

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PQI-3202: FENÔMENOS DE TRANSPORTE I**

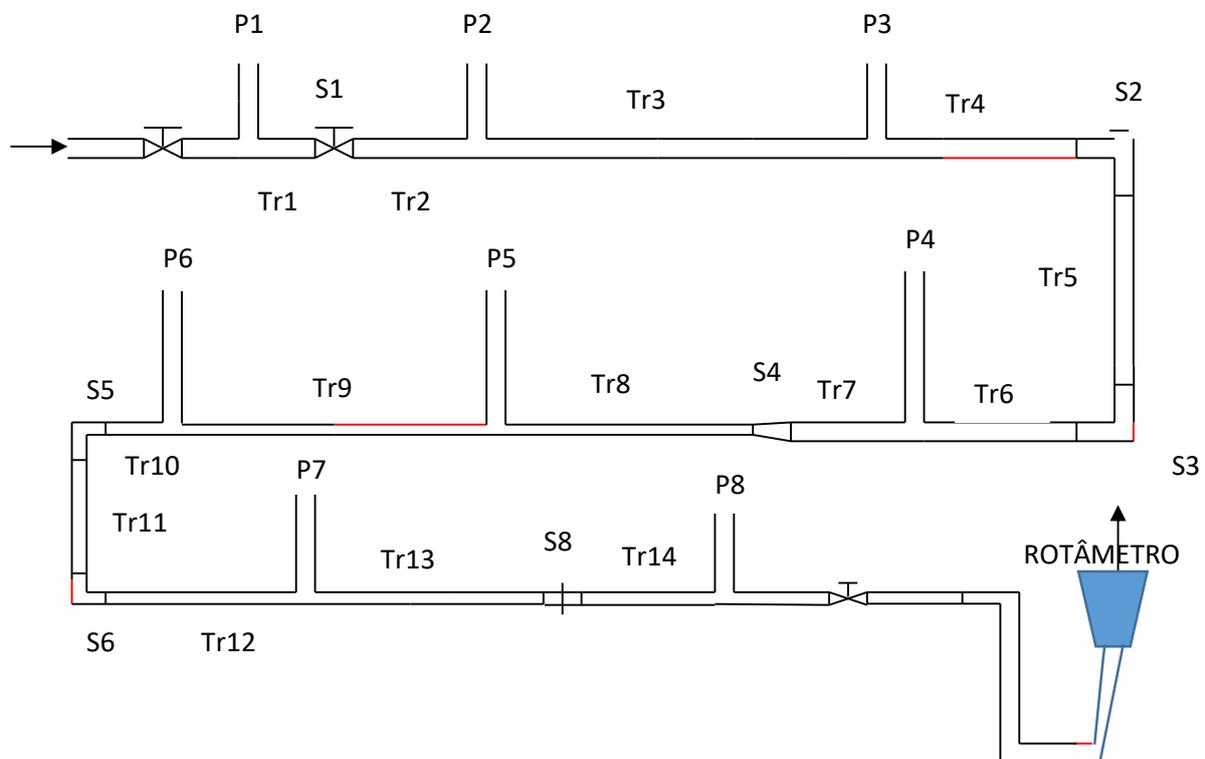
**LABORATÓRIO: ROTEIRO DE EXPERIMENTOS**

***PAINEL DE PIEZÔMETROS – PERDA DE CARGA***

1. OBJETIVOS:

- determinar a perda de carga em singularidades;
- determinar a perda de carga em trecho reto de tubulação.

2. ESQUEMA DA APARELHAGEM



Tubulação em PVC:

- diâmetro interno do trecho I: 32mm
- diâmetro interno do trecho II: 25mm

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Medidas da vazão:

A vazão será medida com um rotâmetro. Observar a escala do rotâmetro e não ultrapassar o valor máximo permitido que será informado antes do experimento para cada equipamento. O número de vazões ensaiadas deve ser de, no mínimo, seis valores diferentes e espaçados de forma a cobrir toda a escala possível para o equipamento.

### 3.2. Obtenção das perdas de carga:

Antes de iniciar o experimento, procure estudar o painel, verificando tipos de singularidades, maneira como as tomadas de pressão são feitas e o controle da vazão. Para cada vazão estabelecida, anotar as alturas das colunas de água em cada piezômetro. Procurar ler com cuidado, já que todos os resultados dependem das leituras efetuadas. Não esquecer de medir o comprimento dos trechos retos de tubulação.

## 4. RELATÓRIO

### **O RELATÓRIO DEVE APRESENTAR OS ITENS A SEGUIR DESCRITOS. EMPREGAR O SISTEMA SI DE UNIDADES**

- Fazer uma tabela contendo:
  - vazões utilizadas;
  - diferença de alturas entre dois piezômetros sucessivos no painel.
- Para cada trecho de medida (entre dois piezômetros):
  - indicar como calcular a perda de carga para cada singularidade a partir dos dados medidos. Apresente o equacionamento;
- Apresentar uma tabela com os seguintes resultados: vazão, trecho reto e perda de carga.
- Apresentar uma tabela com os seguintes resultados: vazão, singularidade e perda de carga.
- Comparar em um único gráfico a perda de carga em função da vazão para cada singularidade. Comentar os resultados obtidos.
- Escolher duas singularidades quaisquer e estimar a perda de carga para um dado valor de vazão, utilizando algum método teórico. Indicar o método, os valores utilizados para a estimativa e comparar com o valor obtido experimentalmente.
- Analisar os resultados dos dois trechos lineares (Tr3 e Tr9) com diâmetros diferentes: verificar tipo de regime de escoamento (laminar, transição turbulento), traçar em um único gráfico a perda de carga em função da vazão. Comparar e comentar os resultados obtidos.
- **OBSERVAÇÃO: DEIXAR CLARO QUAIS OS VALORES DAS CONSTANTES UTILIZADAS, AS UNIDADES EMPREGADAS EM CADA CÁLCULO, AS EQUAÇÕES CONSIDERADAS.**

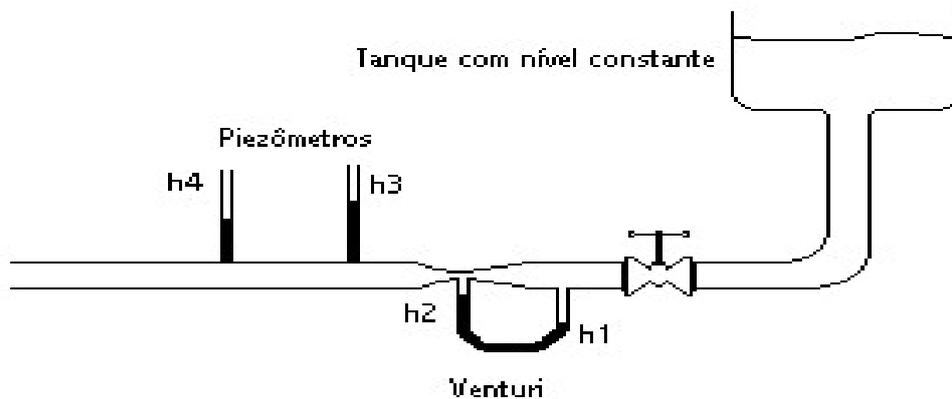
## ***CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR VENTURI E PERDA DE CARGA EM TRECHO RETO DE TUBULAÇÃO***

### 1. OBJETIVO

Este experimento tem como objetivo:

- a calibração do medidor Venturi;
- a determinação de perda de carga em tubo reto.

### 2. ESQUEMA DA APARELHAGEM



### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Calibração do medidor Venturi

Para uma dada vazão, em regime estacionário, medir o volume de líquido coletado em um intervalo de tempo cronometrado. É importante que a tubulação esteja cheia de líquido. Medir, para esta etapa do experimento, as alturas  $h_1$  e  $h_2$  do fluido manométrico do medidor Venturi. Estabelecer, pelo menos, seis vazões diferentes e para cada vazão, medir por duas vezes o volume coletado, o tempo e a diferença de alturas  $h_1$  e  $h_2$ . Não há necessidade de medir as alturas  $h_3$  e  $h_4$  para esta etapa do experimento.

#### 3.2. Obtenção da perda de carga em tubo reto.

Usando vazões diferentes das adotadas durante a calibração do medidor Venturi, proceder do seguinte modo:

- estabelecer uma vazão;
- medir a variação de altura  $h_1 - h_2$ ;
- medir a variação de altura  $h_3 - h_4$ .

Observação: não esquecer de medir a distância entre os dois piezômetros (entre as alturas  $h_3$  e  $h_4$ ) e o diâmetro da tubulação.

#### 4. RELATÓRIO

##### **O RELATÓRIO DEVE APRESENTAR OS ITENS A SEGUIR DESCRITOS. EMPREGAR O SISTEMA SI DE UNIDADES**

###### 4.1. Calibração do medidor Venturi

- Apresentar uma tabela com os seguintes dados:  $\Delta h_{12}$ ,  $\Delta P_{12}$ ,  $\Delta V$ ,  $\Delta t$ ,  $Q$ ,  $Q_{\text{média}}$ , onde  $V$  é o volume coletado,  $t$  é o tempo cronometrado,  $Q$  é a vazão obtida em cada medida e  $Q_{\text{média}}$  é a vazão média das três medidas.
- Construir a curva de calibração do medidor Venturi: Vazão volumétrica ( $Q_{\text{média}}$ ) x desnível observado no medidor Venturi ( $\Delta h_{12}$ ).
- A vazão dada pelo medidor Venturi pode ser relacionada por uma expressão do tipo  $Q_{\text{média}} = a(\Delta P_{12})^b$ . Justifique a validade desta expressão com base nos conhecimentos teóricos. O que representam as constantes **a** e **b**?
- Construir o gráfico de  $\log(Q_{\text{média}})$  x  $\log(\Delta P_{12})$ .
- Desprezando eventuais pontos discrepantes, obter pelo método da regressão linear os parâmetros **a** e **b**. Compare, se possível, com os valores esperados.
- Obtenha com essa expressão os valores das vazões correspondentes ao  $\Delta P_{12}$  ensaiado. Compare os valores obtidos com a expressão e os valores obtidos experimentalmente. Apresente os desvios percentuais.
- Com os valores obtidos no experimento mostre como calcular o  $C_v$  do medidor Venturi. Comente.

###### 4.2. Determinação da perda de carga em tubo reto.

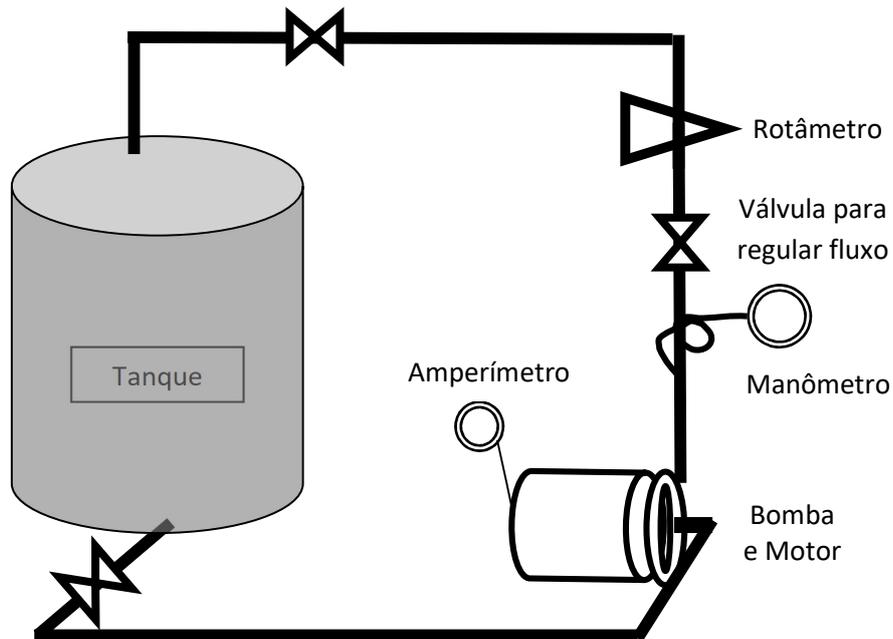
- Apresentar uma tabela com os seguintes dados:  $\Delta h_{12}$ ,  $\Delta P_{12}$ ,  $Q$ ,  $\Delta h_{34}$  e  $\Delta P_{34}$ .
- Construir o gráfico da perda de carga no trecho em função da vazão. Comente sobre o tipo de curva obtida.
- Calcular o fator de atrito,  $f$ , para cada medida feita. Construir uma tabela apresentando  $f$  e  $Re$ .
- Construir o gráfico de  $f$  x  $Re$ .
- Comparar o gráfico obtido com os gráficos encontrados na literatura. Anexar os gráficos com os quais a comparação é feita.
- **OBSERVAÇÃO: DEIXAR CLARO QUAIS OS VALORES DAS CONSTANTES UTILIZADAS, AS UNIDADES EMPREGADAS EM CADA CÁLCULO, AS EQUAÇÕES CONSIDERADAS.**

## ***CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA.***

### 1. OBJETIVO:

- Determinação da curva característica de uma bomba centrífuga.

### 2. ESQUEMA DA APARELHAGEM



### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Determinação da curva característica da bomba.

Operar a bomba em diferentes pressões (diferentes vazões). Para cada vazão, seguir o procedimento descrito a seguir.

- ✓ Ajustar a vazão desejada por meio da válvula de regulação de fluxo instalada na saída da bomba.
- ✓ Medir a vazão através do rotâmetro.
- ✓ Durante a operação de bombeamento, anotar a pressão lida no manômetro e a corrente lida no amperímetro.

#### 4. RELATÓRIO.

##### **O RELATÓRIO DEVE APRESENTAR OS ITENS A SEGUIR DESCRITOS. EMPREGAR O SISTEMA SI DE UNIDADES**

- ✓ Fazer a tabela dos resultados obtidos para o levantamento da curva característica da bomba: pressão na saída da bomba, corrente medida e vazão bombeada.
  - ✓ Construir o gráfico de pressão na saída da bomba em função da vazão.
  - ✓ Construir o gráfico da altura manométrica na saída em função da vazão incluindo a situação de vazão zero (shut off).
  - ✓ Construir o gráfico da potência em função da vazão. Para este caso, considerar que o motor é trifásico, sendo a potência dada por  $P = VI\cos\phi$ , onde P é a potência, V é a diferença de potencial da rede de alimentação (220V, neste caso), I é a corrente medida pelo amperímetro (em Ampère),  $\cos\phi$  é o cosseno da fase e vale 0,85.
- **OBSERVAÇÃO: DEIXAR CLARO QUAIS OS VALORES DAS CONSTANTES UTILIZADAS, AS UNIDADES EMPREGADAS EM CADA CÁLCULO, AS EQUAÇÕES CONSIDERADAS.**

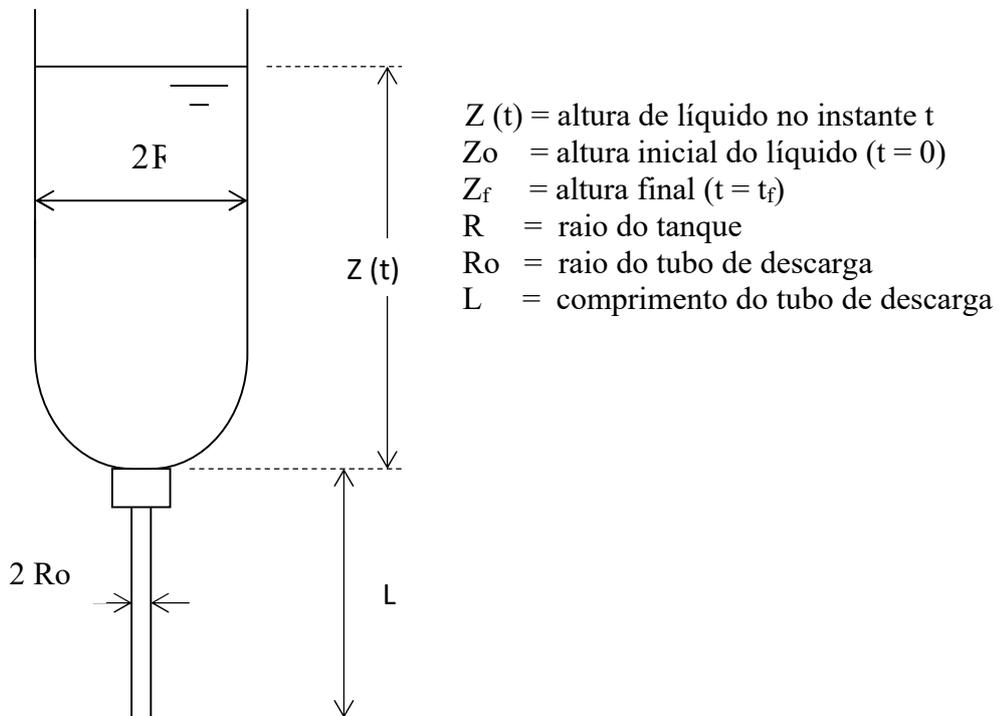
## ***DESCARGA DE TANQUE***

### 1. OBJETIVO

Mostrar a aplicação de balanços de massa e energia na modelagem de um sistema com escoamento em regime pseudo-estacionário. O sistema é constituído de um tanque cilíndrico provido de um tubo vertical conectado no fundo. Estuda-se a descarga do tanque pelo fundo, empregando-se tubos de diferentes comprimentos. Resultados experimentais de tempo de descarga são comparados com os previstos pelo modelo teórico.

### 2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Consiste de tanque (graduado) de seção cilíndrica e tubos cilíndricos, encaixáveis na saída do tanque, com diferentes comprimentos.



### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

- Instalar um tubo na saída do tanque;
- anotar as dimensões do equipamento;
- encher o tanque até um nível  $Z_o$  e medir a temperatura;
- medir o nível  $Z(t)$  em função do tempo, até atingir  $Z_f$ ;
- repetir as etapas anteriores para os demais tubos.

#### 4. RELATÓRIO

- Apresentar a dedução da expressão que relaciona o tempo de descarga com as características do sistema, a partir dos balanços de massa e energia e considerando-se as seguintes hipóteses:
  - regime pseudo-estacionário para o balanço de energia;
  - desprezar efeito de entrada no tubo;
  - desprezar energia cinética no tanque e na saída do tubo;
  - tubo liso
  - regime laminar

Expressão final que deve ser obtida para regime laminar:

$$t = \frac{8\mu LR^2}{\rho g R_0^4} \ln\left(\frac{L + Z_0}{L + Z(t)}\right)$$

Não há necessidade de apresentação de dedução da expressão para regime turbulento, que é dada por :

$$t = \frac{0,4955(R/R_0)^2 \mu^{1/7} L^{4/7}}{\rho^{1/7} g^{4/7} R_0^{5/7}} \left[ (L + Z_0)^{3/7} - (L + Z(t))^{3/7} \right]$$

- Calcular o valor do número de Reynolds no tubo de descarga para as condições iniciais e finais de cada ensaio.
- Comparar os valores de tempo de descarga teóricos (  $t$  ) com os experimentais (  $t_{exp}$  ). Apresentar um gráfico de  $t/t_{exp}$  em função do comprimento L dos diferentes tubos .
- Analisar as hipóteses adotadas no item (a) e fazer o equacionamento desconsiderando as hipóteses mais restritivas. Nas novas condições apresentar um roteiro de cálculo do tempo de descarga teórico indicando as equações a serem resolvidas.
- **OBSERVAÇÃO: DEIXAR CLARO QUAIS OS VALORES DAS CONSTANTES UTILIZADAS, AS UNIDADES EMPREGADAS EM CADA CÁLCULO, AS EQUAÇÕES CONSIDERADAS.**