AULA 6

ESCOAMENTO PERMANENTE DE FLUIDO INCOMPRESSÍVEL EM CONDUTOS FORÇADOS

Prof. Geronimo Virginio Tagliaferro

DEFINIÇÕES

DEFINIÇÕES

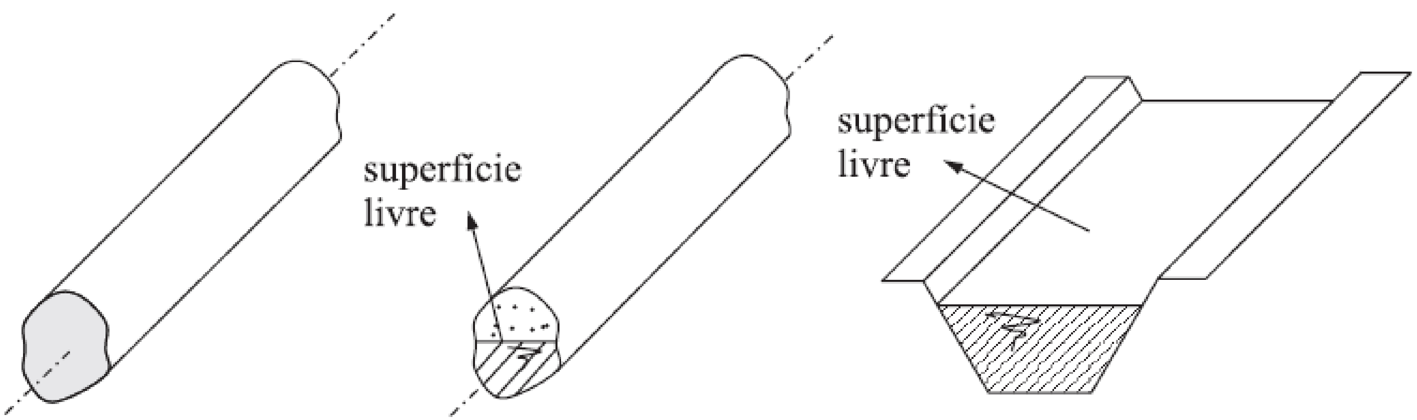
A seguir, serão introduzidas definições e conceitos utilizados ao longo do assunto.

1. Condutos – Classificação

Conduto é qualquer estrutura sólida, destinada ao transporte de fluidos. Os condutos são classificados, quanto ao comportamento dos fluidos em seu interior, em forçados e livres.

DEFINIÇÕES

O conduto é dito forçado quando o fluido que nele escoa o preenche totalmente, estando em contato com toda a sua parede interna, não apresentando nenhuma superfície livre (Figura a). O conduto é dito livre quando o fluido em movimento apresenta uma superfície livre (Figura b).



(a) (b)

DEFINIÇÕES

2. Raio e diâmetro hidráulico

Raio hidráulico (R_H) é definido como:

$$R_H = \frac{A}{\sigma}$$

Onde: A = área transversal do escoamento do fluido;

σ = perímetro "molhado" ou trecho do perímetro, da seção de área A, em que o fluido está em contato com a parede do conduto.

DEFINIÇÕES

2. Raio e diâmetro hidráulico

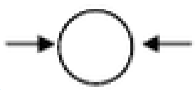
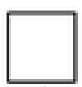
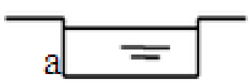
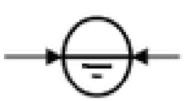
Diâmetro hidráulico (D_H) é definido como:

$$D_H = 4R_H$$

A tabela a seguir apresenta alguns exemplos:

DEFINIÇÕES

2. Raio e diâmetro hidráulico

SEÇÃO	Área	**P**	Rh	Dh
 D	$\pi \frac{D^4}{4}$	π D	$\frac{D}{4}$	D
 A A	a ^{2}	4^a	$\frac{a}{4}$	A
A  B	ab	2(a + b)	$\frac{ab}{2(a+b)}$	$\frac{2ab}{a+b}$
 a b	ab	2 a + b	$\frac{ab}{2a+b}$	$\frac{4ab}{2a+b}$
 D	$\pi \frac{D}{8}$	$\pi \frac{D}{2}$	$\frac{D}{4}$	D

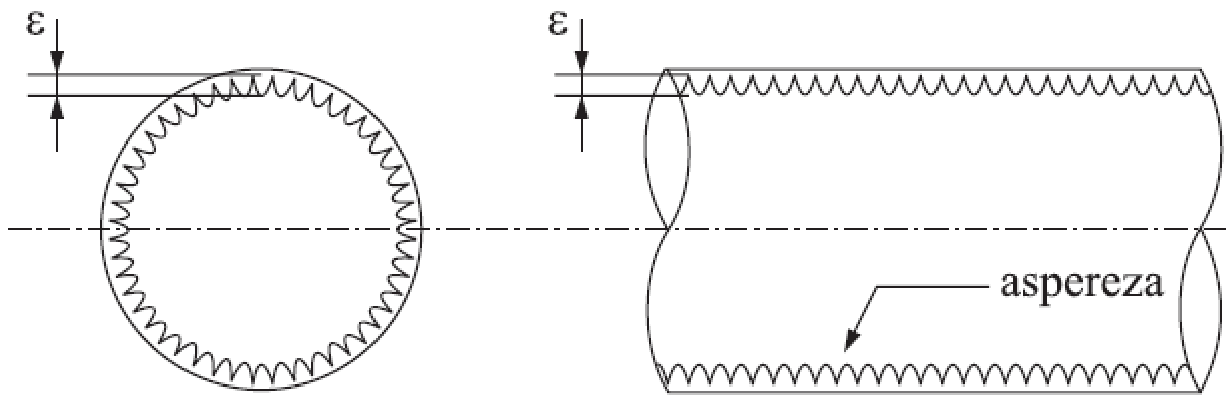
DEFINIÇÕES

3. Rugosidade

Os condutos apresentam asperezas nas paredes internas que influem na perda de carga dos fluidos em escoamento. Em geral, tais asperezas não são uniformes, mas apresentam uma distribuição aleatória tanto em altura como em disposição. No entanto, para efeito de estudo, supõe-se inicialmente que as asperezas tenham altura e distribuição uniformes. A altura uniforme das asperezas será indicada por ε e denominada “rugosidade uniforme”.

DEFINIÇÕES

3. Rugosidade



Para efeitos do estudo das perdas no escoamento de fluidos, é fácil compreender que elas não dependem diretamente de ε, mas do quociente D_H/ε que será chamado “rugosidade relativa”.

DEFINIÇÕES

3. Rugosidade

$$\text{Rug. Relat.} = \frac{D_H}{\varepsilon}$$

Material	Rugosidade equivalente (mm)
Aço, revestimento asfalto quente	0,3 a 0,9
Aço, revestimento esmalte centrifugado	0,01 a 0,06
Aço enferrujado ligeiramente	0,15 a 0,3
Aço enferrujado	0,4 a 0,6
Aço muito enferrujado	0,9 a 2,4
Ferro galvanizado novo, com costura	0,15 a 0,2
Ferro galvanizado novo, sem costura	0,06 a 0,15
Ferro fundido revest. asfalto	0,12 a 0,20
Ferro fundido com crostas	1,5 a 3,0
PVC e Cobre	0,015
Cimento-amianto, novo	0,05 a 0,10

DEFINIÇÕES

4. Classificação das perdas de carga

Se for examinado o comportamento do escoamento de fluidos em condutos, será possível distinguir dois tipos de perdas de carga (não esqueça que perda de carga é a energia perdida pela unidade de peso do fluido quando este escoa).

O primeiro tipo é "**perda de carga distribuída**", que será indicada por $\mathbf{h_d}$. Tal perda, como o próprio nome diz, é a que acontece ao longo de tubos retos, de seção constante, devido ao atrito das próprias partículas do fluido entre si.

DEFINIÇÕES

4. Classificação das perdas de carga

Note-se que nessa situação a perda só será considerável se houver trechos relativamente longos de condutos, pois o atrito acontecerá de forma distribuída ao longe deles.

O segundo tipo corresponde às chamadas "**perdas de carga locais ou singulares**", que serão indicadas por $\mathbf{h_l}$. Elas acontecem em locais das instalações em que o fluido sofre perturbações bruscas no seu escoamento.

DEFINIÇÕES

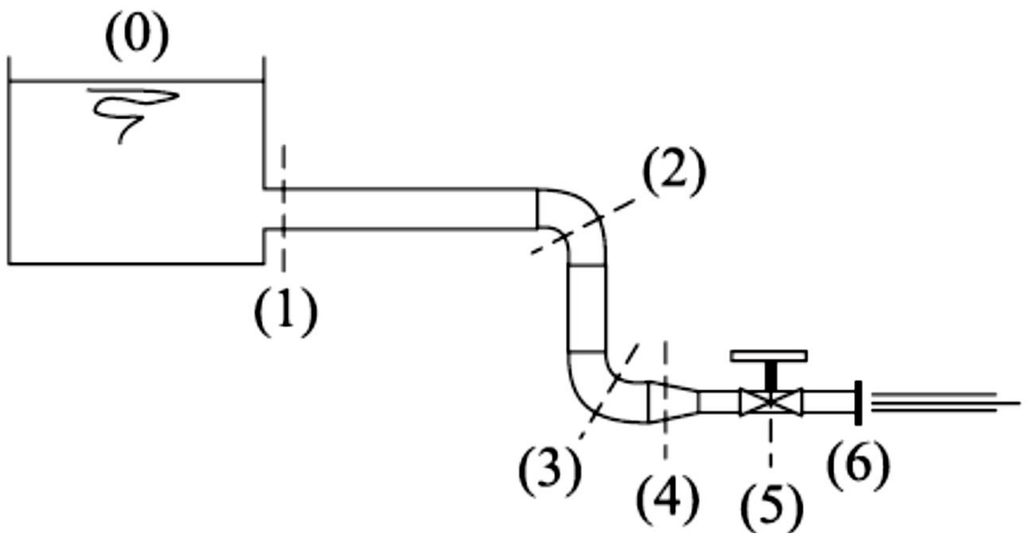
4. Classificação das perdas de carga

Essas perdas podem, diferentemente das anteriores, ser grandes em trechos relativamente curtos da instalação, como, por exemplo, em válvulas, mudanças de direção, alargamentos bruscos, obstruções parciais, etc.

Esses locais, nas instalações, costumam ser chamados de “singularidades”, provindo daí o nome de “perdas de carga singulares”. A figura a seguir mostra uma instalação em que são indicados os tipos de perdas que irão acontecer.

DEFINIÇÕES

4. Classificação das perdas de carga



Entre (1 e 2), (2 e 3), (3 e 4), (4 e 5) e (5 e 6) existem perdas distribuídas. Em (1) estreitamento brusco, (2) e (3) cotovelos, (4) estreitamento, (5) válvula, existem perdas localizadas.

DEFINIÇÕES

4. Classificação das perdas de carga

Mais adiante será observado que o cálculo de umas e outras perdas será efetuado de formas diferentes, como era de esperar, já que as primeiras dependem do comprimento do conduto, enquanto as outras não dependem.

CÁLCULO DA PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA EM DUTO FORÇADO

PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

A perda de carga distribuída em conduto forçado é calculada com a fórmula universal de perda de carga distribuída:

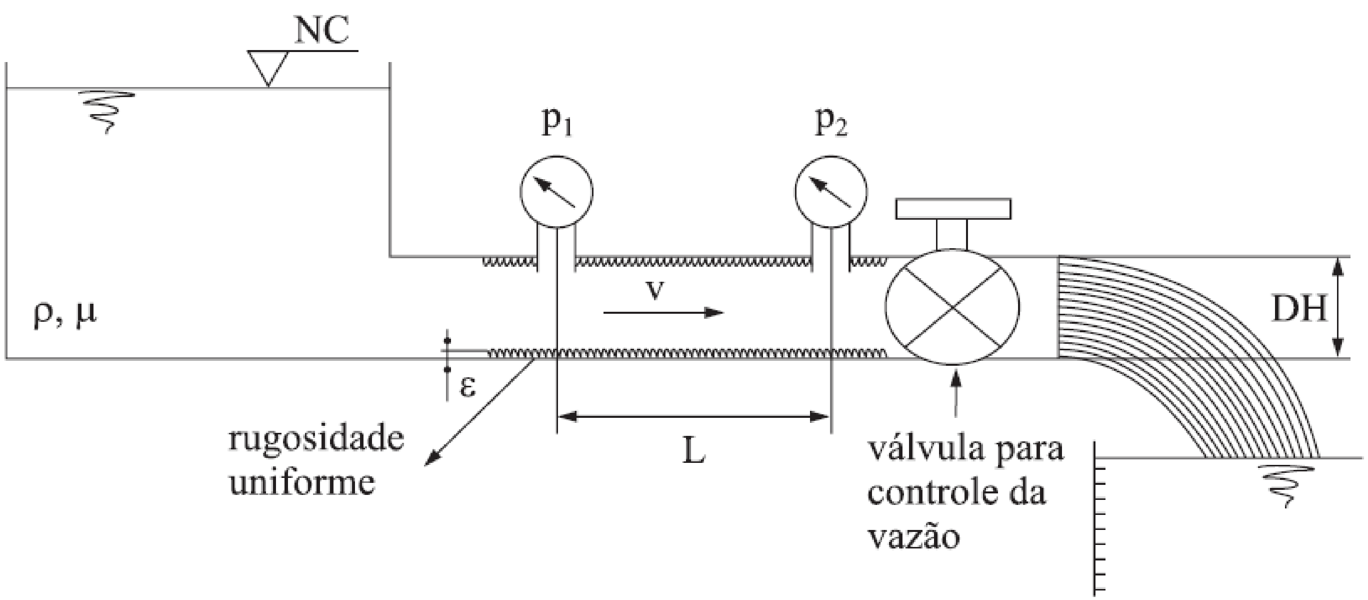
$$h_d = f \frac{L}{D_H} \frac{V^2}{2g} \qquad \text{(\textbf{Equação de Darcy-Weisbach})}$$

onde D é o diâmetro do conduto, L o comprimento do conduto, V é a velocidade média, g é a gravidade e *f* é o coeficiente de perda de carga distribuída.

Experiência de Nikuradse

Nikuradse realizou uma experiência em procurou determinar a função. Dentro do conduto colocou areia de granulosidade uniforme

$$f = f\left(\mathrm{Re}, \frac{D_H}{\varepsilon}\right) \qquad \varepsilon = e = K$$



Pela equação da energia:

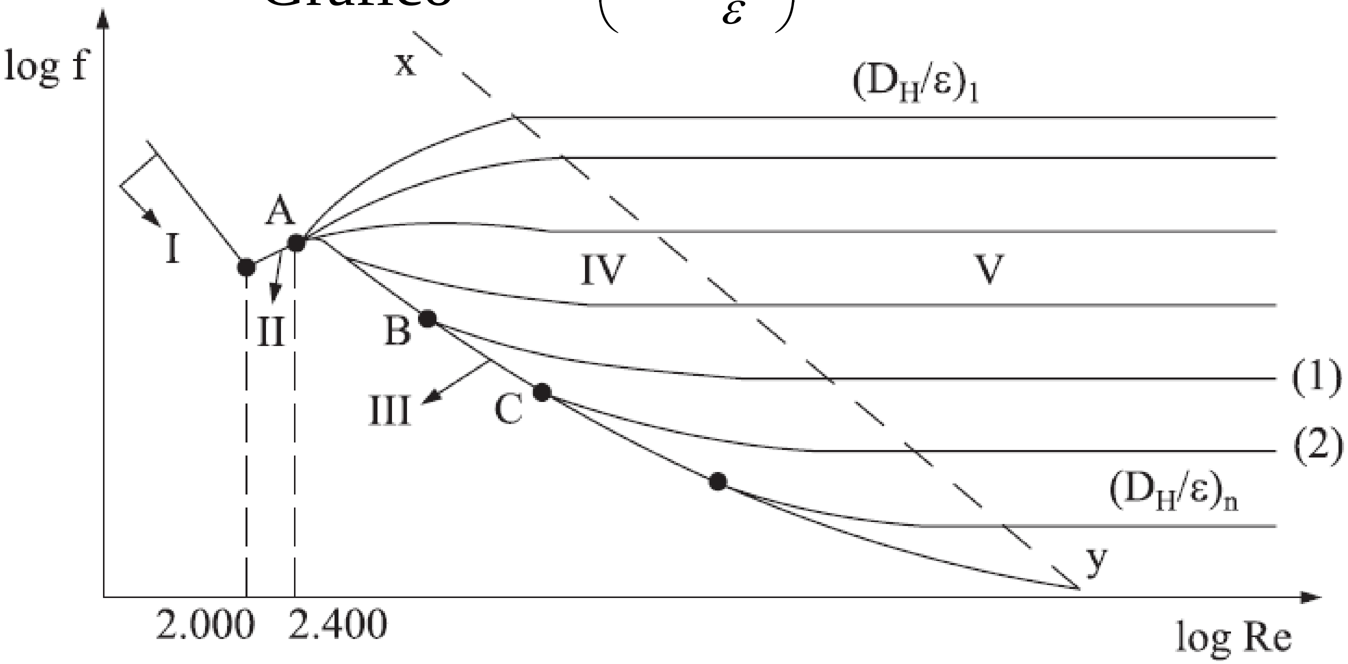
$$h_f = \frac{\left(p_1 - p_2\right)}{\gamma}$$

Logo fixado o D_H/e , obteve uma tabela de f em função de $Re = \rho V D_H/\mu$. Efetuou várias experiências para diversos D_H/e , construíu um gráfico,

$$f = f\left(\mathrm{Re}, \frac{D_H}{\varepsilon}\right) \quad \varepsilon = e = K$$

Com diversas regiões características

Gráfico $f = f\left(\text{Re}, \frac{D_H}{\varepsilon}\right)$ $\varepsilon = e = K$



(I) Re < 2.000, f é função do Re. Regime Laminar. F = 64/Re .

(II) 2.000 < Re < 2.400, Transição laminar para turbulento.

(III) D_H/e é decrescente até um certo número de Re. "Regime hidraulicamente liso" (o filme laminar cobre a aspereza).

(IV) Região de transição da região hidraulicamente liso para rugoso. F começa depender de Re e D_H/e .

(V) Região hidraulicamente rugoso e f não depende mais de Re.

PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

Para escoamento laminar, ***f* independe da rugosidade relativa** ε/D, sendo possível obter uma expressão analítica para *f* na forma:

$$f_{laminar} = \frac{64}{\mathrm{Re}}$$

Para escoamento turbulento, *f* é obtido por via experimental, tendo por base a seguinte função envolvendo os adimensionais número de Reynolds (Re) e rugosidade relativa (D_H/ε):

PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

$$f_{turbulento} = \phi\left(\mathrm{Re}, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

As primeiras tentativas experimentais para a determinação da forma da função ϕ, foram realizadas a partir dos anos 1930, utilizando grãos de areia de tamanhos conhecidos colados nas superfícies internas de tubos lisos (Nikuradse).

PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

Para regime turbulento (**fórmula de Blasius**):

$$f_{turbulento} = \frac{0{,}316}{\mathrm{Re}^{0{,}25}}$$

Fórmula de Blasius $\Rightarrow$ relação empírica válida para Re até 10^5 e tubos lisos.

PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

Colebrook em 1939 combinando os dados disponíveis para o escoamento de transição e turbulento, em **tubos lisos e rugosos industriais**, chegou à seguinte relação implícita para a determinação de *f* e que ficou conhecida como a fórmula de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2{,}0\log\left(\frac{\varepsilon / D}{3{,}7} + \frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right)$$

Com o logaritmo tomado na base 10.

PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

A fórmula de Colebrook em 1939 também pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0{,}86 \times \ln\left(\frac{\varepsilon / D}{3{,}7} + \frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right)$$

Essa equação é válida para tubos rugosos e novos.

PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

A fórmula de Colebrook requer, em geral, processo de cálculo iterativo para a determinação de *f*. Muita embora, a convergência desse processo ocorra, normalmente, em até duas, no máximo até três iterações, pode-se evitar esse trabalho utilizando uma fórmula explícita em relação a *f* que tem sido recomendada:

$$f = \frac{0{,}25}{\left[\log\left(\frac{\varepsilon / D}{3{,}7} + \frac{5{,}74}{\mathrm{Re}^{0{,}9}}\right)\right]^2} \qquad f = \frac{1{,}325}{\left[\ln\left(\frac{\varepsilon / D}{3{,}7} + \frac{5{,}74}{\mathrm{Re}^{0{,}9}}\right)\right]^2}$$

$10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$ e $5 \times 10^3 \leq \mathrm{Re} \leq 10^8$

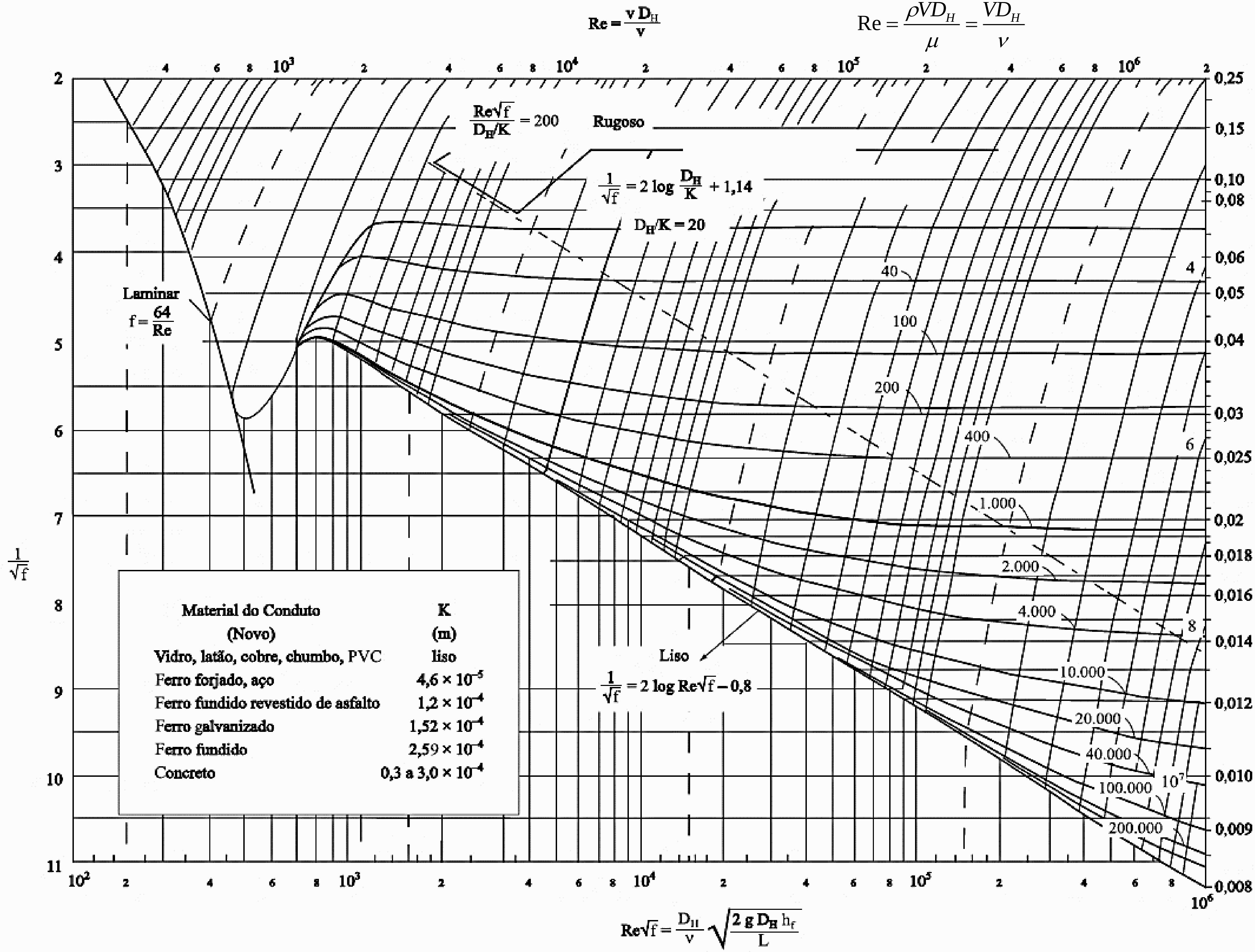
PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

Rouse criou um gráfico para a determinação de *f*, incluindo o regime laminar, aplicável às rugosidades de **tubos comerciais**. Moody e posteriormente Rouse, construíram o notório diagrama de Moody-Rouse, o qual está na figura a seguir.

O diagrama de Moody-Rouse fornece valores de *f* com uma incerteza de até 15% dos dados experimentais.

Observa-se que o diagrama de Moody-Rouse é subdividido em regiões onde o escoamento apresenta características peculiares igual o de Nikuradse.

$$Re = \frac{\rho V D_H}{\mu} = \frac{V D_H}{\nu}$$



f

Exercício1: Determinar a perda de carga por Km de comprimento de uma tubulação de aço de seção circular de diâmetro 45 cm. O fluído é óleo ($v = 1,06 \times 10^{-5}$ m^2/s) e a vazão é 190 L/s.

Solução

Pelo fato de a tubulação ser de aço, no canto esquerdo da Figura 7.16 encontra-se $k = 0{,}000046$ m ou $k = 4{,}6 \times 10^{-5}$ m.

Sendo de seção circular, $D = D_H = 0{,}45$ m.

Note-se que:

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

Seja $g = 10\ m/s^2$; são conhecidos L e D_H; não se tem nem v nem f. O f é função da velocidade, pois depende do Re. Deve-se, então, calcular v.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \times 190 \times 10^{-3}}{\pi \times 0{,}45^2} = 1{,}19\ m/s$$

Determinação de f

$$f = f\left(Re, \frac{D_H}{k}\right)$$

$$Re = \frac{vD_H}{\nu} = \frac{1{,}19 \times 0{,}45}{1{,}06 \times 10^{-5}} \cong 5 \times 10^4$$

$$\frac{D_H}{k} = \frac{0{,}45}{4{,}6 \times 10^{-5}} \cong 10^4 = 10.000$$

A função f deverá então ser calculada no ponto

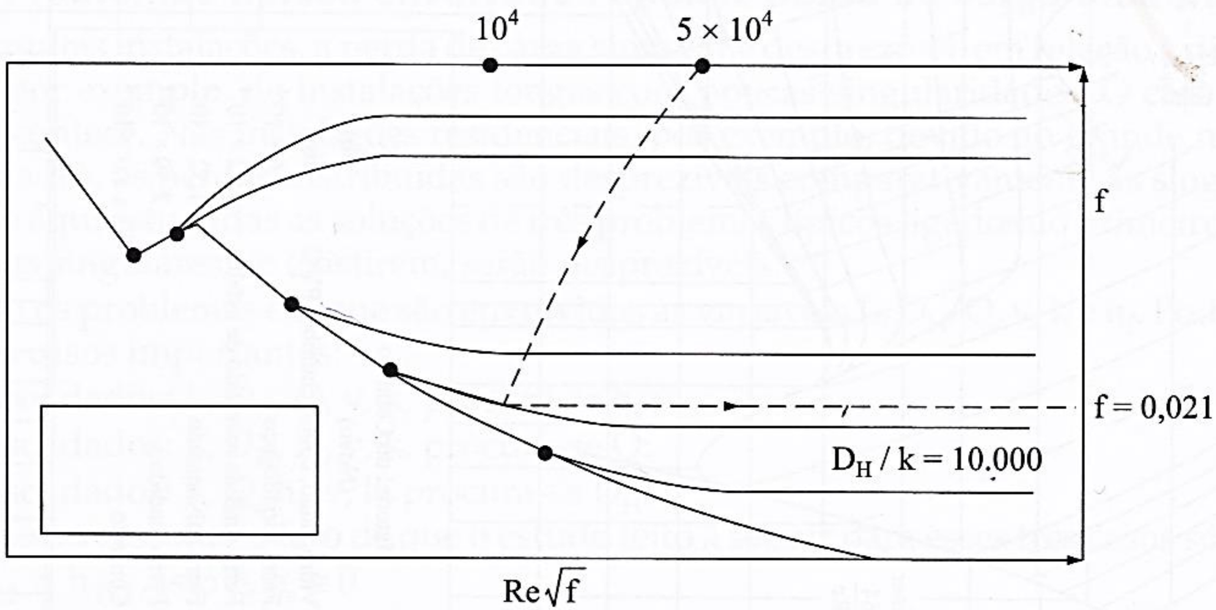
$$f = f(5\times 10^4; 10.000)$$

No diagrama de Moody-Rouse (Figura 7.16) deve-se fazer a determinação do f, conforme a ilustração a seguir. (Note-se que as linhas de chamada, para os Re, são curvas.)

Logo, pelo esquema, f = 0,021.

$$h_f = f \frac{L}{D_H} \frac{v^2}{2g} = 0{,}021\ \frac{1.000}{0{,}45} \times \frac{1{,}19^2}{2\times 10} = 3{,}3\ \text{m}$$

A perda de carga, a cada 1.000 m = 1 km de tubulação, será de 3,3 m.



CÁLCULO DA PERDA DE CARGA LOCALIZADA EM DUTO FORÇADO

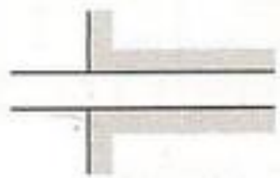
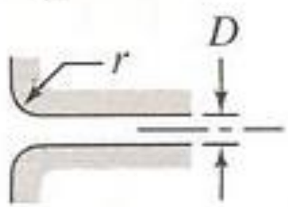
PERDA DE CARGA LOCALIZADA

A perda de carga localizada h_l em duto forçado é calculada por meio de:

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

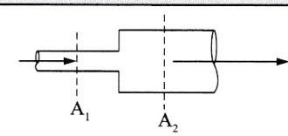
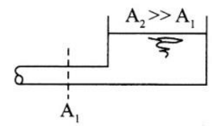
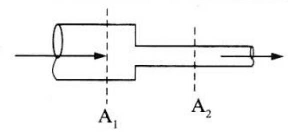
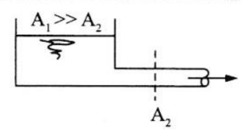
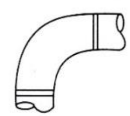
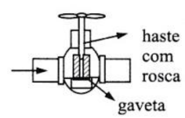
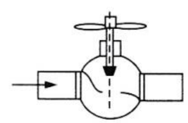
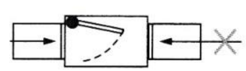
Onde K é o coeficiente de perda de carga localizada (ou singular).

PERDA DE CARGA LOCALIZADA

<table>
<tr><th>Tipo de Entrada</th><th></th><th>Coeficiente de Perda Localizada, K^a</th></tr>
<tr><td>Reentrante →</td><td></td><td>0,78</td></tr>
<tr><td>Borda viva →</td><td></td><td>0,5</td></tr>
<tr><td>Arredondado →</td><td>
</td><td><table><tr><td>r/D</td><td>0,02</td><td>0,06</td><td>$\geq$ 0,15</td></tr><tr><td>K</td><td>0,28</td><td>0,15</td><td>0,04</td></tr></table></td></tr>
</table>

[a] Baseado em $h_{l_m} = K(\bar{V}^2/2)$, onde $\bar{V}$ é a velocidade média no tubo.

PERDA DE CARGA LOCALIZADA

Singularidade	Esquema	k_S
Alargamento		$(1 - A_1/A_2)$ (no caso, $v = v_1$)
Caso limite		1
Estreitamento		$\phi\,(A_1/A_2)$
Caso limite		0,5
Cotovelo a 90°		0,9
Válvula de gaveta		Totalmente aberta 0,2
Válvula tipo globo		Totalmente aberta 10
Válvula de retenção		0,5

Outro método para a perda de carga singulares é dos "comprimentos equivalentes"

Comprimento equivalente de uma singularidade é o comprimento fictício de uma tubulação de seção constante e mesmo diâmetro, que produzirá uma perda distribuída igual à perda singular da singularidade.

Iguala-se as duas equações e determina o comprimento equivalente referente a singularidade.

$$f\,\frac{L_{eq}}{D_H}\,\frac{\mathrm{v}^2}{2g} = K_s\,\frac{\mathrm{v}^2}{2g}$$

$$L_{eq} = \frac{K_s D_H}{f}$$

Na prática os comprimentos equivalente são tabelados

Ref. Azevedo Netto

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

Diâmetro *D* mm	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

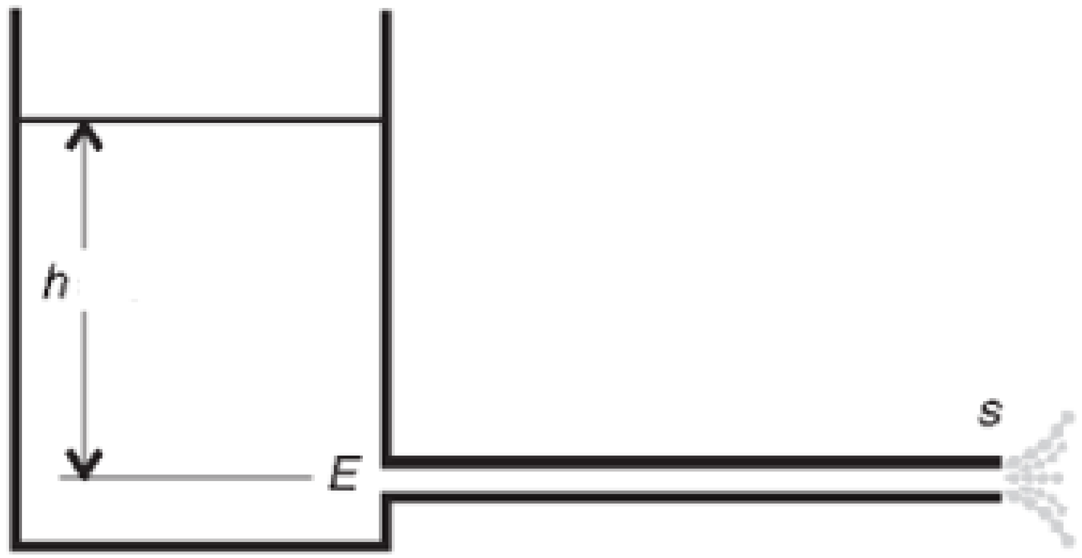
* Os valores indicados para válvulas de globo aplicam-se também às torneiras, válvulas para chuveiros e válvulas de descarga

EXERCÍCIOS - PERDAS DE CARGAS

EXERCÍCIO 1 - Determinar a perda de carga distribuída para o escoamento de 140 L/s de óleo ($\nu = 1x10^{-5}$ m^2/s), num tubo de ferro fundido de 400 m de comprimento e 200 mm de diâmetro.

Dado: ε = 0,25 mm

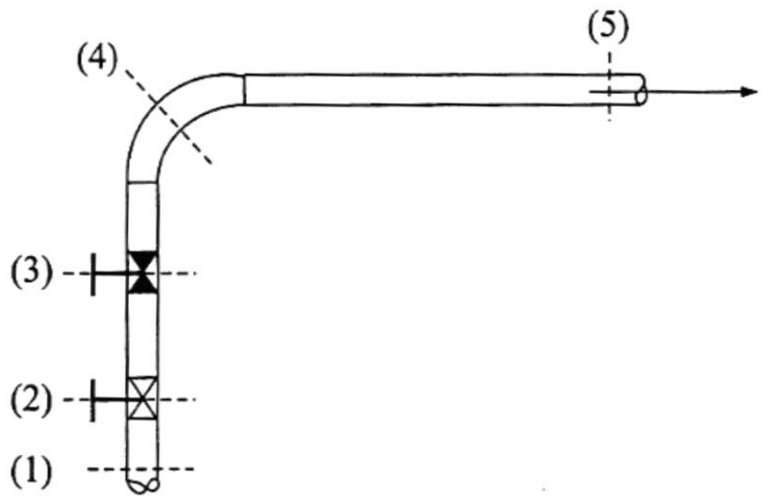
EXERCÍCIO 2 - Uma tubulação horizontal de aço comercial de comprimento 90,0 m, diâmetro 7,5 cm e rugosidade 0,046 mm, transporta água de um grande reservatório aberto, descarregando para a atmosfera. A entrada do duto é de cantos vivos a 90º (K = 0,5). Determine a altura de líquido, acima da linha central do duto, em metros, que deve ser mantida no reservatório para que a vazão volumétrica de descarga de água seja 8,0 L/s.



Exercício 3: Calcule o diâmetro de um tubo de aço que deverá transportar uma vazão de 19 L/s de querosene ($\nu = 3{,}0 \times 10^{-6}$ m^2/s) a uma distância de 600 m, com uma perda de carga de 3 m. (Solução por tentativa e erro).

No trecho (1)-(5) de uma instalação existem: uma válvula de gaveta (2), uma válvula tipo globo (3) e um cotovelo (4). Sendo a tubulação de aço de diâmetro = 2" (5 cm), determinar a perda de carga entre (1) e (5), sabendo que a vazão é 2 L/s e que o comprimento da tubulação entre (1) e (5) é 30 m ($\nu = 10^{-6}$ m^2/s)

Solução



O comprimento das singularidades é desprezado e supõe-se que a perda de carga distribuída seja devida a 30 m de tubulação. Note-se que esse fato será observado em todos os problemas deste capítulo.

$$H_{p_{1,5}} = h_{f_{1,5}} + h_{s_2} + h_{s_3} + h_{s_4}$$

Da tabela de um fabricante tem-se:

Válvula de gaveta (2") $\rightarrow L_{eq_2} = 0{,}335$ m

Válvula tipo globo (2") $\rightarrow L_{eq_3} = 17{,}61$ m

Cotovelo (2") $\rightarrow L_{eq_4} = 3{,}01$ m

Solução:

Considerando que tudo se passa como se tivesse um comprimento característico:

$$L = L_{real} + L_{(eq2)} + L_{(eq3)} + L_{(eq4)}$$

$$L = 30 + 0{,}335 + 17{,}61 + 3{,}01 \cong 51 \text{ m}$$

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

$$L = 30 + 0{,}335 + 17{,}61 + 3{,}01 \cong 51 \text{ m}$$

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

A velocidade será:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \times 2 \times 10^{-3}}{\pi \times (5 \times 10^{-2})^2} \cong 1 \text{ m/s}$$

Logo:

$$Re = \frac{vD_H}{\nu} = \frac{1 \times 5 \times 10^{-2}}{10^{-6}} = 5 \times 10^4$$

Para aço:

$$k = 4{,}6 \times 10^{-5} \text{m}$$

Logo:

$$\frac{D_H}{k} = \frac{5 \times 10^{-2}}{4{,}6 \times 10^{-5}} = 1.090$$

Com $Re = 5 \times 10^4$ e $\frac{D_H}{k} = 1.090$, do diagrama de Moody-Rouse tem-se f = 0,025.

Logo:

$$h_{f_{1,5}} = 0{,}025 \times \frac{51}{5 \times 10^{-2}} \times \frac{1^2}{2 \times 10} = 1{,}28 \text{ m}$$

ou

$$H_{P1,2} = 1{,}28 \text{ m}$$