

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANITÁRIA

PHD 0313 Instalações e Equipamentos Hidráulicos

Aula 3: Perdas de Carga Distribuídas e Localizadas

Prof.: MIGUEL GUKOVAS

Prof.: J .RODOLFO S. MARTINS

Prof.: RONAN CLEBER CONTRERA

<http://www.phd.poli.usp.br>

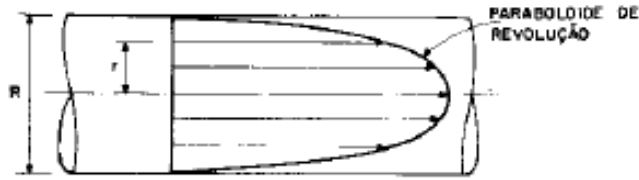
Objetivos da aula

- escoamento no interior de condutos Forçados
- Perdas de Carga Distribuídas
- Fórmulas Práticas
- Perdas Localizadas
- Comprimento Equivalente

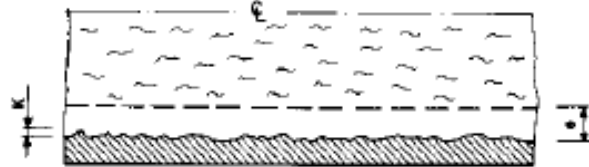
Escoamentos sob Pressão

- Também denominados ESCOAMENTOS EM CONDUTOS FORÇADOS, são aqueles que se desenvolvem dentro das tubulações onde a pressão é diferente da atmosférica, ou seja a pressão efetiva é diferente de zero. Todos os sistemas de tubulações prediais, de abastecimento de água, oleodutos e gasodutos tem este tipo de escoamento.

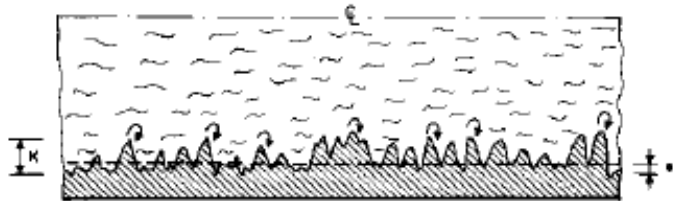
Regimes de Escoamento



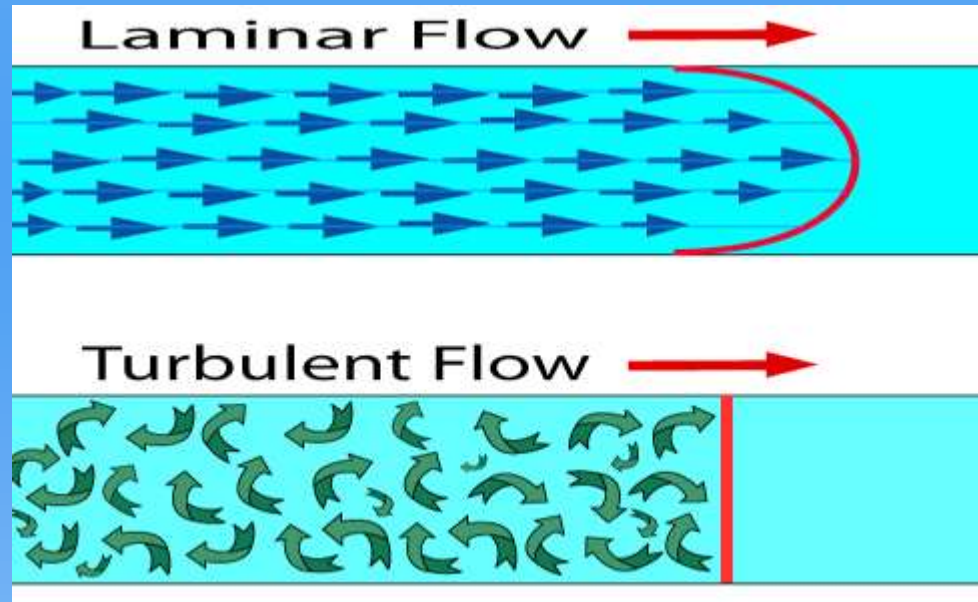
Laminar



Turbulento Liso



Turbulento Rugoso



Identificação dos Regimes

Número de Reynolds → Re (adimensional)

$$\text{Re} = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

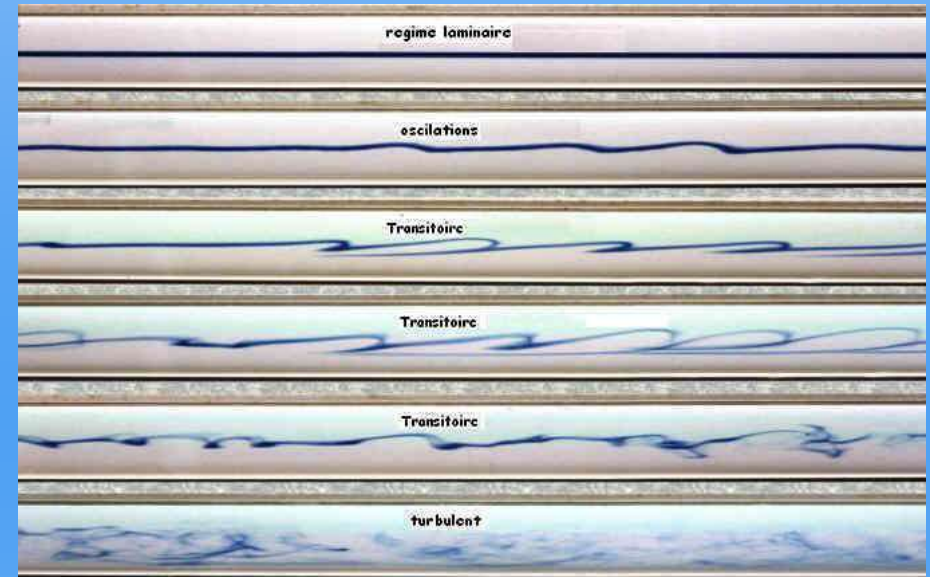
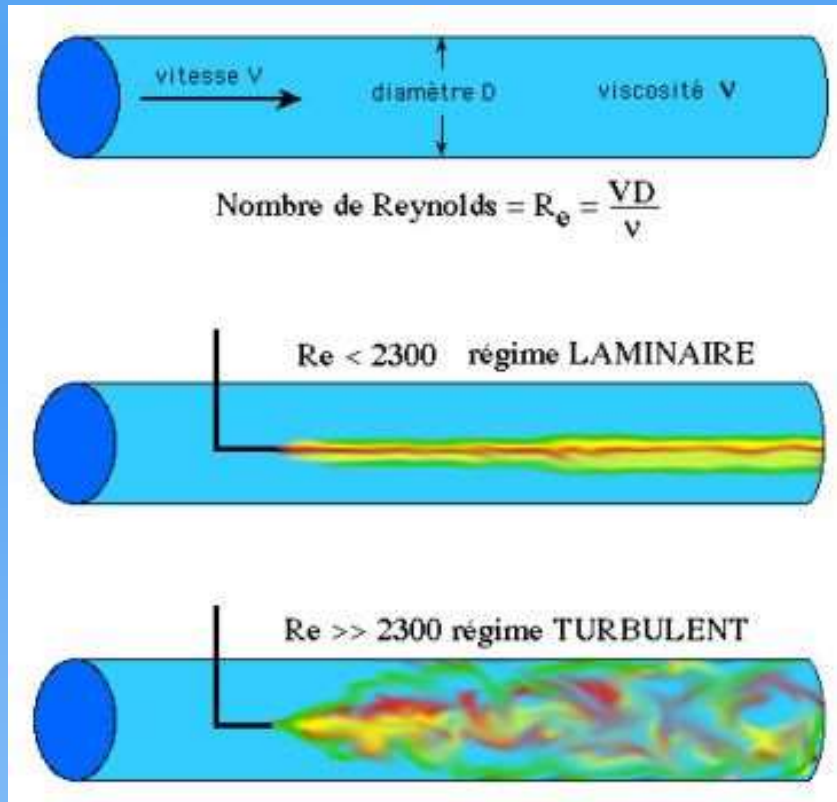
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = 10^{-6}$$

$\text{Re} \leq 2000 \rightarrow$ *la min ar*

$2000 \leq \text{Re} \leq 4000 \rightarrow$ *zona crítica*

$\text{Re} > 4000 \rightarrow$ *turbulento*

Identificação dos Regimes

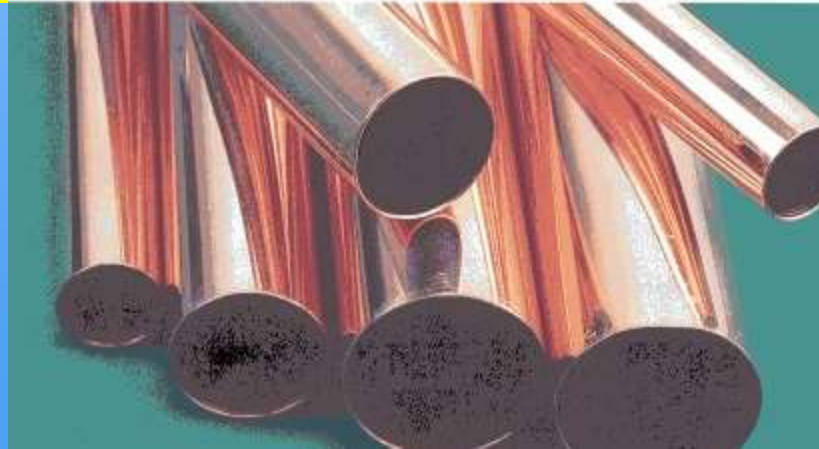


**Linhas de
Fluxo Paralelas**

**Formação de
Vórtices**

Perdas de Carga (Energia)

- Distribuídas

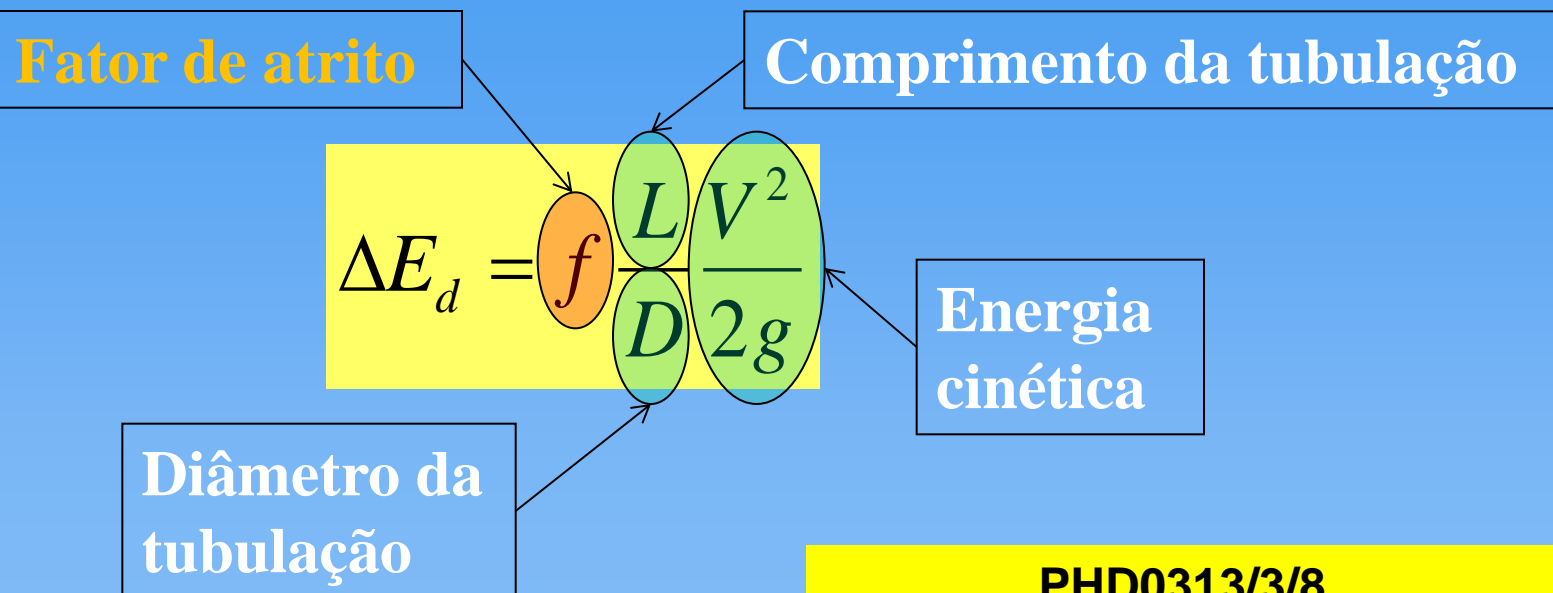


- Localizadas



Perdas Distribuídas

A perda de carga (energia por unidade de peso específico e volume) distribuída nos escoamentos forçados é aquela que ocorre em função dos atritos e turbulências ao longo da tubulação, sendo bem representada através da equação de Darcy-Weissbach, também conhecida como **Fórmula Universal**:



Perdas Distribuídas

$$\Delta E_d = \Delta H = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{(\pi \cdot D^2)/4}$$

$$V^2 = \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4}$$

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

$$J = \frac{\Delta H}{L}$$

$$J = f \cdot \frac{8}{g \pi^2} \cdot \frac{1}{D^5} Q^2$$

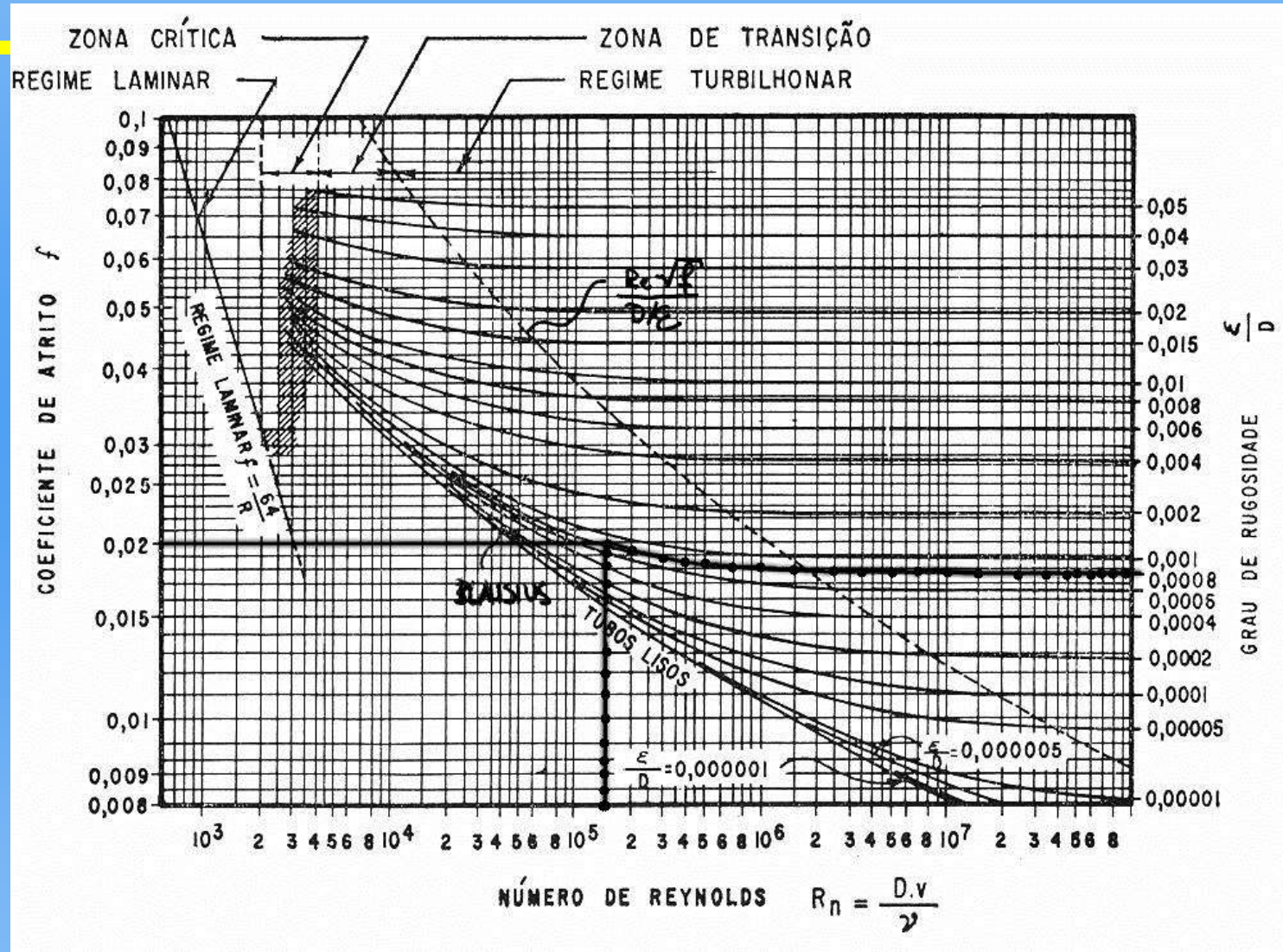
$$J = f \cdot \frac{8}{g \pi^2} \cdot \frac{Q^2}{D^5}$$

J = Perda de carga unitária

Rugosidade

Tipo de conduto	Rugosidade, ϵ (mm)	f
Ferro Fundido		
Incrustado	2,40-1,20	0,020-1,500
Revestido com asfalto	0,30-0,90	0,014-0,100
Revestido com cimento	0,05-0,15	0,012-0,060
Aço Galvanizado		
Novo com costura	0,15-0,20	0,012-0,060
Novo sem costura	0,06-0,15	0,009-0,012
Concreto		
Moldado com forma de madeira	0,20-0,40	0,012-0,080
Moldado com forma em ferro	0,06-0,20	0,009-0,060
Centrifugado	0,15-0,50	0,012-0,085
PVC	0,015	0,009-0,050

Fator f - Comportamento



Fator de atrito f

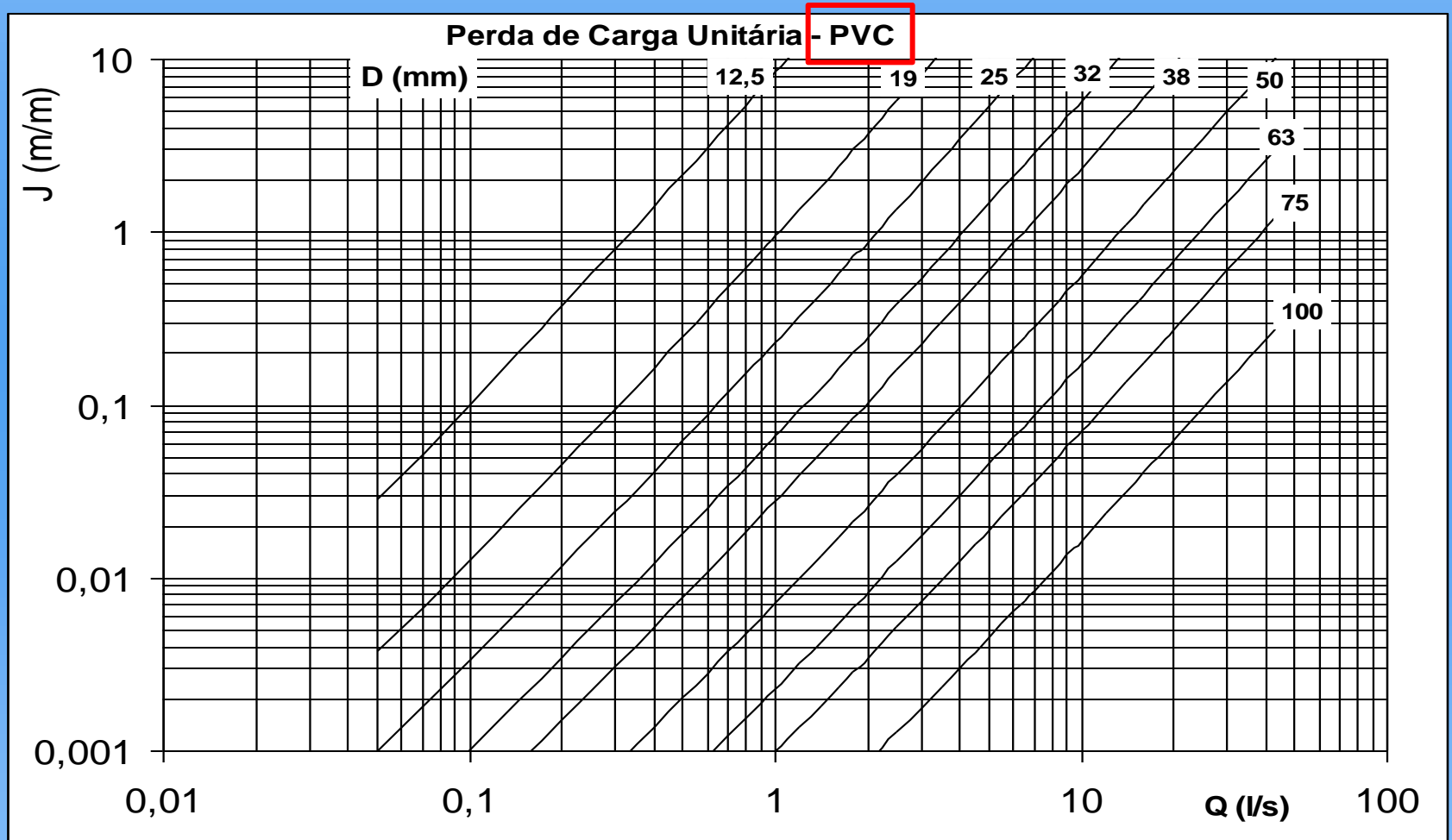
$$f = \frac{64}{\text{Re}} \rightarrow \text{la min ar}$$

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

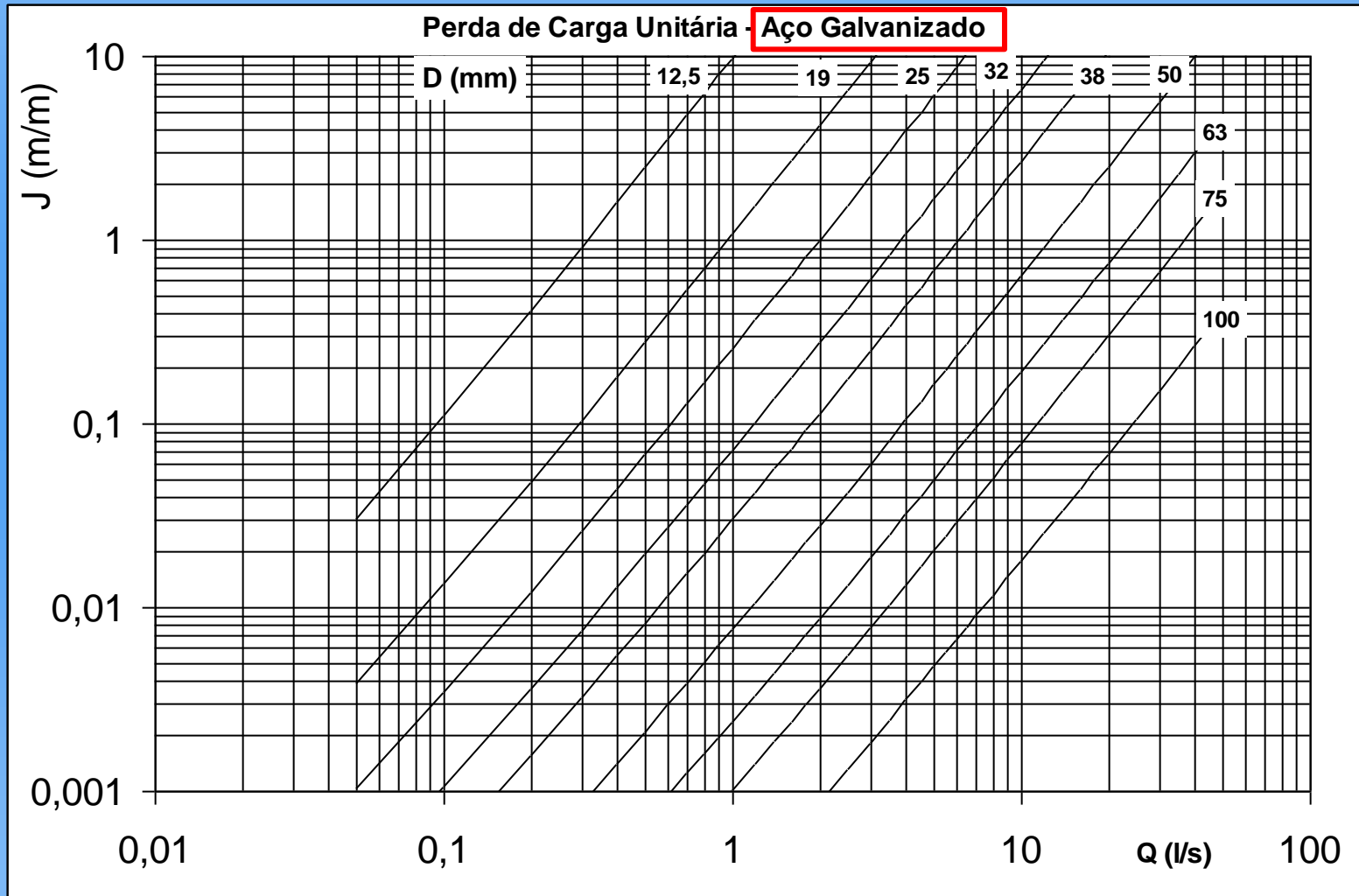
ou

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{5,62}{\text{Re}^{0,9}} + \frac{\varepsilon}{3,71D} \right) \rightarrow \text{turbulento}$$

Diagramas Práticos



Diagramas Práticos



Fórmulas Empíricas

Hazen-Williams

$$\Delta H = 10,65 \frac{L}{C^{1,85} D^{4,87}} Q^{1,85}$$

(D ≥ 100 mm)

$$J = \frac{\Delta H}{L} = 10,65 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}}$$

Material	C
Cobre	130
Aço Galvanizado	125
Ferro Fundido Novo	100

Fórmulas Empíricas

Fair-Whiple-Hsiao

- PVC ou cobre até 100 mm

$$Q = 55,934 \cdot J^{0,571} D^{2,714}$$

ou

$$J = 0,0008695 \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$$

- Aço galvanizado ou ferro fundido até 100 mm

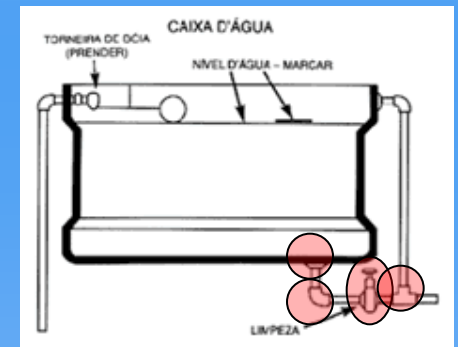
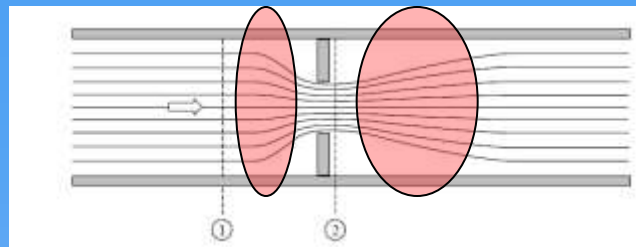
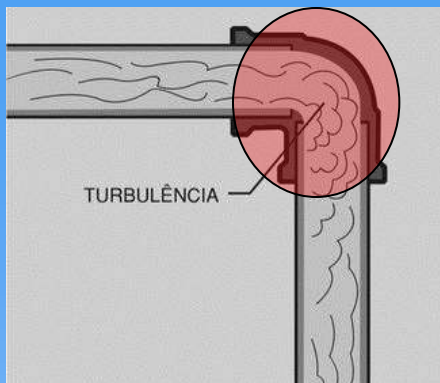
$$Q = 27,1113 \cdot J^{0,532} D^{2,596}$$

ou

$$J = 0,002021 \cdot \frac{Q^{1,88}}{D^{4,88}}$$

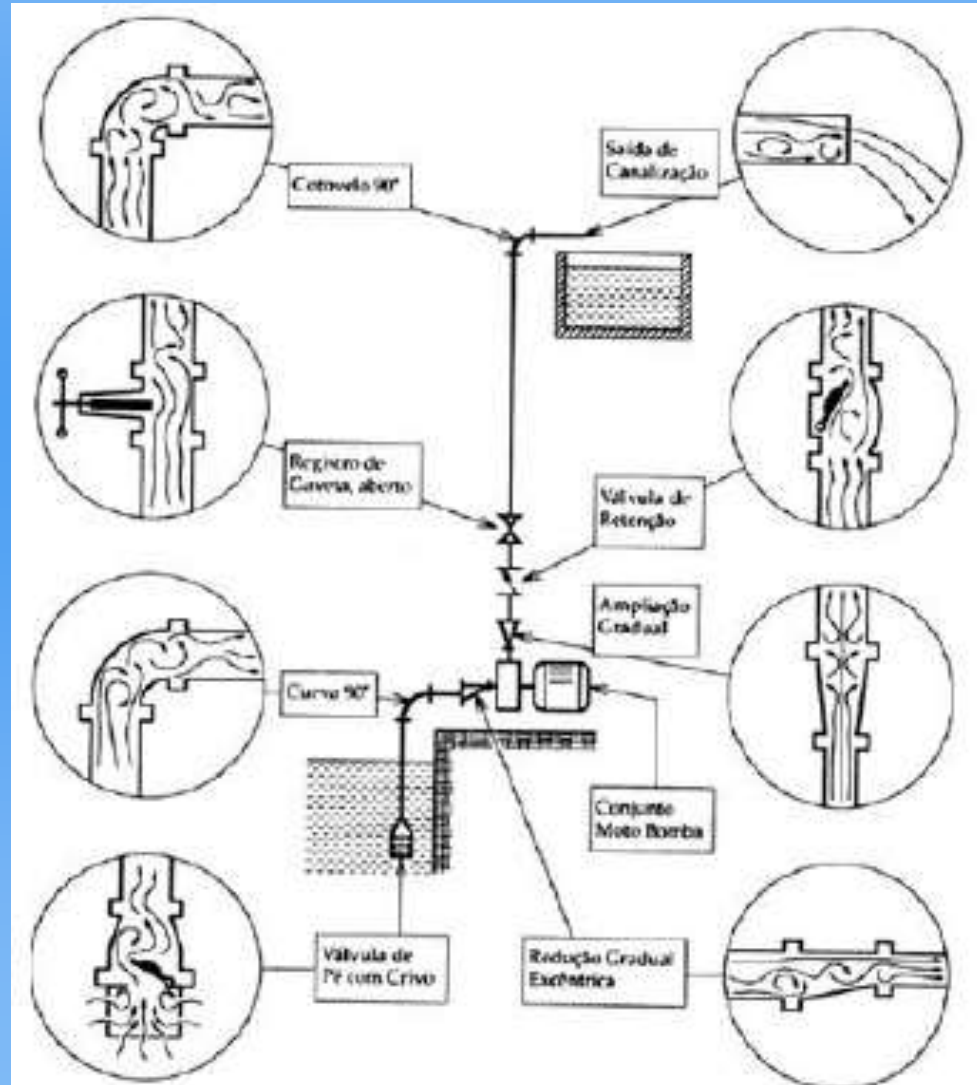
Perdas Localizadas

- Ocorrem em singularidades devido à mudanças de direção (curvas, “T”, “Y”, etc.), geometria (entradas, saídas, etc.) e área (estrangulamento, alargamento) da seção do tubo.



Perdas Localizadas

$$\Delta H = K \frac{V^2}{2g}$$

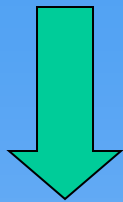


Coeficientes de Perda

Acessório	K	Acessório	K
Cotovelo de 90° raio curto	0,9	Válvula de gaveta aberta	0,2
Cotovelo de 90° raio longo	0,6	Válvula de ângulo aberta	5
Cotovelo de 45°	0,4	Válvula de globo aberta	10
Curva 90°, r/D = 1	0,4	Válvula de pé com crivo	10
Curva de 45°	0,2	Válvula de retenção	3
Tê, passagem direta	0,9	Curva de retorno, $\alpha = 180^\circ$	2,2
Tê, saída lateral	2,0	Válvula de bóia	6

Comprimentos Equivalentes

Conceito: substituir, para fins de cálculo, a singularidade por um trecho retilíneo de mesmo diâmetro que cause a mesma perda



Vantagem: utilizar apenas a fórmula para perda distribuída para se determinar a perda de carga total (distribuída + localizada).

$$\Delta H_{distr.} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$\Delta H_{loc.} = k \frac{V^2}{2g}$$




















$$\Delta H_{loc.} = (\Delta H_{distr.})_{equivalente}$$

$$k \frac{V^2}{2g} = f \frac{L_{virt.}}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$L_{virt.} = k \frac{D}{f}$$
















Tabela de comprimentos Equivalentes

Tabela 7.6 – 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		VÁLVULA DE GAVETA ABERTO		VÁLVULA DE GLOBO ABERTO		VÁLVULA DE ÂNGULO ABERTO		TÉ PASSAGEM DIRETA		TÉ SAÍDA DE LADO		TÉ SAÍDA LATERAL		VÁLVULA DE PÉ E CRIVO		SAÍDA DA CANALIZAÇÃO		VÁLVULA DE RETEÇÃO TIPO LEVE		VÁLVULA DE RETEÇÃO 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	0,2	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																		

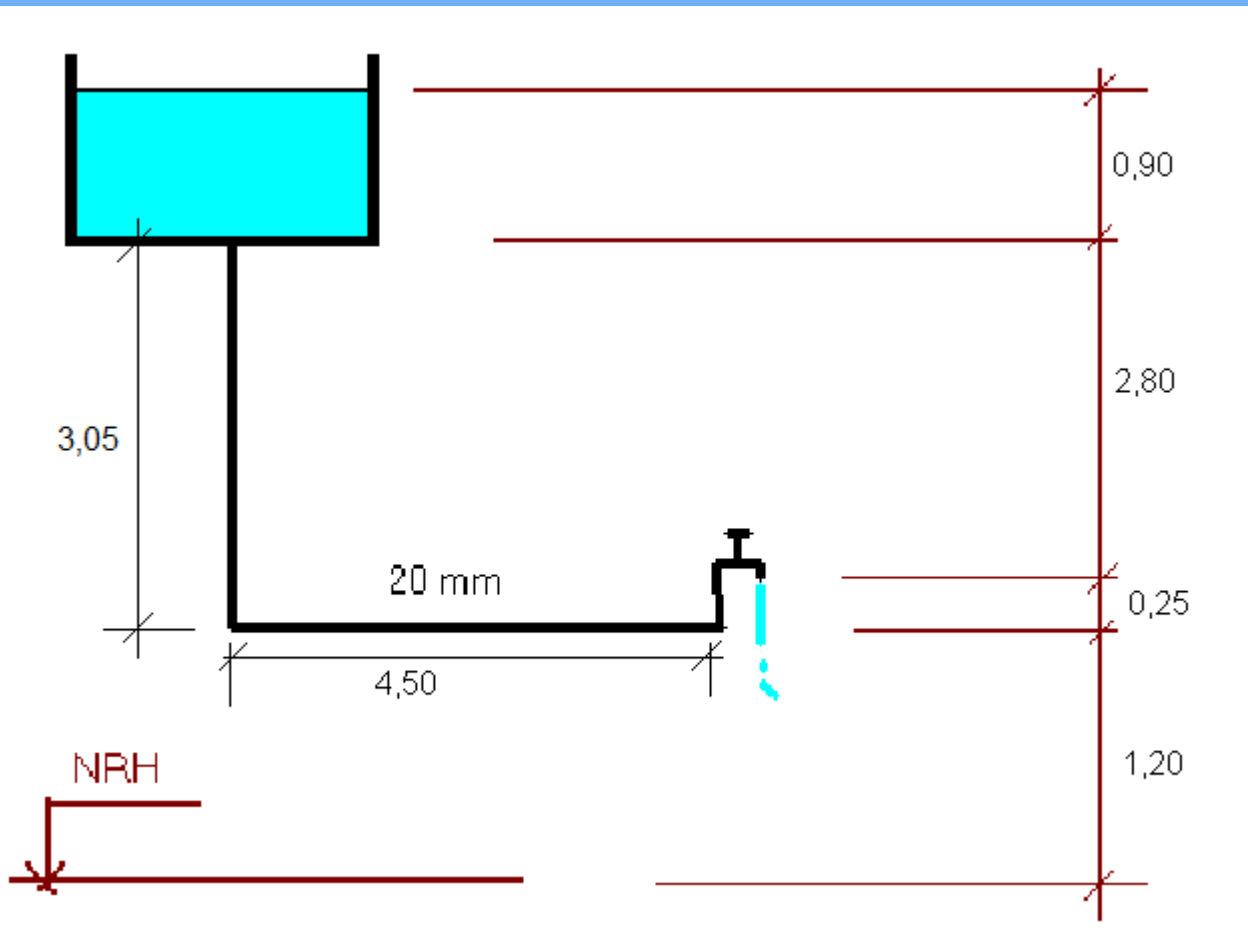
* Os valores indicados para registros de globo aplicam-se também às torneiras, válvulas para chuveiros e válvulas de descarga

Tabela de comprimentos Equivalentes PVC ou metal

Tabela de perdas de cargas localizadas em conexões, considerando-se os comprimentos equivalentes em metros de canalização										
CONEXÃO	Diâmetro nominal X Equivalência em metros de canalização									
	MATERIAL	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"
Curva 90° 	PVC	0,5	0,6	0,7	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,9
	Metal	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,3	1,6	2,1
Curva 45° 	PVC	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
	Metal	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
Joelho 90° 	PVC	1,2	1,5	2,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,3	4,9
	Metal	0,7	0,8	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	3,4	4,2
Joelho 45° 	PVC	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	2,5
	Metal	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,2	1,5	1,9
Tê de passagem direta 	PVC	0,8	0,9	1,5	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	3,3
	Metal	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	2,1	2,7
Tê de saída lateral 	PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
	Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
Tê de saída bilateral 	PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
	Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
União 	PVC	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,25
	Metal	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
Saída de canalização 	PVC	0,9	1,3	1,4	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,9
	Metal	0,5	0,7	0,9	1,0	1,5	1,9	2,2	3,2	4,0
Luva de redução (%) 	PVC	0,3	0,2	0,15	0,4	0,7	0,8	0,85	0,95	1,2
	Aço	0,29	0,16	0,12	0,38	0,64	0,71	0,78	0,9	1,07
Registro de gaveta ou esfera aberto 	PVC	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1
	Metal	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9
Registro de globo aberto 	Metal	6,7	8,2	11,3	13,4	17,4	21,0	26,0	34,0	43,0
Registro de ângulo aberto 	Metal	3,6	4,6	5,6	6,7	8,5	10,0	13,0	17,0	21,0
Válvula de pé com crivo 	PVC	9,5	13,3	15,3	18,3	23,7	25,0	26,8	28,8	37,4
	Metal	5,6	7,3	10,0	11,6	14,0	17,0	22,0	23,0	30,0
Válvula de Retenção 	Horizontal	Metal	1,6	2,1	2,7	3,2	4,2	5,2	6,3	10,4
	Vertical	Metal	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4	8,1	9,7	16,1

- A diferença é principalmente devido ao diâmetro de referência, que pode ser diferente de um material para outro.

Problema

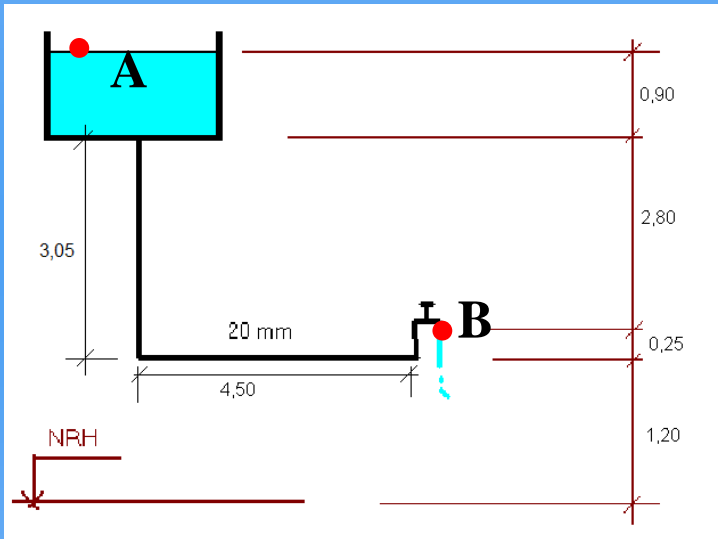


Qual é a vazão da torneira?

- Para cálculo das perdas considere peças de PVC de 19 mm, um registro de globo aberto ao invés da torneira e despreze as perdas na saída.

Cálculo real....

Solução:



- Aplicando-se a eq. de Bernouilli entre os pontos A e B:

$$Z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = Z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + \Delta H_{A \rightarrow B}$$

$$5,15 + 10 + \frac{0^2}{2 \cdot 10} = 1,45 + 10 + \frac{V_B^2}{2 \cdot 10} + \Delta H_{A \rightarrow B}$$

$$\frac{V_B^2}{2 \cdot g} + \Delta H_{A \rightarrow B} = 3,70$$

(1)

$$V_B = ?$$

$$\Delta H_{A \rightarrow B} = ?$$

Cálculo real....

$$V_B = ? \rightarrow$$

- Podemos arbitrar um valor inicial para V_B , e resolver de forma iterativa até convergir ou
- Assumir que $(V_B^2/2.g)$ é um valor muito baixo e desconsiderar este termo (solução aproximada).

$$\Delta H_{A \rightarrow B} = ? \rightarrow$$

- Fórmula Universal
- ou
- Fair-Whiple-Hsiao

Cálculo real....

- $D = 20 \text{ mm} = 0,020 \text{ m} \quad \rightarrow \quad A = \pi.D^2/4 = 3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

- Material = PVC $\rightarrow \varepsilon = 0,015 \text{ mm} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}$

Comprimento Real do Tubo:

- $L_{\text{Tubo}} = 3,05 + 4,50 + 0,25 = 7,80 \text{ m}$

Comprimento Equivalente das Perdas Localizadas:

01 Entrada normal 20 mm $\rightarrow 0,20 \text{ m}$

03 Cotov. raio curto 20 mm $\rightarrow 3 \times 0,70 \text{ m}$

01 Reg. Globo Aberto 20 mm $\rightarrow \underline{6,70 \text{ m}}$

$L_{\text{Eq. Total}} = 9,00 \text{ m}$

Comprimento Virtual Total

- $L_{\text{Virt. Total}} = 7,80 + 9,00 = 16,80 \text{ m}$

Solução 1

- Arbitrando-se $V_B = 1,0 \text{ m/s}$ e utilizando-se a *Fórmula Universal*:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{1,0 \cdot 0,020}{10^{-6}} = 20.000 > 4.000 \therefore \text{Esc. Turbulento}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{5,62}{\text{Re}^{0,9}} + \frac{\varepsilon}{3,71D} \right) = -2 \cdot \log \left(\frac{5,62}{20.000^{0,9}} + \frac{1,5 \times 10^{-5}}{3,71 \cdot 0,020} \right)$$

$$f = 2,75 \times 10^{-2}$$

$$\Delta H_{A \rightarrow B} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_B^2}{2 \cdot g} = 2,75 \times 10^{-2} \cdot \frac{16,8}{0,020} \cdot \frac{V_B^2}{2 \cdot 10}$$

$$\Delta H_{A \rightarrow B} = 1,153 \cdot V_B^2 \quad (2)$$

Solução 1 (continuação)

- Substituindo-se a equação (2) em (1):

$$0,05 \cdot V_B^2 + 1,153 \cdot V_B^2 = 3,70 \rightarrow 1,203 \cdot V_B^2 = 3,70 \rightarrow V_B = 1,75 \text{ m/s}$$

- Note que $V_B = 1,75 \text{ m/s} \neq V_B = 1,0 \text{ m/s}$ arbitrado inicialmente, dessa forma, os cálculos deverão ser refeitos.

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{1,75 \cdot 0,020}{10^{-6}} = 35.000 > 4.000 \therefore \text{Esc. Turbulento}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{5,62}{\text{Re}^{0,9}} + \frac{\varepsilon}{3,71D} \right) = -2 \cdot \log \left(\frac{5,62}{35.000^{0,9}} + \frac{1,5 \times 10^{-5}}{3,71 \cdot 0,020} \right)$$

$$f = 2,47 \times 10^{-2}$$

Solução 1 (continuação)

$$\Delta H_{A \rightarrow B} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_B^2}{2 \cdot g} = 2,47 \times 10^{-2} \cdot \frac{16,8}{0,020} \cdot \frac{V_B^2}{2 \cdot 10}$$

$$\Delta H_{A \rightarrow B} = 1,038 \cdot V_B^2 \quad (3)$$

- Substituindo-se a equação (3) em (1):

$$0,05 \cdot V_B^2 + 1,038 \cdot V_B^2 = 3,70 \rightarrow 1,088 \cdot V_B^2 = 3,70 \rightarrow V_B = 1,84 \text{ m/s}$$

- Note que, embora a diferença entre $V_B = 1,84 \text{ m/s}$ e $V_B = 1,75 \text{ m/s}$ seja de 5%, com mais uma iteração essa diferença seria muito pequena, e portanto não há necessidade de se repetir os cálculos mais uma vez.

$$Q_B = V_B \cdot A_B = 1,84 \cdot 3,14 \times 10^{-4} = 5,78 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} = 0,578 \text{ L/s}$$

Solução 2:

- Utilizando-se *Fair-Whiple-Hsiao* e desprezando-se o termo $V^2/2g$ na expressão (1):

$$J = 0,0008695 \cdot \frac{Q_B^{1,75}}{D^{4,75}} = 0,0008695 \cdot \frac{Q_B^{1,75}}{0,020^{4,75}} = 1,022 \times 10^5 \cdot Q_B^{1,75}$$

$$\Delta H_{A \rightarrow B} = J \cdot L = 1,022 \times 10^5 \cdot Q_B^{1,75} \cdot 16,8 = 1,717 \times 10^6 \cdot Q_B^{1,75} \quad (4)$$

- Substituindo-se a equação (4) em (1) e desprezando-se $V^2/2g$:

$$\Delta H_{A \rightarrow B} = 3,70 \text{ m} \quad 1,717 \times 10^6 \cdot Q_B^{1,75} = 3,70$$

$$Q_B = 5,78 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} = 0,578 \text{ L} / \text{s}$$

Solução 3:

- Utilizando-se *Fair-Whiple-Hsiao* e desprezando-se o termo $V^2/2g$ da expressão (1):

$$Q_B = 55,934 \cdot J^{0,571} \cdot D^{2,714}$$

$$J = \Delta H_{A \rightarrow B} / L \quad - \text{Fazendo-se } \Delta H_{A \rightarrow B} = \Delta Z_{A \rightarrow B} = 3,70 \text{ m}$$

$$J = 3,70 / 16,8 = 0,22024 \text{ m} / \text{m}$$

$$Q_B = 55,934 \cdot (0,22024)^{0,571} \cdot (0,020)^{2,714}$$

$$Q_B = 5,77 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} = 0,577 \text{ L} / \text{s}$$