

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**PMC-3453 MÁQUINAS DE FLUXO**

**LABORATÓRIO**

**1º SEMESTRE - 2023**

**PROF. SÉRGIO ROBERTO CECCATO**

# MÁQUINAS DE FLUXO

## EXPERIÊNCIA Nº 4

### VERIFICAÇÃO DAS LEIS DE SEMELHANÇA PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS RADIAIS

**PROF. SÉRGIO ROBERTO CECCATO**  
**2023**

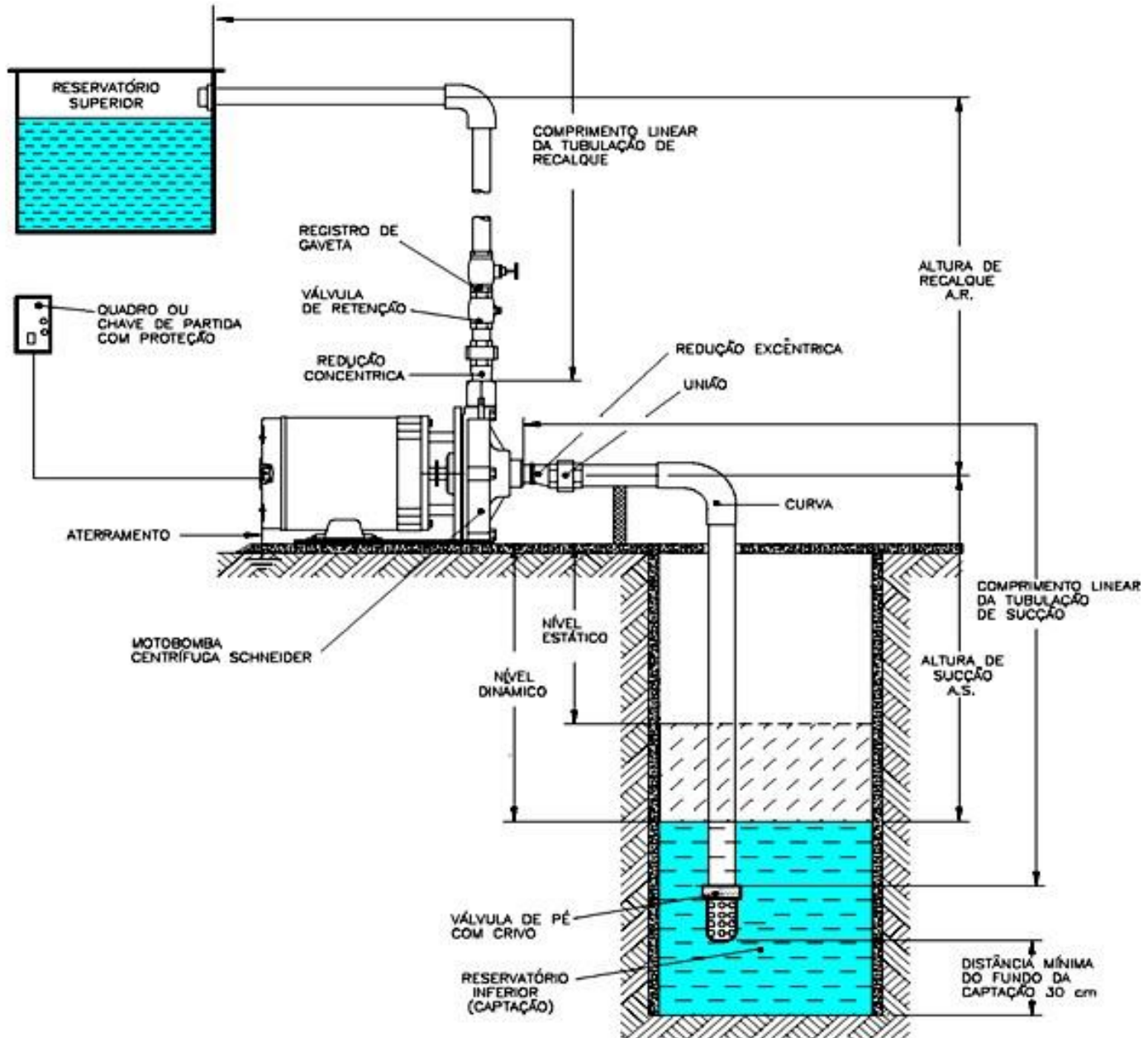
ON LINE PARA A T-21 EM 12-06-2023  
PRESENCIAL PARA A T-22 EM 19-06-2023

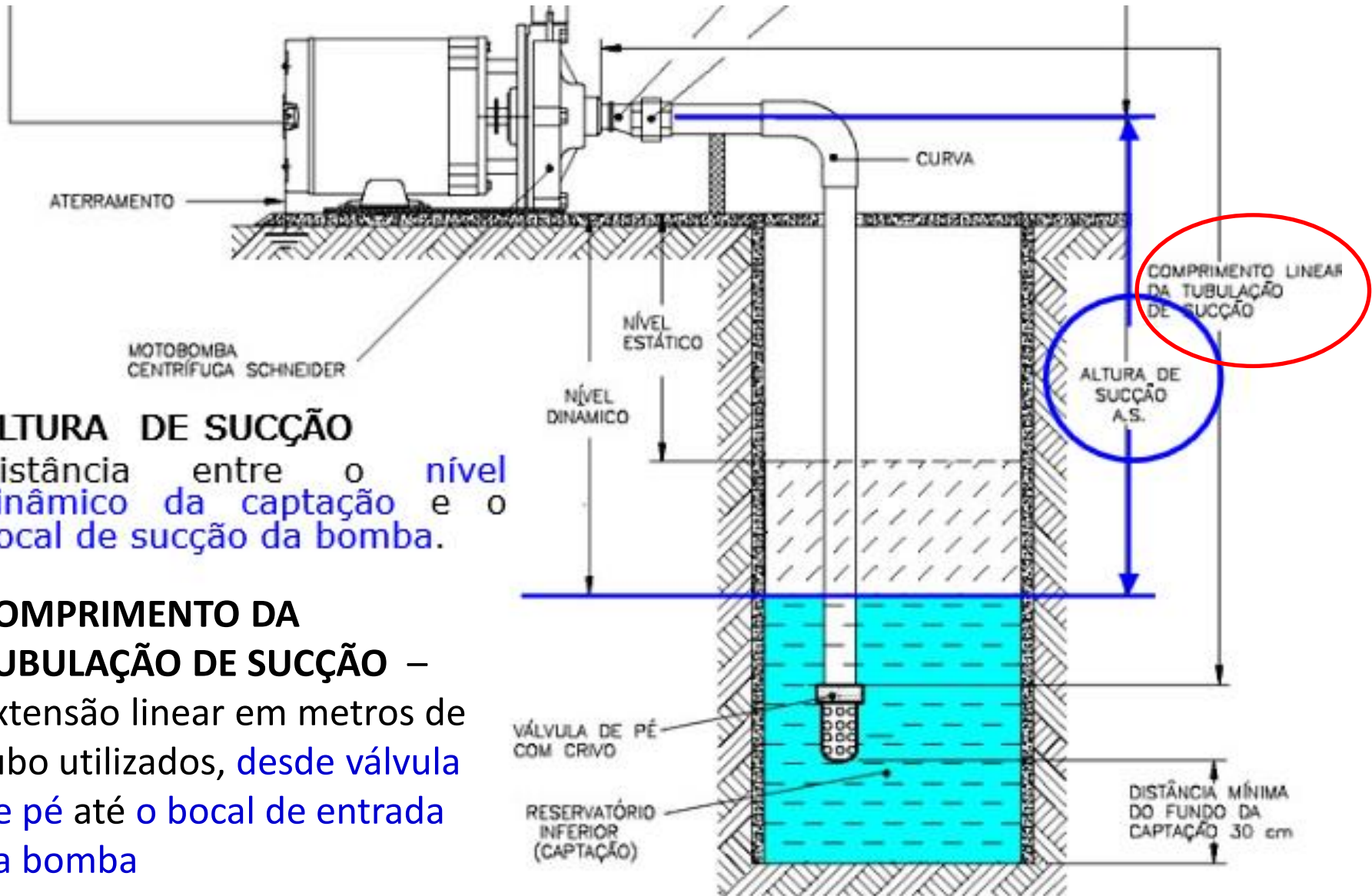
**INSTALAÇÕES DE RECALQUE**

**OU**

**INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS**

# INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS



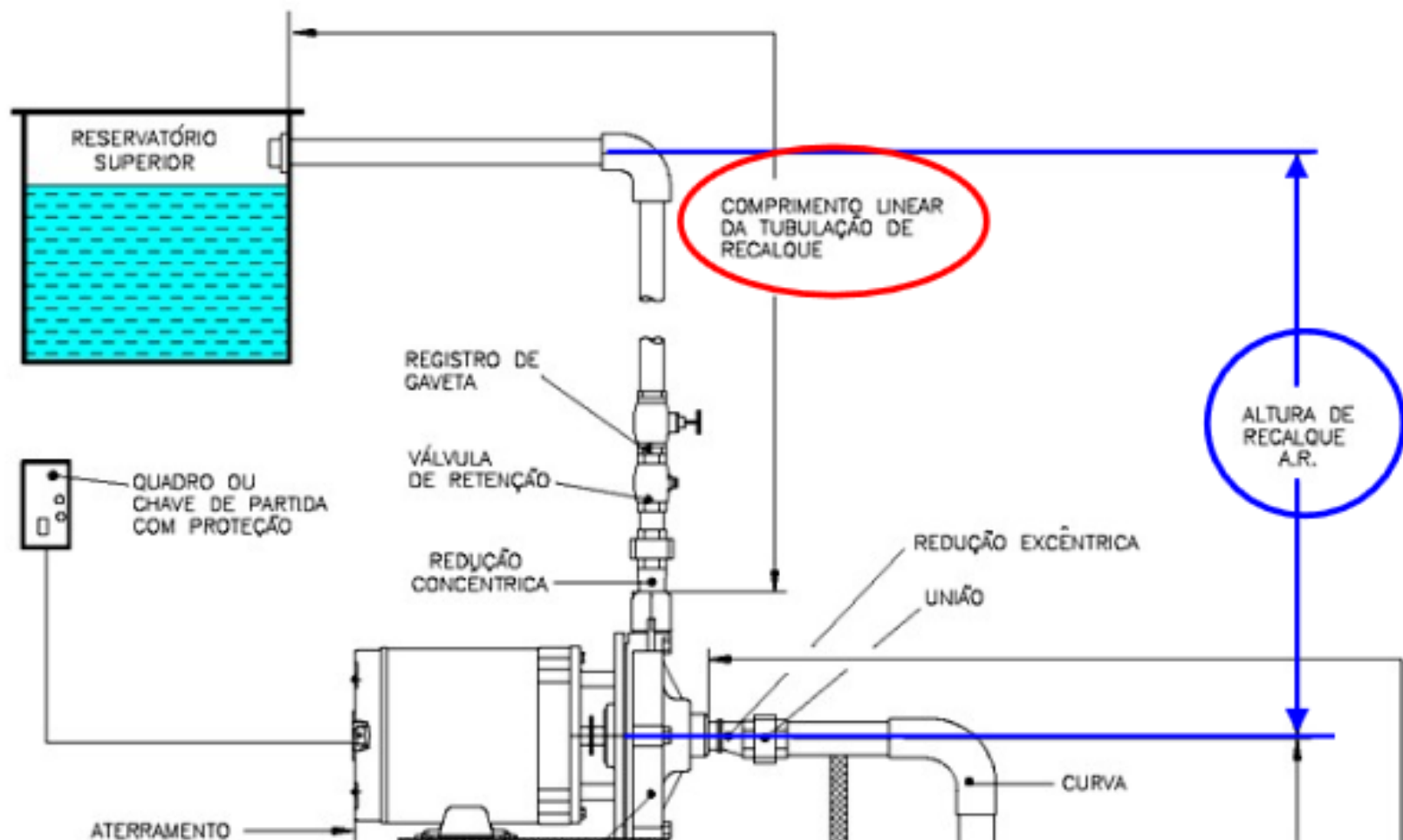


## ALTURA DE SUÇÃO

Distância entre o nível dinâmico da captação e o bocal de sucção da bomba.

## COMPRIMENTO DA TUBULAÇÃO DE SUÇÃO –

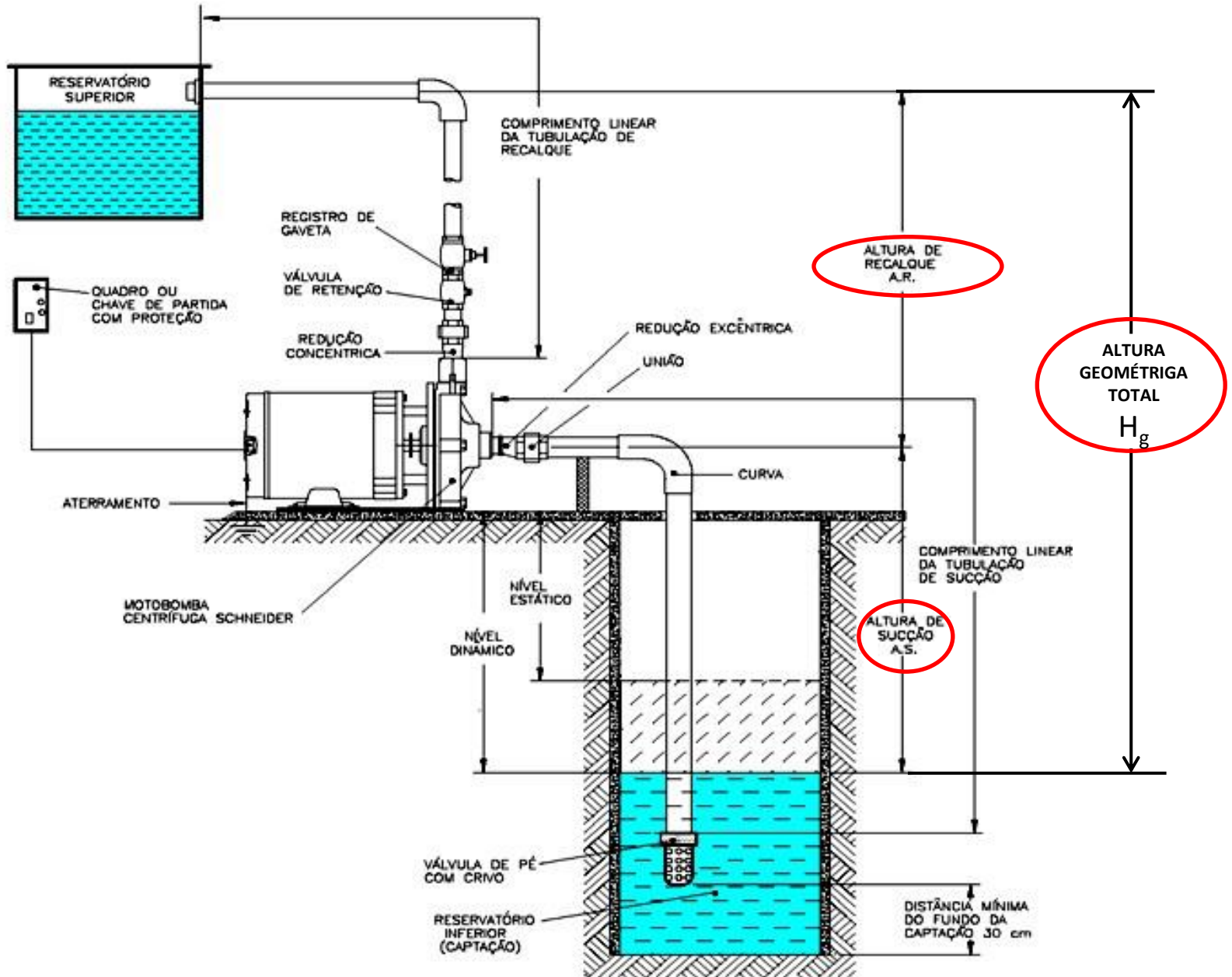
Extensão linear em metros de tubo utilizados, desde válvula de pé até o bocal de entrada da bomba

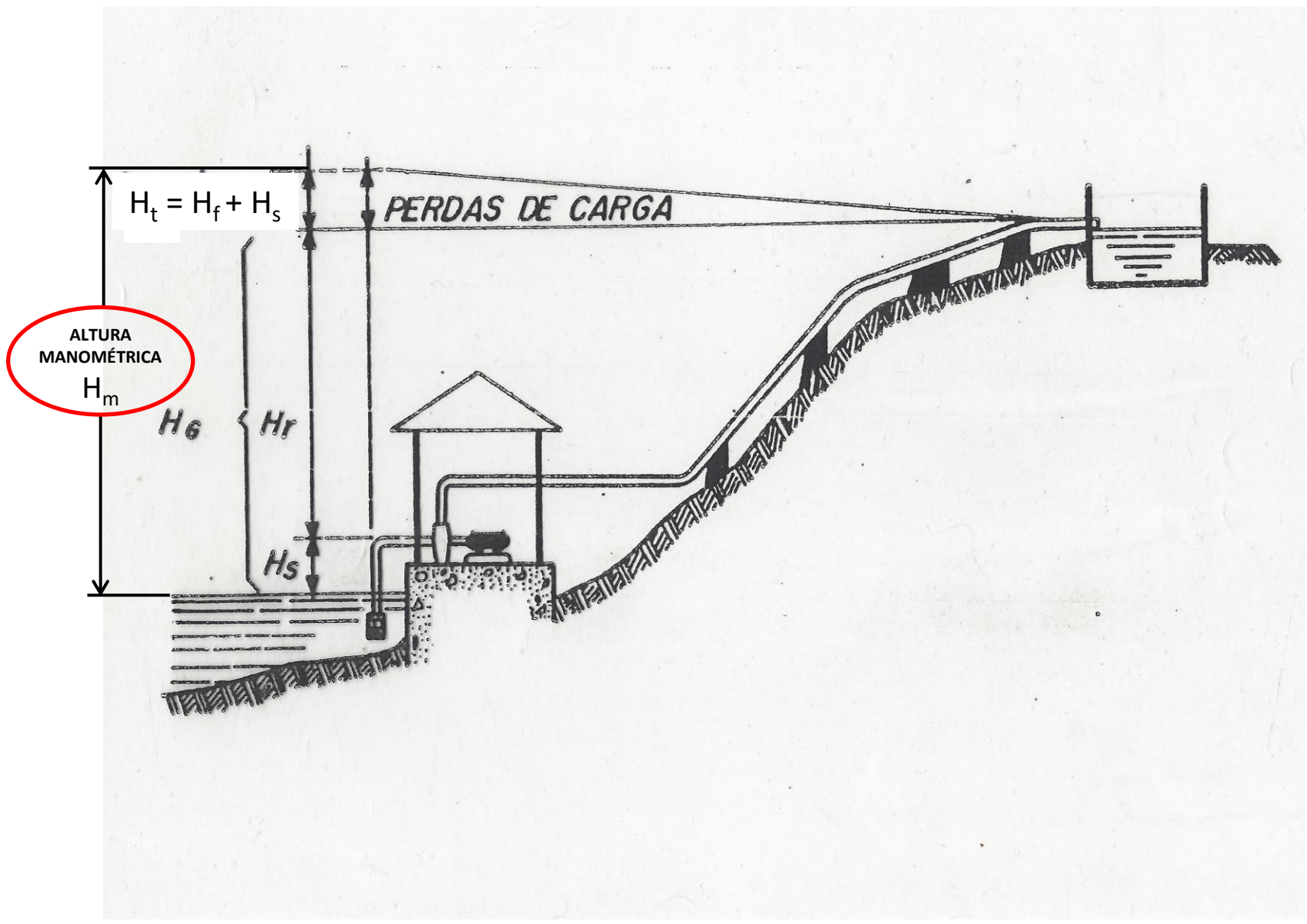


**ALTURA DE RECALQUE (AR)** – Desnível entre o **bocal de sucção da bomba** e o **ponto de maior elevação** do fluido até o destino final da instalação (reservatório, etc.).

**COMPRIMENTO DA TUBULAÇÃO DE RECALQUE** - Extensão linear em metros de tubo, desde a saída da bomba até o ponto final da instalação.

# INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS







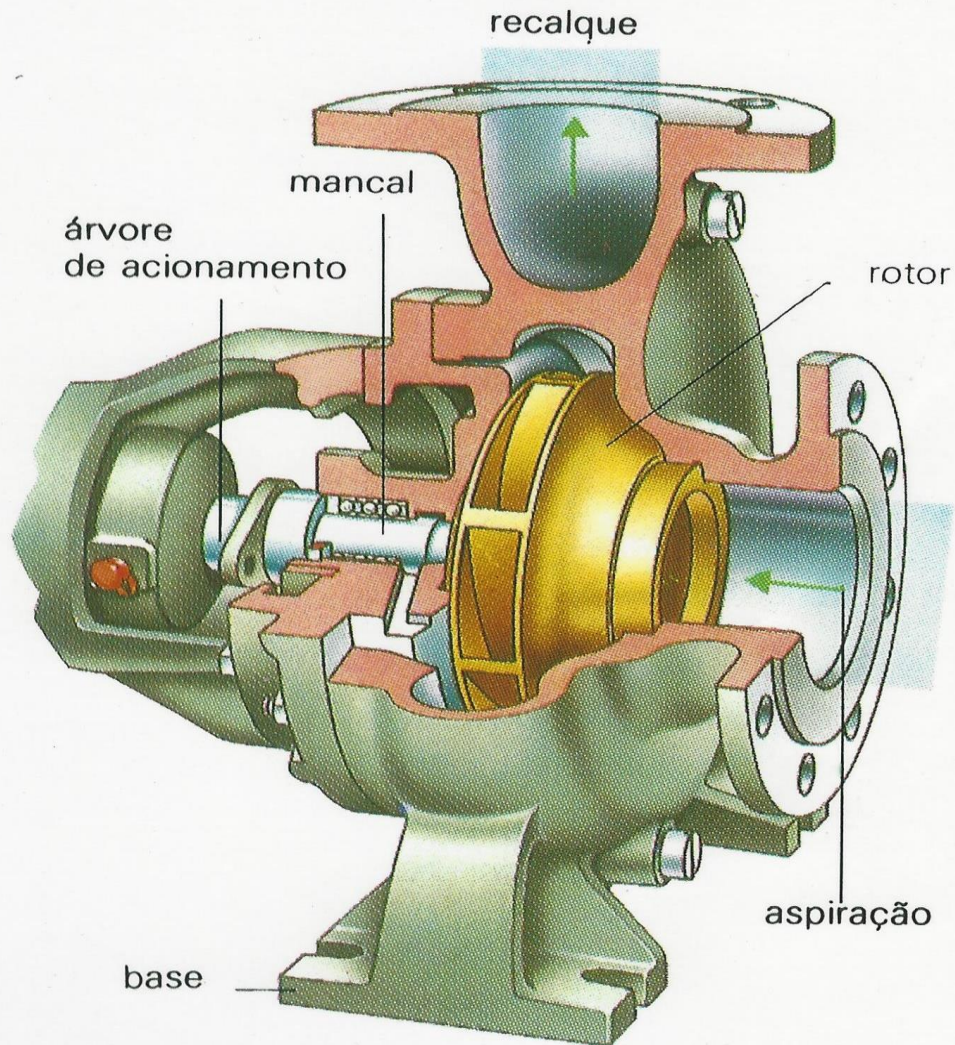
# **MÁQUINAS DE FLUXO**

## **EXPERIÊNCIA Nº 4**

### **VERIFICAÇÃO DAS LEIS DE SEMELHANÇA PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS RADIAIS**

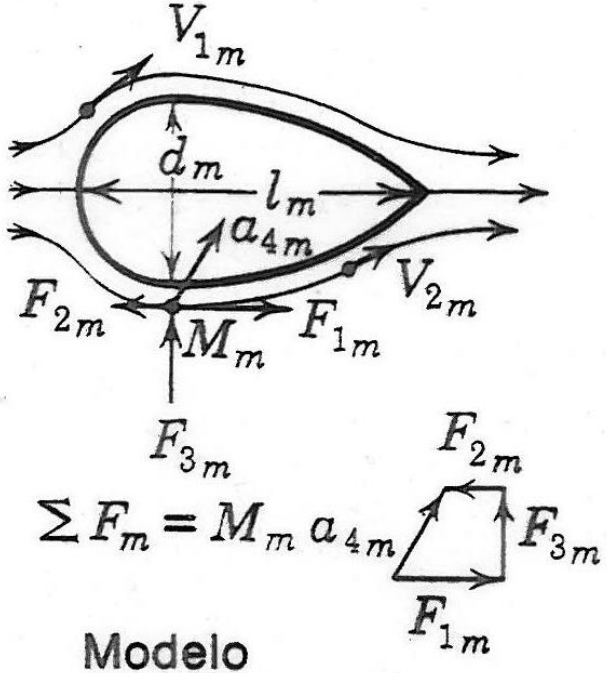
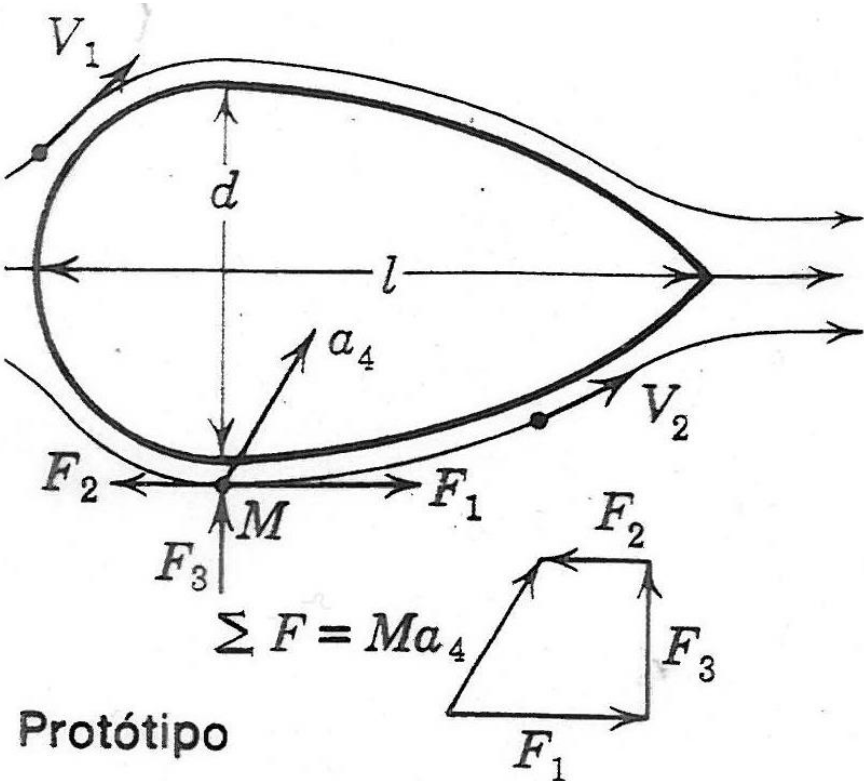
**PROF. SÉRGIO ROBERTO CECCATO  
2023**

# BOMBA CENTRÍFUGA RADIAL



Princípio de funcionamento de uma **bomba** centrífuga.

# Similaridade Geométrica, Cinemática e Dinâmica





# BOMBA CENTRÍFUGA RADIAL





**Bomba Centrífuga para Uso Geral**

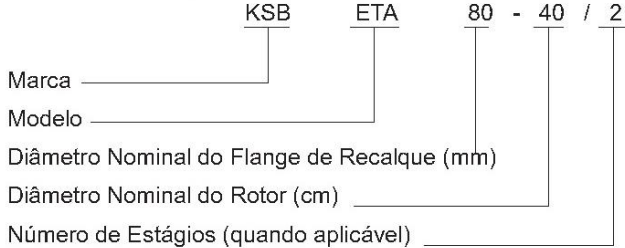
**1. Aplicação**

A bomba KSB ETA é indicada para o bombeamento de líquidos limpos ou turvos e encontra aplicação preferencial em abastecimentos de água nas indústrias, nos serviços públicos, nas lavouras, em irrigações, na circulação de condensados, óleos térmicos, nos serviços de resfriamento, em instalações prediais e de ar condicionado, etc.

**2. Descrição Geral**

Horizontal, bipartida radialmente, com um, dois ou três estágios, sucção simples horizontal e descarga vertical para cima.

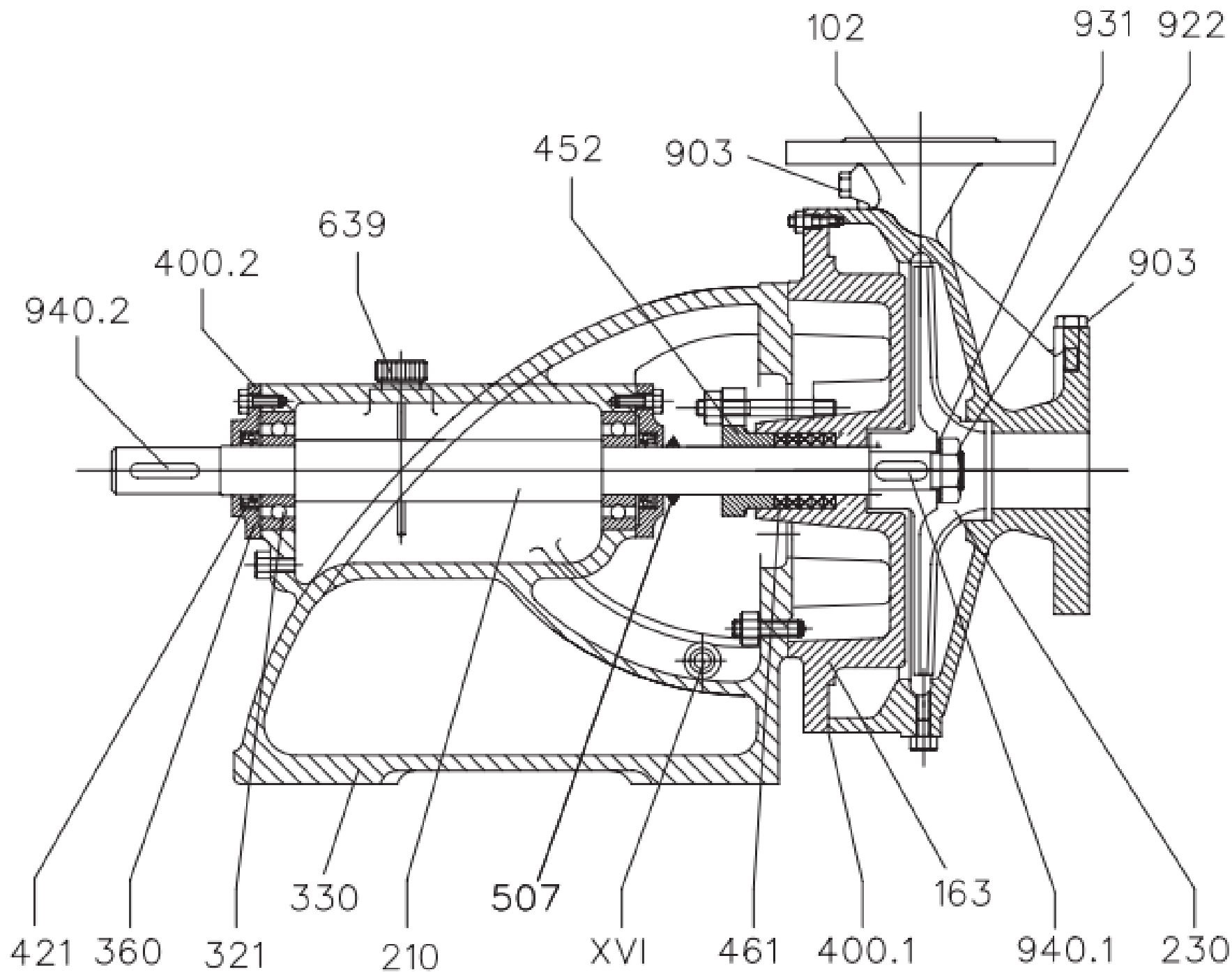
**3. Denominação**



**4. Dados de Operação**

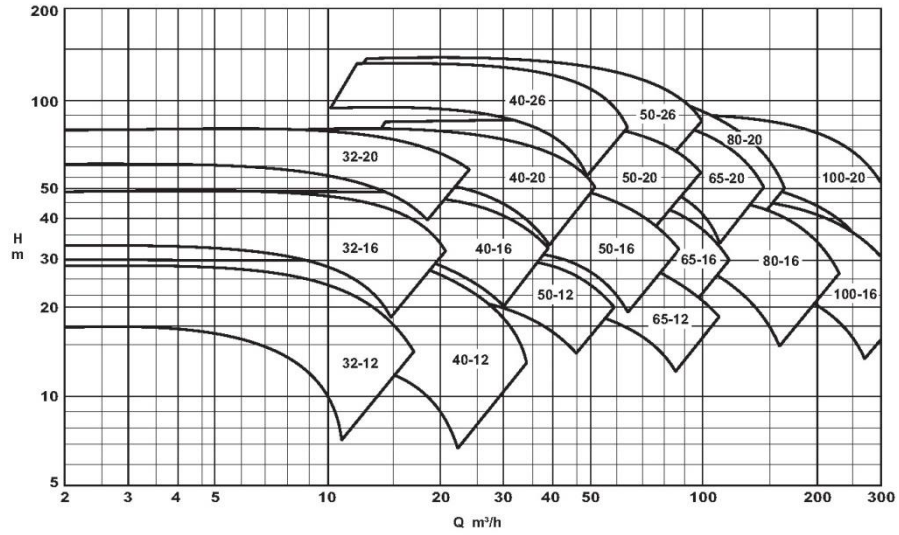
- Tamanhos - DN 32 até 300
- Vazões - até 1.800 m³/h
- Elevações - até 120 m
- Temperaturas - até 140 °C
- Rotações - até 3.500 rpm



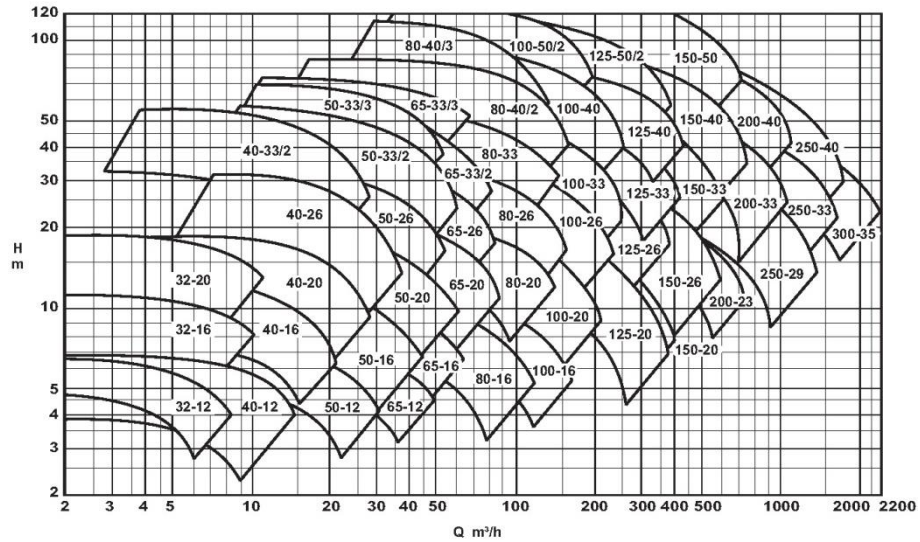




5. Campo de Aplicação - 60 Hz

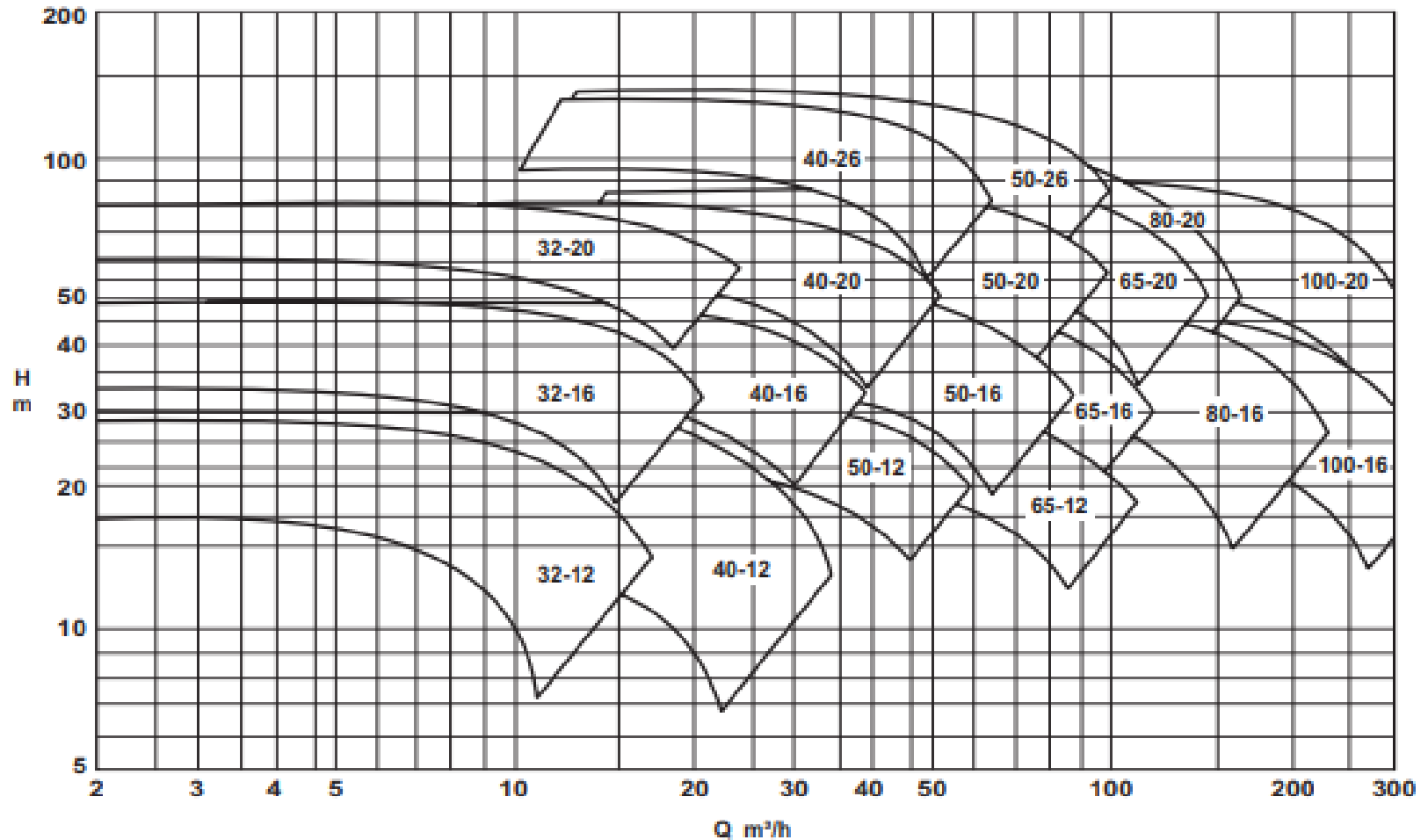


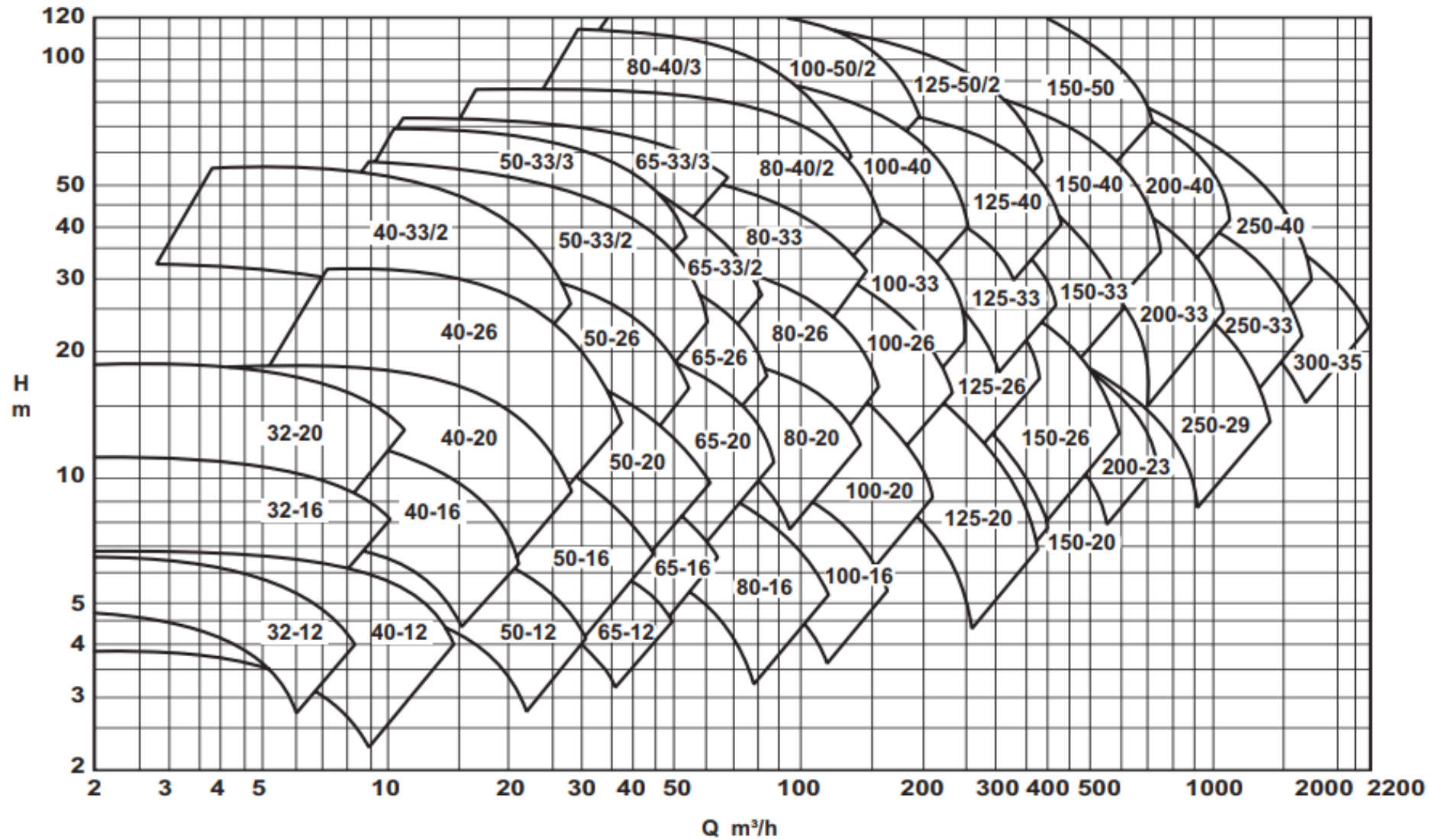
3.500 rpm



1.750 rpm

### 5. Campo de Aplicação - 60 Hz





1.750 rpm

Bomba Tipo  
 Pump Type **KSB ETA**  
 Tipo de Bomba

Tamanho  
 Size **125-33**  
 Tamanho



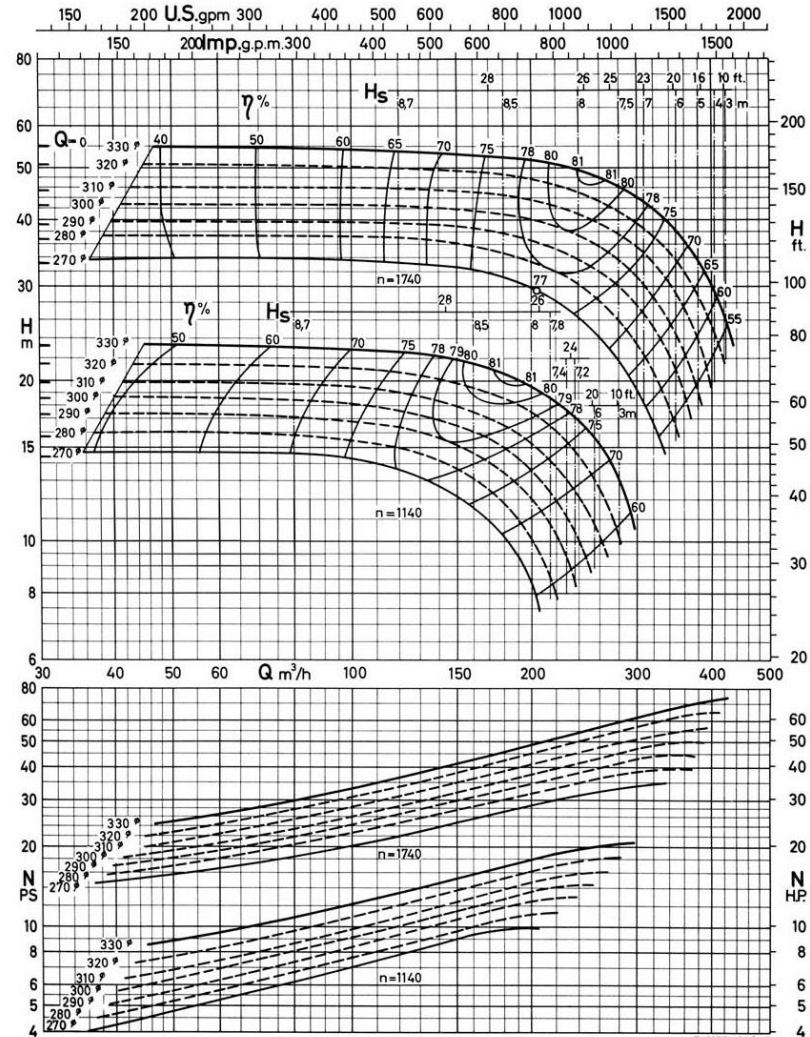
Oferta nº \_\_\_\_\_  
 Project - No. \_\_\_\_\_  
 Oferta - nº \_\_\_\_\_

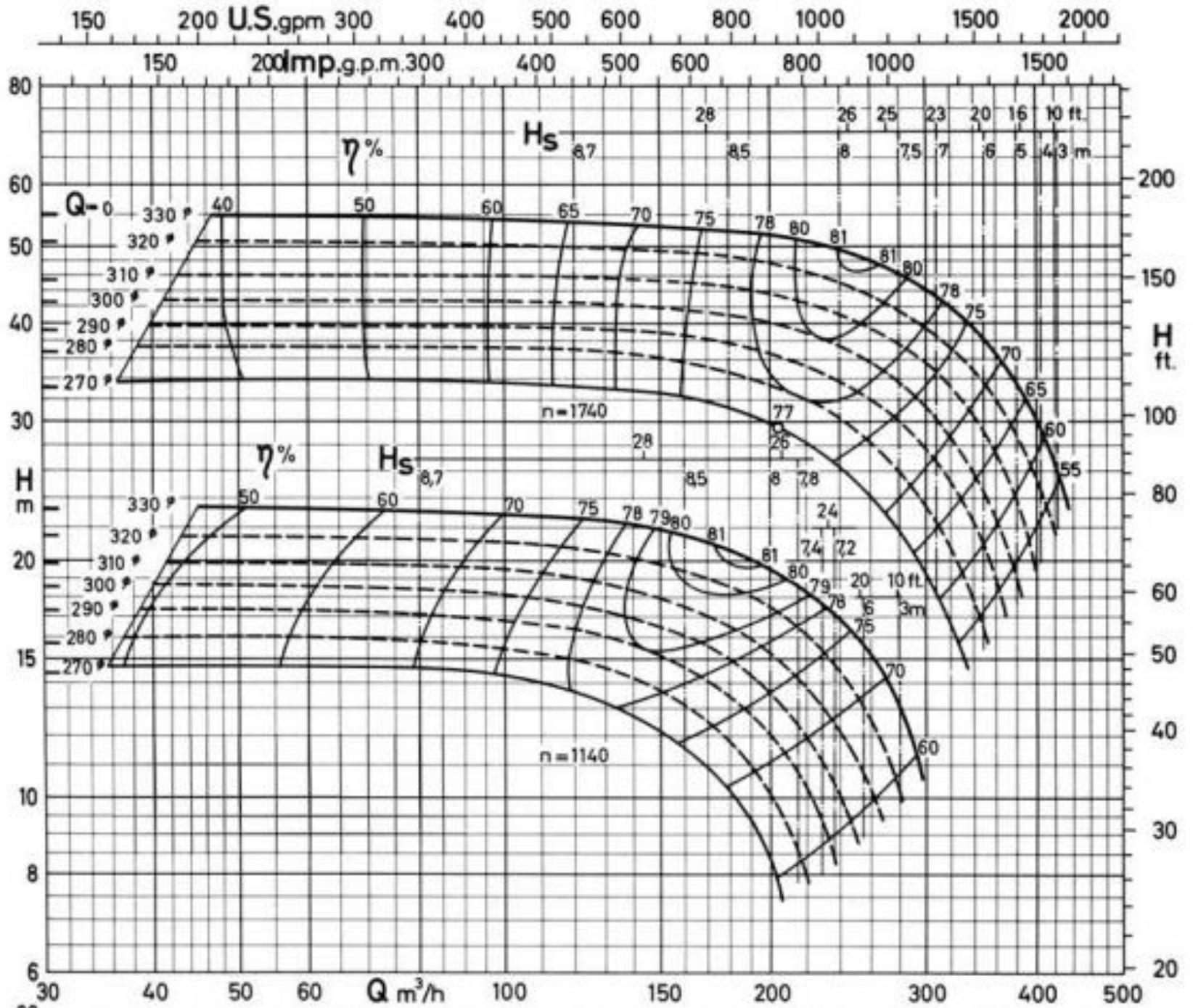
Item nº \_\_\_\_\_  
 Item - No. \_\_\_\_\_  
 Pos - nº \_\_\_\_\_

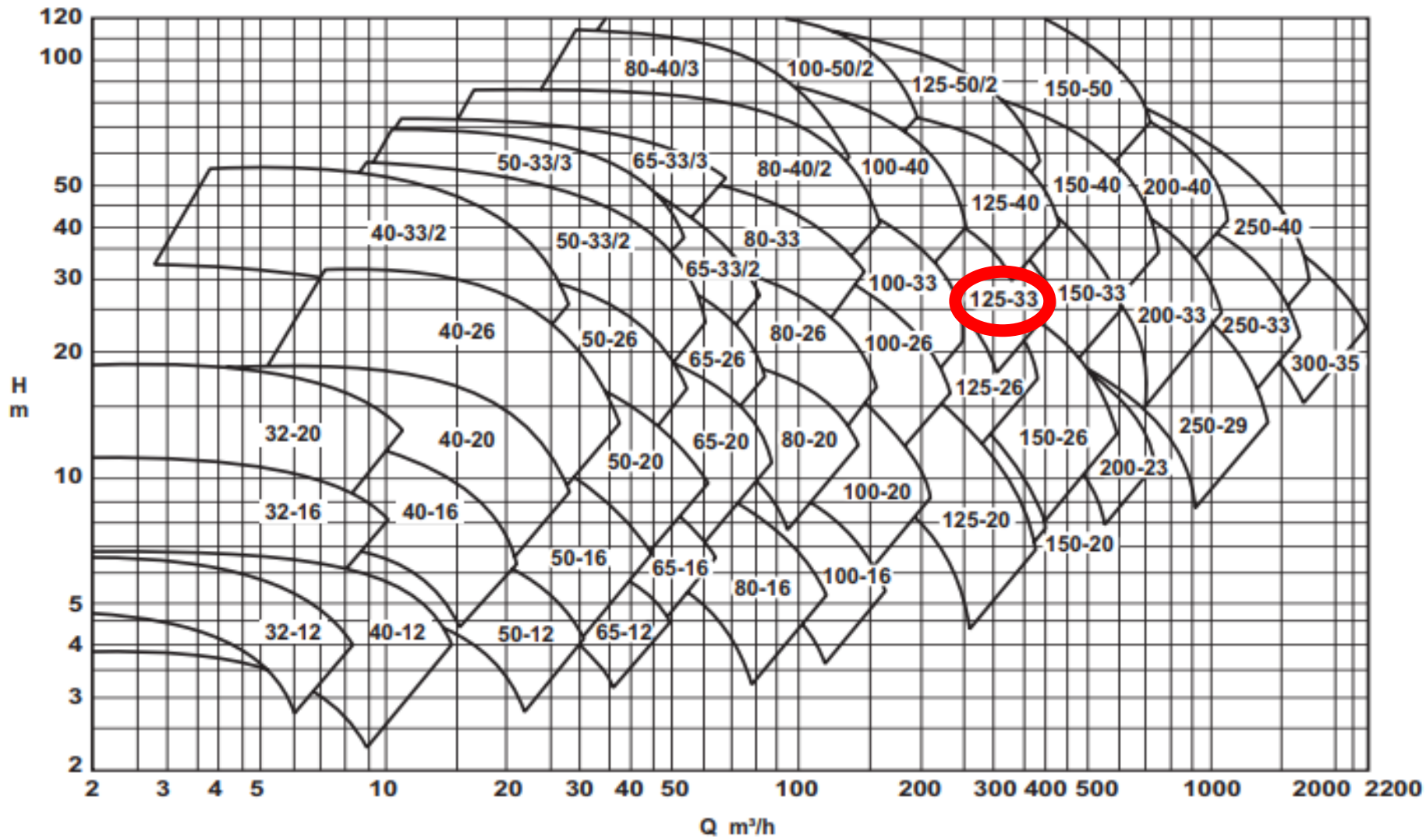
Velocidade Nominal **1740 rpm**  
 Nom. Rotative Speed  
 Velocidad Nominal **1140 rpm**

Altura Manométrica  
 Head  
 Altura Manométrica

Potência Necessária  
 Shaft Power  
 Potencia Necesaria

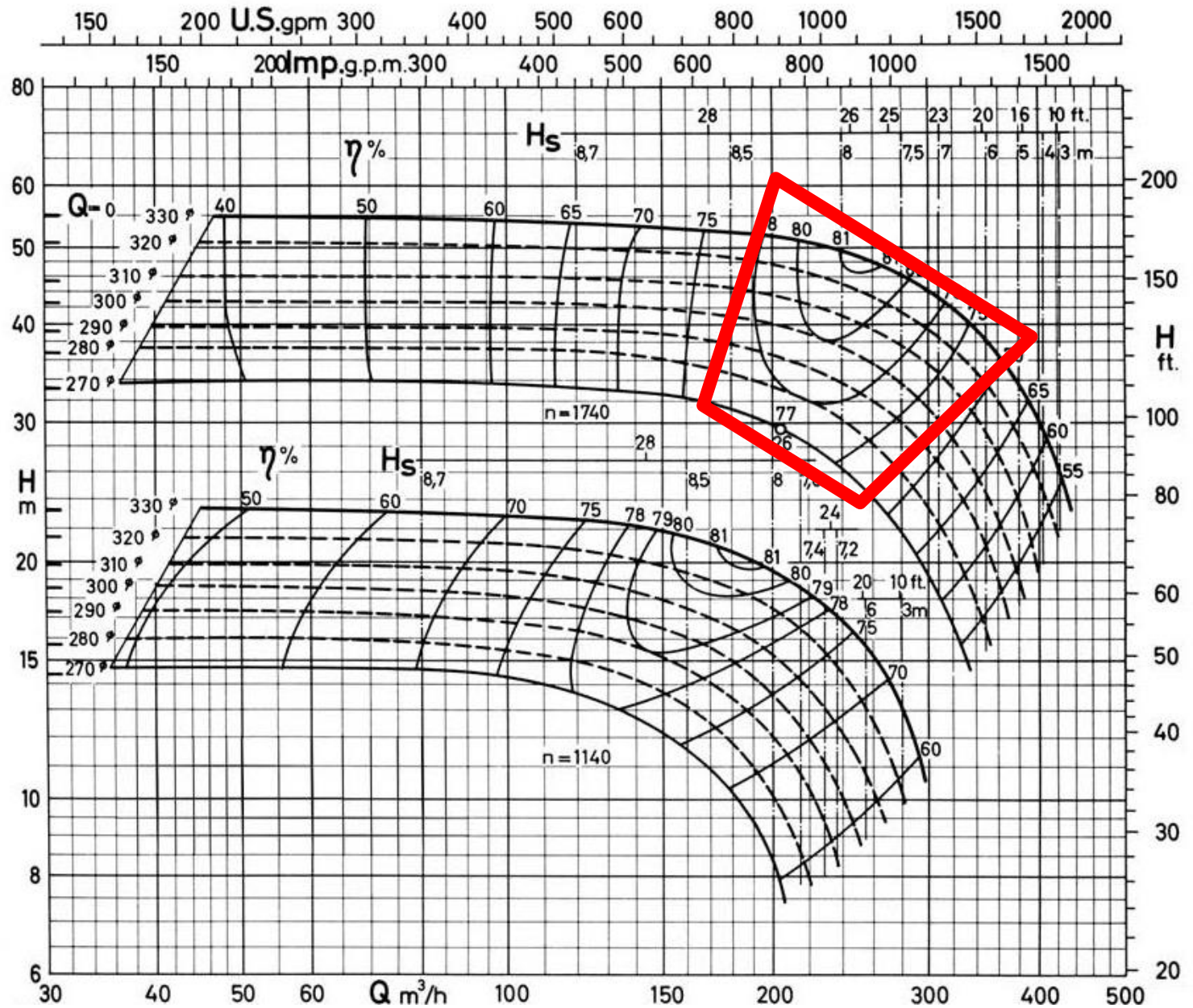


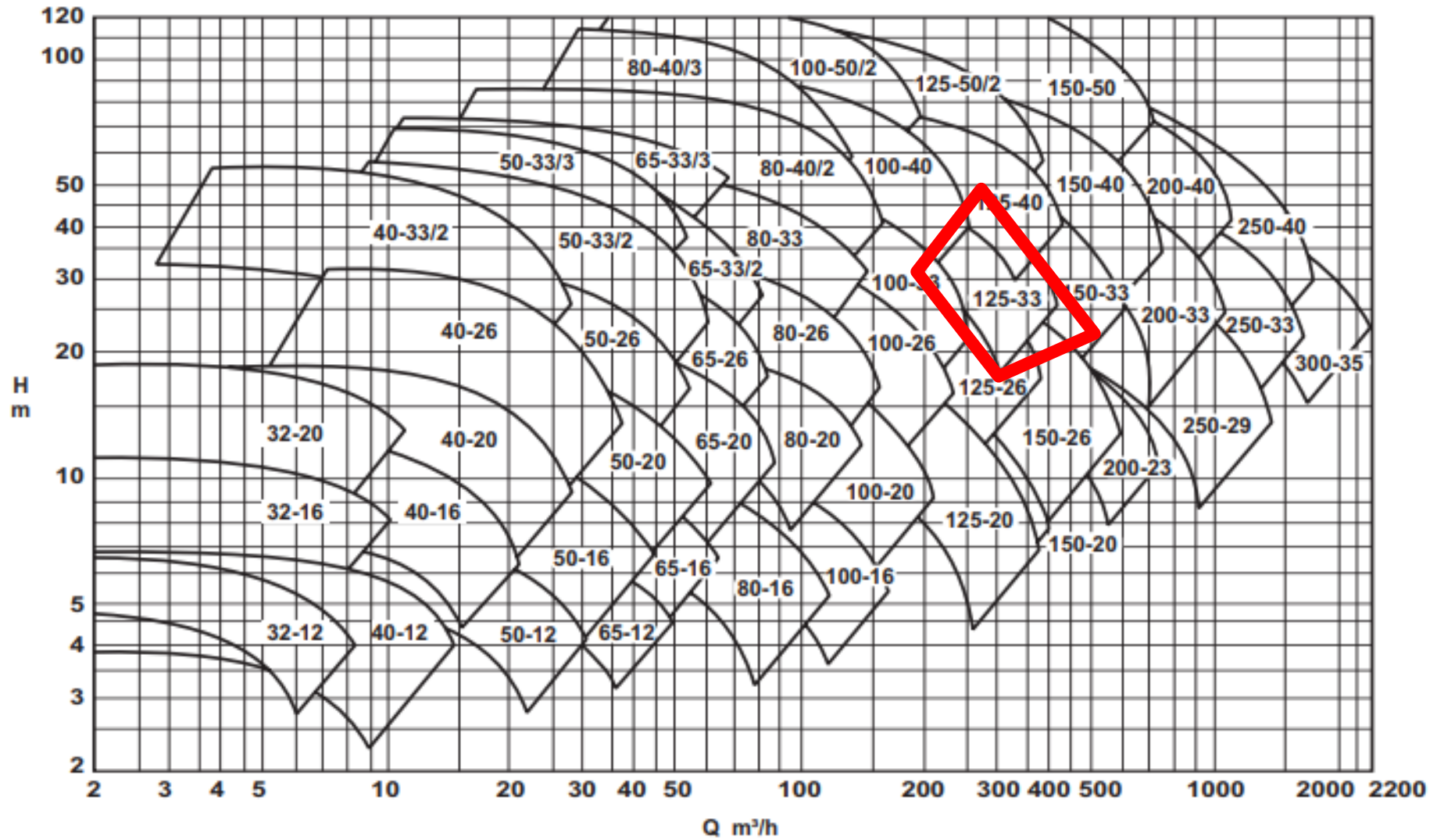




1.750 rpm

Altura Manométrica  
Head  
Altura Manométrica

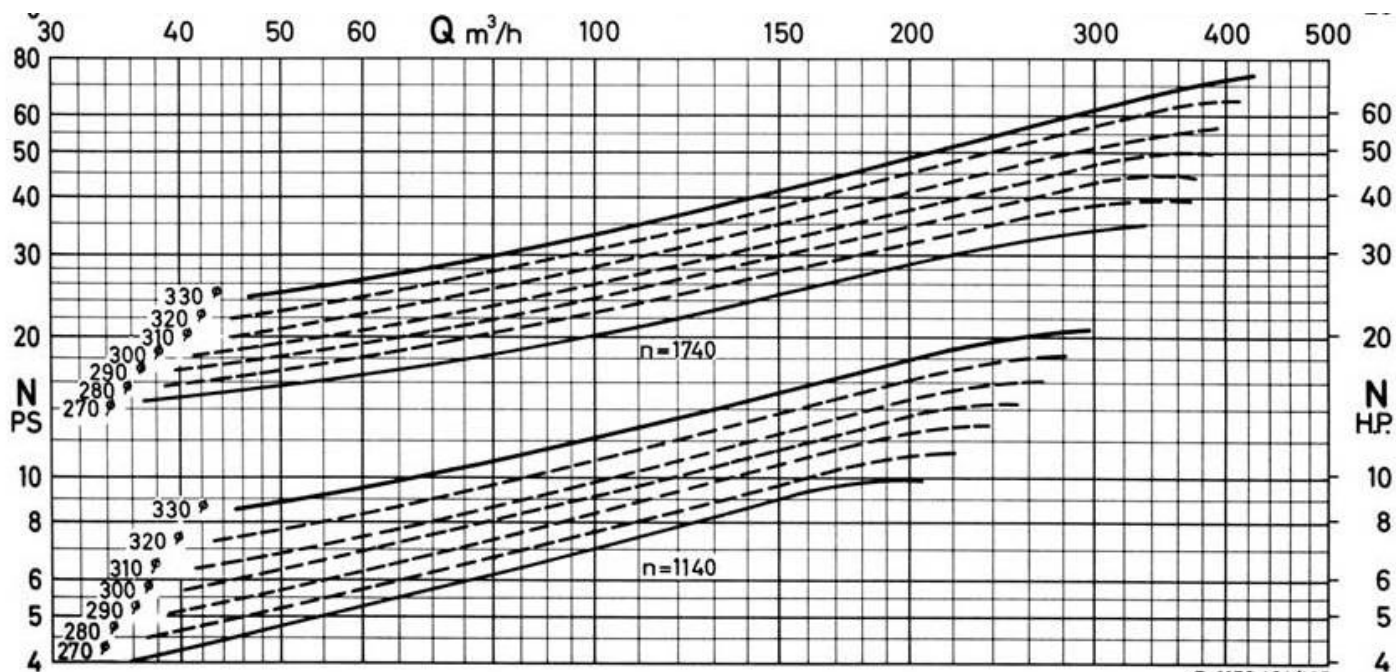




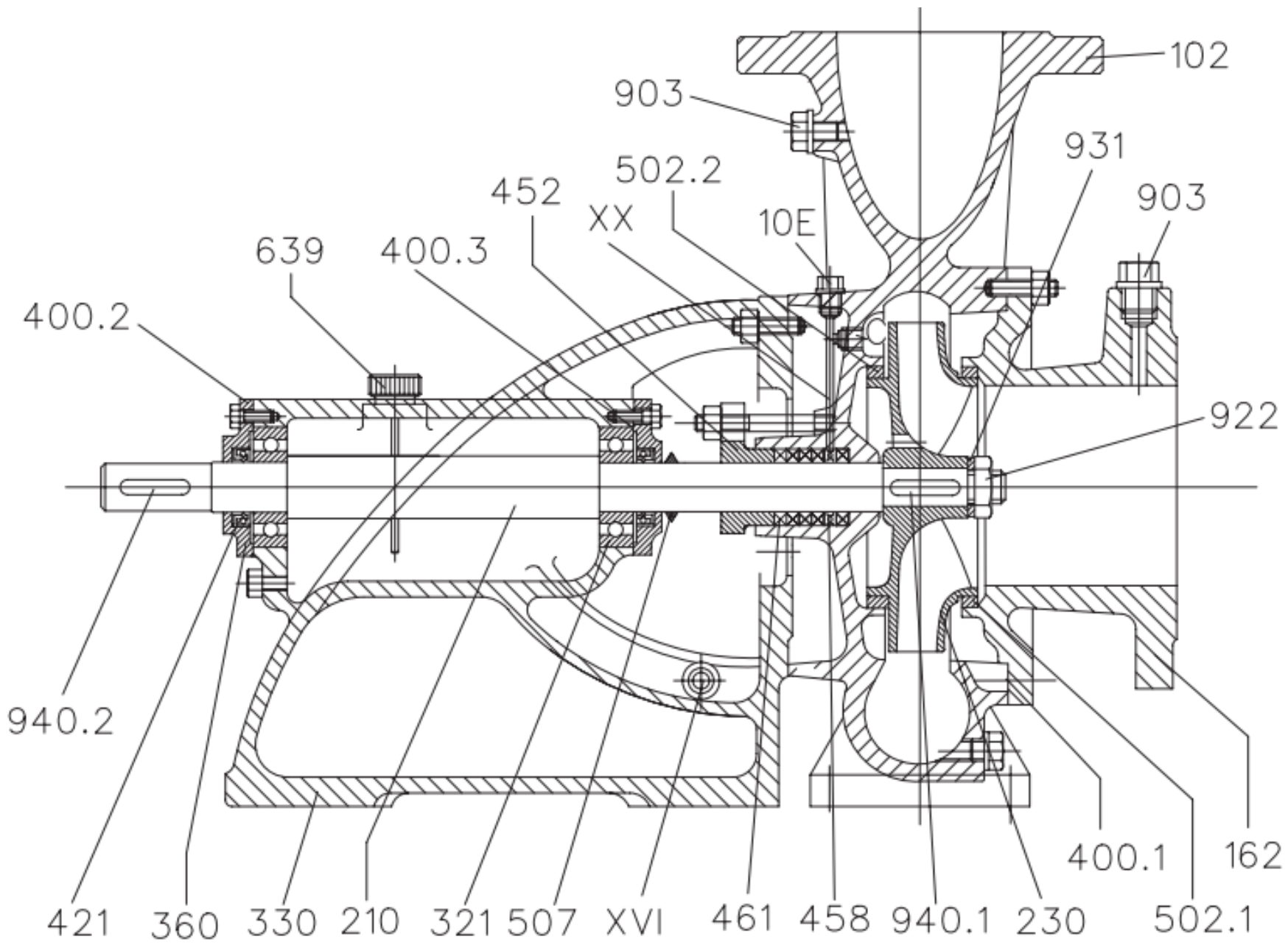
1.750 rpm

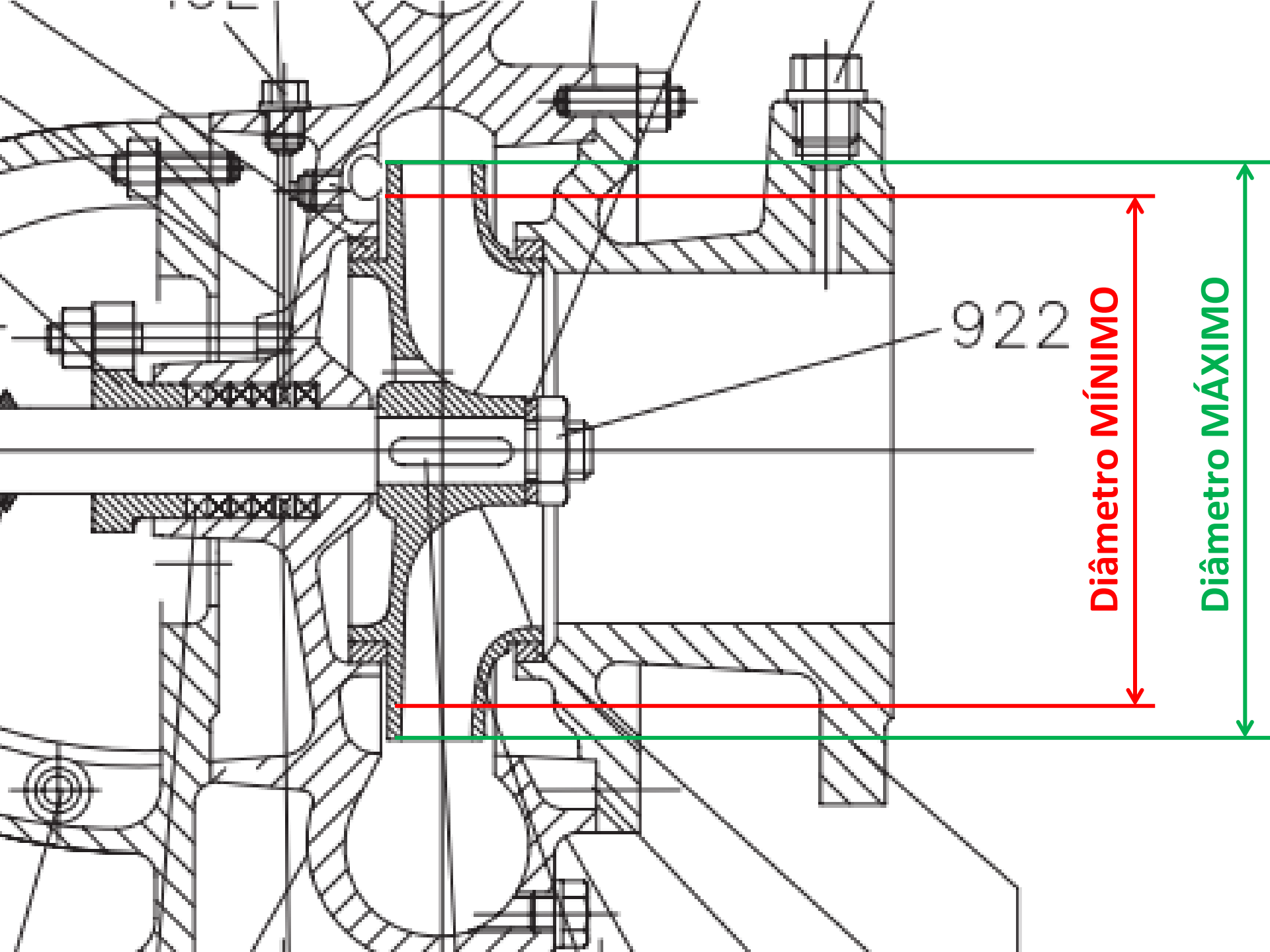


Potência Necessária  
Shaft Power  
Potencia Necesaria



R1150.464/425





922

Diâmetro MÍNIMO

Diâmetro MÁXIMO



N/Ref.: PROJETA

Revisão: 0

Item num.: 1

Tag num.:

Bomba: ETA 125-33

Projeto:

Vazão: 250 m<sup>3</sup>/h

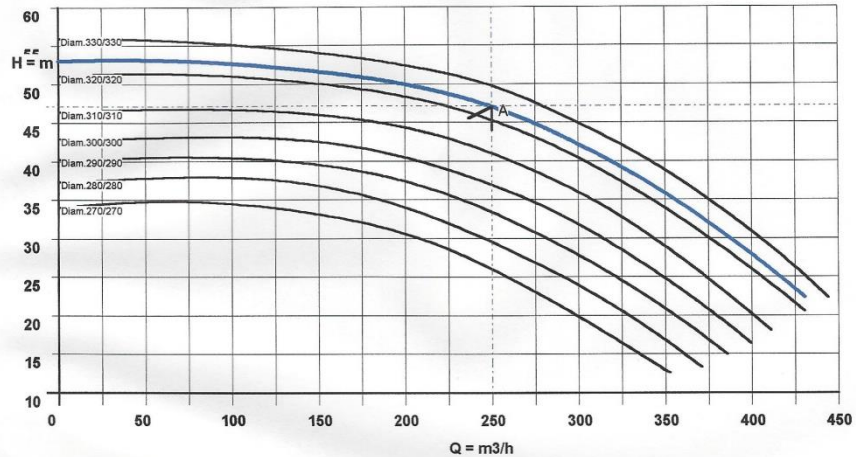
NPSHR: 3,41

Diam.Rotor Projeto: 324mm

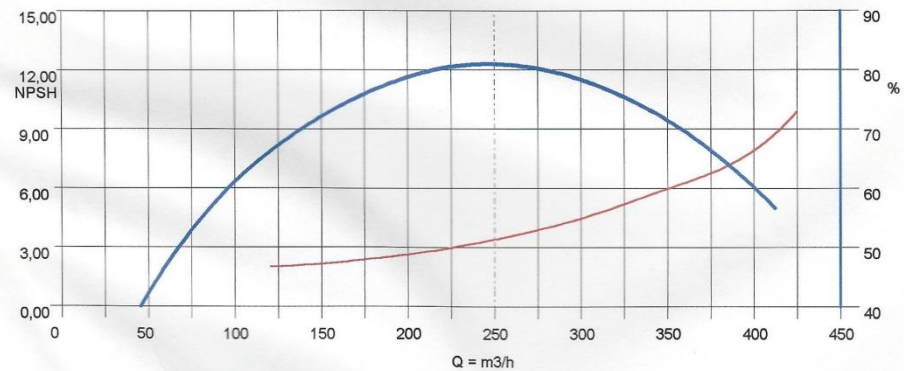
Altura: 47,00 m

Rotação: 1750 rpm

Visc.: 1 SSU



A = Ponto de operação



Rendimento %  
NPSHr

N/Ref.: **PROJETISTA**

Item num.: **1**

Bomba: **ETA 125-33**

Vazão: **250 m<sup>3</sup>/h**

Altura: **47,00 m**

Revisão: **0**

Tag num.:

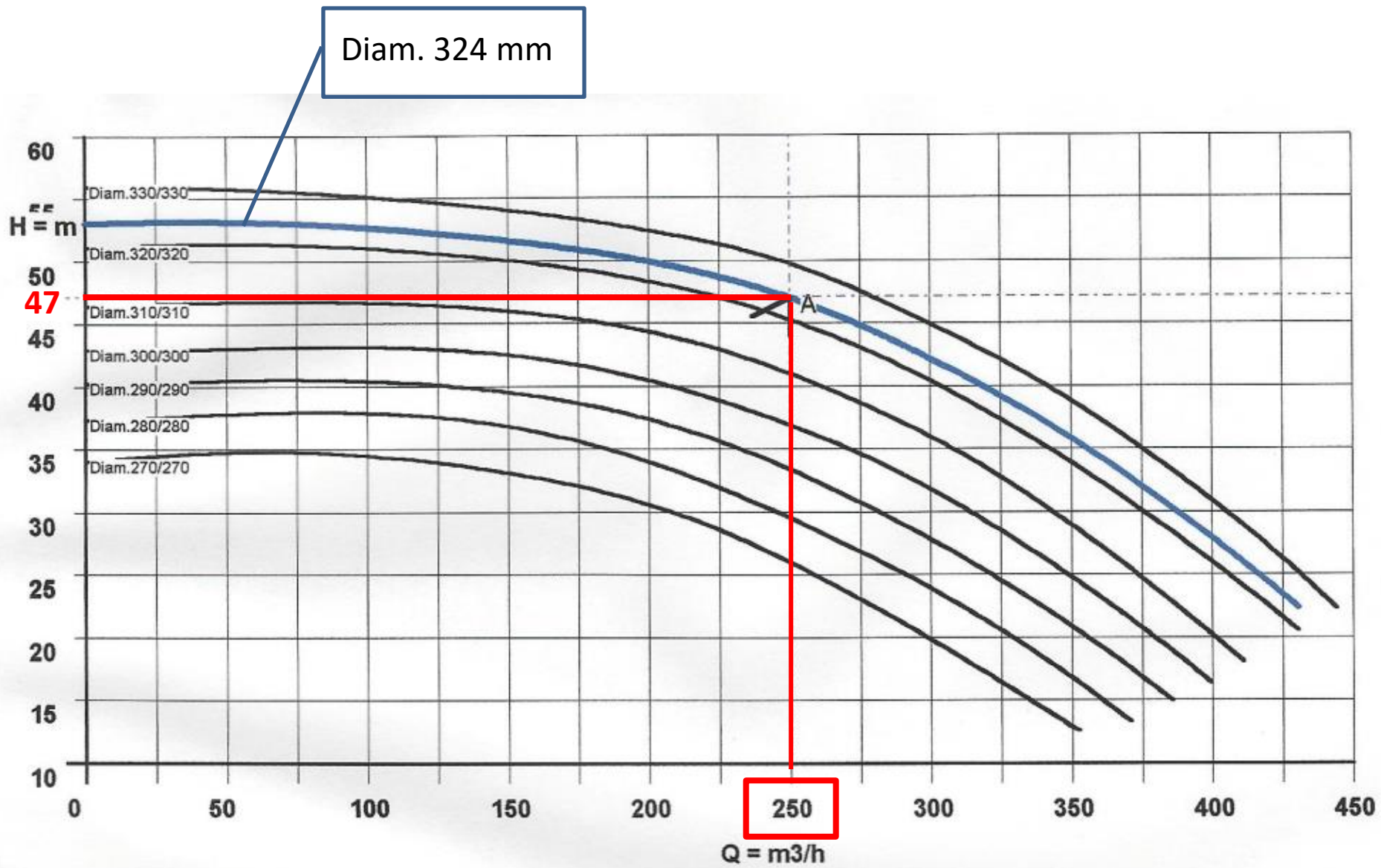
Projeto:

NPSHR: **3,41**

Rotação: **1750 rpm**

Diam.Rotor Projeto: **324mm**

Visc.: 1 SSU



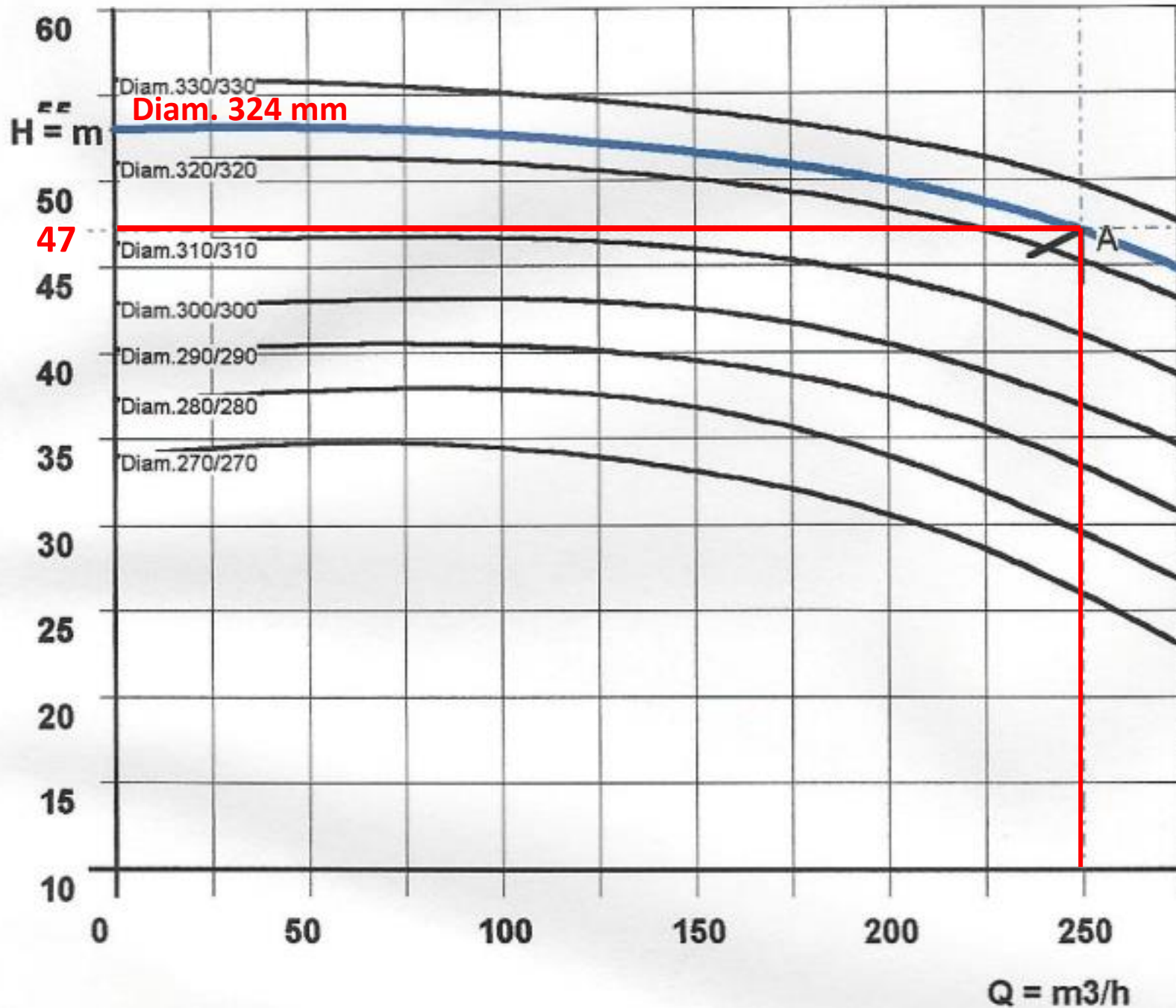
Diam. 324 mm

47

250

Q = m³/h

A = Ponto de operação



# 1. Introdução

O objetivo da presente experiência é a verificação da validade das leis de semelhança para bombas centrífugas.

Para isso, serão levantadas curvas de altura manométrica da bomba ( $H_m$ ) em função da vazão ( $Q$ ), para duas rotações ( $n_1$  e  $n_2$ ) distintas da bomba.

Espera-se produzir como resultado principal uma avaliação comparativa entre o modelo teórico e o experimental, interpretando os eventuais desvios.



## 2. Resumo Teórico

### Equação de Energia para Escoamentos

$$H = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z$$

Energia na seção 1 (entrada da bomba):

$$H_1 = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1$$

Energia na seção 2 (saída da bomba):

$$H_2 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

Energia transferida da bomba para o fluido, sendo o índice 1 entrada da bomba, e o índice 2 saída da bomba :

$$H_m = H_2 - H_1 = \left( \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} \right) + \left( \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \right) + (z_2 - z_1)$$

$$v_1 = v_2$$

$$H_m = \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} + \Delta z$$

Para a geometria da instalação conforme o “Esquema da Instalação” abaixo temos:

$$M_r = \frac{p_2}{\gamma}$$

**$M_r$**  = Leituras no **Manômetro**: instalado no recalque da bomba, para as medições das **pressões relativas**, no caso acima da atmosférica (leituras **positivas**), na tubulação de recalque;

$$M_s = \frac{p_1}{\gamma}$$

**$M_s$**  = Leituras no **Vacuômetro**: instalado na sucção da bomba, para as medições das **pressões relativas**, no caso abaixo da atmosférica (leituras **negativas**), na tubulação de sucção;

Temos portanto o sinal menos antes da leitura de  $\frac{p_1}{\gamma}$ ,  
logo, para a geometria da presente instalação,  
podemos escrever de uma maneira geral a soma em  
módulo:

$$H_m = M_r + M_s + \Delta z$$

# Coeficientes da Análise Dimensional

Coeficiente de energia:

$$C_E = \frac{g \cdot H_m}{n^2 \cdot D^2}$$

Coeficiente de vazão:

$$C_Q = \frac{Q}{n \cdot D^3}$$

Condições de semelhança para mudança de rotação:

$$C_{E n_1} = C_{E n_2} \rightarrow H_{m1} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot H_{m2}$$

$$C_{Q n_1} = C_{Q n_2} \rightarrow Q_1 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \cdot Q_2$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

$$H_{m2} = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \cdot H_{m1}$$

$$H_{m2} = \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 \cdot H_{m1}$$

Se  $H_{m1}$  e  $Q_1$ , são pontos conhecidos de uma determinada curva de uma bomba a uma rotação  $n_1$  ,

e

$H_{m2}$  e  $Q_2$  são pontos a serem determinados a uma rotação  $n_2$ , podemos portanto escrever de uma forma geral:

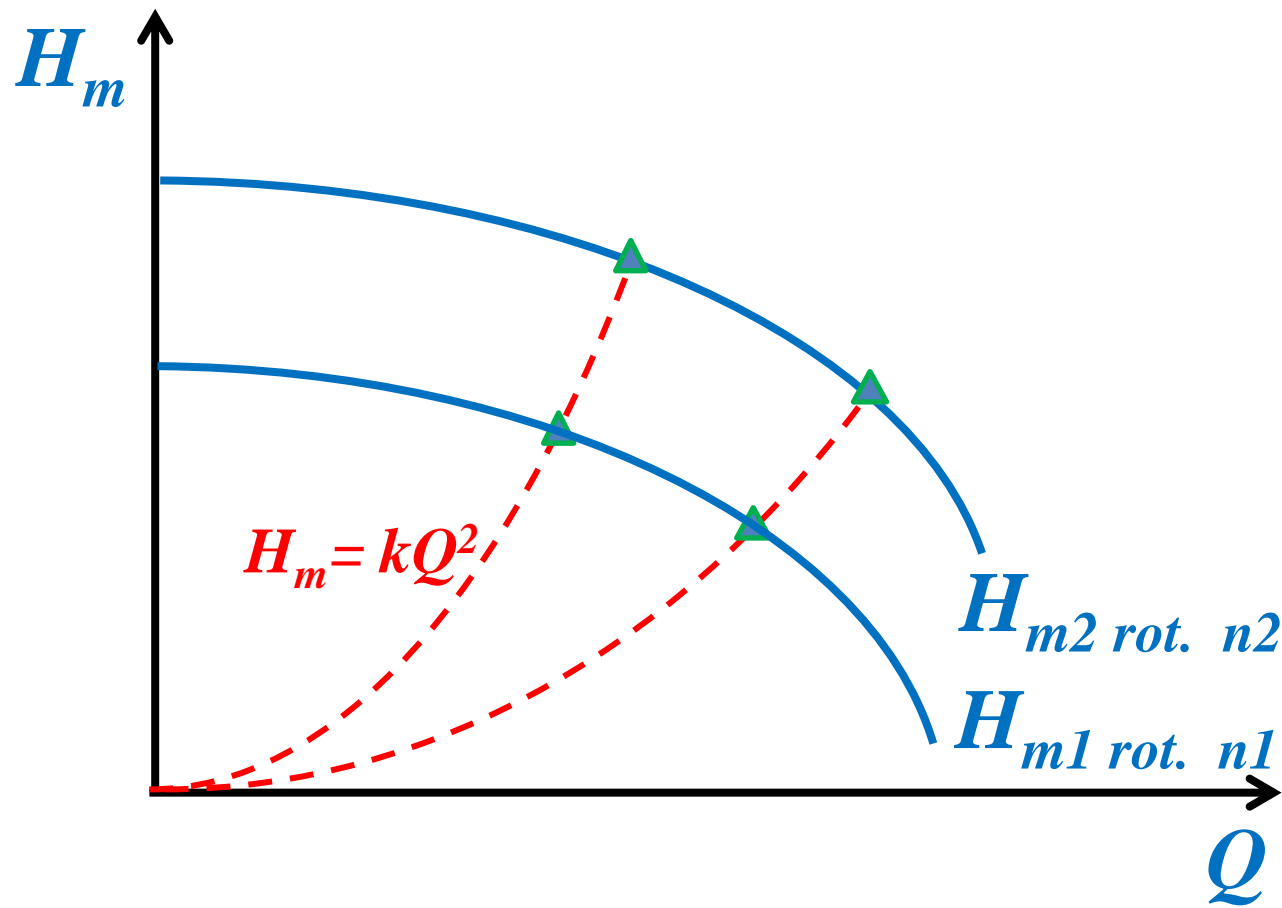


$$H_{m2} = \frac{H_{m1}}{Q_1^2} \cdot Q_2^2$$

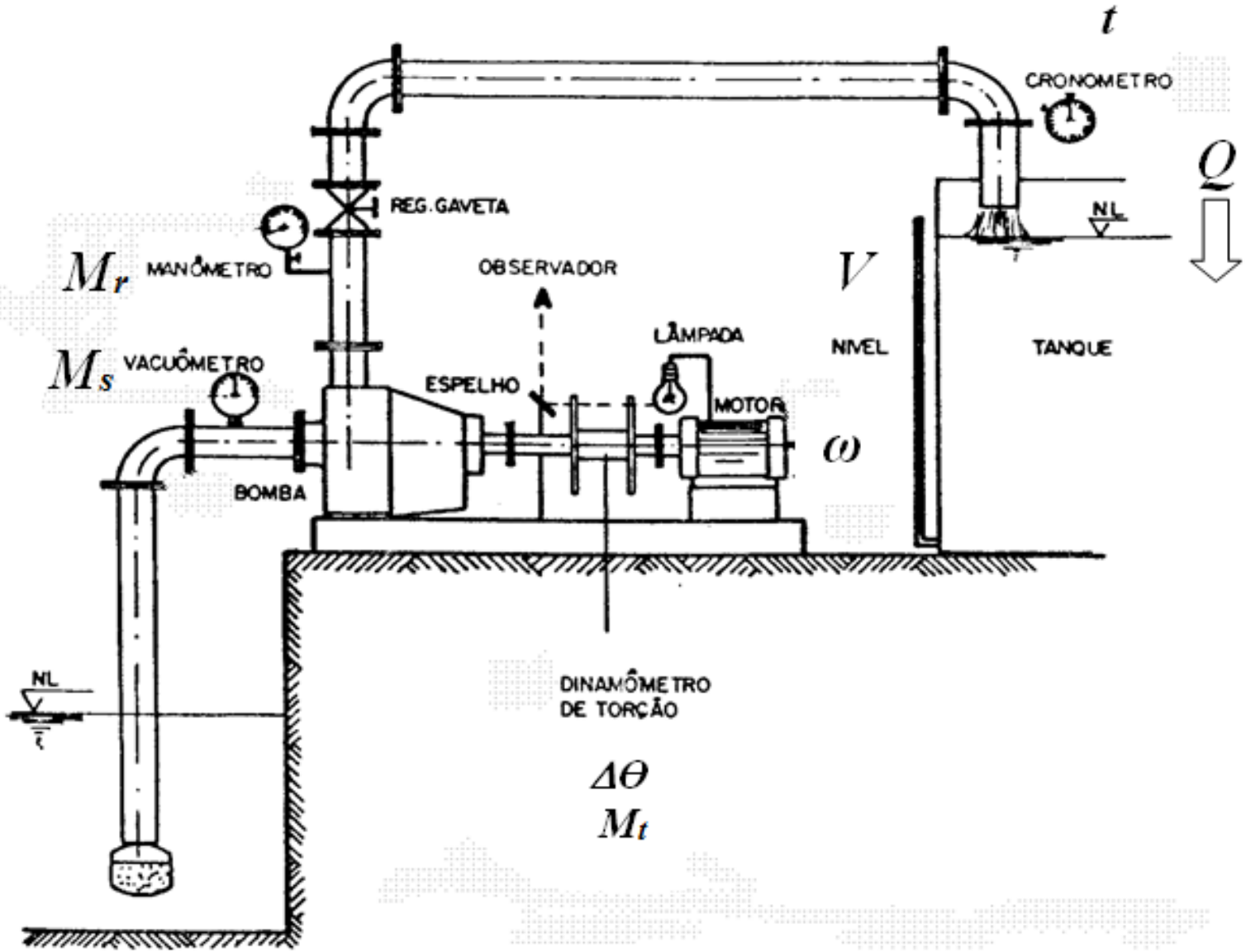
$$H = K \cdot Q^2$$

Esta equação é denominada por:

“PARÁBOLA DE FUNCIONAMENTO SEMELHANTE”



### 3. Esquema da instalação



**NDF**

Laboratório de Mecânica dos Fluidos

• Fluido-Dinâmica • Velocimetria Laser

# INSTALAÇÃO



# INSTALAÇÃO

PAINEL COM INVERSOR DE  
FREQUÊNCIA PARA AJUSTE  
DA ROTAÇÃO



Será utilizado nesta experiência:

**Inversor de Frequência:** para a variação e a medição da rotação do motor acoplado ao eixo do rotor da bomba;

**Vacuômetro:** para as medições das pressões relativas, no caso abaixo da atmosférica (negativas), na tubulação de sucção;

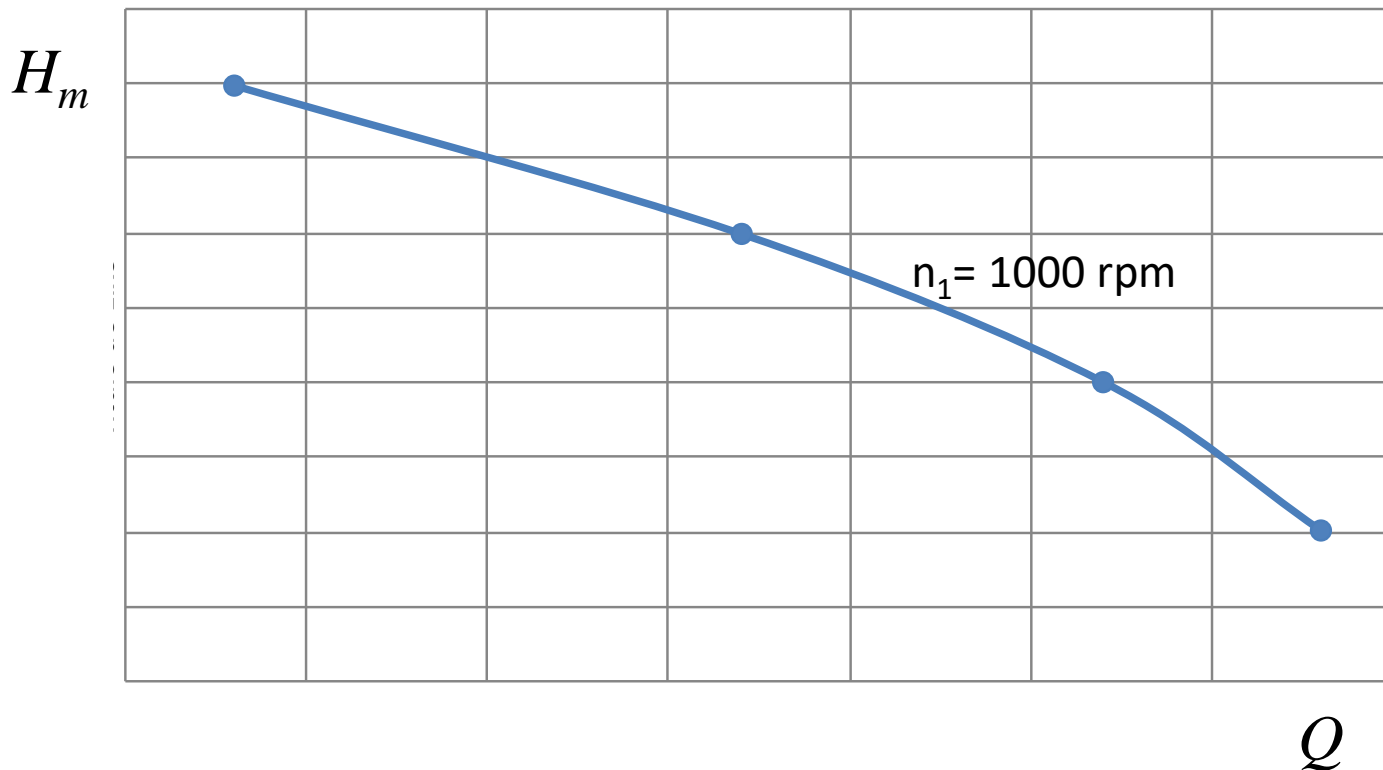
**Manômetro:** para as medições das pressões relativas, no caso acima da atmosférica (positivas), na tubulação de recalque;

**Registro Gaveta:** para a regulação da vazão;

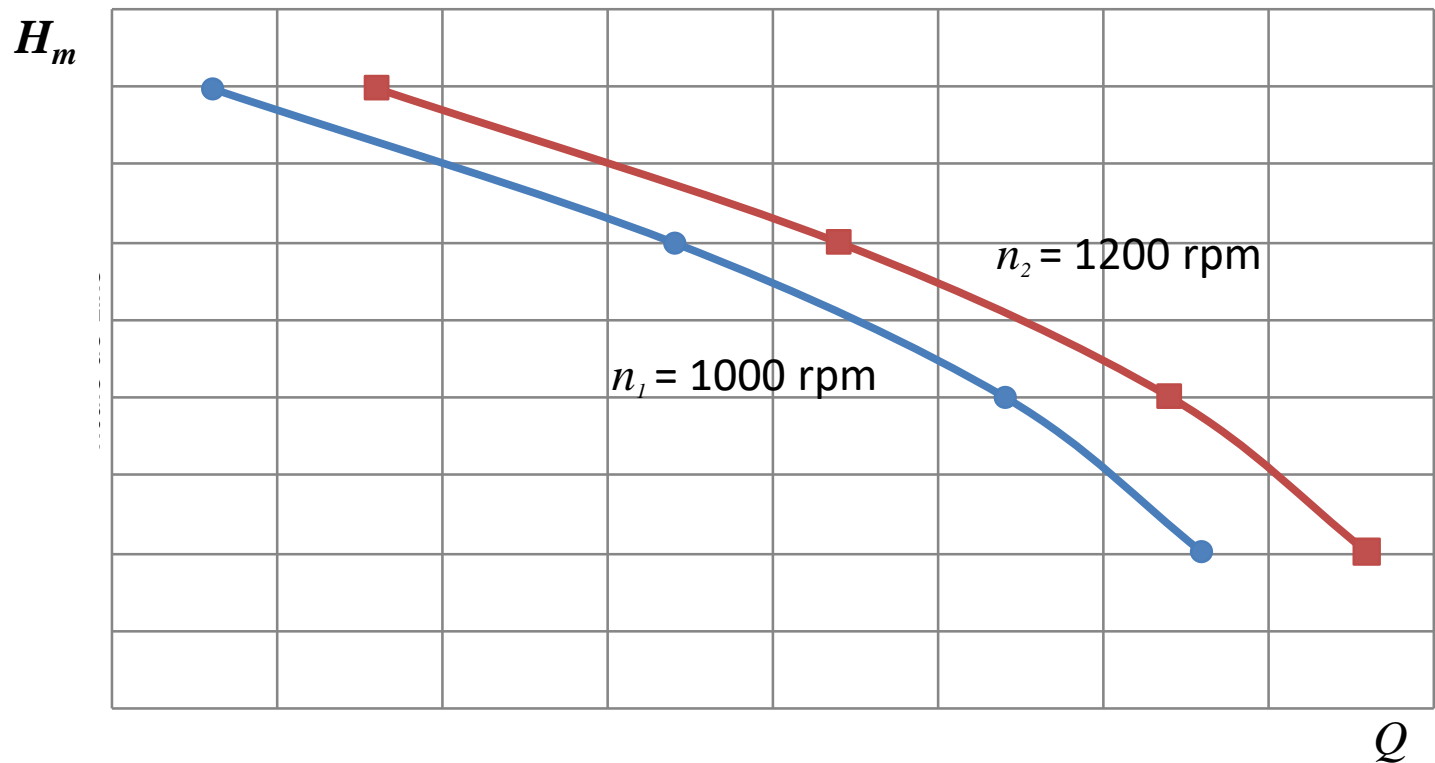
**Reservatório de 2000 L:** para a medição das vazões.

## 4. Procedimento no Ensaio

- Regular a rotação do motor para  $n_1 = 1000$  rpm
- Regular o registro gaveta para uma determinada vazão ( $Q$ )
- Manter a rotação do motor ( $n_1 = 1000$  rpm) constante
- Medir  $M_r$  (valores positivos),  $M_s$  (valores negativos) e  $\Delta z$
- Medir a vazão ( $Q$ ) no reservatório de 2000 L
- Repetir os procedimentos de **b.** até **f.** para pelo menos cinco vazões
- Levantar a curva  $H_m = f(Q)$  para a rotação  $n_1 = 1.000$  rpm



- h. Alterar a rotação para  $n_2 = 1200$  rpm
- i. Repetir os procedimentos de **b.** até **f.** para pelo menos cinco vazões
- j. Levantar no mesmo gráfico a curva de  $H_m = f(Q)$  para a rotação  $n_2 = 1.200$  rpm



(Indicar no gráfico diferentes marcadores para os pontos das curvas distintas.)



## 5. Dados Experimentais e Calculados (Tabela Sugerida)

$n$	PONTOS	$Mr$		$Ms$		$\Delta z$	$Hm$	Vol.	Tempo	$Q$
rpm		(*)	m	(*)	m	m	m	l	s	l/s
$n_1=1000$	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
	7									
	8									
$n_2=1200$	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
	7									
	8									

(\*) Verificar as unidades de medida de pressão dos manômetros

## 6. Verificação das Condições de Semelhança

Tendo levantado todos os pontos os quais permitem traçar as duas curvas experimentais para as rotações de  $n_1 = 1.000$  rpm e  $n_2 = 1.200$  rpm resta validar o modelo de semelhança.

Para isso calcular teoricamente  $H_{m1000}$  e  $Q_{1000}$  através das equações de semelhança utilizando preferivelmente pelo menos três pontos da curva  $H_{m1200} = f(Q_{1200})$  e não os obtidos experimentalmente para que não sejam ampliados os erros experimentais.

Levantar a curva teórica  $H_{m1000} = f(Q_{1000})$  e comparar com a curva já obtida experimentalmente.

O comportamento esperado é a proximidade das curvas com conseqüente validação do modelo.

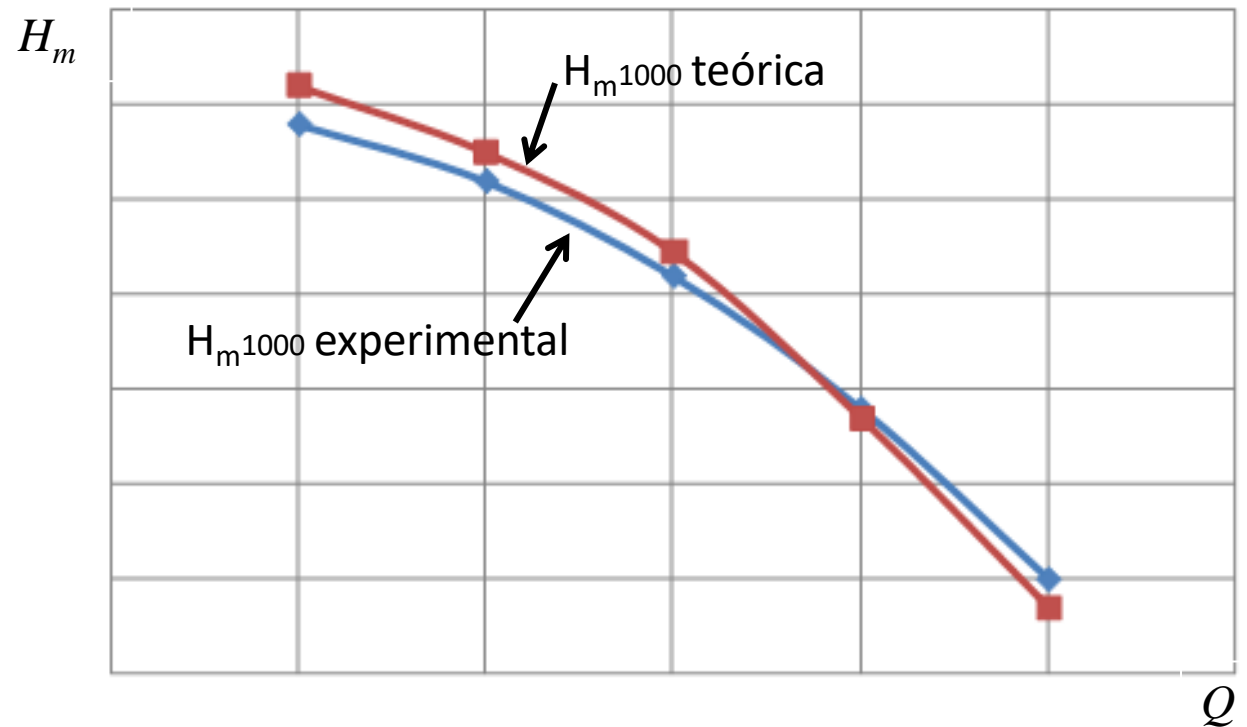
	PONTOS ESCOLHIDOS DA CURVA		PONTOS CALCULADOS TEÓRICAMENTE	
PONTOS	$H_{m1200}$ (m)	$Q_{1200}$ (l/s)	$H_{m1000}$ (m)	$Q_{1000}$ (l/s)
1				
2				
3				
4				

$$C_{E n_1} = C_{E n_2}$$

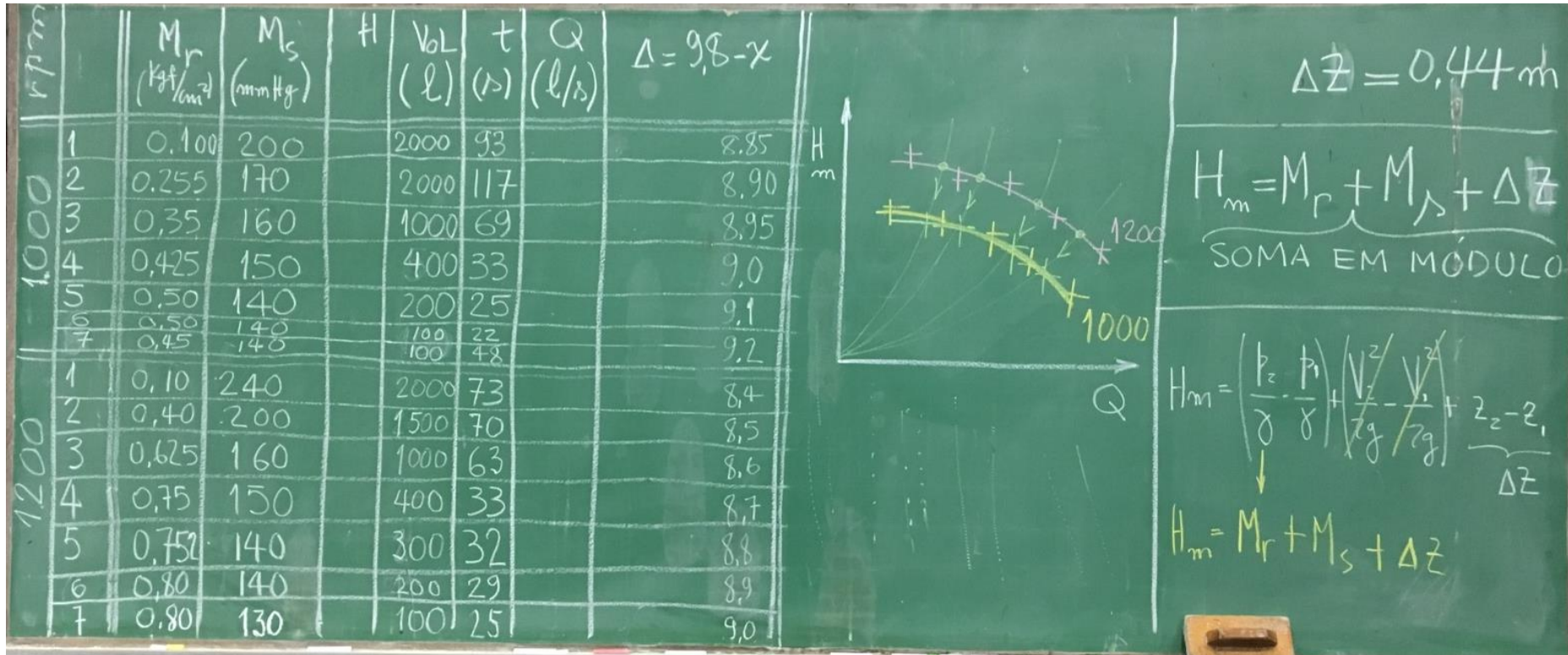
$$H_{m1} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot H_{m2}$$

$$C_{Q n_1} = C_{Q n_2}$$

$$Q_1 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \cdot Q_2$$



- Faça o relatório usando os dados históricos abaixo apresentados:



- **Apresente o Relatório com pelo menos os tópicos abaixo sugeridos:**
  - 1. Introdução ou Objetivos;**
  - 2. Resumo Teórico;**
  - 3. Esquema da Instalação (Foto ou Desenho);**
  - 4. Planilha com os valores anotados em laboratório (dados acima) e calculados;**
  - 5. Gráficos;**
  - 6. Comentários ou Conclusões.**

## 7. Observações:

- Procurar dispor os gráficos ao longo de toda a área de plotagem;
- Plotar os gráficos iniciando as escalas no (0,0) do sistema cartesiano;
- Buscar escalas adequadas nos eixos;
- Colocar Título do Gráfico;
- Colocar Títulos dos eixos com as escalas utilizadas;
- Colocar Legendas nas curvas;
- Colocar Linhas de grade em ambas as direções;

## 8. Anexos:

$$\Delta z = \Delta h$$

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

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PME-3453 – MÁQUINAS DE FLUXO – LABORATÓRIO

EXPERIÊNCIA N° 4

VERIFICAÇÃO DAS LEIS DE SEMELHANÇA  
PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS RADIAIS

PROF. SÉRGIO ROBERTO CECCATO

ALUNO : \_\_\_\_\_ TURMA: \_\_\_\_\_

N° USP : \_\_\_\_\_

DATA : \_\_\_\_\_

VISTO : \_\_\_\_\_

DADOS EXPERIMENTAIS

$n$ rpm	PONTOS	$M_r$		$M_s$		$\Delta z$ m	$H_m$ m	Vol. L	Tempo s	$Q$ L/s
		(*)	m	(*)	m					
$n_1=1000$	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
	7									
	8									
$n_2=1200$	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
	7									
	8									

(\*) Verificar as unidades de medida de pressão dos manômetros

DADOS COMPLEMENTARES:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



