

# **ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**PME 3230 – MECÂNICA DOS FLUIDOS – I**

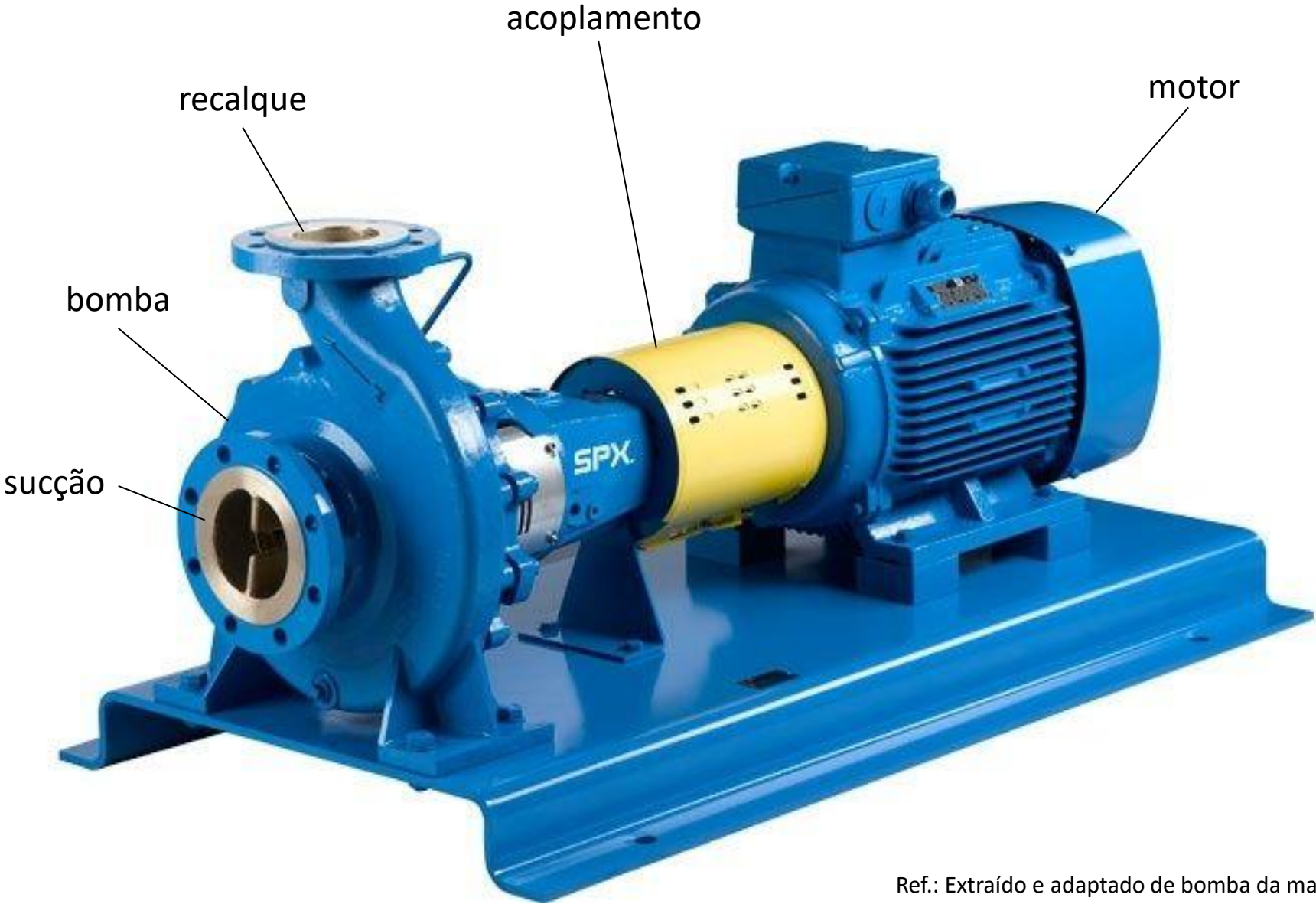
**AULA 2. L 6**

**A4: Estudo das bombas e  
da aplicação da análise dimensional e  
da teoria da semelhança.**

**Notas complementares para auxílio da  
realização dos experimentos e testes.**

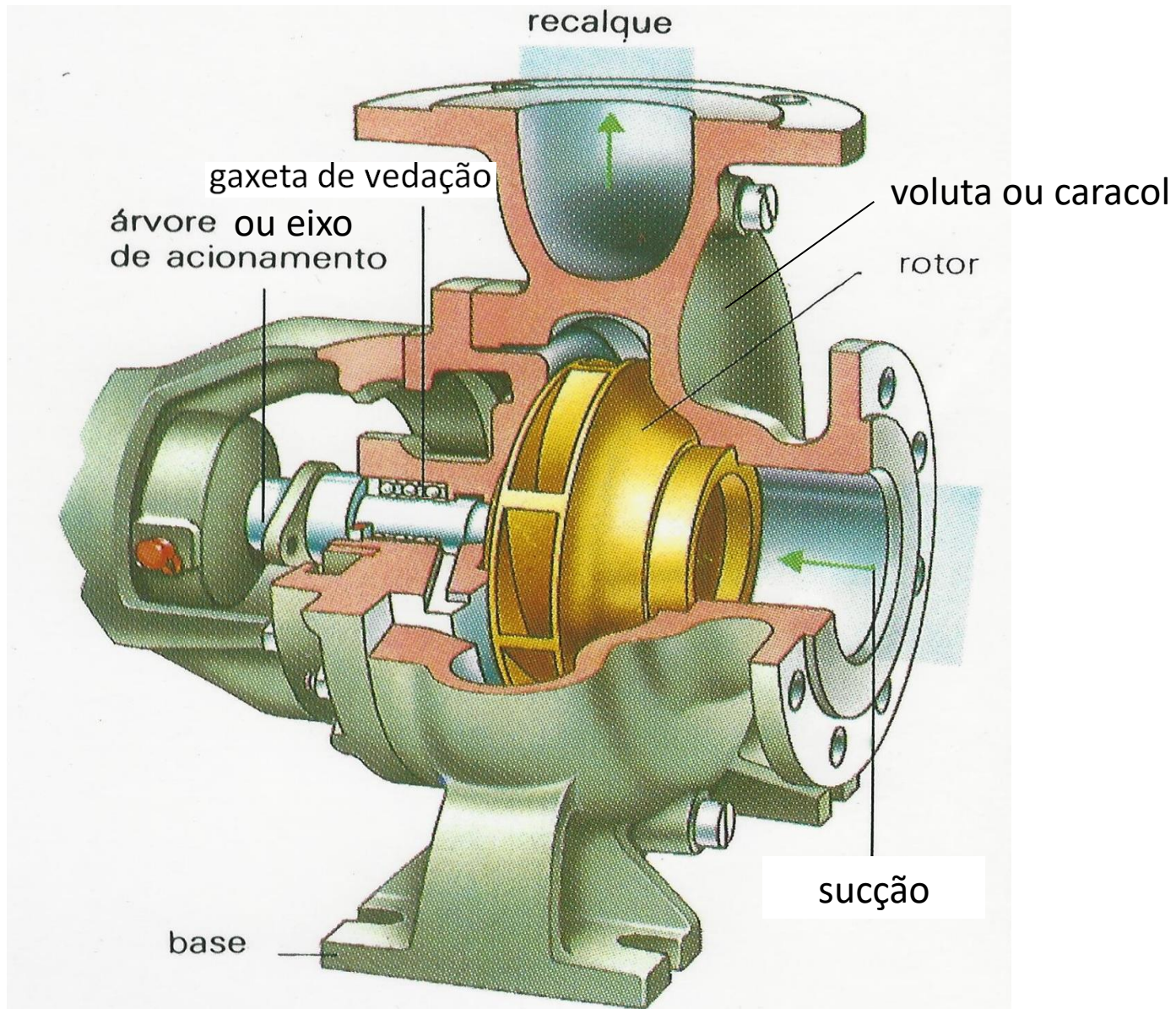
**2º Semestre de 2020**

# Conjunto de uma bomba centrífuga radial com acionamento

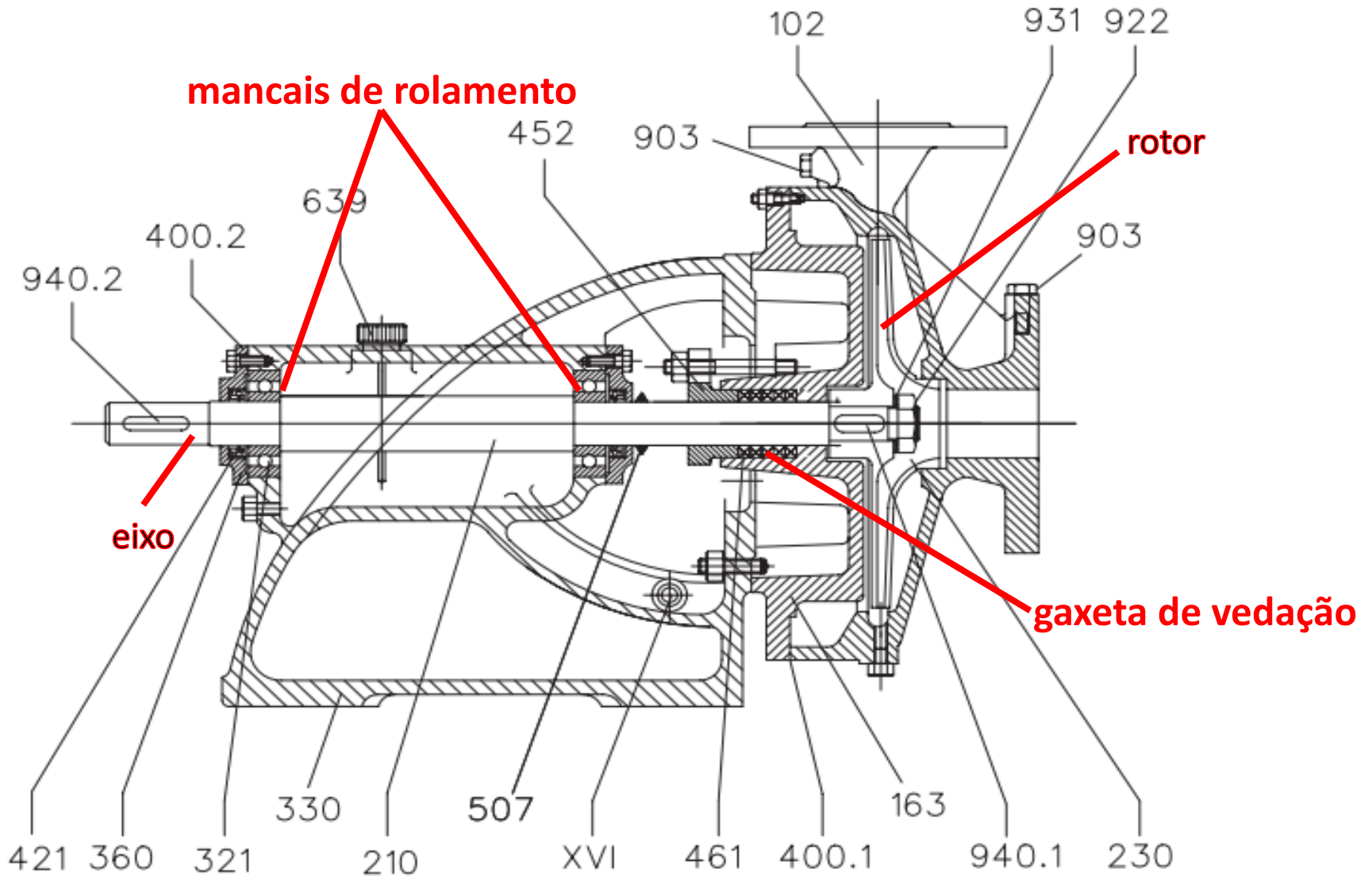


Ref.: Extraído e adaptado de bomba da marca SPX

# Componentes principais de uma bomba centrífuga radial

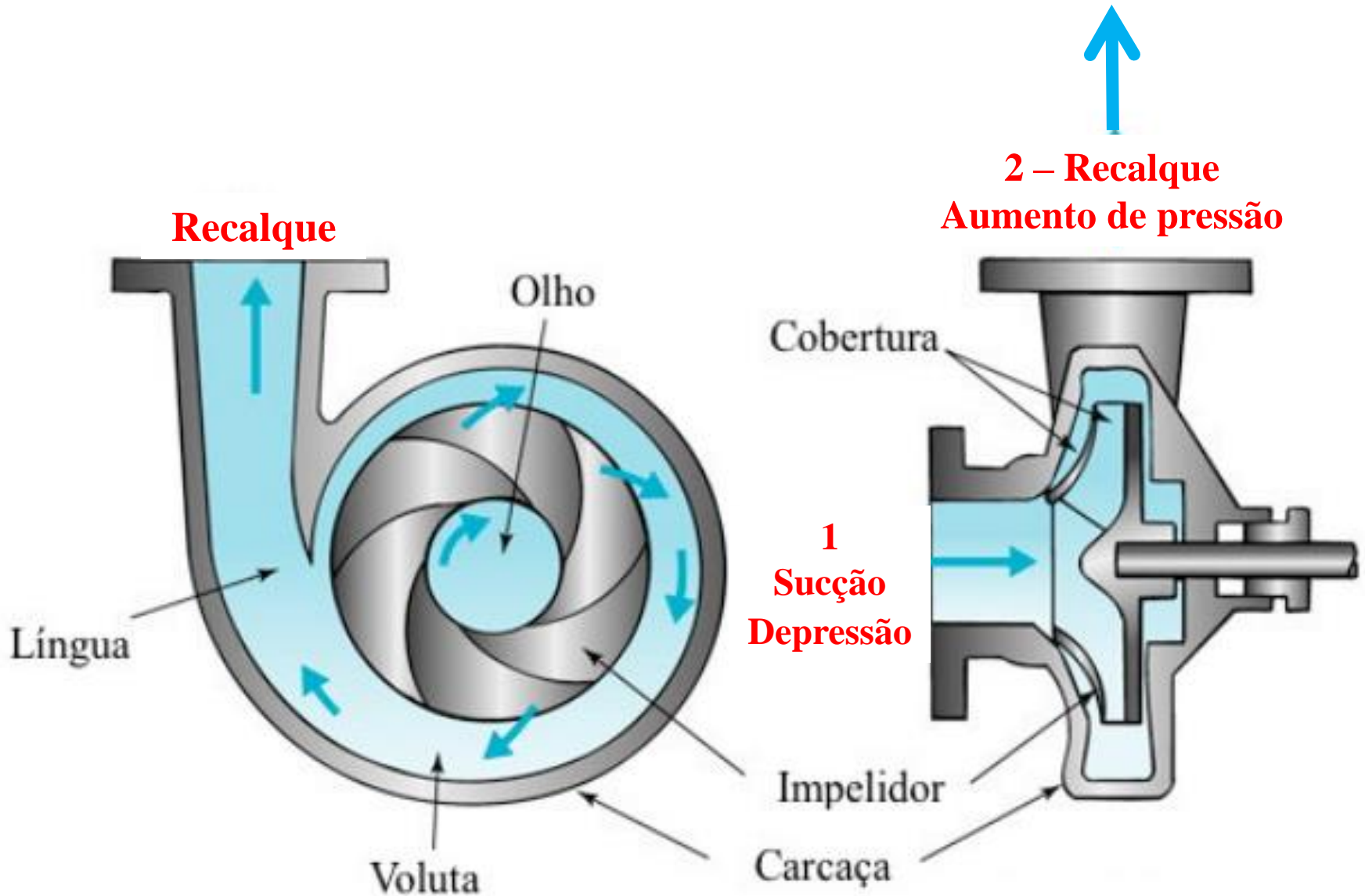


# Vista em corte de uma bomba centrífuga radial

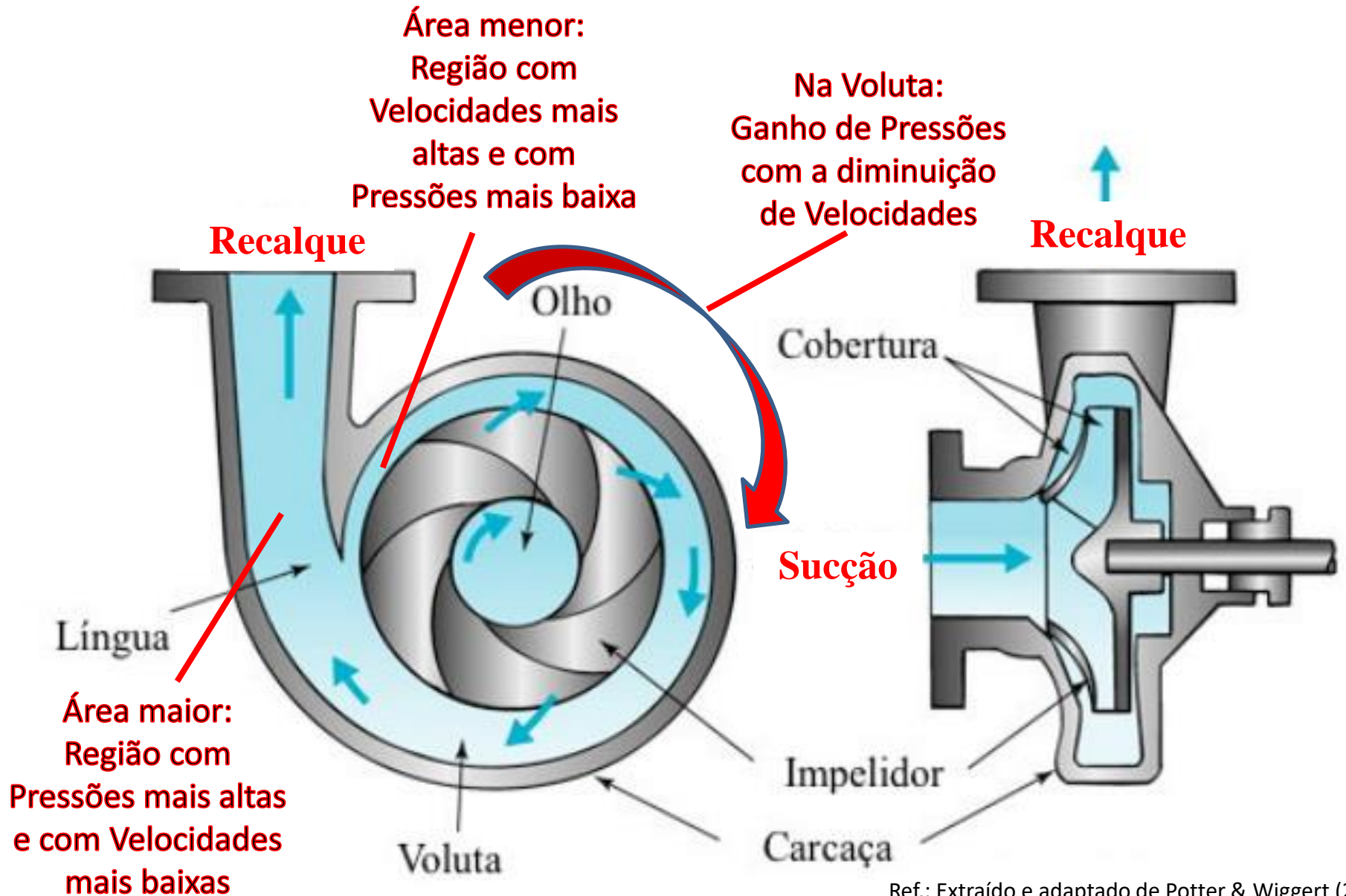




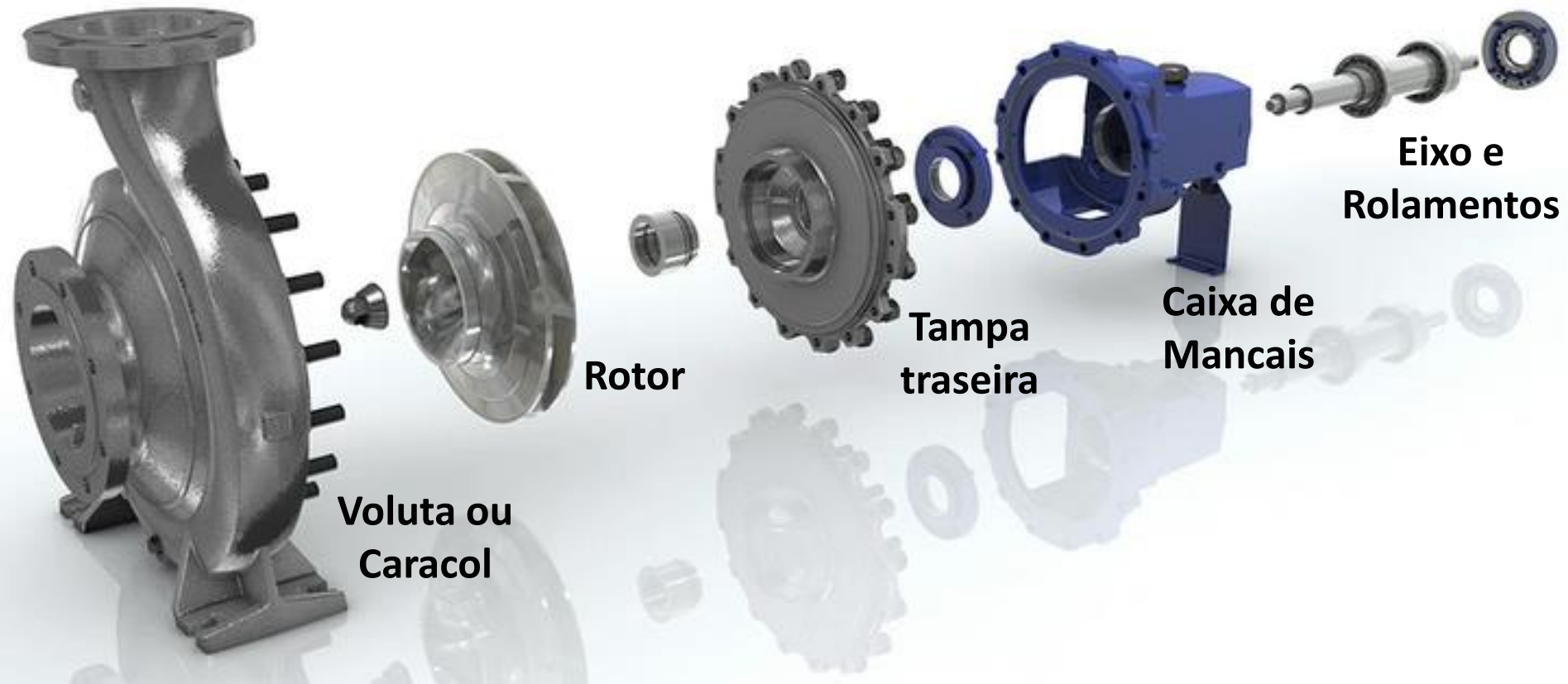
# Princípio de funcionamento de uma bomba Centrífuga Radial



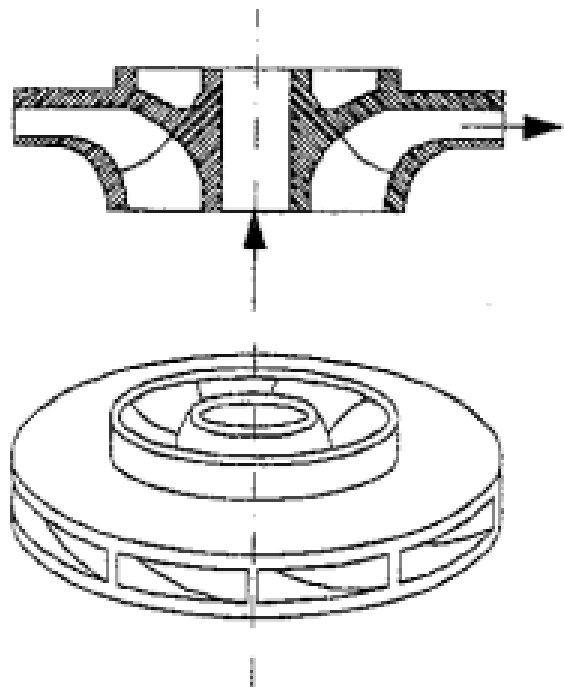
# Balanço de energias dentro da voluta, ou caracol, de uma bomba Centrífuga Radial



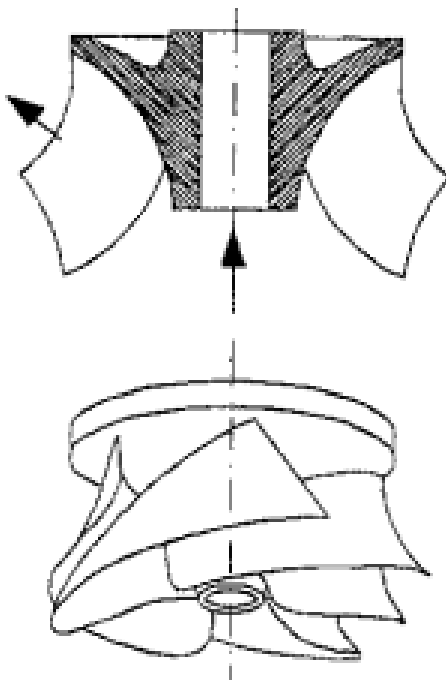
# Vista explodida de uma Bomba Centrífuga Radial



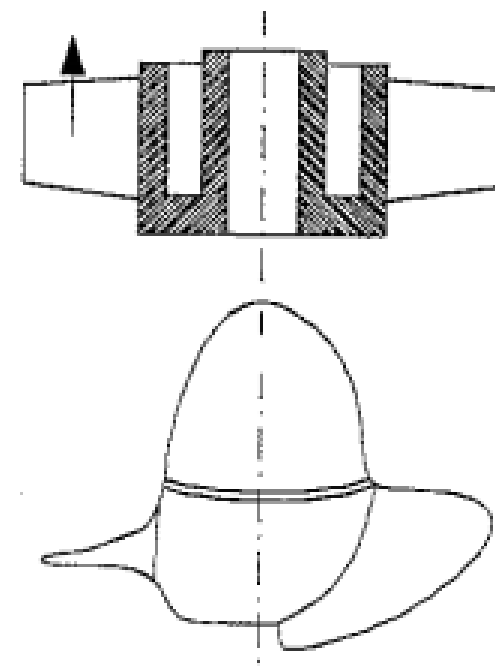
# Classificação conforme a direção do escoamento



(a) Rotor radial



(b) Rotor misto



(c) Rotor axial



# Classificação dos rotores radiais conforme a sua construção



Fechado



Semi-aberto



Aberto

**Devido à característica complexa do escoamento através de uma bomba centrífuga, o comportamento real de uma bomba não pode ser previsto, de modo preciso, a partir de uma base teórica.**

**Assim, o comportamento real de uma bomba é sempre determinado por via experimental de onde se obtém as**  
**Curvas Características da Bomba.**

# Curvas características experimentais de uma bomba centrífuga radial:

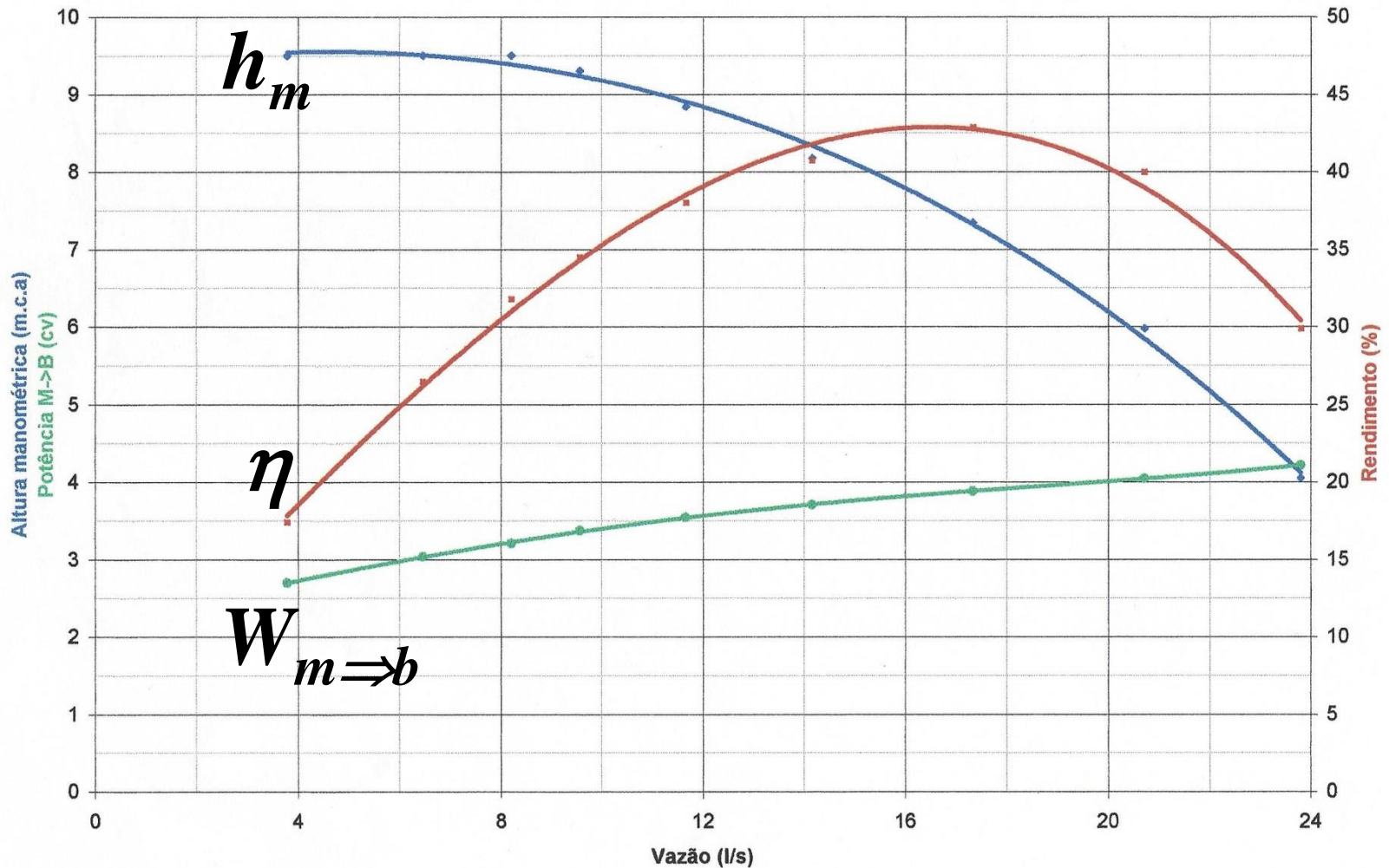
$h_m = f(Q)$  Carga Manométrica  
ou Altura Manométrica da bomba

$W_{m \Rightarrow b} = f(Q)$  Potência fornecida do motor para a bomba

$\eta = f(Q)$  Rendimento da bomba

# Curva característica experimentais da bomba.

Curvas características da bomba



# Tabela de dados afixada nas bancadas

DADOS	BANCADAS 1 A 6	BANCADA 7
ROTAÇÃO DAS BOMBAS	1710 rpm	1710 rpm
DIÂMETRO DO ROTOR	$(200 \pm 0,5)$ mm	$(205 \pm 0,5)$ mm
DIÂMETRO DO TUBO NO FLANGE DE ENTRADA	$(38,8 \pm 0,5)$ mm	$(38,8 \pm 0,5)$ mm
DIÂMETRO DO TUBO NO FLANGE DE SAIDA	$(29,6 \pm 0,5)$ mm	$(29,6 \pm 0,5)$ mm



# Folha de dados a ser preenchida pelo aluno por bancada

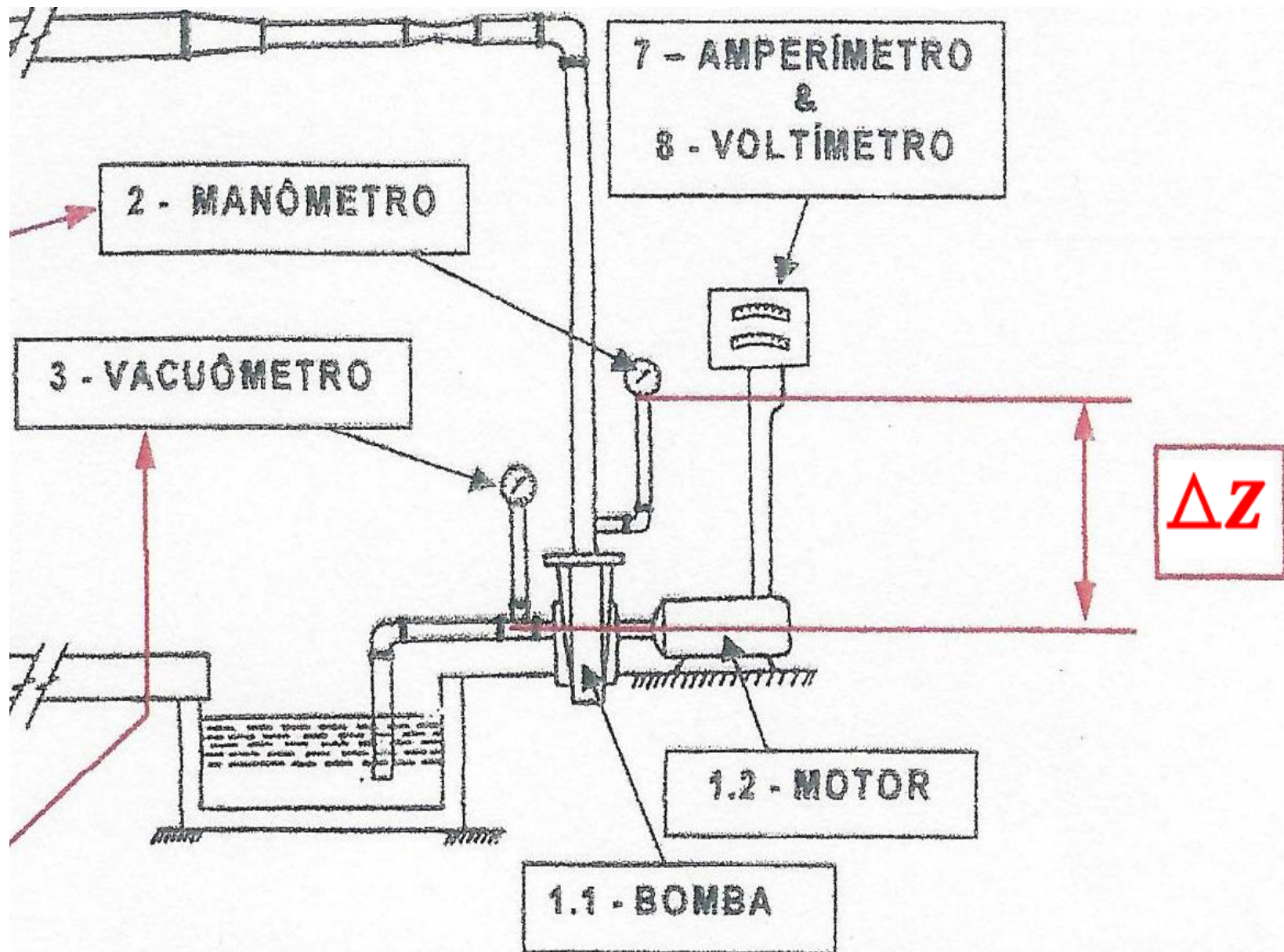
The diagram shows a pump system with the following components labeled:

- 1.1 - BOMBA (Pump)
- 1.2 - MOTOR (Motor)
- 2 - MANÔMETRO (Manometer)
- 3 - VACUÔMETRO (Vacuum gauge)
- 4 - BALANÇA (Scale)
- 5 - VÁLVULA DE TRÊS VIAS (Three-way valve)
- 6 - REGISTRO (Record)
- 7 - AMPERÍMETRO & 8 - VOLTÍMETRO (Ammeter & Voltmeter)

The vertical distance between the pump inlet and outlet is labeled  $\Delta Z$ . A photograph in the bottom left shows the physical setup with a similar  $\Delta Z$  label.

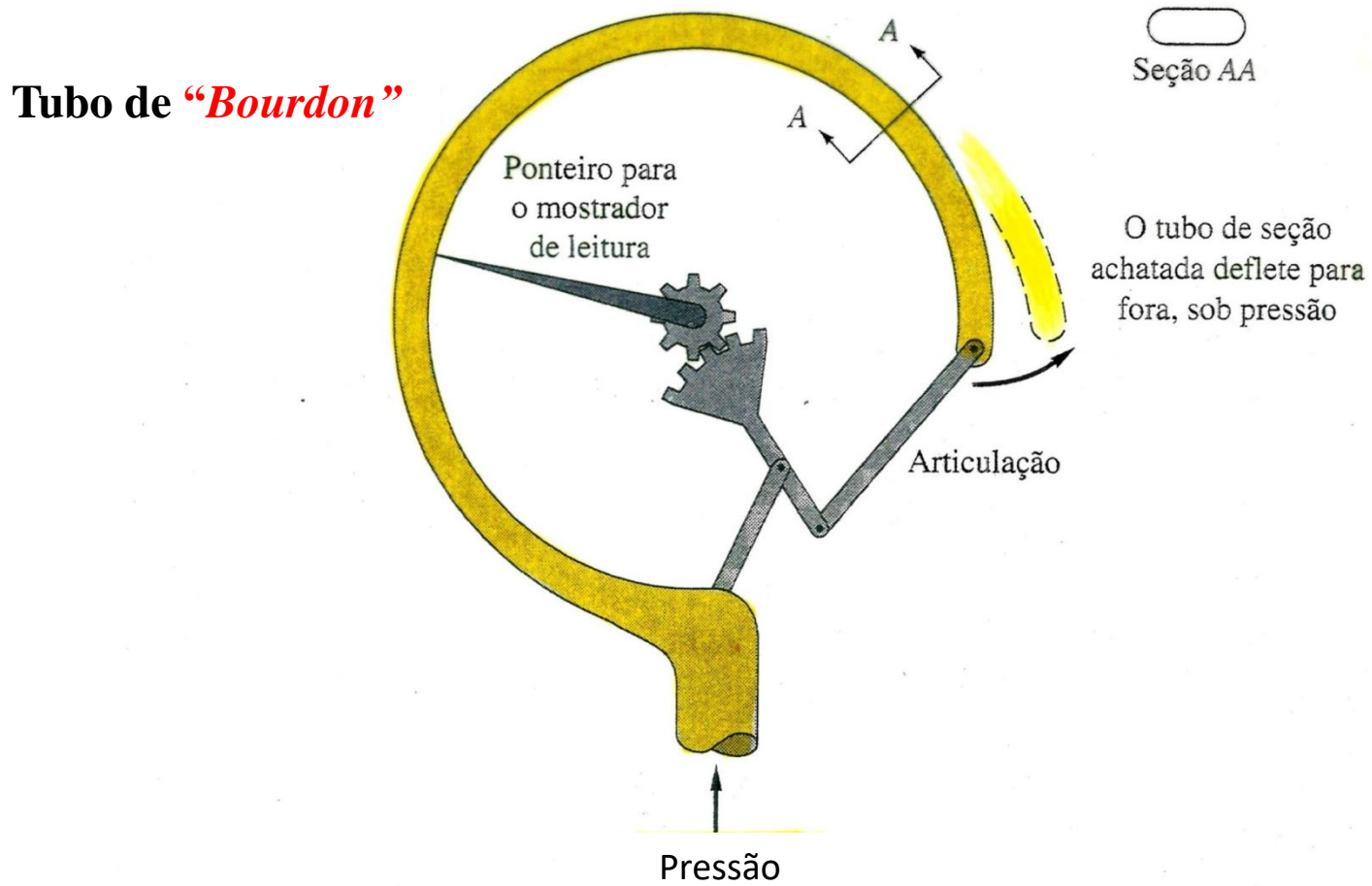
ROTAÇÃO DO MOTOR DA BOMBA (rpm)	1710 rpm
$\Phi$ DO ROTOR DA BOMBA (mm)	
$\Phi$ DO TUBO NO FLANGE DE ENTRADA DA BOMBA (mm)	
$\Phi$ DO TUBO NO FLANGE DE SAÍDA DA BOMBA (mm)	
$\Delta Z = Z_r - Z_s$ (mm) VER ANEXO - 1	
OBS.:-	

# Atenção para a medida do $\Delta Z$





# Manômetro metálico ou de “*Bourdon*”



Pelo fato do tubo de “*Bourdon*” estar “imerso” em uma dada atmosfera o manômetro metálico somente lê as pressões relativas à esta dada atmosfera.

# Manômetro metálico ou de “*Bourdon*”



# VACUÔMETRO Instalado somente na **SUCÇÃO**

Leitura do  
**VACUÔMETRO**

( $M_s$ )

na

**SUCÇÃO**

$$M_s = \frac{p_s}{\gamma}$$

Para a presente

instalação

Os valores são

**NEGATIVOS**

com relação à

pressão

atmosférica

local





# MANÔMETRO Instalado somente no **RECALQUE**

Leitura do  
MANÔMETRO

( $M_r$ )

de

RECALQUE

$$M_r = \frac{p_r}{\gamma}$$

Para a presente  
instalação, os  
valores são  
POSITIVOS com  
relação à  
pressão  
atmosférica  
local

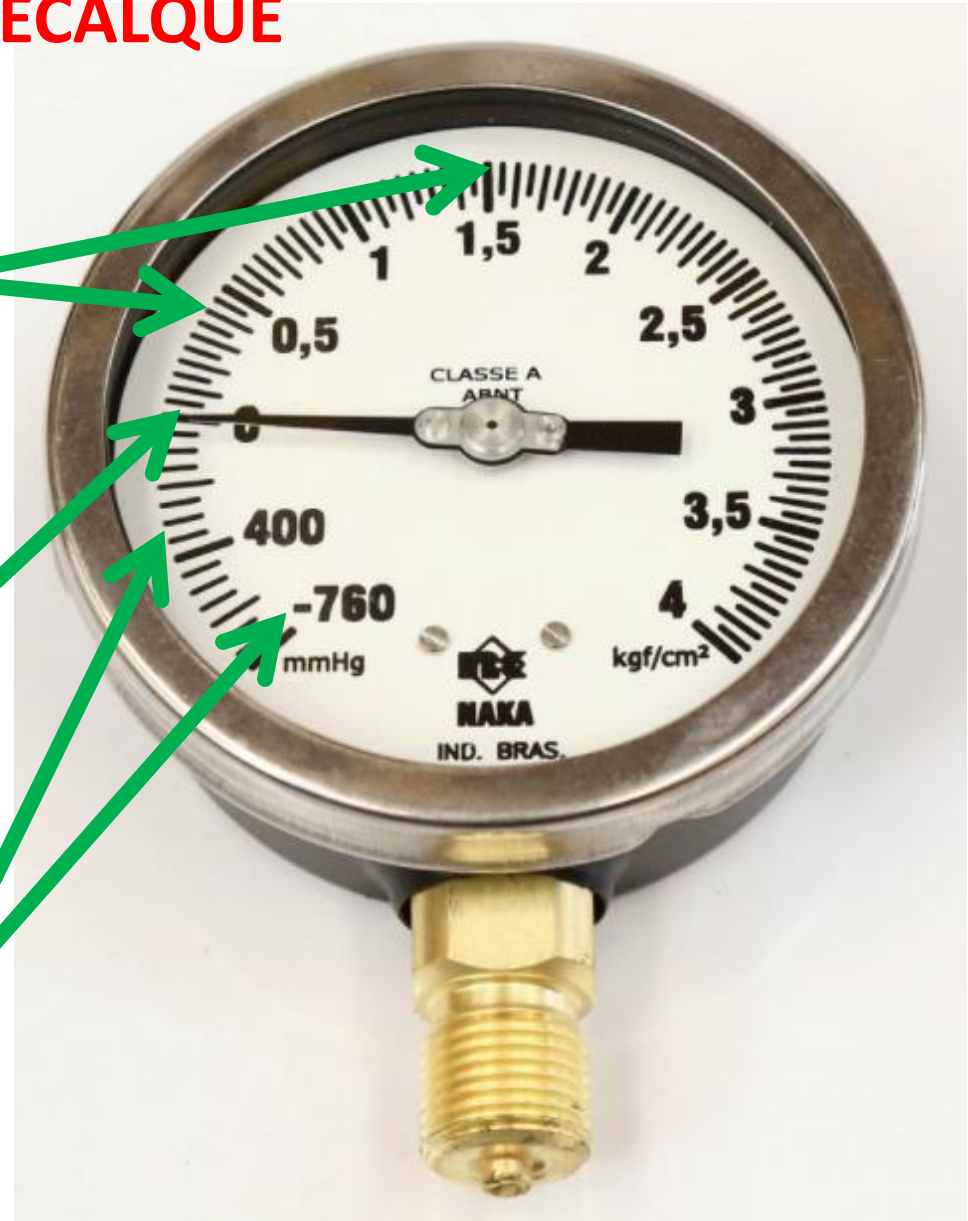


# MANOVACUÔMETRO Instalado tanto na **SUCÇÃO** como no **RECALQUE**

Nesta faixa superior,  
a Leitura do  
**MANOVACUÔMETRO**  
é ACIMA da pressão  
atmosférica local

Pressão "0" relativa à  
pressão atmosférica local

Nesta faixa inferior,  
a Leitura do  
**MANOVACUÔMETRO**  
é ABAIXO da pressão  
atmosférica local



# Medida correta do $\Delta z$

## 2 - MANÔMETRO

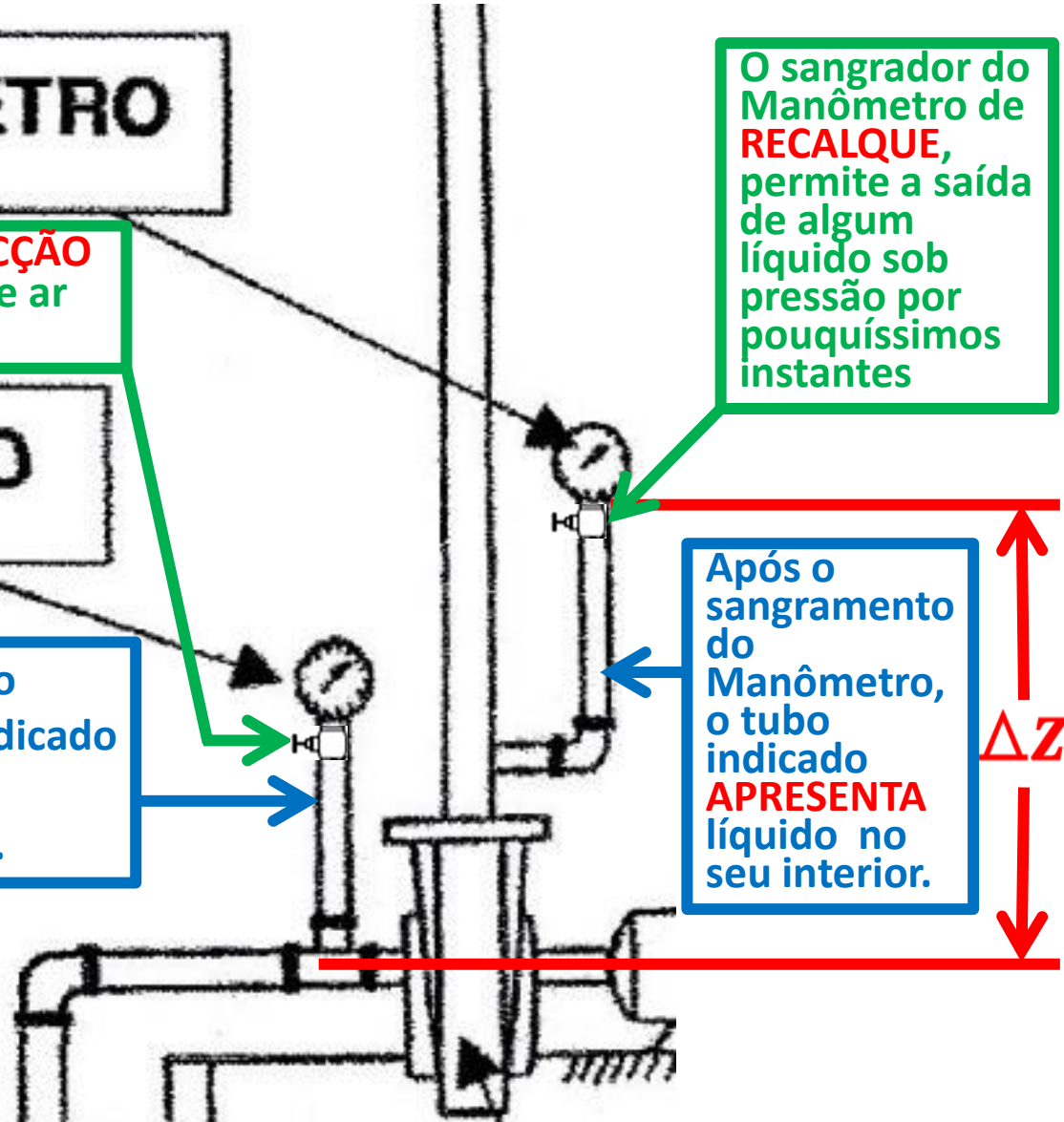
O sangrador do Manômetro de **SUCÇÃO** (Vacuômetro), permite a entrada de ar por pouquíssimos instantes

O sangrador do Manômetro de **RECALQUE**, permite a saída de algum líquido sob pressão por pouquíssimos instantes

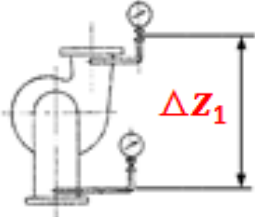
## 3 - VACUÔMETRO

Após o sangramento do Vacuômetro, o tubo indicado **NÃO APRESENTA** mais líquido no seu interior.

Após o sangramento do Manômetro, o tubo indicado **APRESENTA** líquido no seu interior.



# Medida correta do $\Delta Z$

MANÔMETRO DE SUÇÃO (ENTRADA DA BOMBA)	MANÔMETRO DE RECALQUE (SAIDA DA BOMBA)	MEDIDA DO $\Delta Z$ A SER CONSIDERADA	ESQUEMA
ABAIXO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	ACIMA DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	$\Delta Z_1$	
ABAIXO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	ABAIXO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	$\Delta Z_2$	
ACIMA DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	ACIMA DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	$\Delta Z_3$	

Posicionamento do Manômetro e Vacuômetro no nosso Laboratório e nível de pressões na sucção e recalque da bomba

As três possibilidades para a determinação do  $\Delta Z$



# Anotação dos dados

LEITURA	VOLTÍMETRO (V)	AMPERÍMETRO (A)	WATÍMETRO (kW)	MANÔMETRO (kgf / cm <sup>2</sup> )	VACUÔMETRO (m H <sub>2</sub> O)	MASSA INICIAL (kg)	MASSA FINAL (kg)	TEMPO $\Delta t$ (s)
1								
2								
3								
4								
5								

Com as grandezas elétricas registradas no “**VOLTÍMETRO**”, “**AMPERÍMETRO**” e “**WATTÍMETRO**”, é possível calcular a potência transmitida do motor para a bomba ( $W_{\text{motor} \Rightarrow \text{bomba}}$ ).

Esta potência poderá ser calculada conforme procedimento descrito no “Roteiro de Experiência de Laboratório”.

As grandezas “**MANÔMETRO**” e “**VACUÔMETRO**” serão transformadas na unidade de pressão “**mca**” (metros coluna de água), ou simplesmente “**m**” onde irão compor a variação da energia piezométrica entre a saída da bomba ou **recalque** ( $M_r$ ) e a entrada da bomba ou **sucção** ( $M_s$ ), respectivamente.



# Anotação dos dados

LEITURA	VOLTÍMETRO (V)	AMPERÍMETRO (A)	WATÍMETRO (kW)	MANÔMETRO (kgf / cm <sup>2</sup> )	VACUÔMETRO (m H <sub>2</sub> O)	MASSA INICIAL (kg)	MASSA FINAL (kg)	TEMPO $\Delta t$ (s)
1								
2								
3								
4								
5								

Com as grandezas: **TEMPO** e as **MASSAS** e conhecendo a temperatura da água, e portanto a massa específica " $\rho$ ", temos que a **MASSA FINAL** menos a **MASSA INICIAL** = **MASSA CRONOMETRADA** que, dividida pelo tempo  $\Delta t$ , poderemos calcular a **VAZÃO MÁSSICA** ou simplesmente a vazão **Q** propriamente dita.

# 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:

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

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

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

Reagrupando os parâmetros, temos para o balanço energético:

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

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

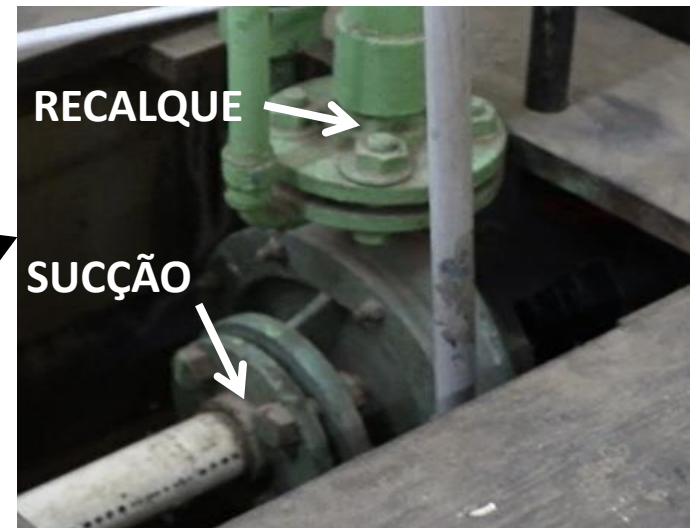
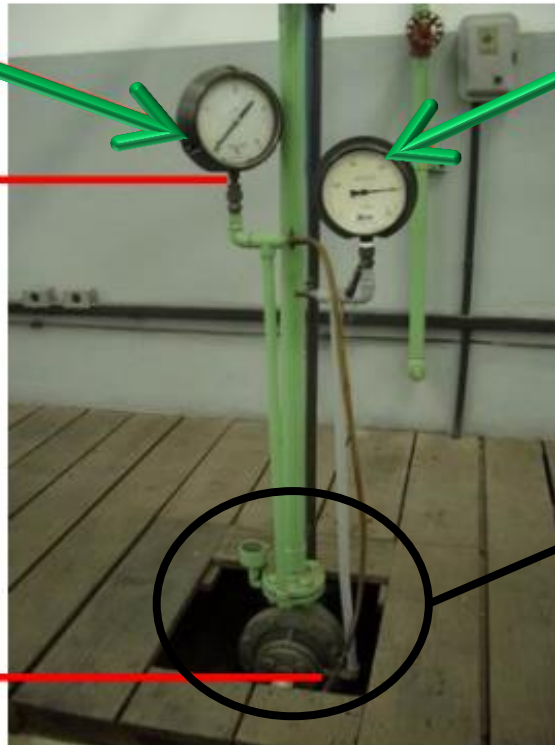
$$h_m = \left( \frac{p_r}{\gamma} - \frac{p_s}{\gamma} + \underbrace{\frac{v_r^2}{2g} - \frac{v_s^2}{2g}}_{\text{Variação da Energia Cinética. Velocidades calculadas com a vazão e os diâmetros dos tubos}} + \Delta z \right)$$

Leitura no Manômetro ( $M_r$ ) de recalque  
 $M_r = \frac{p_r}{\gamma}$

Leitura no Vacuômetro ( $V_s = M_s$ ) de sucção  
 $V_s = M_s = \frac{p_s}{\gamma}$

$$\Delta Z = Z_r - Z_s$$

VARIAÇÃO DA ENERGIA POTENCIAL SUCÇÃO/RECALQUE



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

$$h_m = \underbrace{M_r}_{\substack{\text{Leitura no} \\ \text{manômetro } (M_r) \\ \text{de} \\ \text{recalque} \\ \text{relativa à atmosfera} \\ \text{local, portanto um} \\ \text{valor positivo}}} - \underbrace{M_s}_{\substack{\text{Leitura no} \\ \text{manômetro } (M_s) \\ \text{de} \\ \text{sucção} \\ \text{relativa à atmosfera} \\ \text{local, portanto um} \\ \text{valor negativo}}} + \underbrace{\frac{v_r^2}{2g} - \frac{v_s^2}{2g}}_{\substack{\text{Variação da Energia} \\ \text{Cinética}}} + \underbrace{\Delta Z}_{\substack{\text{Variação} \\ \text{da Energia} \\ \text{Potencial} \\ \text{(Medição} \\ \text{com trena.} \\ \text{Ver} \\ \text{esquema} \\ \text{acima)}}$$

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

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

e traçarmos a curva experimental requerida.



**Para a determinação da potência que o motor transmite à bomba ( $W_{m \Rightarrow b}$ ), verificar este procedimento o qual está descrito no “Roteiro de Experiência de Laboratório” como Material de apoio encontrado no Moodle**

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

$$W_{m \Rightarrow b} = f(Q) \quad (kW)$$

**e traçarmos a curva experimental requerida.**

Para a determinação do rendimento da bomba ( $\eta$ ) temos:

$$\eta = \frac{W_{b \Rightarrow f}}{W_{m \Rightarrow b}}$$

sendo:

$$W_{b \Rightarrow f} = \gamma Q h_m$$

onde:

$\gamma$  = Peso específico da água na temp. medida ( $\frac{kgf}{m^3}$ )

$Q$  = Vazão no ponto considerado ( $\frac{m^3}{s}$ )

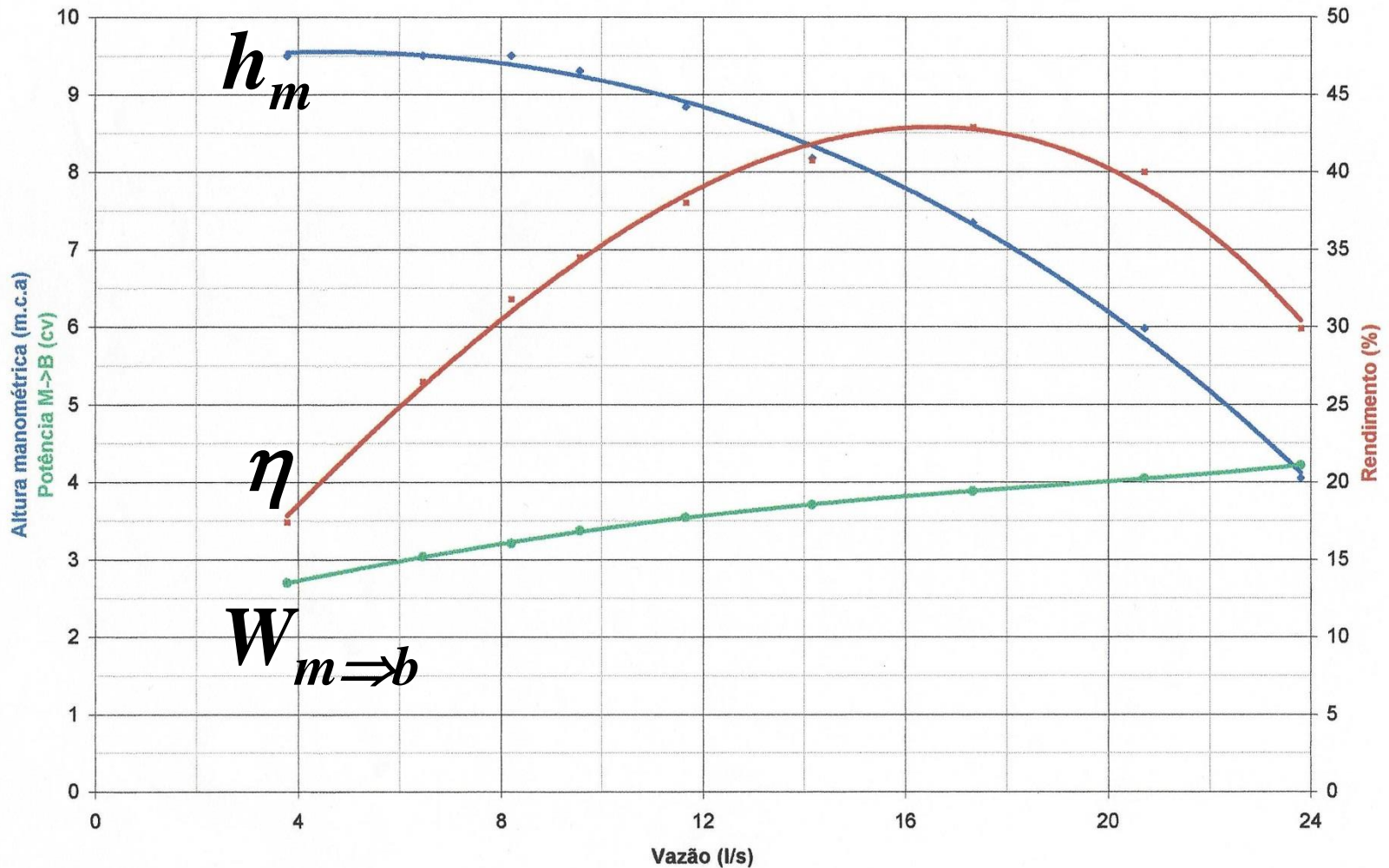
$h_m$  = Alt. Man. no mesmo ponto considerado ( $m$ )

Sendo assim podemos calcular ponto a ponto:

$$\eta = f(Q) \quad (\%)$$

# Curva característica experimentais da bomba.

Curvas características da bomba



## Atenção para algumas variações das notações no presente vídeo comparadas com o “Roteiro de Experiência de Laboratório”

Grandeza	Neste vídeo	No Roteiro de Experiência de Laboratório
Altura Manométrica	$h_m$	$h_r$
Potência transmitida do motor para a bomba	$W_{motor \Rightarrow bomba}$ ou $W_{m \Rightarrow b}$	$\dot{W}_m$
Índice que se refere à sucção	s	2
Índice que se refere ao recalque	r	1

## **Material de apoio disponível no Moodle:**

- “Roteiro de Experiência de Laboratório”.
- Notas complementares para auxílio da realização dos testes.
- Vídeo complementar (FABRICANTE DE BOMBAS KIRLOSKAR BROTHERS LTD.).  
<https://www.youtube.com/watch?v=SpKuTfw560U&t=4s>

## **Com relação à: “Aplicação da análise dimensional e da teoria da semelhança”:**

- Será visto em aula.
- E pode ser visto no “Roteiro de Experiência de Laboratório”.