Escoamento em Condutos Forçados

Prof. Dr. Hugo Alexandre Soares Guedes
E-mail: hugo.guedes@ufpel.edu.br
Website: wp.ufpel.edu.br/hugoguedes/

CONCEITO

São aqueles nos quais o fluido escoa com uma pressão diferente da pressão atmosférica.

Os condutos forçados são geralmente circulares e de seção constante ($L \geq 4000D$).

REGIME DO ESCOAMENTO

Experiência de Ousborne Reynolds (1883)

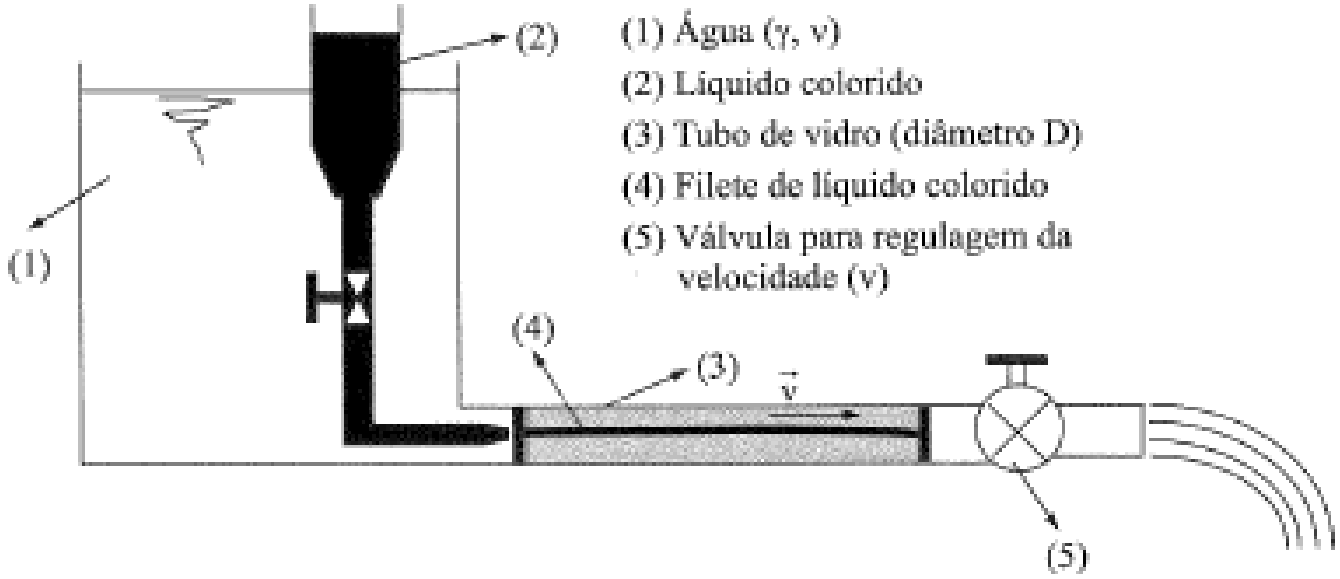


Figura 3.3

REGIME DO ESCOAMENTO

Experiência de Ousborne Reynolds (1883)

- O número de Reynolds leva em conta a velocidade entre o fluido que escoa e o material que o envolve, uma dimensão linear típica e a viscosidade cinemática do fluido.

$$R_e = \frac{vD}{\upsilon}$$

REGIME DO ESCOAMENTO

- $Rey \leq 2000 \rightarrow$ Regime Laminar
- $2000 < Rey < 4000 \rightarrow$ Regime de Transição
- $Rey \geq 4000 \rightarrow$ Regime Turbulento

REGIME DO ESCOAMENTO

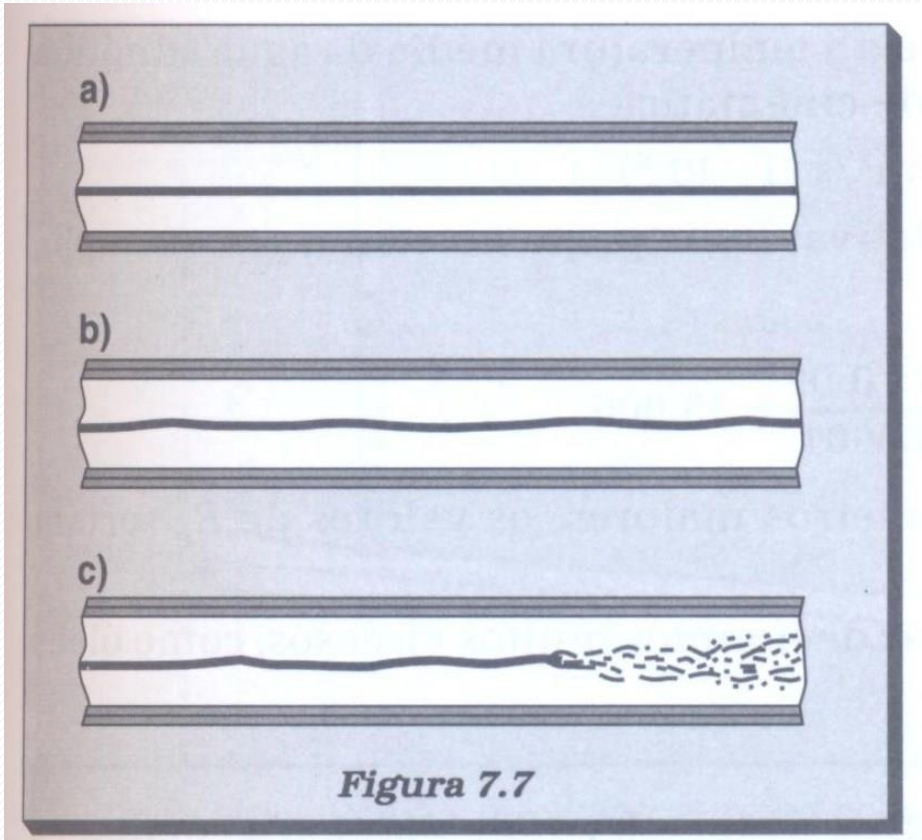


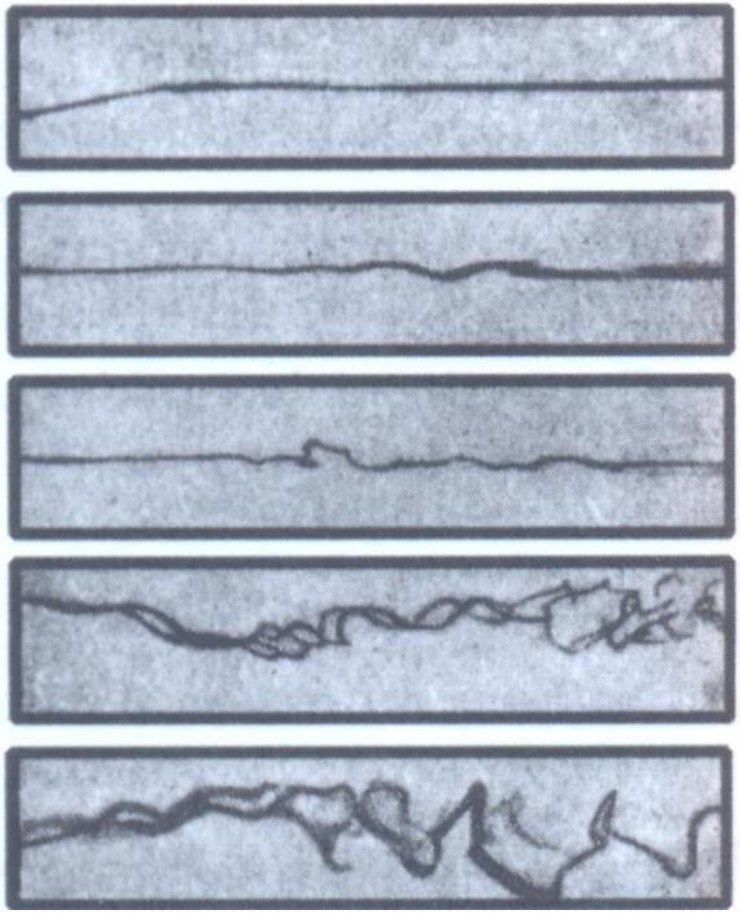
Figura 7.7

a) Regime Laminar ou Lamelar

b) Regime Turbulento

c) Regime Turbulento

REGIME DO ESCOAMENTO



Fotografia mostrando filamentos para diversos valores do número de Reynolds.

PERDA DE CARGA
Conceito

É um termo genérico designativo do consumo de energia desprendido por um fluido para vencer as resistências ao escoamento. Essa energia se perde sob a forma de calor.

Para se ter uma ideia, seriam necessários 100 m de tubulação para a água ter um aumento de temperatura de 0,234 graus centígrados.

CLASSIFICAÇÃO DAS PERDAS DE CARGA

Na prática, as tubulações não são constituídas apenas por tubos retilíneos e de mesmo diâmetro. Há também as peças especiais como: curvas, joelhos ou cotovelos, registros, válvulas, reduções, ampliações etc., responsáveis por novas perdas.

- **Perda de carga contínua ou distribuída ou perda por atrito (h_f):** ocasionada pela resistência oferecida ao escoamento do fluido ao longo da tubulação. A experiência demonstra que ela é proporcional ao comprimento da tubulação de diâmetro constante.

CLASSIFICAÇÃO DAS PERDAS DE CARGA

- **Perda de carga acidental ou localizada ou singular (h_a):** ocorre todas as vezes que houver mudança no valor da velocidade e/ou direção da velocidade (módulo e direção da velocidade).

- **Perda de carga total (h_t):** $h_t = h_f + h_a$

PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM CONDUTOS DE SEÇÃO CONSTANTE, REGIME PERMANENTE E UNIFORME (ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL)

Fórmulas para cálculo de hf:

1) **Fórmula Racional ou Universal**
2) Fórmula de Hazen-Williams
3) Fórmula de Flamant
4) Fórmula de Fair-Wipple-Hsiao
5) Fórmula para tubos de PVC
6) Fórmula de Darcy-Weisbach

Fórmulas práticas ou empíricas

FÓRMULA RACIONAL OU UNIVERSAL

- Válida para qualquer tipo de fluido
- Válida para qualquer regime de escoamento.

$$h_f = \frac{8 f L Q^2}{\pi^2 g D^5}$$

h_f = perda de carga contínua (m);

f = fator de atrito;

L = Comprimento da tubulação (m);

Q = vazão escoada (m^3s^{-1});

D = Diâmetro da tubulação (m).

RESISTÊNCIA DAS PAREDES INTERNAS DO CONDUTO AO ESCOAMENTO

Espessura da Película Laminar (β):

$$\beta = \frac{32{,}5\ \mathrm{D}}{\mathrm{Rey}\sqrt{f}}$$

(Prandtl)

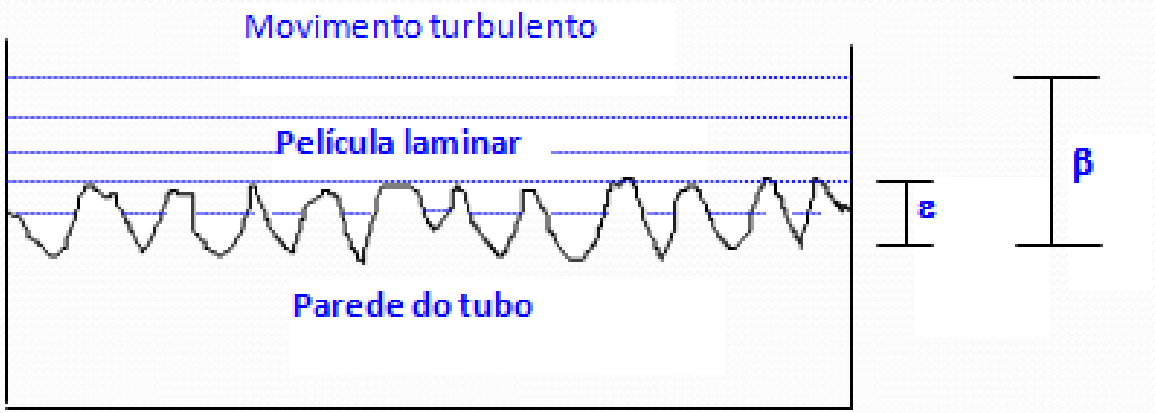
β decresce com o aumento de Rey

Relação de β com a rugosidade absoluta (ε):

1. Escoamento turbulento de parede lisa:

$$\beta \geq 4\varepsilon$$

$$f = f_1(\text{Rey})$$

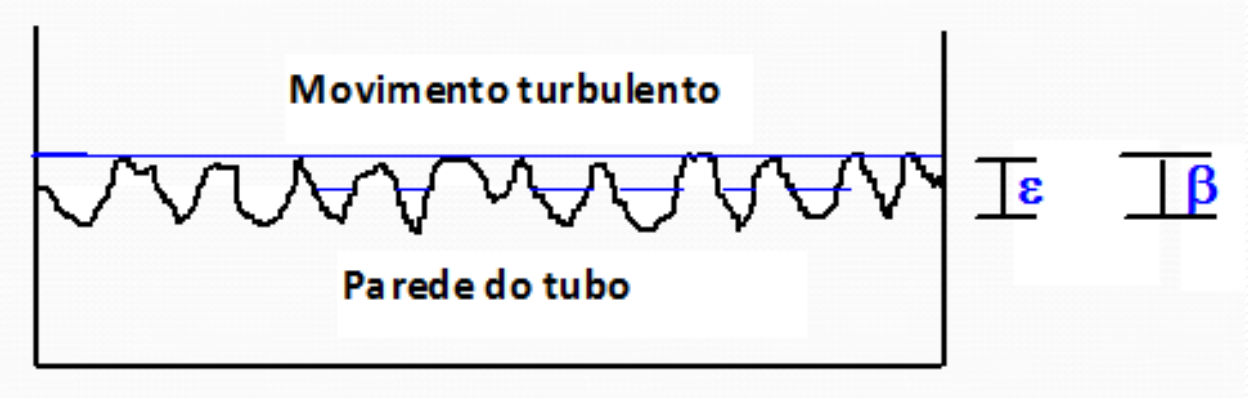


Relação de β com a rugosidade absoluta (ε):

2. Escoamento turbulento de parede intermediária:

$\varepsilon/6 < \beta < 4\varepsilon$

$f = f_2(Rey, \varepsilon/D)$

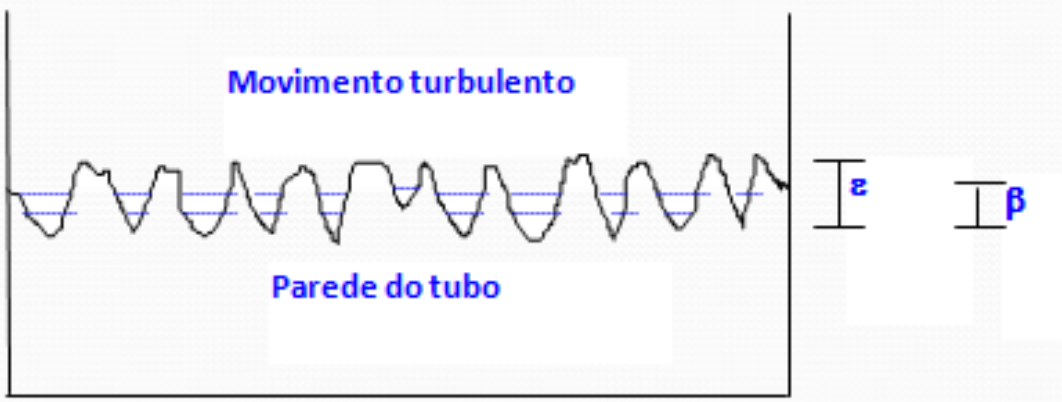


Relação de β com a rugosidade absoluta (ε):

3. Escoamento turbulento de parede rugosa:

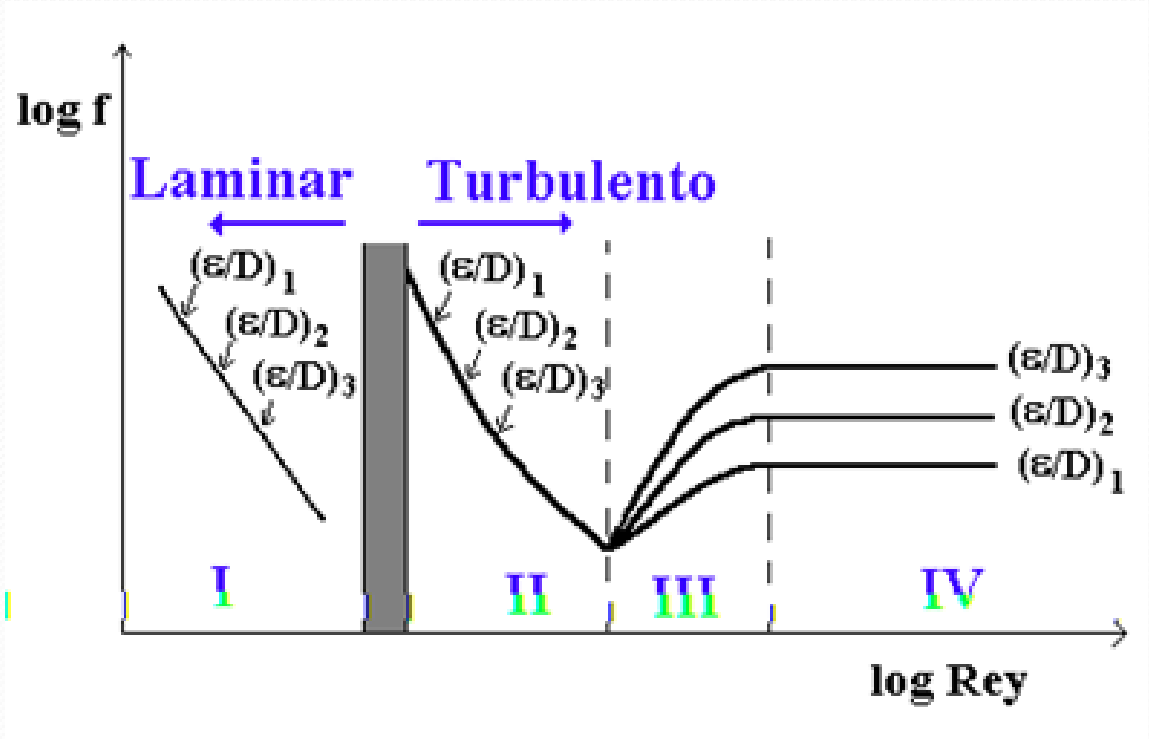
$\beta \leq \varepsilon/6$

$f = f_3(\varepsilon/D)$



DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO (*f*) DA FÓRMULA UNIVERSAL

Representação gráfica de *f* (NIKURADZE):



REGIÃO I:

- Região de escoamento laminar (Rey $\leq$ 2000)
- f independe da rugosidade relativa (ε/D)

$$\boxed{f = \frac{64}{\text{Rey}}}$$

(Poiseuille)

REGIÃO II, III e IV :

- Região de escoamento turbulento (Rey $\geq$ 4000)

$$\boxed{\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon / D}{3{,}71} + \frac{2{,}51}{\text{Rey}\sqrt{f}}\right)}$$

(Colebrook e White)

REGIÃO II:

- Região de escoamento turbulento de parede lisa ($\beta \geq 4\varepsilon$)

- f = f(Rey) e independente de (ε/D)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log\left(\mathrm{Rey}\sqrt{f}\right) - 0{,}8$$

(Expressão de Prandtl)

➔ Válida para $10^4 \leq \mathrm{Rey} \leq 3{,}4 \times 10^6$

REGIÃO III:

- Região de escoamento turbulento de parede intermediária ($\varepsilon/6 < \beta < 4\varepsilon$)
- $f = f(Rey, \varepsilon/D)$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon / D}{3{,}71} + \frac{2{,}51}{Rey\sqrt{f}}\right)$$

(Colebrook e White)

➔ Válida para $14 < \frac{\varepsilon}{D} Rey \sqrt{f} < 200$

REGIÃO IV:

- Região de escoamento turbulento de parede rugosa ($\beta \leq \varepsilon/6$)
- $f = f(\varepsilon/D)$ e independente de Rey

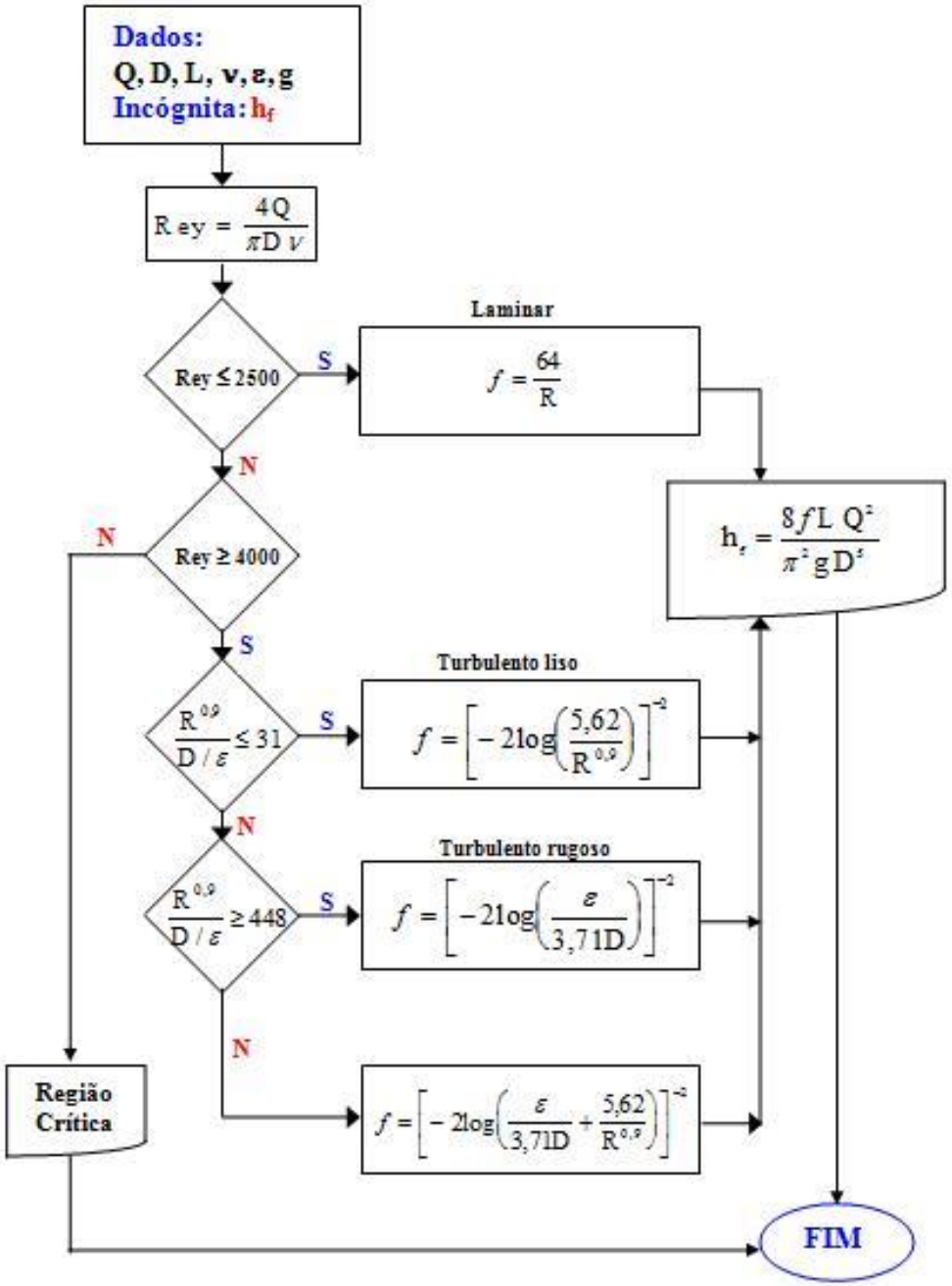
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\frac{\varepsilon}{D} + 1{,}14$$

(Nikuradze)

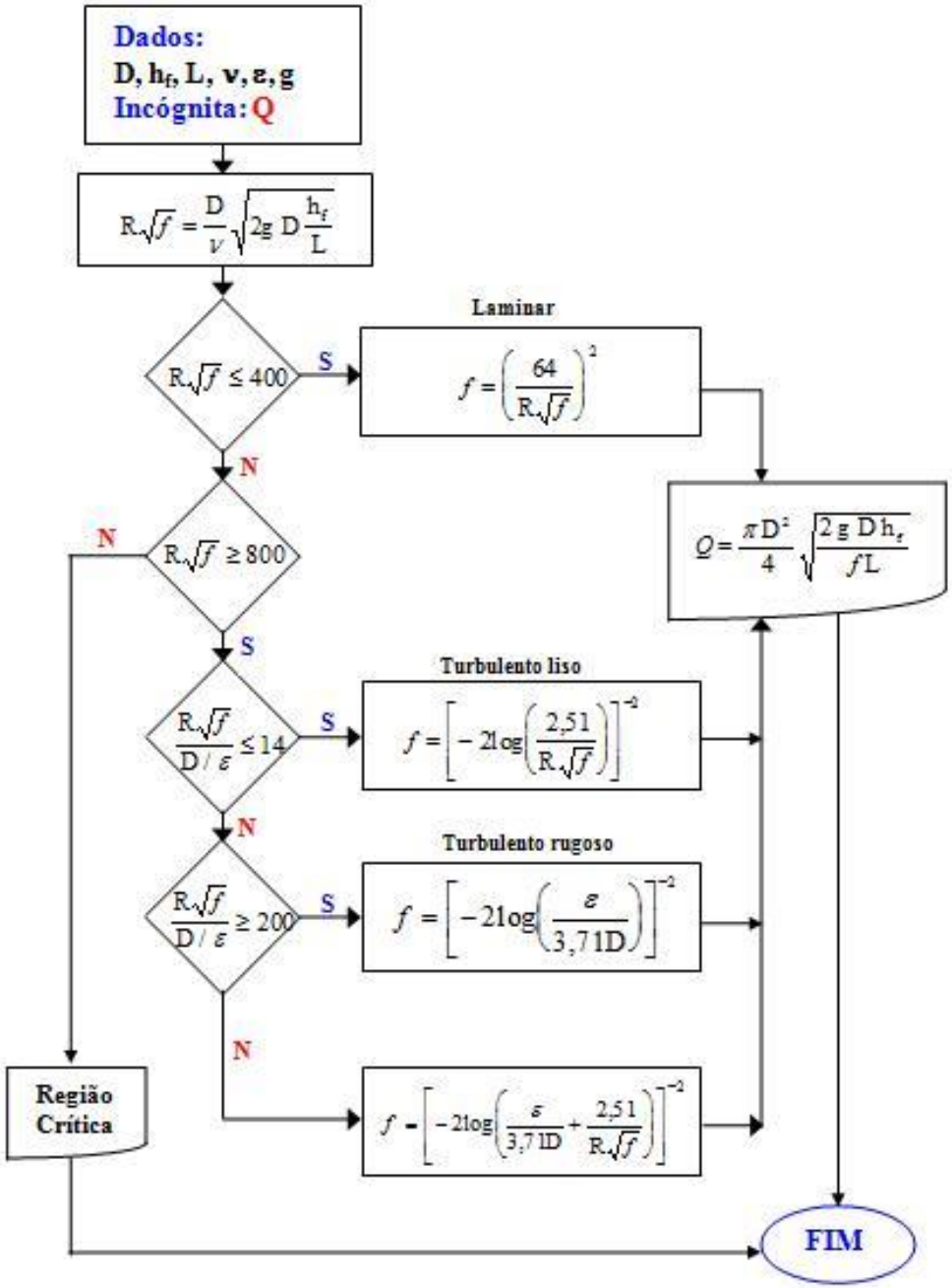
➢ Simplificação da solução das equações:

- Diagrama de Moody (**hf**) – Mecânica dos Fluidos
- Diagrama de Moody-Rouse (hf, **Q**) – Mecânica dos Fluidos
- Fluxograma de Podalyro (hf, Q, **D**) - Hidráulica

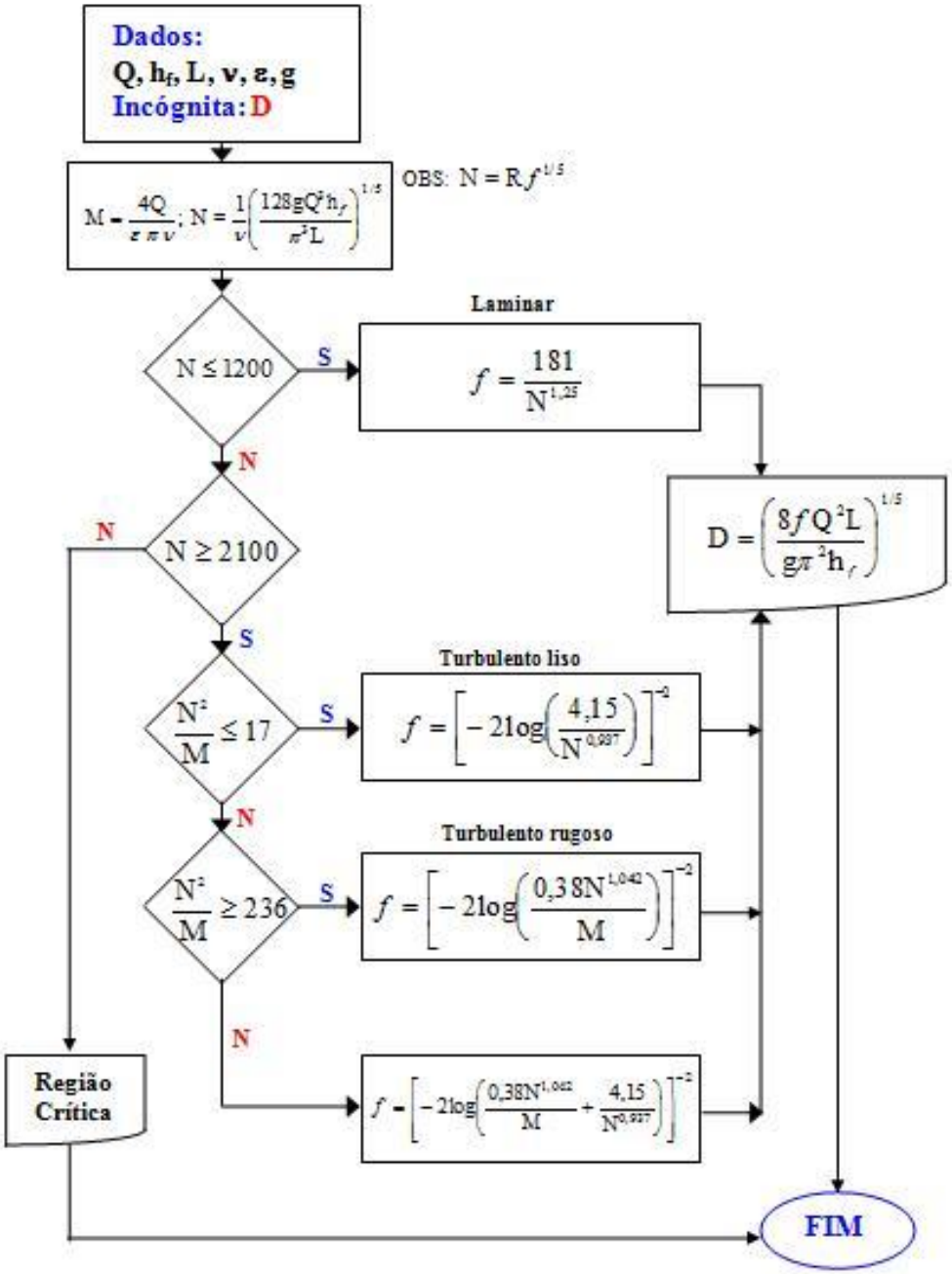
FLUXOGRAMA PARA DETERMINACÃO DA PERDA DE CARGA (h_f)



FLUXOGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DA VAZÃO (Q)



FLUXOGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO (D)



EXERCÍCIOS

1) Uma tubulação de ferro fundido enferrujado (ε=1,5mm), com diâmetro de 150 mm e 60 metros de extensão escoa uma vazão de 50L/s de água. Determinar a perda de carga pela fórmula universal. ($\nu_{água}$=1,01x10^{-6} m^2/s).

EXERCÍCIOS

2) Um conduto de ferro fundido novo, revestido internamente (ε=0,15mm), com diâmetro de 100mm e 75 metros de extensão é submetido a uma vazão que produz uma perda de carga de 35 metros.

Determinar a vazão escoada ($\nu_{água}$=1,01x10^{-6} m^2/s).

EXERCÍCIOS

3) Calcular o diâmetro de um tubo de aço (ε=4,6 x 10^{-5} m) que deverá transportar uma vazão de 19 L/s de querosene (ν = 3 x 10^{-6} m^2/s) a uma distância de 600 m com uma perda de carga de 3 m.

FÓRMULAS PRÁTICAS

1. Fórmula de Hazen-Willians

- Escoamento com água à temperatura ambiente
- Tubulações com diâmetro maior ou igual a 50 mm
- Escoamento turbulento

$$V = 0{,}355\ C\ D^{0{,}63} J^{0{,}54}$$

$$Q = 0{,}2788\ C\ D^{2{,}63} J^{0{,}54}$$

$$h_f = 10{,}646 \frac{L}{D^{4{,}87}} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1{,}852}$$

- C = coeficiente que depende da natureza (material e estado de conservação) das paredes do tubo.

Valores do Coeficiente de Hazen-Willians (C)

Material	C
Alumínio	130
Aço corrugado	60
Aço com juntas “Lock-bar” novas	130
Aço com juntas “Lock-bar” usadas	90 a 100
Aço galvanizado	125
Aço rebitado, novo	110
Aço rebitado, usado	85 a 90
Aço soldado, novo	130
Aço soldado, usado	90 a 100
Aço soldado com revestimento especial	130
Aço zincado	120
Cimento-amianto	130 a 140
Concreto, bom acabamento	130
Concreto, acabamento comum	120
Ferro fundido, novo	130
Ferro fundido, usado	90 a 100
Plásticos	140 a 145
PVC rígido	145 a 150

FÓRMULAS PRÁTICAS

2. Fórmula de Flamant

- Usada para instalações prediais
- Aplicável a tubulações com D entre 12,5 e 100 mm
- Escoamento com água à temperatura ambiente
- Mais utilizada para tubos de ferro e aço-galvanizado

$$\frac{D\,J}{4} = b\sqrt[4]{\frac{V^7}{D}}$$

$$h_f = 6{,}11b\frac{L}{D^{4,75}}Q^{1,75}$$

Valores de “b” da Fórmula de Flamant

Tipos de condutos	b
Ferro fundido ou aço em serviço (usado, acima de 10 anos)	0,00023
Ferro fundido, aço ou canalização de concreto (novo)	0,000185
Condutos de chumbo	0,000140
Condutos de cimento-amianto	0,00062
Plástico	0,000135

FÓRMULAS PRÁTICAS

3. Fórmula de Fair-Whipple-Hisiao

- Recomendada para inst. prediais ($12,5 \leq D \leq 100$ mm)
- Aplicável a escoamento de água
- Recomendada pela ABNT

3.1. Para tubos de aço ou ferro galvanizado conduzindo água fria (20 ºC)

$$\boxed{Q = 27,113\ D^{2,60} J^{0,53}}$$

3.2. Para tubos de cobre ou latão:

a) Conduzindo água quente:

$$\boxed{Q = 63{,}281\ D^{2{,}71} J^{0{,}57}}$$

b) Conduzindo água fria:

$$\boxed{Q = 55{,}934\ D^{2{,}71} J^{0{,}57}}$$

FÓRMULAS PRÁTICAS

4. Fórmula para Tubos de PVC

a) Para $3 \times 10^3 < Rey < 1{,}5 \times 10^5$:

$$\boxed{J = 5{,}37 \times 10^{-4}\ D^{-1{,}24} V^{1{,}76}}$$

(água à temp. ambiente)

b) Para $1{,}5 \times 10^5 < Rey < 1 \times 10^6$:

$$\boxed{J = 5{,}79 \times 10^{-4}\ D^{-1{,}20} V^{1{,}80}}$$

(água à temp. ambiente)

FÓRMULAS PRÁTICAS

5. Fórmula de Darcy-Weisbach

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

- *f* é tabelado para tubos de concreto, ferro fundido e aço de diâmetros superiores a 13mm (1/2”), conduzindo água fria.

CONCLUSÕES A RESPEITO DA PERDA DE CARGA CONTÍNUA

- É diretamente proporcional ao comprimento da canalização
- É inversamente proporcional a uma potência do diâmetro
- É proporcional a uma potência da velocidade ou da vazão
- É variável com a natureza das paredes da tubulação, no caso de regime turbulento. No caso de regime laminar depende apenas do número de Reynolds
- Independe da posição do tubo
- Independe da pressão interna sob a qual o líquido escoa

PERDA DE CARGA ACIDENTAL OU LOCALIZADA

- Mudança no módulo e/ou na direção da velocidade
- Peças especiais: curvas, válvulas, registros, bocais...

Podem ser desprezadas quando:

- Velocidade menor que 1 m/s
- Pequeno número de peças especiais
- L ≥ 4000 D

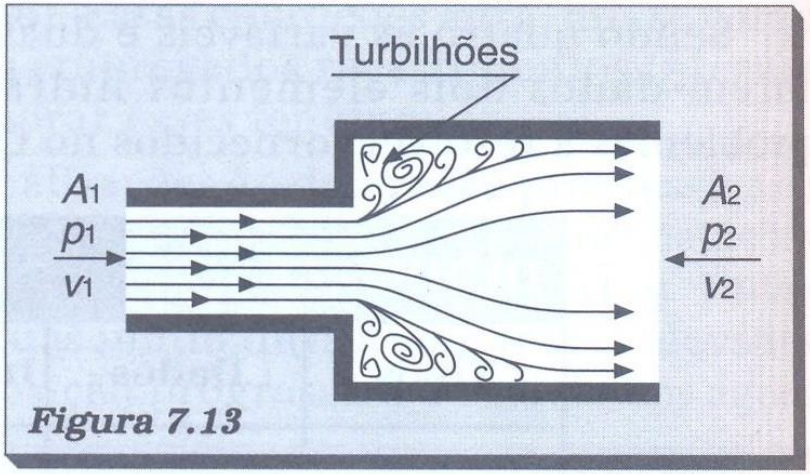


Figura 7.13

PERDA DE CARGA ACIDENTAL OU LOCALIZADA

a) **Expressão Geral das perdas localizadas**

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} \cdot v_1$$

$$h_f = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g}$$

$$h_f = K \frac{v_1^2}{2g}$$

$$\boxed{h_a = K \frac{V^2}{2g}}$$

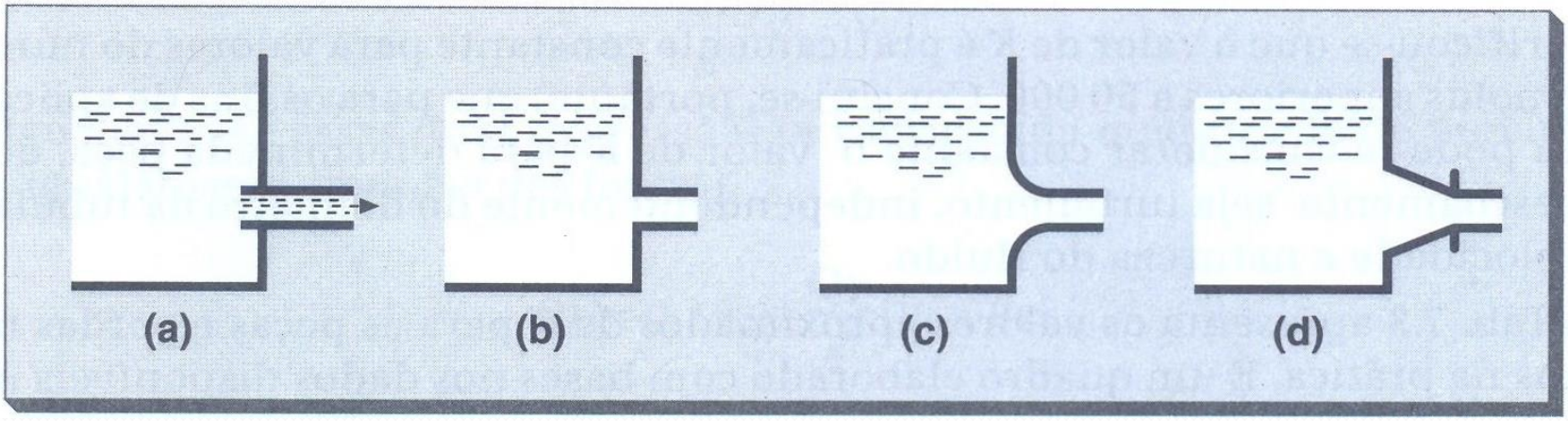
VALORES APROXIMADOS DE K (PERDA LOCALIZADA)

Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	0,30*	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor Venturi	2,50**
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,15*
Controlador de vazão	2,50	Saída de canalização	1.00
Cotovelo de 90º	0,90	Tê, passagem direta	0,60
Cotovelo de 45º	0,40	Tê, saída de lado	1,30
Crivo	0,75	Tê, saída bilateral	1,80
Curva de 90º	0,40	Válvula de ângulo aberta	5,00
Curva de 45º	0,20	Válvula de gaveta aberta	0,20
Curva de 22,5º	0,10	Válvula borboleta aberta	0,30
Entrada normal em canalização	0,50	Válvula-de-pé	1,75
Entrada de Borda	1.00	Válvula de retenção	2,50
Existência de pequena derivação	0,03	Válvula de globo aberta	10.00
		Velocidade	1.00

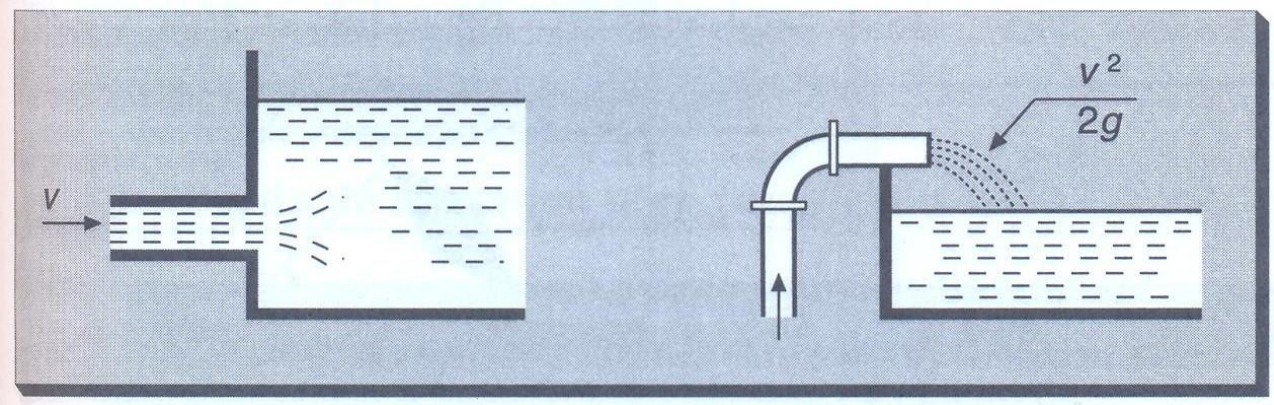
** Com base na velocidade maior (seção menor)*
*** Relativa à velocidade na canalização*

VALORES APROXIMADOS DE K (PERDA LOCALIZADA)

- Perda de carga na entrada de uma canalização



- Perda de carga na saída de uma canalização



VALORES APROXIMADOS DE K (PERDA LOCALIZADA)

- Perda de carga em curvas de 90º

Relação *R/D*	**1**	**1 1/2**	**2**	**4**	**6**	**8**
valores de *K*	0,48	0,36	0,27	0,21	0,27	0,36

VALORES APROXIMADOS DE K (PERDA LOCALIZADA)

- Perda de carga em válvulas de gaveta

Valores de K para registros

d/D	s/S*	K
7/8	0,948	0,07
6/8	0,856	0,26
5/8	0,740	0,81
4/8	0,609	2,06
3/8	0,466	5,52
2/8	0,315	17,00
1/8	0,159	97,80

*s/S é relação de áreas efetivas da abertura de passagem e da tubulação de seção circular

VALORES APROXIMADOS DE K (PERDA LOCALIZADA)

- Perda de carga devida ao alongamento gradual de seção

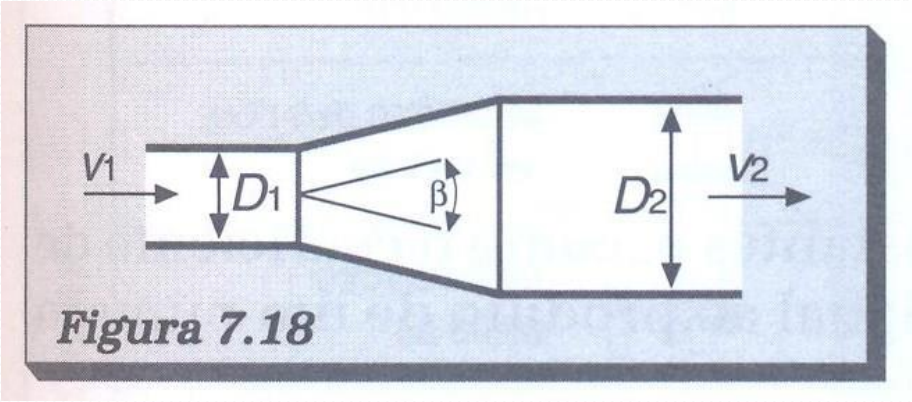


Figura 7.18

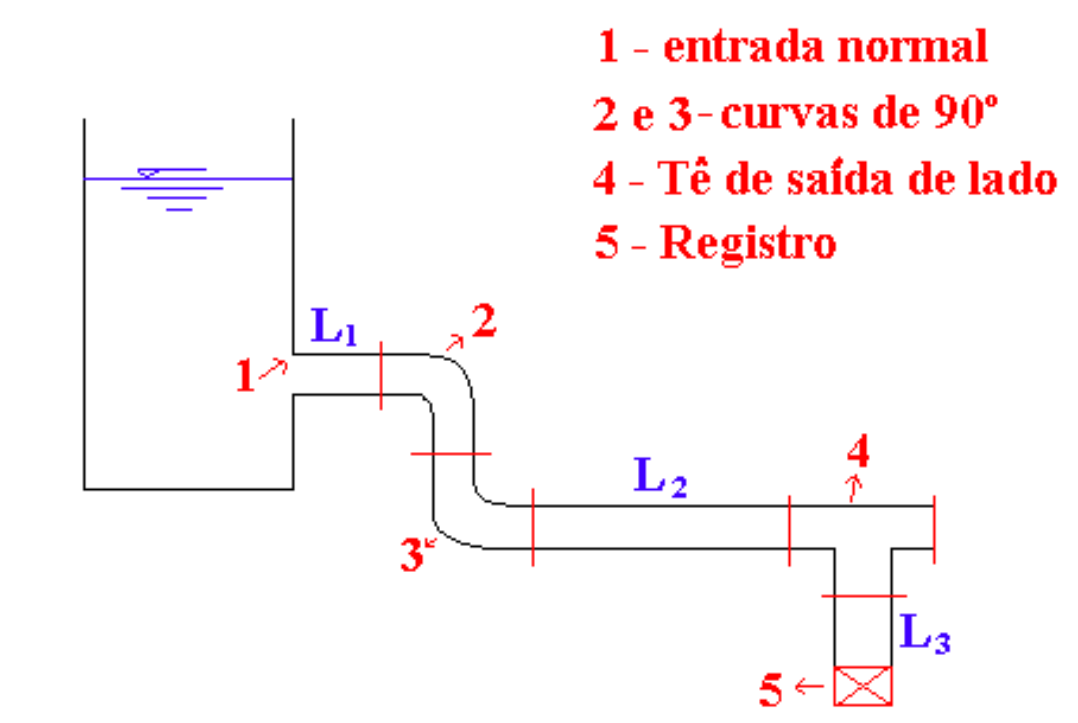
$$h_f = K\frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

ß	5°	10°	20°	40°	60°	80°	120°
K	0,13	0,17	0,42	0,90	1,10	1,08	1,05

PERDA DE CARGA ACIDENTAL OU LOCALIZADA

b) Método dos Comprimentos Virtuais ou Equivalentes

- Adicionar à canalização existente, apenas para efeito de cálculo da perda de carga, comprimentos de tubos (de mesmo D) que causariam a mesma perda de carga da peça especial



$$L_v = L + L_f$$

Tabela 7.6 — Comprimentos equivalentes a perdas localizadas. (Expressos em metros de canalização retilínea)*

Diâmetro D mm	Diâmetro D pol	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	VÁLVULA DE GAVETA ABERTO	VÁLVULA DE GLOBO ABERTO	VÁVULA DE ÂNGULO ABERTO	TÊ PASSAGEM DIRETA	TÊ SAÍDA DE LADO	TÊ SAÍDA LATERAL	VÁLVULA DE PÉ E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO PESADO
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	0,2	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	1,5	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 válvulas de globo aplicam-se também às torneiras, válvulas para chuveiros e válvulas de descarga

PERDA DE CARGA ACIDENTAL OU LOCALIZADA

c) Método dos Diâmetros Equivalentes

- Peças especiais são transformadas em um nº de diâmetros da canalização existente

$$\boxed{L_f = n\,D}$$

n = número de diâmetros (Tabelado)

$$\boxed{L_v = L + L_f}$$

EXERCÍCIOS

1) Calcular a perda de carga total em um trecho de uma canalização de alumínio (f = 0,015), que conduz 20 L/s, numa extensão de 1200 m. O diâmetro da canalização é de 150 mm e ao longo do trecho tem-se as seguintes peças especiais:

2 Curvas de 90º
3 Cotovelos de 90º
2 Curvas de 45º
2 Curvas de 30º
2 Válvulas de retenção
2 Válvulas de gaveta
1 Medidor Venturi

a) Expressão Geral

Tipo de peça	Nº de peças (n)	K	n K
Curva de 90º	2	0,4	0,8
Cotovelo de 90º	3	0,9	2,7
Curva de 45º	2	0,2	0,4
Curva de 30º	2	0,2	0,4
Válvula de retenção	2	2,5	5,0
Válvula de gaveta	2	0,2	0,4
Medidor Venturi	1	2,5	2,5

$\sum K = 12,2$

b) Método dos Comprimentos Virtuais

Tipo de peça	**Nº de peças (n)**	**L_f**	**n L_f**
Curva de 90º	**2**	**2,5**	**5,0**
Cotovelo de 90º	**3**	**4,3**	**12,9**
Curva de 45º	**2**	**1,1**	**2,2**
Curva de 30º	**2**	**1,1**	**2,2**
Válvula de retenção	**2**	**13,0**	**26,0**
Válvula de gaveta	**2**	**1,1**	**2,2**
Medidor Venturi	**1**	**13,0**	**13,0**

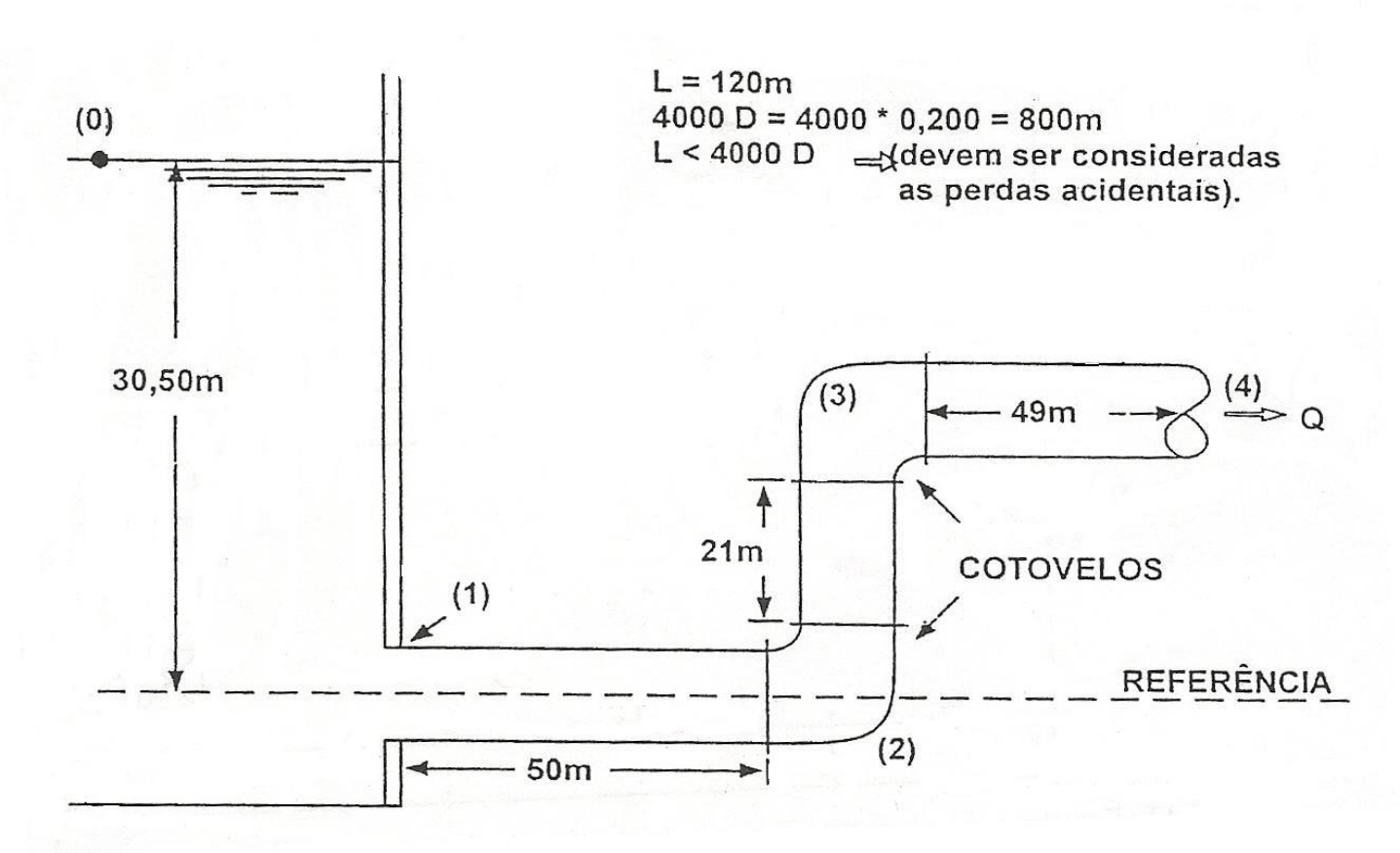
$\sum Lf = 63,5$

c) Método dos Diâmetros Equivalentes

Tipo de peça	**Nº de peças (n)**	**N_d**	**n N_d**
Curva de 90º	**2**	**30**	**60**
Cotovelo de 90º	**3**	**45**	**135**
Curva de 45º	**2**	**15**	**30**
Curva de 30º	**2**	**15**	**30**
Válvula de retenção	**2**	**100**	**200**
Válvula de gaveta	**2**	**8**	**16**
Medidor Venturi	**1**	**100**	**100**

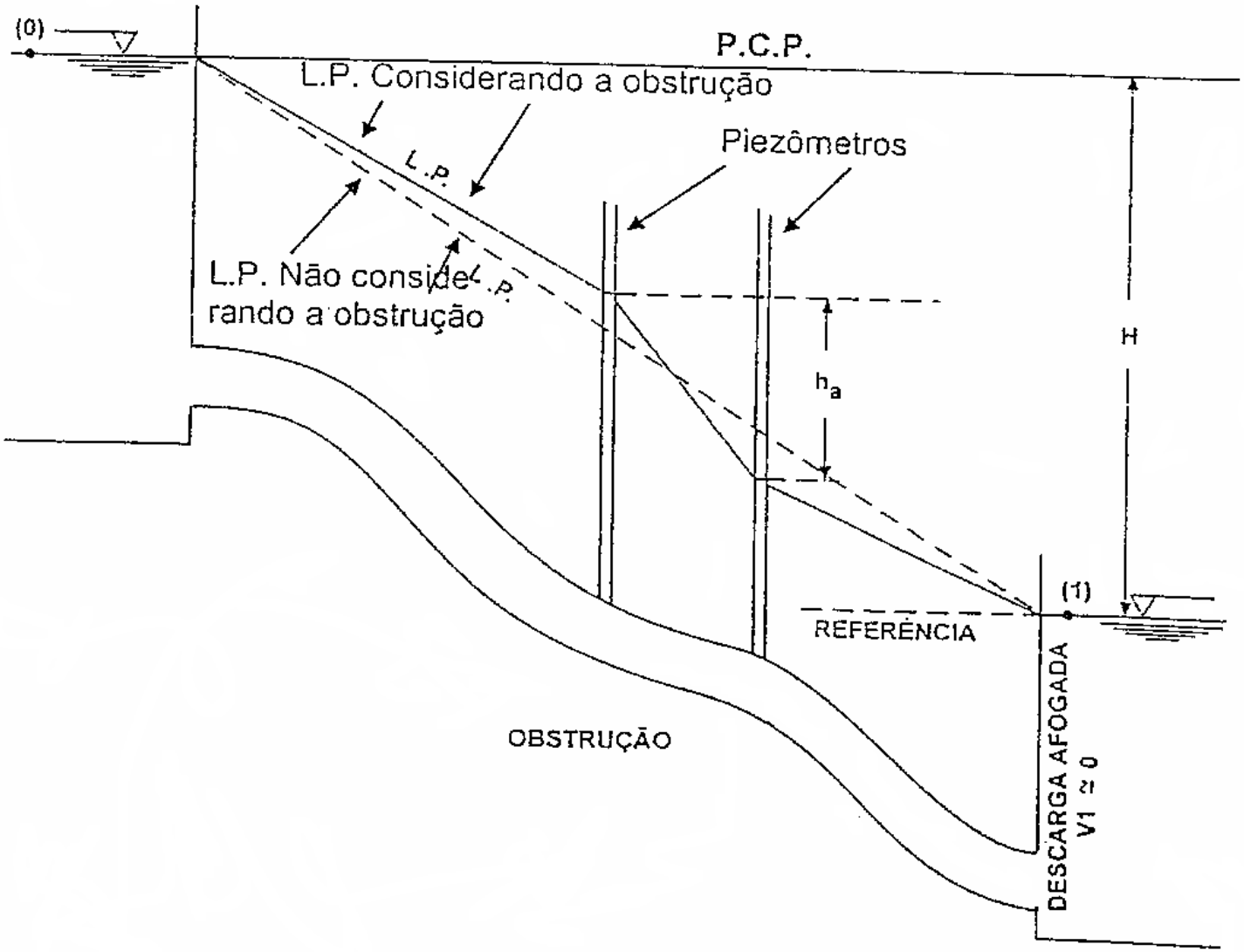
$$\sum N_d = 571$$

2) A tubulação da figura abaixo é de PVC e tem diâmetro de 200 mm. Determinar a vazão adotando f = 0,024.



3) O projeto de uma linha adutora ligando dois reservatórios previa uma vazão de 250 $L.s^{-1}$. A adutora medindo 1300 m de comprimento foi executada em tubos de concreto com acabamento comum e diâmetro de 600 mm.

Colocando em funcionamento, verificou-se que a vazão era de 180 $L.s^{-1}$ devido a alguma obstrução deixada em seu interior, por ocasião da construção. Calcular a perda de carga provocada pela obstrução (usar fórmula de Hazen-Willians), desprezando as demais perdas acidentais.


(0)
P.C.P.
L.P. Considerando a obstrução
L.P.
Piezômetros
L.P. Não considerando a obstrução
L.P.
H
h_a
(1)
REFERÊNCIA
OBSTRUÇÃO
DESCARGA AFOGADA
V1 ≃ 0

4) Uma canalização de tubos de ferro fundido novo (ε = 0,26 mm) com diâmetro de 250 mm é alimentada por um reservatório cujo nível da água situa-se na cota de 1920 m. Calcular a vazão e a pressão no ponto E de cota 1750 m, distante 1500 m do reservatório, sabendo-se que a descarga se faz livremente na cota 1720 m. Use a fórmula Universal e de Hazen-Willians.

DADOS: $L_1 = 1500$ m

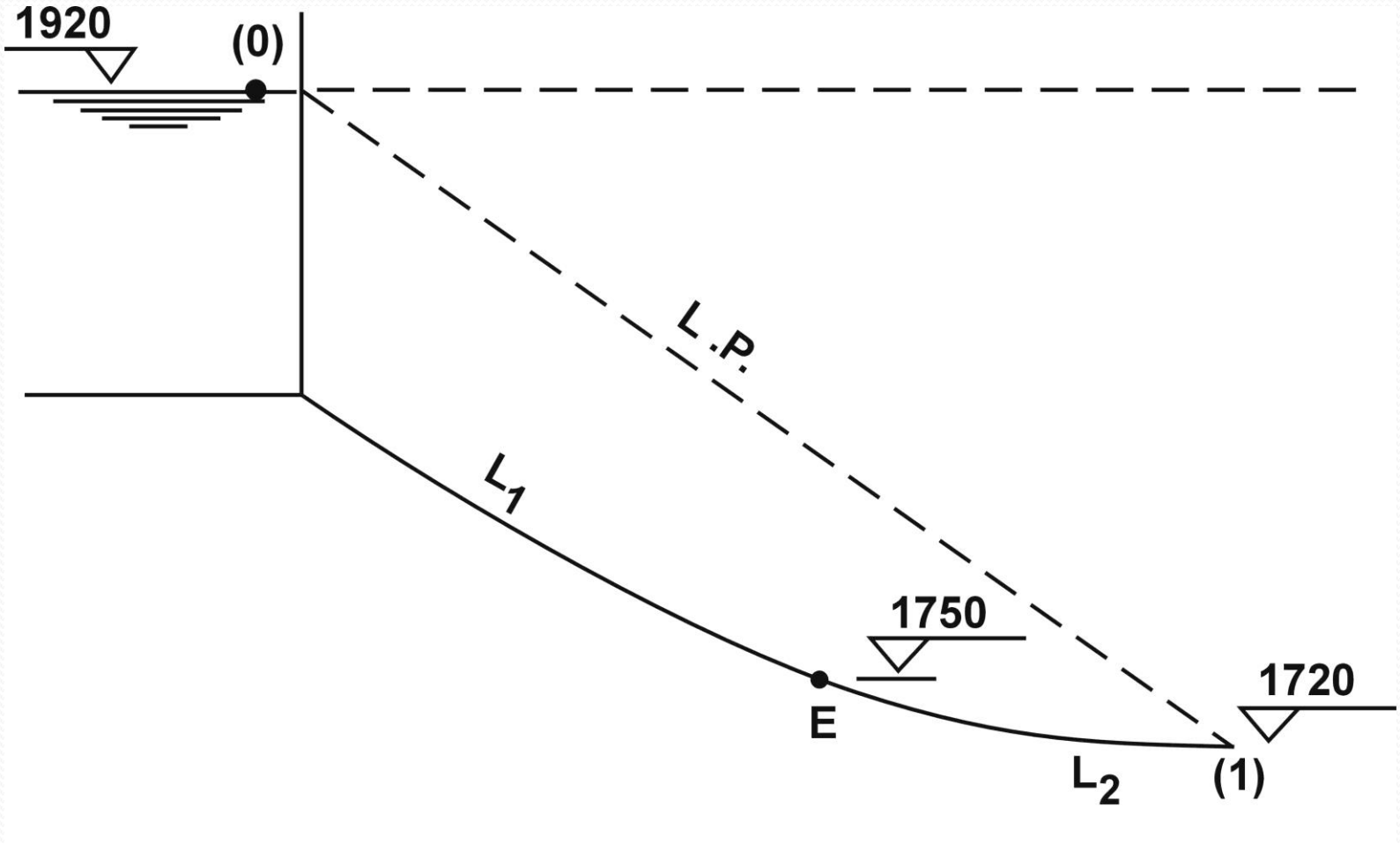
$L_2 = 1000$ m

$D = 0{,}250$ m

$L = L_1 + L_2$

$f = 0{,}03$

$C = 130$


1920
(0)
L.P.
L1
1750
E
1720
L2
(1)