



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

FENÔMENOS DE TRANSPORTE EXPERIMENTAL

Prof. Gerônimo Virgínio Tagliaferro

2019



FENÔMENOS DE TRANSPORTE EXPERIMENTAL

EMENTA:

- ✓ **Experimento 1:** Estudo do tempo de escoamento de líquidos em função da altura, para recipiente cilíndricos.
- ✓ **Experimento 2:** Determinação da variação da temperatura com o tempo, no centro de diferentes formas sólidas imersas em fluido a temperatura fixa.
- ✓ **Experimento 3:** Estudo da influência da perda de carga e da rugosidade do tubo no escoamento forçado de líquidos.



FENÔMENOS DE TRANSPORTE EXPERIMENTAL

AVALIAÇÃO:

P1 = Prova Teórica

MR = Média dos Relatórios Experimentais (3 experimentos)

$$\text{MÉDIA, MF} = \frac{(2 * P1) + MR}{3}$$

CRITÉRIO: Aprovação: $MF \geq 5,0$

Reprovação: $MF < 3,0$

Recuperação: $3,0 \leq MF < 5,0$

Nota Final: $NF = (MF + PR)/2$ onde: PR = prova de recuperação.

Aprovação: $NF \geq 5,0$ Reprovação: $NF < 5,0$



ESQUEMA DO RELATÓRIO CIENTÍFICO

Entrega do relatório: 14 dias após a realização do experimento

- Capa: Título do Experimento e identificação do grupo e dos integrantes (nome e número de matrícula)
- Sumário (resumo)
- Introdução
- Material e Métodos
- Resultados e Discussão
- Conclusão
- Referências Bibliográficas



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

EXPERIMENTO 1

**ESTUDO DO TEMPO DE ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS EM
FUNÇÃO DA ALTURA, PARA RECIPIENTE CILÍNDRICOS**



EXPERIMENTO 1: ESTUDO DO TEMPO DE ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS EM FUNÇÃO DA ALTURA, PARA RECIPIENTE CILÍNDRICOS

INTRODUÇÃO

A experiência consiste em analisar através de dutos a vazão de água de um recipiente cilíndrico e também as aplicações das equações de conservação de energia e conservação da massa para escoamento em recipiente de formato cilíndrico com duto de saída também cilíndrico.

Tem por objetivo também mostrar a importância da formulação teórica para a comparação com as medidas experimentais.



EXPERIMENTO 1: ESTUDO DO TEMPO DE ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS EM FUNÇÃO DA ALTURA, PARA RECIPIENTE CILÍNDRICOS

ARRANJO FÍSICO

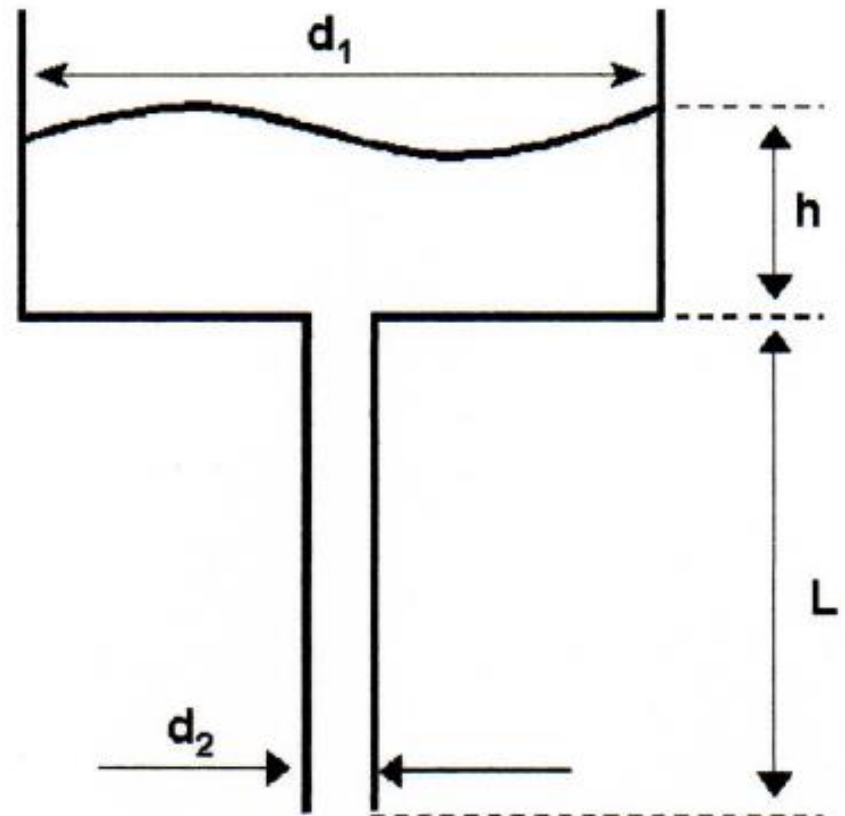
Onde:

d_1 = diâmetro do recipiente

d_2 = diâmetro do duto de saída

L = altura do duto de saída

h = posição da superfície livre do fluido





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL





EXPERIMENTO 1: ESTUDO DO TEMPO DE ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS EM FUNÇÃO DA ALTURA, PARA RECIPIENTE CILÍNDRICOS

EQUAÇÃO QUE REGE O FENÔMENO

Equação desenvolvida pelo prof. René Khattar:

$$t = 2 \cdot \left[\frac{1}{2g} \left[\left(1 + k + \frac{f \cdot L}{d_2} \right) \cdot \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^4 - 1 \right] \right]^{0,5} \cdot \left[(h_0 + L)^{0,5} - (h + L)^{0,5} \right]$$



EXPERIMENTO 1: ESTUDO DO TEMPO DE ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS EM FUNÇÃO DA ALTURA, PARA RECIPIENTE CILÍNDRICOS

OUTRAS RELAÇÕES RELEVANTES

$$f = 0,316 \cdot \text{Re}^{-0,25}$$

$$k = 0,5$$

$$4000 \leq \text{Re} \leq 10^5$$

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

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

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v_2 \cdot d_2}{\mu} = \frac{v_2 \cdot d_2}{\nu}$$

$$h_d = f \cdot \frac{L}{d_2} \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

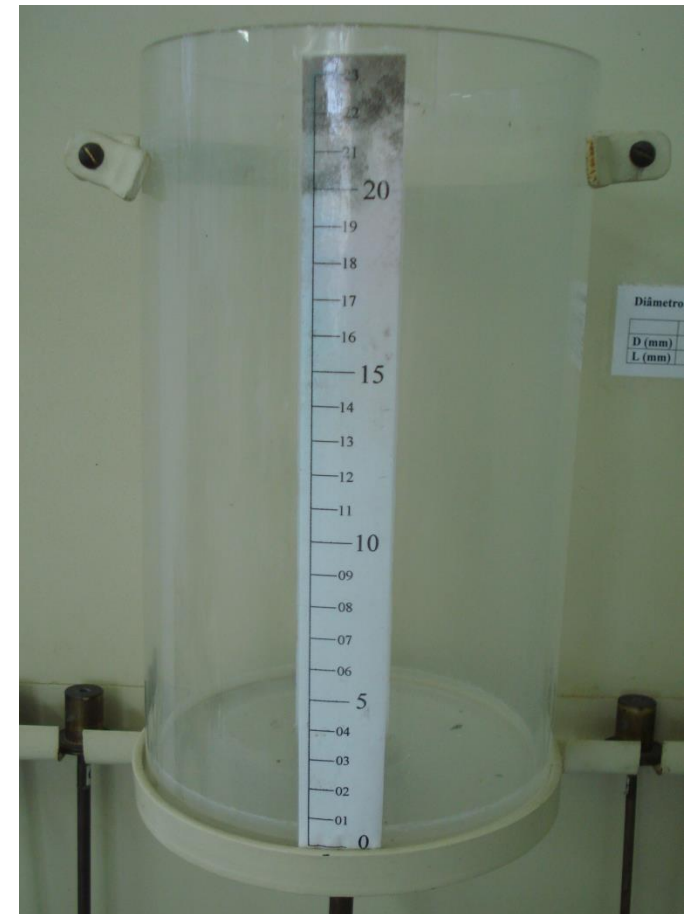
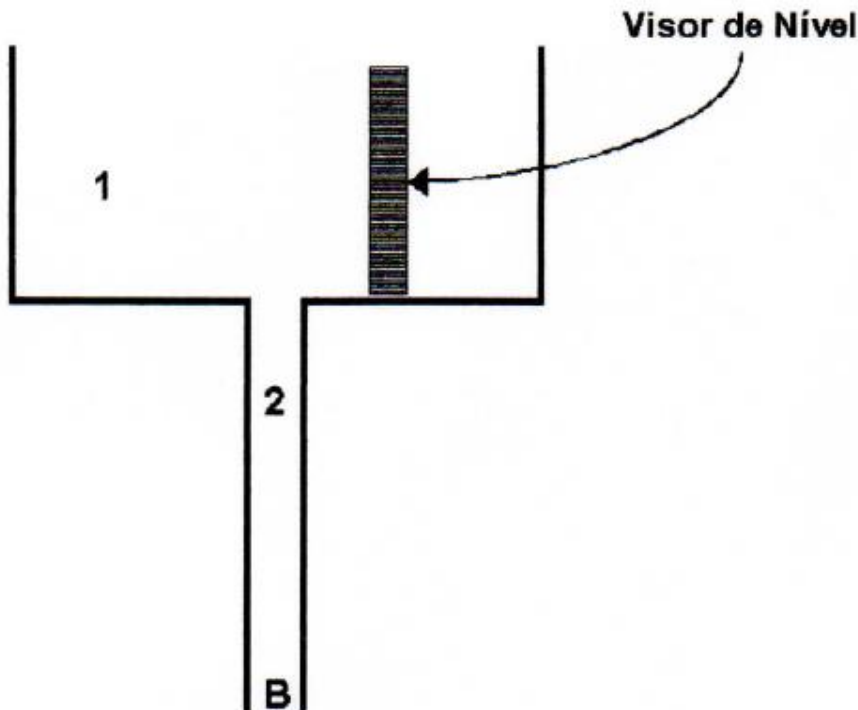
$$h_l = k \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\text{Desvio (\%)} = \frac{|t_{\text{exp}} - t_{\text{teo}}|}{t_{\text{teo}}} \cdot 100$$



EXPERIMENTO 1: ESTUDO DO TEMPO DE ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS EM FUNÇÃO DA ALTURA, PARA RECIPIENTE CILÍNDRICOS

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL





EXPERIMENTO 1: ESTUDO DO TEMPO DE ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS EM FUNÇÃO DA ALTURA, PARA RECIPIENTE CILÍNDRICOS

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

- P1** – Colocar o fluido no recipiente (1) até uma altura (h_0) de referência, estando o duto (2) conectado no tanque e vedado em B
- P2** – Abrir em B e anotar através de um cronômetro o tempo para atingir uma determinada altura (h).
- P3** – Repete-se o experimento mais duas vezes para se obter uma média dos tempos encontrados.
- P4** – Muda-se o duto (2) e retorna-se ao P1, até o término do número de dutos a serem ensaiados.



EXPERIMENTO 1: ESTUDO DO TEMPO DE ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS EM FUNÇÃO DA ALTURA, PARA RECIPIENTE CILÍNDRICOS

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os dutos de saída tem as seguintes dimensões:

	A	B	C	D	E	F
L (mm)	75	150	300	600	600	600
d₂ (mm)	4,8	4,8	4,8	3,1	4,8	7,8



OBSERVAÇÃO: os dados contidos nas tabelas mostradas a seguir deverão ser entregues ao professor ao término do experimento. O grupo deverá providenciar uma cópia para que possam elaborar o relatório.

$h(\text{cm})$									
$t_1 (\text{s})$									
$t_2 (\text{s})$									
$t_3 (\text{s})$									

[illegible]



OBSERVAÇÃO: os dados contidos nas tabelas mostradas a seguir deverão ser entregues ao professor ao término do experimento. O grupo deverá providenciar uma cópia para que possam elaborar o relatório.

[illegible][illegible]



OBSERVAÇÃO: os dados contidos nas tabelas mostradas a seguir deverão ser entregues ao professor ao término do experimento. O grupo deverá providenciar uma cópia para que possam elaborar o relatório.

[illegible][illegible]



EXPERIMENTO 1: ESTUDO DO TEMPO DE ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS EM FUNÇÃO DA ALTURA, PARA RECIPIENTE CILÍNDRICOS

RESULTADOS

Calcular:

- V_1 , V_2 , Re , f , h_l , h_d , $t_{teórico}$ e o desvio de cada tempo encontrado;
- Plotar os gráficos t_{exp} versus altura e $t_{teórico}$ versus altura;
- Completar a tabela a seguir com os devidos valores calculados para cada duto (A, B, C, D, E, F).



EXPERIMENTO 1: ESTUDO DO TEMPO DE ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS EM FUNÇÃO DA ALTURA, PARA RECIPIENTE CILÍNDRICOS

[illegible]



EXPERIMENTO 2

**DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM
O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS
SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA
CONSTANTE**



EXPERIMENTO 2: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

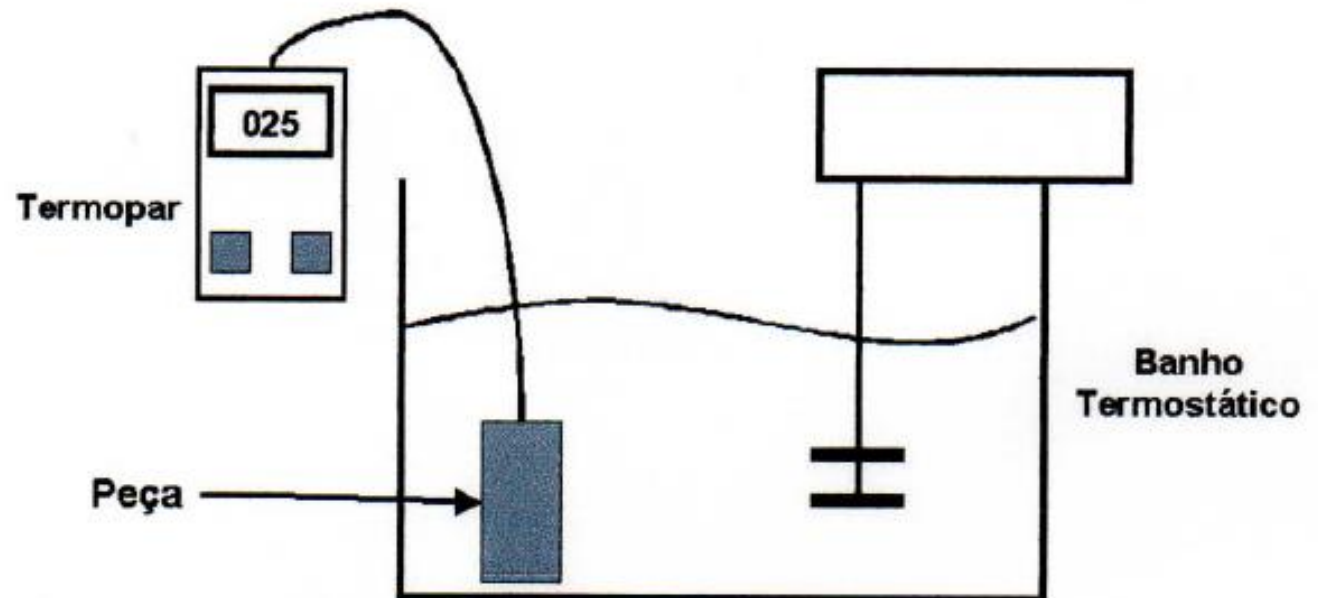
INTRODUÇÃO

Esta experiência visa principalmente a determinação da temperatura no centro geométrico de diferentes formas sólidas (placa, cilindro e esfera). Será feita também a comparação com a análise transiente de parâmetros concentrados, objetivando verificar a validade da hipótese de parâmetros concentrados.



EXPERIMENTO 2: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

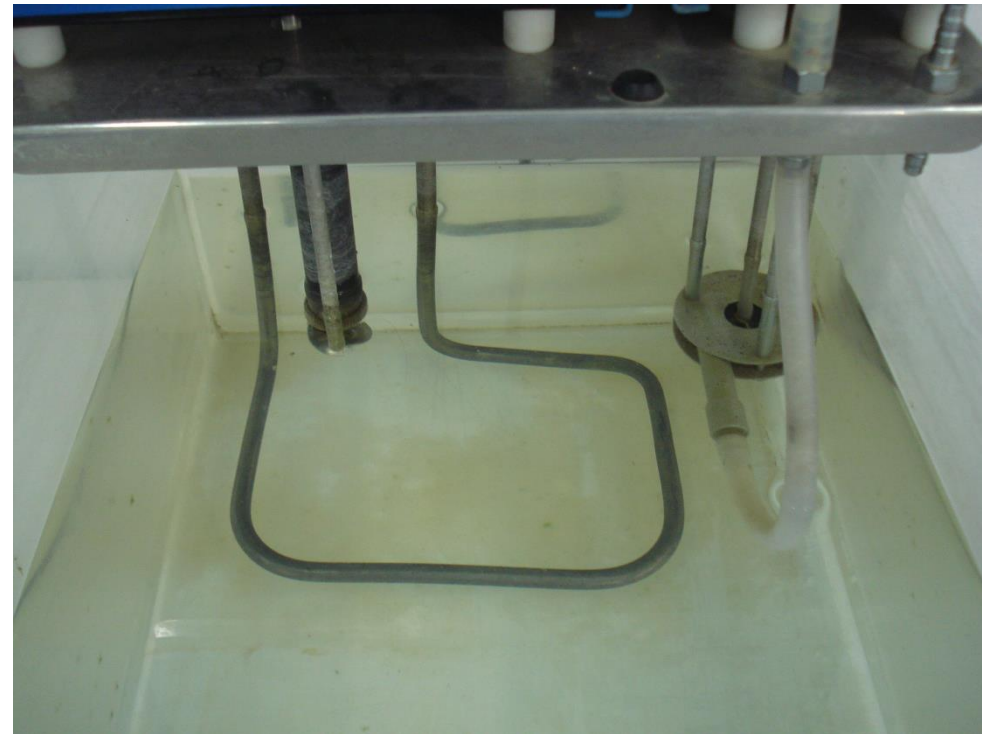
ARRANJO FÍSICO





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ARRANJO FÍSICO





EXPERIMENTO 2: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

EQUAÇÕES QUE REGEM O FENÔMENO

$$\theta = \theta_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \theta_t = T_t - T_f \quad \theta_0 = T_0 - T_f$$

$$\lambda = \frac{h}{\rho_s \cdot L_s \cdot cp_s} \quad \lambda = m^2 \quad L_s = \frac{V_s}{A_s} \quad Bi = \frac{h \cdot L_s}{k_s}$$

Obs: $Bi \leq 0,1$ (vale a hipótese de análise transiente por parâmetros concentrados)



EXPERIMENTO 2: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

Onde:

T_0 = temperatura inicial do sólido

T_t = temperatura do sólido no tempo t

T_f = temperatura do fluido

V_s = volume do sólido

A_s = área do sólido em contato com o fluido

ρ_s = massa específica do sólido

cp_s = calor específico do sólido

h = coeficiente de convecção (valor constante neste caso)

k_s = condutividade térmica do sólido

Bi = número de Biot

L_s = comprimento equivalente



EXPERIMENTO 2: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

- P1** – Colocar a peça no fluido que está mantido a uma temperatura constante, através de um banho termostático.
- P2** – Acoplar o termopar no sólido.
- P3** – Efetuar a leitura da temperatura (T) e o tempo (t), durante o intervalo de temperatura estabelecido pelo Professor.
- P4** – Retirar a peça do fluido e imergi-la em um banho de água gelada para acelerar o arrefecimento.



EXPERIMENTO 2: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

P5 - Selecionar outra peça e retornar a P1.

P6 - Os experimentos serão feitos em duplicata, e na repetição, o procedimento 4 (P4) não deverá ser realizado

P7 – Quando a repetição estiver concluída, todas as peças estarão dentro do banho termostático. Retirar todas as peças e coloca-las no ar ambiente.

P8 – Efetuar a leitura da temperatura (T) e o tempo (t), durante o intervalo de tempo estabelecido pelo Professor.



OBSERVAÇÃO: os dados contidos nas tabelas mostradas a seguir deverão ser entregues ao professor ao término do experimento. O grupo deverá providenciar uma cópia para que possam elaborar o relatório.

Temperatura:[illegible]



EXPERIMENTO 2: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

Geometrias:

- ✓ Placa
- ✓ Cilindro
- ✓ Esfera

Materiais:

- Cobre e Alumínio





EXPERIMENTO 2: DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NO CENTRO DE DIFERENTES FORMAS SÓLIDAS IMERSAS EM FLUIDO A TEMPERATURA CONSTANTE

RESULTADOS

➤ Plotar os gráficos:

- ✓ Temperatura x tempo (experimental)
- ✓ Temperatura x tempo (teórico)

➤ Comparar e discutir os resultados encontrados.



EXPERIMENTO 3

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

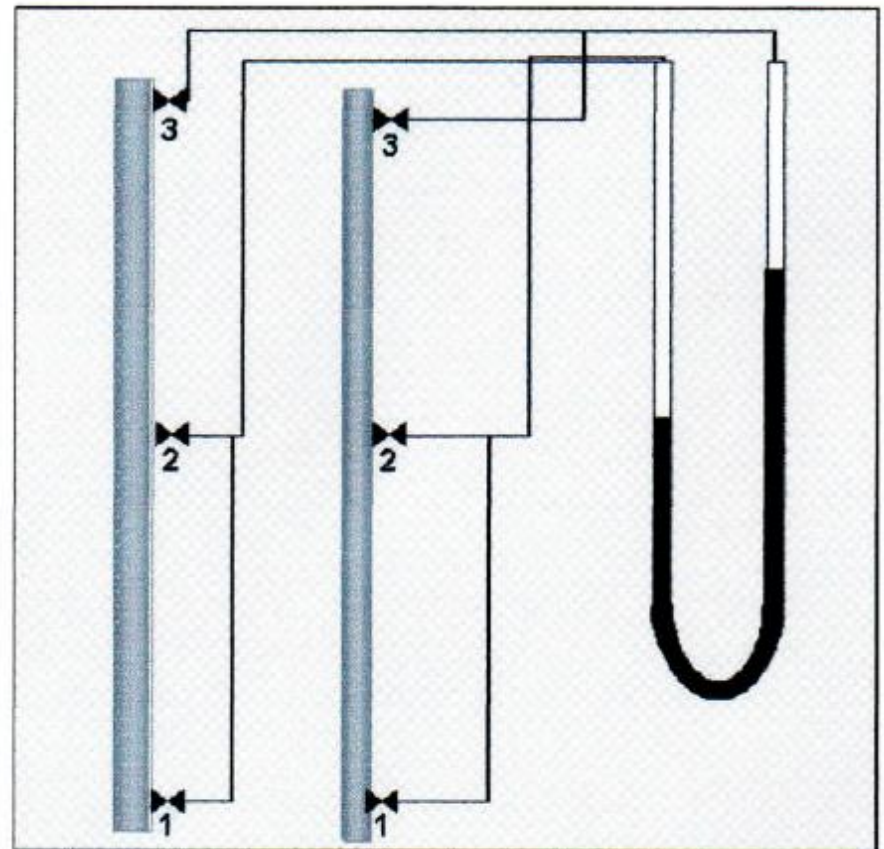
INTRODUÇÃO

Esta experiência visa principalmente a aplicação da equação de conservação de energia e conservação da massa para escoamento forçado em recipiente de formato cilíndrico e a utilização de manômetro diferencial na tomada de medições.



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

ARRANJO FÍSICO





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ARRANJO FÍSICO





EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

EQUAÇÕES QUE REGEM O FENÔMENO

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_d$$

$$h_d = f \cdot \frac{L}{d_2} \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

$$h_l = k \cdot \frac{v_2^2}{2g} \quad k = 0,5$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v_2 \cdot d_2}{\mu} = \frac{v_2 \cdot d_2}{\nu}$$

$$f = 0,316 \cdot Re^{-0,25}$$

$$4000 \leq Re \leq 10^5$$



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

PROCEDIMENTO

P1 – Pesar o balde utilizado no experimento vazio e anotar a massa.

P2 – Ligar a Bomba Hidráulica

P3 – Abrir as válvulas referentes aos pontos onde ocorrerá a medição da diferença de pressão.

P4 – Regular a diferença de pressão até atingir o ponto desejado, manipulando as válvulas de entrada do fluido e reciclo.



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

PROCEDIMENTO

P5 – Na parte de trás do equipamento há duas válvulas globo, que são acionadas por um mesmo mecanismo, e que direciona o fluxo da água. Redirecione o fluxo da água para fora do equipamento e colete com o balde já tarado, cronometrando o tempo de enchimento do balde.

P6 – Pesar a massa de água recolhida no balde.

P7 – Retornar a água do balde para o reservatório na parte de trás do equipamento.

P8 - Retorna-se ao P3, até o término do número de pontos a serem mensurados nos dois tubos.



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

OBSERVAÇÃO: os dados contidos nas tabelas mostradas a seguir deverão ser entregues ao professor ao término do experimento. O grupo deverá providenciar uma cópia para que possam elaborar o relatório.

Tubo A ponto 1 – 3

	1	2	3	4	5	6
P_{máx}	65	63	61	59	57	55
P_{mim}	45	47	49	51	53	55
Massa						
Tempo						
vazão						

Tubo A ponto 2 – 3

	1	2	3	4	5	6
P_{máx}	60	59	58	57	56	55
P_{mim}	50	51	52	53	54	55
Massa						
Tempo						
vazão						



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

OBSERVAÇÃO: os dados contidos nas tabelas mostradas a seguir deverão ser entregues ao professor ao término do experimento. O grupo deverá providenciar uma cópia para que possam elaborar o relatório.

Tubo B ponto 1 – 3

	1	2	3	4	5	6
P_{máx}	80	75	70	65	60	55
P_{mim}	30	35	40	45	50	55
Massa						
Tempo						
vazão						

Tubo B ponto 2 – 3

	1	2	3	4	5	6
P_{máx}	70	67	64	61	58	55
P_{mim}	40	43	46	49	52	55
Massa						
Tempo						
vazão						



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

PROCEDIMENTO

- ✓ Anotar a temperatura da água em cada coleta e ao final do experimento adotar o valor médio da temperatura da água;
- ✓ Temperatura média para referência na determinação:

$$\mu_{H_2O}, \rho_{H_2O}, \rho_{Hg}$$



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

PROCEDIMENTO

✓ Cálculo da vazão mássica:

$$\dot{m} = \frac{m_c - m_{balde}}{\Delta t}$$

Onde: $m_c = m_{\text{água}} + m_{\text{balde}}$ (massa do conjunto)



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

PROCEDIMENTO

✓ Cálculo da velocidade:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A}$$

Onde: A = área do tubo



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

PROCEDIMENTO

✓ Cálculo de Δp :

$$\Delta p = (\gamma_{Hg} - \gamma_{H_2O}) \times \Delta h$$

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



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

PROCEDIMENTO

✓ Cálculo de h_d :

$$h_d = \frac{\Delta p}{\gamma_{H_2O}}$$



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

PROCEDIMENTO

✓ Cálculo de Re:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

PROCEDIMENTO

✓ Cálculo do fator de atrito (f):

$$f = h_d \times \frac{d}{L} \times \frac{2g}{V^2}$$

Onde: d = diâmetro do tubo

L = comprimento do tubo



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

PROCEDIMENTO

✓ Cálculo da rugosidade relativa (ε/d)

Equação de Colebrook:
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,86 \times \ln \left(\frac{\varepsilon / d}{3,7} + \frac{2,51}{Re \times \sqrt{f}} \right)$$

Onde d = diâmetro do tubo



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

PROCEDIMENTO

- ✓ A partir da rugosidade relativa (ε/d), determinar a rugosidade do tubo (ε)



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

RESULTADOS

Completar a tabela

Δh (mmHg)	Δp (Pa)	h_d (m)	$\dot{m}$ (kg/s)	V (m/s)	f	Re	ε/d	ε (m)



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

RESULTADOS

- ✓ Plotar o gráfico perda de carga x vazão
- ✓ Plotar em escala di-log
 - $f \times Re$
 - $f \times \varepsilon/d$



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

RESULTADOS

- ✓ Calcular a rugosidade do tubo
- ✓ Calcular o número de Reynolds



EXPERIMENTO 3: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE CARGA E DA RUGOSIDADE DO TUBO NO ESCOAMENTO FORÇADO DE LÍQUIDOS

RESULTADOS

- ✓ Comparação entre o valor calculado e o valor tabelado para ε
 - pesquisar o valor de $\varepsilon_{\text{tabelado}}$ para o tubo de **latão**

$$\text{Erro (\%)} = \frac{|\varepsilon_{\text{tab}} - \varepsilon_{\text{exp}}|}{\varepsilon_{\text{exp}}} \times 100$$