



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

# ENGENHARIA FÍSICA

## Fenômenos de Transporte A (Mecânica dos Fluidos)

Prof. Dr. Sérgio R. Montoro

[sergio.montoro@usp.br](mailto:sergio.montoro@usp.br)

[srmontoro@dequi.eel.usp.br](mailto:srmontoro@dequi.eel.usp.br)



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

# **MECÂNICA DOS FLUIDOS**

## **ENGENHARIA FÍSICA**

### **AULA 7**

**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.

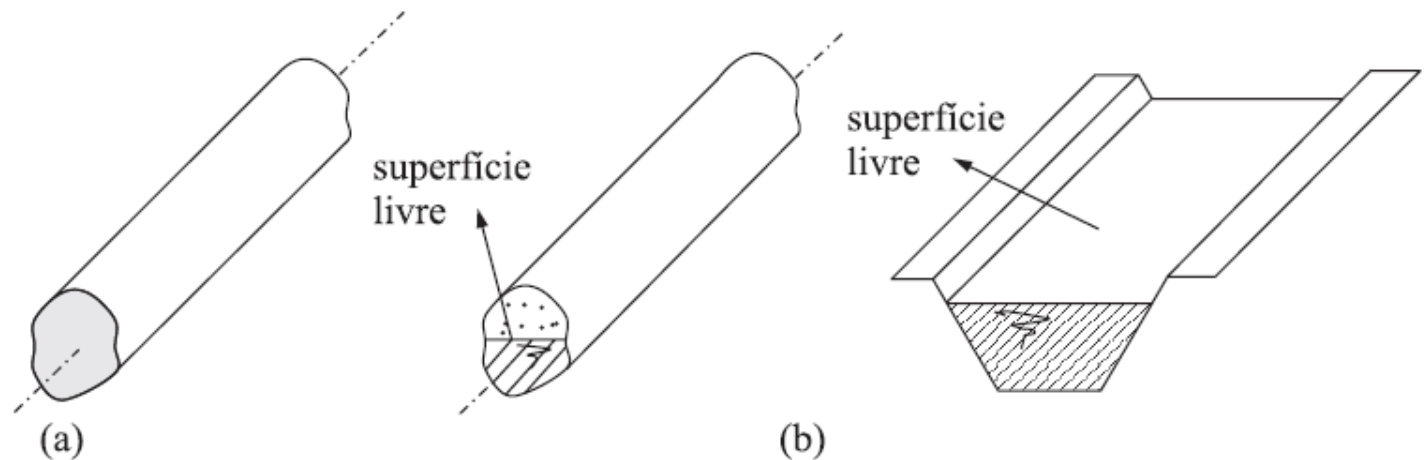
### **1. Condutos – Classificação**

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 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;

$\sigma$  = 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:

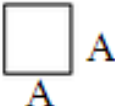
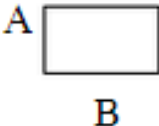
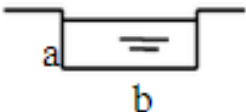
$$D_H = 4R_H$$

A tabela a seguir apresenta alguns exemplos:



## DEFINIÇÕES

### 2. Raio e diâmetro hidráulico

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



## DEFINIÇÕES

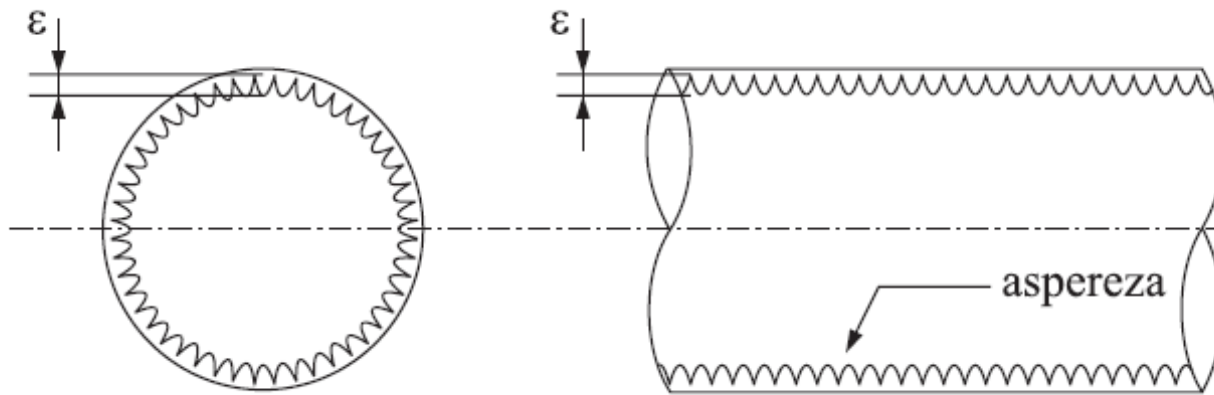
### 3. Rugosidade

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  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$ , mas do quociente  $D_H/\varepsilon$  que será chamado “rugosidade relativa”.



## **DEFINIÇÕES**

### **3. Rugosidade**

| <b>Material</b>                        | <b>Rugosidade equivalente<br/>(mm)</b> |   |      |
|----------------------------------------|----------------------------------------|---|------|
| 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**

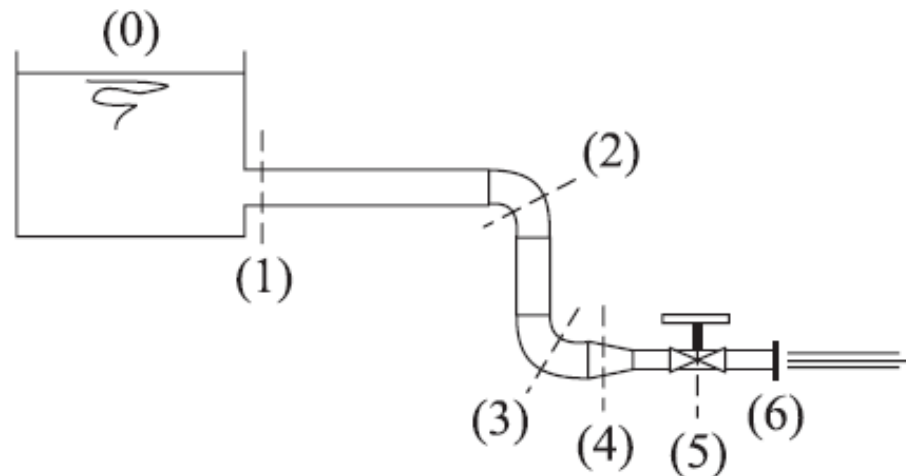
Essas perdas podem, diferentemente das anteriores, ser grandes em trechos relativamente curtos da instalação, como, por exemplo, em válvulas, mudanças de direção, alargamentos bruscos, obstruções parciais, etc.

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**



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Escola de Engenharia de Lorena – EEL**

## **PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA**

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

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

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.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

## PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

Para escoamento laminar,  $f$  independe da rugosidade relativa  $\varepsilon/D$ , 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 ( $\text{Re}$ ) e rugosidade relativa ( $\varepsilon/D$ ):



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

## 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  $\phi$ , foram realizadas a partir dos anos 1930, utilizando grãos de areia de tamanhos conhecidos colados nas superfícies internas de tubos lisos.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

## 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.



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Escola de Engenharia de Lorena – EEL**

## **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.



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Escola de Engenharia de Lorena – EEL**

## **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:

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

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

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

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



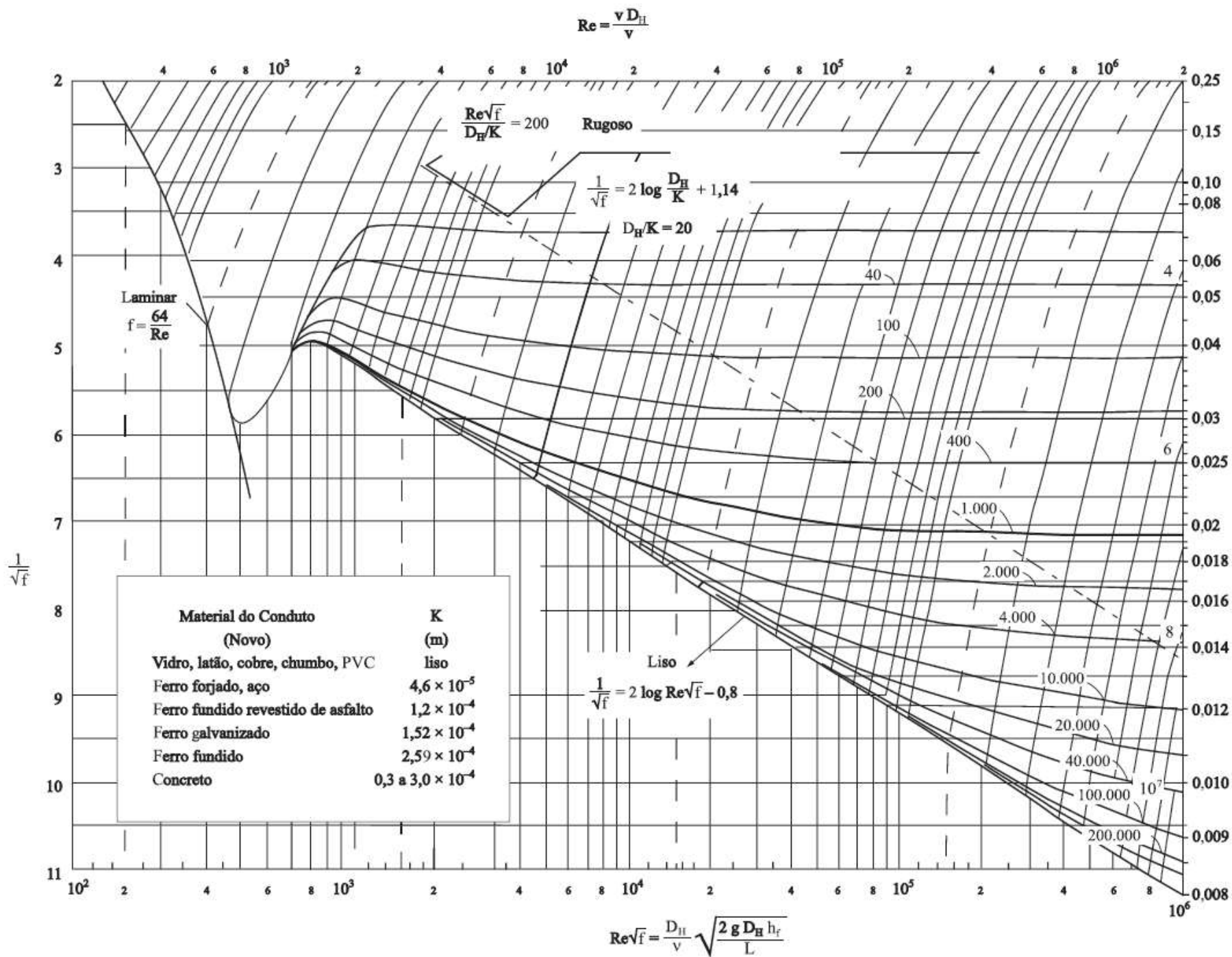
**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Escola de Engenharia de Lorena – EEL**

## **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.





**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Escola de Engenharia de Lorena – EEL**

# **CÁLCULO DA PERDA DE CARGA LOCALIZADA EM DUTO FORÇADO**



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Escola de Engenharia de Lorena – EEL**

## **PERDA DE CARGA LOCALIZADA**

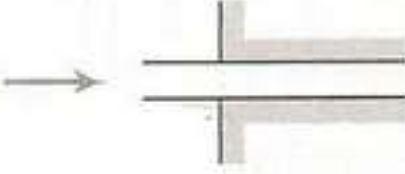
A perda de carga localizada  $h_L$  em duto forçado é calculada por meio de:

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

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     |  | $r/D$                                  | 0,02 | 0,06 | $\geq 0,15$ |
|                 |                                                                                     | $K$                                    | 0,28 | 0,15 | 0,04        |

<sup>a</sup> Baseado em  $h_{l_e} = K(\bar{V}^2/2)$ , 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  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$



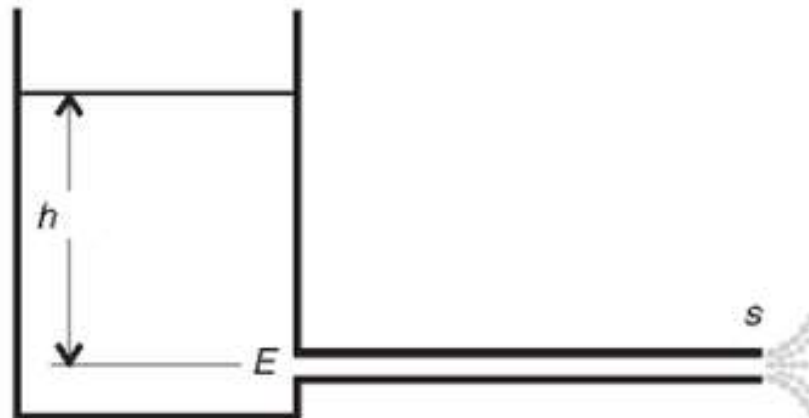
**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Escola de Engenharia de Lorena – EEL**

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





**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Escola de Engenharia de Lorena – EEL**

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

