

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**PME- 3453 MÁQUINAS DE FLUXO - LABORATÓRIO**

**EXPERIÊNCIA Nº 1**

**BOMBAS DINÂMICAS OU DE FLUXO**

**LEVANTAMENTO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS  
DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA RADIAL  
(DINAMÔMETRO DE TORÇÃO)**

**PROF. SÉRGIO ROBERTO CECCATO  
2023**

# 1. Introdução

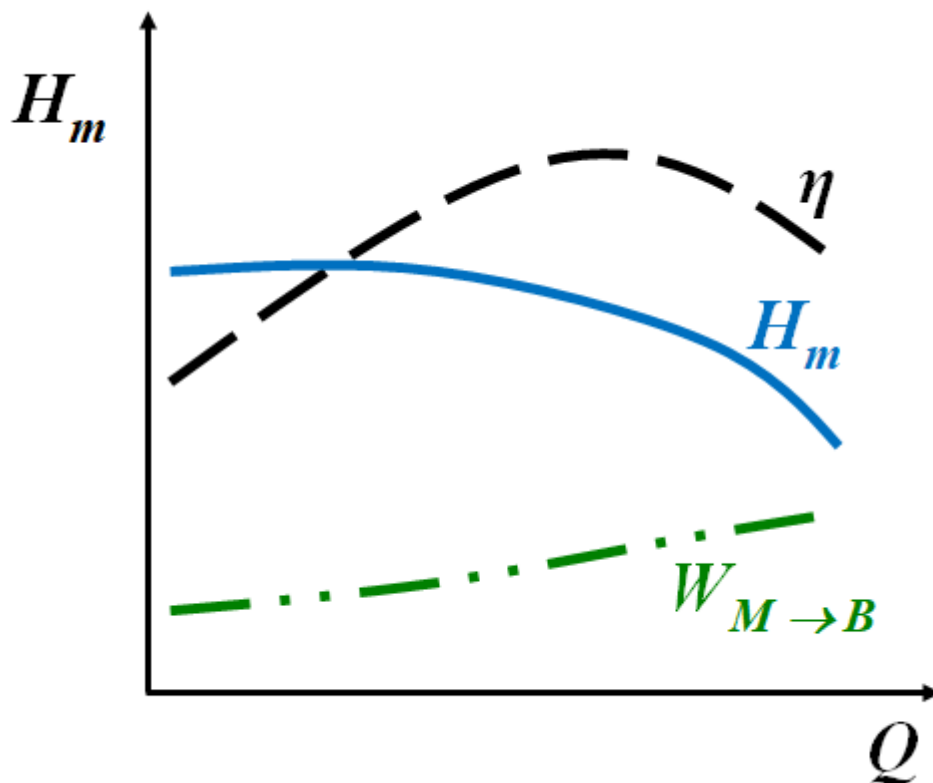
O objetivo da presente experiência é o levantamento das curvas características de uma bomba centrífuga radial (Fig. 1.1).

As curvas características de uma bomba centrífuga radial são representadas pelas seguintes grandezas, em função da vazão (Q):

$$H_m = f(Q) \text{ Altura manométrica da bomba}$$

$$W_{M \rightarrow B} = f(Q) \text{ Potência fornecida do } M_{otor} \text{ para a } B_{omba}$$

$$\eta = f(Q) \text{ Rendimento da bomba}$$



**Fig. 1.1** – Curvas características de uma bomba centrífuga radial.

## 2. Resumo teórico

$W_{B \rightarrow F}$  Potência fornecida da **B**omba para o **F**luido

$$W_{B \rightarrow F} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{75} \quad (\text{cv})$$

$W_{M \rightarrow B}$  Potência fornecida do **M**otor para a **B**omba

$$W_{M \rightarrow B} = \frac{M_t \cdot \omega}{75} \quad (\text{cv})$$

$Q$

Vazão fornecida pela bomba

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{l/s})$$

$\eta$

Rendimento da bomba

$$\eta = \frac{W_{B \rightarrow F}}{W_{M \rightarrow B}} \quad (\%)$$

$H_m$

Altura manométrica fornecida pela bomba

$$H_m = M_r + M_s + \Delta h \quad (\text{m})$$

**NOTA :** Ver mais adiante, no item “8. Apêndice”, a obtenção da equação acima com a aplicação da Equação da Energia, com o volume de controle desde imediatamente à entrada (Sucção) da bomba até imediatamente à saída (Recalque) da bomba, aonde se obtém, **para a geometria da instalação do laboratório**, os valores de  $H_m$ , ponto a ponto, através da soma, **em valores absolutos**, das grandezas  $M_r + M_s + \Delta h$ .

$n$

Rotação do motor em rpm

(rpm)

$\omega$

Rotação do motor em rd/s

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (\text{rad/s})$$

Onde:

$\gamma$  = Peso específico da água; (kgf/m<sup>3</sup>)

$V$  = Volume preenchido do reservatório; (m<sup>3</sup>)

$t$  = Tempo de enchimento do reservatório; (s)

$M_s$  = Leitura do manômetro da sucção; (m)

$M_r$  = Leitura do manômetro de recalque; (m)

$\Delta h$  = Diferença de cota entre os manômetros; (m)

$n$  = Rotação do motor em rpm; (rpm)

$\omega$  = Rotação do motor rd/s; (rd/s)

$M_t$  = Momento de torção entre motor e bomba. (kgf·m)

O momento de torção aplicado à bomba, ( $M_t$ ), é determinado usando-se um dinamômetro de torção, do tipo com barra de seção transversal circular.

Da resistência dos materiais sabemos que o momento de torção é proporcional e linear com o ângulo de torção ( ver Anexo 6.3) pela seguinte relação:

$$M_t = G \cdot \varphi \cdot I_P \quad (\text{kgf}\cdot\text{m})$$

Sendo:

$G$  = módulo de elasticidade transversal (característica do material da barra);

$\varphi$  = ângulo de torção por unidade de comprimento (característica da deformação angular da barra, por unidade de comprimento da barra);

$I_P$  = momento polar de inércia (característica da seção transversal da barra).

Em cada extremidade do dinamômetro estão fixados discos graduados, pelos quais podemos ler, no espelho instalado, um ângulo de torção ( $\Delta\theta$ ) da barra. Sabendo as características da mesma podemos calcular o valor de ( $M_t$ ), ou simplesmente obter este valor do gráfico do Anexo 6.3.

Usaremos, nesta experiência, o gráfico de calibração, fornecido no Anexo 6.3, para a barra usada. No presente caso a barra que será usada tem como limite máximo o valor de 5 kgf.m de torção no regime elástico.

### 3. Esquema da instalação e componentes principais

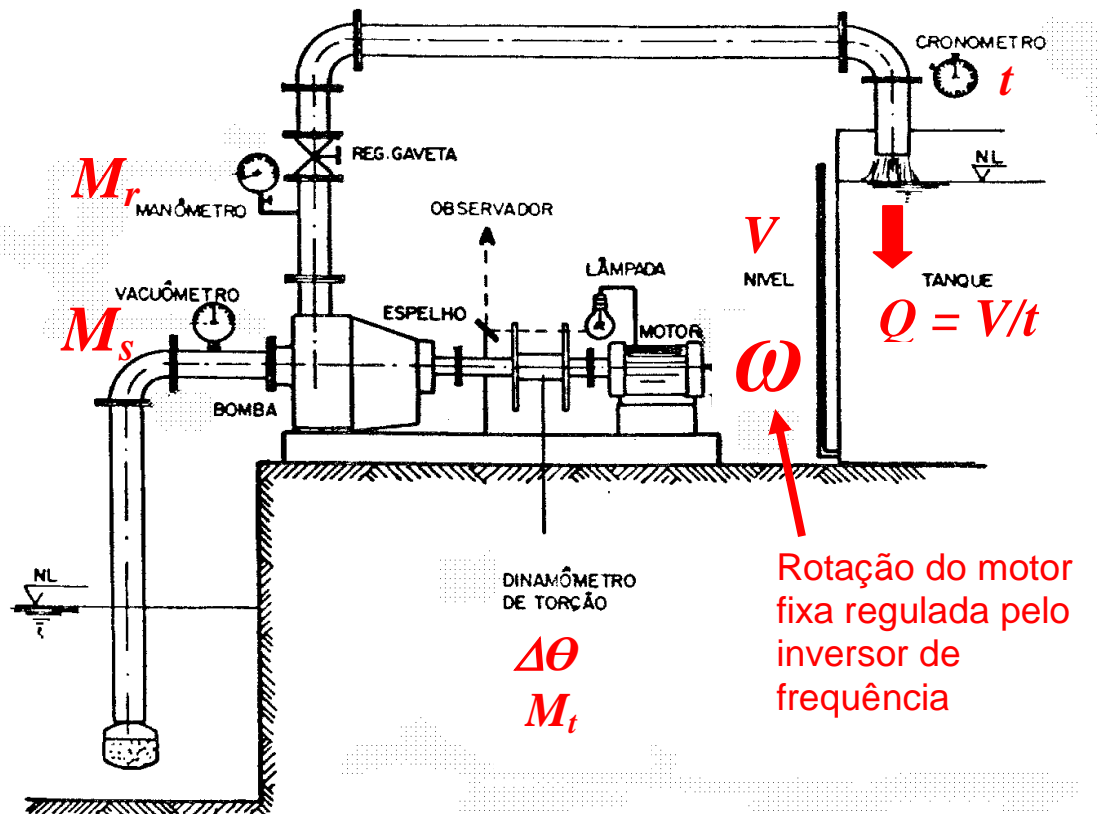


Fig. 3.1 – Esquema da instalação.

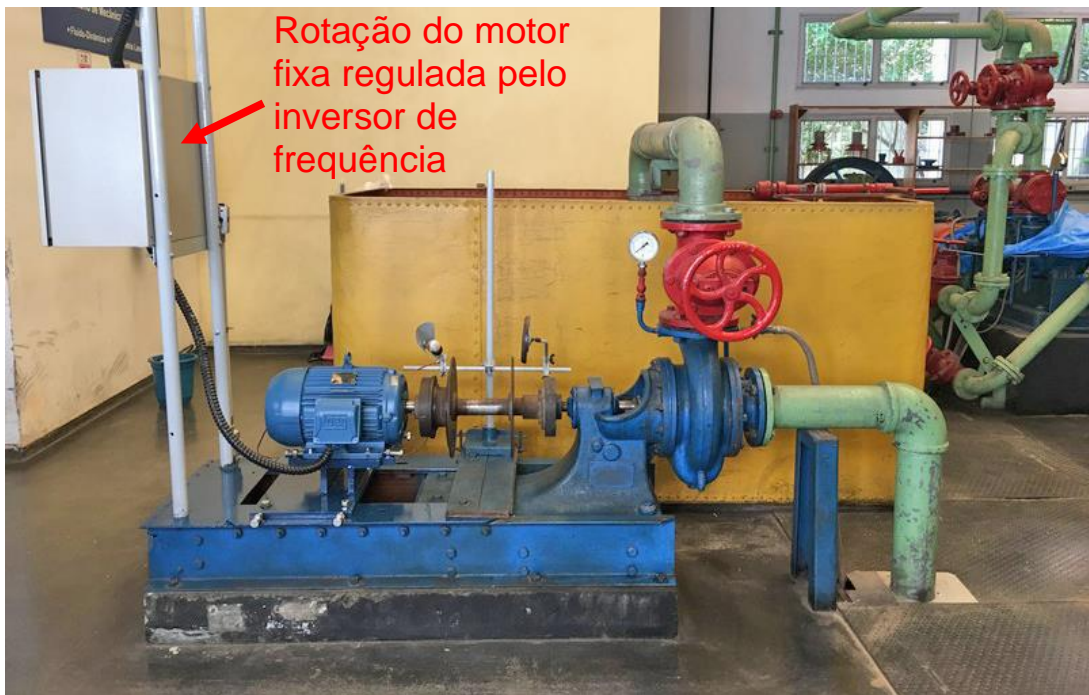


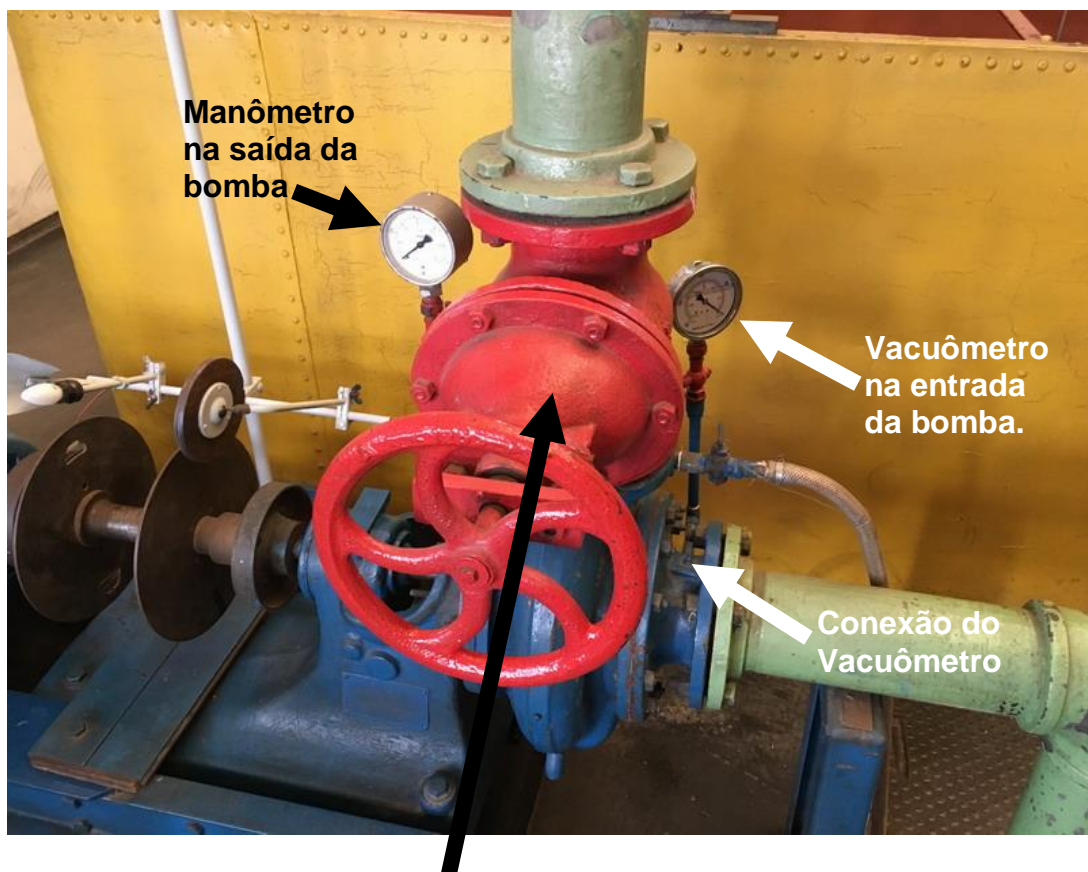
Fig. 3.2 – Componentes da instalação.



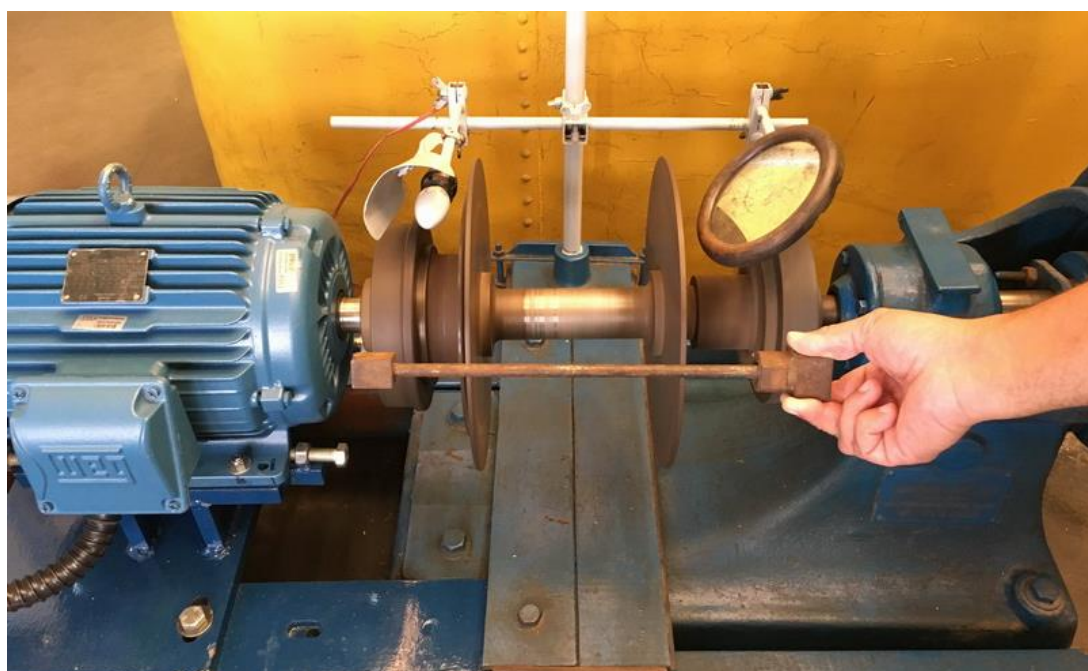
**Fig. 3.3** - Motor WEG, 10 cv, de velocidade variável, por inversor de frequência.



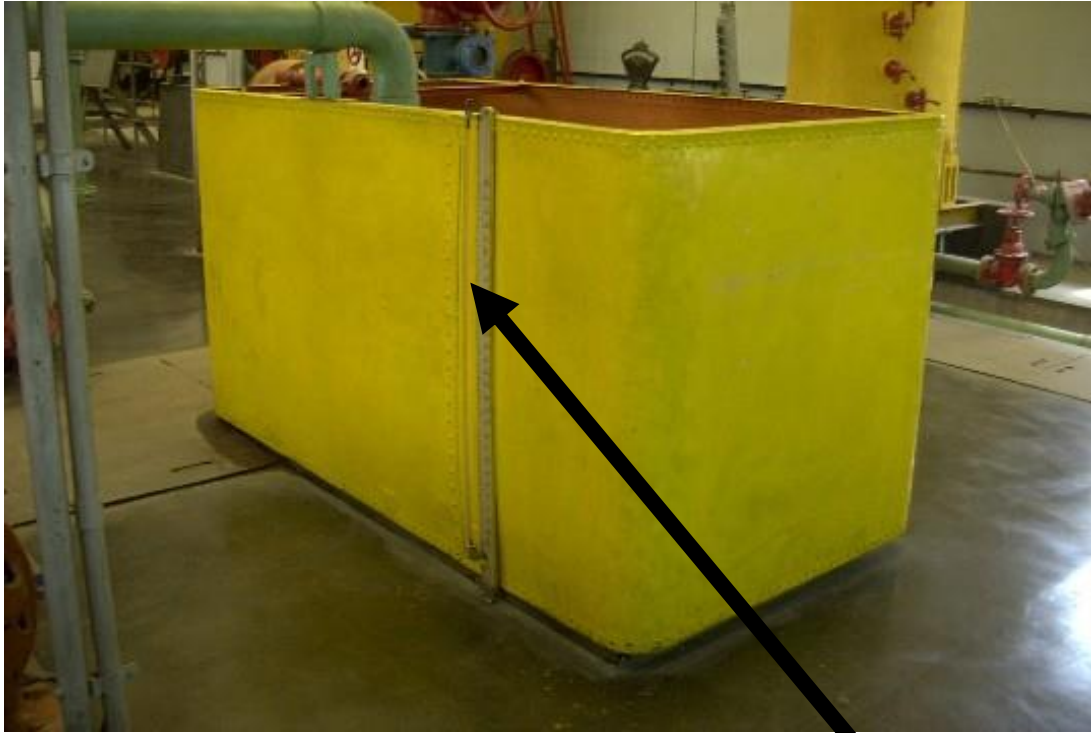
**Fig. 3.4** - Bomba "Gasmotorenfabrik Deutz", centrífuga radial.



**Fig. 3.5** - Registro do tipo **GAVETA**.  
**VACUÔMETRO** na entrada da bomba e **MANÔMETRO** na saída da bomba.



**Fig. 3.6** - Dinamômetro de Torção "Amsler", montado com a barra de torção de 5 kgf·m.



**Fig. 3.7** - Tanque de Descarga com indicação de nível tipo mangueira.

#### 4. Procedimento experimental

- Com a bomba “escorvada” (rotor totalmente envolvido com fluido) e com o registro totalmente fechado, liga-se o motor. A vazão neste momento será zero.
- Conseqüentemente neste ponto será solicitada a mínima potência do motor pela bomba (“característica básica das bombas dinâmicas ou de fluxo”. O rotor estará apenas cisalhando o fluido e a energia se dissipa sob forma de calor). Neste ponto, portanto, o momento ( $Mt$ ) aplicado na barra de torção do dinamômetro será o mínimo ( $\Delta\theta$  mínimo)
- Para medição do “**Primeiro Ponto**” abre-se o registro de recalque até a vazão máxima .



Conseqüentemente neste ponto será solicitada a máxima potência do motor pela bomba (“característica básica das bombas dinâmicas ou de fluxo”).

Neste ponto o momento aplicado na barra de torção do dinamômetro será o máximo ( $\Delta\theta$  máximo)

Anotam-se os valores:

- Do Vacuômetro na entrada da bomba;
  - Do Manômetro na saída da bomba;
  - Do valor de ( $\Delta\theta$ );
  - Do valor do ( $\Delta h$ ) (diferença de cotas entre o Manômetro e o Vacuômetro; valor fixo para toda a experiência. Ver Anexo 6.1).
- 
- Ao completar um determinado volume do tanque, suficiente para estimar a vazão corretamente, anotamos esse valor simultaneamente à marcação do cronômetro.
  - Para os próximos pontos (para um total de 8 a 10 pontos de medição) a sugestão é a de regularmos ponto a ponto valores cada vez menores para o ( $\Delta\theta$ ), por intermédio do fechamento do registro de gaveta, diminuindo discretamente a vazão da máxima para a mínima até o “**Último Ponto**” ( $Q = \text{zero}$ ).
  - Repetimos as medições para todos os pontos conforme procedimento acima.

## 5. Dados experimentais coletados e calculados (Tabela 5.1 sugerida)

$\Delta h$  = Diferença de cotas entre os manômetros;

Valor fixo para toda a experiência.

PONTOS	$M_s$ (*)	$M_r$ (*)	$V$ (L)	$t$ (s)	$\Delta\theta$ (**)	$M_t$ (kgf·m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$M_s$ (m)	$M_r$ (m)	$\Delta h$ (m)	$H_m$ (m)	$W_{B-F}$ (cv)	$W_{M-B}$ (cv)	$\eta$ (%)
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														

**Tabela 5.1** - Dados experimentais e calculados (tabela sugerida)

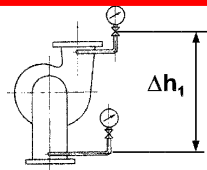
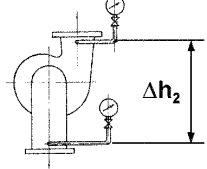
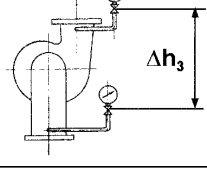
(\*) Verificar no Laboratório as unidades (também chamadas de “fundo de escala”) do Manômetro e do Vacuômetro instalados.

(\*\*) Unidade de subdivisão angular, particular e conveniente do aparelho “Dinamômetro de Torção da AMSLER” (Não é GRAU ° e nem RADIANO.) tirado do Gráfico do Anexo – 6.3.

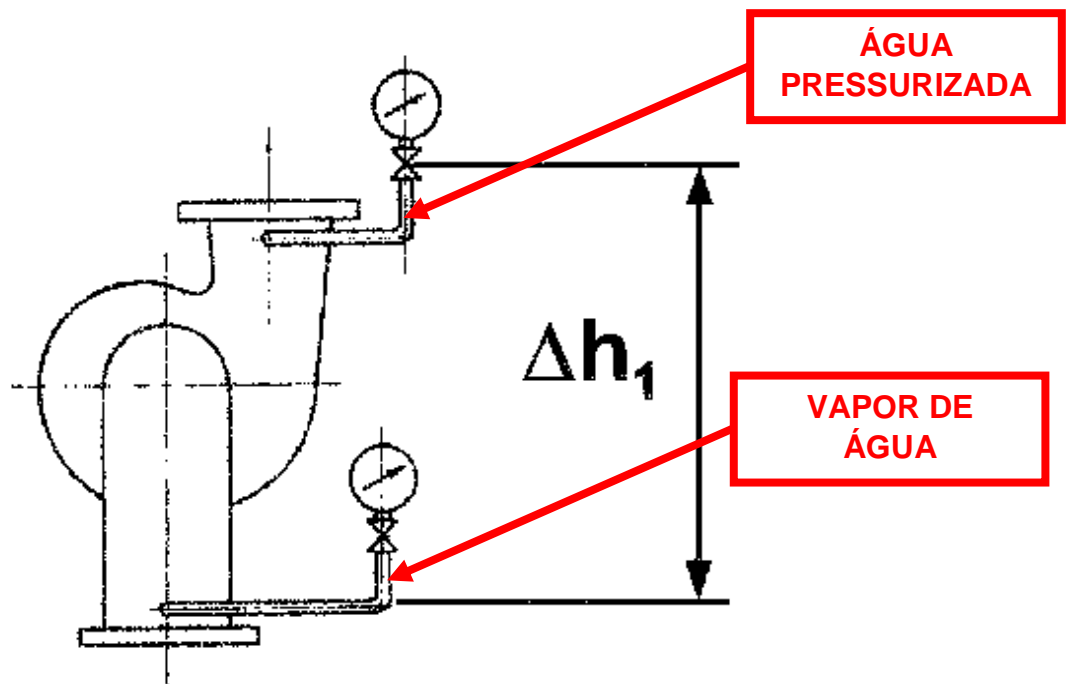
# ATENÇÃO

A geometria da instalação no Laboratório da experiência de número 1 corresponde a situação descrita na primeira linha.

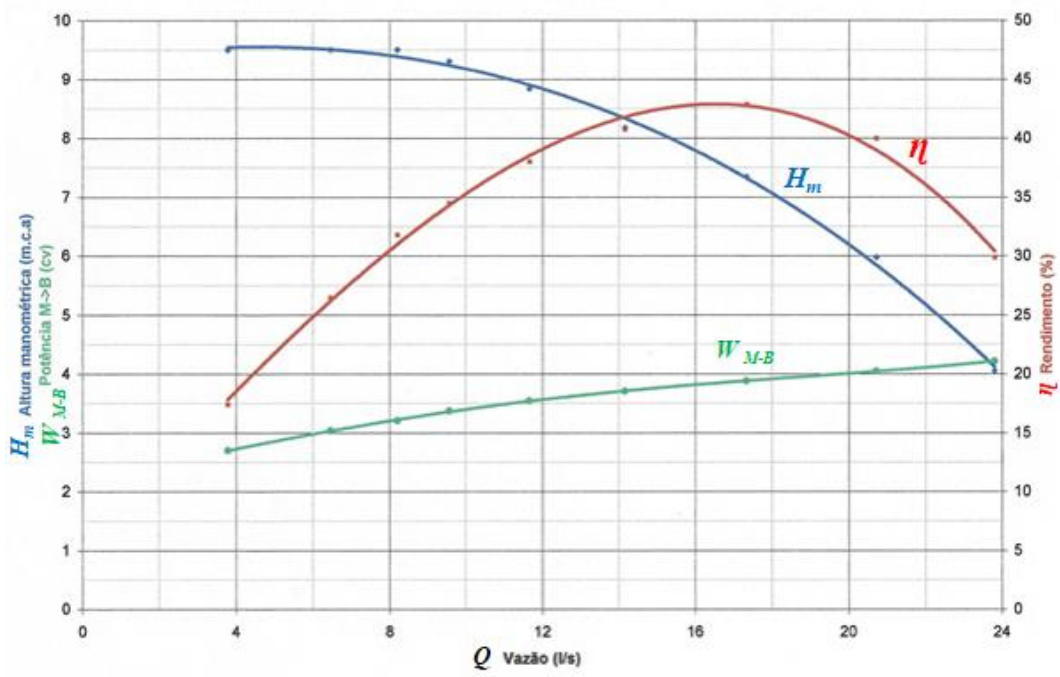
## 6. Anexos

MANÔMETRO DE SUÇÃO (ENTRADA DA BOMBA)	MANÔMETRO DE RECALQUE (SAIDA DA BOMBA)	MEDIDA DO $\Delta h$ A SER CONSIDERADA	ESQUEMA
ABAIXO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	ACIMA DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	$\Delta h_1$	
ABAIXO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	ABAIXO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	$\Delta h_2$	
ACIMA DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	ACIMA DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	$\Delta h_3$	

B

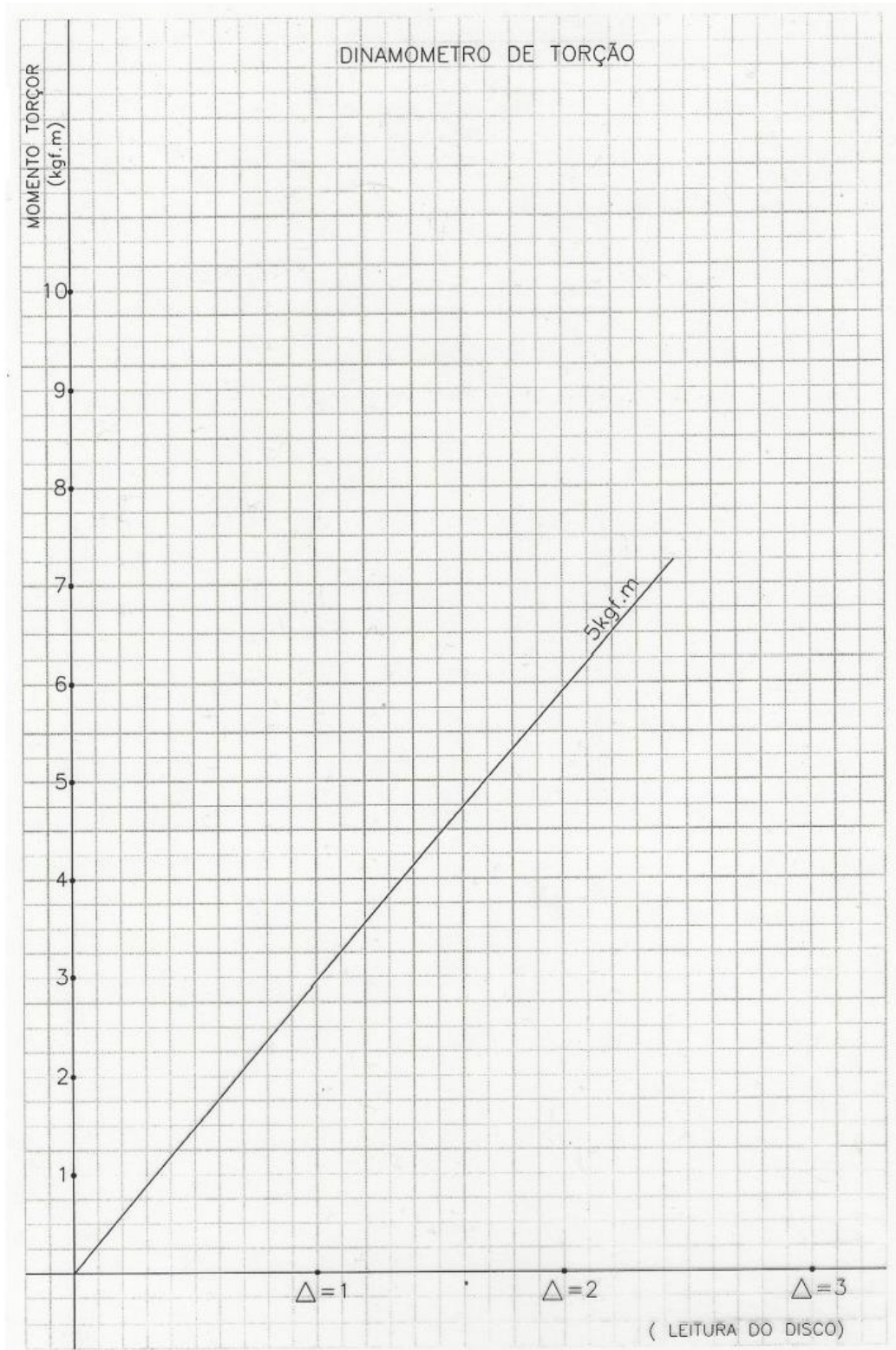


Anexo 6.1 - Determinação do ( $\Delta h$ ) (diferença de cotas entre manômetros)



**Anexo – 6.2 -** Curvas características experimentais da bomba

$M_t$



$\Delta\theta$

Dinamômetro de Torção Amsler – Gráfico de Calibração da Barra de 5 kgf.m

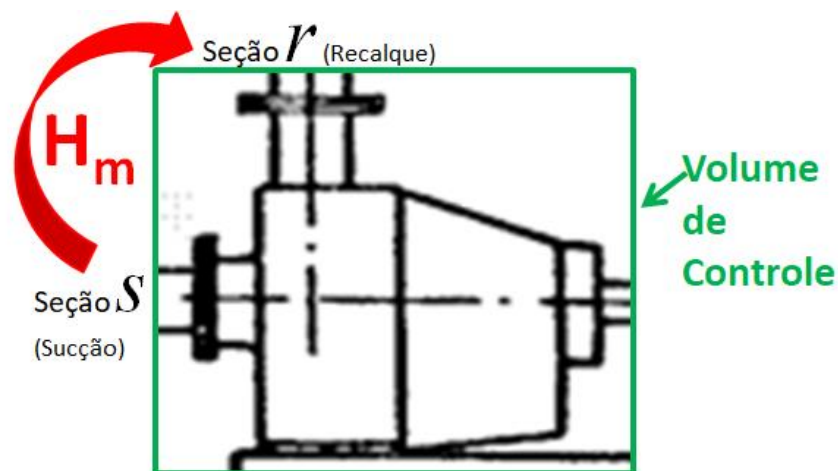
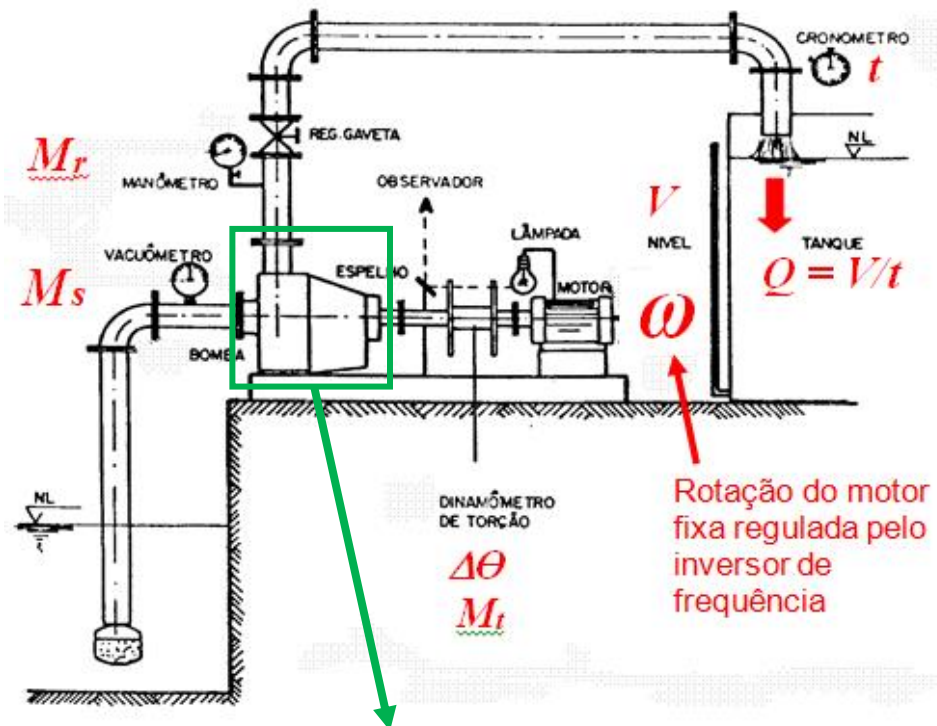
**Anexo 6.3** - Gráfico para a determinação do ( $M_t$ ) em função do ( $\Delta\theta$ ).

## 7. Observações

- Procurar organizar o relatório. Como sugestão dividi-lo em etapas:
  - Introdução ou Objetivo;
  - Resumo Teórico;
    - Descrever sucintamente o ensaio e o seu procedimento experimental apresentando os modelos matemáticos utilizados na experiência;
  - Esquema da Instalação;
    - Desenho os Fotos de preferência tiradas pelo próprio aluno;
  - Parâmetros Informados, Coletados e Calculados
    - Em uma Planilha;
  - Gráficos;
  - Conclusões;
- Procurar redigir o relatório sem muita redundância ou sintético demais;
- Procurar dispor os gráficos ao longo de toda a área de plotagem do sistema cartesiano;
- Quando não em indicação em contrário, plotar os gráficos iniciando as escalas no (0,0) do sistema cartesiano;
- Buscar escalas adequadas nos eixos não usando valores “quebrados”;
- Colocar o título do gráfico;
- Colocar os títulos nos eixos com as respectivas unidades;

## 8. Apêndice

aplicação da Equação da Energia, com o volume de controle desde imediatamente à entrada (Sucção) da bomba até imediatamente à saída (Recalque) da bomba, aonde se obtém, **para a geometria da instalação do laboratório**, os valores de  $H_m$ , ponto a ponto, através da soma, em valores absolutos, das grandezas  $M_r + M_s + \Delta h$ .



A Bomba fornece a Energia, ou Carga  $H_m$ , para o fluido, da Seção  $S$  para a seção  $R$

Determinação da **Carga Manométrica**  
ou da **Altura Manométrica**  $h_m$  da Bomba:

Sendo  $h = \frac{p}{\gamma} + \alpha \frac{v^2}{2g} + z$  a **Carga na Seção**, temos:

$$H_m = h_r \text{ (recalque da bomba)} - h_s \text{ (sucção da bomba)}$$

$$H_m = \left( \underbrace{\frac{p_r}{\gamma}}_{\text{Energia Piezométrica recalque}} + \underbrace{\alpha_r \frac{v_r^2}{2g}}_{\text{Energia Cinética recalque}} + \underbrace{z_r}_{\text{Energia Potencial recalque}} \right) - \left( \underbrace{\frac{p_s}{\gamma}}_{\text{Energia Piezométrica sucção}} + \underbrace{\alpha_s \frac{v_s^2}{2g}}_{\text{Energia Cinética sucção}} + \underbrace{z_s}_{\text{Energia Potencial sucção}} \right)$$

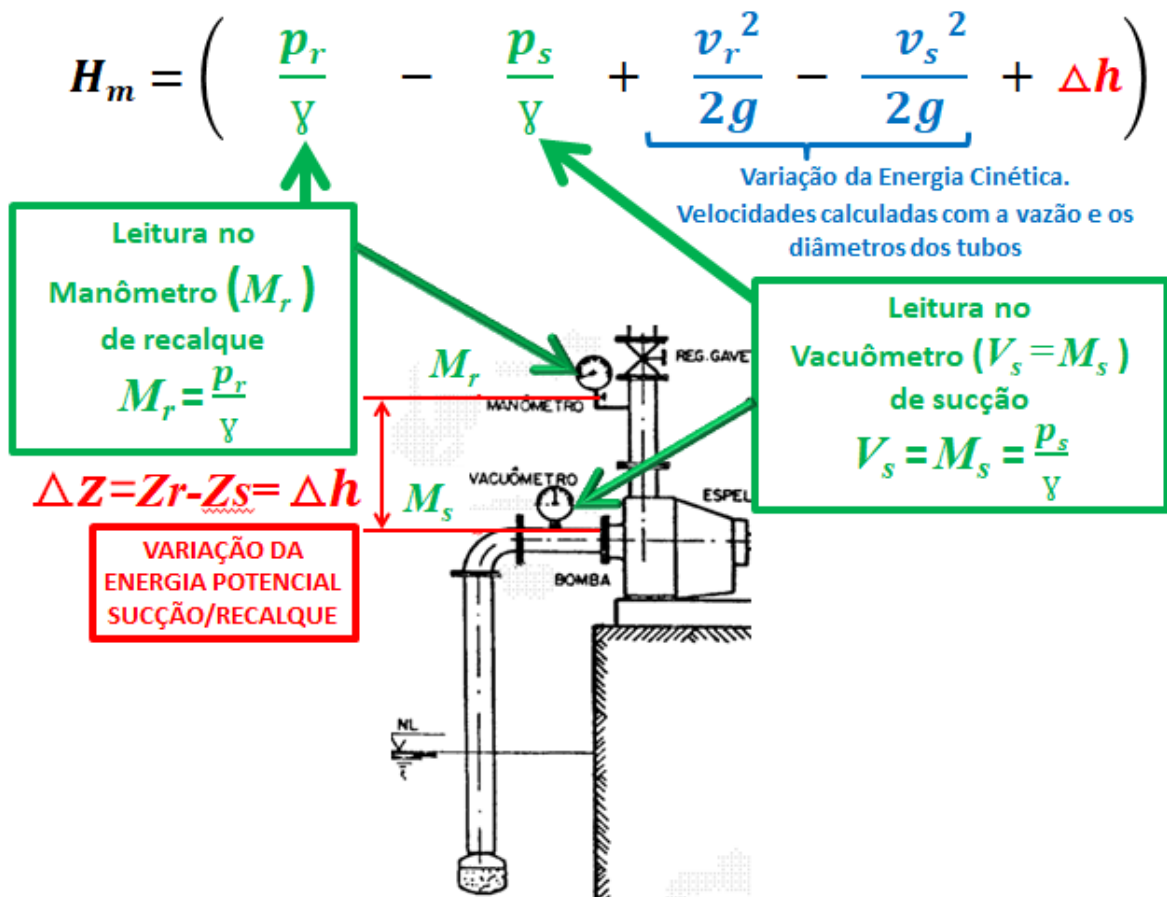
Como o regime é turbulento, logo temos:  $\alpha_s = \alpha_r = 1$

Reagrupando os parâmetros, temos para o balanço energético:

$$H_m = \left( \underbrace{\frac{p_r}{\gamma}}_{\text{Energia Piezométrica no recalque}} - \underbrace{\frac{p_s}{\gamma}}_{\text{Energia Piezométrica na sucção}} + \underbrace{\frac{v_r^2}{2g}}_{\text{Energia Cinética no recalque}} - \underbrace{\frac{v_s^2}{2g}}_{\text{Energia Cinética na sucção}} + \underbrace{z_r - z_s}_{\text{Variação da Energia Potencial}} \right)$$

$$H_m = \left( \underbrace{\frac{p_r}{\gamma}}_{\text{Leitura no Manômetro de recalque}} - \underbrace{\frac{p_s}{\gamma}}_{\text{Leitura no Vacuômetro de sucção}} + \underbrace{\frac{v_r^2}{2g} - \frac{v_s^2}{2g}}_{\text{Variação da Energia Cinética}} + \underbrace{\Delta z}_{\text{Variação da Energia Potencial}} \right)$$





Para a determinação da altura manométrica ( $H_m$ ) da bomba, temos:

$$H_m = \underbrace{M_r}_{\substack{\text{Leitura no} \\ \text{manômetro } (M_r) \\ \text{de recalque} \\ \text{relativa à atmosfera} \\ \text{local, portanto um} \\ \text{VALOR POSITIVO}}} - \underbrace{M_s}_{\substack{\text{Leitura no} \\ \text{manômetro } (M_s) \\ \text{de sucção} \\ \text{relativa à atmosfera} \\ \text{local, portanto um} \\ \text{VALOR NEGATIVO}}} + \underbrace{\frac{v_r^2}{2g} - \frac{v_s^2}{2g}}_{\substack{\text{Variação da Energia} \\ \text{Cinética} \\ \text{No caso desta} \\ \text{experiência, os tubos} \\ \text{são de igual diâmetro,} \\ \text{não havendo variação} \\ \text{da Energia Cinética}}} + \underbrace{\Delta h}_{\substack{\text{Variação da} \\ \text{Energia} \\ \text{Potencial} \\ \text{(Medição} \\ \text{com trena no} \\ \text{laboratório)}}$$

Com os valores levantados experimentalmente podemos calcular, ponto a ponto:

$$H_m = f(Q) \quad (m)$$

e traçarmos a curva experimental requerida.

Portanto temos:

$$H_m = M_r - \underbrace{M_s}_{\text{valor negativo}} + \Delta h$$

Logo, em **MÓDULO**, para esta geometria da instalação do Laboratório temos :

$$H_m = \underbrace{M_r}_{\substack{\text{Leitura em valor} \\ \text{ABSOLUTO no} \\ \text{manômetro (M}_r\text{)} \\ \text{de RECALQUE}}} + \underbrace{M_s}_{\substack{\text{Leitura em valor} \\ \text{ABSOLUTO no} \\ \text{manômetro (M}_s\text{)} \\ \text{de SUCÇÃO}}} + \underbrace{\Delta h}_{\substack{\text{Valor FIXO} \\ \text{Medição} \\ \text{com trena}}}$$

Com os valores levantados experimentalmente podemos calcular, ponto a ponto:

$$H_m = f(Q) \quad (m)$$

e traçarmos a curva experimental requerida.

91

