



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



ENGENHARIA FÍSICA

Fenômenos de Transporte - A

Prof. Dr. Sérgio R. Montoro

sergio.montoro@usp.br

srmontoro@dequi.eel.usp.br



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



AULA 8

ESCOAMENTO PERMANENTE DE FLUIDO INCOMPRESSÍVEL EM CONDUTOS FORÇADOS



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



DEFINIÇÕES



DEFINIÇÕES

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

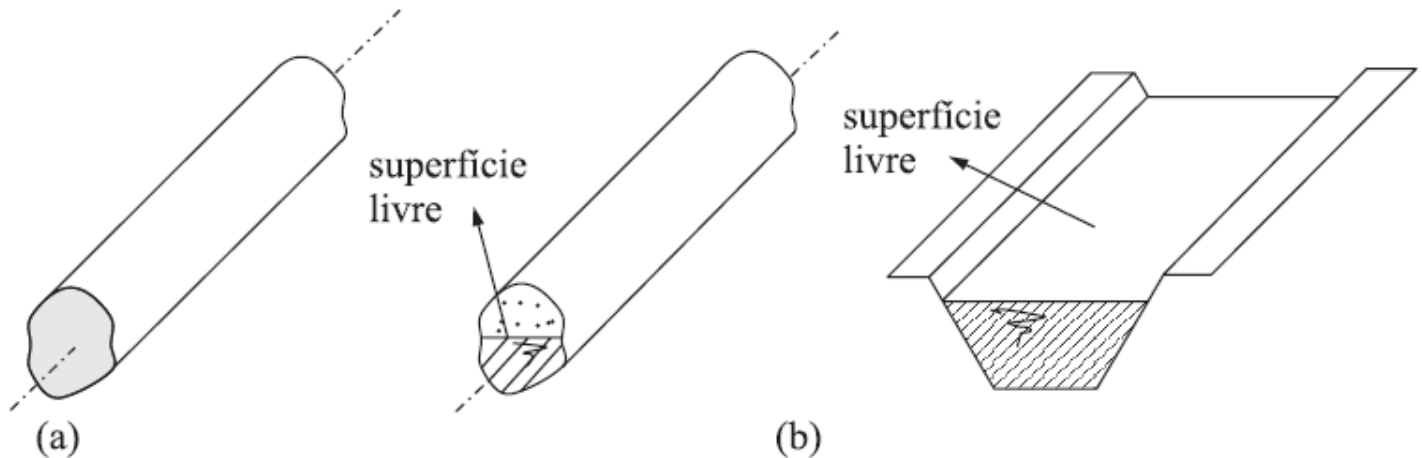
1. Conduitos – Classificação

Conduto é qualquer estrutura sólida, destinada ao transporte de fluidos. Os conduitos 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 escoar 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).





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:


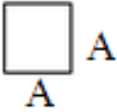
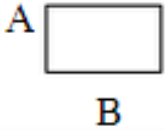
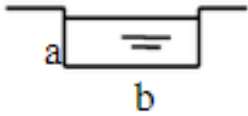
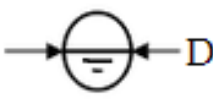
$$D_H = 4R_H$$

A tabela a seguir apresenta alguns exemplos:



DEFINIÇÕES

2. Raio e diâmetro hidráulico

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



DEFINIÇÕES

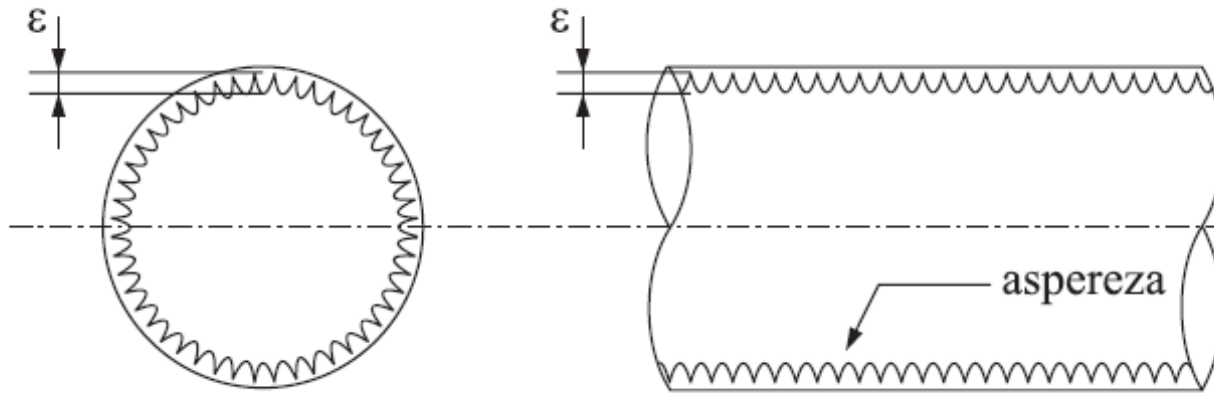
3. Rugosidade

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

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 escoar).

O primeiro tipo é “**perda de carga distribuída**”, que será indicada por 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 longo deles.

O segundo tipo corresponde às chamadas “**perdas de carga locais ou singulares**”, que serão indicadas por 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

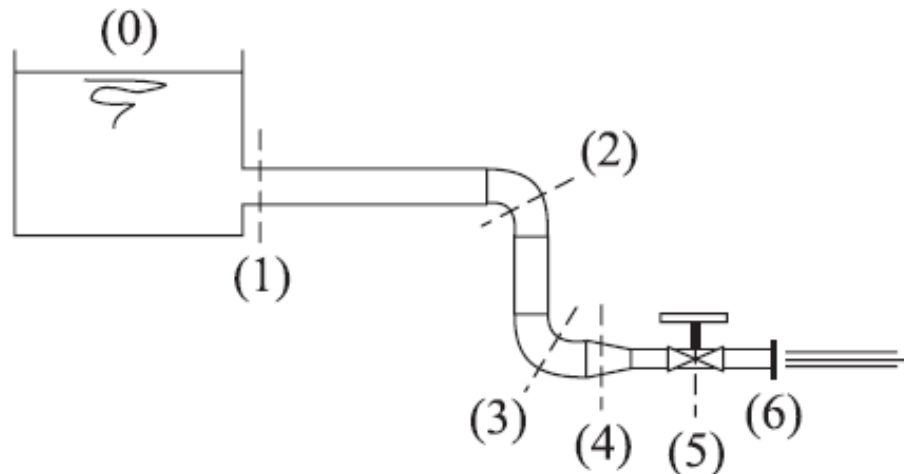
Essas perdas podem, diferentemente das anteriores, ser grandes em trechos relativamente curtos da instalação, como, por exemplo, em válvulas, mudanças de direção, alargamentos bruscos, obstruções parciais, etc.

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.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



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:

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

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.



PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

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

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

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 (ε/D):



PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

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

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.



PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

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

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

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, chegou à seguinte relação implícita para a determinação de f e que ficou conhecida como a fórmula de Colebrook:

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

Com o logaritmo tomado na base 10.



PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

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

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

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:

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

$$10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$$

e

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

$$5 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^8$$



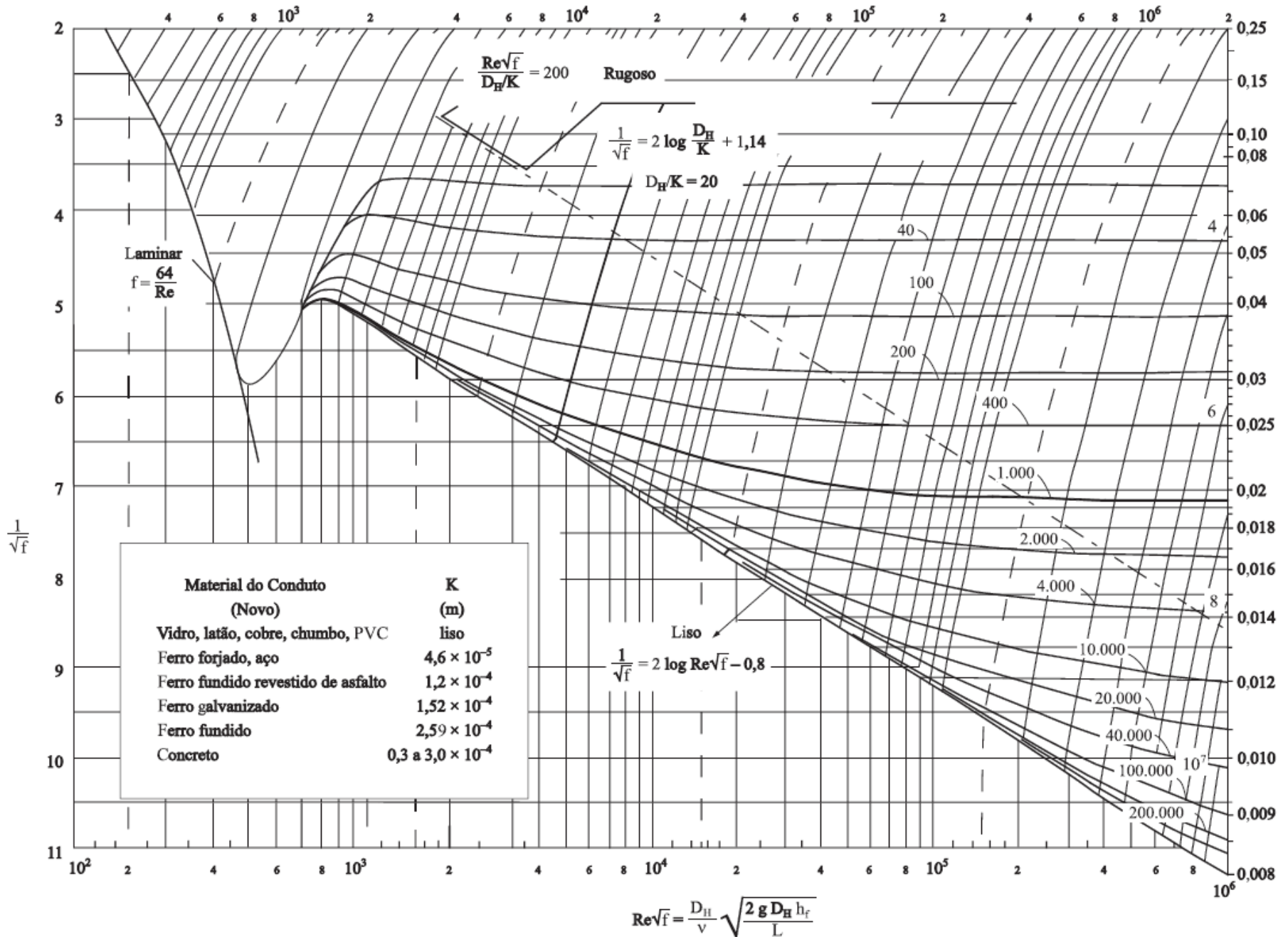
PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

Rouse criou um gráfico para a determinação de f , incluindo o regime laminar, aplicável às rugosidades de tubos comerciais. Moody reformulou o gráfico de Rouse, tendo gerado o notório diagrama de Moody-Rouse, o qual vem reproduzido 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.

$$Re = \frac{v D_H}{\nu}$$





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



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

Tipo de Entrada	Coeficiente de Perda Localizada, K^a								
Reentrante	0,78								
Borda viva	0,5								
Arredondado	<table border="1"><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>	r/D	0,02	0,06	$\geq 0,15$	K	0,28	0,15	0,04
r/D	0,02	0,06	$\geq 0,15$						
K	0,28	0,15	0,04						

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



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



EXERCÍCIOS - PERDAS DE CARGAS



EXERCÍCIO 1 - Determinar a perda de carga total para um escoamento de 250 L/s de óleo ($\nu = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), num tubo de ferro fundido de 1200 m de comprimento e 260 mm de diâmetro, que apresenta um canto vivo na entrada do tubo ($K = 0,5$) e duas válvulas globo totalmente abertas ($K = 10$).

Dado: $\varepsilon = 0,27 \text{ mm}$.

Adote $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

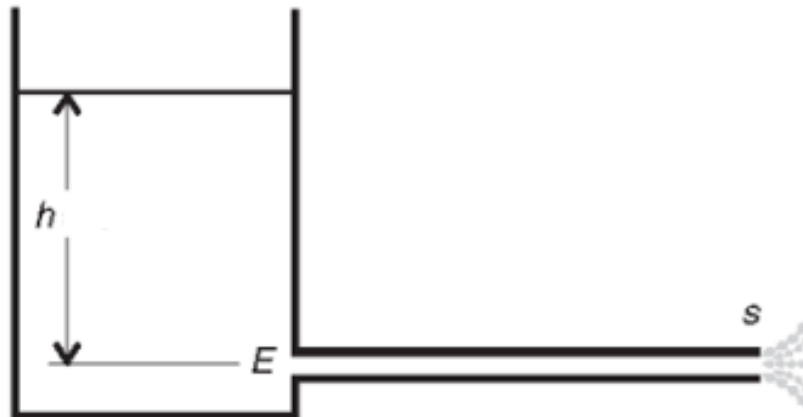


EXERCÍCIO 2 - Uma tubulação horizontal de aço comercial de comprimento 150,0 m, diâmetro 9,5 cm e rugosidade 0,048 mm, transporta água de um grande reservatório aberto, descarregando para a atmosfera. A entrada do duto é de cantos vivos a 90° ($K = 0,5$).

Determine:

A) 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 12,0 L/s.

Dados: $\mu = 1 \times 10^{-3}$ N.s/m²; $\rho = 1000$ kg/m³; $g = 9,81$ m/s².





B) 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 20,0 L/s, levando-se em conta uma válvula-globo completamente aberta ($K = 10$).

Dados: $\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$; $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$; $g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$.

