

**EXPERIÊNCIA Nº 6 – OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA**

**1. CONCEITOS ENVOLVIDOS**

- Máquinas de fluxo
- Bombas centrífugas
- Equações de conservação
- Características de desempenho
- Altura de elevação ou altura de carga
- Potência hidráulica
- Potência no eixo
- Eficiência da bomba, tipos de perdas
- Torque
- Curvas características de bombas centrífugas radiais
- Cavitação
- Altura de carga de sucção positiva líquida (NPSH)
- NPSH disponível x NPSH requerido pela bomba
- Ponto de operação da bomba

**2. OBJETIVO**

Levantar a curva característica de uma bomba centrífuga e analisar as curvas de desempenho obtidas.

**3. TEORIA**

**3.1 Conceito**

Amplamente utilizadas para os trabalhos de engenharia, as bombas centrífugas são capazes de trabalhar com sensível variação de vazão, de pressão e de rotação.

As curvas características das bombas centrífugas relacionam a vazão recalçada com a altura manométrica alcançada ( $H$ ), com a potência absorvida ( $P$ ) e com o rendimento ( $\eta$ ). Muitas vezes também apresentam a altura máxima de sucção ( $H_{s,máx}$ ) ou a energia específica positiva líquida de sucção requerida pela bomba (NPSH ou *net positive suction head*). De modo geral, as curvas características apresentam o aspecto da Fig. 1.

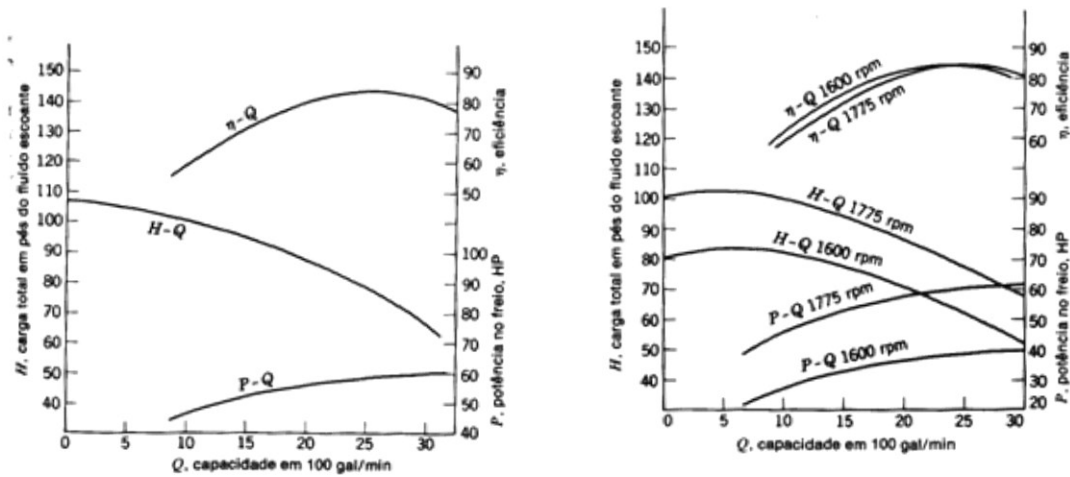


Figura 1. Curva característica de uma bomba centrífuga

Onde:

$H$  = altura de elevação manométrica ou carga total

$Q$  = vazão ou capacidade da bomba

$P$  = potência absorvida ou potência no eixo

$\eta$  = rendimento

Nesse tipo de bomba, a energia mecânica é transferida ao líquido pelas forças centrífugas geradas no rotor. Considerando a mesma carcaça, a intensidade dessas forças variam com as dimensões, forma e número de giros do rotor. Assim, ao modificarmos qualquer destes três parâmetros, alteramos, de modo correspondente, a curva característica da máquina. As curvas de  $H$  vs.  $Q$  e de  $\eta$  vs.  $Q$  não sofrem alteração significativa para um rotor que tenha forma, diâmetro e rotação definidos, independente do líquido bombeado, desde que não possua viscosidade elevada (Macintyre, 1980).

Portanto, a curva característica da bomba representa as condições hidráulicas operacionais da máquina trabalhando a determinada rotação (giros na unidade de tempo).

### 3.2 Bancada de ensaio de bomba

As curvas características das bombas são levantadas em bancadas de ensaio, em geral essas bancadas são semelhantes a mostrada na Fig. 2. Essas bancadas são constituídas, basicamente, por circuitos hidráulicos fechados, possuindo, além da bomba a ser ensaiada e da fonte de acionamento, os seguintes componentes:

- Equipamento que permita a variação da rotação de acionamento da bomba;
- Válvula para regulação da vazão do fluido;
- Instrumentos para determinação da vazão, potência e rotação de acionamento.

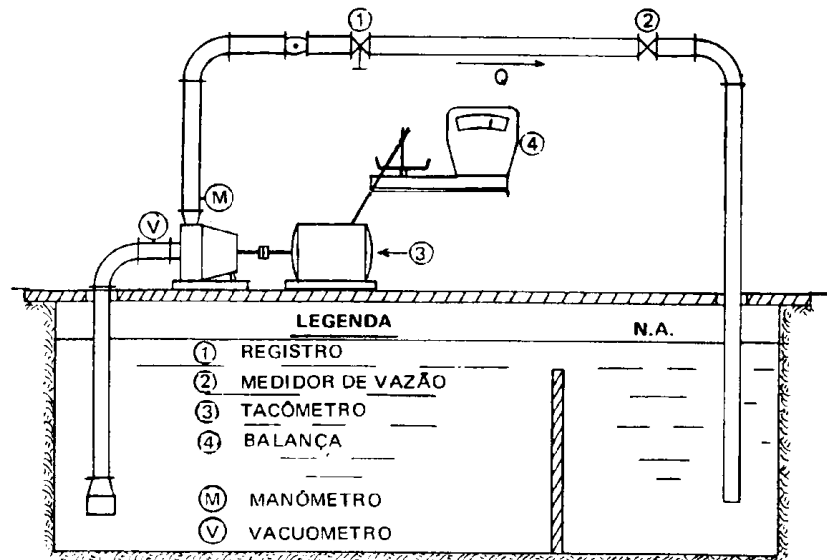


Figura 2 - Esquema de uma bancada de ensaio de bombas

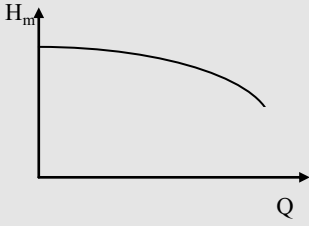
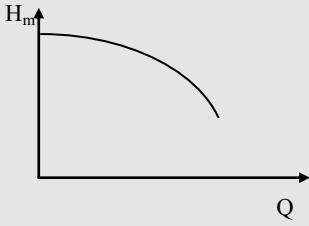
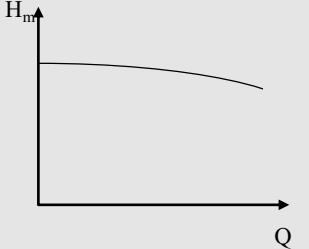
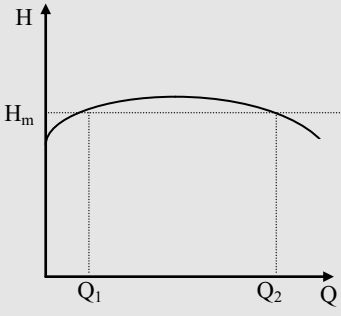
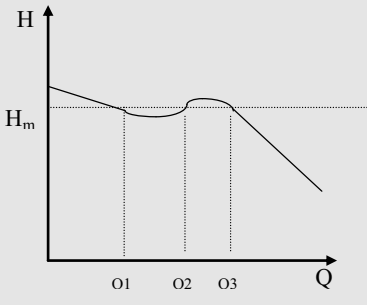
As curvas características da bomba são obtidas da seguinte forma: para cada valor da vazão recalçada, regulada através do registro de recalque, são medidos os correspondentes valores da altura manométrica, da potência de acionamento e do rendimento, anotando-os em uma ficha chamada “folha de teste da bomba”. Em seguida a curva característica da bomba é construída.

### 3.3 Tipos de curvas características

As curvas características são classificadas em estáveis e instáveis, dependendo da forma como varia a altura manométrica com a vazão. São ditas estáveis quando para um dado valor de altura manométrica, fornece apenas um valor da vazão.

As instáveis são assim chamadas porque fornecem duas ou mais vazões para uma mesma altura manométrica. A tabela 1 fornece os tipos principais de curvas estáveis e instáveis.

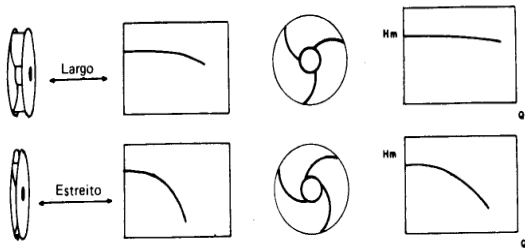
Tabela 1. Principais tipos de curvas características

tipo	classificação	conceito	gráfico
estáveis	<i>rising</i>	À medida que a vazão diminui, altura manométrica aumenta	
	<i>steep</i>	Apresenta grande diferença de altura manométrica para pequena variação de vazão	
	<i>flat</i>	A altura manométrica varia pouco com a vazão	
Instáveis	<i>droping</i>	A aplicação de bombas com este tipo de curvas depende muito das características dos sistemas de tubulações	
	(Classificação com nome desconhecido)	Própria de algumas bombas centrífugas de elevada rotação. São usadas em tubulações cujas curvas tenham grande inclinação.	

### 3.4 - Variação das curvas características

As curvas características das bombas centrífugas são sensíveis às variações do diâmetro, da rotação e da forma do rotor. Assim, alterada uma dessas grandezas, a curva característica da bomba se modificará. A tabela 2 é explicativa a esse respeito, mostrando, para cada caso, as equações que relacionam as grandezas primitivas com as grandezas alteradas. Essas equações são chamadas equações de similaridade.

Tabela 2. Características de bombas centrífugas (Fox e McDonald, 1981)

Variação	Comentário	Equações
Diâmetro do rotor	A cada diâmetro corresponde uma curva característica. Se a forma e a rotação se mantiverem constantes, a variação do diâmetro do rotor dá origem a curvas características paralelas sendo que as superiores referem-se aos diâmetros maiores. Se o diâmetro do rotor de certa bomba for modificado, as curvas características da máquina apresentam relações bem definidas com as características originais. A raspagem do rotor pode ser feita até 20% do valor máximo do diâmetro sem afetar apreciavelmente o rendimento da máquina.	$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1}$ $\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$ $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3$
Rotação	Conservando a forma e o diâmetro do rotor, a energia transferida ao fluido circulante varia com o número de rotação (n). A curva característica da bomba também se modifica, porque a altura manométrica cresce com o número de giros do rotor na unidade de tempo.	$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}$ $\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$ $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$
Forma do rotor	Compete ao fabricante levantar as curvas correspondentes aos rotores de uso possível na mesma carcaça. Rotores de canais de maior largura fornecem curvas características do tipo chato (flat) e permitem vazões maiores para determinada altura manométrica. Rotores de canais estreitos ocasionam curvas do tipo steep. O número de pás influi na forma da curva característica da bomba.	

1 : características originais do rotor (diâmetro do rotor =  $D_1$ );

2 : características com o rotor raspado (diâmetro do rotor reduzido para  $D_2$ )

### 3.5 Ponto de trabalho

As curvas estáveis, principalmente o tipo rising, apresentam as maiores alturas manométricas quando a vazão é nula. Este ponto onde a curva corta o eixo das ordenadas, é chamado de *shut off*. Nesta situação as bombas trabalham com suas rotações normais, mas com os registros das tubulações fechados.

O ponto de trabalho é o ponto de equilíbrio de funcionamento do sistema de recalque. Abrindo gradualmente o registro, começa o escoamento do fluido e as correspondentes perdas de carga, diminuindo o valor da altura manométrica. Com o aumento da vazão de escoamento, progressivamente a energia cinética vai aumentando e, conseqüentemente a pressão vai diminuindo até atingir o equilíbrio, no ponto em que as curvas características da bomba e do sistema se cruzam. Este ponto é o ponto de trabalho PT, conforme mostra a Fig. 3.

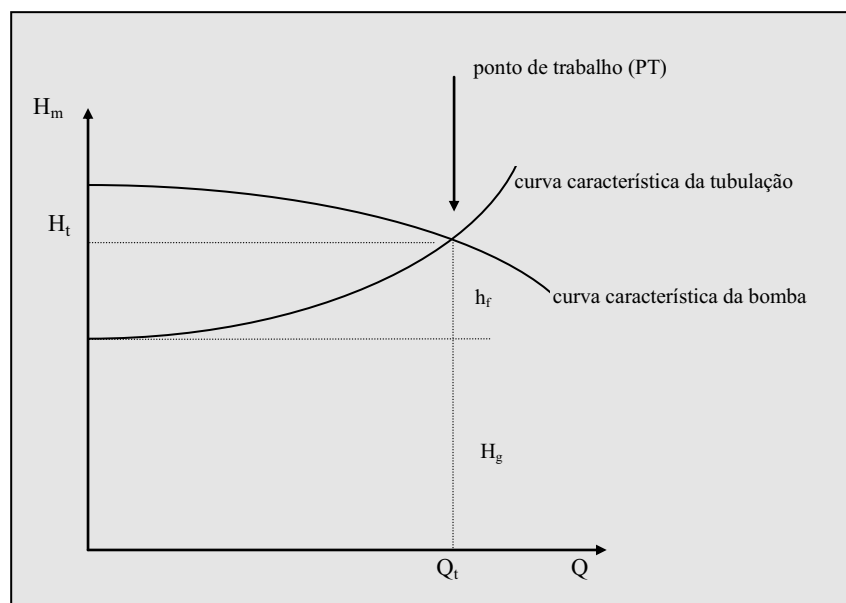


Figura 3 - Ponto de trabalho

Assim, com a abertura do registro, as curvas características da bomba e da tubulação encontram-se no ponto PT, ponto de trabalho, que fornece a vazão  $Q_t$  e altura manométrica  $H_t$ . Observando a curva característica do sistema de bombeamento (indicada como curva característica da tubulação na Fig. 3), notamos que a vazão cresce de zero ao valor de trabalho  $Q_t$ , enquanto a altura manométrica cresce de  $H_g$  até seu valor de regime  $H_t$ .

### 3.6 NPSH

Ao especificar um conjunto moto-bomba deve-se ter precauções referentes ao *Net Positive Suction Head* - NPSH (energia específica positiva líquida de sucção) e à potência absorvida. Além disto, é importante verificar a compatibilidade da variação da vazão com o serviço destinado à bomba.

NPSH é um importante parâmetro a ser levado em conta na fase de projeto de um circuito: quando a pressão do líquido cai abaixo da pressão de vapor, a vaporização do

líquido ocorre, e o efeito final será a cavitação: bolhas de vapor podem reduzir ou parar o fluxo de líquido. NPSH é a energia específica mínima que o escoamento pode ter na boca de sucção da bomba para que não ocorra cavitação. Um conceito semelhante à NPSH é a altura de sucção máxima,  $H_{s,máx}$ .

Bombas centrífugas são particularmente vulneráveis à cavitação. Já as bombas de deslocamento positivo são menos afetadas pela cavitação, sendo capazes de bombear fluxos de duas fases (mistura de gás e líquido).

O colapso violento das bolhas de cavitação cria ondas que podem escavar material dos componentes internos da bomba e criar ruído que é popularmente descrito como "bombear cascalho". Adicionalmente, o inevitável aumento na vibração pode causar outras falhas mecânicas na bomba e equipamentos associados.

### 3.7 Envelhecimento das tubulações

Com o passar do tempo, as tubulações envelhecem, aumentam as perdas de carga e, por conseguinte, crescem as alturas manométricas fazendo com que as bombas trabalhem com vazões menores, como demonstra a Fig. 4.

Ao crescer a altura manométrica, o ponto de trabalho se desloca de 1 para 2 e a bomba passa a fornecer a vazão  $Q_2$ , menor do que  $Q_1$ .

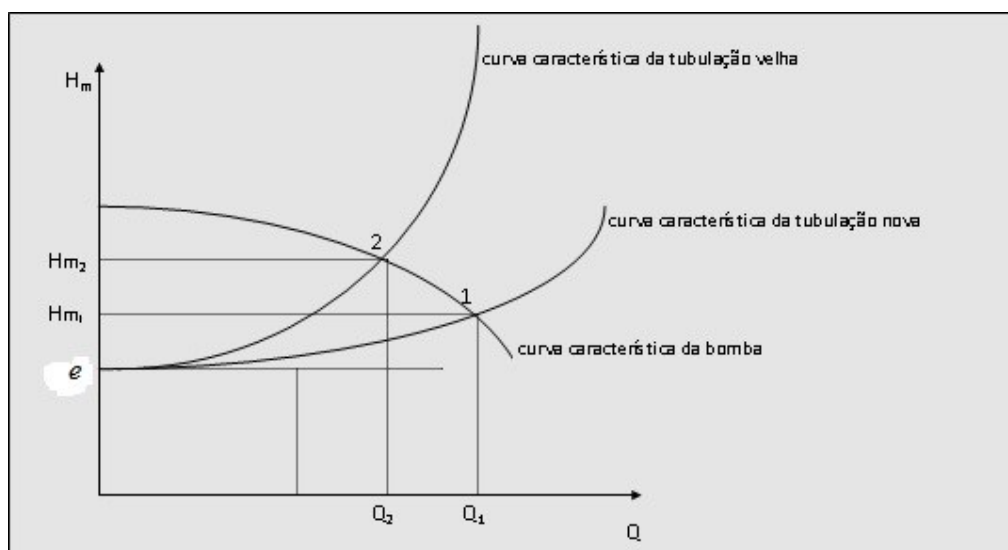


Figura 4 - Curva característica x envelhecimento das canalizações

### 3.8 Variação dos níveis de sucção e de recalque

Quando a água é bombeada de um reservatório inferior para um superior, os níveis de água nos reservatórios de sucção e de recalque alteram. Enquanto no reservatório inferior o nível de água está baixando, no superior está subindo. Isso modifica a altura geométrica de elevação de um valor mínimo até um máximo (Fig. 5). Como consequência, a curva característica do sistema desloca-se paralelamente a ela mesma, como indica a Fig. 6.

Nesses casos, calculamos a altura geométrica mínima que é obtida quando as alturas de sucção e de recalque assumem os menores valores, e a altura geométrica máxima fornecida pela soma da altura de sucção com a de recalque maiores. Traçamos as curvas

características da tubulação correspondentes às duas situações e determinam-se os pontos de trabalho (1) e (2), como indica a Fig. 6.

Para a altura manométrica maior  $H_{m2}$ , a bomba fornece a vazão  $Q_2$  inferior à  $Q_1$ . O ponto de trabalho da bomba se desloca de (1) para (2).

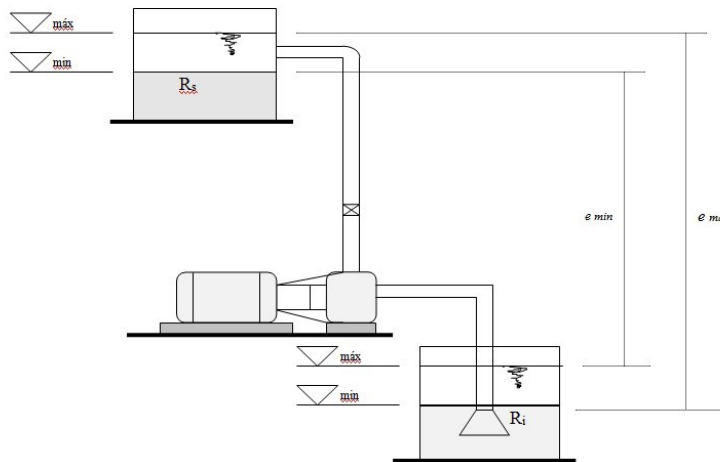


Figura 5 – Variação da altura geométrica

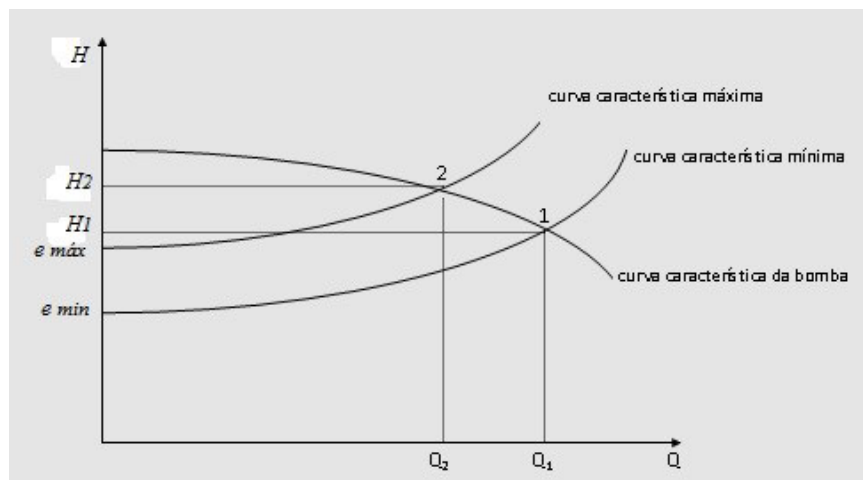


Figura 6 – Curvas características em função da variação da altura geométrica

Assim, se o conjunto elevatório atender aos pontos extremos (1) e (2) atenderá, evidentemente, aos pontos intermediários.

### 3.9 Parábolas de isoefficiência

Como citado anteriormente, a curva característica de determinada bomba varia com o número de giros do rotor. Quando a máquina deve operar com diferentes rotações, podemos construir um gráfico mostrando seu completo desempenho para alturas manométricas e vazões correspondentes. Para tanto, traçamos as curvas  $Q$  vs.  $H_m$ , relativas às velocidades a serem consideradas (Fig. 7). Em seguida, traçamos as



parábolas de isoefficiência, por meio das quais podemos escolher a rotação e a vazão desejadas, dentro do campo de operação da máquina.

Como os pontos das curvas de isoefficiência obedecem às equações abaixo, podemos escrever:

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^2 \quad \text{ou} \quad \frac{Q_1^2}{H_1} = \frac{Q_2^2}{H_2} = \text{constante}$$

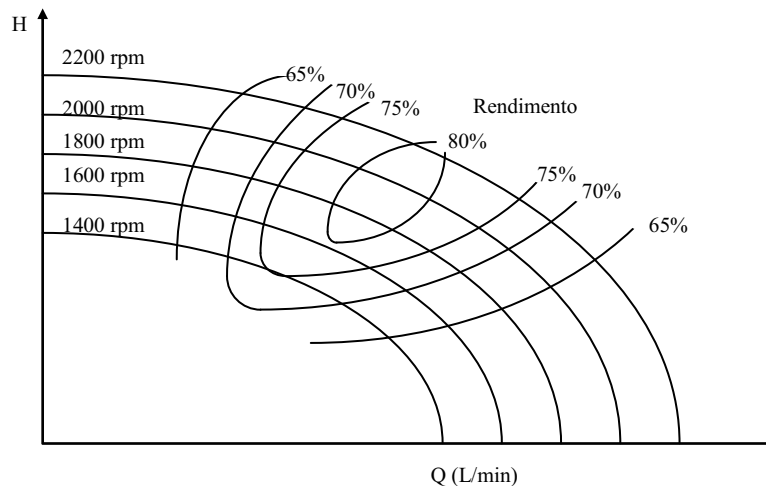


Figura 7 - Parábolas de isoefficiência

Portanto, a equação das parábolas de isoefficiência será

$$\frac{Q^2}{H} = \text{constante}$$

equação que nos permite construir as parábolas indicadas na Fig. 8.

#### 4. SISTEMA EXPERIMENTAL

Nas figuras 8 e 9 vemos a montagem experimental para o ensaio de bomba centrífuga com água como fluido de trabalho. A seção de medição de vazão é alimentada através da bomba. Os medidores de vazão foram instalados cumprindo as condições da norma ASME, com 40 diâmetros livres a montante e 10 a jusante. Este requerimento da norma visa minimizar efeitos indesejáveis no escoamento (deformação de linhas de fluxo, turbulência), induzidos por cotovelos, válvulas, etc. Cada um dos medidores tem tomadas de pressão adequadamente instaladas, segundo norma própria. O diferencial de pressão é medido em manômetro apropriado.

Na saída da seção de teste da tubulação existe um divisor de fluxo que permite conduzir o fluxo de água para o reservatório ou para um tanque-coletor, instalado numa balança. O direcionamento do fluxo para o tanque-coletor permitirá a determinação da vazão real.

A bomba, com 4 estágios, modelo KSB 32/4, está devidamente instalada em balanço para se medir o torque através de um dinamômetro. O torque é determinado multiplicando-se a força transmitida ao dinamômetro pelo comprimento do braço da

alavanca (63cm). Há manômetros instalados na entrada e na saída da bomba para se medir as pressões de sucção e de recalque da mesma.

O nível de água no reservatório, quando cheio, está 86 cm acima do nível do chão. A linha de sucção possui 2,5 pol de diâmetro, 4,4m de comprimento, 3 cotovelos de 90°, uma união e uma válvula gaveta. A linha de descarga possui 1,5 pol de diâmetro. A entrada da bomba encontra-se 77 cm acima do nível do chão. Outras características da linha poderão ser verificadas durante o experimento.



Figura 8. Fotografia da bomba.

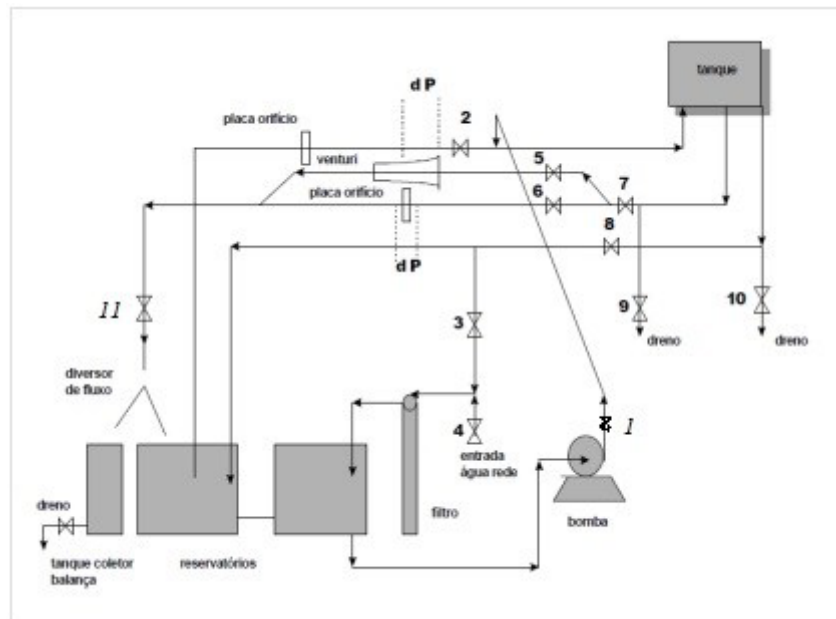


Figura 9. Bancada experimental para o ensaio de bomba centrífuga.

## 5. PROCEDIMENTO

Para sua segurança e preservação do equipamento, leia com cuidado este item. Em caso de dúvida, não hesite em perguntar ao professor, ao PED ou ao técnico de laboratório.

- 1) Medir a pressão atmosférica, temperatura ambiente e temperatura da água no tanque.
- 2) Medir o valor da pré-carga no dinamômetro e ajustar o ponteiro sobre ela.
- 3) Certifique-se de que todas as válvulas do sistema estejam fechadas, exceto V1 e V11.
- 4) Verificar que os calços do motor da bomba e da balança, que mede o torque da mesma, estejam devidamente desconectados. (O motor da bomba encontra-se “em balanço”, para permitir a medição do torque).
- 5) Identificar os manômetros de entrada e saída da bomba no painel de controle.
- 6) Certificar-se de que o divisor está direcionado para o reservatório e abra completamente a válvula N°11. Esta válvula deve ser mantida aberta o tempo todo.
- 7) Ligar a bomba.
- 8) Escolher uma rotação de trabalho entre 3500 e 2000 rpm. Manter a mesma rotação durante todo o experimento.
- 9) Medir a vazão de água impulsionada pela bomba. Para isso desviar o divisor para o tanque situado sobre a balança e utilizar um cronômetro para registrar o tempo necessário para que determinada massa seja adicionada ao reservatório.
- 10) Ler as pressões de entrada e saída da bomba e o torque aplicado.
- 11) Repita o procedimento para vazões diferentes (mínimo de seis), regulando-as pela válvula N° 1.
- 12) Abra quase completamente a válvula N° 1 e faça as leituras novamente.
- 13) Reduzir a rotação da bomba para 1500 rpm.
- 14) Desligar a bomba.

## **6. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

Apresentar e discutir as curvas de altura manométrica por vazão, potência absorvida por vazão, rendimento por vazão e NPSH disponível por vazão. Discutir os resultados obtidos.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Fox, R. W. ; McDonald, A.T., Introdução à Mecânica dos Fluidos, Ed. Guanabara Dois, 1981.
- Macintyre, A. J, Bombas e Instalações de Bombeamento, Ed. Guanabara Dois, 1980.
- Cherkassky, V. M., Pumps, Fans and Compressors, Mir Publishers, Moscow, 1980.
- Foust, A. S.; Wenzel, L. A.; Clump, C. W.; Maus, L.; Andersen, L. B., Princípios de Operações Unitárias, LTC Editora, 1982.
- Gupta, S. K., Momentum Transfer Operations, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1979.
- Perry, R. H.; Chilton, C. H., Manual do Engenheiro Químico, 5ª. Ed., Editora Guanabara Dois, 1979.