

Laboratório de Engenharia Química I

Aula Prática 04

**Estudo da influência da perda de carga
e da rugosidade do tubo no escoamento
forçado de líquidos**

Prof. Dr. Gilberto Garcia Cortez

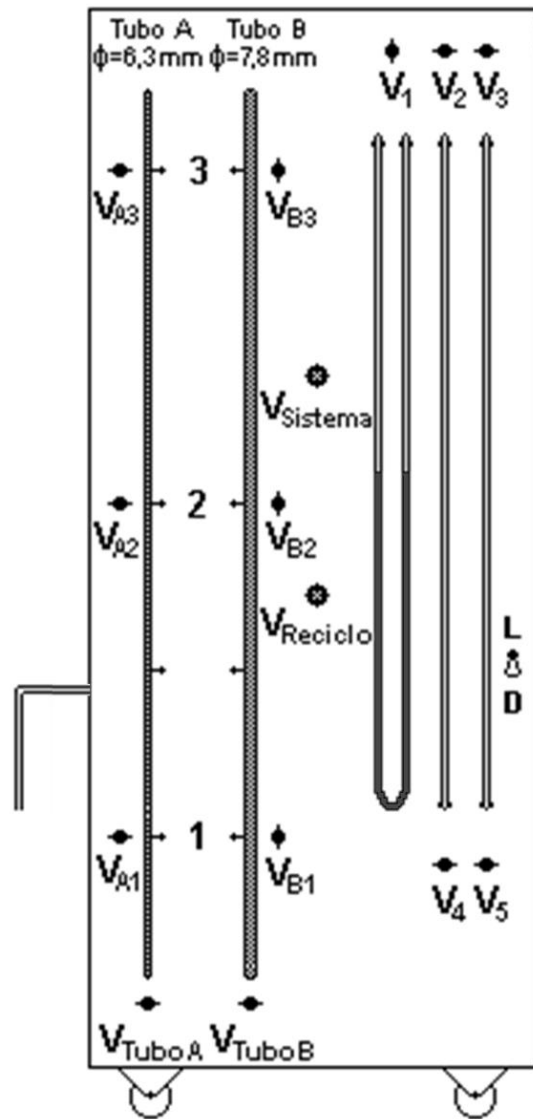
Introdução

Esta experiência visa aplicação da equação de conservação de energia e conservação da massa para escoamento forçado em dutos de formato cilíndrico e a utilização de manômetro diferencial na tomada de medidas de pressão para a estimativa da perda de carga distribuída e da rugosidade da parede interna dos dutos.

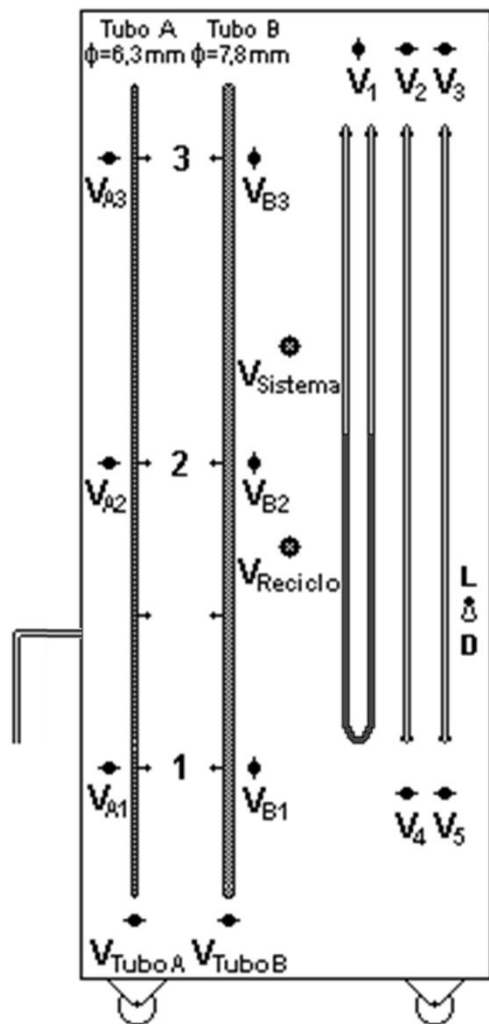
Objetivos:

- Determinar o fator de atrito de Darcy em diferentes tubos de latão;**
- Obter a rugosidade no tubo de latão com diferentes diâmetros.**
- Comparar o resultado da rugosidade teórica com o valor experimental.**

Arranjo físico



Procedimento Experimental



Passo 1: Pesar o balde vazio e anotar a massa;

Passo 2: Ligar a bomba centrífuga;

Passo 3: Abrir as válvulas referentes aos pontos onde ocorrerá a medição da diferença de pressão;

Passo 4: Regular a diferença de pressão até atingir o ponto desejado, manipulando as válvulas de entrada do fluido e reciclo;

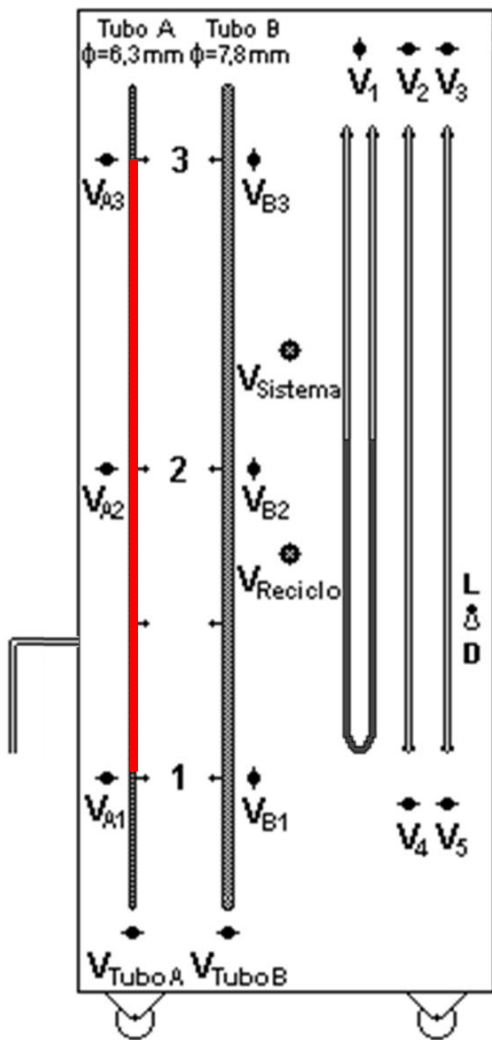
Passo 5: Na parte de trás do equipamento, há duas válvulas de esfera, que são acionadas por um mesmo mecanismo, e que direciona o fluxo de água. Redirecione o fluxo da água para fora do equipamento, cronometrando o tempo de enchimento do balde;

Passo 6: Pesar a massa de água recolhida pelo balde e calcular a vazão mássica de água ($\dot{m}$);

Passo 7: Retornar a água para dentro do tanque;

Passo 8: Retorna-se ao passo 3, até o término do número de pontos a serem mensurados nos dois tubos.

Cálculos



TUBO A (L = 1,22 m , D = 7,8 mm) – Pontos 1 – 3					
	1	2	3	4	5
P ₁ (cm)	75	73	71	69	67
P ₂ (cm)	49	51	53	55	57
M (kg)					
T (s)					
$\dot{m}$ (kg/s)					

$$\Delta P = (\gamma_{\text{Hg}} - \gamma_{\text{água}}) h$$

$$\dot{m} = \frac{M_{(\text{balde} + \text{água})} - M_{(\text{balde})}}{\Delta t}$$

$$\bar{v} = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{4\dot{m}}{\rho \pi D^2}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu}$$

Avaliar também 2, 3, 4 e 5

Equação da energia mecânica

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{\bar{V}_1^2}{2} + z_1 g \right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{\bar{V}_2^2}{2} + z_2 g \right) = h_\ell + h_{\ell m}$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2, z_1 = z_2, h_{\ell m} = 0$$



$$h_\ell = \frac{\Delta P}{\rho}$$

**Perda de carga
distribuída**

$$h_\ell = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2}$$



$$f = \frac{2Dh_\ell}{L\bar{V}^2}$$

$$\bar{V} = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{4\dot{m}}{\rho \pi D^2}$$



$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu}$$

Equação de Colebrook

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

ε / D = Rugosidade relativa do tubo de cobre

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

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

$$\varepsilon / D = 3,7 \left[e^{-\frac{1}{0,86\sqrt{f}}} - \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right]$$

Rugosidade relativa da tubulação

$$\varepsilon = 3,7D \left[e^{-\frac{1}{0,86\sqrt{f}}} - \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right]$$

Rugosidade da tubulação (m)

Cálculo do fator de atrito:

A obtenção do cálculo do fator de atrito dependerá do tipo de escoamento do fluido.

Regime Laminar:

$$f = \frac{64}{Re}$$

$$Re \leq 2300$$

Regime não laminar:

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

$$Re > 2300$$

(Colebrook)

Equações com o fator de atrito implícito

As equações empíricas a seguir representam o diagrama de Moody para $Re > 4000$

Escoamento em tubo liso ($\varepsilon = 0$):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0,86 \ln Re \sqrt{f} - 0,8$$

Zona completamente turbulenta ($Re = \infty$):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,86 \ln \left(\frac{\varepsilon / D}{3,7} \right)$$

Zona de transição ($Re > 2300$):

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

Equações com o fator de atrito explícito

Equação de N. H. Chen (1979) para R_e turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left[\frac{\varepsilon/d}{3,7065} - \left(\frac{5,0452}{Re}\right)\log_{10}\left(\left(\frac{\varepsilon/d}{2,5497}\right)^{1,1098} + \left(\frac{7,149}{Re}\right)^{0,8981}\right)\right]$$

$$f = \left\{ -2\log_{10}\left[\frac{\varepsilon/d}{3,7065} - \left(\frac{5,0452}{Re}\right)\log_{10}\left(\left(\frac{\varepsilon/d}{2,5497}\right)^{1,1098} + \left(\frac{7,149}{Re}\right)^{0,8981}\right)\right] \right\}^{-2}$$

Equação de D. I. H. Barr (1975) para R_e turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left[\frac{\varepsilon/d}{3,7} - \left(\frac{5,02}{Re}\right)\log_{10}\left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} + \frac{5}{Re^{0,89}}\right)\right]$$

$$f = \left\{ -2\log_{10}\left[\frac{\varepsilon/d}{3,7} - \left(\frac{5,02}{Re}\right)\log_{10}\left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} + \frac{5}{Re^{0,89}}\right)\right] \right\}^{-2}$$

TUBO A (L = 1,22 m , D = 7,8 mm) – Pontos 1 – 3									
	1		2		3		4		5
P_{maior} (cm)	75		73		71		69		67
P_{menor} (cm)	49		51		53		55		57
M (kg)									
T (s)									
$\dot{m}$ (kg/s)									

TUBO A (L = 0,61 m , D = 7,8 mm) – Pontos 2 – 3									
	1		2		3		4		5
P_{maior} (cm)	68		67		66		65		64
P_{menor} (cm)	55		56		57		58		59
M (kg)									
T (s)									
$\dot{m}$ (kg/s)									

TUBO B (L = 1,22 m , D = 6,3 mm) – Pontos 1 – 3									
	1		2		3		4		5
P_{maior} (cm)	73		72		70		65		60
P_{menor} (cm)	36		37		39		44		49
M (kg)									
T (s)									
$\dot{m}$ (kg/s)									

TUBO B (L = 0,61 m , D = 6,3 mm) – Pontos 2 – 3									
	1		2		3		4		5
P_{maior} (cm)	62		60		59		58		56
P_{menor} (cm)	47		49		50		51		53
M (kg)									
T (s)									
$\dot{m}$ (kg/s)									

Dados experimentais

		ΔP (N/m ²)	$h\ell$ (m ² /s ²)	$\dot{m}$ (kg/s)	V (m/s)	f	Re	ε / D	ε (m)
Tubo A Pontos 1 - 3	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

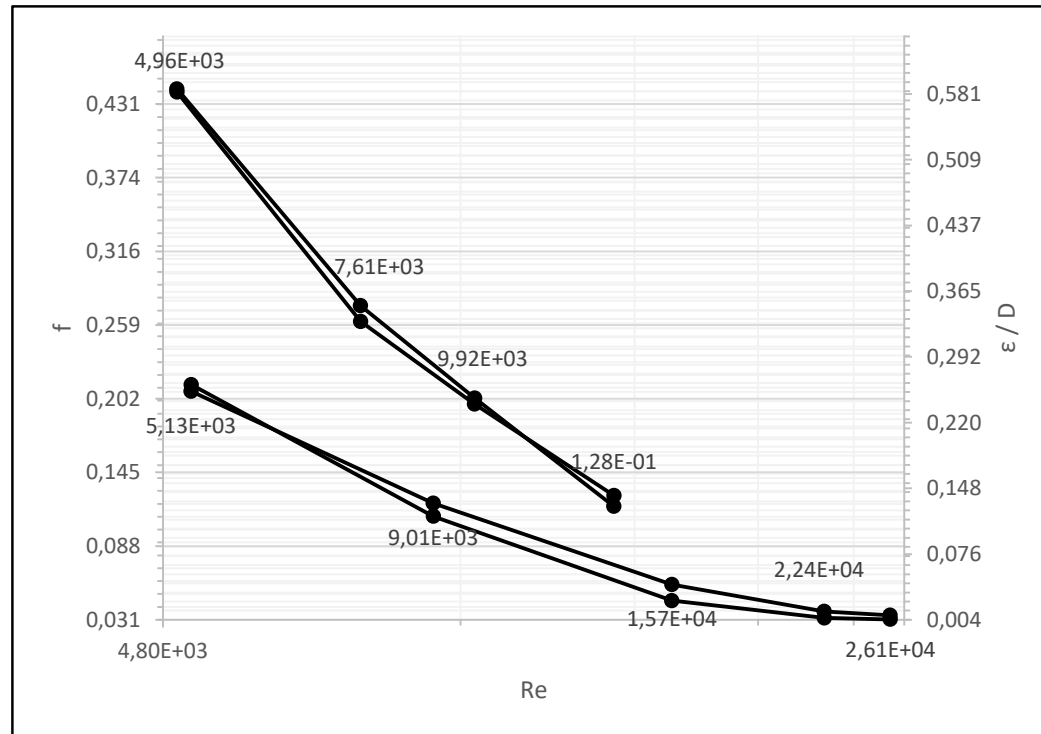
		ΔP (N/m ²)	$h\ell$ (m ² /s ²)	$\dot{m}$ (kg/s)	V (m/s)	f	Re	ε / D	ε (m)
Tubo A Pontos 2 - 3	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

		ΔP (N/m ²)	$h\ell$ (m ² /s ²)	$\dot{m}$ (kg/s)	V (m/s)	f	Re	ε / D	ε (m)
Tubo B Pontos 1 - 3	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

		ΔP (N/m ²)	$h\ell$ (m ² /s ²)	$\dot{m}$ (kg/s)	V (m/s)	f	Re	ε / D	ε (m)
Tubo B Pontos 2 - 3	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

Análise dos resultados

- Pesquisar na literatura o valor teórico da rugosidade (ϵ) para o tubo de latão e comparar com o valor experimental;
- Construir um gráfico que representa R_e versus f e ϵ / D (log versus log) para os tubos A e B.



- Discutir os resultados a partir do cálculo do Erro(%) com os valores experimentais e o teórico da rugosidade (ϵ) .

$$\text{Erro (\%)} = \left(\frac{\epsilon_{\text{exp}} - \epsilon_{\text{teórico}}}{\epsilon_{\text{teórico}}} \right) 100$$

d) Discutir os resultados a partir do cálculo do Erro(%) com os valores experimentais e teórico do fator de atrito (f) utilizando a equação para o cálculo do fator de atrito teórico (Barr, 1975) com o valor de ε (teórico):

$$f = \left\{ -2 \log_{10} \left[\frac{\varepsilon / d}{3,7} - \left(\frac{5,02}{\text{Re}} \right) \log_{10} \left(\frac{\varepsilon / d}{3,7} + \frac{5}{\text{Re}^{0,89}} \right) \right] \right\}^{-2} \quad (\text{teórico})$$

$$f = \frac{2Dh_{\ell}}{L\bar{V}^2} \quad (\text{experimental})$$

$$h_{\ell} = \frac{\Delta P}{\rho}$$

$$\text{Erro (\%)} = \left(\frac{f_{\text{exp}} - f_{\text{teórico}}}{f_{\text{teórico}}} \right) 100$$