

## **Prática 01: REOLOGIA DOS FLUIDOS**

### **1. Objetivo:**

Estudo das propriedades reológicas de fluidos não newtonianos.

### **2. Fundamentos:**

A viscosidade é uma força volumétrica de atrito interno que aparece no movimento de camadas deslizando umas sobre as outras, dando origem a tensões tangenciais de cisalhamento. Com isso, o atrito interno impede ou oferece uma resistência ao deslizamento das partículas, umas sobre as outras. Tendo uma idéia intuitiva de viscosidade e sabendo reconhecer um líquido mais ou menos viscoso; esta noção intuitiva é dada, por exemplo, pela maior ou menor facilidade com que um líquido escorre sobre uma superfície inclinada.

A Lei de Newton da viscosidade relaciona a tensão tangencial ( $F/A$  = Força por unidade de área) à taxa de variação espacial de velocidade, de acordo com a Equação 1.

$$\tau_{rz} = -\mu \frac{dv_z}{dr} \quad (1)$$

Os fluidos ditos não newtonianos não obedecem a equação 1. Para esses fluidos, aplica-se a expressão da equação 2.

$$\tau_{rz} = -\eta \frac{dv_z}{dr} \quad (2)$$

Na equação 2,  $\eta$  pode ser expresso por uma variedade de modelos ou expressões empíricas, de acordo com o tipo de fluido não newtoniano em questão. Bird *et al.* (2004) e Perry e Chilton (1985) apresentam modelos que permitem a estimativa de  $\eta$  para diversos materiais.

Um exemplo de aplicação é o fluido incompressível do tipo *Power-Law*, descrito por um modelo de potência, em um tubo circular. A expressão para a tensão cisalhante para um fluido do tipo *Power Law* toma a forma da equação 3.

$$\tau_{rz} = -m \gamma^{n-1} \frac{dv_z}{dr} \quad (3)$$

Manipulações matemáticas descritas em Bird *et al.* (2004) permitem uma relação entre a vazão e a queda de pressão para o escoamento incompressível em um tubo circular, para um fluido tipo *Power Law*, como mostra a Equação 4.

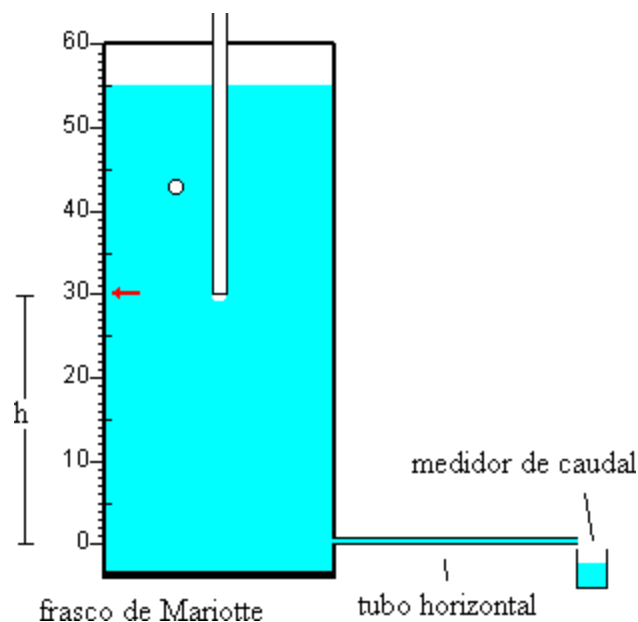
$$W = \frac{\rho \pi R^3}{[(1/n) + 3]} \left( \frac{R \Delta P}{2mL} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

A equação 4 pode ser simplificada na equação de *Hagen-Poiseuille* quando  $n = 1$  e  $m = \mu$ .

### 3. Materiais

- Frasco de Mariotte com tomada e saída para capilar e uma escala graduada
- Picnômetro
- Termômetro
- Proveta
- Cronômetro
- Água destilada
- Solução de sacarose concentrada

### 4. Procedimento Experimental



A determinação das propriedades reológicas do fluido é feita utilizando um tubo capilar cujo diâmetro interno é desconhecido. A calibração do capilar é feita com água destilada, uma vez que suas propriedades reológicas são conhecidas.

De posse das propriedades da água nas condições do experimento, utiliza-se o equipamento anotando-se a vazão obtida para cada altura. Com isso, o diâmetro do capilar é dado pela equação 5.

$$D = \sqrt[4]{\frac{128\mu LW}{\rho\pi\Delta P}} \quad (5)$$

Após determinado diâmetro do capilar, efetua-se o mesmo procedimento para a solução de sacarose concentrada. Entretanto, agora se conhece o valor de D e deve-se determinar os parâmetros da Equação 4.



## 5. Questões

- Pesquisar outros tipos de viscosímetros existentes no mercado e dizer qual deles parece ser o mais interessante.
- Pesquisar como funciona o frasco de Mariotte.
- Com base nos resultados experimentais obtidos, calcule o diâmetro do capilar.
- Determine os valores dos parâmetros do modelo de Lei de Potência para a solução de sacarose.
- Indique a que classe de fluido não newtoniano essa solução pertence.
- Comparar e interpretar os gráficos para a água em relação aos da solução de sacarose.

## 6. Simbologia

$\tau_{rz}$  – Tensão de cisalhamento

$v_z$  – Componente em z do vetor velocidade

$\mu$  – viscosidade do fluido

$m$  – parâmetro do modelo da lei de potência [ $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-n}$ ]

$W$  – vazão mássica [ $\text{MT}^{-1}$ ]

$\rho$  – densidade do fluido [ $\text{ML}^{-3}$ ]

$\Delta P$  – queda de pressão [ $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$ ]

$L$  – Comprimento do capilar [L]

$R$  – Raio do capilar [L]

## 7. Bibliografia:

- BIRD, R. B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons., Inc., 2004.
- PERRY, R.H.; GREEN D. *Chemical Engineers' Handbook*, 6ª Edição, McGraw-Hill, 1984

## Resultados Experimentais

### Parte 1: Cálculo do diâmetro efetivo

$\rho = 997,05 \text{ Kg/m}^3$ ;

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

$h = 0,085 \text{ m}$

$m$ (massa coletada) (Kg)	$t$ (coleta) (s)	$W$ (Vazão mássica, kg/s)	$D$ (diâmetro Efetivo, m)
0,650	65,8		
0,725	73,2		



Parte 2: Cálculo das características de escoamento da solução.

A solução de sacarose foi preparada de tal modo que cada 500 mL dessa solução tivesse 961 g de massa total. Calcule a densidade dessa solução.

Sabendo que esses 0,961 kg de solução (500mL) levaram um tempo de 1050 s para escoar, calcule a vazão  $W$  em kg/s.

Parte 3: Assumindo que  $m = \mu$  e  $n = 1$ , calcule a viscosidade dessa solução usando a equação 4.

## Prática 02: TEMPO DE DESCARGA DE UM TANQUE

### 1 – Objetivos

- Analisar a descarga livre de um líquido pelo fundo de um tanque, através de tubos verticais de diferentes diâmetros e comprimentos.
- Medir o tempo de descarga para cada geometria do sistema e comparar com os resultados teóricos esperados.
- Deduzir ou propor uma equação para o tempo de descarga.

### 2 – Fundamentos Teóricos

Água líquida contida em um tanque cilíndrico de PVC com 10 cm de diâmetro e 120 cm de altura é drenada por meio de um tubo de cobre montado no fundo do reservatório e com descarga aberta para a atmosfera, conforme mostra a Figura 1. Esse experimento visa principalmente avaliar o tempo de descarga do líquido em função do comprimento e do diâmetro dos tubos utilizados.

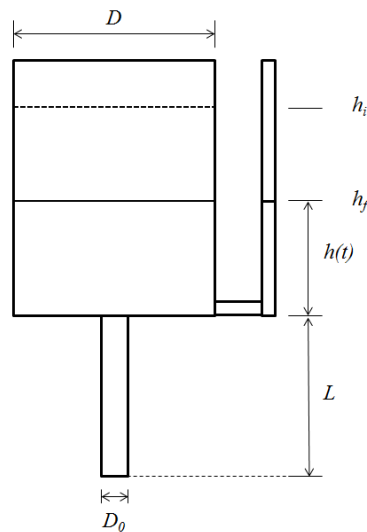


Figura 1. Aparato usado para avaliar o tempo de descarga de um tanque.

O balanço de massa global no sistema conduz à Equação 01, sendo “v” a velocidade do líquido no tubo de descarga.

$$\frac{dh}{dt} = - \left( \frac{R}{R_0} \right)^2 v \quad (1)$$

De acordo com Crosby, a velocidade é obtida pela aplicação da equação de Bernoulli, de acordo com a Equação 2.

$$v = \sqrt{\frac{2g(L+h)}{1+2f\frac{L}{R_0}}} \quad (2)$$

Assumindo  $f$  constante e desprezando as perdas de carga localizadas e admitindo um tubo rugoso, Crosby propõe a Equação 3 para a estimativa do tempo de descarga do tanque.

$$td = 2\left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \left(\frac{1+2f\frac{L}{R_0}}{2g}\right)^{\frac{1}{2}} \left[(L+h_i)^{\frac{1}{2}} - (L+h_f)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (3)$$

No caso de tubos lisos e para  $2100 < Re < 10^5$ ,  $f$  pode ser calculado pela expressão de Blasius, descrita pela Equação 4.

$$f = \frac{0,0791}{Re^{1/4}} \quad (4)$$

Com isso, somente os termos que tem  $f$  na Equação 2 são considerados significativos e a velocidade passa a ser descrita pela Equação 5.

$$v = \left[ \frac{2g^4(L+h)^4 R_0^5 \rho}{(0,0791)^4 L^4 \mu} \right]^{\frac{1}{7}} \quad (5)$$

Substituindo-se a Equação 5 na Equação 1 e resolvendo a integral tem-se o tempo de descarga do líquido dado pela Equação 6, para o caso de tubos lisos e  $2100 < Re < 10^5$ .

$$td = \frac{7}{3} \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \left(\frac{0,0791 L \mu^{1/4}}{g(2\rho R_0^5)^{1/4}}\right)^{\frac{4}{7}} \left[(L+h_i)^{\frac{3}{7}} - (L+h_f)^{\frac{3}{7}}\right] \quad (6)$$

### 3 – Materiais

- Tanque dotado de indicador de nível.
- Dutos de diferentes diâmetros e comprimentos.
- Proveta graduada
- Cronômetro
- Béqueres
- Termômetro

### 4 – Procedimento Experimental

1. Encher o tanque até o nível  $h_i$ ;
2. Medir a temperatura do líquido;
3. Disparar o cronômetro e liberar o fluxo;



4. Quando o nível estiver em  $h_f$  interromper o fluxo e anotar o tempo realizando tomadas de tempo a cada 10 cm;
5. Efetuar nova medida do intervalo de tempo para todos os níveis definidos;
6. Repetir o procedimento para os outros dutos.

## 5 – Tratamento dos dados e discussões

- Deduzir as Equações;
- Calcular o tempo ideal de descarga para cada geometria e comparar com o obtido experimentalmente. Discutir os resultados.
- Estabelecer os gráficos abaixo, interpretando os resultados:
  - $t_{dreal} \times t_{dideal}$  para todos os tubos, mantendo o mesmo  $h_i$  e  $h_f$
  - $t_{dreal} \times d$  mantendo  $h_i$  e  $h_f$  e  $L$  constante
  - $t_{dreal} \times L$  mantendo  $h_i$  e  $h_f$  e  $d$  constante

## 6 – Referências Bibliográficas

CROSBY, E.J. Experiments in Transport Phenomena. Editora John Wiley & sons, Inc., USA.

PERRY & CHILTON. Chemical Engineers Handbook. 5a ed. Seção 5, McGraw-Hill, USA.



**ANEXOS**

**Tabela para teste dinâmico com tomadas de tempo a cada 10 cm.**

Experimento	$h_i$ (m)	$h$ (m)	$L$ (m)	$D_0$ (m)	$T$ ( $^{\circ}C$ )	$t_{dreal}$ (s)	$t_{dideal}$ (s)
1	0,8	0,8					
		0,7					
		0,6					
		0,5					
		0,4					
		0,3					
		0,2					
2	0,8	0,8					
		0,7					
		0,6					
		0,5					
		0,4					
		0,3					
		0,2					
3	0,8	0,8					
		0,7					
		0,6					
		0,5					
		0,4					
		0,3					
		0,2					
4		0,8					
		0,7					
		0,6					
		0,5					
		0,4					
		0,3					
		0,2					



## **Prática 03 e 04: CURVA DE OPERAÇÃO DE BOMBAS**

### **1. Objetivos**

Determinar o ponto de operação de uma bomba centrífuga e a curva do sistema para diferentes configurações de tubulação e analisar perdas de carga distribuída e localizada.

### **2. Introdução**

A perda de carga é definida como sendo a energia desprendida pelo líquido para escoar entre dois pontos. Os escoamentos reais de um fluido apresentam dissipação de energia mecânica por causa do atrito viscoso devido à aderência do fluido junto às superfícies sólidas. Assim, à Equação de Bernoulli é acrescido um termo referente às perdas de energia do fluido por atrito ( $h_T$ ), conforme mostra a equação abaixo.

$$\frac{1}{2g} v_1^2 + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \frac{1}{2g} v_2^2 + \frac{P_2}{\rho g} + z_1 + h_T \quad (1)$$

O termo " $h_T$ " é conhecido como perda de carga e é dado pelo somatório das perdas de cargas distribuídas ( $h_D$ ) e localizadas ( $h_L$ ), conforme mostra a equação seguinte:

$$h_T = \sum h_D + \sum h_L \quad (2)$$

As perdas de cargas distribuídas ( $h_D$ ) se devem aos trechos retos e as perdas de cargas localizadas ( $h_L$ ) se devem aos acidentes, ou seja, dispositivos inseridos no sistema (joelhos, curvas, válvulas, equipamentos, restrições, expansões) que promovem perturbações que ocasionam o aumento da dificuldade de escoamento. As perdas de cargas distribuídas podem ser calculadas pela fórmula de *Darcy-Weisbach*:

$$h_D = f \frac{L}{D} \frac{\langle v \rangle^2}{2g} \quad (3)$$

em que:

$L$  – comprimento do duto;

$D$  – diâmetro do duto;

$\langle v \rangle$  – velocidade média do fluido (Vazão volumétrica/Área transversal do duto)

$f$  – fator de atrito.

Em escoamento laminar, o fator de atrito  $f$  pode ser escrito como:

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (4)$$

Para os demais regimes de escoamento do fluido, o *fator de atrito*  $f$  tem a seguinte dependência:

$$f = F\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right) \quad (5)$$

sendo:

$Re$  – número de Reynolds;

$\varepsilon$  – rugosidade absoluta do duto, cuja unidade é comprimento;

$D$  – diâmetro do duto.

$\varepsilon/D$  – rugosidade relativa.

Os valores de  $f$  são levantados experimentalmente ou podem ser obtidos, para dutos de seção circular, através do *diagrama de Moody*. Caso a seção transversal não seja circular (quadrada, retangular, triangular) pode-se utilizar o diagrama de *Moody-Rouse* que se difere do de *Moody* apenas por exigir o conhecimento do diâmetro hidráulico ( $D_H$ ). Os diâmetros hidráulicos para dutos quadrangulares, retangulares, triangulares e retangulares abertos são apresentados nos anexos.

Com isso, a perda de carga total é dada pela seguinte relação:

$$h_T = h_D + h_L \quad (6)$$

$$h_T = f \left[ \frac{L}{D} + \frac{\sum L_{ei}}{D} \right] \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

Para se evitar a necessidade do uso de métodos gráficos na estimativa de  $f$ , diversas expressões matemáticas estão disponíveis na literatura. Uma expressão que tem sido bastante empregada é a de Colebrook.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left[ \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right] \quad (8)$$

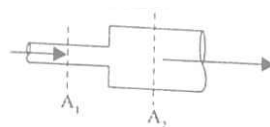
As perdas de cargas localizadas podem ser calculadas substituindo-se o termo  $fL/D$  pelo fator  $K_S$ , desde que seja devidamente conhecido. Assim, para cada tipo de acidente existente na linha pela qual o fluido escoar, há um valor de  $K_S$  obtido experimentalmente e disponível para consulta, conforme mostrado na sequência:

Singularidade

Esquema

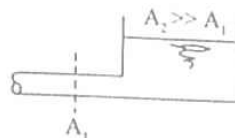
$K_S$

Expansão súbita

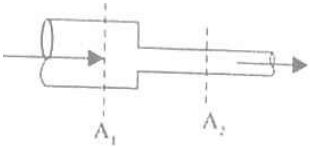
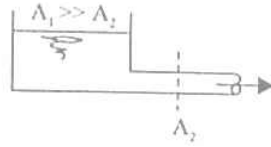
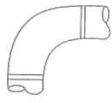
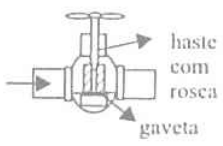
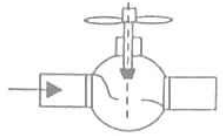
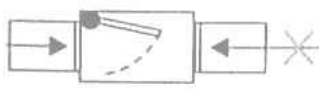


$$\left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right)^2$$

Caso limite



1

Contração súbita		$0,5 \left( 1 - \frac{A_2^2}{A_1^2} \right)$
Caso Limite		0,5
Cotovelo de 90°		0,9
Válvula Gaveta		0,2 (Totalmente aberta)
Válvula Globo		10 (Totalmente aberta)
Válvula de Retenção		0,5

Logo, a perda de carga localizada por ser calculada de acordo com equação mostrada a seguir.

$$h_L = K_s \frac{\langle v \rangle^2}{2g} \quad (9)$$

### 3. Metodologia

O conjunto experimental ilustrado na Figura 1 consiste de um reservatório de 100 litros, de uma bomba centrífuga (1/2 HP), um sistema de tubulações de PVC com diferentes diâmetros (3/4", 1" e 1/2") e acidentes, incluindo válvulas gaveta, globo e esfera e de um manômetro e um vacuômetro, ambos de Bourdon (na figura aparecem em segundo plano com o visor para o fundo).

A operação do equipamento permite a coleta de dados para obter experimentalmente assim como determinar o ponto de operação (vazão de trabalho) pela interseção da "curva de operação da bomba centrífuga" (carga da bomba (HBomba) vs vazão de operação (Q)) com a "curva do sistema" (altura manométrica total (HMT) vs vazão de operação (Q)) dos diferentes sistemas de escoamento que o conjunto proporciona.

A "curva de operação da bomba centrífuga" (carga da bomba (HBomba) vs vazão de operação (Q)) é obtida a partir de um "Balanço de Energia Mecânica" entre os pontos "S" (sucção da bomba) e "D" (descarga

da bomba). A "curva do sistema" (altura manométrica total (HMT) vs vazão de operação (Q)) é obtida a partir do "Balanço de Energia Mecânica" (equação de projeto) que inclui entre outros, os cálculos das perdas de carga "normais ou distribuídas" e "localizadas ou por acidentes".

Para uma clara descrição da operação do equipamento, faz-se necessário citar os diferentes "acessórios" (acidentes) constantes no mesmo, a maioria deles geradores das "perdas de carga localizadas". São eles:

$V_G$ : válvula gaveta

$V_{GL}$ : válvula globo

$V_E$ : válvula esfera

1 : Bordo de entrada (3/4")

2 : T  $\rightarrow$  saída lateral (3/4")

3 : Cotovelo 90° - raio longo (3/4")

4 : Cotovelo padrão 90° (3/4")

5 : T  $\rightarrow$  passagem direta (3/4")

6 : Alargamento 3/4"  $\rightarrow$  1"

7 : Cotovelo 45° (1")

8 : Redução 1"  $\rightarrow$  3/4"

9 : Redução 3/4"  $\rightarrow$  1/2"

10 : Cotovelo 45° (1/2")

11 : Alargamento 1/2"  $\rightarrow$  3/4"

12 : Cotovelo 45° (3/4")

13 : Saída de tubulação - Água (3/4")

#### Diâmetros Internos das tubulações:

$D_i$  (1/2") = 0,0127 m -  $D_i$  (1") = 0,0254

m-  $D_i$  (3/4") = 0,0190 m

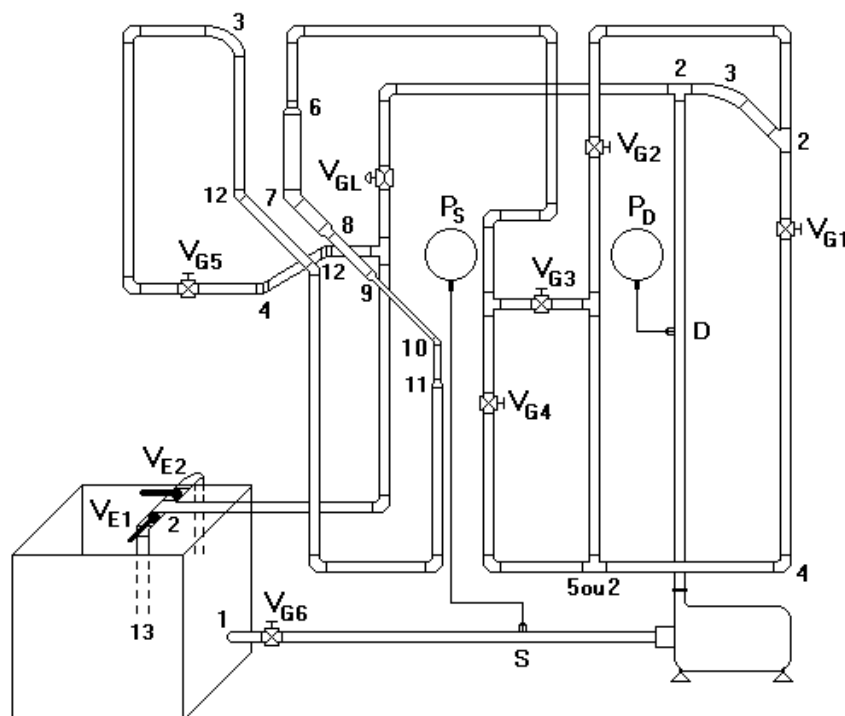


Figura 1 – Aparato Experimental.

### 3.1. Funcionamento do Sistema

- Encher o reservatório com água "limpa" até aproximadamente 5 cm do seu nível máximo;
- **abrir totalmente** todas as válvulas gaveta ( $V_G$ ) e a válvula globo ( $V_{GL}$ ) (girando-as no sentido anti-horário), a válvula esfera  $V_{E1}$  (posicionando-a paralelamente à tubulação), mantendo apenas a válvula esfera  $V_{E2}$  fechada (posicionando-a perpendicularmente à tubulação).
- Retirar o ar das linhas do Manômetro e do Vacuômetro.
- ligar o equipamento posicionando o seletor em liga (L).

### 3.2. Obtenção da "Curva de Operação da Bomba Centrífuga" ( $H_{Bomba}$ vs $Q$ )

Para a obtenção da "curva de operação da bomba centrífuga" (carga da bomba ( $H_{Bomba}$ ) vs vazão de operação ( $Q$ )), inicialmente devem ser fechadas as válvulas  $V_{G1}$ ,  $V_{G2}$  e  $V_{G5}$  girando-as no sentido horário. A partir daí, para diferentes posições da válvula globo ( $V_{GL}$ ) desde totalmente fechada ("shut-off") até totalmente aberta (vazão máxima) devem ser determinadas as vazões mássicas ( $W$ ) correspondentes encaixando a saída da tubulação (após a válvula esfera  $V_{E2}$ ) na abertura de um coletor, manipulando simultaneamente as válvulas  $V_{E1}$  e  $V_{E2}$  e monitorando o tempo de coleta de água com um cronômetro. Medindo-se a temperatura da água ( $T$ ) com um termômetro, pode-se obter a densidade da água e calcular as respectivas vazões volumétricas ( $Q$ ).

Para cada vazão ( $Q$ ) devem ser medidas as pressões na sucção ( $P_S$ ) e na descarga ( $P_D$ ) da bomba. As tomadas de pressão foram posicionadas nos pontos indicados na figura de modo que os "eventuais acidentes" do sistema (incluindo a bomba) não prejudicassem tais medidas.

#### 3.2.1 Cálculos

O balanço de energia entre o vacuômetro (sucção) e o manômetro (descarga) fornece:

$$\frac{v_S^2}{2g} + \frac{P_S}{\rho g} + z_S + H_B = \frac{v_D^2}{2g} + \frac{P_D}{\rho g} + z_D + h_S + h_D \quad (10)$$

Que pode ser escrito em função de  $H_B$ :

$$H_B = \frac{v_D^2 - v_S^2}{2g} + \frac{P_D - P_S}{\rho g} + (z_D - z_S) + h_S + h_D \quad (11)$$

Sendo:

S = sucção;

D = descarga

Se as tubulações de descarga (recalque) e de sucção possuem mesmo diâmetro, então  $v_D = v_S$  e a equação acima pode ser reescrita da seguinte forma:

$$H_B = \frac{P_D - P_S}{\rho g} + (z_D - z_S) + h_S + h_D \quad (12)$$

Na equação acima, deve-se descontar  $P_{atm}$  de  $P_D$  lida no manômetro e adicionar  $P_{atm}$  a  $P_S$  lida no vacuômetro, uma vez que o balanço de energia considera **Pressão absoluta**. A Tabela 1 propõe uma forma de aquisição de dados:

Tabela 1 – Aquisição de dados experimentais para curva de operação da bomba.

Exp.	$P_S$ (Pa)	$P_D$ (Pa)	$W$ (kg/s)	$T$ (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$Q$ (m <sup>3</sup> /h)	$H_B$ (m)
1							
2							
...							
N							

Uma tabela de densidade em função da temperatura é mostrada nos Anexo.

### 3.3. Obtenção da "Curva de Sistema" ( $H_{MT}$ vs $Q$ )

Para a obtenção das "curvas dos sistemas" (altura manométrica total ( $H_{MT}$ ) vs vazão de operação ( $Q$ )) deve-se, inicialmente, abrir todas as válvulas gaveta ( $V_G$ ) e fechar a válvula globo ( $V_{GL}$ ). O conjunto experimental em questão permite, a partir da manipulação das válvulas gaveta ( $V_G$ ), definir vários sistemas distintos, cada qual com diferentes "perdas de carga distribuídas e localizadas" e, portanto com diferentes curvas. Com relação ao caminho do escoamento, mantendo-se as válvulas  $V_{G5}$  e  $V_{G6}$  sempre **abertas**, define-se **4 sistemas** como segue:

**Sistema 1:**  $V_{G1}$  e  $V_{G3} \rightarrow$  Abertas e  $V_{G2}$  e  $V_{G4} \rightarrow$  Fechadas

**Sistema 2:**  $V_{G1}$  e  $V_{G4} \rightarrow$  Abertas e  $V_{G2}$  e  $V_{G3} \rightarrow$  Fechadas

**Sistema 3:**  $V_{G2}$  e  $V_{G3} \rightarrow$  Abertas e  $V_{G1}$  e  $V_{G4} \rightarrow$  Fechadas

**Sistema 4:**  $V_{G2}$  e  $V_{G4} \rightarrow$  Abertas e  $V_{G1}$  e  $V_{G3} \rightarrow$  Fechadas

Além destes sistemas, vários outros podem ser definidos fazendo com que as 6 válvulas gaveta ( $V_G$ ) estejam posicionadas diferentemente daquela **totalmente aberta**, ou seja, combinações das válvulas nas posições **totalmente aberta**, **3/4 aberta**, **1/2 aberta** e **1/4 aberta**, possibilitam conjuntos distintos de perdas de carga localizadas e, portanto, diferentes curvas do sistema.

Ainda, de acordo com a literatura relacionada com a Mecânica dos Fluidos e com a Operação Unitária de Bombeamento de Fluidos, existem várias metodologias para se quantificar as perdas de carga distribuídas (normal) e localizadas (por acidentes), o que torna ainda mais rica a análise dos dados obtidos pelo conjunto experimental em questão. Independente do sistema escolhido e das combinações das metodologias de cálculos das perdas de carga distribuídas (normais) e localizadas (por acidentes), pode-se obter equações do tipo  $H_{MT}$  vs  $Q$  para serem plotadas em um gráfico e obter os pontos de operação (vazão de trabalho) para cada sistema com a interseção destas curvas com a respectiva curva da bomba.

### 3.3.1 Cálculos

O balanço de energia entre o nível do líquido no tanque e a descarga fornece:

$$\frac{v_N^2}{2g} + \frac{P_N}{\rho g} + z_N + H_s = \frac{v_{DS}^2}{2g} + \frac{P_{DS}}{\rho g} + z_{DS} + h_s + h_D \quad (13)$$

Sendo:

N = nível do líquido

DS = descarga na saída

O ponto no nível da água e na saída da tubulação estão abertos para a atmosfera, ou seja,  $P_N = P_{DS} = P_{atm}$ . No sistema,  $v_N$  e  $v_{DS}$  podem ser desprezados e a equação acima pode ser reescrita da seguinte forma:

$$H_s = (z_{DS} - z_N) + h_s + h_D \quad (14)$$

A Tabela 2 propõe uma forma de aquisição de dados para avaliação da altura manométrica do sistema em função da vazão:

Tabela 2 – Aquisição de dados experimentais para curva de operação da bomba.

Sistema	$P_s$ (Pa)	$P_D$ (Pa)	$W$ (kg/s)	$T$ (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$Q$ (m <sup>3</sup> /h)	$H_s$ (m)
1							
2							
...							
N							

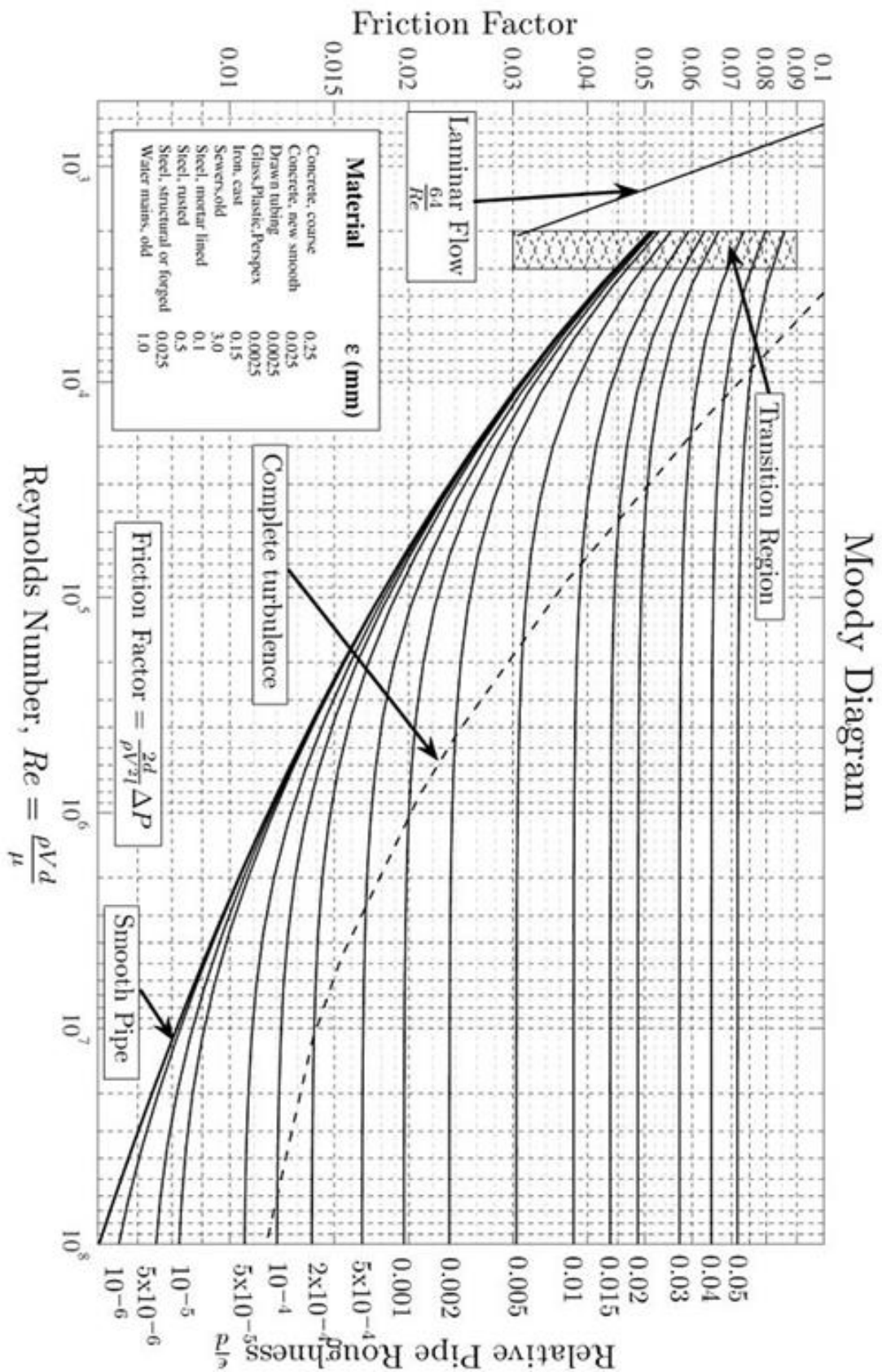
Com os resultados obtidos nas Tabelas 1 e 2 obtém-se as curvas H & Q da bomba e do sistema, sendo que o ponto em que essas duas curvas se cruzam fornece a vazão teórica, ou seja, o ponto de operação da bomba no sistema.

## 4. Referências Bibliográficas

- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N., **Fenômenos de Transporte**. 2º ed.. LTC. 2011.
- ROMA, W. N. L., **Fenômenos de transporte para engenharia**. 2º ed. São Carlos, Rima, 2006.
- BRAGA FILHO, W., **Fenômenos de transporte para engenharia**. 2º ed.. LTC, 2012.
- CANEDO, E. L., **Fenômenos de transporte**. LTC. 2010.
- FOX, R. W., Pritchard, P. J., McDonald, A. T., **Introdução a mecânica dos fluidos**. 7º ed. Gen, 2012.
- WHITE, F. M., **Mecânica dos Fluidos**. 6º ed.. AMGH, 2011.
- BRUNETTI, F., **Mecânica dos Fluidos**. 2º ed.. Prentice Hall, 2010.
- LIVI, C. P., **Fundamentos de fenômenos de transporte : um texto para cursos básicos**, 2º ed. , LTC, 2012.

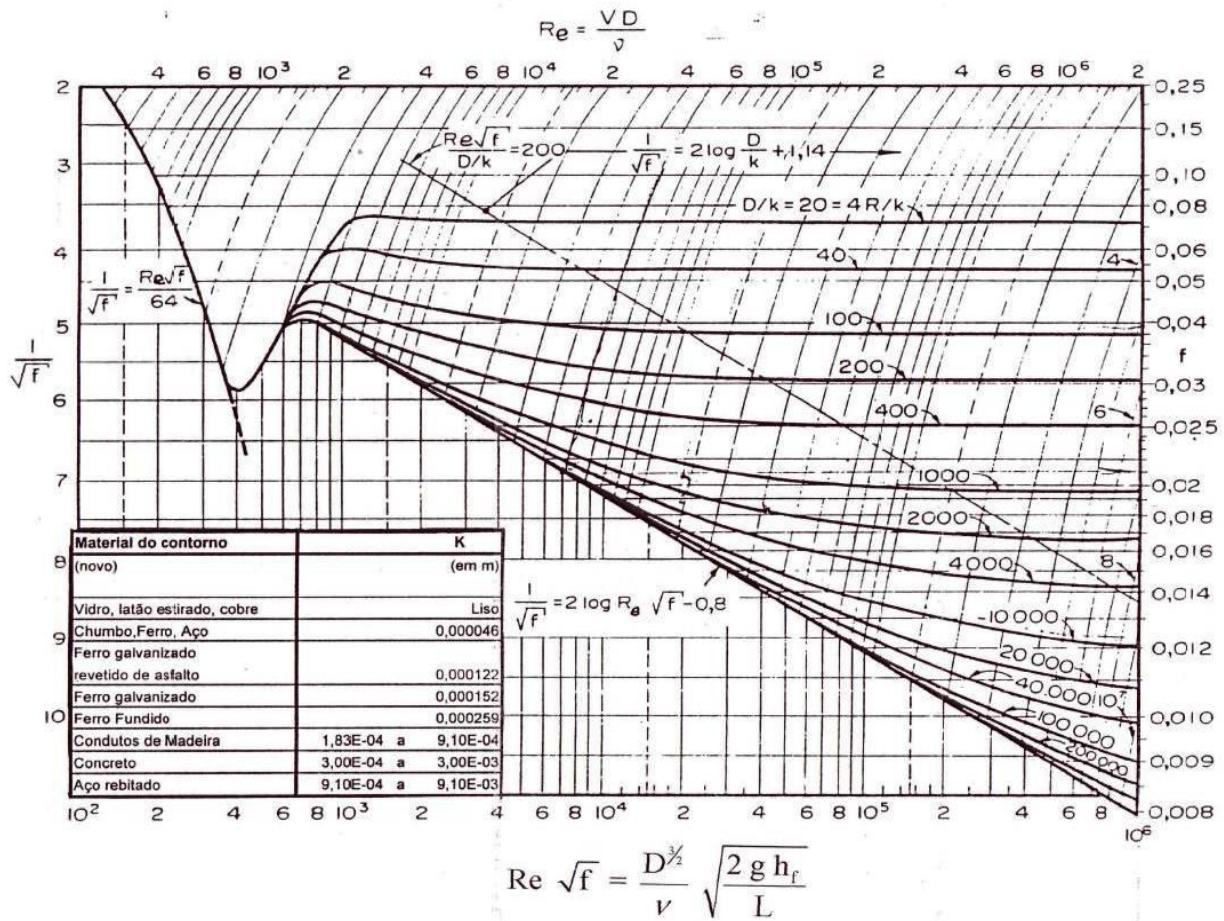


## ANEXOS

















### Diagrama de Moody-Rouse









### Tipos de Válvulas

Globo	Gaveta	Esfera	Diafragma
			

**Comprimentos Equivalentes (Perda de carga localizada) para alguns acessórios**

PERDAS DE CARGAS LOCALIZADAS. SUA EQUIVALÊNCIA EM METROS DE CANALIZAÇÃO DE PVC RÍGIDO											
BITOLAS		SOLDÁVEIS	ROSCÁVEIS	JOELHO 90°	JOELHO 45°	CURVA 90°	CURVA 45°	TÊ 90° PASSAGEM DIRETA	TÊ 90° SAÍDA DE LADO	TÊ 90° SAÍDA BILATERAL	ENTRADA NORMAL
DN	D Ref.	DE mm	DE mm								
15	1/2	20	21,0	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3	2,3	0,3
20	3/4	25	26,5	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4	2,4	0,4
25	1	32	33,2	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1	3,1	0,5
32	1.1/4	40	42,0	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6	4,6	0,6
40	1.1/2	50	48,0	3,2	1,3	1,2	0,6	2,2	7,3	7,3	1,0
50	2	60	60,0	3,4	1,5	1,3	0,7	2,3	7,6	7,6	1,5
60	2.1/2	75	75,5	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8	7,8	1,6
75	3	85	88,3	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0	8,0	2,0
100	4	110	113,1	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3	8,3	2,2
125	5	140	139,3	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0	10,0	2,5
150	6	160	164,4	5,6	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1	11,1	2,8

BITOLAS		SOLDÁVEIS	ROSCÁVEIS	ENTRADA DE BORDA	SAÍDA DE CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE PÉ E CRIVO	VÁLV. DE RETENÇÃO		REGIS-TRO DE GLOBO ABERTO	REGIS-TRO DE GAVETA ABERTO	REGIS-TRO DE ÂNGULO ABERTO
DN	D Ref.	DE mm	DE mm				TIPO LEVE	TIPO PESADO			
15	1/2	20	21,0	0,9	0,8	8,1	2,5	3,6	11,1	0,1	5,9
20	3/4	25	26,5	1,0	0,9	9,5	2,7	4,1	11,4	0,2	6,1
25	1	32	33,2	1,2	1,3	13,3	3,8	5,8	15,0	0,3	8,4
32	1.1/4	40	42,0	1,8	1,4	15,5	4,9	7,4	22,0	0,4	10,5
40	1.1/2	50	48,0	2,3	3,2	18,3	6,8	9,1	35,8	0,7	17,0
50	2	60	60,0	2,8	3,3	23,7	7,1	10,8	37,9	0,8	18,5
60	2.1/2	75	75,5	3,3	3,5	25,0	8,2	12,5	38,0	0,9	19,0
75	3	85	88,3	3,7	3,7	26,8	9,3	14,2	40,0	0,9	20,0
100	4	110	113,1	4,0	3,9	28,6	10,4	16,0	42,3	1,0	22,1
125	5	140	139,3	5,0	4,9	37,4	12,5	19,2	50,9	1,1	26,2
150	6	160	164,4	5,6	5,5	43,4	13,9	21,4	56,7	1,2	28,9

Descrição	Comprimento equivalente em diâmetro do tubo (L/D)
<b>Válvulas Globo</b>	
Convencional	
Sem obstrução, com sede plana, biselada ou tamponada – Aberta	340
Tampão com aletas ou pino guia - Aberta	450
Com escoamento em Y	
(Sem obstrução, com sede plana, biselada ou tamponada)	
Com haste de 60° da linha – Aberta	175
Com haste de 45° da linha – Aberta	145
<b>Válvula angular</b>	
Convencional	
Sem obstrução, com sede plana, biselada ou tamponada-Aberta	145
Tampão com aletas ou pino guia - Aberta	200
<b>Válvulas de Gaveta</b>	
Convencional, com tampão em cunha, ou duplo ou chato	
Aberta	13
Aberta três quartos	35
Aberta à metade	160
Aberta um quarto	900
<b>Válvula Comporta</b>	
Aberta	17
Aberta três quartos	50
Aberta à metade	260
Aberta um quarto	1200
<b>Válvula Conduíte</b> – completamente aberta	3 <sup>a</sup>

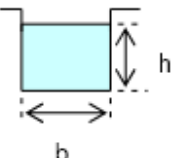
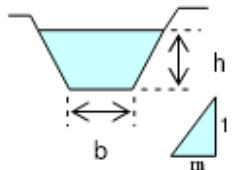
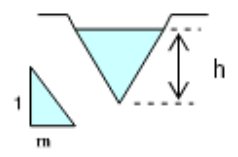
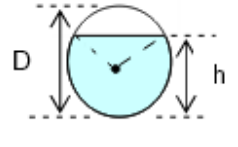
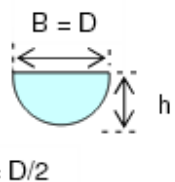


<b><i>Válvulas de Retenção</i></b>	
Articulação convencional da portinhola – 0,5 <sup>b</sup> – Aberta	135
Articulação integral da portinhola – 0,5 <sup>b</sup> – Aberta	50
Retenção, de esfera, de retenção e fechamento – 2,0 <sup>b</sup> – Aberta	O mesmo das válvulas globo
Angular ou de retenção e fechamento – 2,0 <sup>b</sup> – Aberta	O mesmo das válvulas angulares
Retenção, de esfera, de direta – 2,5 vertical e 0,25 horizontal <sup>b</sup> – Aberta	150
<b><i>Válvula de pé de crivo filtrante</i></b>	
Com tampão de levantamento – 0,3° – Aberta	420
Com tampão articulado – 0,4 <sup>b</sup> – Aberta	75
<b><i>Válvula borboleta (de 6 in ou mais) – Aberta</i></b>	20
<b><i>Válvulas de Macho</i></b>	
Furo retangular com 100% de área do tubo – Aberta	18
<b><i>Válvula de três vias</i></b>	
Furo retangular com área igual a 80% do tubo – Aberta	
Escoamento direto	44
Escoamento por derivação	140
<b><i>Acessórios</i></b>	
Joelho padrão 90°	30
Joelho padrão 45°	16
Curva de raio grande 90°	20
Junta rosqueada 90°	50
Junta rosqueada 45°	26
Junta angular 90°	57
<b><i>Peça normal T</i></b>	
Escoamento direto	20
Escoamento por ramificação	60
<b><i>Curva de retorno em gomos</i></b>	50

a – Comprimento equivalente exato igual à distância entre as faces dos flanges ou dos terminais de solda.

b – Queda de pressão mínima (em psi) calculada para que o escoamento ocorra com o tampão completamente elevado.

### RAIO HIDRÁULICO

Forma da seção	Área (A) (m <sup>2</sup> )	Perímetro molhado (P) (m)	Raio hidráulico (R) (m)	Largura do Topo (B) (m)
	$b.h$	$b + 2h$	$\left(\frac{A}{P}\right) = \frac{b.h}{b + 2h}$	$b$
	$(b + m.h).h$	$b + 2.h.\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{A}{P}$	$b + 2.m.h$
	$m.h^2$	$2.h.\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{A}{P}$	$2.m.h$
	$\frac{1}{8} . (\theta - \text{sen } \theta) . D^2$ $\theta = \text{RAD}$	$\frac{\theta . D}{2}$	$\frac{1}{4} . \left(1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta}\right) . D$	$\left(\text{sen } \frac{\theta}{2}\right) . D$
	$\frac{\pi . D^2}{8}$	$\frac{\pi . D}{2}$	$\frac{D}{4} = \frac{h}{2}$	$D = 2.h$

Temperatura (°C)	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$\mu$ (N.s.m <sup>-2</sup> ) x 10 <sup>4</sup>
0	1000	17,5
10	1000	13,0
20	998	10,2
30	996	8,0
40	992	6,51
50	988	5,41
60	984	4,60
70	978	4,02
80	971	3,50
90	965	3,11
100	958	2,82



## PRÁTICA 5 – MEDIDORES DE VAZÃO

### 1. Descrição do Equipamento

O sistema experimental consiste essencialmente de um reservatório (caixa d'água) de 100 litros, uma bomba centrífuga (3/4 HP), um medidor de vazão tipo Venturi, um medidor de vazão tipo placa de orifício confeccionados em acrílico e um rotâmetro comercial (CONAUT) com corpo acrílico, interligados por um sistema de tubos de PVC de 1", e um manômetro diferencial tipo tubo em "U" confeccionado em vidro, tendo como fluidos manométricos Hg e H<sub>2</sub>O. A Figura 1 ilustra o lado frontal do sistema experimental.



Figura 1 – Medidores de vazão.



Na descarga da bomba, a tubulação é dividida, fazendo a água bombeada passar por duas válvulas do tipo gaveta, uma inferior que permite a admissão de água no sistema ( $V_{\text{Sistema}}$ ) e outra superior que faz a água retornar ao reservatório ( $V_{\text{Reciclo}}$ ). O caminho do fluido (água) pelo sistema é determinado pelas posições das válvulas tipo esfera  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  que, quando posicionadas paralelamente ao tubo encontram-se totalmente abertas e, quando posicionadas perpendicularmente encontram-se totalmente fechadas.

O sistema permite três caminhos ao fluido:

- 1) passagem apenas pelo medidor tipo Venturi ( $V_1$  aberta e  $V_2$  e  $V_3$  fechadas);
- 2) passagem apenas pelo medidor tipo placa de orifício ( $V_3$  aberta e  $V_1$  e  $V_2$  fechadas);
- 3) passagem em série por ambos os medidores ( $V_2$  aberta e  $V_1$  e  $V_3$  fechadas).

O fluido escoar de baixo para cima passando pelo sistema e, independentemente do caminho, passa pelo rotâmetro que mede a vazão de operação, para depois retornar ao reservatório.

O manômetro mede as diferenças de pressão devido à passagem do fluido pelos medidores de vazão e as diferenças de pressão ( $\Delta P = \rho g \Delta h$ ) estão diretamente relacionadas com as vazões volumétricas que passam pelos medidores ( $Q$ ), ou seja,  $Q \propto \sqrt{\Delta P}$ .

Para se medir a diferença de pressão quando o fluido escoar através do medidor tipo Venturi, as válvulas do tipo esfera  $V_{V1}$  e  $V_{V2}$  alinhadas verticalmente do lado esquerdo devem estar abertas posicionadas na direção vertical e as válvulas do tipo esfera  $V_{P1}$  e  $V_{P2}$  alinhadas verticalmente do lado direito devem estar fechadas posicionadas na direção horizontal.

Para se medir a diferença de pressão quando o fluido escoar através do medidor tipo placa de orifício, as válvulas do tipo esfera  $V_{P1}$  e  $V_{P2}$  devem estar abertas posicionadas na direção vertical e as válvulas do tipo esfera  $V_{V1}$  e  $V_{V2}$  devem estar fechadas posicionadas na direção horizontal (Obs: as medidas são excludentes, ou se mede uma ou outra).

Para qualquer medida de diferença de pressão, a válvula do tipo esfera  $V_4$  deve estar fechada, posicionada na direção horizontal.

## 2. Operação do Equipamento

A operação deste equipamento permite medidas de vazões volumétricas através de três diferentes medidores; Venturi, placa de orifício e rotâmetro e a comparação entre os valores medidos



por cada um deles e com aqueles determinados experimentalmente a partir da coleta de água por um certo intervalo de tempo, como descrito posteriormente.

Para uma correta e segura operação do equipamento, siga as instruções:

### 2.1. Funcionamento

- Encher o reservatório com água "limpa" até aproximadamente 5 cm do seu nível máximo;
- Abrir totalmente as válvulas do tipo gaveta ( $V_{\text{Sistema}}$  e  $V_{\text{Reciclo}}$ ) girando-as no sentido anti-horário e posicionar as válvulas do tipo esfera  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  na posição aberta (perpendicularmente à tubulação);
- Posicionar a válvula  $V_4$  e as válvulas localizadas na parte traseira do equipamento na posição aberta (vertical);
- Posicionar o aparato "tipo manivela" para que o fluxo de água seja despejado no reservatório;
- Ligar o equipamento posicionando o seletor em liga (L) - para cima.

### 2.2. Retirada de Bolhas de Ar do Sistema

Para medidas corretas das diferenças de pressões utilizando os manômetros diferenciais tipo tubo em "U", deve-se retirar "bolhas de ar" do sistema, a fim de não ocorrer descontinuidades nas tubulações de água:

- Com o equipamento funcionando (ligado), fechar totalmente a válvula  $V_{\text{Reciclo}}$ , girando-a no sentido horário, fazendo com que a vazão no sistema seja máxima;
- Este procedimento deve ser realizado com todas as válvulas do tipo esfera totalmente abertas, e proporcionará um fluxo de água pelas mangueiras plásticas;
- Observar as mangueiras plásticas na parte traseira do equipamento e certificar se as bolhas de ar estão deixando o sistema. Para aumentar o fluxo pelas mangueiras basta impor uma certa resistência ao fluxo de água na tubulação de saída imersa no reservatório;
- Após a total retirada das bolhas de ar do sistema, abrir totalmente as válvulas  $V_{\text{Reciclo}}$  e  $V_{\text{Sistema}}$ , girando-as no sentido anti-horário e fechar a válvula  $V_4$ . Após esse procedimento, o equipamento estará pronto para a tomada de dados experimentais ou para o experimento didático propriamente dito.

### 2.3. Tomada de Dados Experimentais

Para medidas de vazões volumétricas ( $Q$ ) nos medidores tipo Venturi e placa de orifício, esses devem ser previamente calibrados, obtendo-se as constantes das equações que relacionam  $Q$  com  $P^{1/2}$  para cada medidor (vide Bennett & Myers, cap. 6, 1978).

Deve-se inicialmente, manipular as válvulas  $V_{\text{Reciclo}}$  e  $V_{\text{Sistema}}$  de modo a estabelecer uma dada vazão volumétrica ( $Q$ ) no sistema. A posição totalmente aberta da válvula  $V_{\text{Sistema}}$  e totalmente fechada para a válvula  $V_{\text{Reciclo}}$  define a vazão máxima do sistema. Para se obter baixas vazões de operação, sugere-se manter a válvula  $V_{\text{Reciclo}}$  totalmente aberta, fechando-se paulatinamente a válvula  $V_{\text{Sistema}}$ . Este procedimento assegura que a bomba não vá operar próxima à "vazão zero", condição de operação não recomendada, onde a energia da bomba é dissipada na forma de calor aquecendo em demasia o fluido de trabalho.

A vazão mássica ( $W$ ) de água através do sistema é medida com o auxílio de um recipiente (balde) e de um cronômetro. Medindo-se a temperatura da água ( $T$ ) através de um termômetro, pode-se obter sua densidade ( $\rho$ ) e calcular a respectiva vazão volumétrica ( $Q$ ). Pesa-se inicialmente o recipiente vazio obtendo-se sua massa ( $m_{\text{rec}}$ ).

Manipulando o dispositivo divisor de fluxo, coleta-se uma quantidade de água durante um intervalo de tempo conhecido ( $\Delta t$ ) e pesa-se novamente o recipiente agora com água obtendo-se a massa correspondente ( $m_{\text{rec+água}}$ ). Calcula-se a vazão mássica ( $W$ ) através da técnica gravimétrica.

Dividindo a vazão mássica ( $W$ ) pela densidade da água ( $\rho$ ) na referida temperatura, encontra-se o valor da vazão mássica ( $Q$ ).

As quedas ou diferenças de pressão anteriormente citadas ( $\Delta P$ ) podem ser determinadas através de medidas do desnível entre os meniscos ( $\Delta \rho$ ) do manômetro.

### **3. Bibliografia**

- Bennett, C.O.; Myers, J.R. Fenômenos de transporte: quantidade de movimento, calor e massa. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, cap. 2, 1978.