

Laboratório de Engenharia Química I

Aula Prática 05

Medidas de vazão em líquidos mediante o uso da *Placa de Orifício, Venturi e Rotâmetro.*

Prof. Dr. Gilberto Garcia Cortez

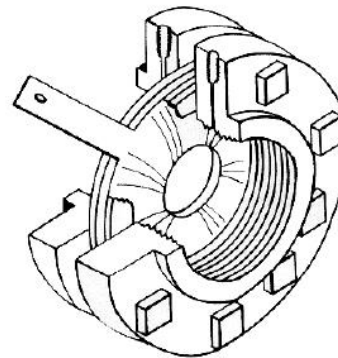
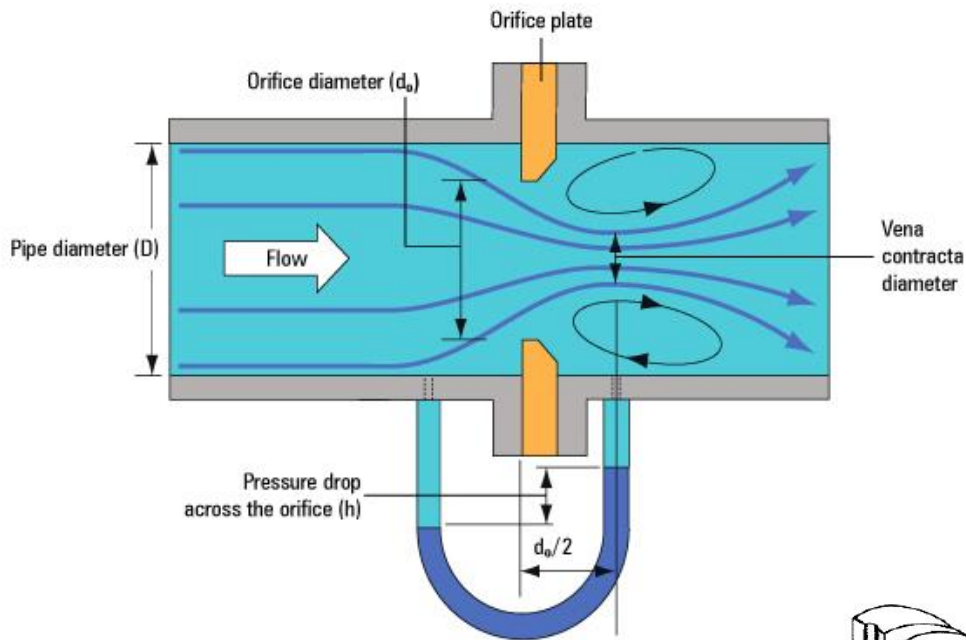
1- Introdução

O experimento consiste no uso de instrumentos de medição de vazão do tipo placa de orifício, Venturi e rotâmetro.

Objetivos:

- **Calibração dos medidores de vazão do tipo placa de orifício e Venturi, tendo como base as medidas de vazão realizadas em um rotâmetro.**
- **Introduzir a determinação direta e indireta da vazão de escoamento de um fluido.**
- **Estudar o equacionamento básico dos aparelhos medidores de vazão do tipo Venturi e placa de orifício.**
- **Calcular o coeficiente de escoamento da placa de orifício e Venturi.**
- **Comparar os dados experimentais dos coeficientes de fluxo aos valores teóricos encontrados da literatura.**

USO DA PLACA DE ORIFÍCIO NA MEDIÇÃO DE VAZÃO



USO DO TUBO DE VENTURI NA MEDIÇÃO DE VAZÃO



Equação para o cálculo da vazão teórica da Placa de Orifício e Venturi.

As equações para o cálculo da vazão podem ser obtidas genericamente para os dois tipos de medidores indiretos (placa de orifício e Venturi). Aplica-se a equação da conservação da massa, bem como a equação da conservação da energia, sendo esta última na sua forma simplificada, que é a equação de *Bernoulli*. Assim para o escoamento através de uma redução de área (ex. placa de orifício), considerando-o fluido incompressível, não viscoso e em regime permanente e tomando uma linha de corrente entre os pontos 1 e 2, conforme a Figura 1, a equação de *Bernoulli* ficará:

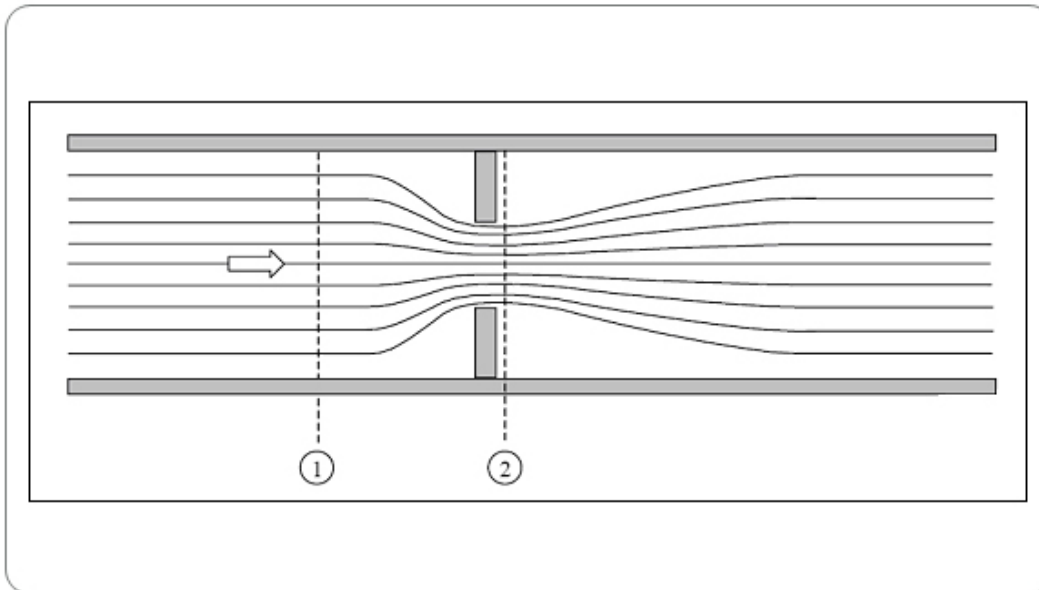


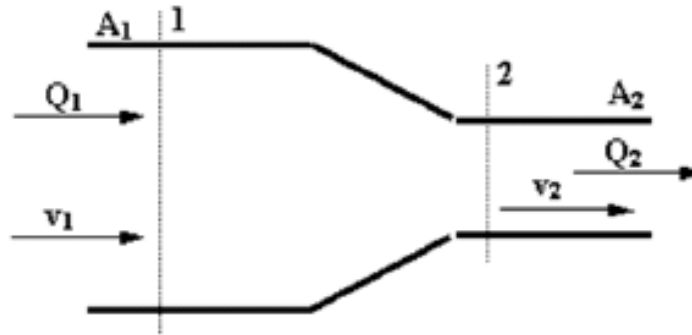
Figura 1

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho}$$



$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (1)$$

Pela equação da continuidade ou da conservação de massa em regime permanente, diz-se que a vazão mássica ($\rho_i A_i v_i$) é constante em qualquer seção da tubulação e do elemento medidor, então, tem-se:



$$\sum_i (\rho_i A_i v_i)_{\text{entrada}} = \sum_i (\rho_i A_i v_i)_{\text{saída}} \quad (2)$$

Como há uma entrada e uma saída, a equação 2 fica:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (3)$$

Usando a equação da conservação da massa entre as seções 1 e 2, para o escoamento incompressível ($\rho = \text{cte}$), tem-se que:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \longrightarrow v_1 A_1 = v_2 A_2 \longrightarrow v_1 = v_2 \frac{A_2}{A_1} \quad (4)$$

Seja “A” a área da seção transversal e β a razão entre os diâmetros da placa de orifício (d) e da tubulação (D), ou seja:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (5)$$

$$\beta^2 = \frac{A_2}{A_1} \quad (6)$$

Através da norma ISO 5167-2 (2003), para que o cálculo seja correto se devem cumprir as seguintes condições:
 $d \geq 12,5 \text{ mm}$ e $0,10 \leq \beta \leq 0,75$ (Flange)

Substituindo a equação (6) em (4), temos:

$$v_1 = v_2 \beta^2 \quad (7)$$

Substituindo a equação (4) em (1), temos:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{v_2^2 - (v_2 \beta^2)^2}{2} \quad \longrightarrow \quad \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{v_2^2 (1 - \beta^4)}{2}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{\Delta P}{\rho} \right)}{1 - \beta^4}} \quad \longrightarrow \quad v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (8)$$

$$v_1 = v_2 \frac{A_2}{A_1} \quad \longrightarrow \quad v_1 = \frac{A_2}{A_1} \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}$$

$$\beta^2 = \frac{A_2}{A_1} \quad \longrightarrow \quad v_1 = \frac{\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (9)$$

A vazão teórica para o fluido é dado por:

$$Q_1 = v_1 A_1 \quad (10)$$

Substituindo a equação (9) em (10), temos a vazão teórica:

$$Q_1 = \frac{A_1 \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (11)$$

A vazão real para o fluido é dado por:

$$Q_{\text{real}} = C_d Q_1 \quad (12)$$

onde C_d é o *coeficiente de descarga* do fluido

Substituindo a equação (11) em (12), temos:

$$Q_{\text{real}} = \frac{C_d A_1 \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \longrightarrow Q_{\text{real}} = C_d \frac{A_1 \frac{A_2}{A_1}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$
$$Q_{\text{real}} = C_d \frac{A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \longrightarrow Q_{\text{real}} = C_e A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (13)$$

onde C_e é o coeficiente de escoamento e A_2 é a área do orifício da placa.

$$C_e = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (14) \quad \Delta P = (\gamma_{\text{Hg}} - \gamma_{\text{água}}) h$$

$\Delta P = P_1 - P_2 = (\rho_{\text{Hg}} - \rho)gh$, onde ρ_{Hg} é a massa específica do fluido manométrico (mercúrio) no manômetro em U; ρ é a massa específica do fluido na tubulação (água); g a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$) e h é o desnível entre os níveis 1 e 2 do fluido manométrico no manômetro em U.

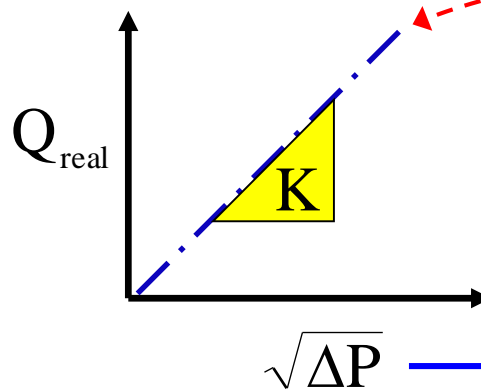
Determinação do valor de C_e experimental:

$$Q_{\text{real}} = C_e A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (15)$$

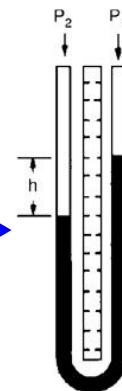
$$Q_{\text{real}} = K \sqrt{\Delta P} \quad (16)$$

$$K = C_e A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho}}$$

Rotâmetro



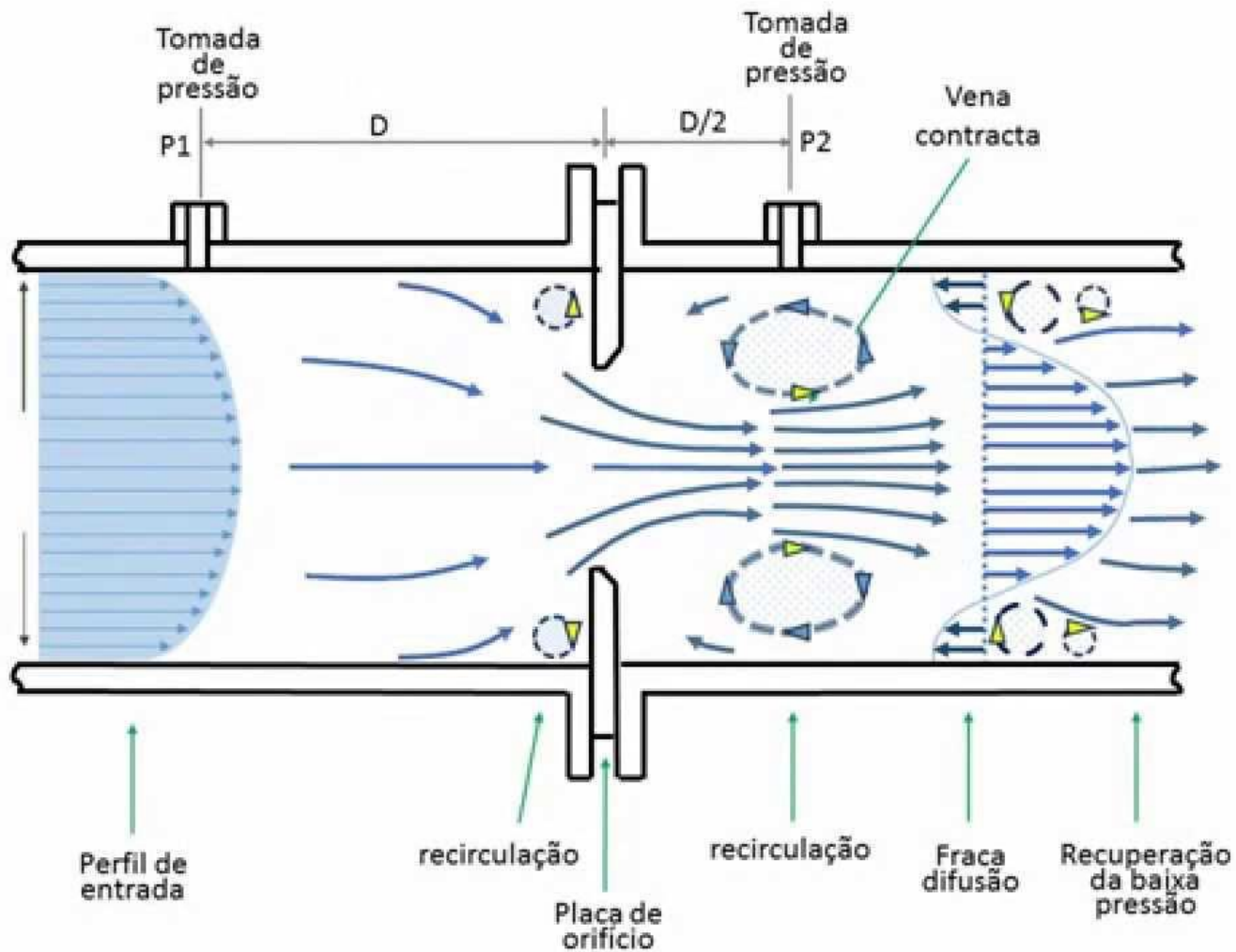
Manômetro em U



Regressão linear

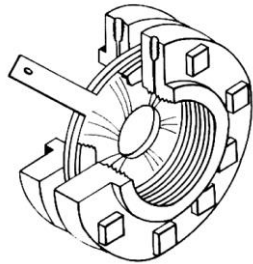
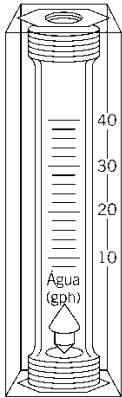
$$\Delta P = (\gamma_{\text{Hg}} - \gamma_{\text{água}}) h$$

Perfil de velocidade em condições reais na placa de orifício

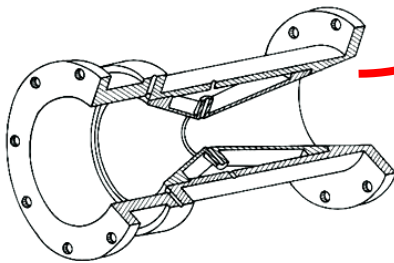


Arranjo Físico

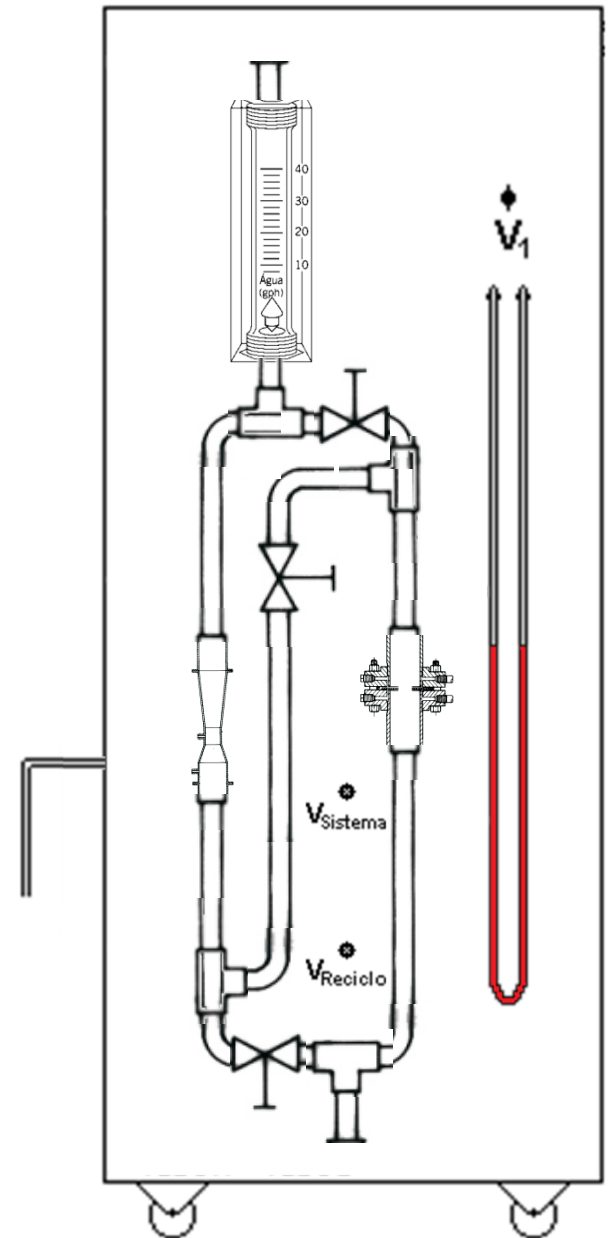
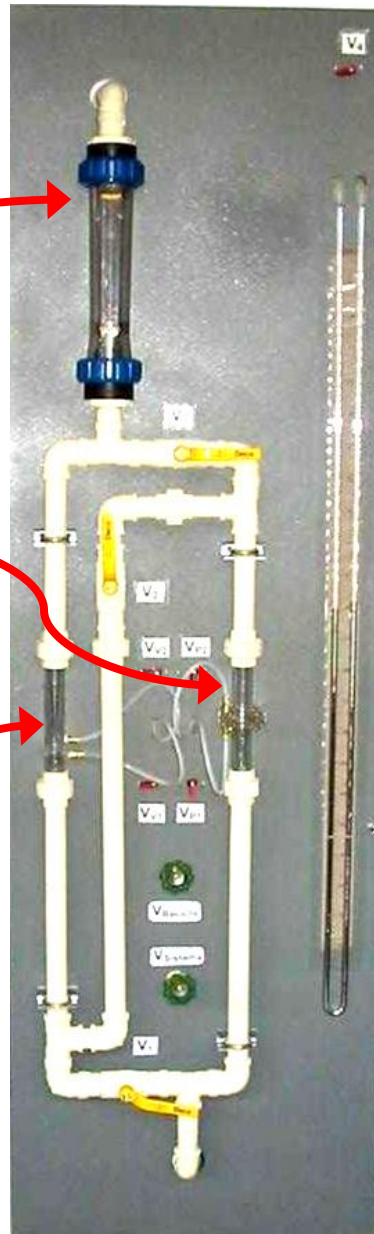
Rotâmetro



Placa de orifício



Venturi



Procedimento Experimental

Calibração do Rotâmetro

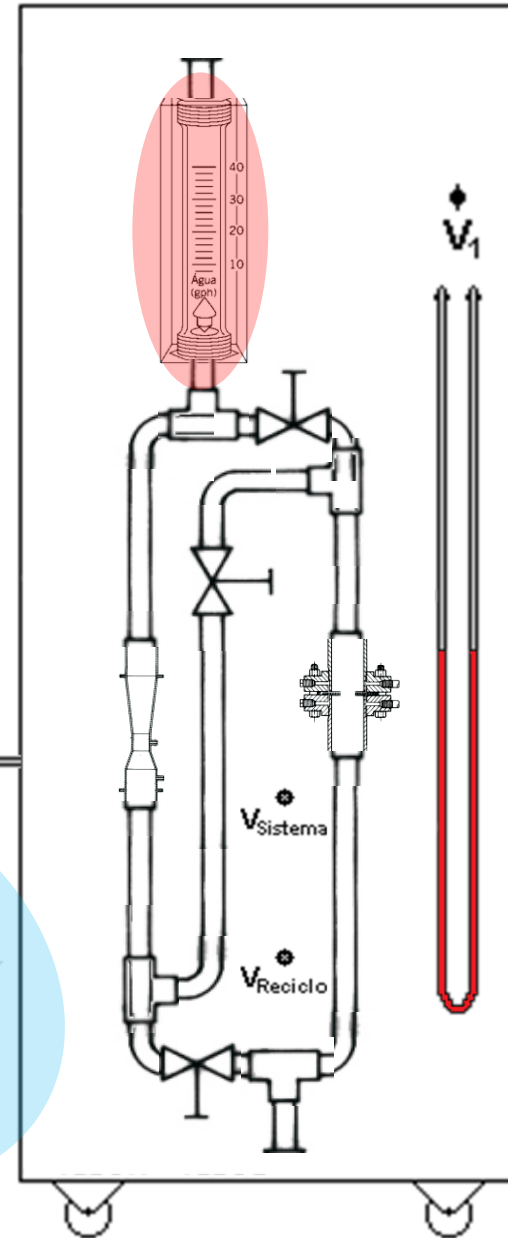
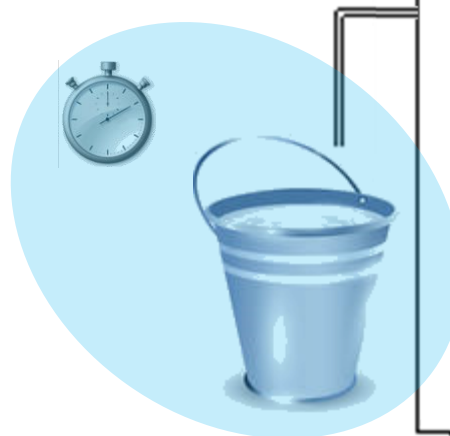
- Passo 1:** Pesar o balde vazio e anotar a massa;
- Passo 2:** Ligar a bomba centrífuga;
- Passo 3:** Abrir as válvulas referentes a passagem da água pelo Venturi e placa de orifício em série;
- Passo 4:** Conferir a escala do rotâmetro medindo a vazão com um cronômetro e um balde para a coleta de água.
- Passo 5:** Calcular a vazão e comparar com o rotâmetro.

Dados experimentais:

$m_{\text{balde}} =$

$T_{\text{água}} =$

Tempo (s)		
Massa (kg)		
$Q_{\text{rotâmetro}}$		
$\text{cmHg}_{1,\text{po}}$		
$\text{cmHg}_{2,\text{po}}$		
$\text{cmHg}_{1,\text{v}}$		
$\text{cmHg}_{2,\text{v}}$		



Procedimento Experimental

Calibração da Placa de Orifício e Venturi

Passo 1: Ligar a bomba centrífuga;

Passo 2: Abrir as válvulas referentes a passagem da água pela placa de orifício e Venturi em série e ajustar uma vazão no rotâmetro;

Passo 3: Medir a altura manométrica da placa de orifício e do Venturi;

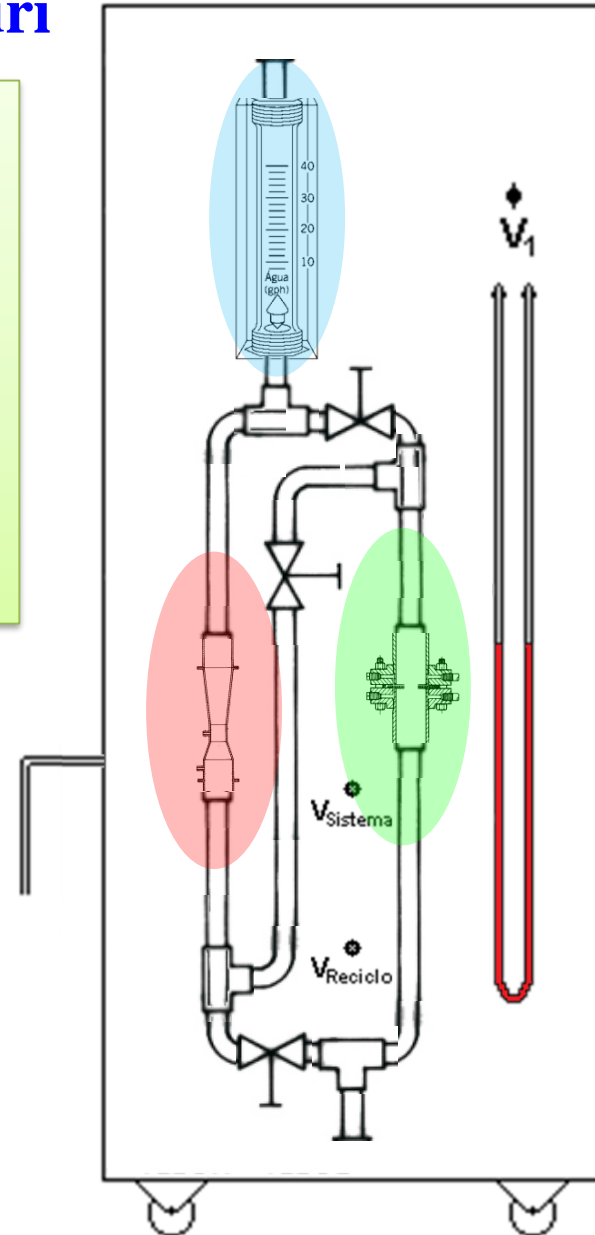
Passo 4: Repetir os mesmos passos com a passagem paralela do fluido passando pela placa de orifício e Venturi.

Dados experimentais:

$m_{\text{balde}} =$

$T_{\text{água}} =$

Tempo (s)		
Massa (kg)		
$Q_{\text{rotâmetro}}$		
$\text{cmHg}_{1,\text{po}}$		
$\text{cmHg}_{2,\text{po}}$		
$\text{cmHg}_{1,\text{v}}$		
$\text{cmHg}_{2,\text{v}}$		



Procedimento Experimental

$d_{PO} = 0,012 \text{ m}$ (Diâmetro interno do orifício da placa de orifício)

$D_{PO} = 0,026 \text{ m}$ (Diâmetro interno da tubulação da placa de orifício)

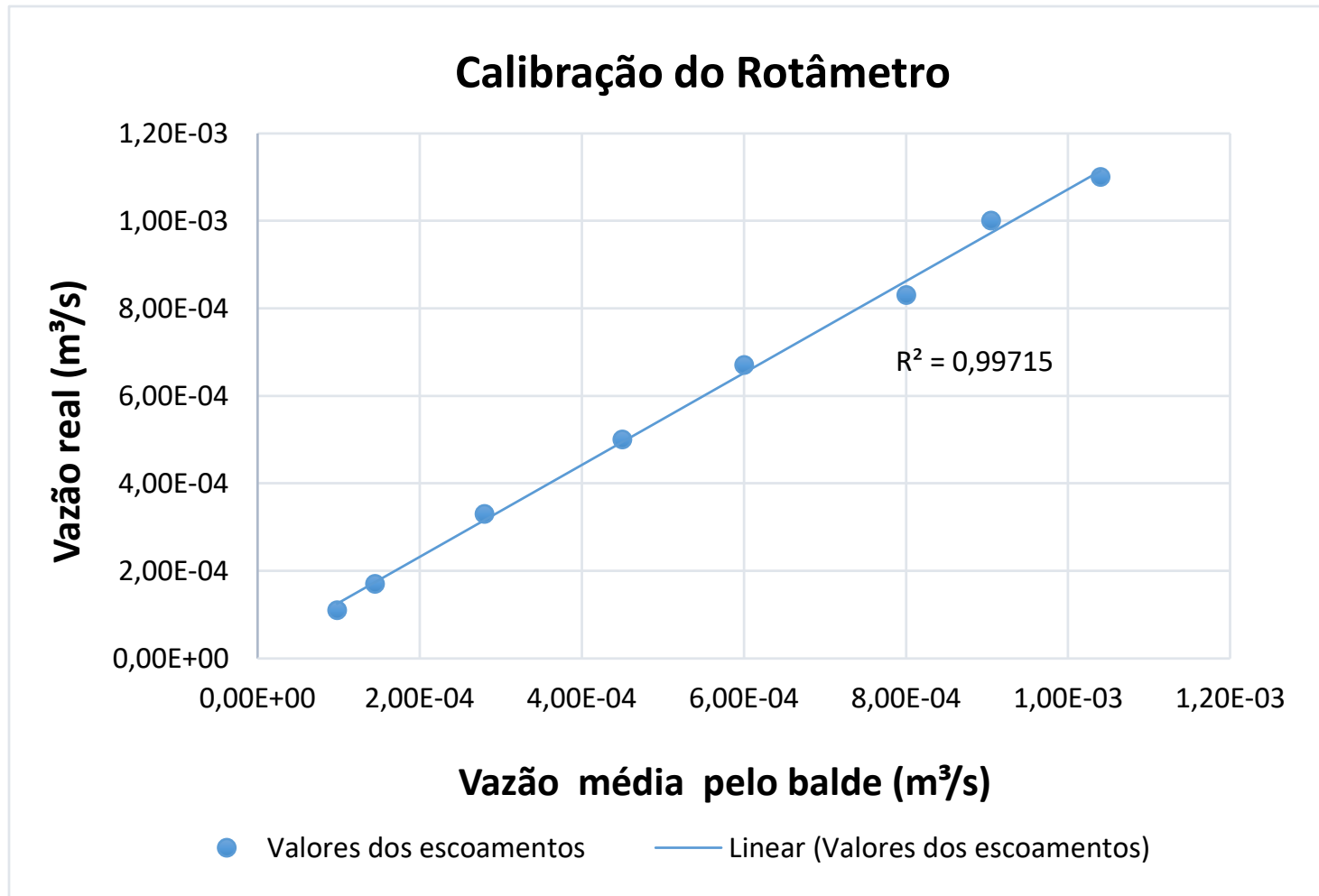
$d_V = 0,010 \text{ m}$ (Diâmetro interno da garganta do Venturi)

$D_V = 0,026 \text{ m}$ (Diâmetro interno da tubulação do Venturi)

Dados experimentais para a Placa de Orifício e Venturi

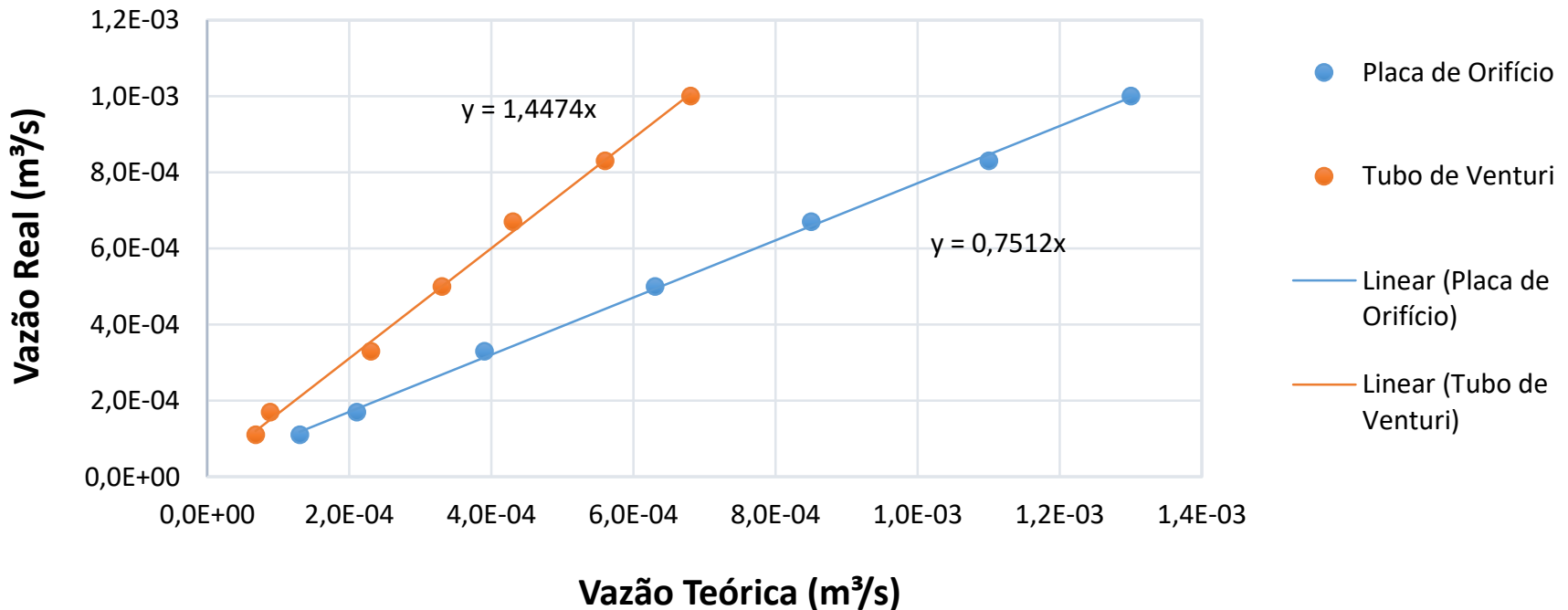
$Q_{\text{rotâmetro}}$ (L/min)	$Q_{\text{rotâmetro}}$ (m^3/s)	Re	h (cm)	h (m)	ΔP ($\text{kg}/\text{m}.\text{s}^2$)	$Q_{\text{teórico}}$ (m^3/s)	C_e (exp)	C_e (teór)	Erro (%)
6,5									
10									
20									
30									
40									
50									
60									
65									

- Plotar os dados de vazão volumétrica (rotâmetro) versus vazão volumétrica (medida pelo balde) em série e paralelo e ajustar os dados através de uma regressão linear.

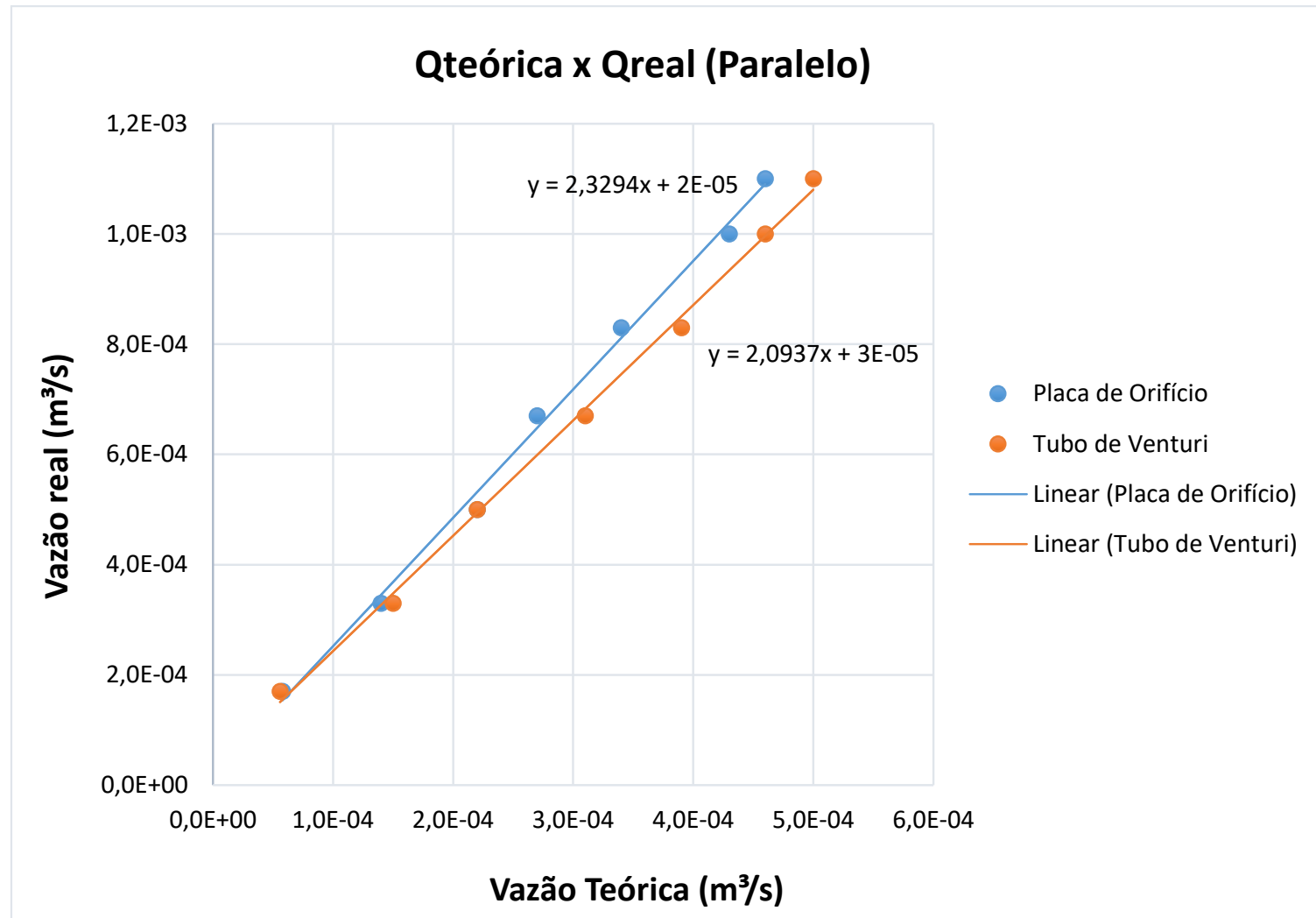


- Plotar os dados experimentais de vazão volumétrica (rotâmetro) versus vazão teórica e realizar uma regressão linear, para a placa de orifício e Venturi em série.

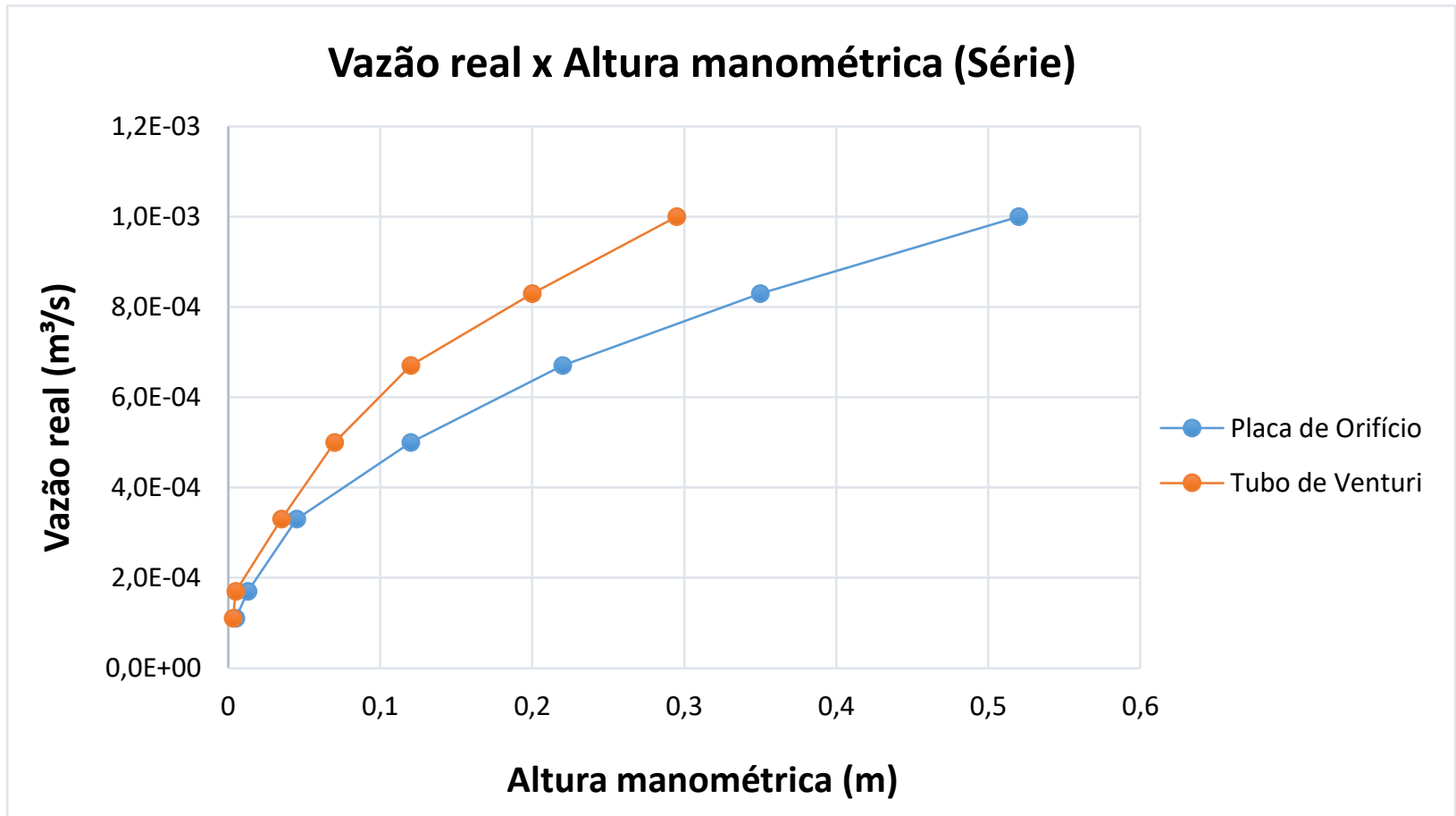
Qteórica x Qreal (Série)



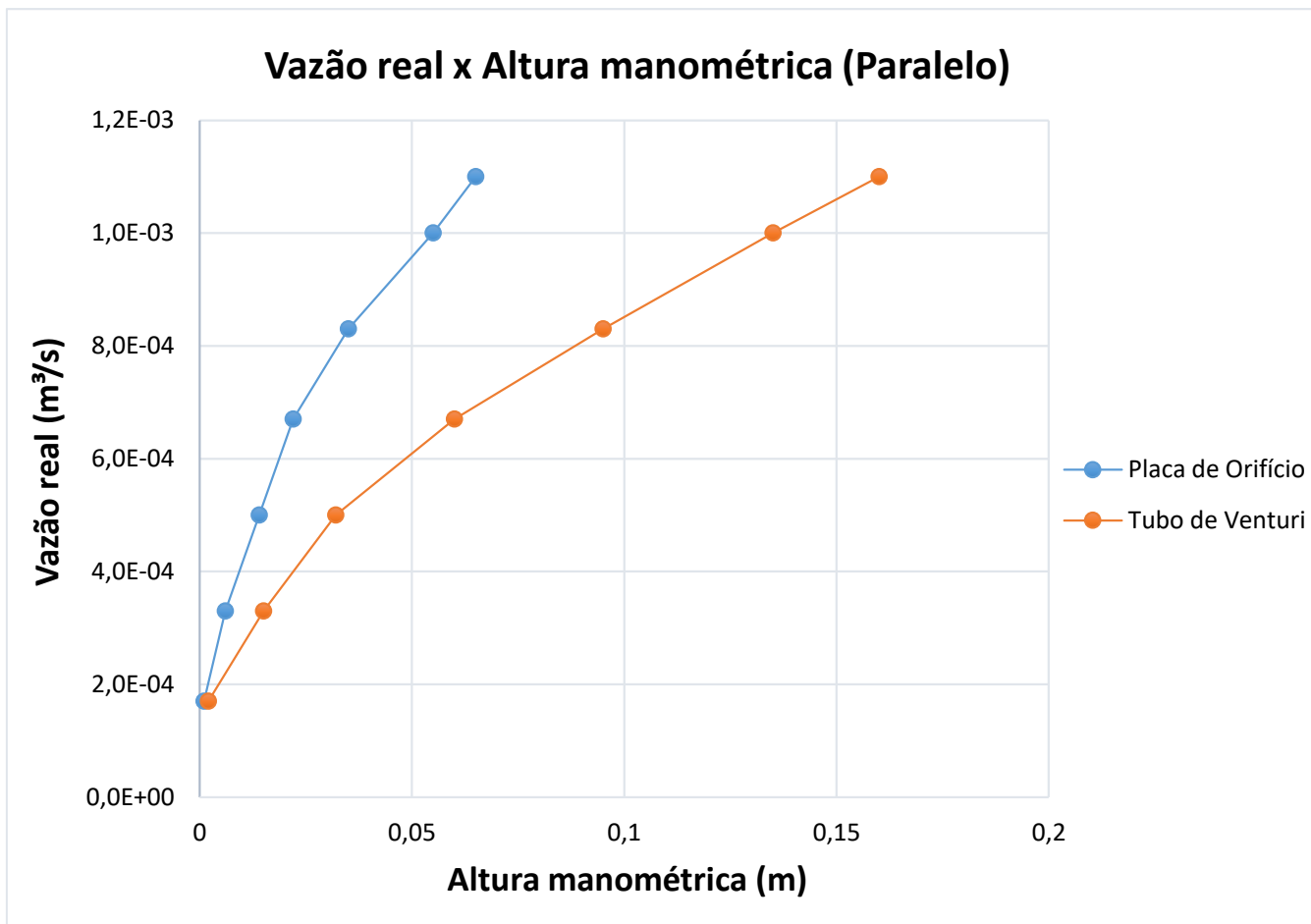
- Plotar os dados experimentais de vazão volumétrica (rotâmetro) versus vazão teórica e realizar uma regressão linear, para a placa de orifício e Venturi em paralelo.



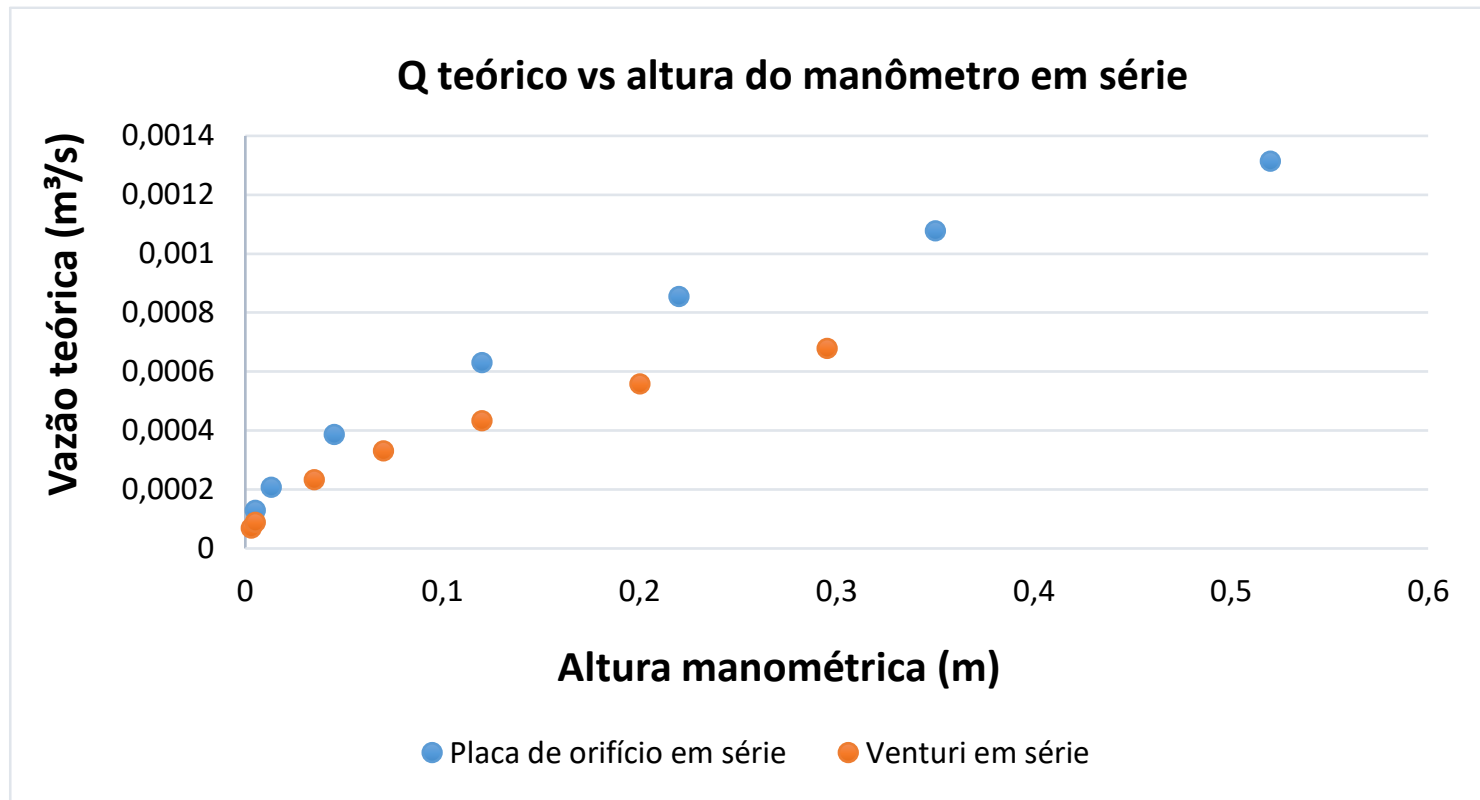
- Plotar o gráfico vazão real versus altura h (manômetro) para a placa de orifício e Venturi em série.



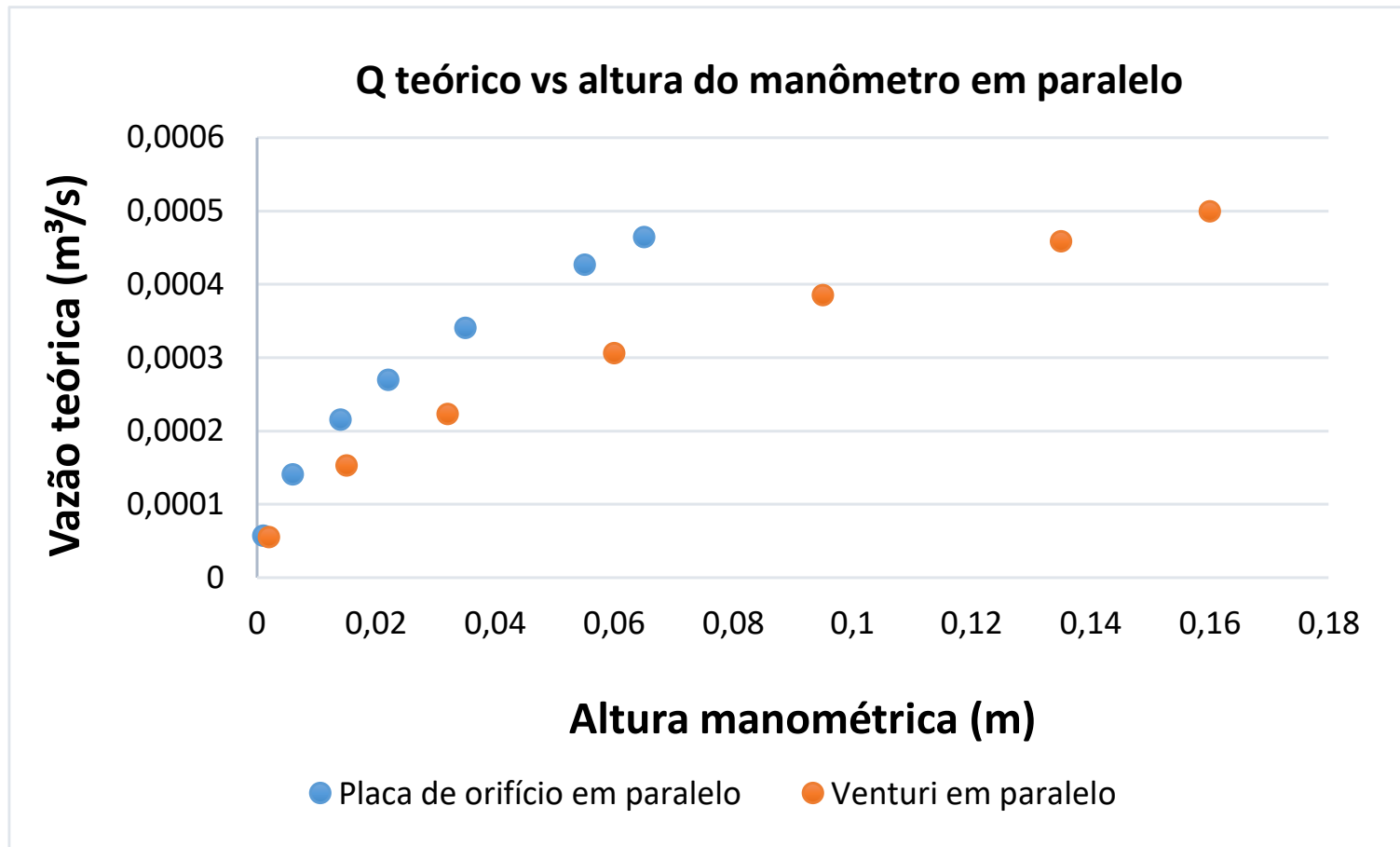
- Plotar o gráfico vazão real versus altura h (manômetro) para a placa de orifício e Venturi em paralelo.



- Plotar o gráfico vazão teórica versus altura h (manômetro) para a placa de orifício e Venturi em série.



- Plotar o gráfico vazão teórica versus altura h (manômetro) para a placa de orifício e Venturi em paralelo.



Determinação do coeficiente de escoamento experimental

- Com o valor da inclinação da reta, obtêm-se o valor do coeficiente de descarga experimental, C_d . Depois calcular o valor do coeficiente de escoamento experimental, C_e para a placa de orifício e Venturi em série e paralelo.

$$Q_{\text{real}} = C_d Q_1$$

$$\beta = \frac{d}{D}$$

$$C_e = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

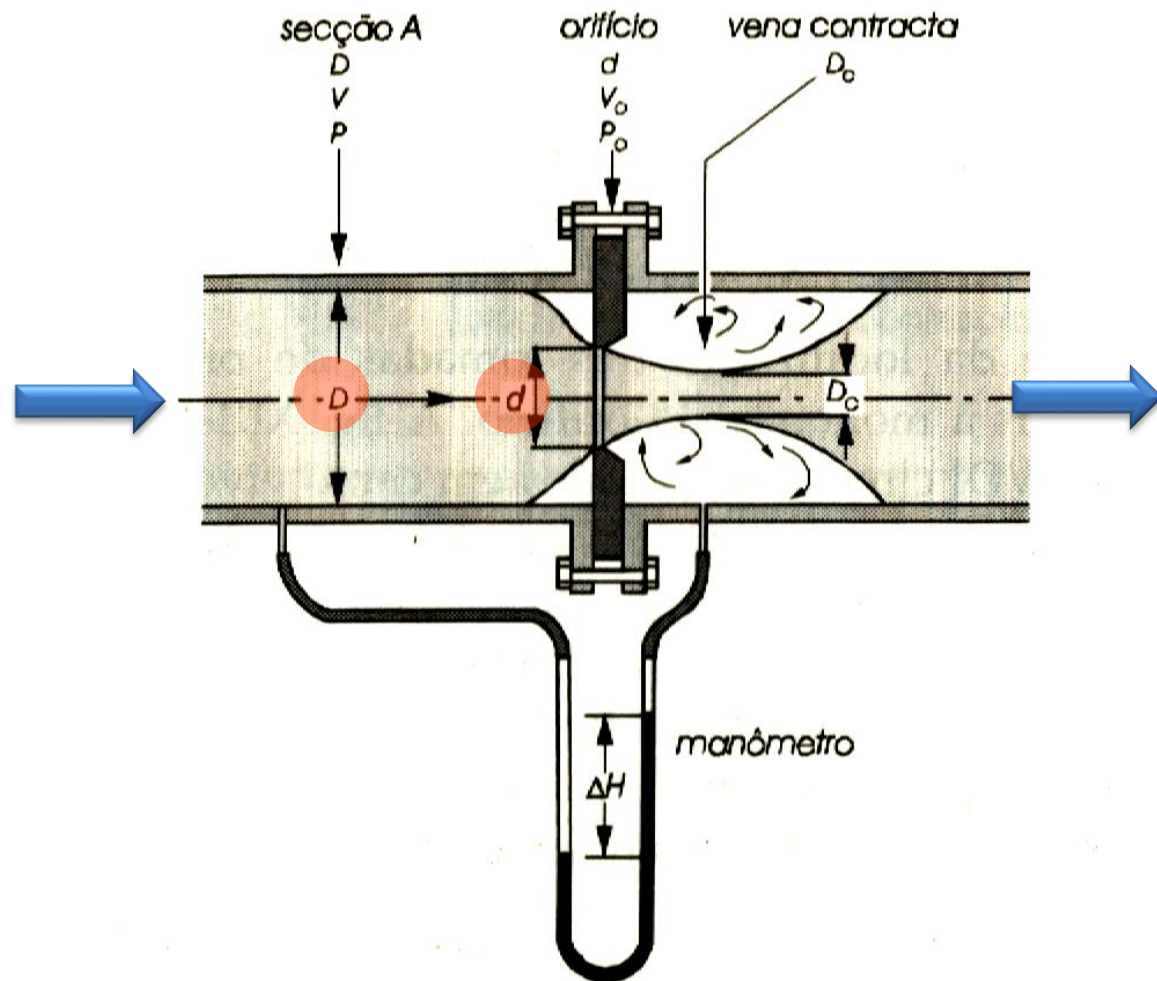
Determinação do valor teórico do coeficiente de escoamento (C_e) da placa de orifício:

Placa de orifício

$$\beta = \frac{d}{D}$$

$$R_e = \frac{4 \cdot \rho \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \mu}$$

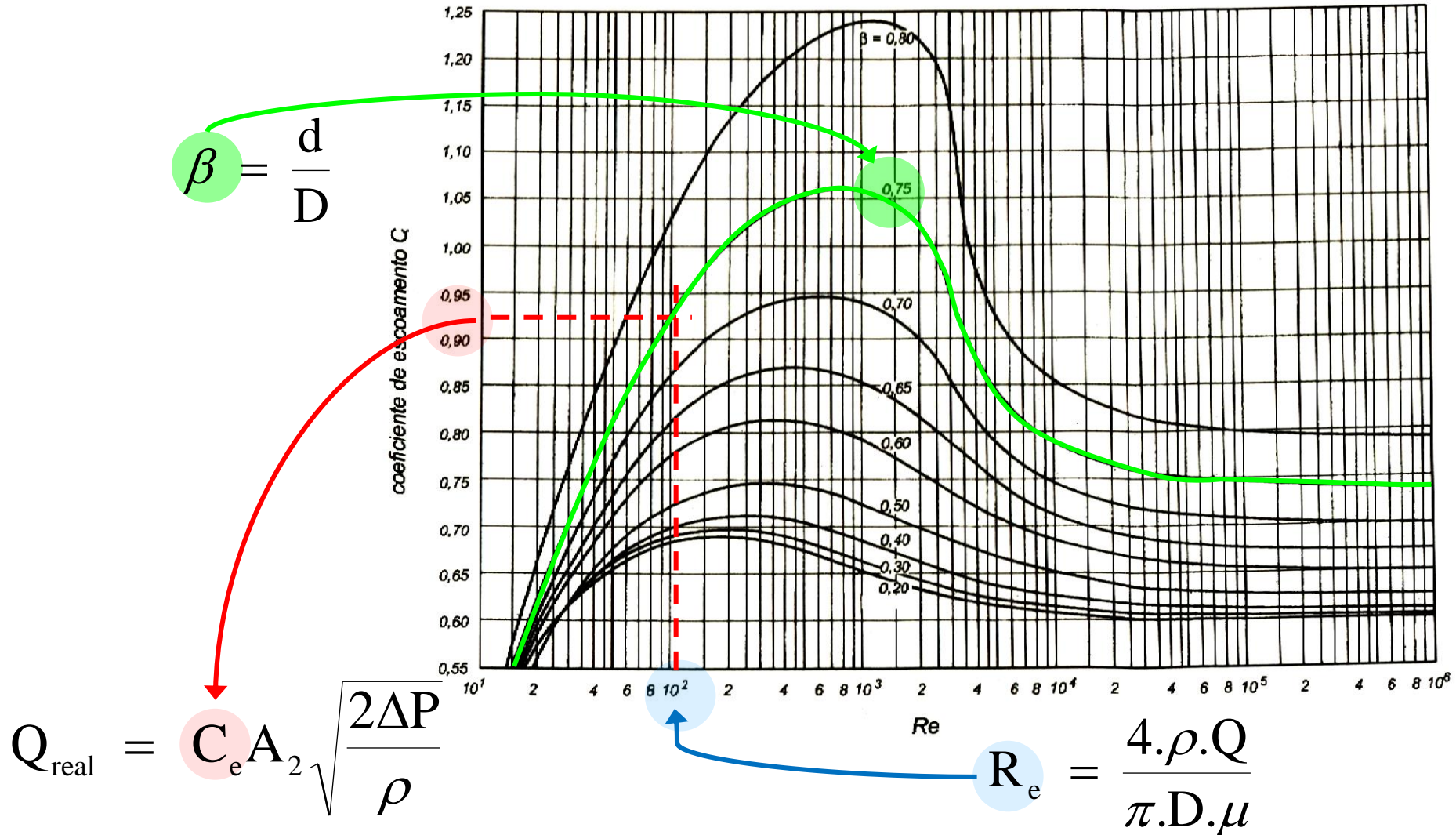
$$Q_{\text{real}} = C_e A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$



Determinação do valor teórico do coeficiente de escoamento (C_e) da placa de orifício:

Placa de orifício

Obs: C é o coeficiente de escoamento teórico na figura.



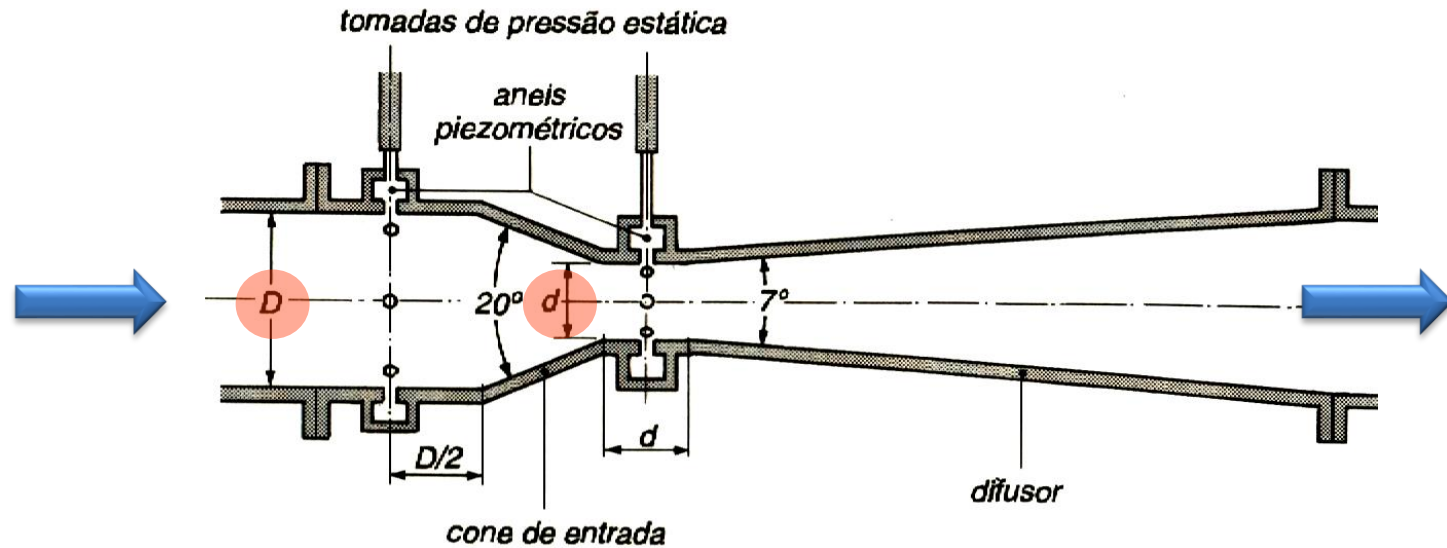
Determinação do valor teórico do coeficiente de escoamento (C_e) do Venturi:

Tubo Venturi

$$\beta = \frac{d}{D}$$

$$R_e = \frac{4 \cdot \rho \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \mu}$$

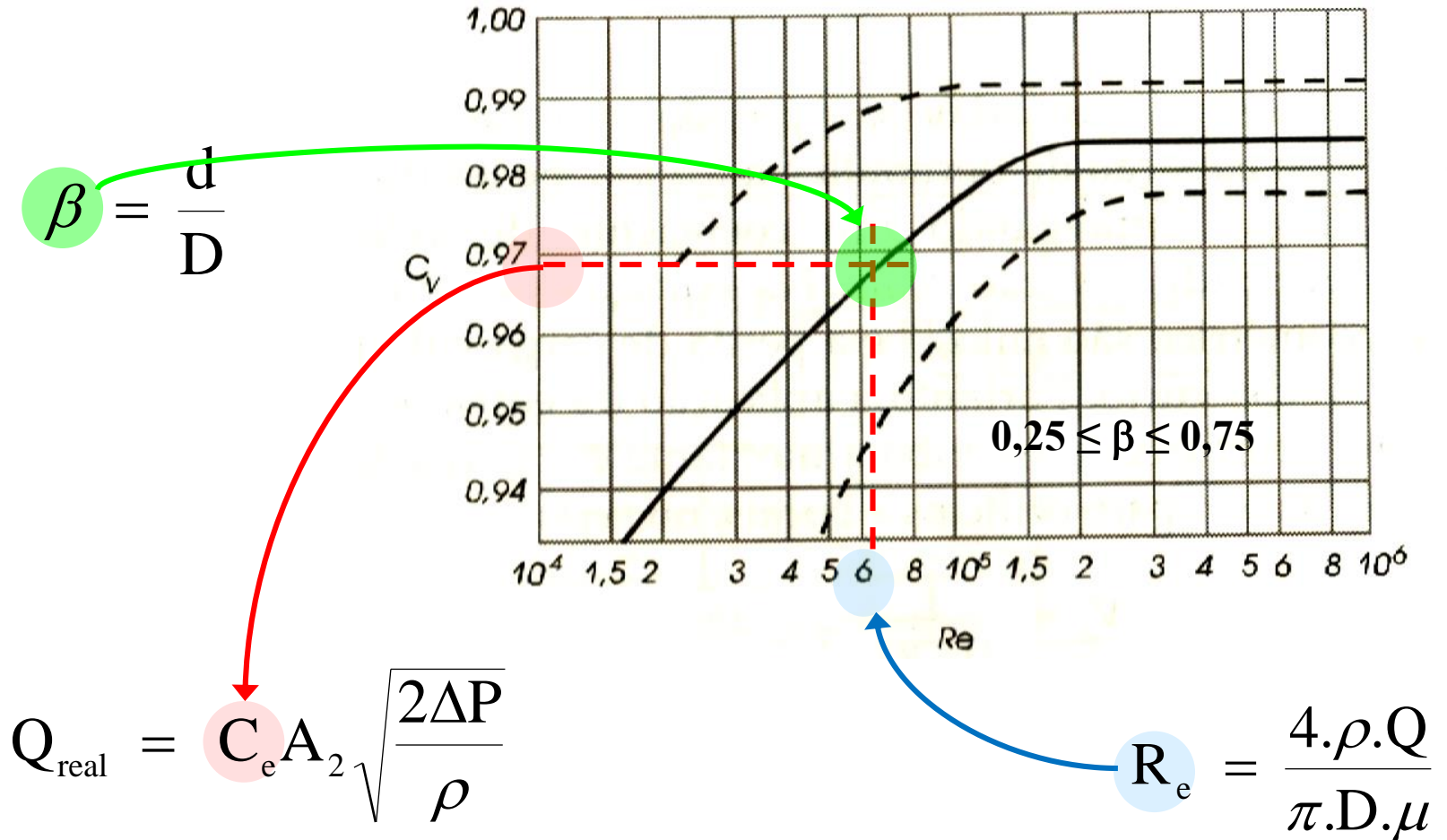
$$Q_{\text{real}} = C_e A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$



Determinação do valor teórico do coeficiente de escoamento (C_e) do Venturi:

Tubo Venturi

Obs: C_V é o coeficiente de velocidade = coeficiente de escoamento



Determinação do coeficiente de escoamento teórico

- Para o valor de β e para um valor médio do 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, calcula-se o erro.

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