

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS**



Operações Unitárias I

Introdução a transferência de quantidade de movimento

Dinâmica dos Fluidos – FLUIDOS EM ESCOAMENTO

AULA 19

Profa. Dra. Bianca Chierregato Maniglia

biancamaniglia@usp.br

biancamaniglia@iqsc.usp.br

Equação de Bernoulli para **Fluidos Reais** ✓ Correção

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + W_e = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

Trabalho de Bomba

PERDA DE CARGA

*Energia perdida
pelo fluido entre 2 pontos*

PERDA DE CARGA (h_f)

- Energia por unidade de peso perdida no trecho de tubulação reta.

PERDAS DE CARGA NORMAL OU DISTRIBUÍDA (h_{fN})

Trechos retos da tubulação

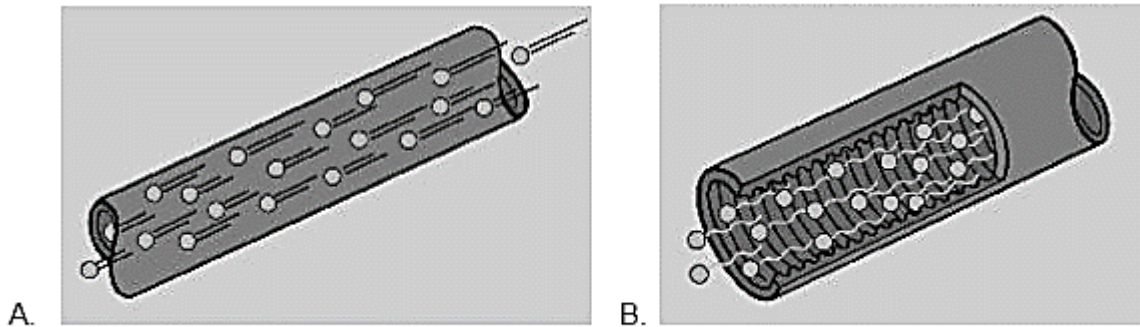
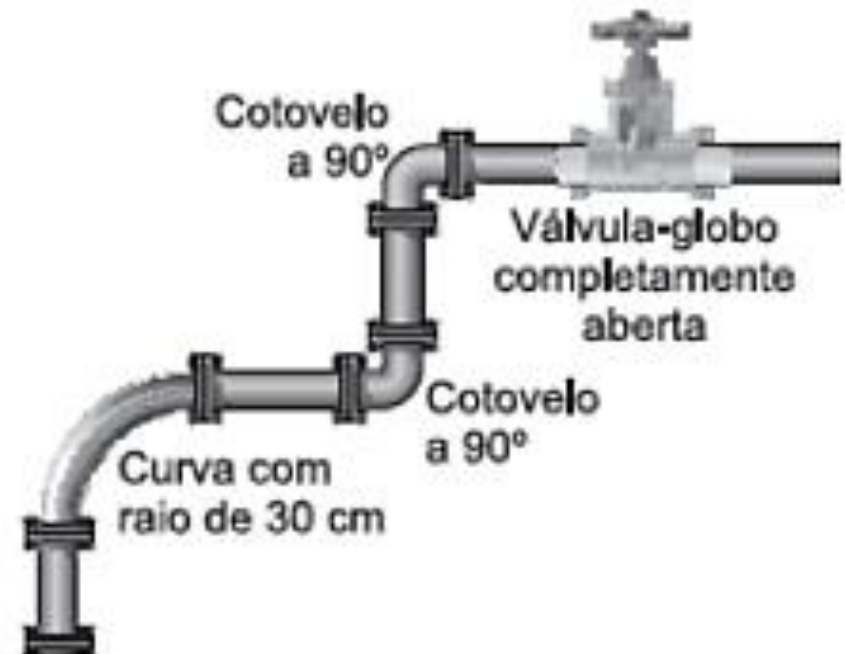


Figura 7. Perda de carga no interior de tubos

$$h_f = h_{fN} + h_{fL}$$

PERDA DE CARGA LOCALIZADA (h_{fL})

Acessórios na tubulação
“acidentes na tubulação”



Perda de carga normal ou distribuída (h_{fN})

(1) Equação de Darcy

$$h_{fn} = f \frac{Lv^2}{D2g}$$

onde: D = diâmetro interno da tubulação

L = comprimento do trecho reto do tubo

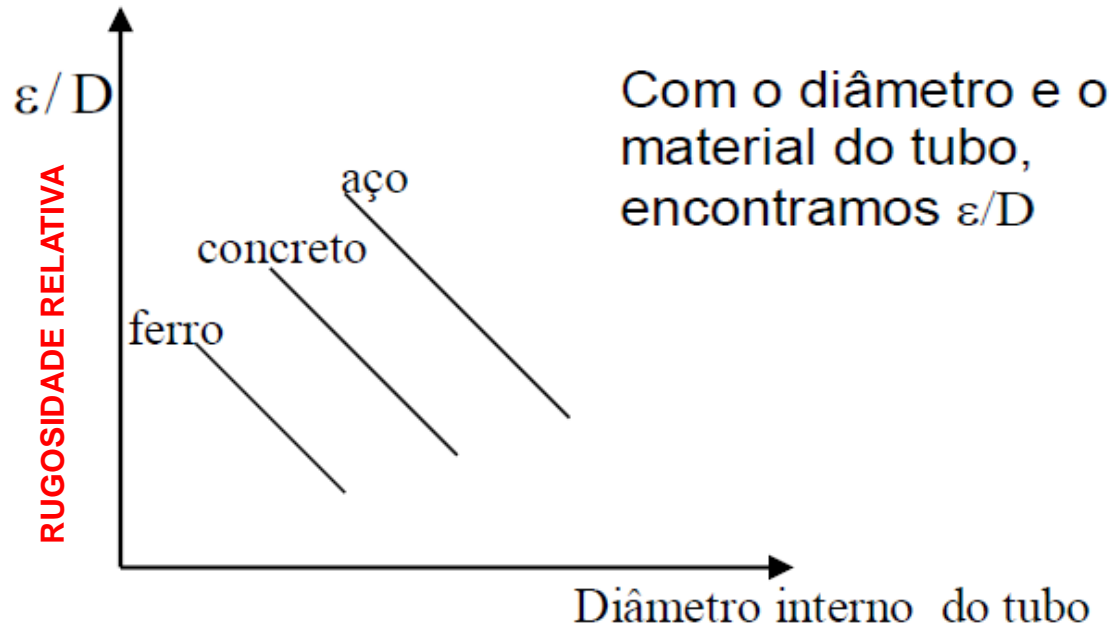
v = velocidade de escoamento

f = fator de atrito ou coeficiente de atrito

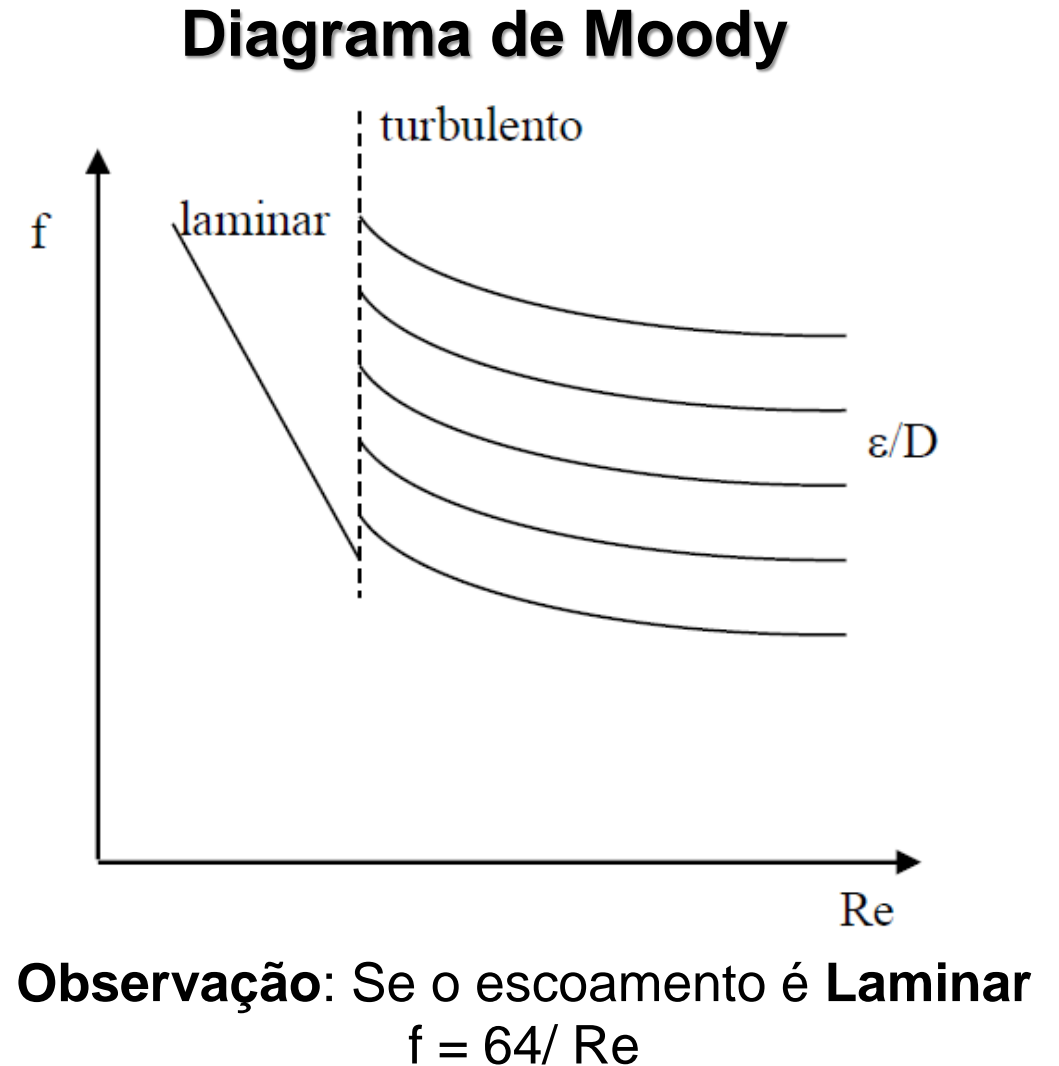
“ f ”
Auxílio de figuras e tabelas

Rugosidade relativa do tubo (ϵ / D)
Número de Reynolds (Re)

Perda de carga normal ou distribuída (h_{fN})



Rugosidade é um defeito ou alteração na parede interna do tubo que depende do material e do tempo de uso.



Rugosidade relativa x diâmetro do tubo

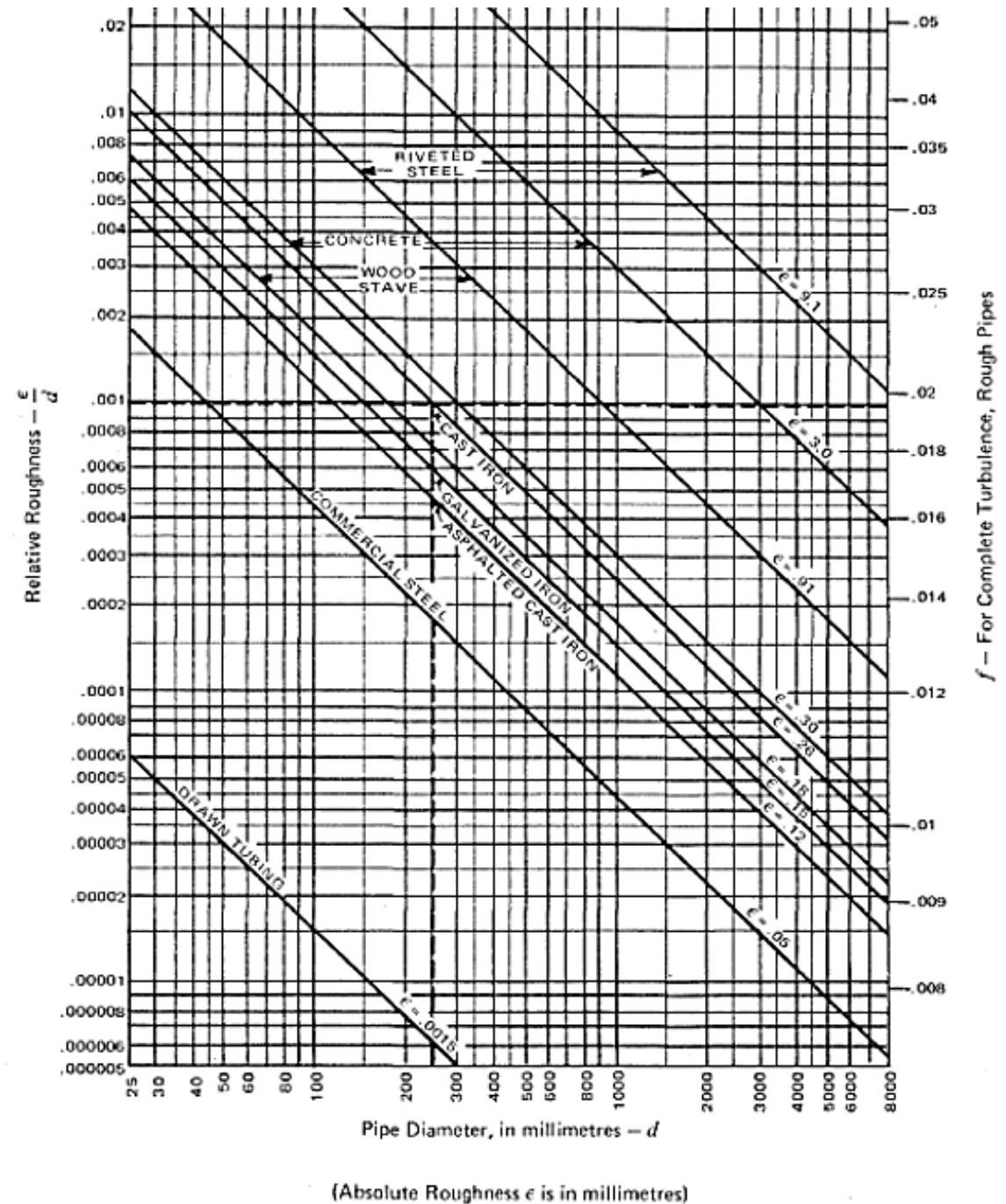
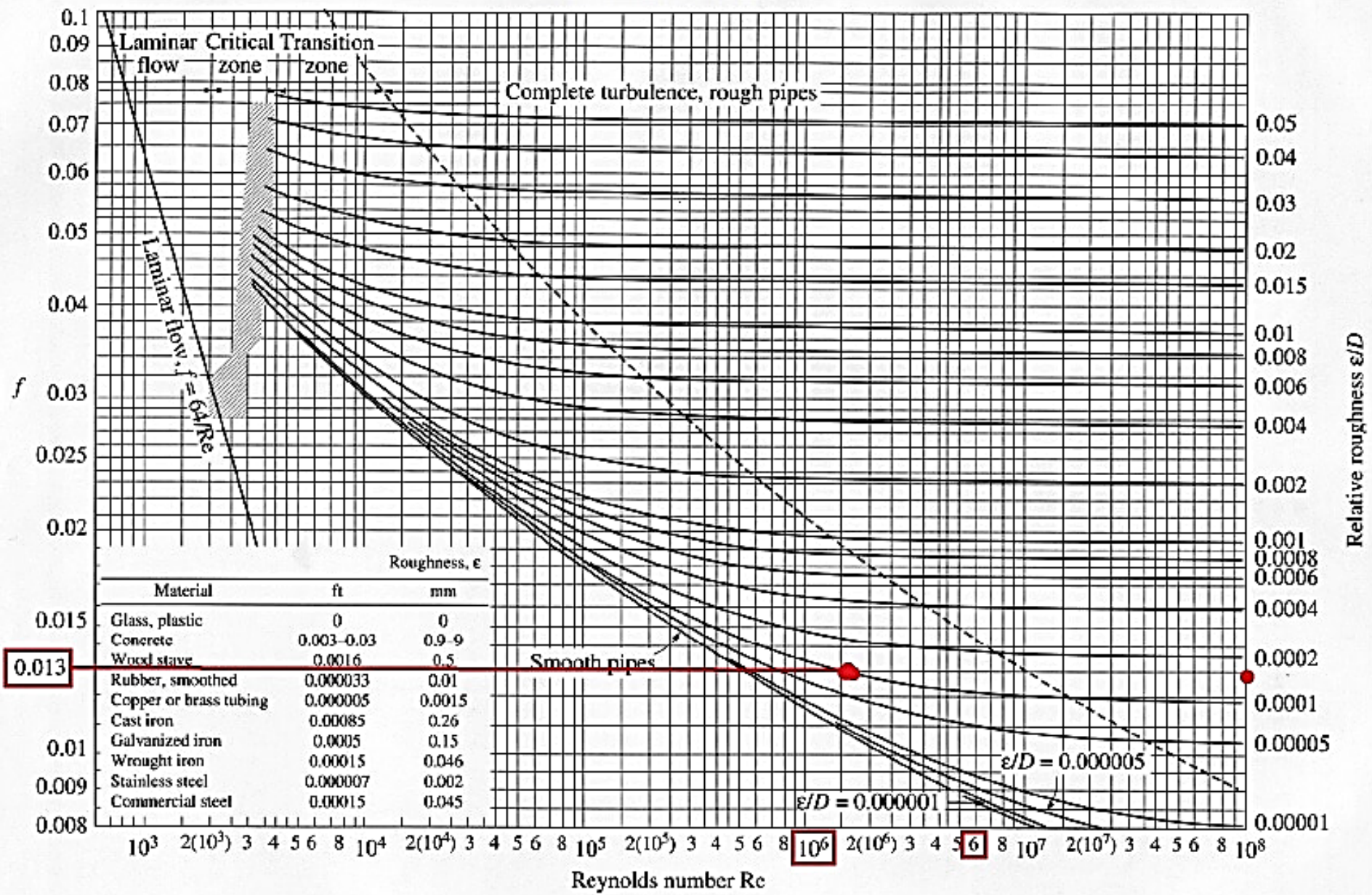


Diagrama de Moody



$f \times Re \times \epsilon/D$

FIGURE A-27

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

Perda de carga normal ou distribuída (h_{fN})

(1) Equação de Hazen-Willians

- ✓ Tubulações com diâmetros entre 5 cm e 350 cm,
- ✓ Qualquer material de construção dos tubos.

$$h_{fn} = 10,643 \frac{L}{D^{4,87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,85}$$

onde: h_f = perda de carga (m)

L = comprimento da tubulação (m)

Q = vazão volumétrica (m^3/s)

D = diâmetro interno do tubo (m)

C = coeficiente que depende da natureza do material de fabricação dos tubos e da rugosidade interna das paredes (vide Tabela IV.1).

Tabela IV.1. Valores do coeficiente C da Equação de Hazen-Willians.

Material do tubo	C
Aço corrugado	60
Aço comercial	100
Aço rebitado (novo)	110
Aço rebitado (em uso)	85
Chumbo	130
Cimento-Amianto	140
Cobre	130
Concreto	120
Ferro fundido (novo)	130
Ferro fundido (em uso)	90
Latão	130
Vidro	140
Plásticos em geral	140
PVC	140

Perda de carga normal (h_{fN})

Equação de Darcy

$$h_{fn} = f \frac{Lv^2}{D2g}$$

onde: D = diâmetro interno da tubulação

L = comprimento do trecho reto do tubo

v = velocidade de escoamento

f = fator de atrito ou coeficiente de atrito

Tubulações industriais

Fórmula Universal

Equação de Hazen-Willians

$$h_{fn} = 10,643 \frac{L}{D^{4,87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,85}$$

onde: h_f = perda de carga (m)

L = comprimento da tubulação (m)

Q = vazão volumétrica (m^3/s)

D = diâmetro interno do tubo (m)

C = coeficiente que depende da natureza do material de fabricação dos tubos e da rugosidade interna das paredes (vide Tabela IV.1).

Equação empírica

Tubulações com diâmetros entre 5 cm e 350 cm

Qualquer material de construção dos tubos

Perda de carga localizada (h_{fL})

(1) EQUAÇÃO GERAL

ou Equação Baseada no Coeficiente K

$$h_{fL} = K \frac{v^2}{2g}$$

h_{fL} : m

v : m/s

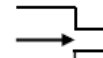
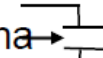
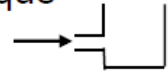
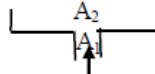
g : m/s²

K: coeficiente adimensional que depende do tipo de acidente

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + K_1 \frac{v^2}{2g} + K_2 \frac{v^2}{2g} + K_3 \frac{v^2}{2g} + \dots$$

$$h_f = \frac{v^2}{2g} \left(f \frac{L}{D} + K_1 + K_2 + K_3 + \dots \right)$$

Tabela IV.2. valores de K para diversos acidentes em tubulações:

ACIDENTE	K
Cotovelo 90°	0,90
Cotovelo 45°	0,40
Curva 90°	0,40
Curva 45°	0,20
Tê - saída direta	0,60
Tê - saída lateral	1,30
Válvula gaveta aberta	0,20
Válvula globo aberta	10,00
Válvula de retenção	2,50
Saída de tanque	0,50
- bordas vivas 	
- com projeção interna 	0,70
Entrada de tanque	1,0
- lateral 	
- inferior ($A_1 \ll A_2$) 	1,0

Perda de carga localizada (h_{fL})

(2) COMPRIMENTO EQUIVALENTE

Determinar o comprimento de tubulação reta que forneceria a mesma perda de carga do acessório considerado.

Comprimento Equivalente ($L_{eq.}$)

$$h_{fn} = fL \frac{v^2}{2gD}$$

Se considerarmos só o acidente:

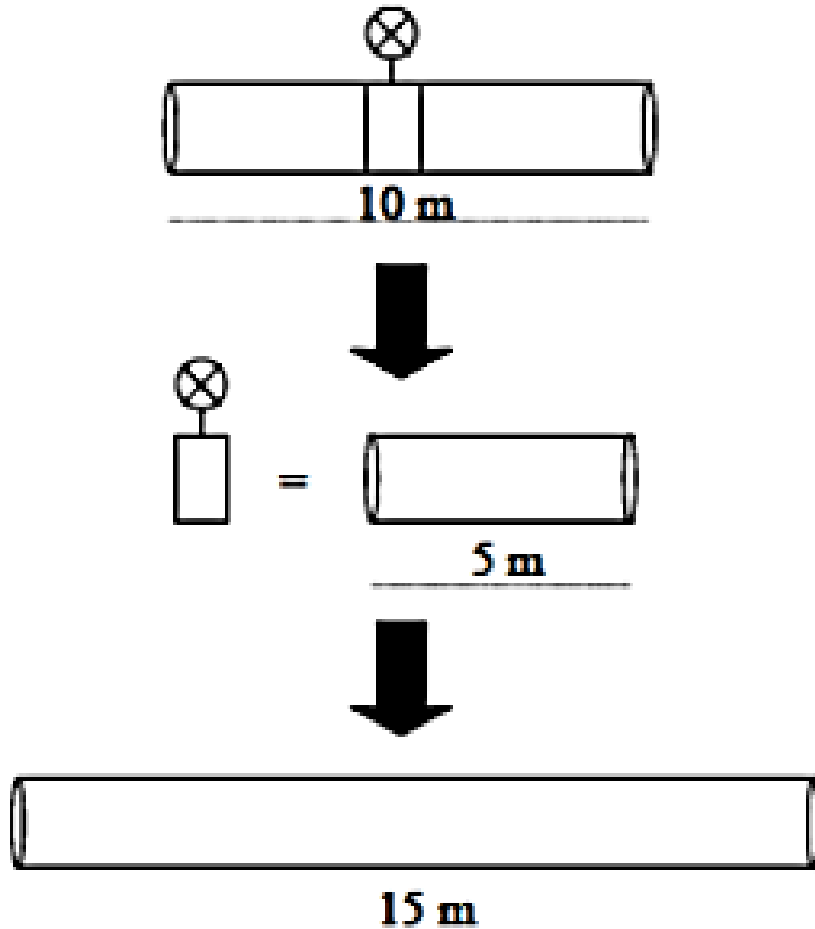
$$h_{fn} = h_{fl}$$

$$h_{fl} = K \frac{v^2}{2g}$$

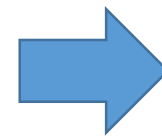
$$f.L \frac{v^2}{2gD} = K \frac{v^2}{2g} \Rightarrow K = f \frac{L}{D} \therefore L_{eq.} = \frac{K}{f} D$$

Perda de carga localizada (h_{fL})

Comprimento Equivalente ($L_{eq.}$)



$$L_{eq.} = \frac{K}{f} D$$



K/f tabelado

Em função de D




















$$\therefore L_{TOTAL} = L_{eq.} + L_{real}$$

$$h_f = f \cdot L_{TOTAL} \frac{v^2}{2gD}$$

Figura 6.2: Representação da perda de carga localizada pelo método dos comprimentos virtuais.

Valores de L_e em metros de canalização retilínea

Manual KSB

DIÂMETRO D		COTOVELO 90° RAIO LONGO	COTOVELO 90° RAIO MEDIO	COTOVELO 90° RAIO CURTO	COTOVELO 45°	CURVA 90° R / D - 1 1/2	CURVA 90° R / D - 1	CURVA 45°	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÊ PASSAGEM DIRETA	TÊ SAÍDA DE LADO	TÊ SAÍDA BILATERAL	VÁLVULA DE PÉ E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE RETIÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETIÇÃO TIPO PESADO
mm	pol.																			
13	½	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	¾	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1 ¼	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1 ½	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2 ½	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,3	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

* Os valores indicados para registros de globo, aplicam-se também às torneiras, válvulas para chuveiros e válvulas de descarga.



Perda de carga localizada (h_{fL})

Equação Geral

ou Equação Baseada no Coeficiente K

$$h_{fL} = K \frac{v^2}{2g}$$

h_{fL} : m

v : m/s

g : m/s²

K: coeficiente adimensional que depende do tipo de acidente

COMPRIMENTO EQUIVALENTE ($L_{eq.}$)

$$h_{fm} = h_{fL}$$

$$f.L \frac{v^2}{2gD} = K \frac{v^2}{2g} \Rightarrow K = f \frac{L}{D} \therefore L_{eq.} = \frac{K}{f} D$$

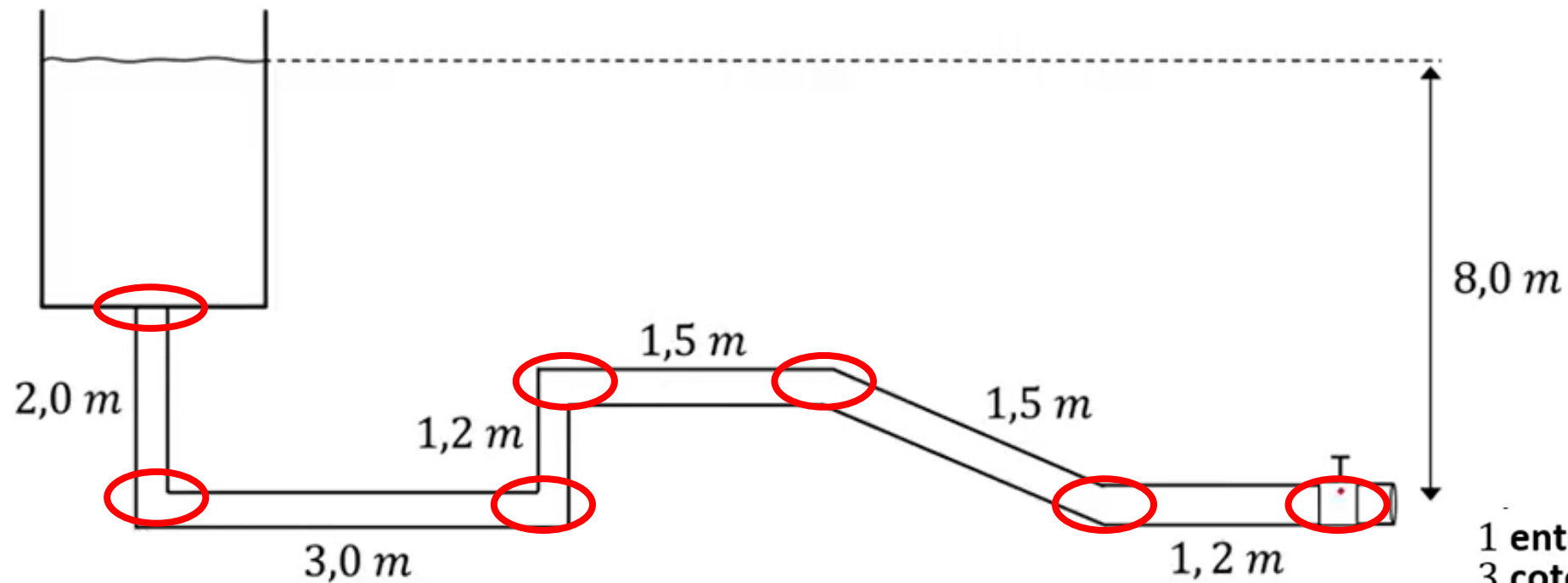
$$\therefore L_{TOTAL} = L_{eq.} + L_{real} \quad \text{K/f tabelado}$$

Acessórios Trecho reto

$$h_f = f.L_{TOTAL} \frac{v^2}{2gD}$$

Problema 1 - Revisão

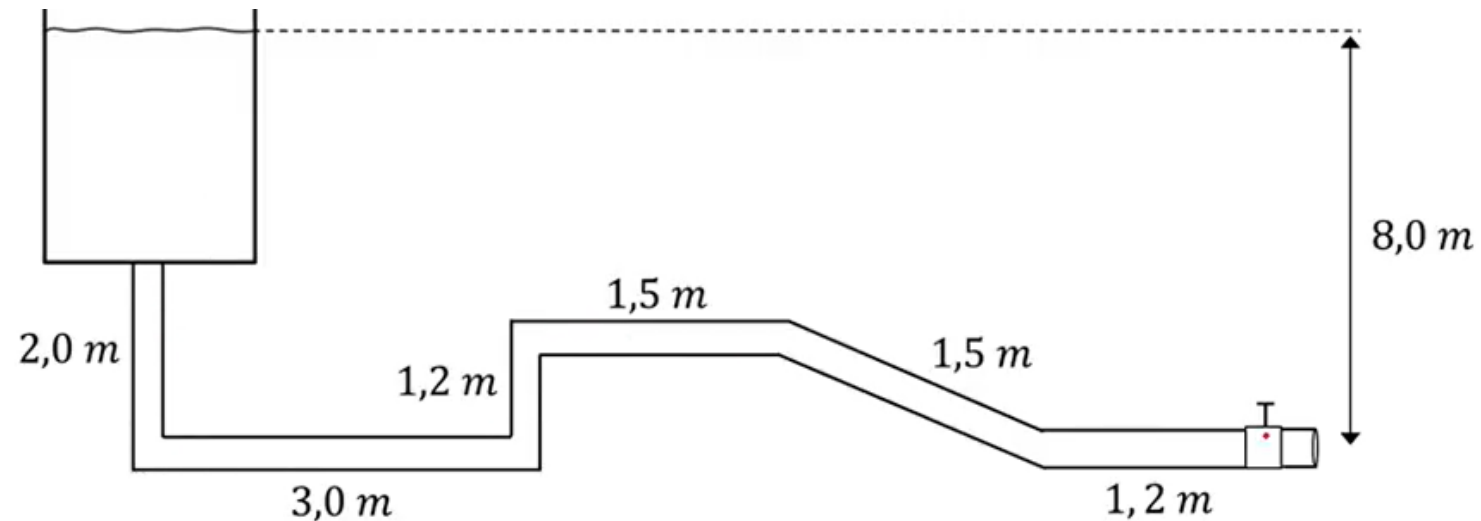
Calcular os comprimentos equivalentes e o total da instalação hidráulica esquematizada abaixo. O diâmetro interno da tubulação é de 50 mm . A instalação possui 1 entrada normal, 3 cotovelos de 90° raio curto, 2 curvas de 45° , 1 registro de gaveta aberto e 1 saída de tubulação. Utilize a tabela de comprimentos equivalentes.



- 1 entrada normal
- 3 cotovelos de 90° raio curto
- 2 curvas de 45°
- 1 registro de gaveta aberto
- 1 saída de canalização

Problema 1 - Revisão

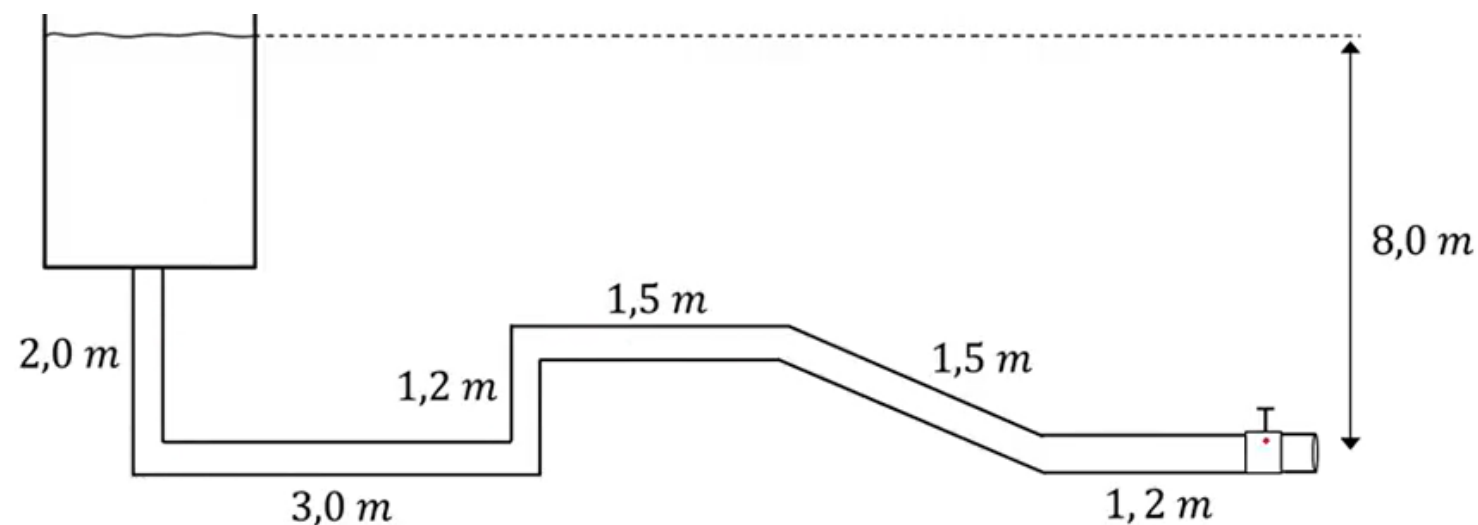
Calcular os comprimentos equivalentes e o total da instalação hidráulica esquematizada abaixo. O diâmetro interno da tubulação é de 50 mm . A instalação possui 1 entrada normal, 3 cotovelos de 90° raio curto, 2 curvas de 45° , 1 registro de gaveta aberto e 1 saída de tubulação. Utilize a tabela de comprimentos equivalentes.

**1) Comprimento real de tubulação (L)**

$$L = 2,0 + 3,0 + 1,2 + 1,5 + 1,5 + 1,2 = 10,4\text{ m}$$

Problema 1 - Revisão




















Calcular os comprimentos equivalentes e o total da instalação hidráulica esquematizada abaixo. O diâmetro interno da tubulação é de 50 mm . A instalação possui 1 entrada normal, 3 cotovelos de 90° raio curto, 2 curvas de 45° , 1 registro de gaveta aberto e 1 saída de tubulação. Utilize a tabela de comprimentos equivalentes.



2) Comprimento equivalente de tubulação (L_{eq}) **ACESSÓRIOS**

- 1 entrada normal
- 3 cotovelos de 90° raio curto
- 2 curvas de 45°
- 1 registro de gaveta aberto
- 1 saída de canalização

Comprimentos equivalentes a perdas localizadas. (Expressos em metros de canalização retilínea)*

DIÂMETRO D		COTOVELO 90° RAIO LONGO	COTOVELO 90° RAIO MÉDIO	COTOVELO 90° RAIO CURTO	COTOVELO 45°	CURVA 90° R/D - 1 1/2	CURVA 90° R/D - 1	CURVA 45°	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÊ PASSAGEM DIRETA	TÊ SAÍDA DE LADO	TÊ SAÍDA BILATERAL	VÁLVULA DE PE E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE RETIÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETIÇÃO TIPO PESADO
mm	pol.																			
13	1/2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	3/4	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1 1/4	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1 1/2	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2 1/2	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,3	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1



2) Comprimento equivalente de tubulação (L_{eq})

ACESSÓRIOS

Acessórios:

1 entrada normal $\rightarrow 0,7 \text{ m} \times 1 = 0,7 \text{ m}$

3 cotovelos de 90° raio curto $\rightarrow 1,7 \text{ m} \times 3 = 5,1 \text{ m}$

2 curvas de 45° $\rightarrow 0,4 \text{ m} \times 2 = 0,8 \text{ m}$

1 registro de gaveta aberto $\rightarrow 0,4 \text{ m} \times 1 = 0,4 \text{ m}$

1 saída de canalização $\rightarrow 1,5 \text{ m} \times 1 = 1,5 \text{ m}$

$$L_{eq} = 0,7 + 5,1 + 0,8 + 0,4 + 1,5 = \underline{8,5 \text{ m}}$$

1) Comprimento real de tubulação (L)

$$L = 2,0 + 3,0 + 1,2 + 1,5 + 1,5 + 1,2 = 10,4 \text{ m}$$

Comprimento total (L_T)

$$L_T = L + L_{eq} \quad L_T = 10,4 + 8,5 = 18,9 \text{ m}$$

Qual a perda de carga total?

$$h_T = f \frac{Lv^2}{D2g}$$

onde: D = diâmetro interno da tubulação

L = comprimento do trecho reto do tubo

v = velocidade de escoamento

f = fator de atrito ou coeficiente de atrito

$$D = 50 \text{ mm}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$f = 0.04$$

$$v = 2 \text{ m/s}$$

$$L_T = 18,9 \text{ m}$$

Qual a perda de carga total?

Outro método:

$$h_{fN} \text{ (trecho reto)} + h_{fL} \text{ (acessórios)} = h_T$$

$$h_T = \underbrace{f \cdot \frac{L_{\text{reto}} \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g}}_{\text{TRECHO RETO}} + \underbrace{f \cdot \frac{L_{\text{acessórios}} \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g}}_{\text{ACESSÓRIOS}}$$

Exercício IV.4) Determinar a perda de carga de um fluido escoando em uma tubulação de 2 m de comprimento e 1" de diâmetro interno. A vazão do fluido é 30 L/min. O tubo é de aço comercial. Considere que o fluido escoando seja água.

- ✓ $L = 2 \text{ m}$
- ✓ $D = 1''$
- ✓ $Q_v = 30 \text{ L/min}$
- ✓ Tubo => aço comercial
- ✓ Fluido => água (1000 kg/m^3)
- ✓ $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ e $\mu = 1 \text{ cP}$

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

Rugosidade relativa x diâmetro do tubo

$$\epsilon/D = 0.002$$

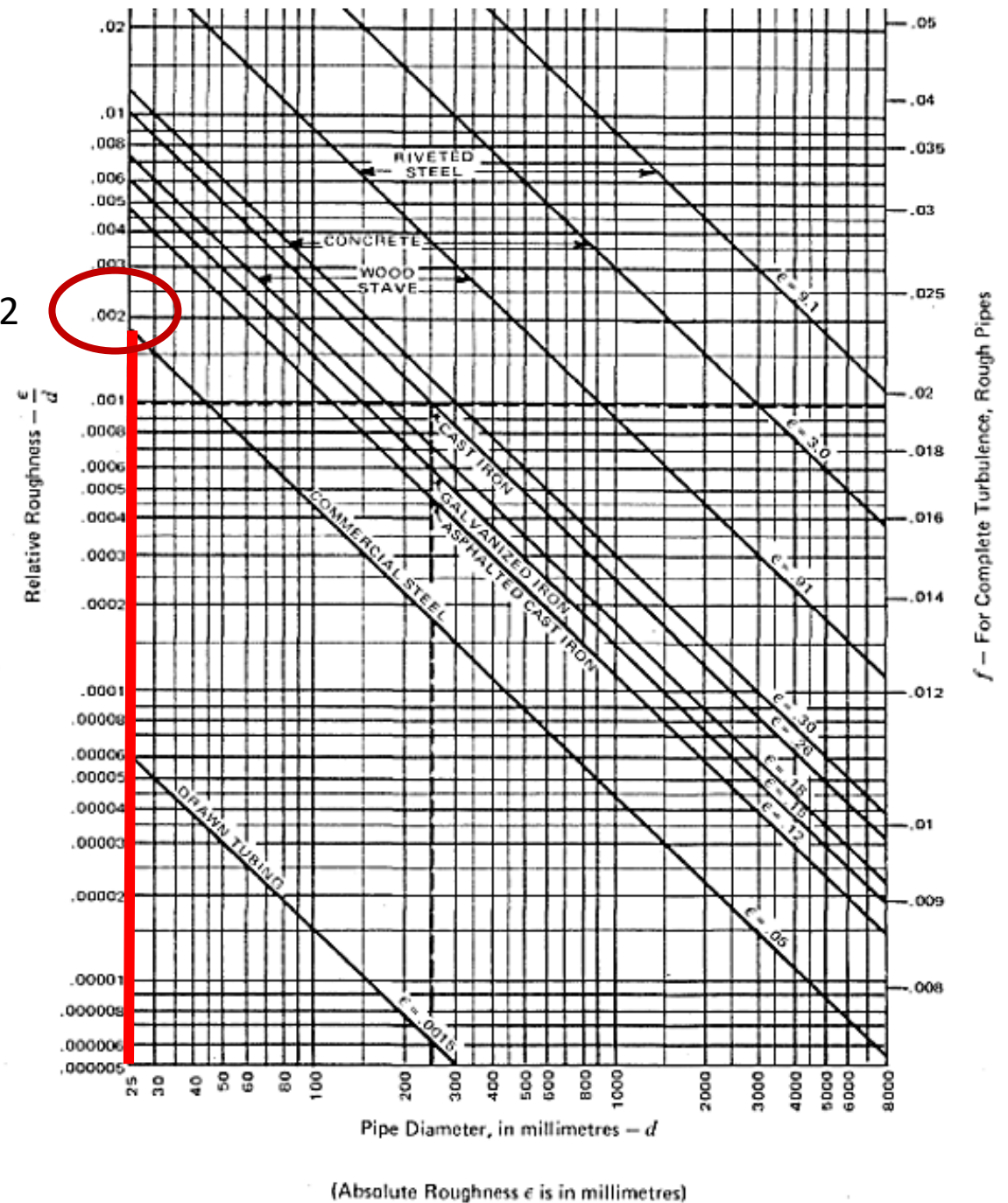
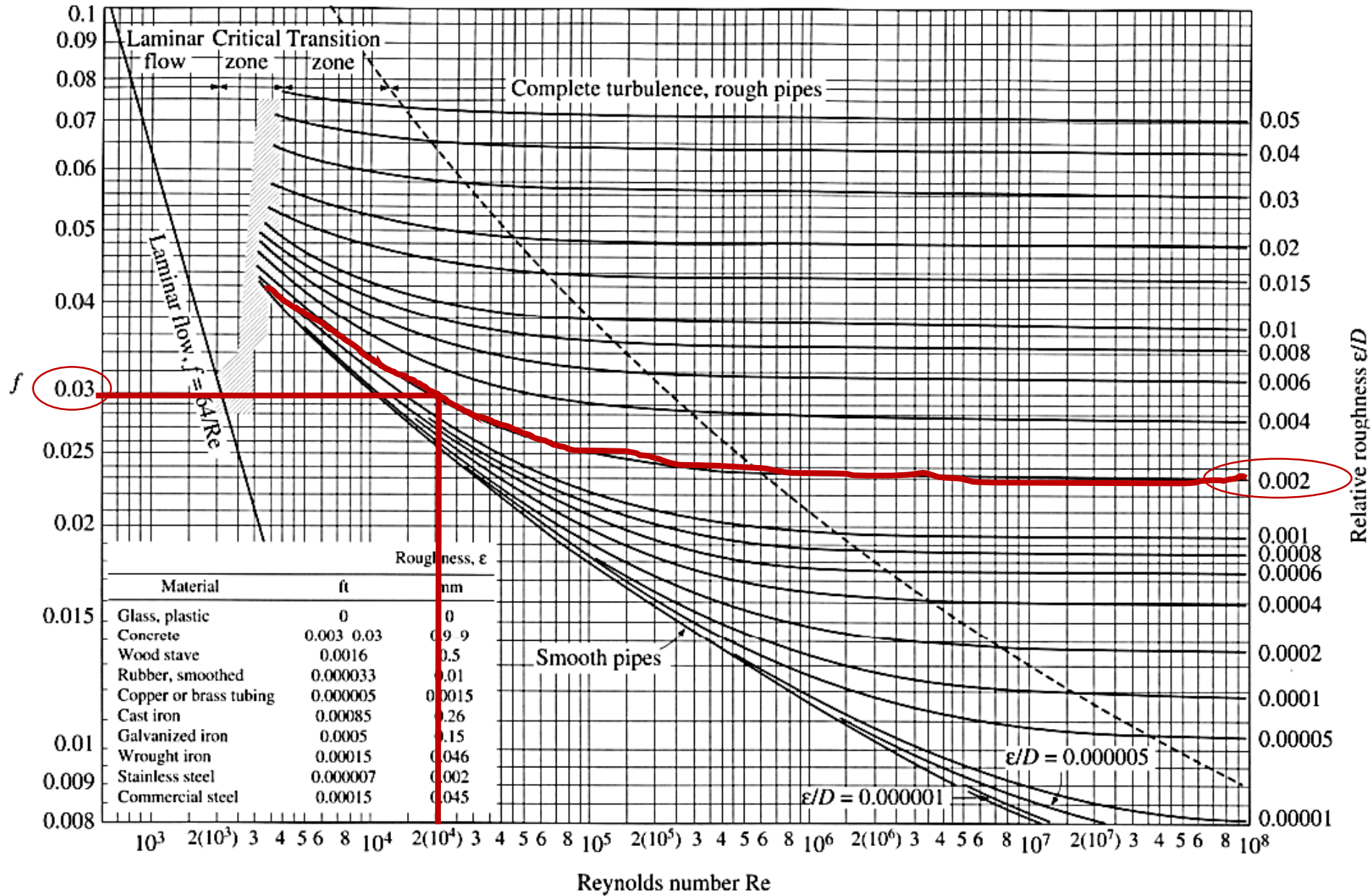


Diagrama de Moody



$f \times Re \times \epsilon/D$

FIGURE A-27

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

Exercício IV.5) Considere agora que na tubulação do exercício anterior há 2 acessórios: um cotovelo de 90° e uma válvula gaveta aberta.

Tabela IV.2. valores de K para diversos acidentes em tubulações:

ACIDENTE	K
Cotovelo 90°	0,90
Cotovelo 45°	0,40
Curva 90°	0,40
Curva 45°	0,20
Tê - saída direta	0,60
Tê - saída lateral	1,30
Válvula gaveta aberta	0,20
Válvula globo aberta	10,00
Válvula de retenção	2,50
Saída de tanque	0,50
- bordas vivas	
- com projeção interna	0,70
Entrada de tanque	1,0
- lateral	
- inferior ($A_1 \ll A_2$)	1,0

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + K_1 \frac{v^2}{2g} + K_2 \frac{v^2}{2g} + K_3 \frac{v^2}{2g} + \dots$$