



**Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de Lorena**

LAB. DE ENGENHARIA QUÍMICA I
LOQ4060 – Turma 20212D1 – Engenharia Química

Apresentação 03

Experimento 2
Medidas de vazão:
Rotâmetro, Venturi,
Placa de orifício

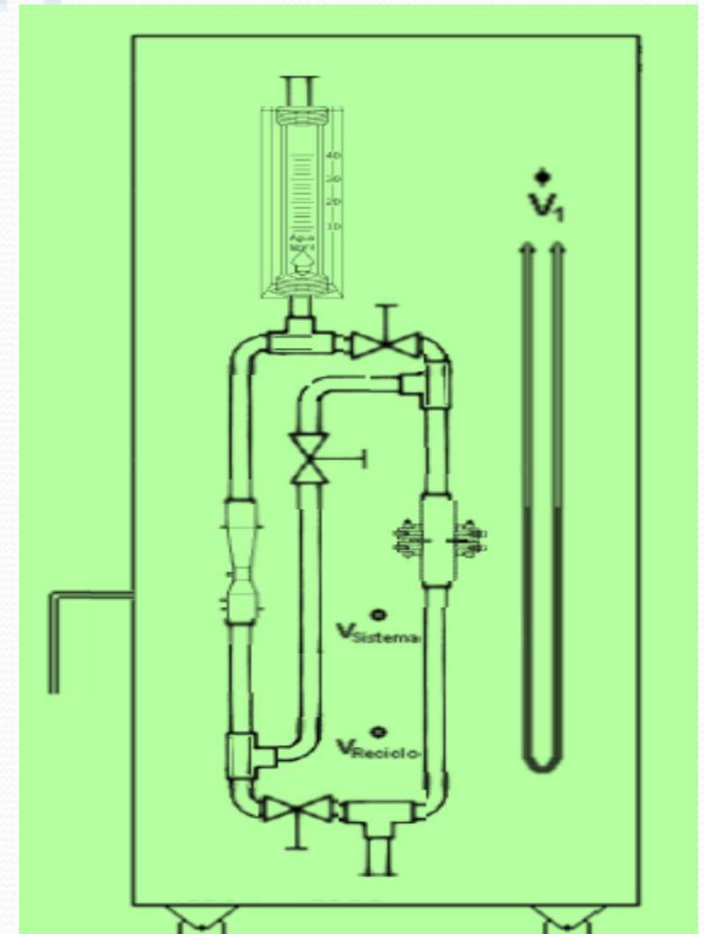
PROF. ANTONIO CARLOS DA SILVA



OBJETIVO DO EXPERIMENTO

Este experimento visa:

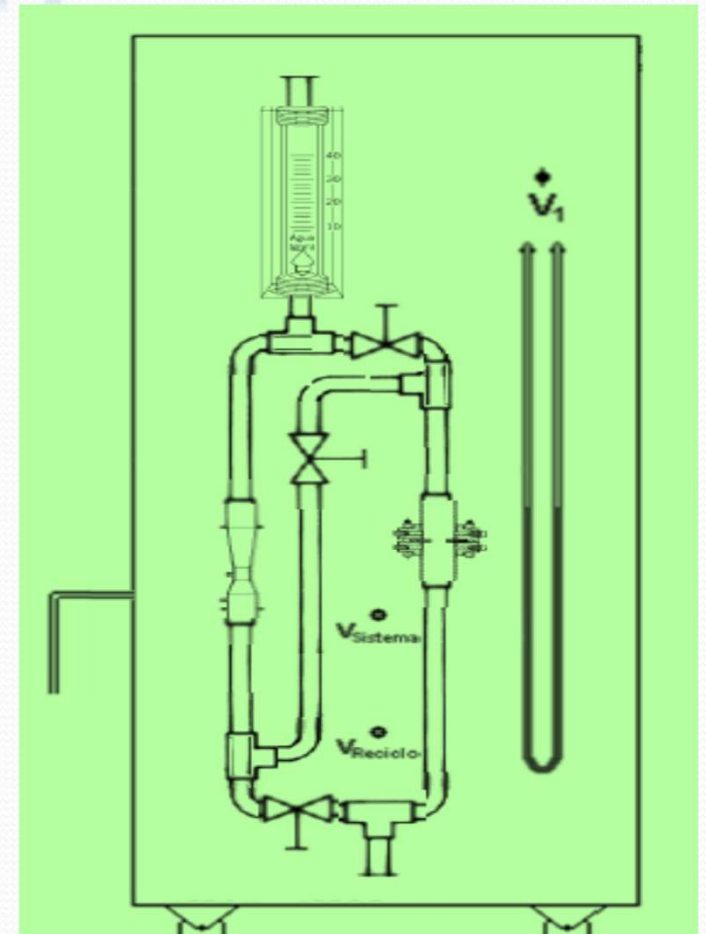
- ✓ O equacionamento básico de instrumentos de medição de vazão do tipo Placa de Orifício e Venturi, por comparação com um Rotâmetro.
- ✓ Calibrar os medidores de vazão do tipo Placa de Orifício e Venturi, tendo como base as medidas de vazão realizadas em um rotâmetro;



OBJETIVO DO EXPERIMENTO

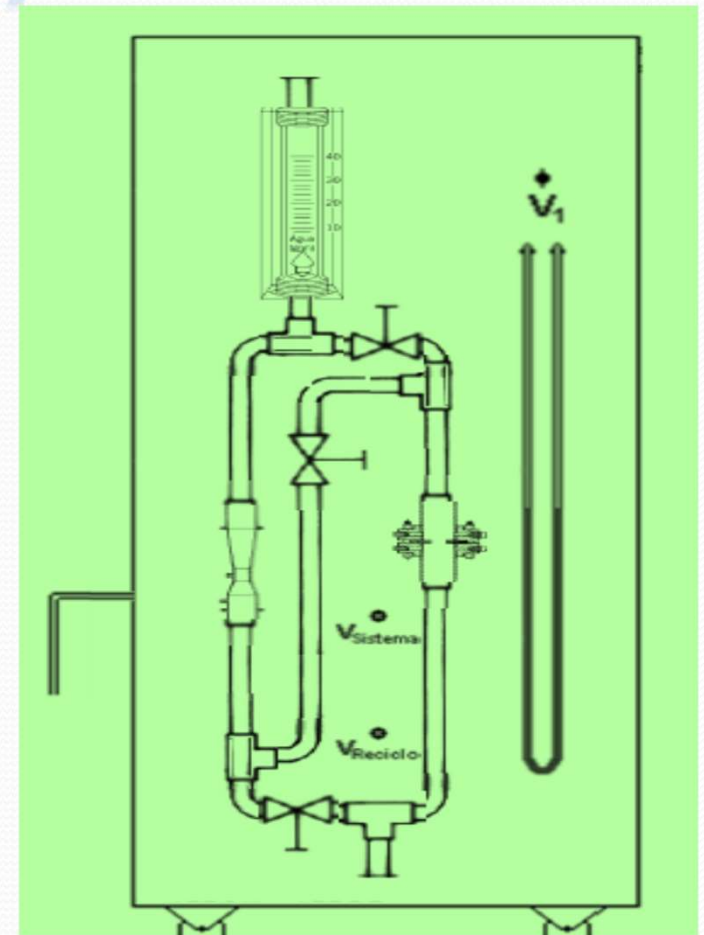
Este experimento visa:

- ✓ Determinar as vazões direta e indireta de escoamento de um fluido;
- ✓ Comparar os dados experimentais dos coeficientes de fluxo com os valores teóricos encontrados da literatura.



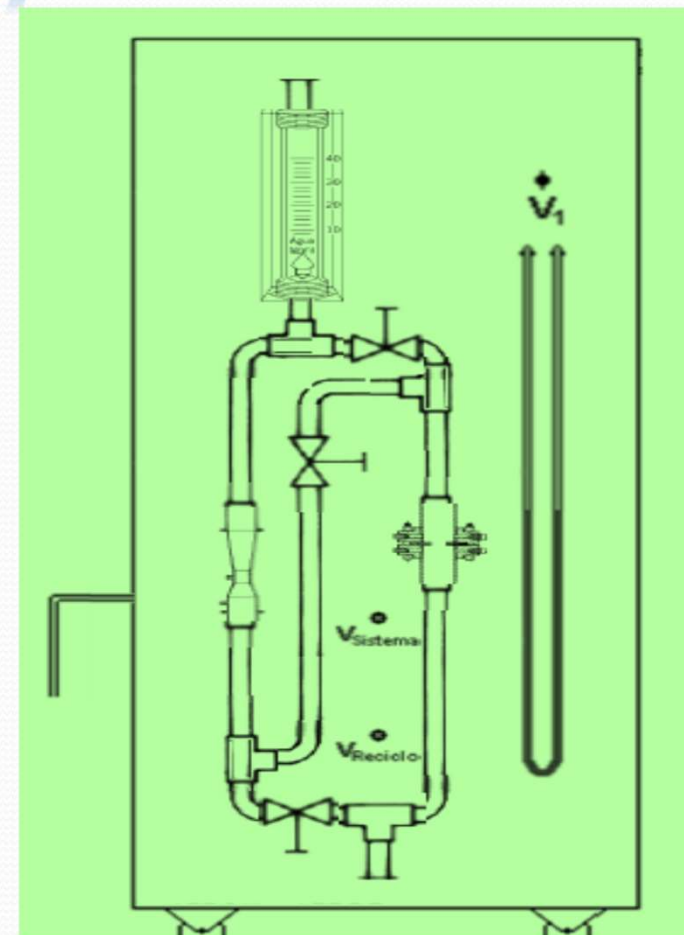
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A medição de vazão de fluidos está presente a todo o momento em nosso dia, como exemplo o hidrômetro das residências, o marcador de uma bomba de combustível nos veículos, etc. Os medidores de vazão são fundamentais nas estratégias econômicas dos processos industriais.



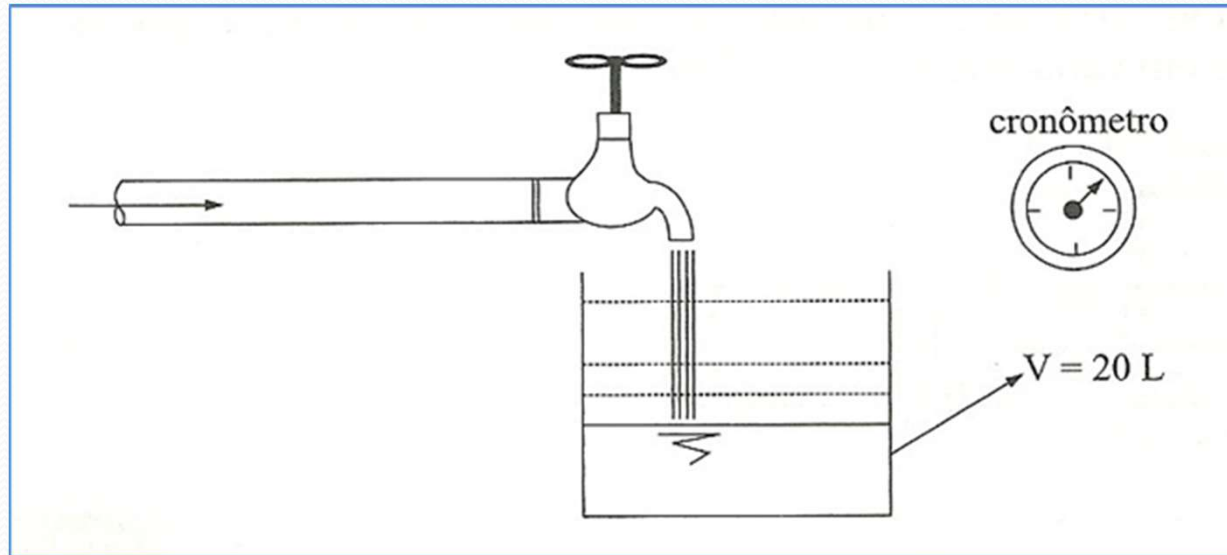
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos processos químicos industriais os medidores de vazão são utilizados para o controle do processo, análise e garantia de qualidade, produtividade; segurança; análise de eficiência, perdas e rendimento; balanço de massa, balanço de energia; transações comerciais, medições contábeis, etc.



FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A vazão pode ser definida como sendo a quantidade volumétrica ou mássica de um fluido que escoa através de uma seção de uma tubulação ou canal por unidade de tempo.



$$Q = \frac{V}{t}$$

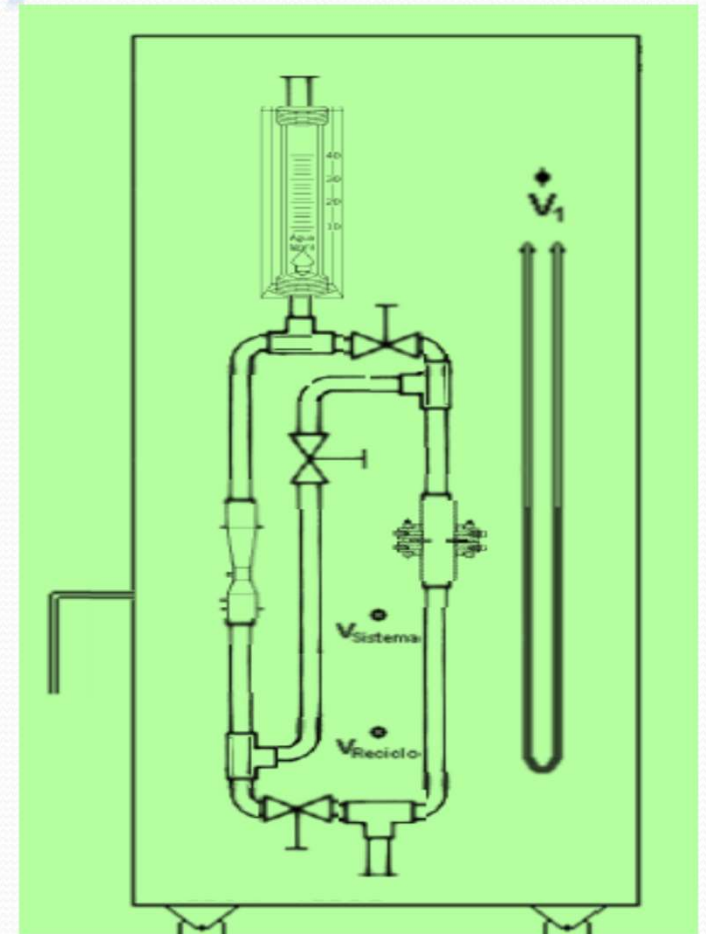
Q ... Vazão volumétrica
V ... Volume no intervalo t
T ... Intervalo de tempo

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem três tipos fundamentais de medidores de vazão: indiretos, diretos e especiais.

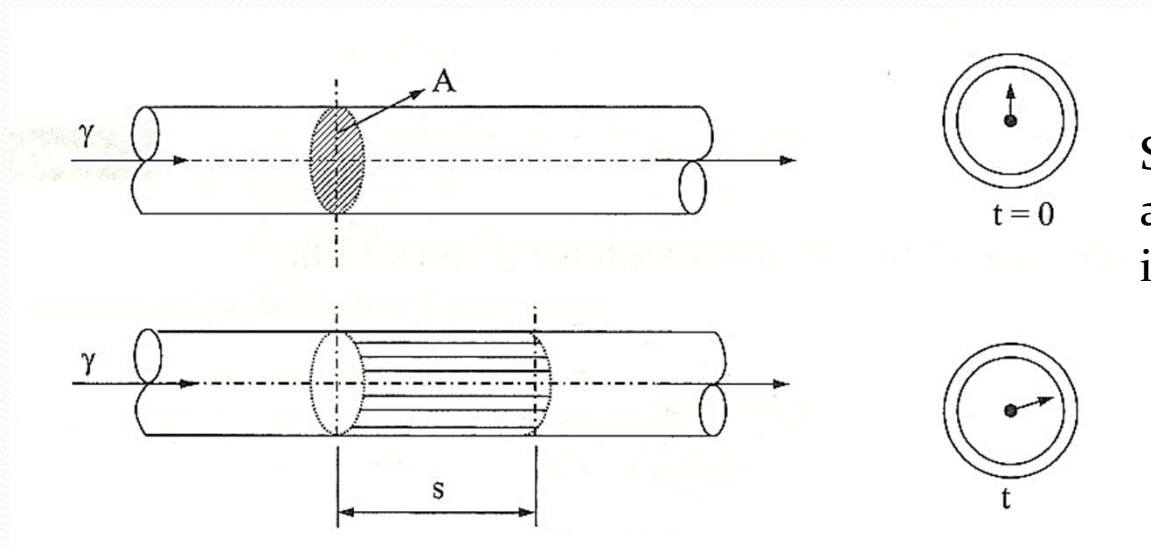
Nesta prática é trabalhado o conceito indireto de medição com os medidores tubo de venturi, placa de orifício e rotâmetro.

Os medidores tubo de venturi e placa de orifício, utilizam os conceitos de perda de carga variável e área constante, já o rotâmetro, tem perda de carga constante e área variável.



FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Relação entre vazão volumétrica e velocidade média:



Sabe-se que o **volume** de fluido que atravessa a seção de área A no intervalo de tempo t é

$$V = s \cdot A$$

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Então a relação entre vazão volumétrica e velocidade média do fluido pode ser dada por:

$$Q = \frac{V}{t}$$



$$Q = \frac{s \cdot A}{t} = v \cdot A$$

v é a velocidade

Unidade: m³/s, m³/h

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Tipos de medidores de vazão:

- Volumétricos
- Em canais abertos
- Lineares
- Elementos deprimogênicos

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Medidores Lineares

Produzem um sinal de saída diretamente proporcional à vazão. Podem ser:

- ✓ Medidor de área variável: Rotâmetro
- ✓ Eletromagnético
- ✓ Ultrassônico
- ✓ Turbina
- ✓ Coriolis
- ✓ Vortex



FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Medidores Lineares

Produzem um sinal de saída diretamente proporcional à vazão. Podem ser:

- ✓ Medidor de área variável: Rotâmetro
- ✓ Eletromagnético
- ✓ Ultrassônico
- ✓ Turbina
- ✓ Coriolis
- ✓ Vortex

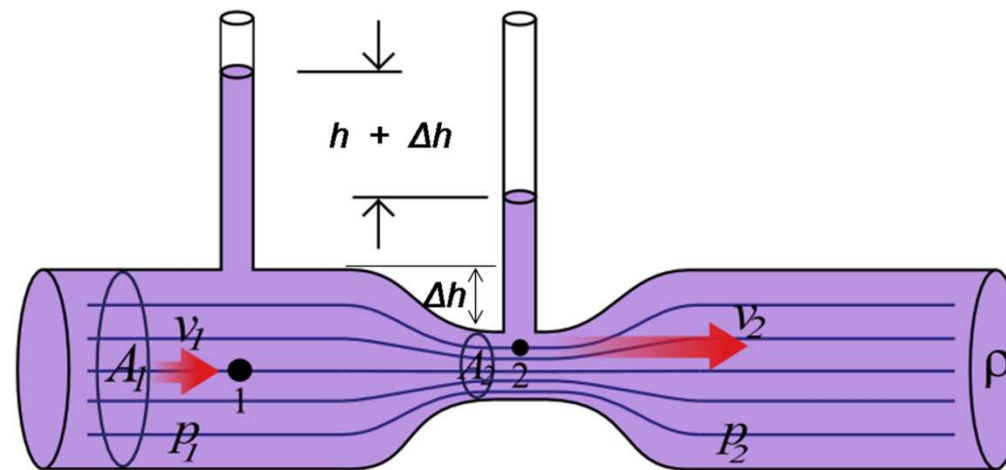


FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Medidores de elementos deprimogênicos

Se denomina assim ao elemento primário cuja instalação produz diferença de pressões (perda de carga), que se vincula com a vazão do fluido que circula, em uma relação determinada. Podem ser:

- ✓ **Tubo de Pitot;**
- ✓ **Bocal;**
- ✓ **Placa de Orifício;**
- ✓ **Tubo de Venturi.**



FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No dispositivo experimental:



Rotâmetro



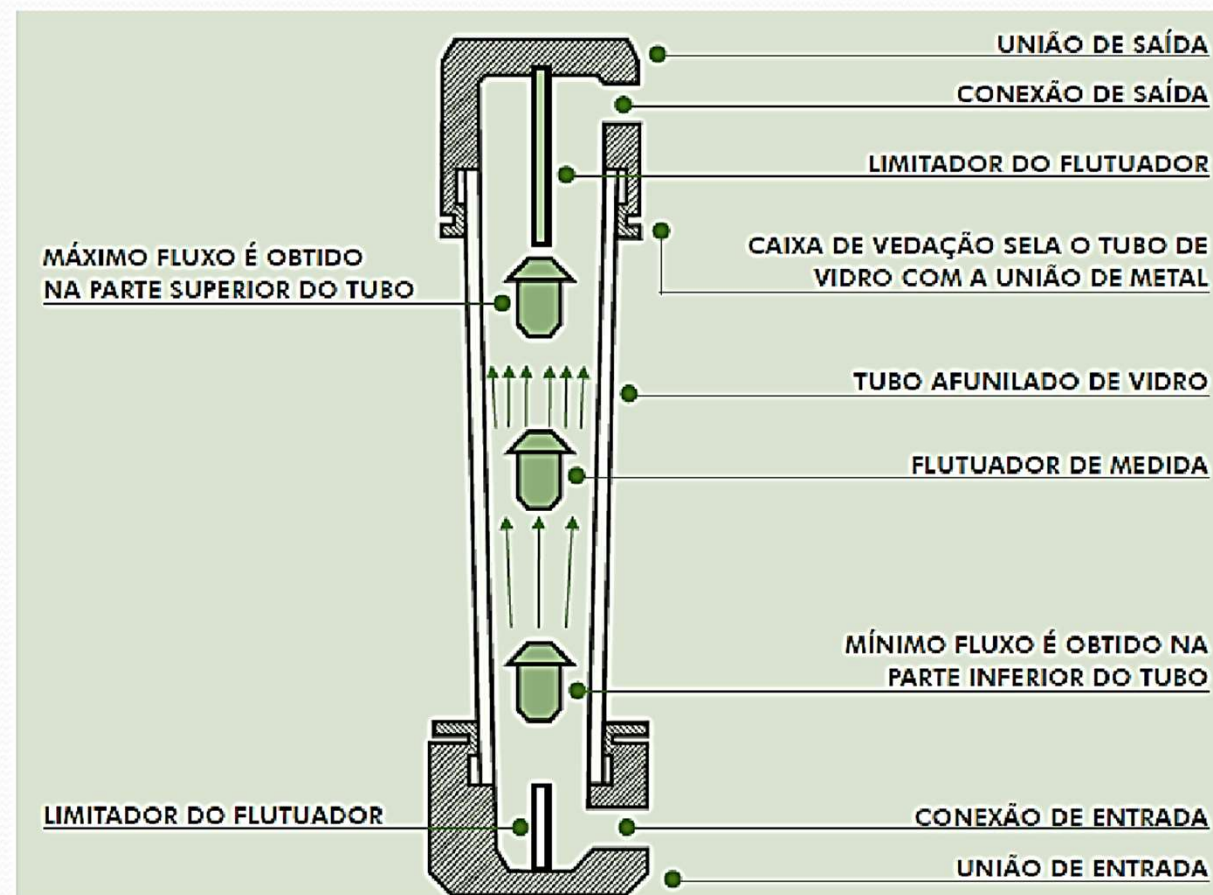
Placa de Orifício



Tubo de Venturi

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Rotâmetro



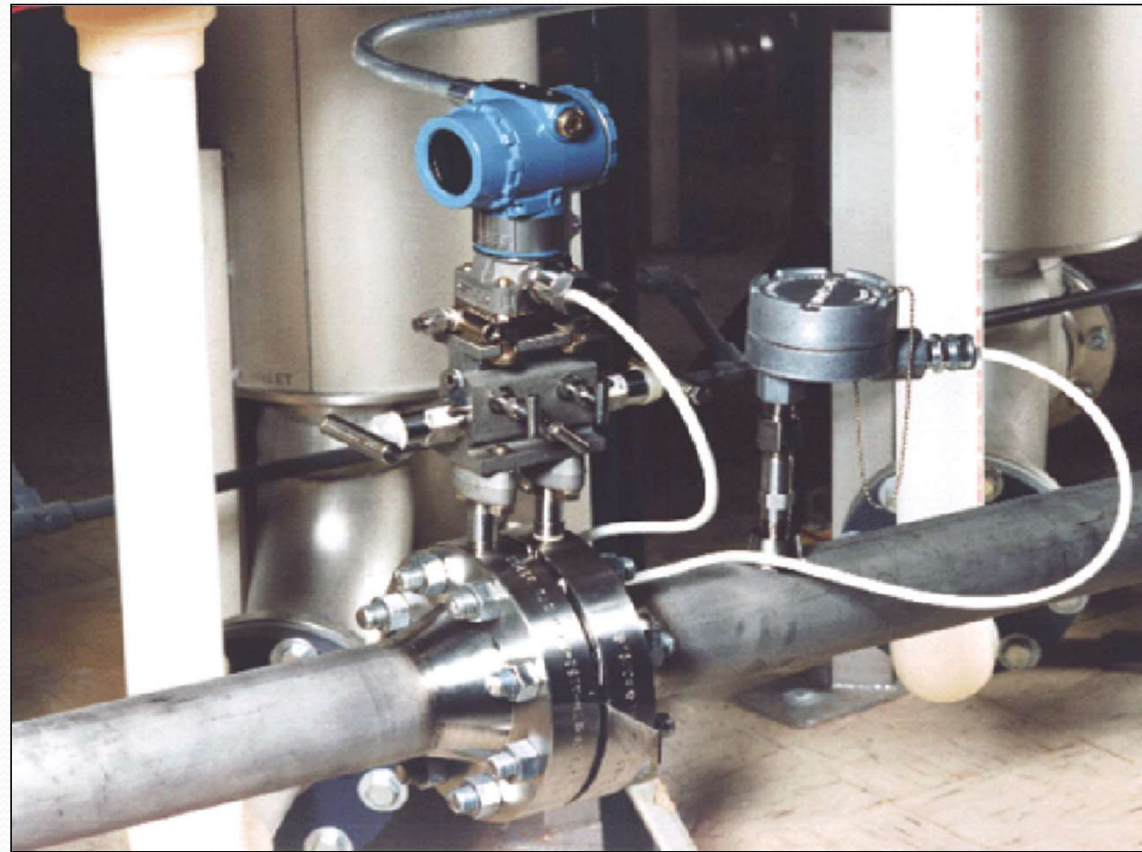
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Rotâmetro



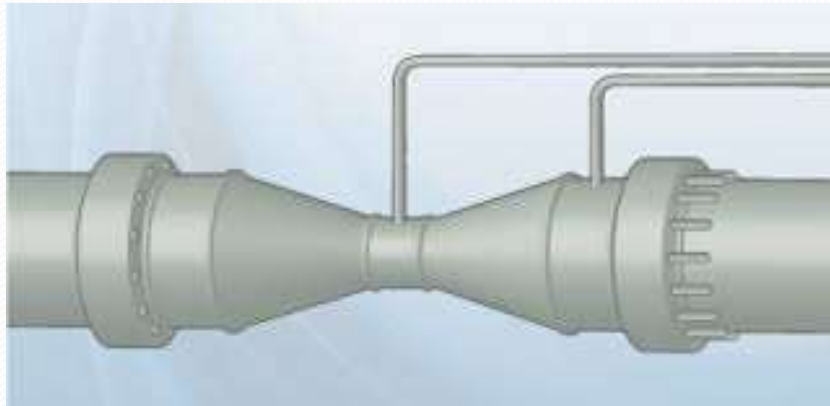
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Placa de orifício



FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

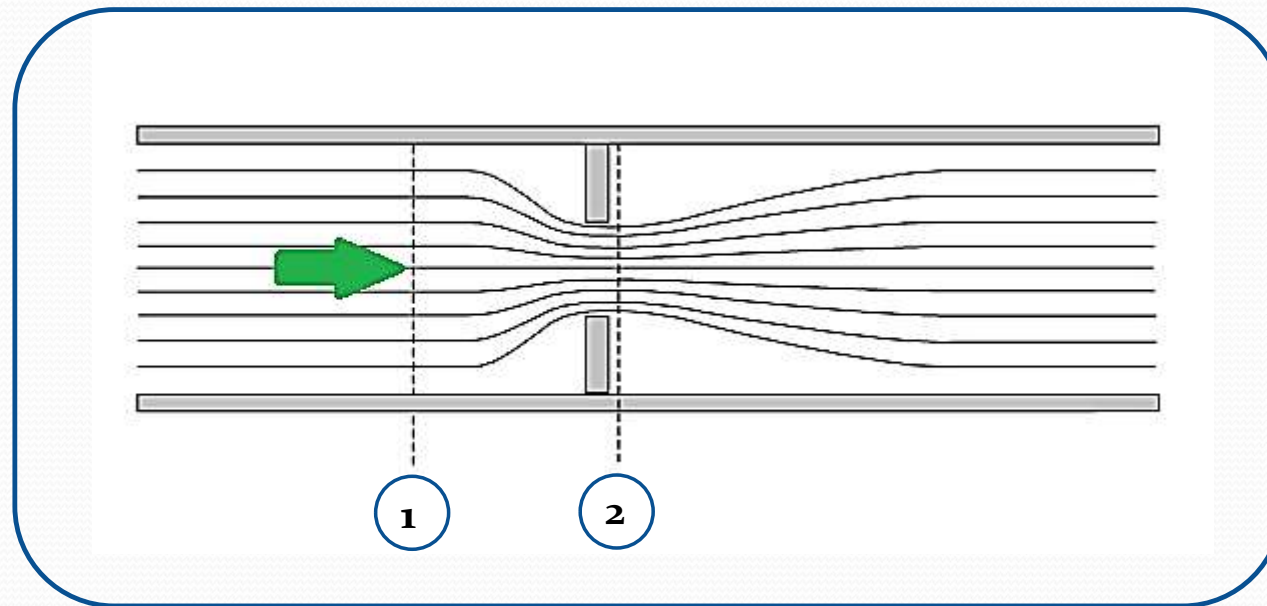
Tubo de venturi



FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Cálculo da vazão da Placa de Orifício e do Tubo de Venturi

Seja o esquema da figura, onde se tem um escoamento, em regime permanente, através de uma redução de área, com fluido incompressível e não viscoso.



FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aplicando-se a equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2:

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

Energia potencial

Energia cinética

Energia de escoamento

Como $Z_1 = Z_2$

A equação de Bernoulli se reduz a:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2}$$



$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

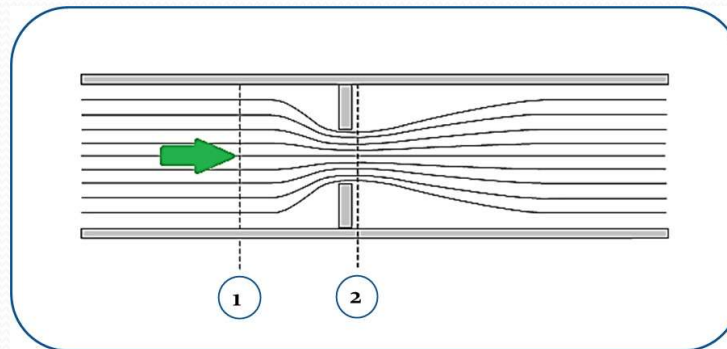
$$\sum (\rho_i A_i V_i)_{entrada} = \sum (\rho_i A_i V_i)_{saída}$$

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Da Equação de Conservação de Massa:

$$\sum (\rho_i A_i V_i)_{entrada} = \sum (\rho_i A_i V_i)_{saída}$$

Há somente uma entrada (ponto 1) e uma saída (ponto 2):



$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Sendo $\rho_1 = \rho_2 = \text{cte}$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad \rightarrow \quad V_1 = \frac{A_2}{A_1} V_2$$

Seja β a razão entre o diâmetro da placa (d) e o diâmetro da tubulação (D):

$$\beta = \frac{d}{D} \quad \rightarrow \quad \beta^2 = \frac{A_2}{A_1}$$

$$V_1 = \beta^2 V_2$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{V_2^2 - (\beta^2 V_2)^2}{2}$$

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{V_2^2(1 - \beta^4)}{2} \rightarrow V_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P/\rho}{1 - \beta^4}} \rightarrow V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

$$V_1 = \frac{A_2}{A_1} V_2 \rightarrow V_1 = \frac{A_2}{A_1} \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

A **VAZÃO TEÓRICA** para o fluido é dada por:

$$Q_{teórica} = Q_1 = V_1 A_1$$

$$Q_{teórica} = Q_1 = \frac{A_1 \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para **VAZÃO REAL**, há que se introduzir um coeficiente denominado de coeficiente de descarga:

$$Q_{real} = C_e Q_1$$

C_e é o coeficiente de descarga (ou escoamento).

$$Q_{real} = \frac{C_e A_1 \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (14)$$

$$\text{Como: } \beta^2 = \frac{A_2}{A_1}$$

$$Q_{real} = \frac{C_e A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Fazendo $C_f = \frac{C_e}{\sqrt{1-\beta^4}}$, tem-se:

$$Q_{real} = C_f A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

C_f é o coeficiente de fluxo e A_2 é a área do orifício da placa.

A diferença de pressão (ΔP) pode ser medida pelo manômetro em U, cuja expressão é:

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

(h) é o desnível entre os pontos 1 e 2 no manômetro em U.

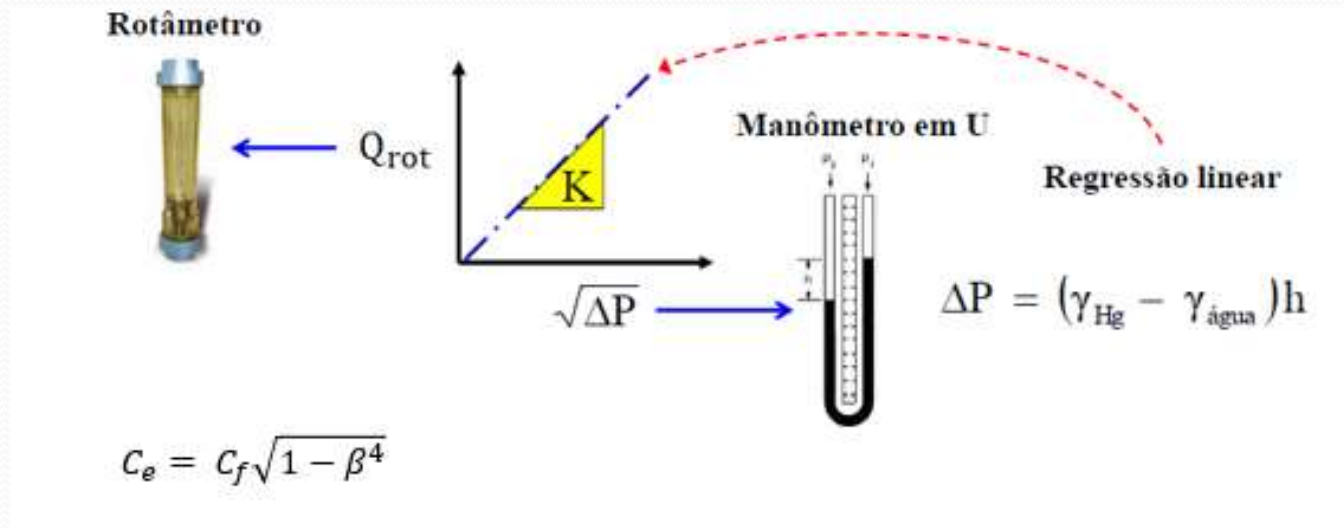
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Determinação do valor de C_f experimental:

$$Q_{real} = C_f A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad \text{Fazendo } k = C_f A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho}}$$

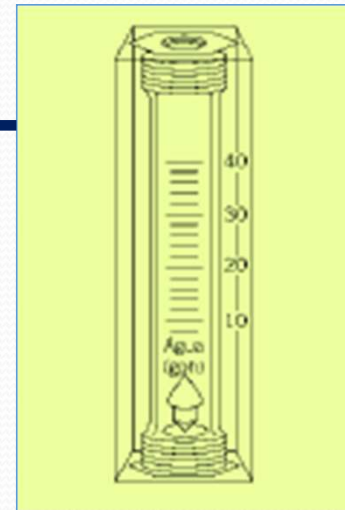
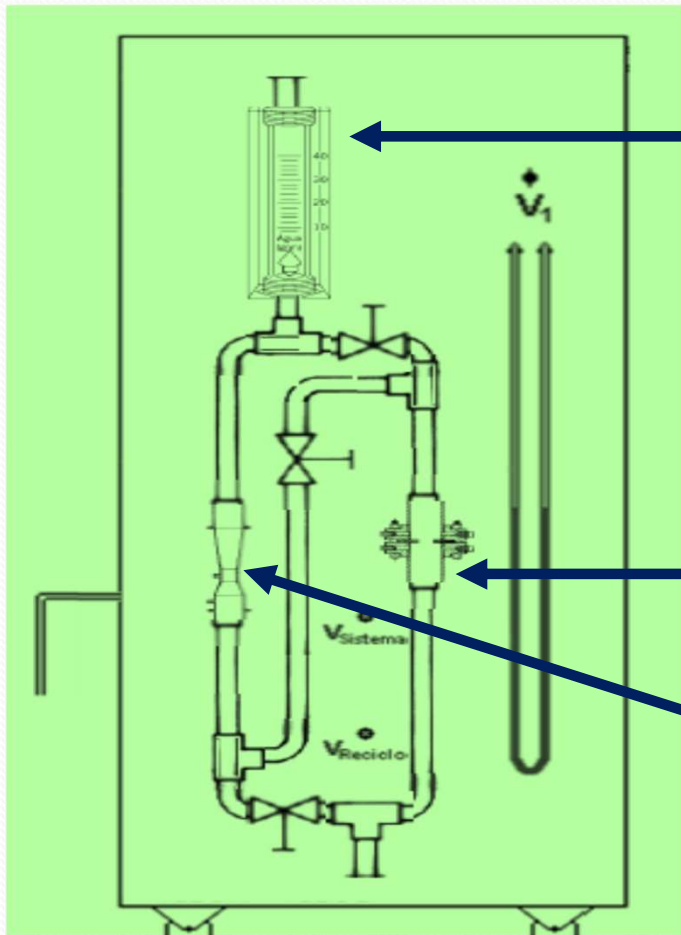
$$Q_{real} = k\sqrt{\Delta P}$$

Tendo a vazão medida pelo rotâmetro e ΔP , por regressão linear, obtém-se o k .

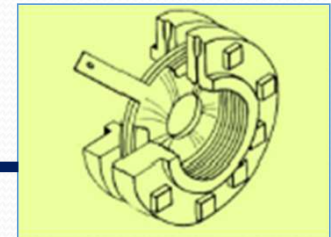


PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

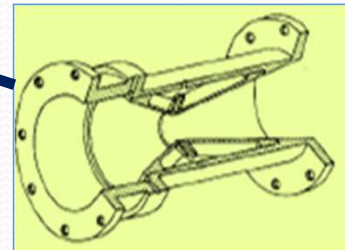
Aparato:



Rotâmetro



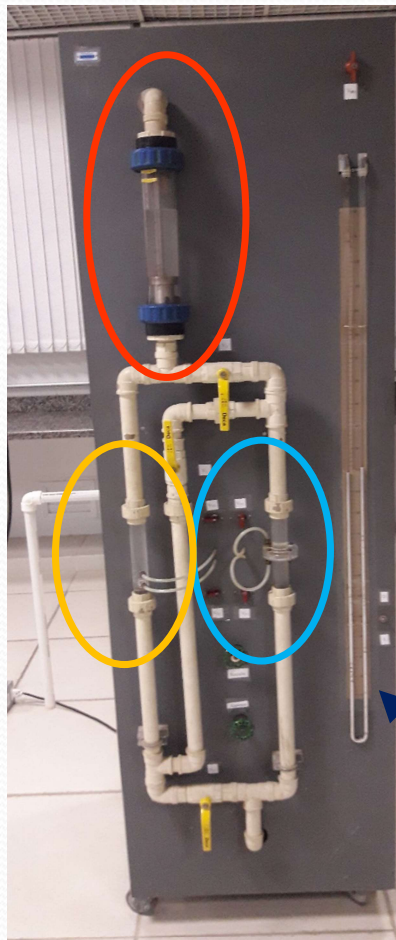
Placa de orifício



Tubo de Venturi

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Aparato:



Rotâmetro

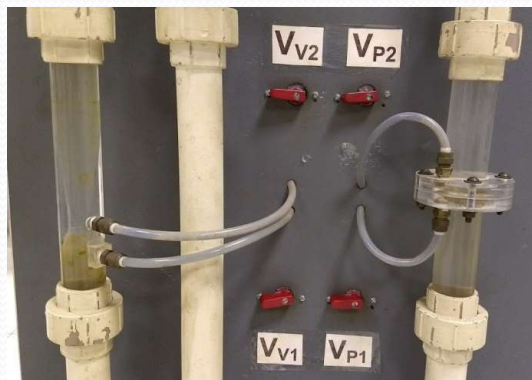


Tubo de Venturi

Placa de orifício



PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL



Balança

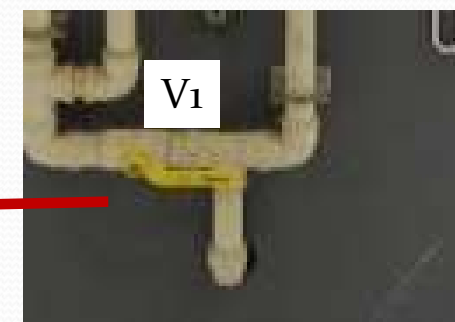
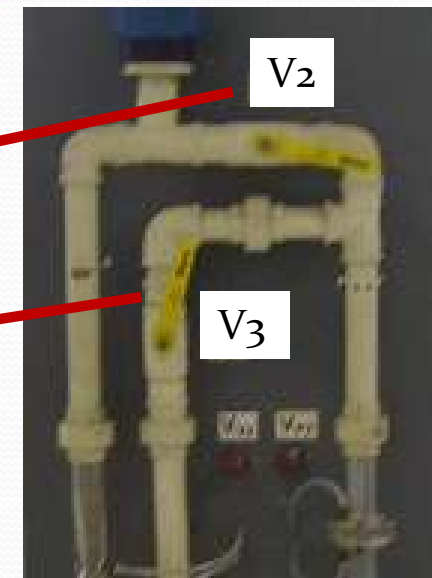
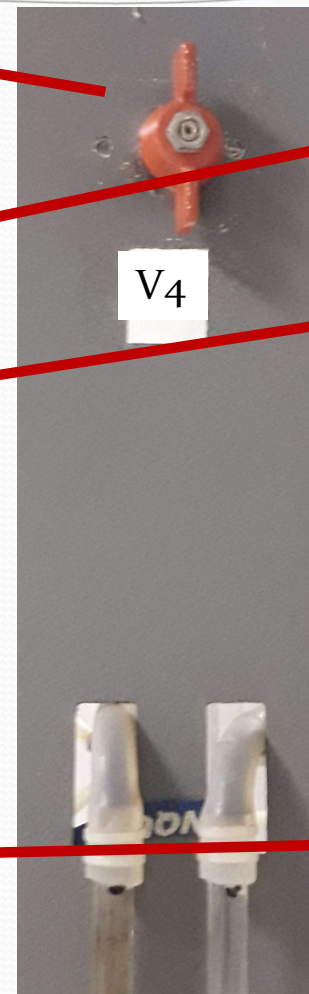
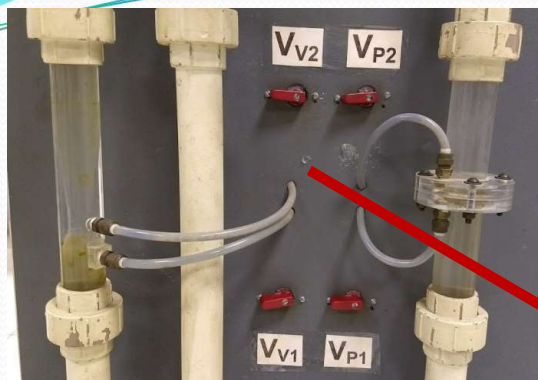


Cronômetro



Balde





PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Procedimento de Calibração do Rotâmetro:

1. Medir a temperatura da água no tanque
2. Abrir a válvula referente à passagem da água pelo Venturi e Placa de orifício (V2) e manter as válvulas V1 e V3 fechadas
3. Ligar a bomba do equipamento
4. Controlando a vazão através das válvulas de sistema e de reciclo, estabelecer a vazão de 10 L/s
5. Conferir a escala do rotâmetro medindo a vazão com um cronômetro e um balde para a coleta de água
6. Calcular a vazão e comparar com o rotâmetro
7. Repetir o procedimento para as vazões de 20 L/s, 30 L/s, 40 L/s, 50 L/s e 60 L/s
8. Repetir os procedimentos 4 a 7 por três vezes anotando os resultados de medição



PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Procedimento de Calibração da Placa de Orifício e Venturi:

1. Abrir as válvulas referentes à passagem da água pelo Venturi e Placa de orifício (V2) e manter as válvulas V1 e V3 fechadas e ajustar a vazão no rotâmetro em 10 L/s (mesmo do procedimento anterior)
2. Ligar a bomba do equipamento
3. Ajustar a vazão no rotâmetro em 10 L/s
4. Abrir as válvulas de tomada de pressão: Placa de orifício ou Venturi
5. Medir a altura manométrica da Placa de orifício ou tubo Venturi
6. Realizar o experimento em triplicata
7. Repetir os procedimentos 3 a 6 para as vazões de 20 L/s, 30 L/s, 40 L/s, 50 L/s e 60 L/s

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Procedimento de Calibração do Rotâmetro:

$Q_{\text{rotâmetro}}$ (L/min)	$Q_{\text{rotâmetro}}$ (m ³ /s)	Medições	Volume coletado (L)	t (s)	Q (m ³ /s)	Erro (%)
10		1ª				
		2ª				
		3ª				
		Média				
20		1ª				
		2ª				
		3ª				
		Média				
30		1ª				
		2ª				
		3ª				
		Média				
40		1ª				
		2ª				
		3ª				
		Média				
50		1ª				
		2ª				
		3ª				
		Média				
60		1ª				
		2ª				
		3ª				
		Média				

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Procedimento de Calibração da Placa de orifício e Venturi:

$Q_{\text{rotâmetro}}$ (L/min)	$Q_{\text{rotâmetro}}$ (m³/s)	Medições	$D_{h_{\text{placa}}}$ orifício	$D_{h_{\text{Venturi}}}$
10		1ª		
		2ª		
		3ª		
		Média		
20		1ª		
		2ª		
		3ª		
		Média		
30		1ª		
		2ª		
		3ª		
		Média		
40		1ª		
		2ª		
		3ª		
		Média		
50		1ª		
		2ª		
		3ª		
		Média		
60		1ª		
		2ª		
		3ª		
		Média		

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Pede-se:

1. Plotar os dados de vazão volumétrica (rotâmetro) versus vazão volumétrica (medida pelo balde) e ajustar os dados através de uma regressão linear;
2. Plotar os dados experimentais de vazão volumétrica (rotâmetro) versus vazão teórica e realizar uma regressão linear, para a placa de orifício e Venturi (Com o valor da inclinação da reta, obtêm-se o valor do coeficiente de escoamento experimental, C_e);
3. Plotar o gráfico vazão volumétrica (rotâmetro) versus altura h (manômetro) para a placa de orifício e Venturi;
4. Plotar o gráfico vazão teórica versus altura h (manômetro) para a placa de orifício e Venturi;
5. Para o valor de β (placa de orifício e Venturi) e número de Reynolds, obtêm-se um coeficiente de escoamento teórico no gráfico para a placa de orifício e Venturi; com o valor do coeficiente de escoamento teórico e experimental, calcular o erro relativo.

