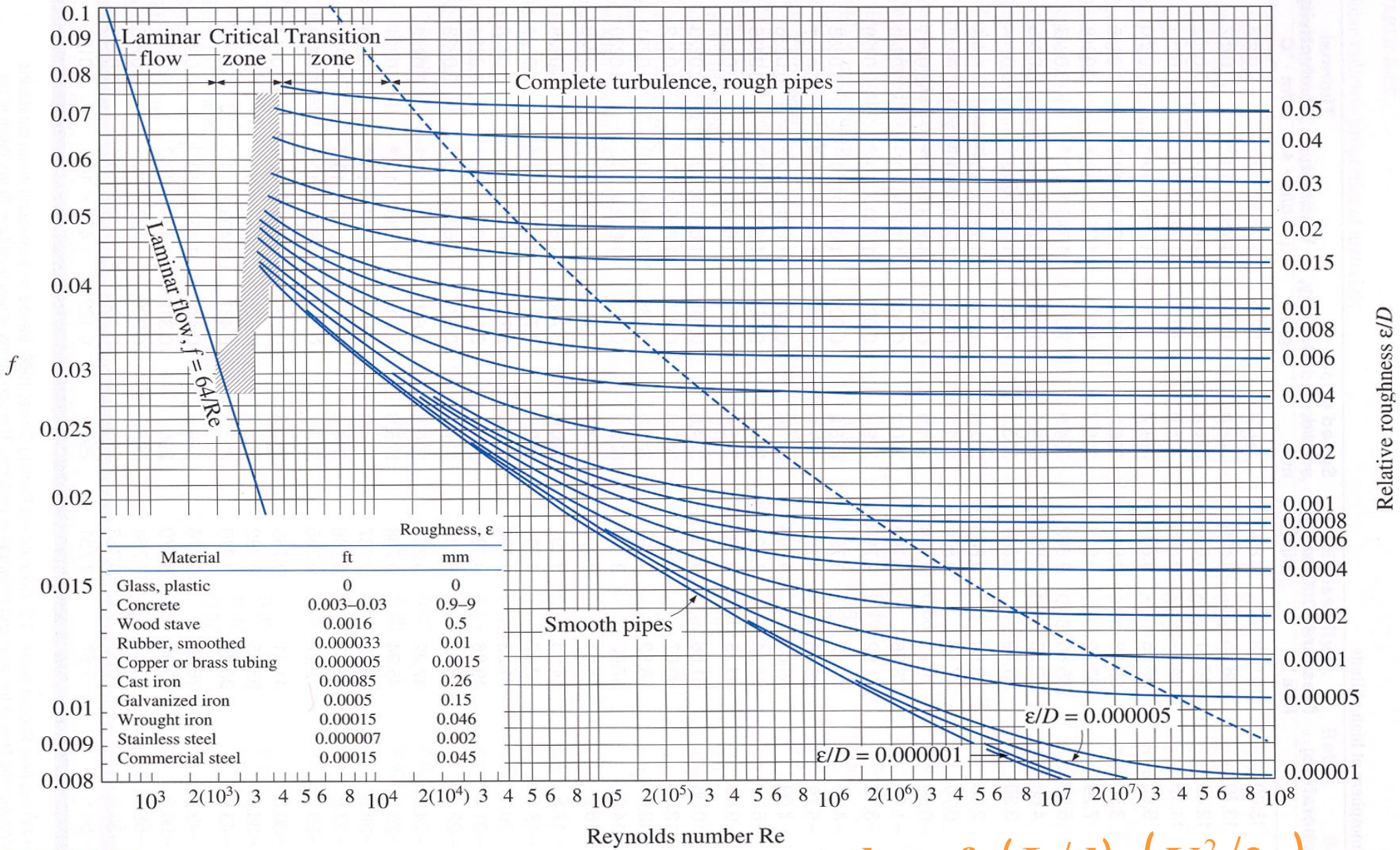


FIGURE A-27

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

$$h_f = f \cdot (L/d) \cdot (V^2/2g)$$

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**

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

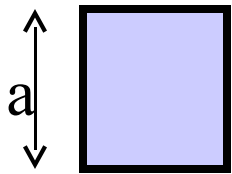
Desvio de 2% da eq. Colebrook

Como Determinar d_h 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:

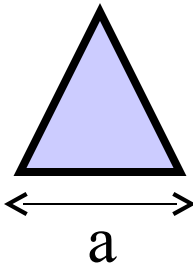
$$d_h = \frac{4 \cdot \text{Área}}{\text{Perímetro}}$$

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 |

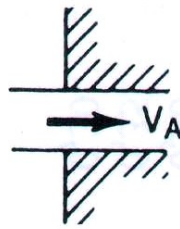
Como Determinar h_m , a constante K

Tabela 7-3 Perdas de válvulas parcialmente abertas.

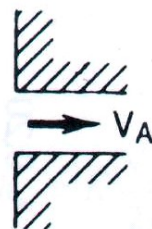
| Condição | Razão K/K (condição aberta) | |
|--------------|-----------------------------|---------------|
| | Válvula da porta | Válvula Globo |
| Aberta | 1,0 | 1,0 |
| Fechada, 25% | 3,0-5,0 | 1,5-2,0 |
| 50% | 12-22 | 2,0-3,0 |
| 75% | 70-120 | 6,0-8,0 |

Entradas

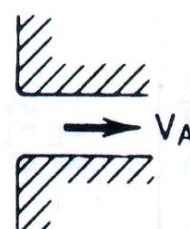
$$K \equiv \frac{h_m}{V_A^2/2g}$$



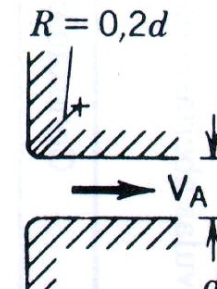
Saliente:
 $K = 0,78$



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

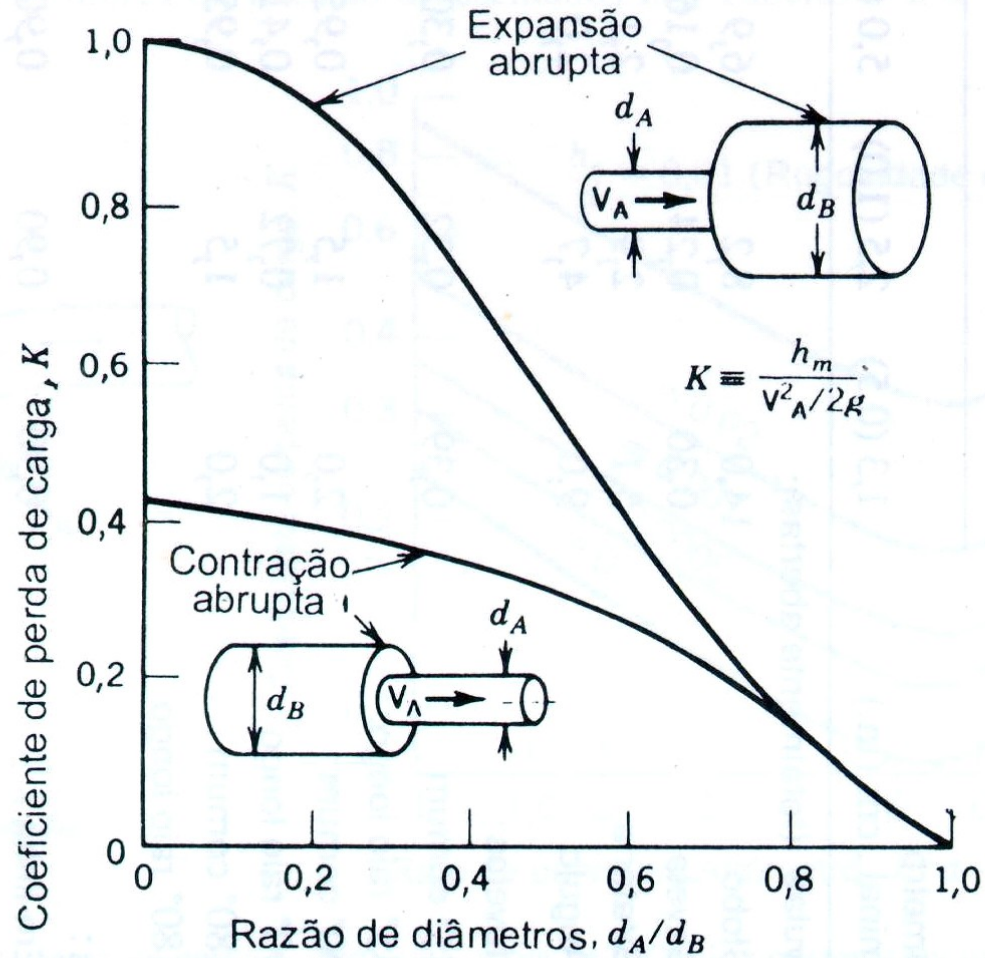
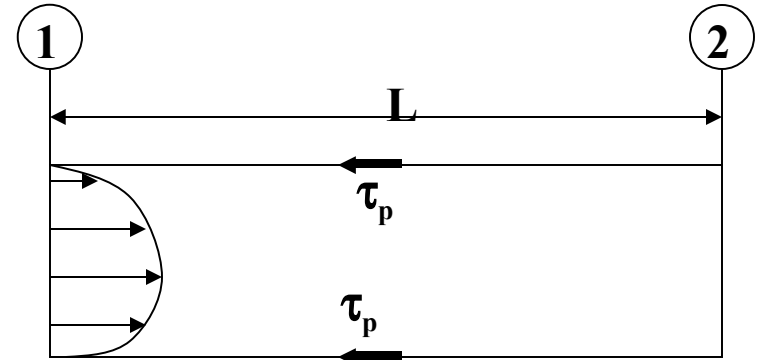


Figura 7-7 Coeficiente de perda K para contrações e expansões abruptas.

Fluxograma Perda de Carga

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

$$h_L = h_f + \sum h_m$$



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

Problema 7-6

- 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?

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

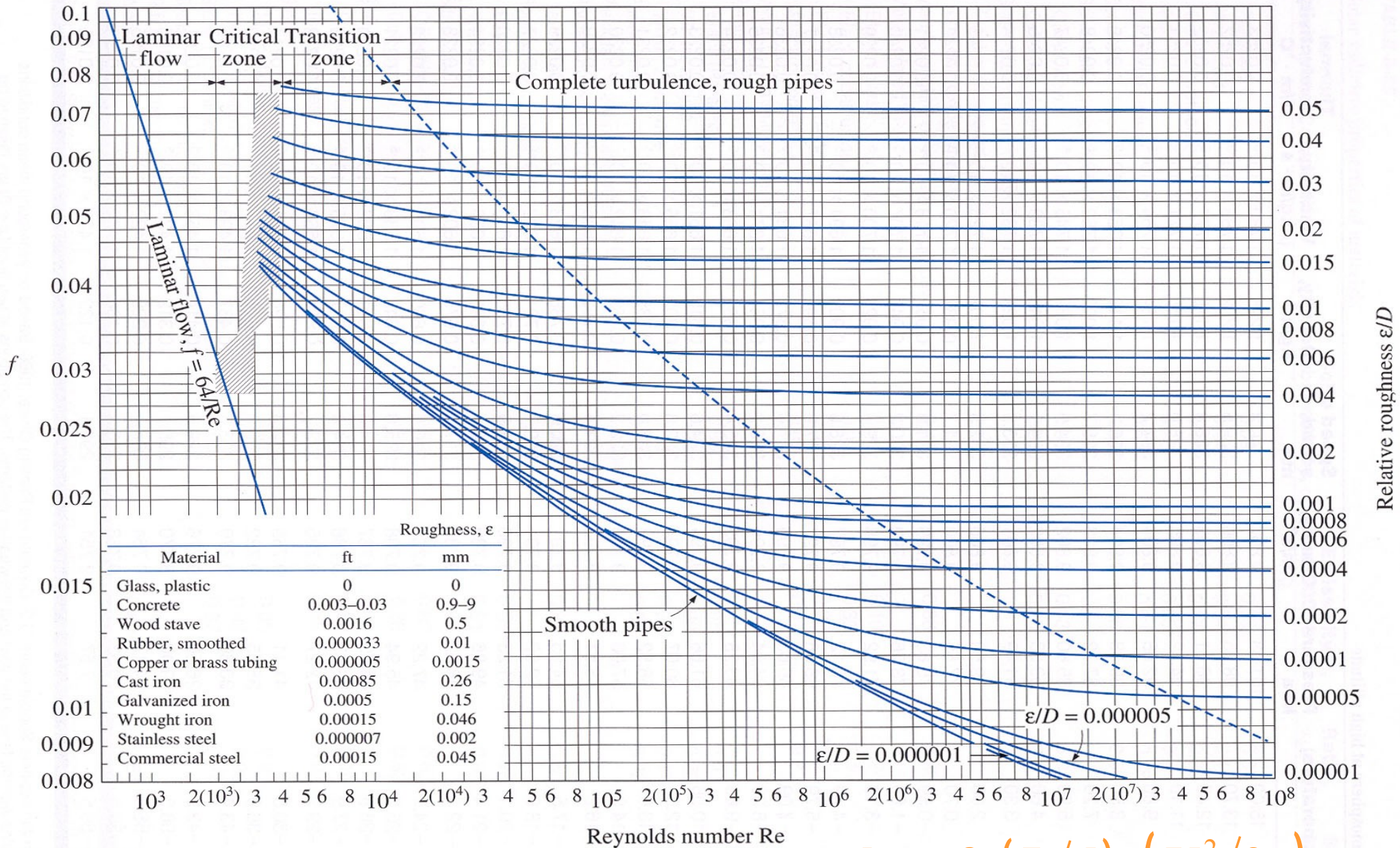


FIGURE A-27

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


$$h_f = f \cdot (L/d) \cdot (V^2/2g)$$

Problema 7-8

- Água a 10°C escoia através de um tubo de ferro galvanizado a uma vazão de 0.3 m³/s. O diâmetro interno do tubo vale 190mm. Determine o coeficiente de atrito de Darcy e a correspondente a queda de pressão por unidade de comprimento do duto.

$$D = 190\text{mm}$$

Tab. 7.1 → rugosidade = 0.15 mm



$Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ →

$$\textit{rugosidade relativa} = 0.15 / 190 = 0.0008$$

Problema 7-8

Tab. A-9, $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ & $\nu = 1.308 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Definição de Reynolds $\rightarrow \text{Re}_D = V \cdot D/\nu$

Em termos da vazão volumétrica \rightarrow

$$\text{Re}_D = 4Q/\pi D\nu = 1.54 \times 10^6$$

$ReD = 1.54 \cdot 10^6$ & $\epsilon/D = 0.0008$

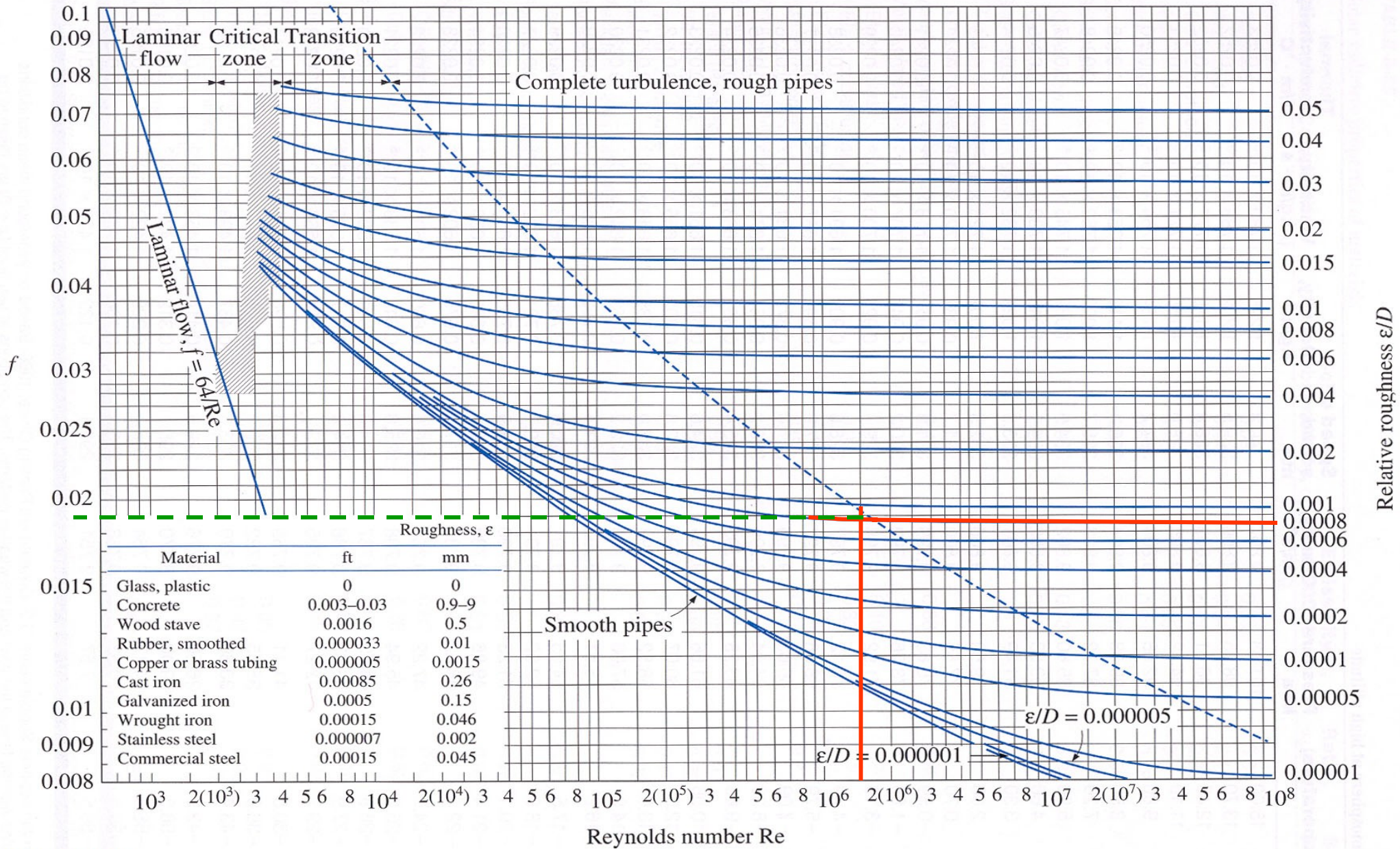


FIGURE A-27

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

Problema 7-8

- O fator de atrito é $f = 0.019$
- A queda de pressão é:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h_L$$

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot f \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

ou

$$\frac{\Delta P}{L} = 8 \cdot f \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} = 5.5 \text{ kPa/m}$$

Problema 7-9 (obs. Problema parecido com 5-30E cap 5)

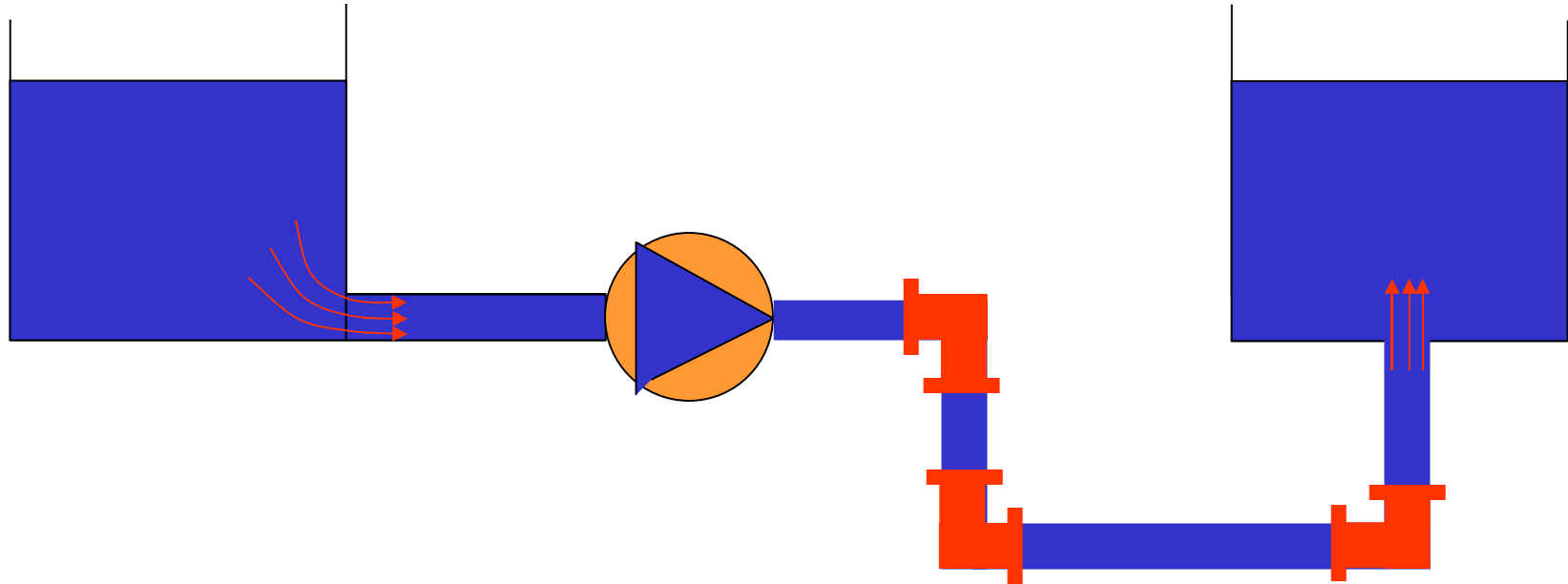
- Uma bomba é necessária para movimentar óleo a 310K de um terminal de descarga marítimo ao nível do mar para o tanque de armazenamento de uma refinaria que se encontra a 200 m de distância. O diâmetro interno do tubo é 20 cm, é feito de ferro fundido e contém três cotovelos flangeados de 90°. A vazão de operação é 0.356 m³/s. Desprezando as perdas de carga na entrada e saída dos reservatórios determine:
- A potência de eixo da bomba se sua eficiência é de 85%;
- Se a entrada e saída dos tubos são do tipo ‘abruptas’, estime as perdas de carga em cada uma;

Problema 7-9

Óleo, tab. A-10 & 310K, $\rho = 877.9 \text{ kg/m}^3$ @ $\nu = 288.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Comprimento, $L = 200\text{m}$, vazão $Q = 0.356 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\sim 2000000\text{bpd}$)

Tubo ferro fundido, diâmetro = 0.2m & rugosidade (tab. 7.1) $\epsilon = 0.26 \text{ mm}$

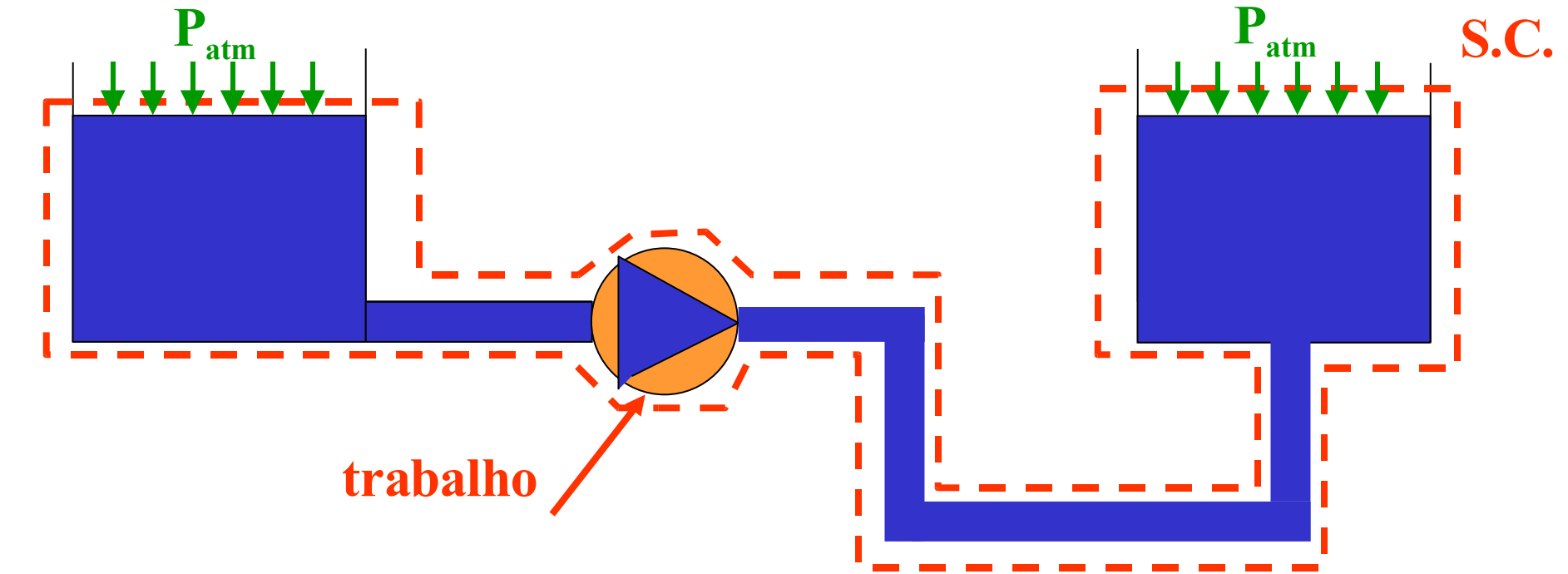


Cotovelos, tab. 7.2 (conexão flangeada 90°) $K = 0.26$

Contração abrupta, Fig. 7-7, $K = 0.4$

Expansão abrupta, Fig. 7-7, $K = 1.0$

Problema 7-9 Superfície de Controle

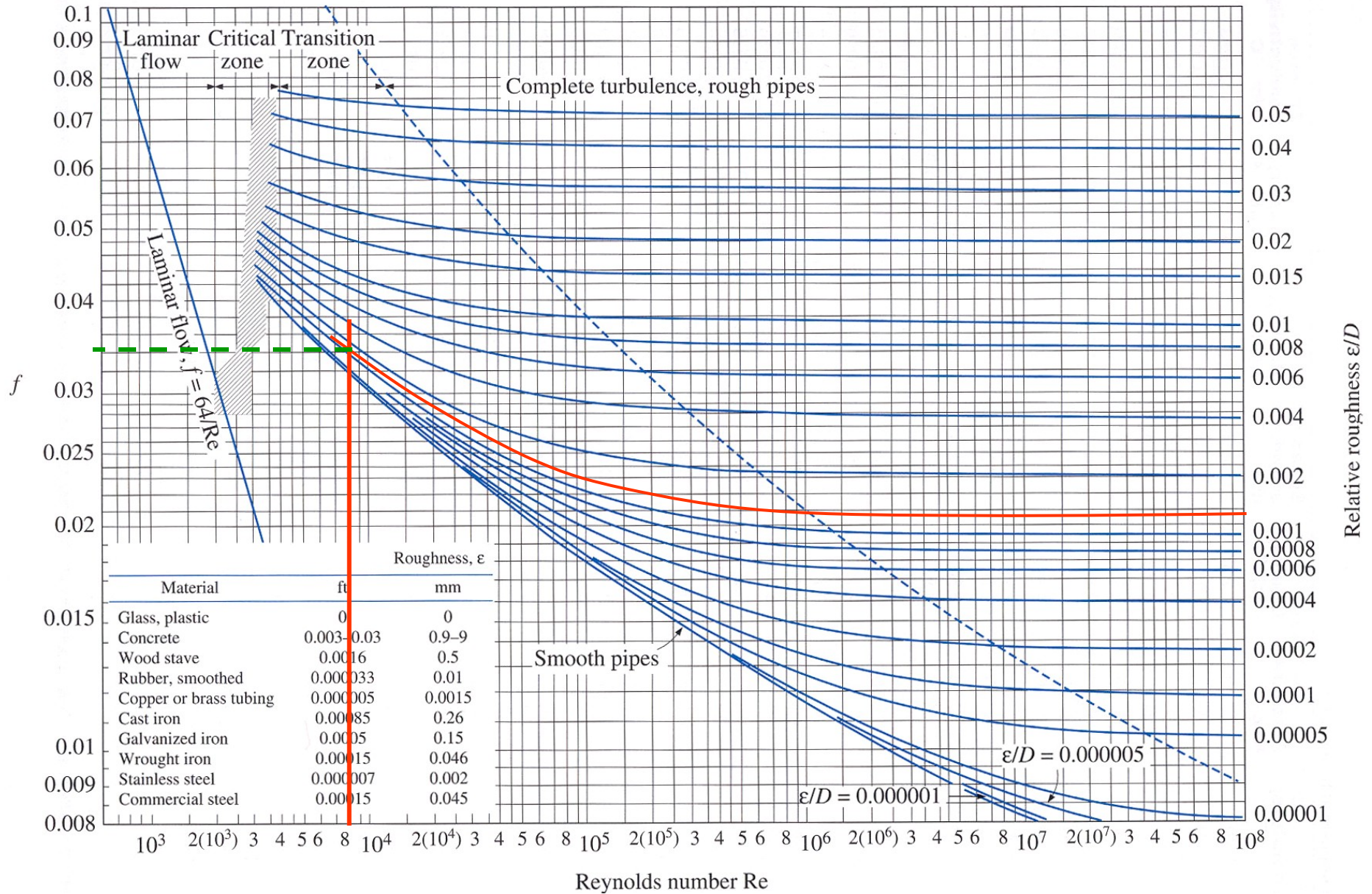


$$\left(\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \right)_e - \left\{ \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z \right)_s + h_L \right\} = \frac{w}{g} \quad \rightarrow \quad h_L = -\frac{w}{g}$$

~ 0 (indicated by red arrows pointing to the velocity terms in the Bernoulli equation)

$$\dot{W}_{VC} = \dot{m} g h_L = (\rho Q) g h_L$$

$$\text{Re}_D = 4Q/\pi Dv = 7869 \quad \& \quad \epsilon/d = 0.0013 \quad \rightarrow \quad f = 0.034$$



Problema 7-9

- **Perda de carga distribuída:**

$$h_f = f \cdot \left(\frac{L}{d} \right) \cdot \left(\frac{V^2}{2g} \right) = 0.034 \cdot \left(\frac{200}{0.2} \right) \cdot \left(\frac{11.3^2}{2g} \right) = 227.8\text{m}$$

- **Perda de carga localizada:**

$$h_m = \sum K \cdot \frac{V^2}{2g} = (3 \cdot 0.26 + 0.4 + 1) \cdot \left(\frac{11.3^2}{2g} \right) = 14.2 \text{ m}$$

- **Perda de carga total:**

$$h_L = h_f + h_m = 242\text{m}$$

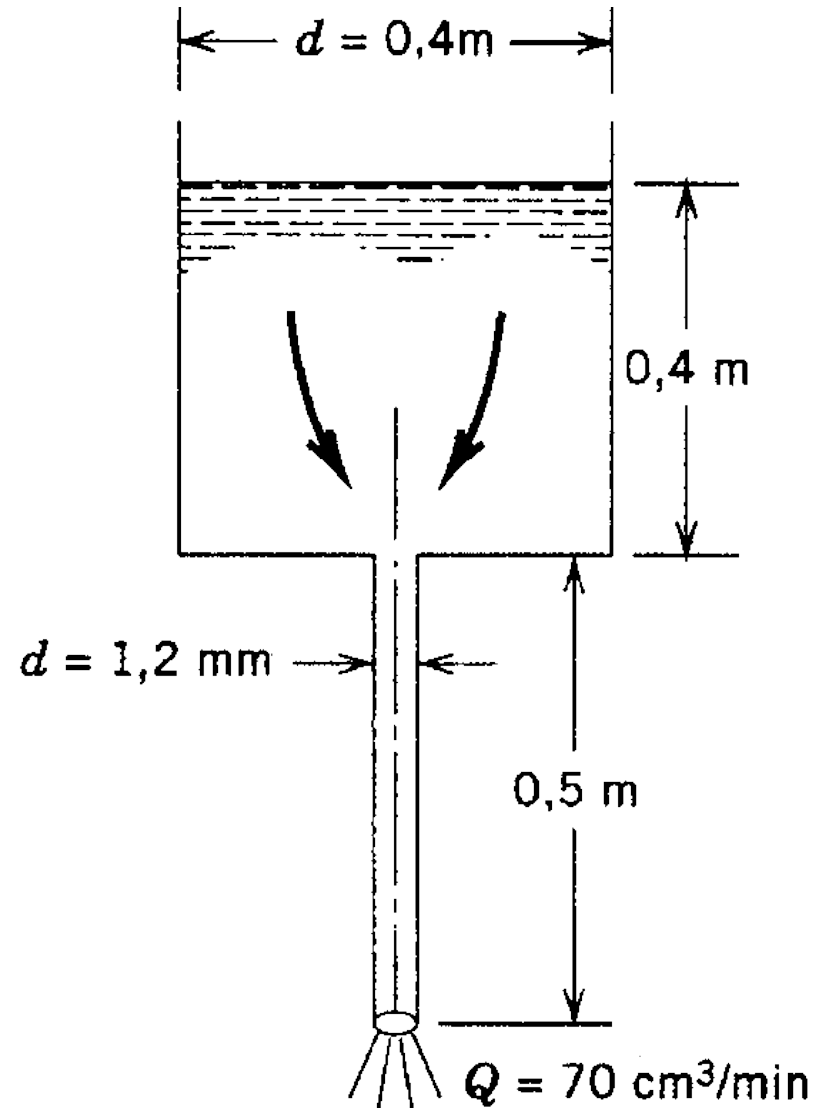
Problema 7-9

- Potência da bomba:

$$\dot{W} = \frac{Q \cdot (\rho \cdot g \cdot h_L)}{\eta} = \frac{0.356 \cdot 877.9 \cdot g \cdot 242}{0.85} = 873 \text{ kW}$$

Problema 7-15

- Um líquido escoar de um tanque grande ($d=0.4\text{m}$) para um tubo pequeno ($d=1.2\text{ mm}$) instalado no centro da base do tanque. Há uma coluna de $0,4\text{ m}$ de líquido no tanque grande e o comprimento do tubo capilar é 0.5m . O tanque é aberto para a atmosfera e o tubinho também descarrega num ambiente de P_{atm} . O escoamento é mantido apenas por força gravitacional, e o nível de líquido no tanque grande permanece constante. Calcule a viscosidade cinemática do líquido em (m^2/s)



Problema 7-15

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

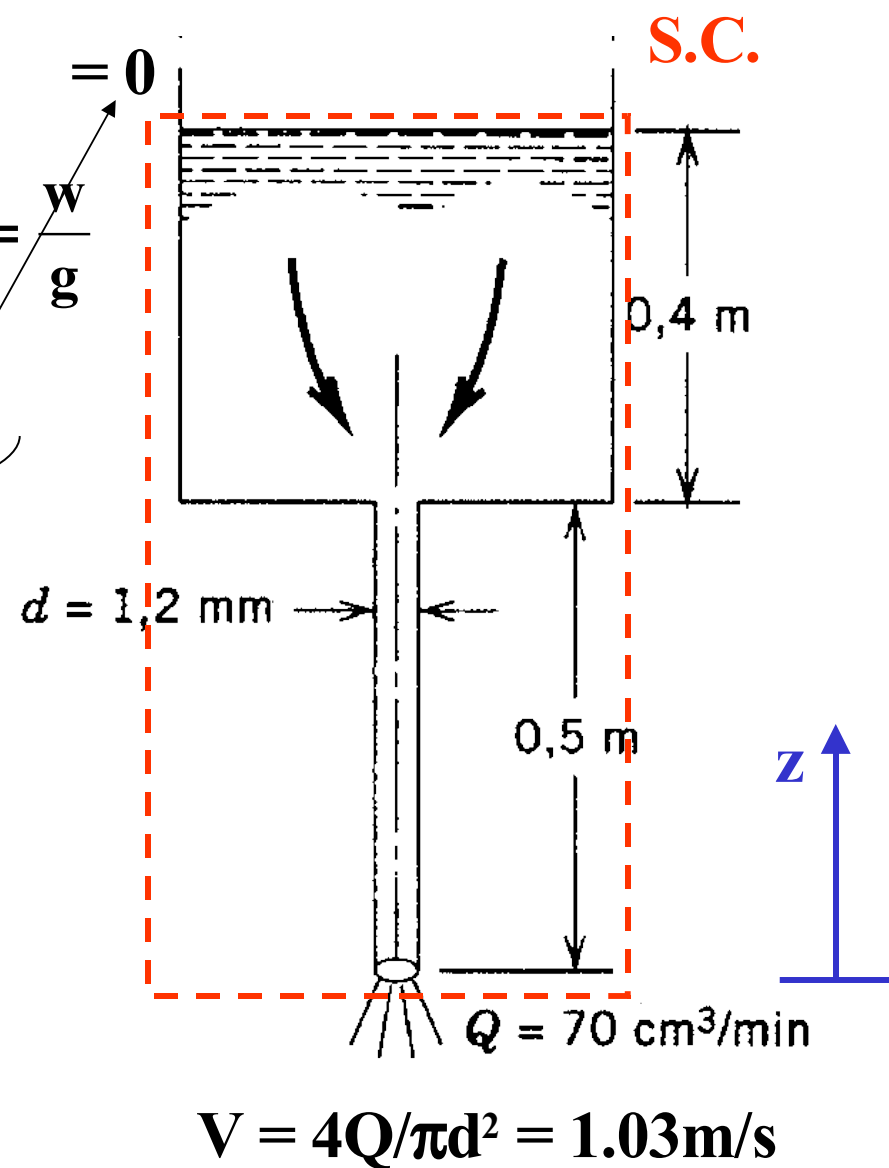
$\sim 0 = 0.9\text{m}$ (red arrow pointing to $\frac{V^2}{2g}$)
 $\sim 4Q/\pi d^2$ (red arrow pointing to V)
 $\equiv 0$ (blue arrow pointing to z_s)

P_{atm} (green line under $\frac{p}{\rho g}$)

$$0.9 - \left(\frac{1.03^2}{2 \cdot g} \right) = h_L \rightarrow h_L = 0.8457\text{m}$$

- Perda distribuída:

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



Problema 7-15

- Como h_f , L , d e V são conhecidos (0.8457 m, 0.5m, 1.2 mm e 1.03 m/s) pode-se determinar f :

$$f = \frac{h_f}{\left(\frac{L}{d}\right) \cdot \left(\frac{V^2}{2g}\right)} = 3.745 \cdot 10^{-2}$$

- Se considerarmos ‘ad hoc’ que o regime no tubo capilar seja laminar, então $f = 64/\text{Re}$;

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \rightarrow \nu = \frac{f \cdot d \cdot V}{64} = 7.247 \cdot 10^{-7}$$

Problema 7-15

- Vamos verificar se a hipótese de escoamento laminar é válida uma vez determinado o valor da viscosidade do líquido:

$$Re_d = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{1.03 \cdot (1.2/1000)}{7.247 \cdot 10^{-7}} = 1709$$

- Como $Re_d < 2300$ o escoamento está em regime laminar e portanto a hipótese ‘ad hoc’ é válida.