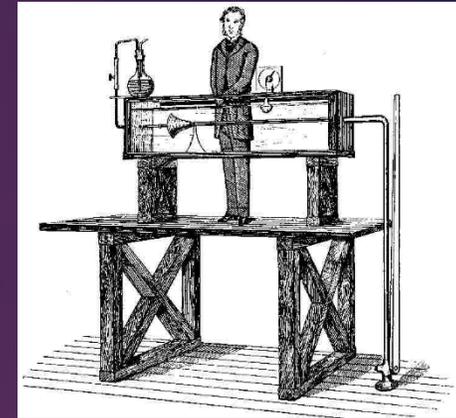


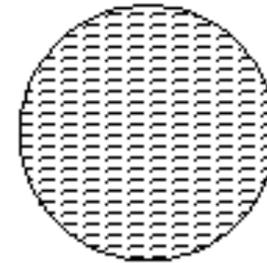
$$hf = K \cdot \frac{L \cdot V^m}{D^n}$$



Aula 6 – Condutos Forçados e Perdas de Carga (parte 1)

Condutores forçados

- ▶ São canalizações em que o escoamento ocorre a uma pressão diferente da pressão atmosférica.
- ▶ - Sempre fechados e escoamento com seção completamente cheia
- ▶ Escoamento por gravidade ou bombeamento

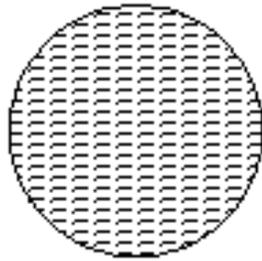


$P \neq P_{atm}$

Seção plena

Bomba ou gravidade

CONDUTOS FORÇADOS

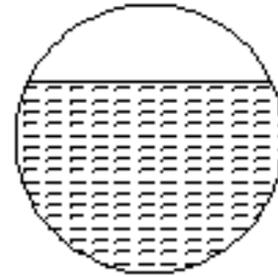


$$P \neq P_{atm}$$

Seção plena

Bomba ou gravidade

CONDUTOS LIVRES



$$P = P_{atm}$$

Seção parcial

Gravidade

Condutores forçados

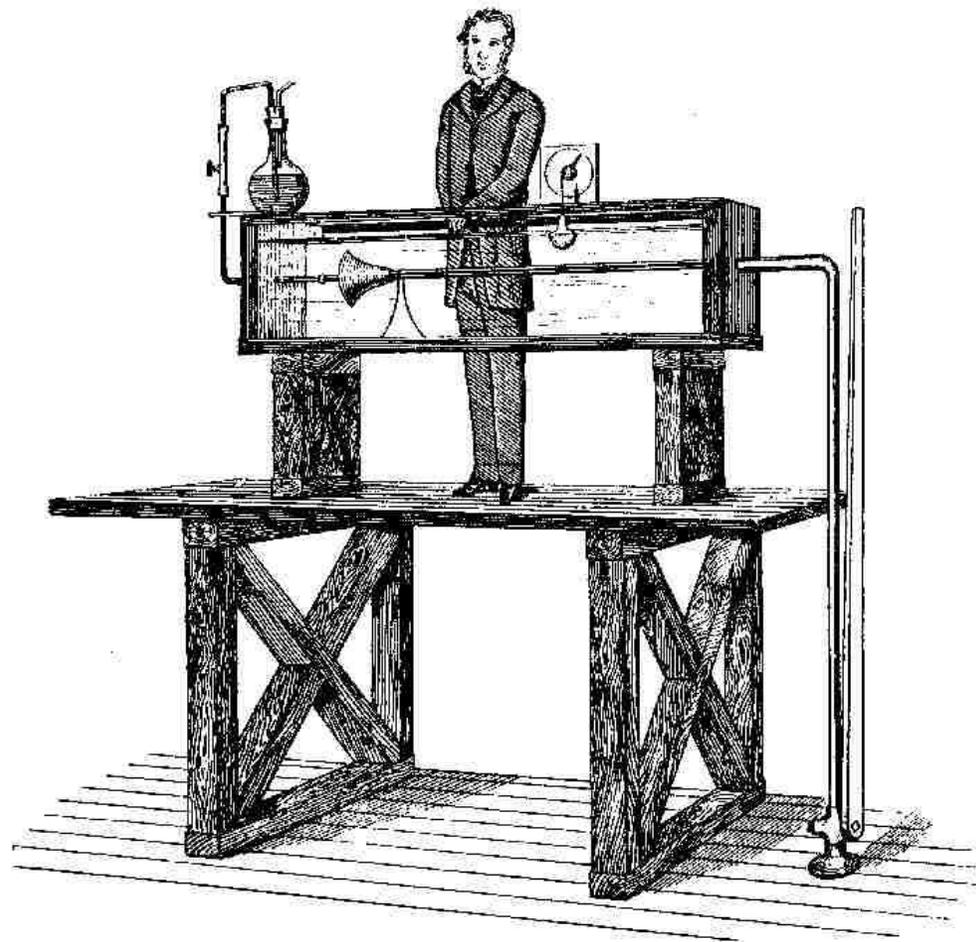
Histórico - escoamento de líquidos em condutos forçados

❖ Perdas de carga são proporcionais à velocidade de escoamento

- Gotthilf Heinrich Ludwig **HAGEN** (Prússia, 1830): $hf \propto V$

- Jean-Louis-Marie **POISEUILLE** (França, 1840): $hf \propto V^n$; $n \approx 2$

Experimento de Osborne Reynolds (1883)



Fonte: Manchester School of Engineer
(<http://www.mace.manchester.ac.uk>)

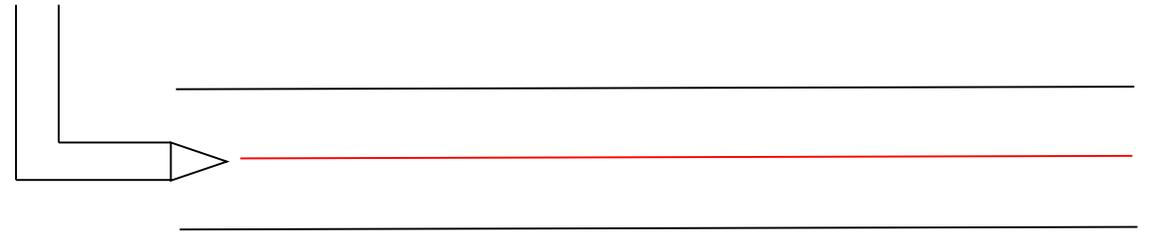
Número de Reynolds

$$Re = NR = \frac{V \text{ (m s}^{-1}\text{)} \cdot D \text{ (m)}}{\nu \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}}$$

- ▶ NR = número de Reynolds (adimensional)
- ▶ V = velocidade média
- ▶ D = diâmetro do conduto
- ▶ ν = Viscosidade cinemática do líquido

Regime laminar

- ▶ Reynolds observou que:
- ▶ $V < V_{\text{crítica}} \rightarrow$ corante retilíneo e a trajetória das partículas não se misturava
- ▶ As partículas fluidas apresentam trajetórias bem definidas e não se cruzam

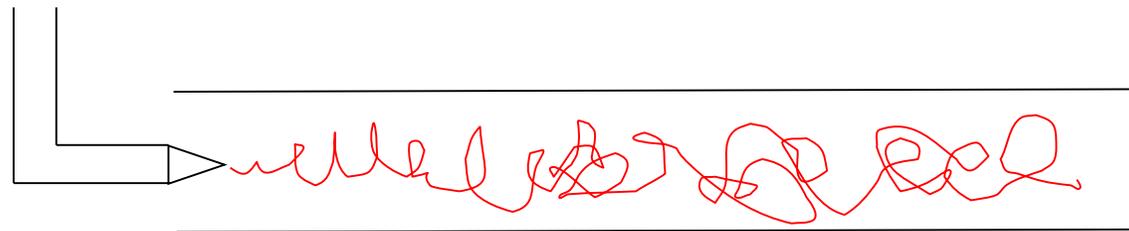


NR < 2.000 \rightarrow Regime laminar

REGIME TURBULENTO

▶ $V > V_{\text{crítica}} \rightarrow$ corrente se mistura em um movimento desordenado

▶ Trajetórias das partículas são desordenadas



$NR > 4.000 \rightarrow$ Regime turbulento

Regimes de escoamento

$2.000 > NR > 4.000 \rightarrow$ zona crítica \rightarrow Transição

Limites de velocidade

Limites de velocidade em escoamento de líquidos

- Mínimo: evita sedimentação de partículas

Água não tratada: 0,4 m/s

Esgoto: 0,6 m/s

Água tratada: sem limite mínimo

- Máximo: evita perda de carga excessiva e desgaste prematuro de condutos

$V \leq 2,5$ m/s

Medida prática: $V_{\max} = 2,0$ m/s

Exemplo:

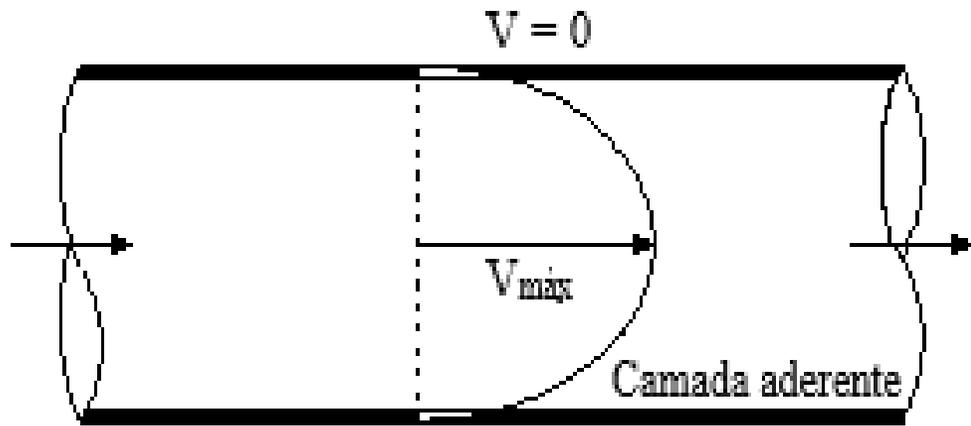
- ▶ Qual o regime de escoamento da água a 20 °C em um conduto de $\varnothing = 0,05$ m com uma velocidade de 1 m s^{-1} ?

$$\nu_{\text{água } 20^{\circ}\text{C}} = 10^{-6} = 0,000001 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

- ▶ Qual deveria ser a velocidade de escoamento do exemplo anterior para que o regime se tornasse laminar? (Regime laminar: $Re \leq 2000$)

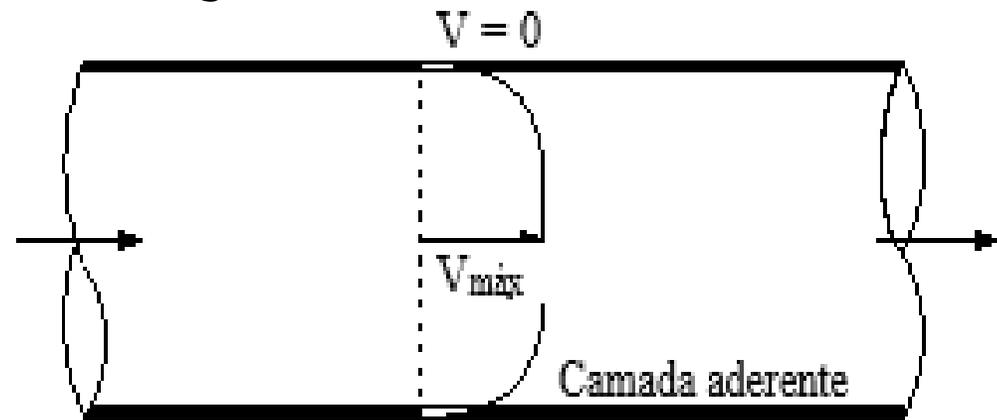
Distribuição de velocidade em tubos

$$V_m = \text{Velocidade média} = \frac{Q}{S}$$



Escoamento Laminar

$$V_{\max} = 2 V_m$$
$$V_m \approx 0,5 V_{\max}$$



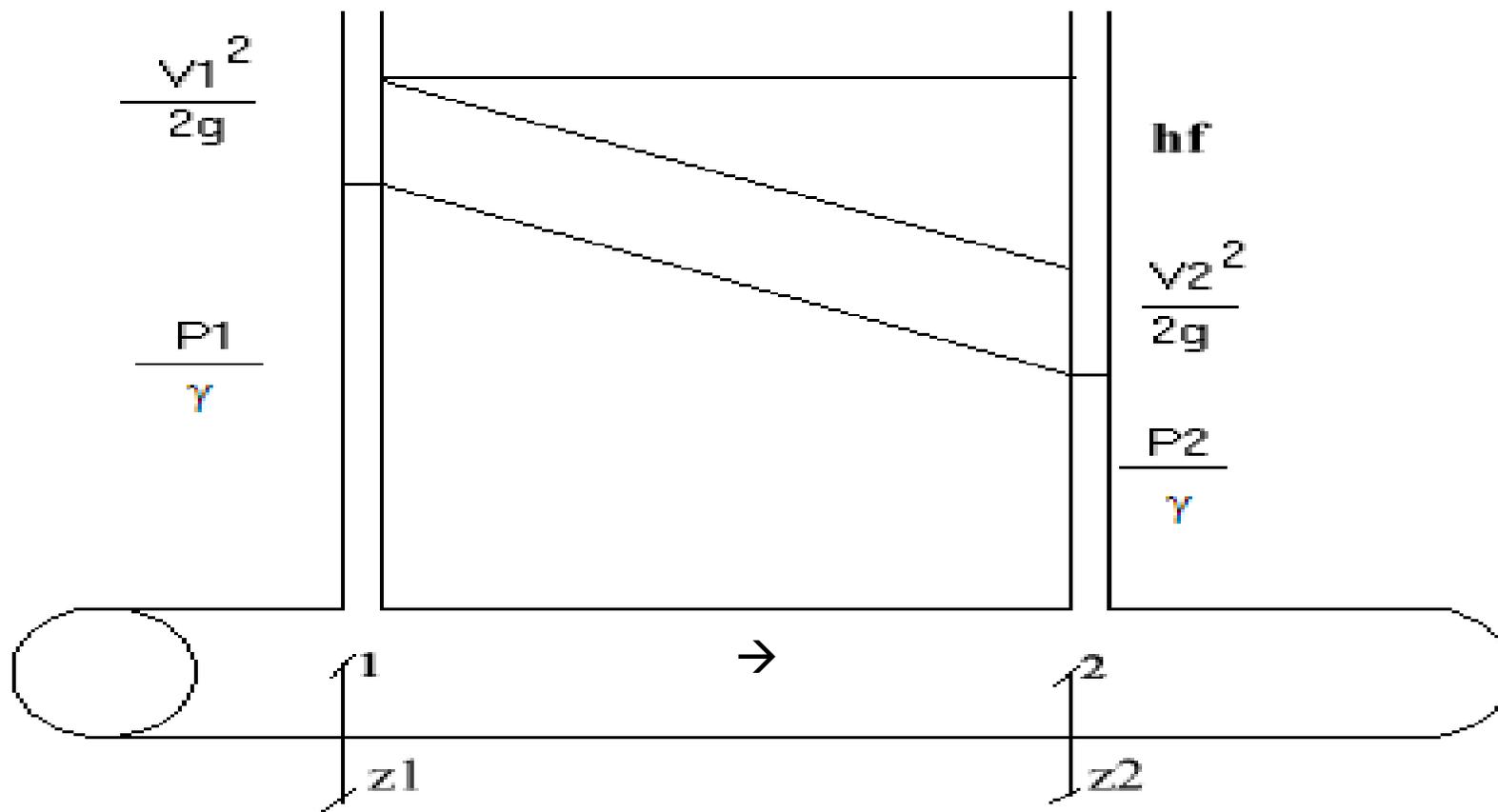
Escoamento Turbulento

$$V_{\max} = 1,1 \text{ a } 1,25 V_m$$
$$V_m \approx 0,8 \text{ a } 0,9 V_{\max}$$

PERDA DE CARGA hf

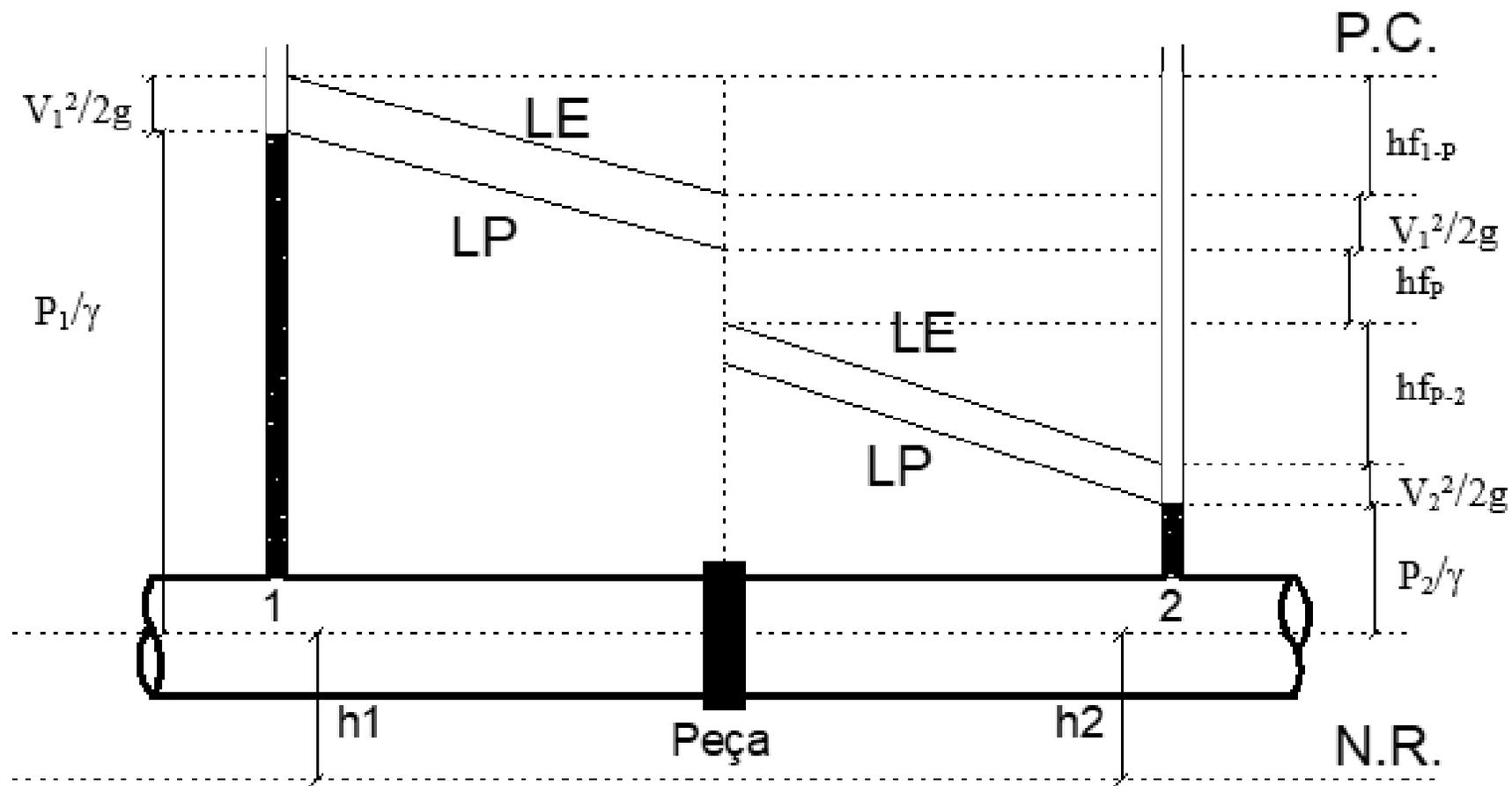
- ▶ Movimento laminar: perda devido à força de viscosidade (atrito interno) → resistência ao deslizamento
- ▶ Movimento turbulento: perda devido à ação conjunta da viscosidade e da inércia (atrito interno e externo) → resistência ao deslizamento, movimento desordenado e choque entre as moléculas.
- ▶ Princípio de Lavoisier: perda de carga = energia transformada em calor

PERDA DE CARGA h_f



PERDA DE CARGA

- ▶ Classificação
 - ▶ h_f ao longo das canalizações (h_f normal)
 - ▶ H_f das peças e acessórios (h_f localizada)



hf_{1-P} – perda de carga no tubo (do ponto 1 até a peça)

hf_P – perda de carga na peça

hf_{P-2} – perda de carga no tubo (desde a peça até o ponto 2)

Perda de carga é:

- ▶ Diretamente proporcional ao comprimento da canalização (L)
- ▶ Diretamente proporcional à uma potência da velocidade ($V^m \rightarrow Q^m$)
- ▶ Inversamente proporcional a uma potência do diâmetro (D^n)
- ▶ Dependente da natureza das paredes do tubo (em regime turbulento) (constante de proporcionalidade = K)
- ▶ Independente da posição do encanamento (para escoamento permanente)
- ▶ Independente da pressão que o fluido esco

PERDA DE CARGA AO LONGO DO CONDUTO

Fórmula geral da perda de carga (Darcy 1857)

$$hf = K \cdot \frac{L \cdot V^m}{D^n}$$

PERDA DE CARGA AO LONGO DO CONDUTO

$$J = \frac{hf}{L} = K \frac{1}{D^n} v^m$$

Perda de carga unitária

Fórmula Universal

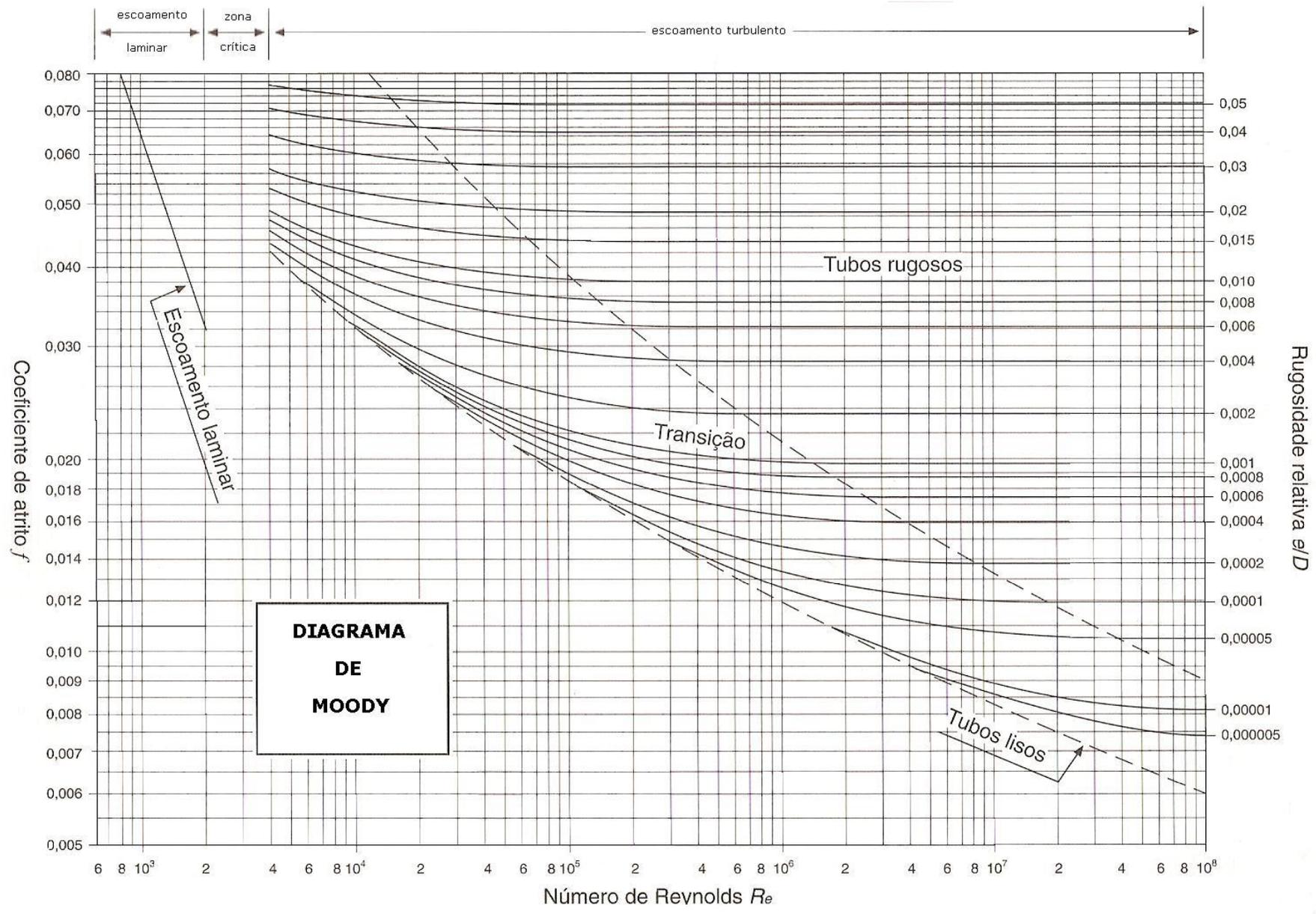
$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

f é o coeficiente de atrito (adimensional)

→ Número de Reynolds (NR)

→ Rugosidade relativa $\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)$

Diagrama de Moody



**DIAGRAMA
DE
MOODY**

Tubos lisos

Transição

Tubos rugosos

Escoamento laminar

escoamento laminar

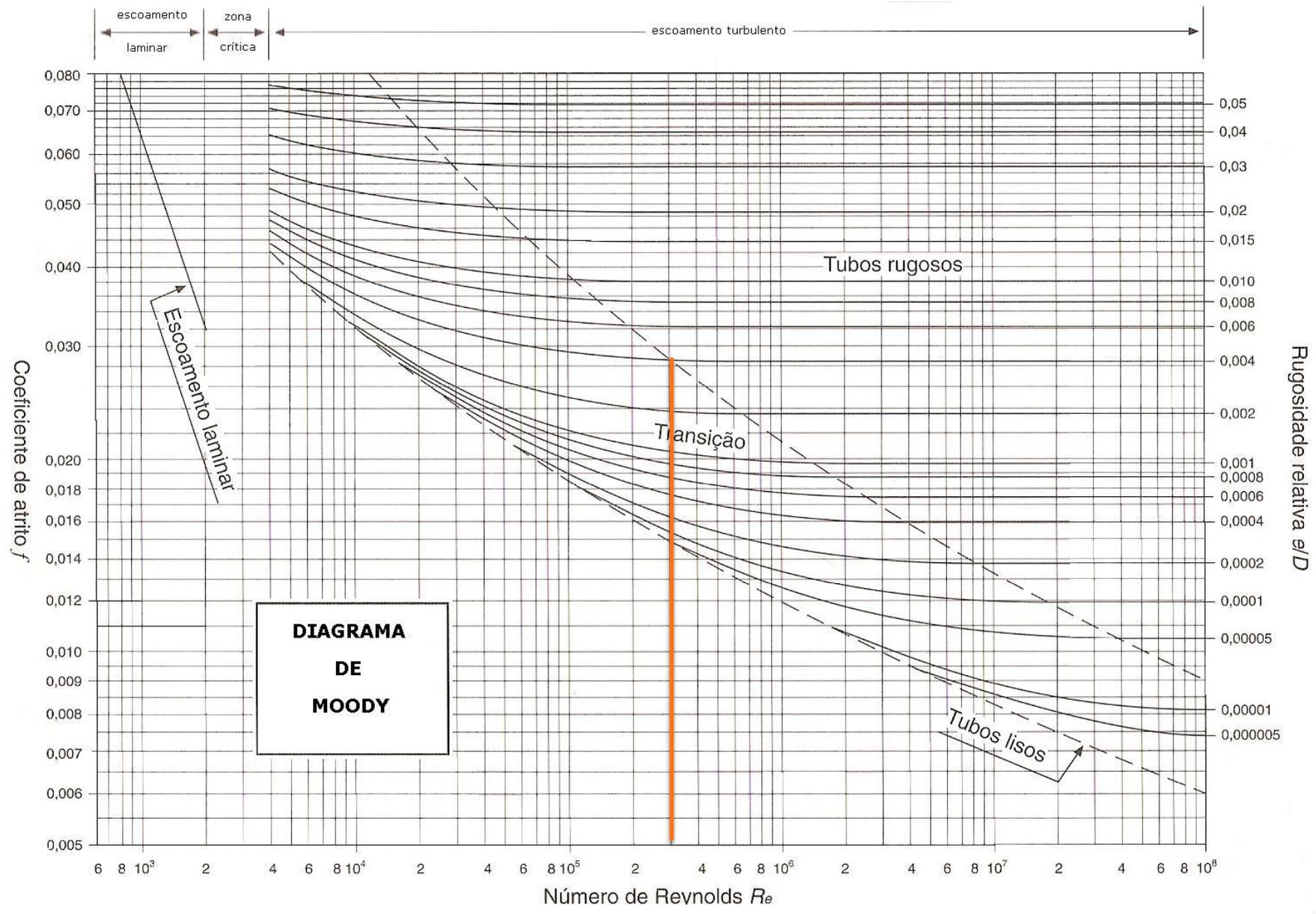
zona crítica

escoamento turbulento

Coefficiente de atrito f

Número de Reynolds Re

Rugosidade relativa e/D



**DIAGRAMA
DE
MOODY**

Tubos lisos

Tubos rugosos

Transição

Escoamento laminar

escoamento laminar

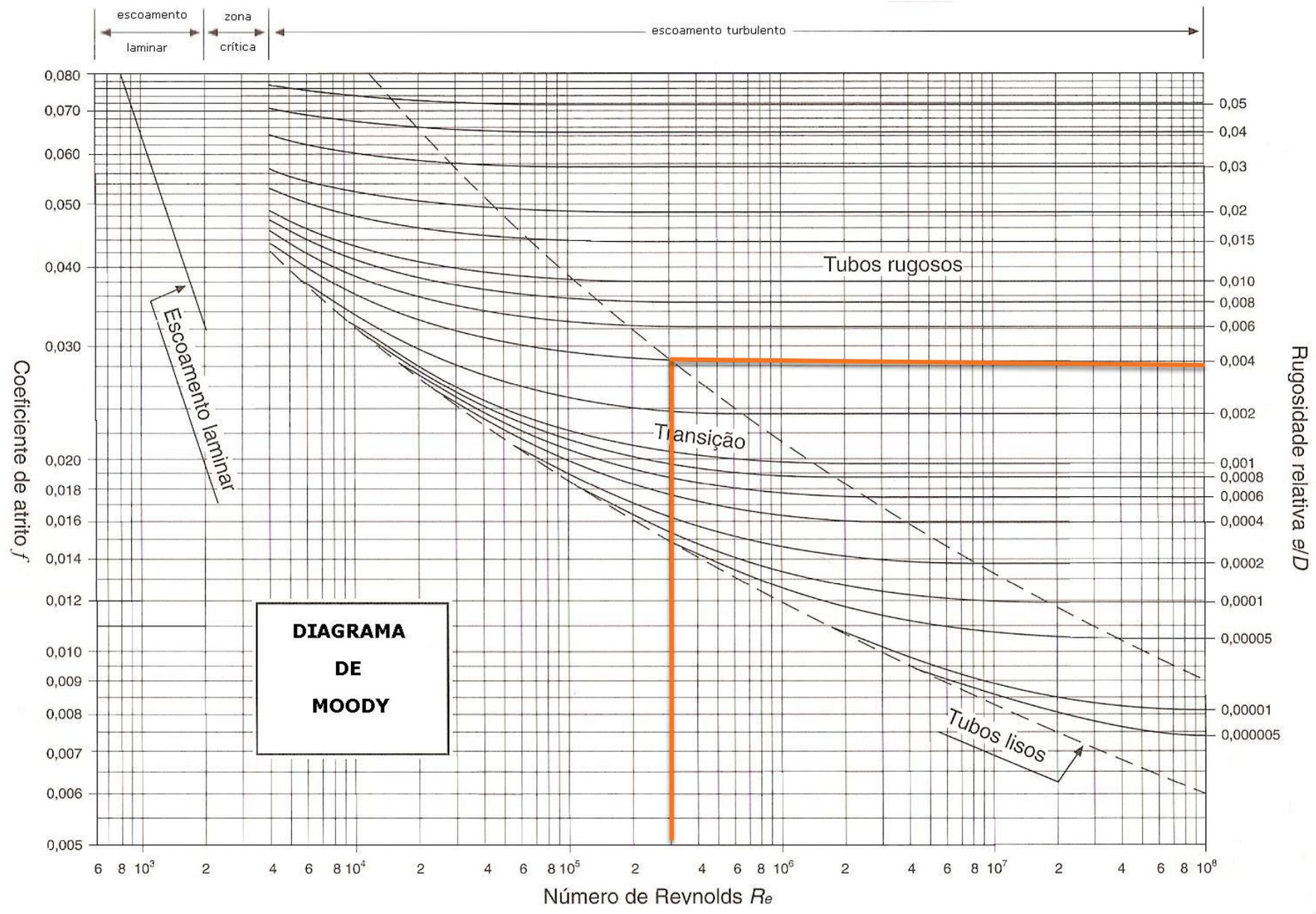
zona crítica

escoamento turbulento

Rugosidade relativa e/D

Número de Reynolds Re

Coefficiente de atrito f



**DIAGRAMA
DE
MOODY**

Coefficiente de atrito f

Número de Reynolds Re

Rugosidade relativa e/D

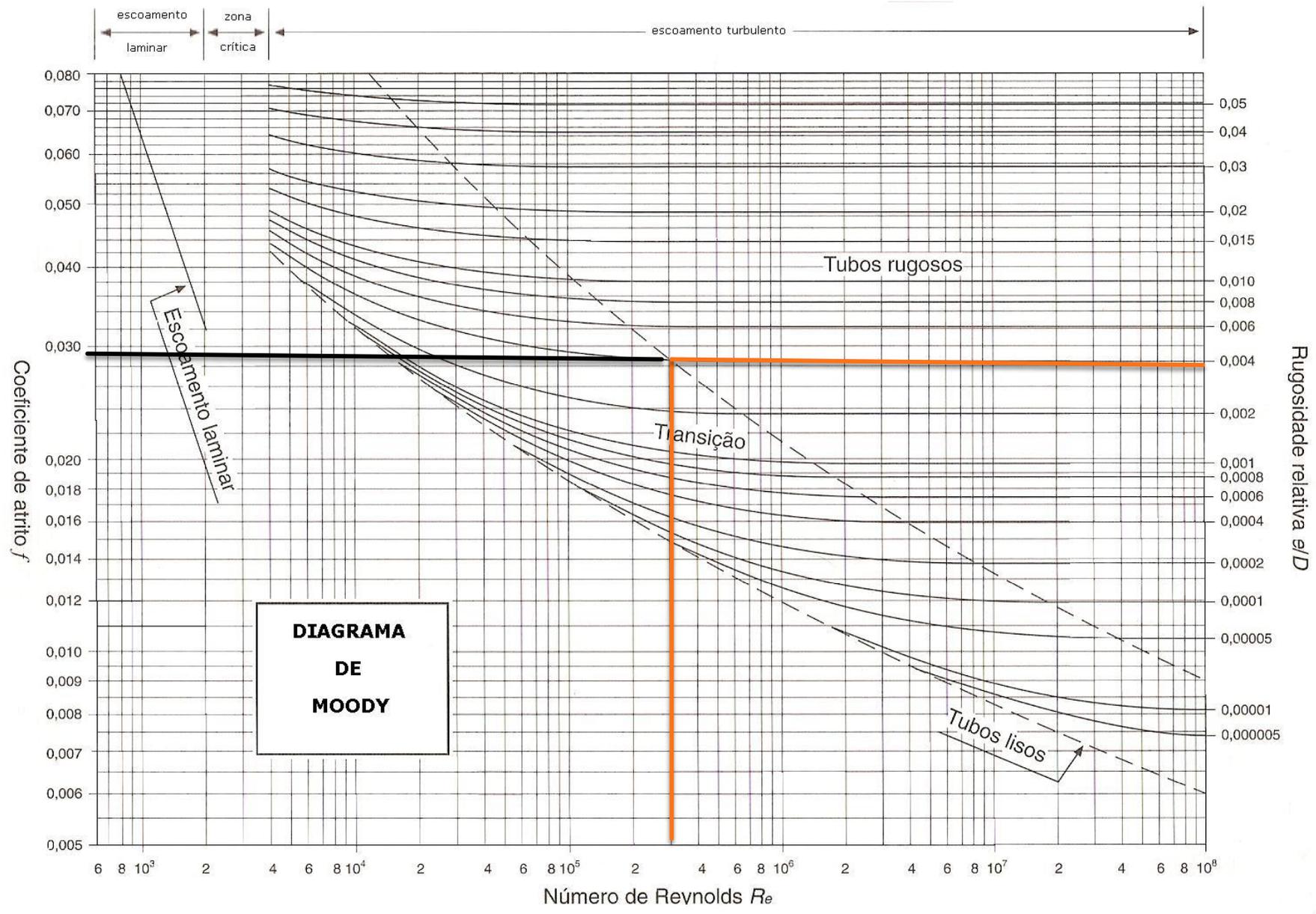
escoamento laminar zona crítica escoamento turbulento

Tubos rugosos

Transição

Tubos lisos

Escoamento laminar



Fórmulas Práticas empíricas de h_f :

- ▶ Obtidas em laboratório
- ▶ Válidas para condições específicas:
 - grupo de materiais
 - tipo de líquido
 - temperatura do líquido
 - faixa de diâmetros
 - geralmente regime de escoamento turbulento

Fórmula de Hazen-Williams

Gardner Williams and Allen Hazen (1920).

Aplicação: Todos os materiais e Diâmetro: 2” a 120” (50 a 300 mm)

$$hf = \frac{10,65 \cdot Q^{1,852} \cdot L}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}}$$

$$D = \frac{Q^{0,38}}{0,615 \cdot C^{0,38} \cdot J^{0,205}} \quad \text{onde} \quad J = \frac{hf}{L}$$

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

Fórmula de Hazen-Williams

MATERIAL	coeficiente C
Plástico, polietileno, PVC	150
Latão, cobre, chumbo, estanho, chapas de ferro estanhado novos, cimento amianto, mangueiras de tecido revestidas de borracha de boa qualidade	140
Alumínio	135
Aço galvanizado, concreto de acabamento liso, ferro fundido e aço revestidos de cimento liso novos, ferro fundido novo	130
Ferro galvanizado	125
Alumínio com juntas de acoplamento rápido, Manilha de argila comum para drenos	120
Manilhas de ferro para esgoto	110
Alvenaria de tijolos revestido de cimento liso	100
Tubos corrugados	60

Fórmula de Flamant

- Alfred-Aimé Flamant (França, 1883)

Aplicação: Irrigação localizada e Diâmetro inferior a 2" (50 mm)

$$hf = \frac{6,107 \cdot b \cdot L \cdot Q^{1,75}}{D^{4,76}}$$

$$Q = \frac{0,356}{b^{0,57}} \cdot D^{2,714} \cdot \left(\frac{hf}{L}\right)^{0,57}$$

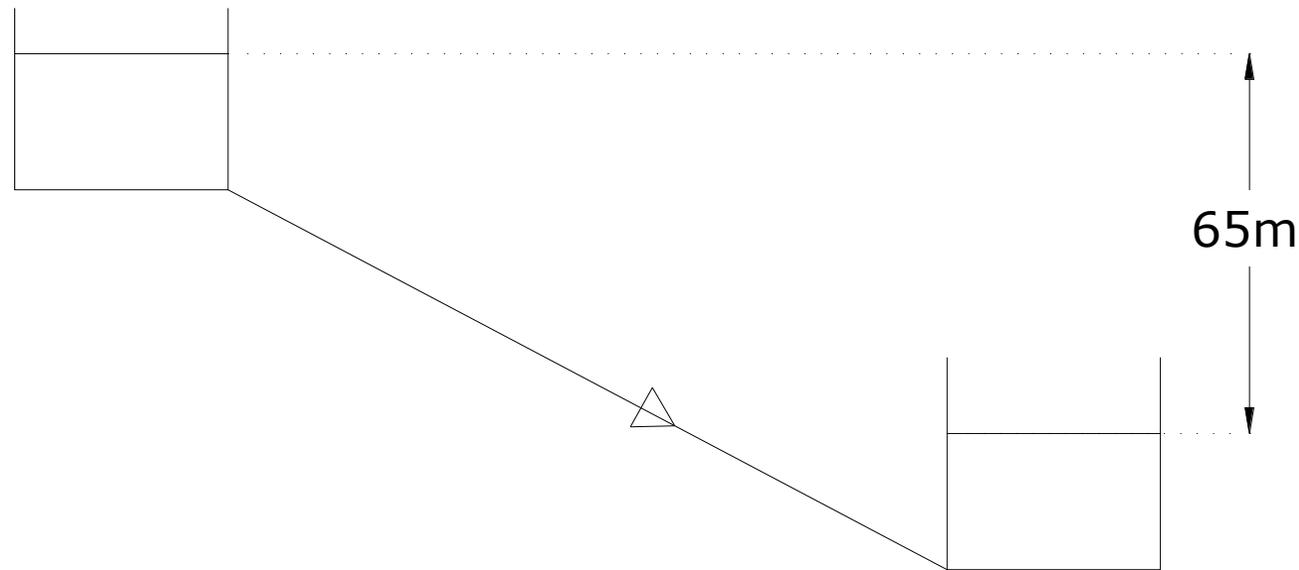
$$D = 1,464 \cdot b^{0,21} \cdot Q^{0,368} \cdot \left(\frac{L}{hf}\right)^{0,21}$$

Fórmula de Flamant

MATERIAL	FLAMANT coeficiente b
Ferro ou aço usado	0,00023
Ferro ou aço novo	0,000185
Concreto	0,000185
PVC	0,000135
Chumbo	0,000140

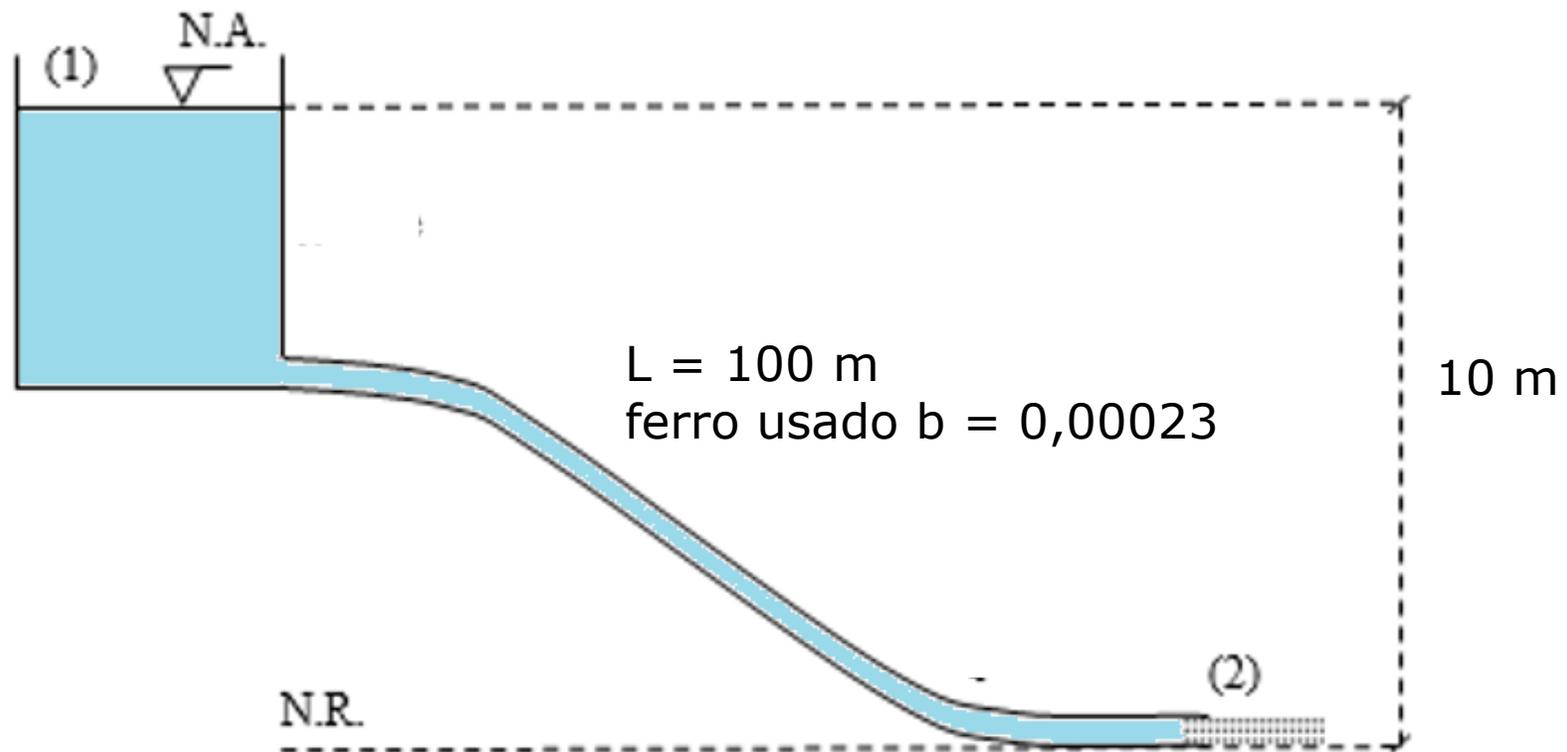
Exemplos:

- ▶ Considerando a adutora por gravidade com $Q = 0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $L = 650 \text{ m}$ e tubo de cimento amianto com $C = 140$. Qual o diâmetro teórico?



Exemplos:

- Considerando o esquema abaixo:



Exemplos:

- ▶ Calcule (utilizando Flamant):
 - a) Diâmetro teórico para vazão de 2,5 L/s
 - b) Qual o diâmetro comercial para $Q = 2,5$ L/s
 - c) Caso não seja controlada, qual seria a Q efetiva para o diâmetro comercial adotado no item b
 - d) Caso a Q seja controlada em 2,5 L/s qual a perda de carga efetiva

Diâmetro		
m	mm	'' (polegadas)
0,0063	6,3	1/4
0,0095	9,5	3/8
0,0125	12,5	1/2
0,016	16	5/8
0,019	19	3/4
0,025	25	1
0,031	31	1 1/4
0,038	38	1 1/2
0,050	50	2
0,062	62	2 1/2
0,075	75	3

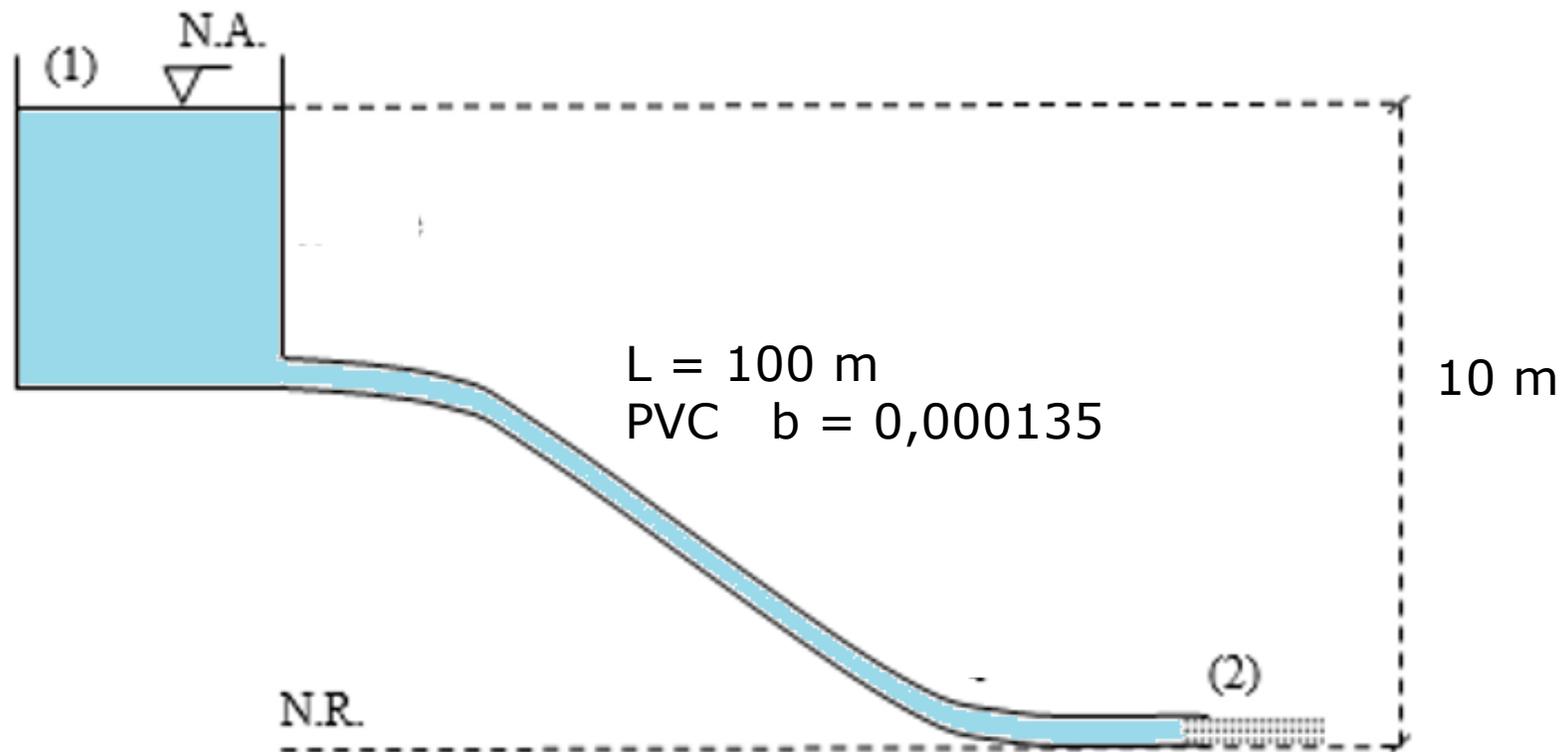
Diâmetro		
m	mm	'' (polegadas)
0,1	100	4
0,125	125	5
0,150	150	6
0,2	200	8
0,25	250	10
0,3	300	12
0,35	350	14
0,4	400	16
0,45	450	18
0,5	500	20

Exemplos:

- ▶ Uma adutora de PVC usado ($C = 140$) de 1800 m de comprimento será dimensionada para conduzir uma $Q = 2,0$ L/s entre 2 reservatórios cuja $\Delta h = 21,72$ m (diferença de nível). Pede-se:
 - a) Diâmetro teórico
 - b) Diâmetro comercial
 - c) A Q efetiva para o diâmetro comercial caso a mesma não seja controlada
 - d) A h_f efetiva caso a vazão seja controlada em 2,0 L/s

Entregar

- Considerando o esquema abaixo:

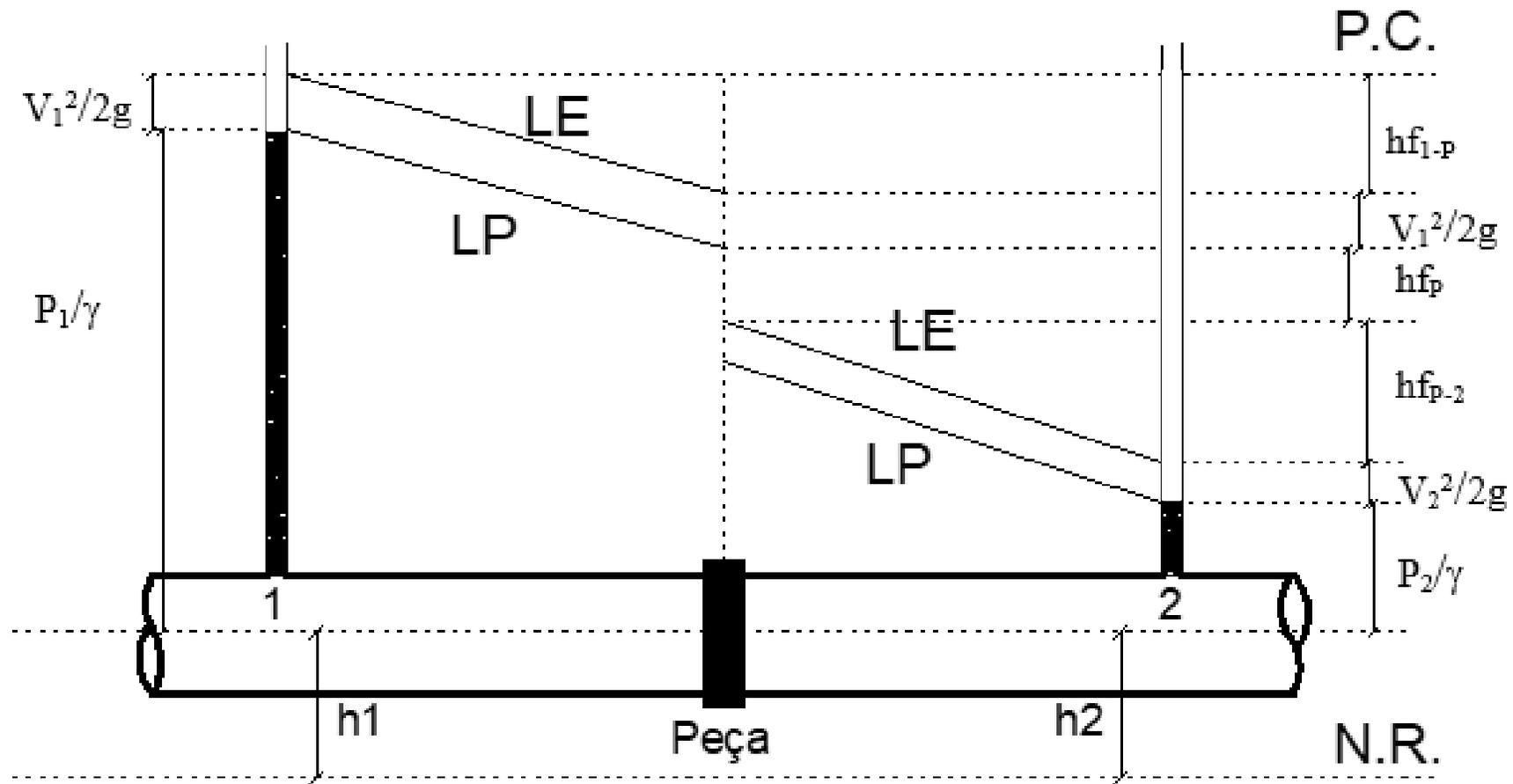


Exemplos:

- ▶ Calcule (utilizando Flamant):
 - a) Diâmetro teórico para vazão de 2,5 L/s
 - b) Qual o diâmetro comercial para $Q = 2,5$ L/s
 - c) Caso não seja controlada, qual seria a Q efetiva para o diâmetro comercial adotado no item b
 - d) Caso a Q seja controlada em 2,5 L/s qual a perda de carga efetiva

PERDA DE CARGA LOCALIZADA

- Cada peça instalada na tubulação causa perda de carga
- Perdas de carga que ocorrem nas peças = hf_L
- 2 métodos:
 - a) Método dos coeficientes (K) → expressão geral
 - b) Método dos comprimentos equivalentes (L_{eq})



hf_{1-P} – perda de carga no tubo (do ponto 1 até a peça)

hf_P – perda de carga na peça

hf_{P-2} – perda de carga no tubo (desde a peça até o ponto 2)

PERDA DE CARGA LOCALIZADA

a) Método dos coeficientes (K)

$$hf_l = K \frac{V^2}{2g}$$

hf_L – perda de carga localizada, mca

V – velocidade de escoamento, m/s

g – aceleração da gravidade, m/s²

PERDA DE CARGA LOCALIZADA

Localizada $hf = \sum K \cdot \frac{V^2}{2g}$

PEÇA	K
Curva de raio longo	0,25 a 0,40
Curva de raio curto	0,90 a 1,50
Curva 45°	0,20
Registro de gaveta aberto	0,20
Registro globo aberto	10,00
T passagem direta	0,60
T saída lateral	1,30
T saída bilateral	1,80
Válvula de retenção	2,50
Válvula de pé	1,75
Medidor Venturi	2,50

PERDA DE CARGA LOCALIZADA

b) Método dos comprimentos equivalentes (L_{eq})

- Para efeito de cálculo adiciona-se comprimentos que correspondem à perda causada pelas peças existentes na tubulação
- Comprimento da tubulação: L
- Comprimento equivalente às peças na tubulação: L_e
- Comprimento total: $L_T = L + L_e$

PERDA DE CARGA LOCALIZADA

Diâmetro nominal		Joelho 90°	Joelho 45°	Curva 90°	Curva 45°	Tê 90° passag. direta	Tê 90° saída de lado	Tê 90° saída bilat.	Entrada normal	Entrada de borda	Saída de Canaliz.	Válvula de pé e crivo	Válv. de retenção		Registro de globo aberto	Registro de gaveta aberto	Registro de ângulo aberto
DN	(Ref.)																
	(-)																
15	(1/2)	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3	2,3	0,3	0,9	0,8	8,1	2,5	3,6	11,1	0,1	5,9
20	(3/4)	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4	2,4	0,4	1,0	0,9	9,5	2,7	4,1	11,4	0,2	6,1
25	(1)	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1	3,1	0,5	1,2	1,3	13,3	3,8	5,8	15,0	0,3	8,4
32	(1,1/4)	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6	4,5	0,6	1,8	1,4	15,5	4,9	7,4	22,0	0,4	10,5
40	(1,1/2)	3,2	1,3	1,2	0,6	2,2	7,3	7,3	1,0	2,3	3,2	18,3	6,8	9,1	35,8	0,7	17,0
50	(2)	3,4	1,5	1,3	0,7	2,3	7,6	7,6	1,5	2,8	3,3	23,7	7,1	10,8	37,9	0,8	18,5
60	(2,1/2)	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8	7,8	1,6	3,3	3,5	25,0	8,2	12,5	38,0	0,9	19,0
75	(3)	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0	8,0	2,0	3,7	3,7	26,8	9,3	14,2	40,0	0,9	20,0
100	(4)	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3	8,3	2,2	4,0	3,9	28,6	10,4	16,0	42,3	1,0	22,1
125	(5)	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0	10,0	2,5	5,0	4,9	37,4	12,5	19,2	50,9	1,1	26,2
150	(6)	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1	11,1	2,8	5,6	5,5	43,4	13,9	21,4	56,7	1,2	28,9

Exemplo

Calcular a perda de carga no esquema a seguir:

$D = 25 \text{ mm}$; Material: PVC; $Q = 0,5 \text{ L/s}$ e

PVC ($b = 0,000135$)

Item	Peça	Quant	K	Le
1	Entrada reentrante	1	1,0	1,0
2	Tê de saída lateral	1	1,3	2,4
3	Curva 90o raio longo	5	0,4	0,5
4	Registro de gaveta aberto	1	0,2	0,2
5	Saída de canalização	1	1,0	0,9

