

# ENSAIO DE CAVITAÇÃO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA OPERANDO NO SEGUNDO QUADRANTE

DEDALUS - Acervo - EESC



31100006823

MARCOS ANTONIO CHIUSOLI

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento

ORIENTADOR: Prof. Tit. HANS GEORGE ARENS



São Carlos

1998

Class.	TESE-EESC
Cutt.	1510
Tombo	0012198

31100006823

31100006823

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP**

C543e Chiusoli, Marcos Antonio  
Ensaio de cavitação de uma bomba centrífuga  
operando no segundo quadrante / Marcos Antonio  
Chiusoli. -- São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia  
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.  
Área: Hidráulica e Saneamento.  
Orientador: Prof. Dr. Hans George Arens.


1. Bomba centrífuga.
2. Curva de bomba.
3. Cavitação.
4. NPSH. I. Título.


## FOLHA DE APROVAÇÃO

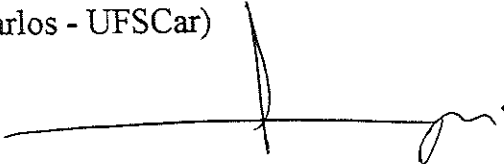
Candidato: Engenheiro **MARCOS ANTONIO CHIUSOLI**

Dissertação defendida e aprovada em 29.10.1998  
pela Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Tit. **HANS GEORGE ARENS (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Tit. **WOODROW NELSON LOPES ROMA**  
(Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Tit. **JOSÉ TEIXEIRA FREIRE**  
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**  
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento

  
\_\_\_\_\_  
**JOSÉ CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor e Orientador Hans George Arens, pela atenção, orientação e apoio dispendidos durante a elaboração deste trabalho.

Ao CNPq pela bolsa de estudo concedida.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo, pela chance oferecida.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento, em especial ao Sr. Edson Cornetta pelos excelentes serviços prestados.

À Marley Cristina Chiusoli pelo apoio relacionado a pesquisa bibliográfica.

Agradeço a Raquel e ao Rodrigo, que nas horas mais difíceis muito me ajudou e incentivou para o término deste trabalho.

## Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iv
Lista de Símbolos	viii
Resumo	x
Abstract	xi
1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
3. Fundamentos Teóricos	5
3.1. Bombas	5
3.1.1. Definição de bomba hidráulica de fluxo	5
3.1.2. Classificação geral das bombas hidráulicas	5
3.1.2.1. Bombas volumétricas ou de deslocamento positivo	5
3.1.2.2. Bombas especiais	7
3.1.2.3. Turbobombas	7
3.1.3 Curvas características das bombas	11
3.2. Cavitação	14
3.2.1. Conceito	14
3.2.2. Ocorrência da cavitação	16
3.2.3. Identificação da cavitação	16
3.2.4. Combate à cavitação	17
3.2.5. Parâmetros de cavitação	18
3.2.6. NPSH (Net Positive Suction Head)	18
3.3. Gases dissolvidos na água	22
3.4. Ensaios de cavitação descritos por normas técnicas	23
3.5. Equações utilizadas nos cálculos	27

4. Metodologia	33
4.1 Banco de Ensaio	33
4.2. Procedimento Experimental	34
4.3. Detecção do ponto de cavitação	35
5. Resultados	37
6. Discussão e Conclusão	57
7. Recomendações	59
Anexos	60
Referências Bibliográficas	85

## Lista de Figuras

Figura 3.1: Tipos de bombas rotativas	6
Figura 3.2: Esquema de uma bomba peristáltica	7
Figura 3.3: Tipos de rotores: (a ) fechado; (b) aberto	8
Figura 3.4: Bomba centrífuga	9
Figura 3.5: Bomba de fluxo misto ou diagonal	10
Figura 3.6: Bomba axial ou propulsora	10
Figura 3.7: Curva característica de uma bomba de deslocamento positivo	12
Figura 3.7.1: Tipos de curvas de turbobombas mais comuns	13
Figura 3.8 : Diagrama de fase para a água	15
Figura 3.9: Situação de equilíbrio da bolha	16
Figura 3.10: Determinação gráfica do NPSH	19
Figura 3.11: Sistema para determinação da cavitação utilizando-se um circuito fechado	25
Figura 3.12: Sistema para determinação da cavitação através da variação do nível d'água	25
Figura 3.13: Sistema para determinação da cavitação com regulagem de registro de entrada	26
Figura 3.14: Figura representativa ilustrando os pontos de recalque e sucção	27
Figura 3.15: Figura representativa para obtenção da Equação da Estática	28
Figura 4.1 : Representação simplificada do banco de ensaios utilizado	33
Figura 4.2: Detecção do ponto de cavitação	36
Figura 5.1: Esquema dos manômetros utilizados	38
Figura 5.2: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 1)	41
Figura 5.3: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 2)	41

Figura 5.4: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 3)	42
Figura 5.5: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 4)	42
Figura 5.6: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 5)	43
Figura 5.7: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 6)	43
Figura 5.8: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 7)	44
Figura 5.9: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 8)	44
Figura 5.10: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 9)	45
Figura 5.11: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 10)	45
Figura 5.12: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 11)	46
Figura 5.13: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1000 RPM (Teste 12)	46
Figura 5.14: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1200 RPM (Teste 13)	47
Figura 5.15: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1200 RPM (Teste 14)	47
Figura 5.16: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1200 RPM (Teste 15)	48
Figura 5.17: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1200 RPM (Teste 16)	48
Figura 5.18: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1200 RPM (Teste 17)	49



Figura 5.19: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1200 RPM (Teste 18)	49
Figura 5.20: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $15 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1200 RPM (Teste 19)	50
Figura 5.21: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1200 RPM (Teste 20)	50
Figura 5.22: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1200 RPM (Teste 21)	51
Figura 5.23: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1200 RPM (Teste 22)	51
Figura 5.24: Curva de NPSH x $H/H_m$ para a vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ e rotação de 1200 RPM (Teste 23)	52
Figura 5.25: Figura de Q x NPSH para a rotação de 1000 RPM	52
Figura 5.26: Figura de Q x NPSH para a rotação de 1200 RPM	53
Figura 5.27: Figura do coeficiente de NPSH em função do coeficiente de vazão	53
Figura 5.28: Figura do coeficiente de NPSH em função do coeficiente de vazão	54
Figura 5.29: Figura de $C_{\text{NPSH}}$ em função de $\phi$ encontrado por Silva (1998)	54
Figura 5.30: Figura do $C_{\text{NPSH}}$ em função de $\phi$ desprezado por Silva (1998)	55
Figura 5.31: Totalidade dos valores de $C_{\text{NPSH}}$ em função de $\phi$ obtidos por Silva (1998)	55
Figura 5.32: Figura do $C_{\text{NPSH}}$ em função de $\phi$ obtidos para o 1° e 2° quadrantes	56

## Lista de Tabelas

Tabela A1: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 1)	60
Tabela A2: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 2)	60
Tabela A3: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 3)	61
Tabela A4: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 4)	61
Tabela A5: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 5)	62
Tabela A6: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 6)	62
Tabela A7: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 7)	63
Tabela A8: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 8)	63
Tabela A9: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 9)	64
Tabela A10: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 10)	64
Tabela A11: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 11)	65
Tabela A12: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 12)	65
Tabela A13: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 13)	66

Tabela A14: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 14)	66
Tabela A15: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 15)	67
Tabela A16: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 16)	67
Tabela A17: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 17)	68
Tabela A18: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 18)	68
Tabela A19: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 19)	69
Tabela A20: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 20)	69
Tabela A21: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 21)	70
Tabela A22: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 22)	70
Tabela A23: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 23)	71
Tabela B1: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 1)	72
Tabela B2: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 2)	72
Tabela B3: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 3)	73
Tabela B4: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 4)	73
Tabela B5: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 5)	74

Tabela B6: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 6)	74
Tabela B7: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 7)	75
Tabela B8: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 8)	75
Tabela B9: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 9)	76
Tabela B10: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 10)	76
Tabela B11: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 11)	77
Tabela B12: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 12)	77
Tabela B13: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 13)	78
Tabela B14: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 14)	78
Tabela B15: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 15)	79
Tabela B16: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 16)	79
Tabela B17: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 17)	80
Tabela B18: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 18)	80
Tabela B19: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 19)	81

Tabela B20: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 20)	81
Tabela B21: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 21)	82
Tabela B22: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 22)	82
Tabela B23: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ (Teste 23)	83
Tabela C1: Valores de NPSH obtidos para a rotação de 1000 RPM	84
Tabela C2: Valores de NPSH obtidos para a rotação de 1200 RPM	84

### Lista de Símbolos

$C_{NPSH}$	Coeficiente de NPSH
$g$	Aceleração gravitacional, $m/s^2$
$H$	Altura total de elevação, mca
$H_{atm}$	Pressão atmosférica absoluta, mca
$H_S$	Altura total de sucção, mca
$H_V$	Carga de vapor absoluto, mca
$H_m$	Altura total de elevação média, utilizada para cálculo do desvio de 3% do NPSH, m
$H_R$	Altura total de recalque, mca
$H_S$	Altura total de sucção, mca
$h_s$	Pressão de sucção ( $h_s=P_s/\gamma$ ), mca
$K$	Número adimensional
mca	Metro de coluna de água
NPSH	Net Positive Suction Head, m
$NPSH_d$	NPSH disponível, mca
$NPSH_r$	NPSH requerido, m
$P_s$	Pressão de sucção da bomba, mca
$P_V$	Pressão de vapor do fluido, mca
$P_R$	Pressão de recalque da bomba, mca
pot	Potência, Hp
$P_{atm}$	Pressão atmosférica, mca
$q$	Vazão de água, $m^3/h$ ou $m^3/s$
$Q$	Vazão de água, $m^3/h$ ou $m^3/s$
$r$	Raio do rotor, m
$Re$	Número de Reynolds, adimensional

$V_s^2/2g$	Energia cinética na entrada da bomba, mca
$V_R^2/2g$	Energia cinética na saída da bomba, mca
$V_s$	Velocidade do líquido na sucção da bomba, m/s
$V_R$	Velocidade do líquido no recalque da bomba, m/s
$X$	Número adimensional dividido por 2
$Z_R$	Altura do recalque da bomba, m
$z_1$	Leitura manométrica relativa a posição 1 indicada, mmHg
$z_2$	Leitura manométrica relativa a posição 2 indicada, mmHg
$z_3$	Leitura manométrica relativa a posição 3 indicada, mmHg
$z_4$	Leitura manométrica relativa a posição 4 indicada, mmHg
$z_4'$	Leitura manométrica relativa a posição 4' indicada, mmHg
$Z_s$	Medida entre o eixo da bomba invertida e o zero dos manômetros, m
$^{\circ}\text{C}$	Temperatura da água, graus Celcius
$\text{K}$	Temperatura da água, em Kelvin
$\sigma$	Número de Thoma
$\rho$	Massa específica da água, $\text{Kg/m}^3$
$\psi$	Coefficiente de pressão
$\omega$	Rotação da bomba, rpm
$\phi$	Coefficiente de vazão
$\Delta P$	Varição de pressão, mca
$\eta$	Rendimento
$\nu$	Viscosidade cinemática da água, $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
$\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$	Peso específico da água, $\text{Kgf/m}^3$
$\gamma_{\text{Hg}}$	Peso específico do mercúrio, $\text{Kgf/m}^3$

## RESUMO

A cavitação é um sério problema para máquinas e instalações hidráulicas, necessitando que sejam realizados estudos para o desenvolvimento de novas metodologias para sua detecção e mesmo para que seus efeitos sejam minimizados.

A maioria dos catálogos de curvas de bombas de fabricantes fornecem valores para vazões positivas, sendo que muitas vezes se faz necessário conhecer o comportamento da mesma em situações diferentes das condições originalmente trabalhadas.

Apesar de ultimamente ter-se falado com mais frequência do assunto, ainda são encontrados poucos trabalhos de pesquisa na área, o que indica que existem muitos pontos a serem pesquisados, dada a complexidade do fenômeno de cavitação em líquidos.

Este trabalho trata da determinação da curva de cavitação de uma bomba centrífuga instalada de modo com que o fluxo d'água adentre na mesma pelo seu recalque e saia pela sua sucção, ou seja, a bomba foi ensaiada trabalhando-se com vazões negativas.

Para a realização deste trabalho foram feitos testes para diferentes vazões e rotações obtendo-se, por fim, as curvas de NPSH em função da vazão.

**Palavras chave:** bomba centrífuga, curva de bomba, cavitação, NPSH



## ABSTRACT

Cavitation is a serious problem for both machines and hydraulic facilities; therefore, studies must be made for the development of new methodology, which would allow its detection, and also the reduction of its effects.

The majority of manufacturers' leaflets about curves of pumps shows values for positive outflows, but many times it is necessary to know how they work in different situations from those originally dealt.

Although the subject has been discussed lately, there is still little research in the area, what indicates that there are many aspects to be studied due to the complexity of the cavitation phenomenon in liquids.

The present work deals with the determination of the cavitation curve of a centrifugal pump installed in a way that the water flow comes into it through its outlet and goes out through its suction, i. e., the pump was tested with negative outflows.

In this work, tests were made for different outflows and rotation, finally arriving at the curves of NPSH as a function of the outflow.

**Key Words:** centrifugal pumps, pump curve, cavitation, NPSH

## 1. Introdução

A cavitação é um fenômeno indesejável que pode vir a ocorrer em bombas ou máquinas hidráulicas.

Segundo GIKAS (1986), o termo cavitação surgiu pela primeira vez na Inglaterra, no ano de 1894, pela observação de hélices de navios, feita por "Barnaby".

LAURIA (1997), escreve que a cavitação é um fenômeno de ocorrência limitada a líquidos com consequências negativas tanto para o escoamento em si, quanto para regiões sólidas ao seu redor.

As máquinas e instalações hidráulicas são sujeitas à cavitação em regiões de baixa pressão (como entrada de bombas e saída de turbinas), ou em regiões onde o escoamento do líquido possa ter pressões próximas da pressão de vaporização.

Este fenômeno ocasiona muitos prejuízos e desconforto, pois pode prejudicar o desempenho das bombas e muitas vezes, até vir a ocasionar sua perda. Isso sem contar os problemas que podem ocorrer em processos industriais ou em equipamentos que estejam trabalhando associados com bombas cavitantes, pois estas, quando em cavitação, tem seu desempenho afetado.

O presente trabalho trata do fenômeno de cavitação, mas, diferentemente do que se encontra normalmente sobre o assunto, realizou-se testes utilizando-se uma bomba posicionada de modo invertido, ou seja, com o fluxo de água adentrando na mesma pelo recalque e saindo pela sua sucção.

Para se construir sua curva de NPSH em função da vazão foi necessário a realização de vários testes experimentais.

Este trabalho tem como objetivo principal a obtenção da curva de NPSH em função da vazão, obtendo-se, assim, a curva de NPSH da bomba para operação no segundo quadrante, já que trabalhou-se com vazões negativas.

Como objetivo prático, conheceu-se o comportamento da bomba quando esta não trabalha em condições normais de operação (isto é, com vazão negativa), o que é interessante, pois muitas vezes em instalações hidráulicas, a bomba pode vir a ficar sujeita a esta condição.

Quanto à metodologia empregada, foram utilizados ensaios de cavitação para diferentes vazões e rotações, encontrando-se a curva de NPSH em função da vazão da bomba, como esperado.

O capítulo 2 diz respeito à revisão bibliográfica consultada sobre o assunto cavitação.

Já o capítulo 3 explica conceitos importantes para o entendimento do comportamento das bombas centrífugas; sendo também tratado o conceito de cavitação, dando seu modo de ocorrência e principais características. Também, comentou-se sobre as exigências sugeridas por normas de ensaio de cavitação e tratou-se do equacionamento matemático do trabalho.

No capítulo 4 foram explicadas as características do equipamento utilizado e o procedimento para a obtenção de dados experimentais.

Os resultados obtidos são apresentados no capítulo 5, sendo também explicadas algumas particularidades dos valores obtidos.

O capítulo 6 conclui o trabalho, finalizando com algumas recomendações para trabalhos futuros.

## 2. Revisão Bibliográfica

Foi realizada a procura por literaturas que tratassem do assunto referido neste trabalho. Entretanto, muito pouco encontrou-se sobre ensaios de cavitação em bombas. Alguns dos trabalhos encontrados são antigos e não apresentam citações para o caso de se ensaiar bombas de fluxo invertido. A seguir é realizado um apanhado geral de alguns trabalhos pesquisados.

KITLREDGE, L. P. e THEMA, D. apud INNOCENTI (1997), foram os primeiros a apresentar idéia para a determinação das características de operação de bomba em condições de trabalho diferentes das condições em que a máquina tenha sido projetada.

DONSKY B. (1961), realizou trabalho no qual mostrou curvas completas de bombas para diferentes velocidades específicas. Entretanto, houve escassez de valores para algumas regiões.

ARENS, H. G. e PORTO, R. M. (1987), tratam de modelos numéricos para se determinar curvas adimensionais de desempenho de bombas.

KNAPP (1970), trata a respeito da constituição dos núcleos de cavitação, citando que estes se tratavam de vazios no seio dos líquidos sem nenhuma molécula em seu interior, originados devido a flutuações térmicas randômicas, com diâmetro teórico da ordem de  $10^{-8}$  cm.

Já J. FRENKEL apud GIKAS diz que tais núcleos eram da ordem de grandeza da metade do espaço médio intermolecular.

SCHROETER apud STEPANOFF trata do ensaio de cavitação, utilizando-se de vários tipos de materiais sob cavitação, num conduto a uma velocidade constante e compara o efeito do fenômeno para cada material.

DE HALLER apud STEPANOFF realizou trabalho sobre a quantidade de metal perdido utilizando-se de jato d'água; foram encontrados resultados bastante próximos dos resultados encontrados por SCHROETER (SCHROETER apud STEPANOFF).

KERR (1937) realizou ensaios com cerca de oitenta materiais diferentes e observou que a água do mar causou um dano de cavitação levemente maior que a água doce. Observou-se também, que a temperatura da água acarreta maior perda de materiais por cavitação quando o seu valor é aumentado. Quando em temperatura elevada a quantidade de ar dissolvido na água é reduzido, diminuindo o efeito do chamado ``efeito almofada`` enquanto que, ao mesmo tempo, ocorre aumento na formação das bolhas de vapor.

MOUSSON (1937) mostrou o efeito benéfico quando se injeta pequenas quantidades de ar sobre o metal, minimizando assim o efeito da cavitação. Seu trabalho fornece extensos dados de ensaio úteis na seleção de materiais quando se espera o fenômeno da cavitação.

SILVA (1998), realizou estudo de uma metodologia alternativa para se realizar ensaios de cavitação em bombas centrífugas de pequena altura total de elevação e estudou o coeficiente de NPSH no primeiro quadrante para a mesma bomba ensaiada neste trabalho.

As referências bibliográficas até aqui citadas são algumas das referências lidas, sendo que no item Referências Bibliograficas do presente trabalho encontramos mais referências utilizadas para a elaboração deste trabalho.

O capítulo 3, a seguir, diz respeito aos fundamentos teóricos, nos quais este trabalho se encontra embasado.

### **3. Fundamentos Teóricos**

#### **3.1. Bombas**

##### **3.1.1. Definição de bomba hidráulica de fluxo**

Bombas são máquinas que transformam a energia mecânica a elas cedida, através de um motor, em energia hidráulica a ser absorvida pelo líquido (puro, mistura, suspensão, pasta), cuja principal finalidade seria o transporte do líquido de um local para outro de maior energia potencial.

##### **3.1.2. Classificação geral das bombas hidráulicas**

As bombas são classificadas segundo a forma com que é realizada a transformação de trabalho mecânico em energia hidráulica, podendo ser:

- Bombas volumétricas ou de deslocamento positivo;
- Bombas especiais;
- Turbobombas ou bombas hidráulicas de fluxo.

###### *3.1.2.1. Bombas volumétricas ou de deslocamento positivo*

Estas bombas ocasionam aumento da pressão ao fluido, fazendo com que seja realizado seu escoamento. A quantidade de fluido impelida é constante (para uma determinada rotação), podendo se dar de forma alternativa (no caso de bombas de pistão, diafragma ou êmbolo) ou intermitente (no caso de bombas de engrenagem, parafuso, palhetas, etc...).

As bombas de deslocamento positivo são muito utilizadas quando se deseja vazão constante (independentemente da carga aplicada sobre a bomba) e, quando se necessita de volumes precisos do fluido a ser impelido (para uma dada rotação da bomba).

As bombas alternativas não possuem limites de pressão (desde que a bomba seja suficientemente resistente e o motor com a potência necessária), entretanto possuem capacidade relativamente pequena. As bombas alternativas são bastante utilizadas para o bombeamento de óleos, águas de caldeiras, fluidos sem material sólido abrasivo (exceto para bomba de diafragma); são também muito utilizadas como bombas dosadoras.

Nas bombas rotativas o fluido é deslocado continuamente desde a entrada até a saída da bomba. Estas bombas são utilizadas para líquidos de quaisquer viscosidade, desde que não possuam sólidos abrasivos.

Na Figura 3.1, são apresentados alguns exemplos das bombas citadas.

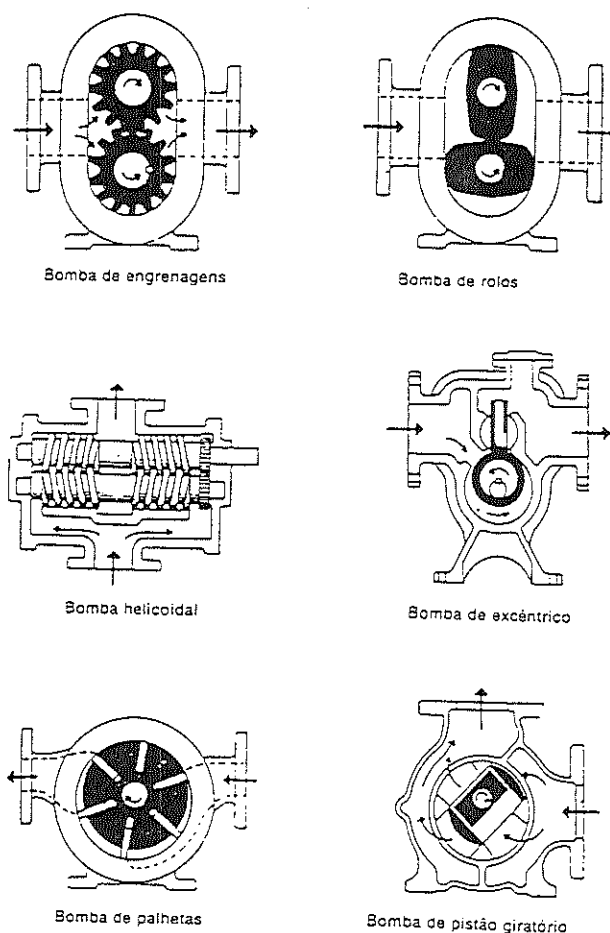


Figura 3.1: Tipos de bombas rotativas

### 3.1.2.2. Bombas especiais

Este tipo de bomba apresenta características próprias, destacando-se pela aplicação geralmente restritiva com relação aos materiais de fabricação. A bomba peristáltica é um exemplo que possui ampla utilização em dosadores químicos de substâncias que não devem entrar em contato com metais ou lubrificantes utilizados nas bombas. A bomba peristáltica (ver Figura 3.2) é composta de um tubo flexível, o qual é amassado progressivamente por um rolete, o qual cria um aumento de pressão, que empurra o fluido no tubo.

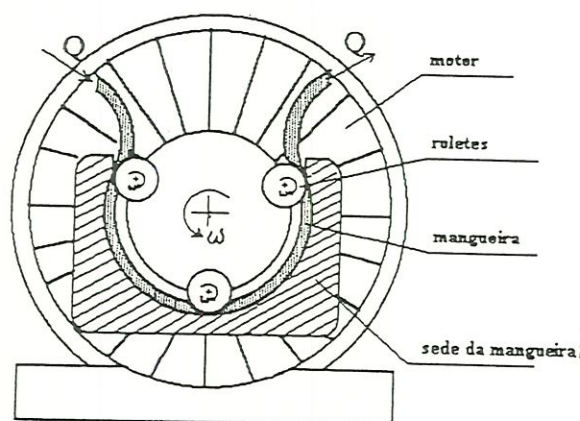


Figura 3.2: Esquema de uma bomba peristáltica

### 3.1.2.3. Turbobombas

As turbobombas, também conhecidas como bombas rotodinâmicas ou de fluxo têm como característica a presença de um órgão rotatório dotado de pás, chamado rotor (ou impelidor ou impulsor), o qual comunica aceleração ao fluido, ocorrendo a transformação da energia mecânica em energia cinética. Diferentemente das bombas de deslocamento positivo, a aceleração não possui o mesmo sentido do movimento do líquido em contato com as pás. A descarga da bomba é função das características da mesma, da sua rotação e das características do sistema ao qual estiver acoplada.

O rotor comunica aceleração à massa líquida, adquirindo energia cinética



através da transformação da energia mecânica de que está dotado. O rotor pode apresentar-se de forma fechada ou aberta (Figura 3.3).

No rotor fechado, além do disco ao qual são fixadas as pás (que possuem forma recurvada) existe uma coroa circular também presa às pás, formando dutos através do qual escoo o fluido. A coroa possui uma abertura central circular que é a entrada do rotor e a periferia do conjunto forma a abertura de saída. Este tipo de rotor é bastante empregado para líquidos limpos, sem sólidos em suspensão e isentos de impurezas.

O rotor aberto possui as pás de forma recurvada e é montado sem os discos, formando canais abertos para o escoamento do fluido. Este tipo de rotor é utilizado no bombeamento de líquidos com impurezas em suspensão, pastas, lamas, areias, esgotos, etc ..



Figura 3.3: Tipos de rotores: (a) fechado; (b) aberto

As turbobombas são, também, compostas por outro órgão chamado difusor (ou recuperador), no qual é realizada a transformação de grande parte da elevada energia cinética com que o líquido sai do rotor, em energia de pressão. Assim sendo, ao sair da bomba, o líquido escoo com velocidade razoável, equilibrando a pressão que se opõe ao seu escoamento. Essa transformação obedece ao teorema de Bernoulli, pois, normalmente, o difusor possui seção gradativamente crescente, realizando uma diminuição contínua e progressiva da velocidade do líquido que por ele escoo, aumentando simultaneamente a pressão.

O difusor pode ser de tubo reto troncônico (nas bombas axiais) ou na forma de caracol ou voluta (nos demais tipos de bombas).

De acordo com as posições relativas do movimento geral do líquido e do eixo de rotação pode-se classificar as turbobombas em: bombas centrífugas puras ou radiais (conforme Figura 3.4), bombas de fluxo misto ou diagonal (conforme Figura 3.5) e bombas axiais ou propulsoras (conforme Figura 3.6):

Bomba centrífuga ou radial:

Nas bombas centrífugas, uma força externa se aplica ao eixo da bomba, fazendo girar o rotor dentro da carcaça fixa. As pás do rotor, ao girarem, produzem uma redução de pressão na entrada ou centro do mesmo, obrigando o líquido a escoar da sucção para dentro do rotor. O líquido é forçado para fora ao longo das pás com velocidade tangencial crescente. A energia de velocidade que o líquido adquire quando deixa as extremidades do rotor é convertida em energia de pressão ao adentrar a câmara espiral até atingir a saída. Por ser um equipamento relativamente simples, as bombas centrífugas são fabricadas em série, sendo utilizadas na maioria das instalações de água.

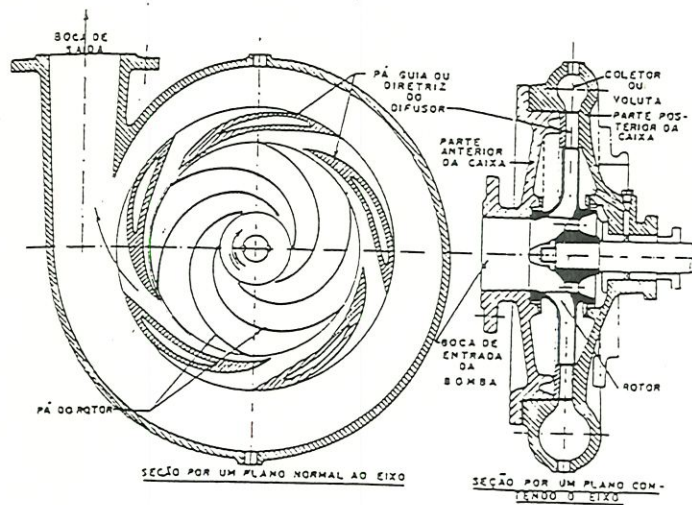


Figura 3.4: Bomba centrífuga

Bomba de fluxo misto ou diagonal:

Neste tipo de bomba o fluido chega axialmente ao rotor, atingindo as pás de dupla curvatura, vindo a impor ao fluido uma trajetória em forma de curva reversa que chega ao bordo de saída da pá. Se a curva reversa pertence ao plano

perpendicular ao eixo na saída do rotor ou é ligeiramente inclinada em relação a este plano, a bomba é denominada helico-centrífuga. Se o bordo de saída das pás é bastante inclinado em relação ao eixo a bomba é denominada helicoidal. Estes tipos de bombas são geralmente utilizados para altas vazões e pequenas e médias alturas de elevação do fluido.

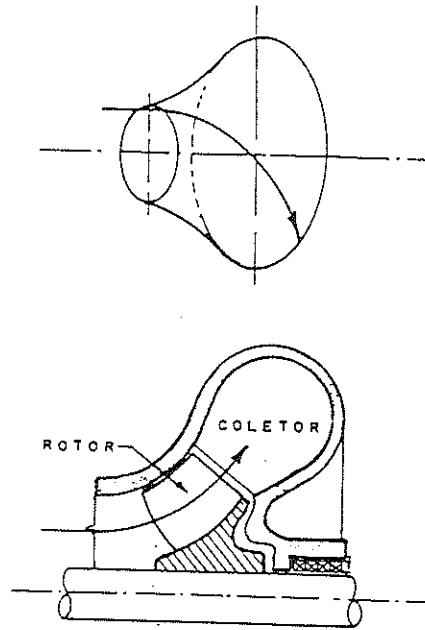


Figura 3.5: Bomba de fluxo misto ou diagonal

Bomba axial ou propulsora:

Este tipo de bomba possui escoamento paralelo ao eixo e o rotor aplica uma aceleração ao fluido dotando-o, na saída, de um movimento helicoidal superposto ao movimento axial. Este tipo de equipamento é utilizado para serviços caracterizados por altas vazões e elevação do fluido.

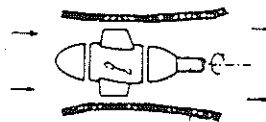


Figura 3.6: Bomba axial ou propulsora

Pode-se, também, classificar as bombas de acordo com:

- Número de rotores presentes:
  - Bombas de simples estágio: composta por apenas um rotor.
  - Bombas de múltiplo estágio: composta de dois ou mais rotores em série.
- Número de entradas por aspiração:
  - Aspiração simples ou entrada unilateral: possui um só ponto de aspiração conectado a abertura circular da coroa do rotor.
  - Aspiração dupla ou entrada bilateral: possui duas entradas opostas, usando um rotor simétrico equivalente a dois rotores trabalhando em paralelo.

### 3.1.3 Curvas características das bombas

Estas curvas têm como finalidade traduzir o comportamento das grandezas típicas do funcionamento de uma bomba, em quaisquer situações que se possa provocar, ou seja, descrevem as características operacionais das bombas. A curva da altura manométrica (H) em função da vazão (Q) é a mais conhecida e utilizada.

#### *Bombas de deslocamento positivo*

Para esse tipo de bomba, teoricamente, a vazão independe da pressão desenvolvida. Portanto, a curva (H x Q) deveria se resumir a uma curva paralela ao eixo das alturas ou pressões (ver Figura 3.7). Na realidade, porém, verifica-se uma perda  $\Delta Q$  que é devido a vazamentos e fugas, os quais aumentam com o crescimento da pressão. Em tais bombas há o risco de se elevar excessivamente o valor da pressão, desde que uma alteração da curva do sistema o provoque (pela cessação do consumo, fechamento de registro, etc...)

Tal fato faz com que a regulagem da vazão das bombas desse tipo se tornem mais difíceis, pois só poderá ser realizado com a variação de rotação do eixo motor ou através da regulagem do curso do órgão transmissor (bombas alternativas).

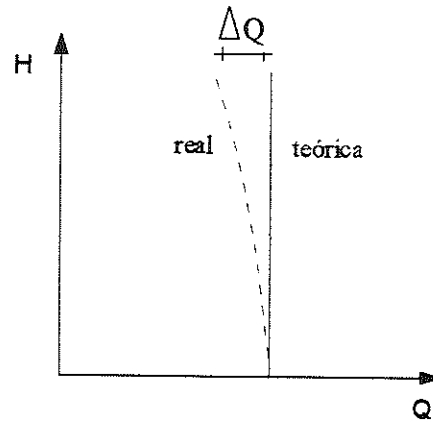


Figura 3.7: Curva característica de uma bomba de deslocamento positivo

### *Turbobombas*

A rotação do rotor, sua forma e sua dimensão influem na quantidade de energia fornecida ao fluido. Dessa forma, a curva da bomba é modificada por qualquer desses parâmetros. Para uma determinada carcaça com um rotor de diâmetro e forma definidos e rotação constante, a curva da bomba quase não se altera e praticamente independe do líquido bombeado.

As curvas características das bombas são fornecidas por fabricantes, curvas estas que são obtidas em bancadas experimentais. Como uma mesma carcaça pode acomodar rotores de diâmetros variados, os gráficos mais complexos mostram o efeito de se alterar o diâmetro do rotor sobre as características das bombas. Também são relacionados a eficiência, potência do motor e o NPSH para uma dada rotação.

As curvas das turbobombas são classificadas de acordo com a forma que assumem ao variar a altura manométrica com a vazão. Na Figura 3.7.1 estão expressos os principais tipos de curvas

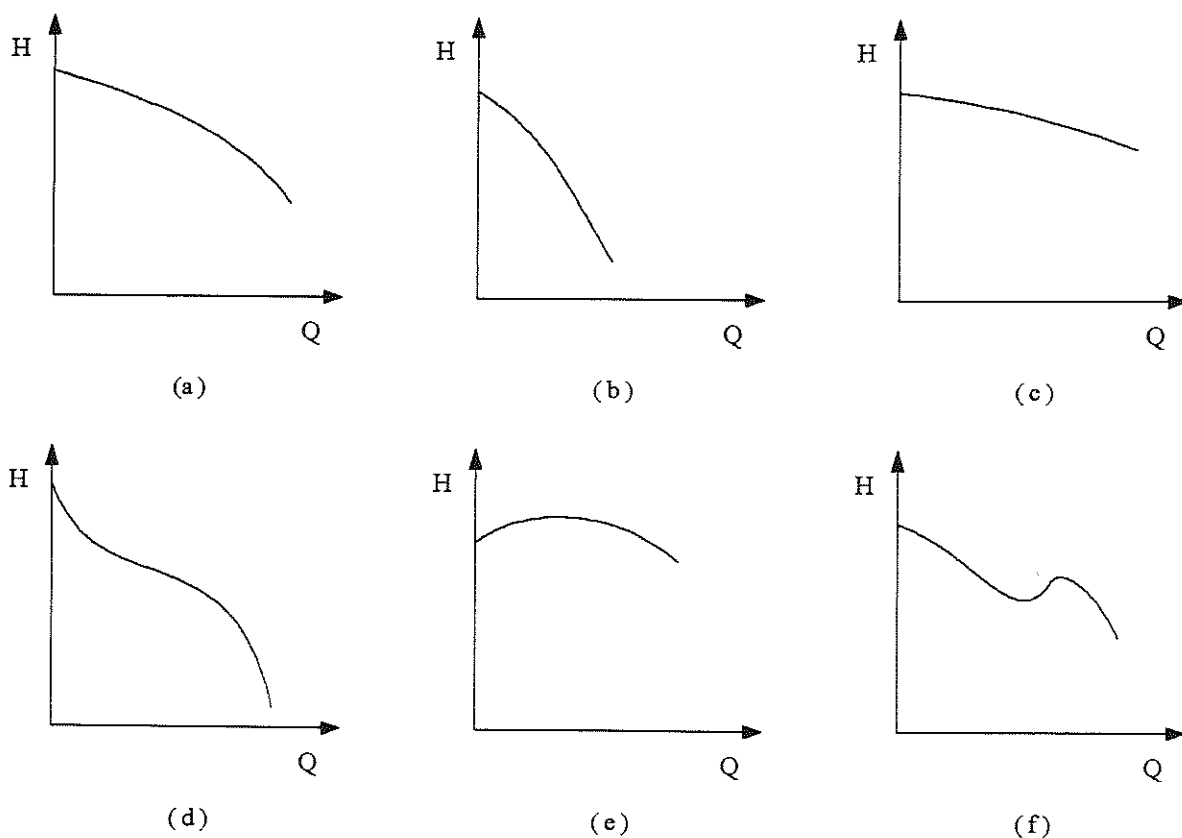


Figura 3.7.1: Tipos de curvas de turbobombas mais comuns

As Figuras 3.7.1 (a), 3.7.1 (b), 3.7.1 (c) e 3.7.1 (d) correspondem às chamadas curvas estáveis, pois para cada valor da altura manométrica existe apenas um valor para a vazão e vice-versa. Já para as Figuras 3.7.1 (e) e 3.7.1 (f) são do tipo instável, pois para determinada altura manométrica encontramos dois ou mais valores de vazão.

## 3.2 Cavitação

A cavitação é um fenômeno limitado a fase líquida, apresentando consequências danosas tanto para o escoamento do fluido quanto para as partes sólidas ao seu redor.

Este fenômeno ocorre em regiões de baixa pressão de máquinas e instalações hidráulicas, tais como entradas de bombas, saídas de turbinas, faces de jusante de válvulas, ou qualquer região do escoamento líquido onde possa ocorrer pressões próximas da pressão de vaporização do líquido na temperatura de trabalho.

### 3.2.1. Conceito

A cavitação caracteriza-se pela formação de uma fase vapor em regiões em que a pressão seja reduzida, mantendo-se a temperatura do meio constante. A cavitação e a ebulição são processos semelhantes, do ponto de vista físico e termodinâmico, diferenciando-se apenas o fato de um ser consequência da elevação da temperatura (mantendo-se pressão constante) e de outro ser devido ao abaixamento da pressão (mantida a temperatura constante).

Os processos comuns de cavitação estão longe de uma condição de equilíbrio termodinâmico, exigindo que a pressão no local seja inferior à pressão de vaporização para que o fenômeno ocorra.

A Figura 3.8 mostra um diagrama de fase para pressão e temperatura, onde estão expressas as condições de ebulição e cavitação.

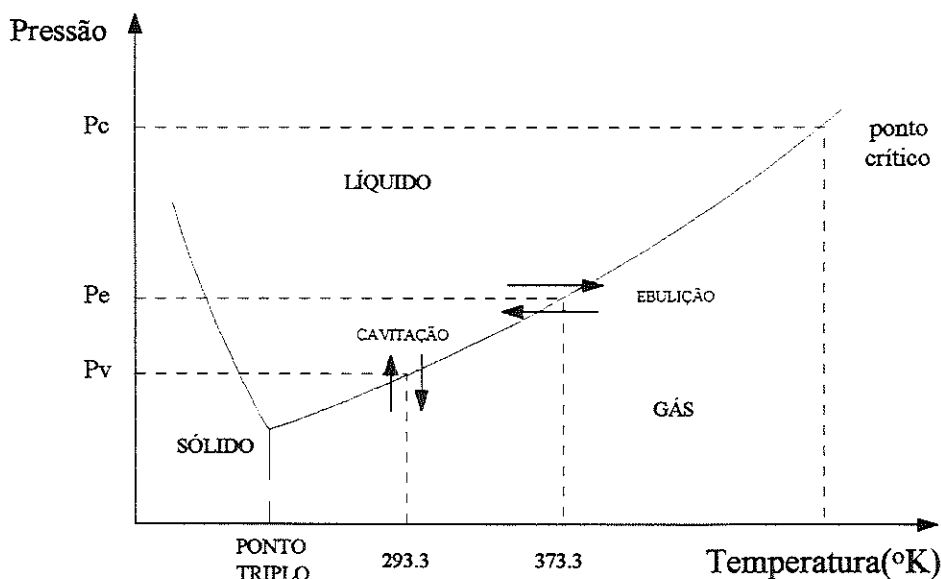


Figura 3.8 : Diagrama de fase para a água

A ocorrência da cavitação está condicionada à presença de núcleos livres de gás e/ou vapor no meio fluido, os quais participam como indutores da vaporização nas regiões submetidas a baixas pressões. Só ocorrerá cavitação caso esses núcleos tornarem-se instáveis e crescerem quando submetidos a pressões baixas.

As micro-bolhas são formadas nas regiões de baixa pressão do escoamento, sendo carregadas pelo mesmo e, ao atingir regiões em que a pressão se torne mais elevada, ocorre sua implosão. A região de cavitação apresenta a formação e colapso de um grande número de bolhas de vapor e gases, o que induz a vibrações elevadas. Como consequência desta implosão desenvolve-se um micro-jato, que ao incidir sobre superfícies sólidas, vêm a erodi-las.

A Figura 3.9 mostra as condições de equilíbrio estático da bolha. Através dessa figura verifica-se que a pressão adjacente à bolha apresenta um valor mínimo, inferior à pressão de vapor do líquido. Enquanto a pressão ambiente for superior a este mínimo e o raio inicial inferior ao raio associado a esta pressão, o núcleo permanece estável, tendendo a um raio de equilíbrio definido pela curva cheia. Se, entretanto, a pressão ambiente atingir valores inferiores ao valor limite, a bolha instabiliza-se, crescendo indefinidamente.

A pressão limite da instabilidade é função do volume de gás no interior da bolha. Quanto menor o seu conteúdo menor será a pressão crítica e, assim, menor a



possibilidade de ocorrer cavitação. Desta forma conclui-se que a vaporização torna-se impossível de ocorrer em líquidos puros, isentos de núcleos gasosos.

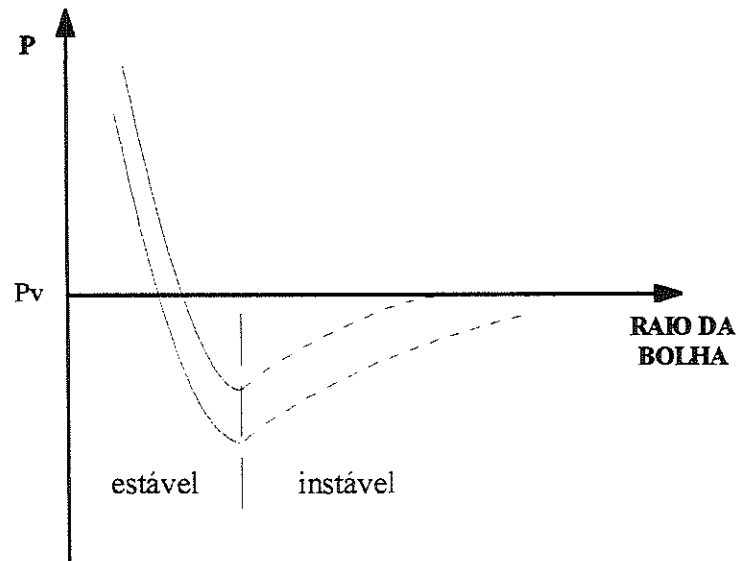


Figura 3.9: Situação de equilíbrio da bolha

### 3.2.2. Ocorrência da cavitação

A cavitação em escoamentos pode ser identificada através do comportamento do escoamento e ruídos, os quais são bastante característicos. A ocorrência de cavitação em máquinas e instalações hidráulicas conduz a uma deterioração do escoamento local, sempre sendo prejudicial ao mesmo, sendo que a erosão das partes sólidas faz-se sentir após longo período de ataque, devido às reduzidas dimensões dos micro-jatos.

### 3.2.3. Identificação da cavitação

As principais indicações da ocorrência da cavitação são:

- *Ruído típico*: a cavitação franca é caracterizada por frequências de formação e colapso de bolhas na faixa audível, sendo este ruído utilizado para a identificação

do escoamento cavitante. É bom salientar que no início da cavitação as frequências situam-se fora da faixa de audição do ser humano.

- *Queda de desempenho da instalação:* as bolhas formadas causam bloqueio parcial do escoamento, ocasionando queda do desempenho das máquinas e instalações, o que pode ser evidenciado por:

- Redução da altura manométrica total: torna-se detectável apenas quando sob cavitação plena, sendo padrão de referência para determinação do padrão NPSH;

- Redução da vazão em bombas: a redução de altura manométrica total e de vazão em uma máquina conduz a uma queda no rendimento. O descolamento do escoamento, assim como a instabilidade de alta frequência que é característica da nuvem de cavitação conduzem a uma operação instável na máquina, evidenciada em vibrações inconvenientes das parte girantes.

- Bloqueio da vazão em válvulas: ocorre devido a uma grande redução da área e pequena redução da vazão, o que acarreta grande aumento de velocidade, ocasionando diminuição de pressão e bloqueio do escoamento por parte da nuvem de cavitação. Isto ocorre devido a má escolha da válvula.

### **3.2.4. Combate à cavitação**

Devido a característica destruidora da cavitação, deve-se tentar eliminá-la ou, pelo menos, reduzir seus efeitos nos casos em que sua eliminação se torna muito difícil.

A seguir são relacionados alguns procedimentos que podem ser utilizados para eliminação ou redução da cavitação:

- Aumento da pressão estática local: neste procedimento, um aumento da pressão local irá contribuir para eliminação da cavitação, o que ocorrerá devido a uma mudança na instalação;
- Alteração na formas dos perfis: ocasionará mudança no perfil de velocidade com consequente mudança no campo das pressões (devido a seu aumento);
- Escolha de material resistente: este procedimento desconsidera as condições do escoamento, concentrando-se apenas na seleção do material mais resistente à sua

ação. Neste procedimento a cavitação é mantida, entretando, o período de manutenção ficará mais espaçado;

- Injeção de ar comprimido: esta medida é tomada especificamente para atenuarmos efeitos da cavitação e da formação de vórtice na entrada de tubos de sucção de turbinas. Ocorre um aumento localizado de pressão, enquanto o colchão de ar injetado protege a superfície contra o ataque erosivo.

### 3.2.5. Parâmetros de cavitação

A identificação da sensibilidade de máquinas e instalações à cavitação é determinada por parâmetros numéricos apoiados em desenvolvimentos experimentais.

No decorrer de estudos sobre cavitação foram criados dois parâmetros de aplicação específica. O parâmetro NPSH tem sua aplicação limitada a bombas, enquanto o número de cavitação ( $\sigma$ ), também conhecido como Número de Thoma, é aplicado a todos os demais casos. O valor de  $\sigma$  é encontrado através da equação 3.1.

$$\sigma = \frac{\text{NPSH}_r}{H} \quad (3.1)$$

No presente trabalho será tratado apenas do parâmetro NPSH.

### 3.2.6. NPSH (Net Positive Suction Head)

O NPSH foi definido no início do século, mantendo-se como referência geral. O NPSH corresponde ao valor da energia existente na flange de sucção da bomba, ou seja, corresponde à carga absoluta (positiva) total tomada no flange de entrada de uma bomba.

A obtenção experimental da curva NPSH em função da vazão para cada máquina deve ser feito a partir das condições impostas pelo escoamento. Esta curva é característica da máquina, podendo apenas ser alterada quando alguma característica

dimensional da mesma for alterada. A partir de experimentos, o NPSH é calculado por:

$$\text{NPSH} = \frac{P_s - P_v}{\rho g} + \frac{V_s^2}{2g} \quad (3.2)$$

Por outro lado, a máquina deve estar associada a uma instalação. A pressão na entrada da máquina varia de acordo com a instalação e, com isso o NPSH também varia. O NPSH determinado a partir da instalação é feito compondo as variáveis mostradas na Figura 3.10, sendo que a equação 3.3 expressa a bomba afogada e a equação 3.4 expressa a bomba não afogada.

$$\text{NPSH} = H_{\text{atm}} + H_s - \Delta H_s - H_v \quad (3.3)$$

$$\text{NPSH} = H_{\text{atm}} - H_s - \Delta H_s - H_v \quad (3.4)$$

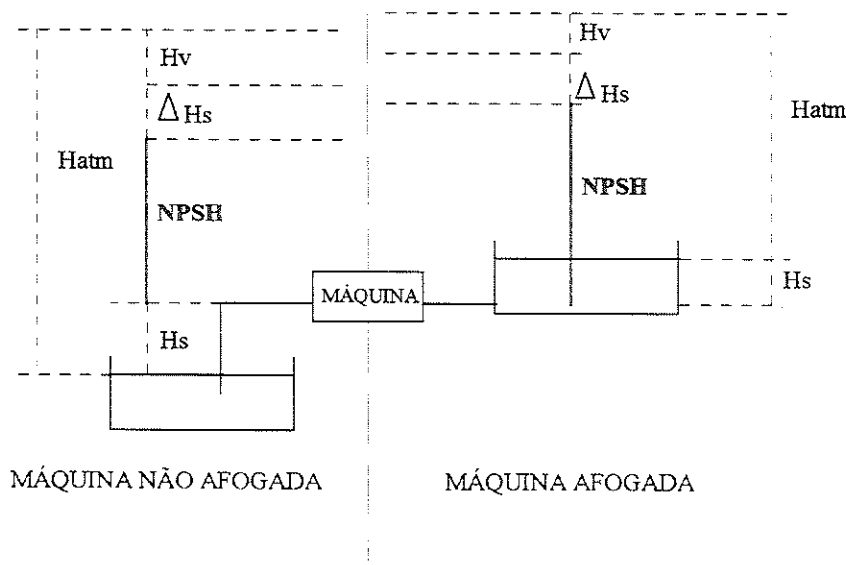


Figura 3.10: Determinação gráfica do NPSH

Portanto, a equação 3.2 permite a determinação do NPSH a partir das características de projeto da máquina, sendo função apenas da vazão que passa pela máquina. As equações 3.3 e 3.4 nos fornecem o NPSH a partir das características

construtivas da instalação, sendo função de muitas variáveis que participam da definição do escoamento, tais como, velocidade, diâmetro da tubulação, comprimento, etc...

Resumindo, a equação 3.2 fornece o NPSH requerido pela bomba ( $NPSH_r$ ), enquanto as equações 3.3 e 3.4 nos fornecem o NPSH disponível na instalação ( $NPSH_d$ ).

Sendo assim, a equação 3.2 pode ser expressa por:

$$NPSH_r = \frac{P_s - P_v}{\rho g} + \frac{V_s^2}{2g} \quad (3.5)$$

e as equações 3.3 e 3.4 são expressas, respectivamente, por:

$$NPSH_d = H_{atm} + H_s - \Delta H_s - H_v \quad (3.6)$$

$$NPSH_d = H_{atm} - H_s - \Delta H_s - H_v \quad (3.7)$$

Portanto o  $NPSH_r$  corresponde à carga absoluta (positiva) total disponível no flange de entrada da bomba, não podendo ser alterado, a menos que modificações dimensionais sejam realizadas na máquina, já o  $NPSH_d$  corresponde à carga absoluta total disponível no flange de entrada da máquina, podendo ser alterado a partir de um redimensionamento na instalação.

Ao compararmos o  $NPSH_r$  e o  $NPSH_d$ , podemos estabelecer critérios de análise de ocorrência de cavitação.

Se:

- i)  $NPSH_d < NPSH_r \rightarrow$  Ocorrerá cavitação
- ii)  $NPSH_d > NPSH_r \rightarrow$  Não ocorrerá cavitação
- iii)  $NPSH_d = NPSH_r \rightarrow$  Ocorrerá cavitação

Podemos afirmar, com certeza, que apenas a afirmação i) é verdadeira, pois em ii) a não ocorrência da cavitação irá depender de quanto o  $NPSH_d$  é maior com

relação ao  $NPSH_r$ . Para o caso iii) ocorre uma confusão com relação a sua interpretação, pois se trata do limite teórico de não cavitação, entretanto, é o ponto em que se dá início a cavitação.

É comum, em cálculos de projeto, por motivos de segurança, adicionar-se de 0,5 a 1,0 m.c.a., devido a possíveis oscilações de pressão, temperatura, etc...

Portanto, utiliza-se, em cálculos de projeto, a equação 3.8, para garantia da não ocorrência da cavitação.

$$NPSH_d = NPSH_r + 1,0 \text{ m.c.a.} \quad (3.8)$$

### 3.3 Gases dissolvidos na água

A água quando em contato com o ar, em condições normais de pressão e temperatura (15 °C e 760 mm Hg), contém gases em dissolução, os quais ocupam até 1,8 % do volume total.

Quando a pressão do ambiente diminui, parte dos gases dissolvidos vem a se libertar, provocando uma certa agitação e formação de bolhas, concorrendo para que as seções de escoamento e descarga venham a diminuir, alterando as condições hidrodinâmicas e, conseqüentemente, o rendimento hidráulico da bomba.

Quando ocorre simultaneamente a cavitação e a liberação de ar dissolvido, o efeito da primeira se torna menor, devido ao ar libertado fazer papel de “amortecedor” do choque das partículas.

Para a quantidade de ar dissolvido na água em torno de 10 % do valor de saturação a cavitação tem início ao se atingir a pressão de vapor do líquido. Para taxas muito elevadas, a pressão com a qual tem início a cavitação pode tornar-se superior a pressão de vapor, devido a formação de bolhas de gás de grandes dimensões, relativas as bolhas de cavitação, ocasionando um amortecimento na implosão das bolhas de vapor. É importante salientar que a presença de gases do ar presente na água funciona como uma fonte de núcleos de cavitação, estimulando o início do fenômeno, já quando a água possui elevado teor de ar, a velocidade de implosão diminui, minimizando o efeito de cavitação no material.

Para que seja realizada a vaporização é necessário a retirada de calor do núcleo das bolhas, o que ocasiona abaixamento da temperatura do gás no interior da bolha e do líquido adjacente. Esse processo é de pouca importância para água fria, mas é relevante quando se trata de cavitação para temperaturas elevadas e líquidos que não água. Os efeitos termodinâmicos vêm a retardar os efeitos de crescimento e implosão da bolha. Este é o motivo pelo qual a exceção de metais líquidos, a água fria é um dos líquidos que apresentam maiores problemas com relação a cavitação.

### 3.4 Ensaios de cavitação descrito por normas técnicas

As normas mais comumente utilizadas para ensaios de cavitação em bombas centrífugas são:

- The American Society of Mechanical Engineers (ASME) PTC - 8.2 - 1990
- International Organization for Standardization - ISO/DIS2548 - 1972
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - MB - 1032 - 1989

Segundo a norma ABNT, a detecção de cavitação pode ser realizada verificando-se a queda de pressão na bomba, sendo que neste caso a pressão de entrada deverá ser maior ou igual à pressão de entrada limite da bomba para que não ocorra o fenômeno. Pode-se, também, realizar o ensaio investigando-se o valor de  $NPSH_r$  pela mesma, sendo o valor de NPSH reduzido até que sejam notados efeitos mensuráveis. O ensaio utilizando-se do NPSH corresponde a uma investigação mais completa das características da cavitação.

No teste de NPSH determina-se o valor do parâmetro característico da cavitação na bomba que causa uma redução percentual prefixada no valor da altura total de elevação, ou no rendimento, para dada vazão, ou alternativamente, no valor da vazão ou do rendimento para dada altura total de elevação.

As três normas citadas tratam da detecção da cavitação de forma parecida, sendo mostrado a seguir.

De acordo com as normas ABNT e ISO, o critério de aceitação a ser utilizado seria o de queda máxima na altura total de elevação ou no rendimento da bomba de  $3\% + X\%$ , mantendo-se a altura total de elevação constante.

O valor de X é dado por:



$$X = \frac{K}{2} \quad (3.9)$$

onde K é adimensional e depende da altura total de elevação, rotação da bomba, vazão e aceleração da gravidade, sendo expresso por:

$$K = \frac{2\pi\omega\sqrt{q}}{\sqrt[4]{(gH)^3}} \quad (3.10)$$

A norma ASME, por sua vez, leva em consideração apenas a variação da altura total de elevação de 3%.

Nas três normas citadas existem 3 métodos pelos quais pode ser realizado o ensaio de cavitação, os quais serão descritos a seguir:

- **Método 1:** a bomba é instalada em circuito fechado, de tal maneira que pode-se variar a pressão na entrada da mesma ou a pressão de vapor do líquido (através da variação da temperatura) sem se alterar a altura total de elevação da bomba ou a vazão.

Neste método podem ser necessários, além de registros especiais, de dispositivos para resfriamento ou aquecimento da água no circuito (para manter a temperatura constante) e de um tanque desaerador.

A Figura 3.11 mostra um esquema simplificado deste método.

- **Método 2:** Neste método (Figura 3.12) é instalado uma bomba que succiona água, através de uma tubulação de sucção sem obstruções, de um reservatório que pode-se alterar o nível da superfície de água e, conseqüentemente, ajustar o valor da pressão na entrada da bomba ou o valor do NPSH.

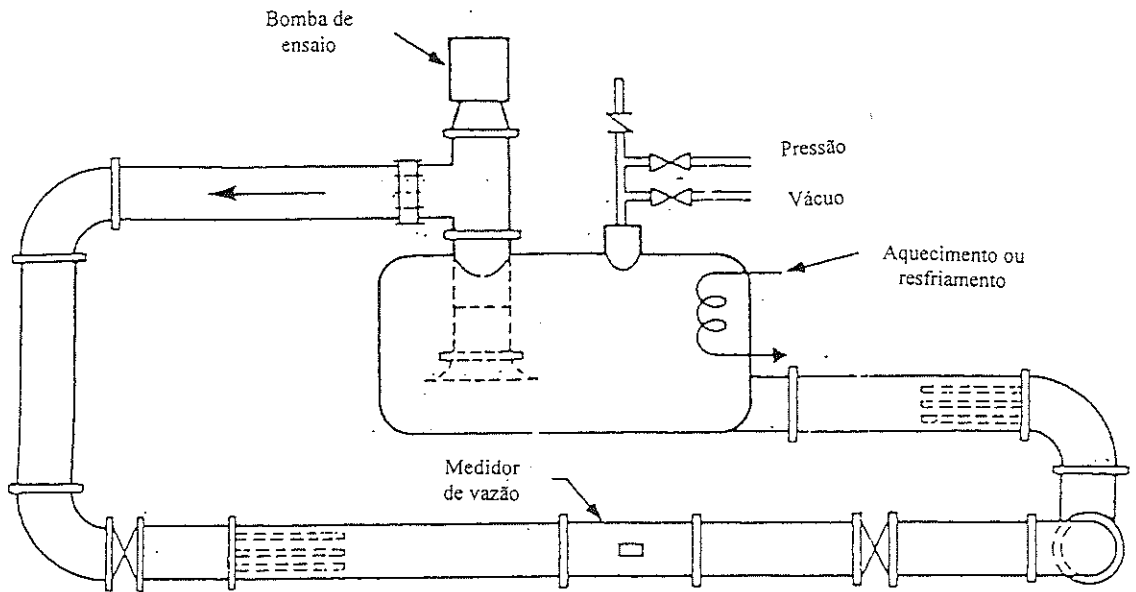


Figura 3.11: Sistema para determinação da cavitação utilizando-se um circuito fechado

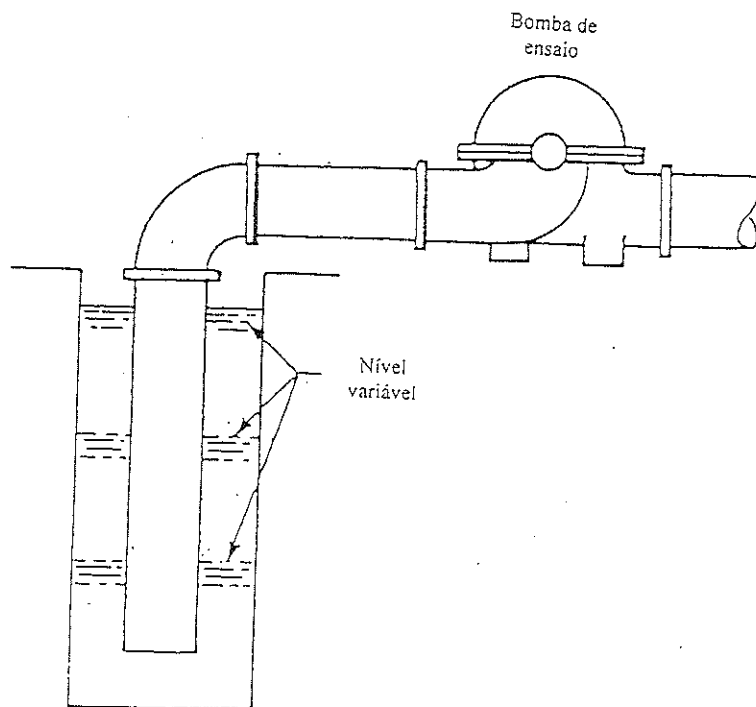


Figura 3.12: Sistema para determinação da cavitação através da variação do nível d'água

- **Método 3:** Este método (Figura 3.13) consiste na variação da pressão da água que entra na bomba através de um registro, instalado no nível mais baixo possível da tubulação de entrada.

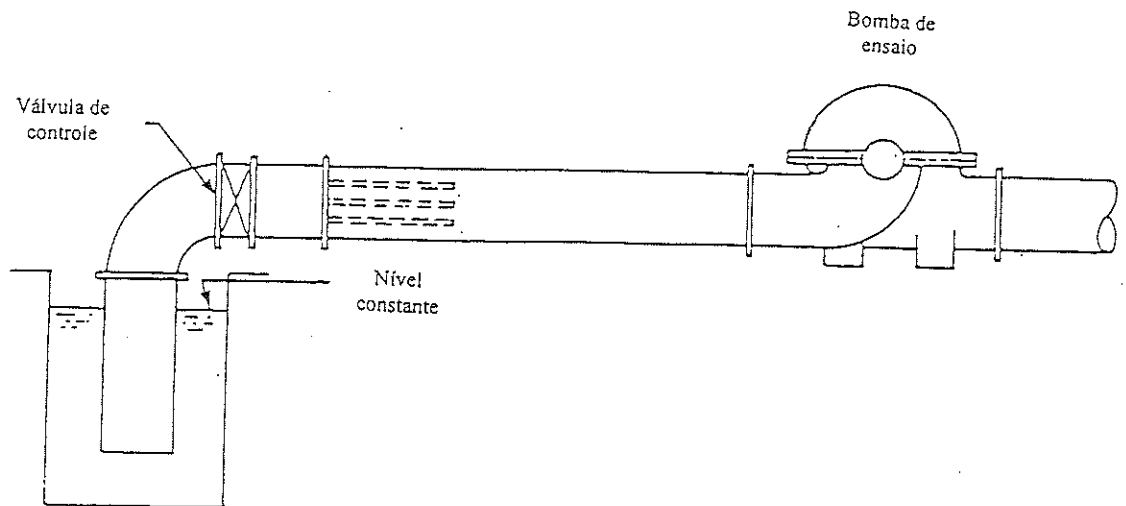


Figura 3.13: Sistema para determinação da cavitação com regulagem de registro de entrada

Segundo as normas ABNT e ISO, para os três métodos descritos, os limites de erro considerado é de 5,3 % ou 0,2 m, o que for maior, considerando-se que as medidas sejam feitas com mamômetros de coluna líquida.

A norma ASME recomenda que para se realizar a determinação da curva  $H \times NPSH_d$ , devam ser tomados, no mínimo, oito pontos experimentais, sendo que destes, três pontos devam pertencer ao trecho linear da curva e que no mínimo quatro pontos sejam para definir a forma da curva entre o trecho linear e o último ponto.

### 3.5. Equações utilizadas nos cálculos

Tomando-se por base a Figura 3.14, temos uma bomba centrífuga na qual a soma das energias de sua sucção pode ser representada por:

$$H_s = \frac{P_s}{\gamma_{H_2O}} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_s \quad (3.11)$$

Por sua vez, a soma das energias de recalque pode ser dada por:

$$H_R = \frac{P_R}{\gamma_{H_2O}} + \frac{V_R^2}{2g} + Z_R \quad (3.12)$$

A diferença entre as energias de recalque e sucção nos dá:

$$H_R - H_s = \frac{P_R}{\gamma_{H_2O}} + \frac{V_R^2}{2g} + Z_R - \frac{P_s}{\gamma_{H_2O}} - \frac{V_s^2}{2g} - Z_s \quad (3.13)$$

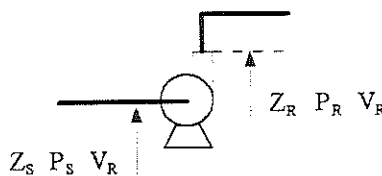


Figura 3.14: Figura representativa ilustrando os pontos de recalque e sucção

Através da Figura 3.15 podemos representar a Equação da Estática para o caso da bomba centrífuga.

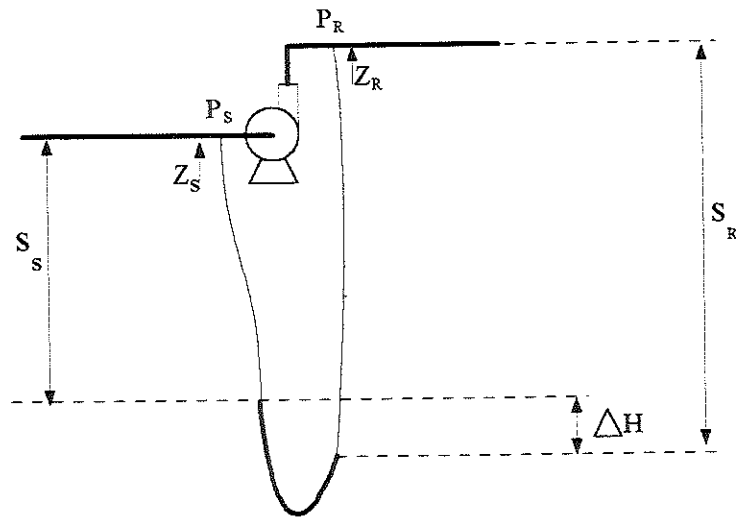


Figura 3.15: Figura representativa para obtenção da Equação da Estática

Temos, então, que:

$$P_S + S_S \gamma_{H_2O} + \gamma_{Hg} \Delta H = P_R + S_R \gamma_{H_2O} \quad (3.14)$$

Isolando  $P_R$ , temos:

$$P_S + S_S \gamma_{H_2O} + \gamma_{Hg} \Delta H - S_R \gamma_{H_2O} = P_R \quad (3.15)$$

Reagrupando a equação 3.15, temos:

$$P_S + (S_S - S_R) \gamma_{H_2O} + \gamma_{Hg} \Delta H = P_R \quad (3.16)$$

Pela Figura 3.15, podemos demonstrar que:

$$Z_R - Z_S = S_R - (S_S + \Delta H) \quad (3.17)$$

$$Z_R - Z_S + \Delta H = S_R - S_S \quad (3.18)$$

ou, ainda,

$$S_S - S_R = Z_S - Z_R - \Delta H \quad (3.19)$$

Ao substituírmos a equação (3.19) na equação (3.16), obtemos:

$$P_S + (Z_S - Z_R - \Delta H)\gamma_{H_2O} + \gamma_{Hg}\Delta H = P_R \quad (3.20)$$

Dividindo a equação (3.20) por  $\gamma_{H_2O}$ , temos:

$$\frac{P_S}{\gamma_{H_2O}} + Z_S - \frac{P_R}{\gamma_{H_2O}} - Z_R - \Delta H + \frac{\gamma_{Hg}}{\gamma_{H_2O}}\Delta H = 0 \quad (3.21)$$

Ao reagruparmos a equação (3.21), encontramos:

$$\left(\frac{P_S}{\gamma_{H_2O}} + Z_S\right) - \left(\frac{P_R}{\gamma_{H_2O}} + Z_R\right) + \Delta H\left(-1 + \frac{\gamma_{Hg}}{\gamma_{H_2O}}\right) = 0 \quad (3.22)$$

que pode ser representa por:

$$\left(\frac{P_S}{\gamma_{H_2O}} + Z_S\right) - \left(\frac{P_R}{\gamma_{H_2O}} + Z_R\right) = -\Delta H\left(-1 + \frac{\gamma_{Hg}}{\gamma_{H_2O}}\right) \quad (3.23)$$

Da equação (3.13) podemos obter:

$$H_R - H_S = \left(\frac{P_R}{\gamma_{H_2O}} + Z_R\right) - \left(\frac{P_S}{\gamma_{H_2O}} + Z_S\right) + \frac{V_R^2}{2g} - \frac{V_S^2}{2g} \quad (3.24)$$

Ao substituírmos a equação (3.23) na equação (3.24), encontramos:

$$H_R - H_S = -\left(-\Delta H\left(-1 + \frac{\gamma_{Hg}}{\gamma_{H_2O}}\right)\right) + \frac{V_R^2}{2g} - \frac{V_S^2}{2g} \quad (3.25)$$

A qual pode ser representada por:

$$H_R - H_S = \Delta H\left(-1 + \frac{\gamma_{Hg}}{\gamma_{H_2O}}\right) + \frac{V_R^2}{2g} - \frac{V_S^2}{2g} \quad (3.26)$$

Como citado anteriormente (no item 3.2.6. deste trabalho), o valor de NPSH pode ser dado por:

$$NPSH = \frac{P_{atm}}{\gamma_{H_2O}} - \frac{P_{vapor}}{\gamma_{H_2O}} + \frac{P_S}{\gamma_{H_2O}} + \frac{V_S^2}{2g} \quad (3.27)$$

De uma maneira geral, quando em um fenômeno físico são envolvidas  $n$  grandezas  $G_1, G_2, \dots, G_n$ , os coeficientes adimensionais podem ser obtidos através do Teorema dos Coeficientes Adimensionais, também conhecido como Teorema de Buckingham ou Teorema dos  $\pi$ .

A análise dimensional das bombas hidráulicas é feita a partir de grandezas físicas dimensionais tradicionais estabelecidas no uso das máquinas hidráulicas no decorrer do tempo.

As grandezas físicas relacionadas ao problema são:

q: vazão	[m <sup>3</sup> /h]
$\Delta P$ : pressão	[Kgf/m <sup>2</sup> ] ou [N/m <sup>2</sup> ]
$\rho$ : massa específica	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$ : viscosidade	[N s/m <sup>2</sup> ]
n: rotação	[rpm]
r: raio do rotor	[m]
$\eta$ : rendimento	[adimensional]

Quando se aplica o Teorema de Buckingham à função que liga sete variáveis físicas, determinam-se quatro variáveis adimensionais, que são dadas por:

- Coeficiente de pressão:

$$\Psi = \frac{\Delta P}{\rho(\omega r)^2} \quad (3.28)$$

- Coeficiente de vazão:

$$\phi = \frac{q}{\omega r^3} \quad (3.29)$$

- Coeficiente de regime ou Número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{\omega r^2}{\nu} \quad (3.30)$$

- Rendimento:

$$\eta = \frac{\gamma h q}{Pot} \quad (3.31)$$

Como este trabalho trata do estudo de cavitação em bombas centrífugas, torna-se interessante definir um coeficiente denominado coeficiente de NPSH ( $C_{NPSH}$ ).

Portanto, através da equação (3.28), temos:



$$C_{NPSH} = \frac{\frac{\Delta P}{\gamma_{H_2O}}}{\frac{\rho}{\gamma_{H_2O}} (\omega r)^2} \quad (3.32)$$

Como sabemos, a aceleração da gravidade é dada por:

$$g = \frac{\rho}{\gamma_{H_2O}} \quad (3.33)$$

Substituindo em (3.32), temos:

$$C_{NPSH} = \frac{g \Delta P}{(\omega r)^2} \quad (3.34)$$

e finalmente, substituindo a pressão por NPSH, chegamos a expressão:

$$C_{NPSH} = \frac{g NPSH}{(\omega r)^2} \quad (3.35)$$

Algumas das equações até aqui apresentadas serão utilizadas nos cálculos para obtenção dos resultados deste trabalho.

A seguir, no Capítulo 4, será comentado sobre o equipamento utilizado e a maneira com que se trabalhou com o mesmo

## 4. Metodologia

### 4.1 Banco de Ensaio

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica e Saneamento do SHS - EESC - USP - São Carlos. O banco de ensaios utilizado para a realização deste trabalho apresentava, basicamente, dois reservatórios de água, três bombas centrífugas, sendo que duas bombas trabalhavam em condições normais de operação (bombas A e C, com sentido do fluxo de água normal) e uma bomba invertida (bomba B - com sentido do fluxo de água invertido) ou seja, o fluxo de água entrava pelo recalque da bomba e saía pela sucção da mesma.

Utilizou-se, também, um medidor de vazão eletromagnético e dois quadros de manômetros.

A Figura 4.1 mostra o esquema simplificado do banco de ensaios utilizado.

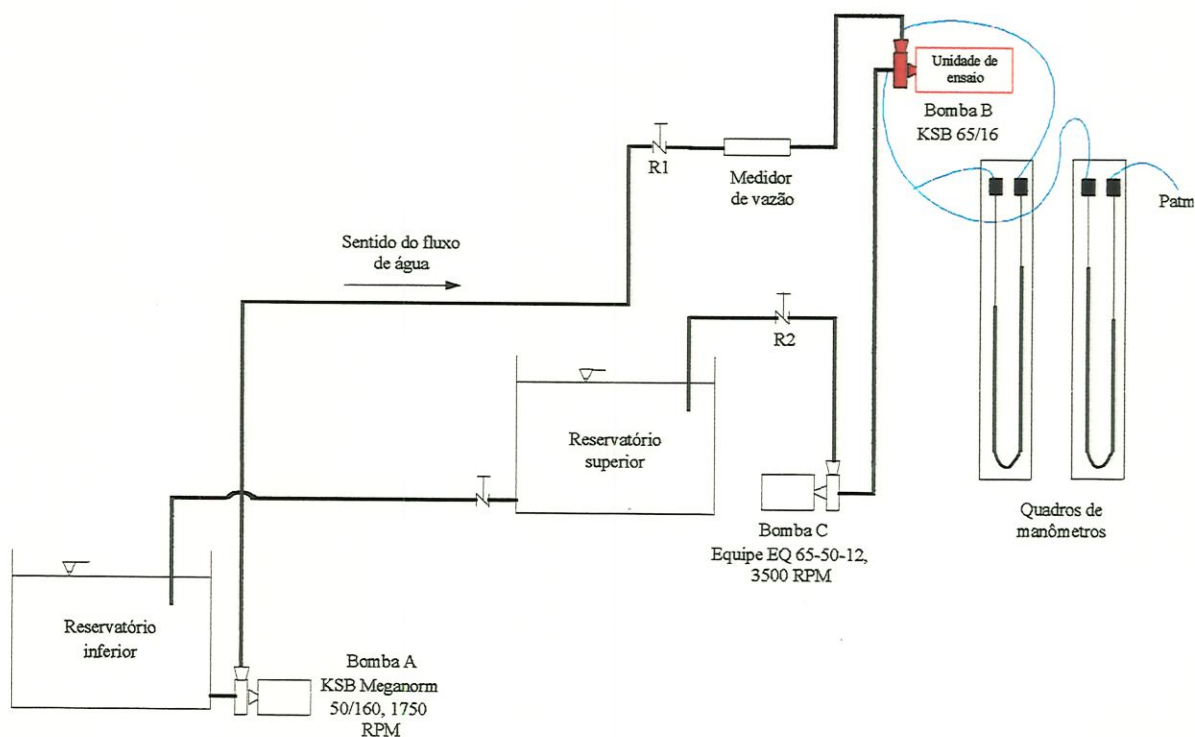


Figura 4.1 : Representação simplificada do banco de ensaios utilizado

O funcionamento do banco de ensaios consistia, basicamente, na retirada de água do reservatório inferior e injeção, pela bomba A (modelo KSB Meganorm 50/160, 1750 RPM), no recalque da bomba invertida (bomba B - Modelo KSB 65/16) esta, por sua vez, possuía a jusante a bomba C (Modelo Equipe EQ 65-50-12), a qual succionava o fluido e o enviava para o reservatório superior.

É bom salientar que tanto o reservatório superior como o inferior permaneceram com seus níveis de água constante durante todo o experimento.

O medidor de vazão eletromagnético estava posicionado entre as bombas A e B, já os manômetros estavam ligados ao recalque e a sucção da bomba invertida.

Utilizou-se, também, um tacômetro para se medir a rotação da bomba invertida.

Durante a realização dos experimentos, notou-se a ocorrência de oscilações no sistema, o que pode ser observado pela variação constante das grandezas. Sendo assim, os valores experimentalmente obtidos são valores médios, levando-se em conta a variação dos mesmos.

A seguir está relacionada a incerteza dos instrumentos de medida utilizados neste trabalho:

- piezômetros e manômetro diferencial de mercúrio:  $\pm 0,5$  mm
- medidor eletromagnético de vazão:  $< 1$  % (de acordo com fabricante)
- Tacômetro:  $< 1$  % (de acordo com fabricante)

## 4.2 Procedimento Experimental

O experimento consiste na obtenção de grandezas para valores constantes de vazão e rotação da bomba invertida.

Inicialmente ligava-se os equipamentos e regulava-se a rotação da bomba invertida (bomba B) através de um variador de frequência.

Para uma determinada rotação mantinha-se o registro R1 totalmente aberto e fechava-se o registro R2 até obter-se a vazão desejada. Deixava-se, então, o equipamento nessas condições por cerca de 5 minutos para observar se os

equipamentos estavam estáveis (rotação constante, vazão constante, piezômetros estabilizados, etc...), podendo-se, então, iniciar a obtenção das medidas.

Passava-se a realizar as mudanças das condições operacionais, através do fechamento do registro R1 e abertura do registro R2, mantendo-se constante a vazão e rotação da bomba. Para cada mudança de abertura/fechamento de válvulas realizava-se a coleta das medidas.

Este procedimento era realizado até que se observava que a bomba estava em pleno processo de cavitação, o qual é notado através do aparecimento de bolhas no reservatório superior e pela instabilidade do sistema (tubulações trepidando, piezômetro variando muito, ruído típico, etc...).

É também importante salientar que as regulagens a serem aplicadas nos registros R1 e R2 devem ser feitas com muito cuidado e critério para se ter certeza que está se caminhando para a obtenção do ponto de cavitação, pois variações bruscas podem ocasionar a não observação do início da mesma.

Entre um experimento e outro é inevitável que seja feita a retirada de possíveis bolhas de ar nas tubulações/piezômetros formados devido a cavitação do experimento anterior. Esta deve ser realizada através da drenagem dos equipamentos por um intervalo de tempo próximo a vinte minutos, com posterior observação da não existência de bolhas de ar em tubulações dos piezômetros.

#### **4.3 Detecção do ponto de cavitação**

Como citado anteriormente, as normas ISO e ABNT dizem que a cavitação é determinada quando a altura total de elevação decresce em  $3\%+X\%$ , já a norma ASME diz que o decrescimento deve ser de 3%.

Para qualquer uma das normas empregadas, deve-se inicialmente realizar os cálculos para obtenção dos resultados ( $H$ ,  $P_s/\gamma$ , NPSH). De posse destes resultados, deve-se fazer uma análise para se saber qual valor de  $H$  será utilizado como  $H_m$ , valor este que servirá para nos indicar o decrescimento procurado ( $3\%+X\%$  ou 3%) da altura total de elevação.

Na Figura 4.2 está apresentado, de forma simplificada, o comportamento teórico da função  $H/H_m \times NPSH_d$ , a qual apresenta um trecho linear na curva que precede o decréscimo progressivo da mesma.

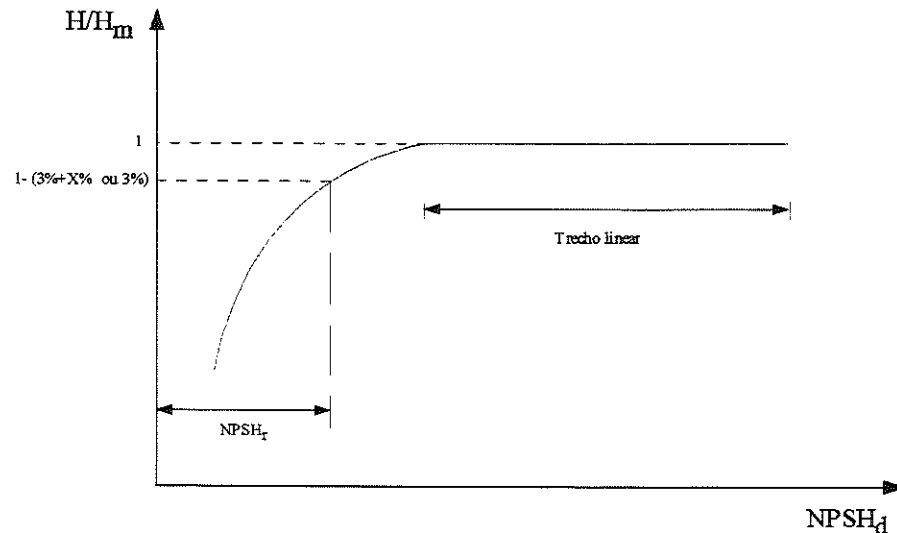


Figura 4.2: Detecção do ponto de cavitação

Caso se consiga, durante o experimento, um decréscimo suave da curva, pode-se até se obter o valor exato do ponto de cavitação. Caso isso não venha a ocorrer e se obtenha pontos anteriores e posteriores ao início da mesma, pode-se adotar como procedimento, para a obtenção dos resultados, a utilização de métodos gráficos.

O método mais simples seria o cálculo, através de interpolação linear, entre os pontos imediatamente anterior e imediatamente posterior ao valor de  $H/H_m$  onde se dá o início da cavitação.

O segundo método seria a obtenção de um polinômio que se ajuste aos pontos pertencentes ao trecho curvilíneo do gráfico, podendo-se, então, obter o ponto de início da cavitação. Convém salientar que deve-se testar polinômios de vários graus até se obter um que represente a curva da melhor maneira possível.

É interessante que sejam realizados, para termos de comparação, a obtenção de valores para os dois métodos descritos para que se possa decidir qual será utilizado no presente trabalho.

## 5. Resultados

Neste item serão apresentados os testes realizados neste trabalho, os quais consistiram na obtenção de curvas  $H/H_m$  em função do NPSH, as quais estão expressando a variação da altura manométrica, mantendo-se fixa a rotação e vazão da bomba invertida.

Os resultados experimentais expressos neste trabalho mostram que trabalhou-se com rotações da bomba invertida de 1000 RPM e 1200 RPM pois para estas rotações o sistema em teste apresentou-se com maior estabilidade, propiciando uma maior facilidade de obtenção de dados experimentais, já que para as rotações de 1300 RPM e 1400 RPM o equipamento tornava-se instável, ocasionando a formação de bolhas de ar e instabilidade nos manômetros.

Para as rotações citadas, realizou-se os testes para vazões de  $-6 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$ . Para vazões superiores a  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  o sistema entrava em processo de cavitação ao se ligar a bomba invertida, não permitindo, assim, a obtenção do ponto de início da mesma. A vazão máxima de água que poderia passar pelo sistema seria de  $-30 \text{ m}^3/\text{h}$ , isso se a bomba invertida permanecesse desligada, já com esta ligada não obteve-se vazão superior a  $-24 \text{ m}^3/\text{h}$  (para a rotação de 1000 RPM).

No Anexo A deste trabalho, estão expressos os resultados obtidos experimentalmente, os quais são chamados de  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$ ,  $z_4$  e  $z_4'$ .

Os pontos  $z_1$  e  $z_3$  tomavam as medidas de pressão na sucção da bomba invertida (ver Figura 5.1); já no ponto  $z_2$  tomava-se a medida de pressão no recalque da mesma bomba.

O ponto  $z_4$  seria a tomada de pressão na atmosfera, entretanto, devido ao fato de existir uma coluna de água sobre o mercúrio, de tamanho  $z_4' - z_4$ , leu-se, portanto, os valores de  $z_4'$  e  $z_4$ .

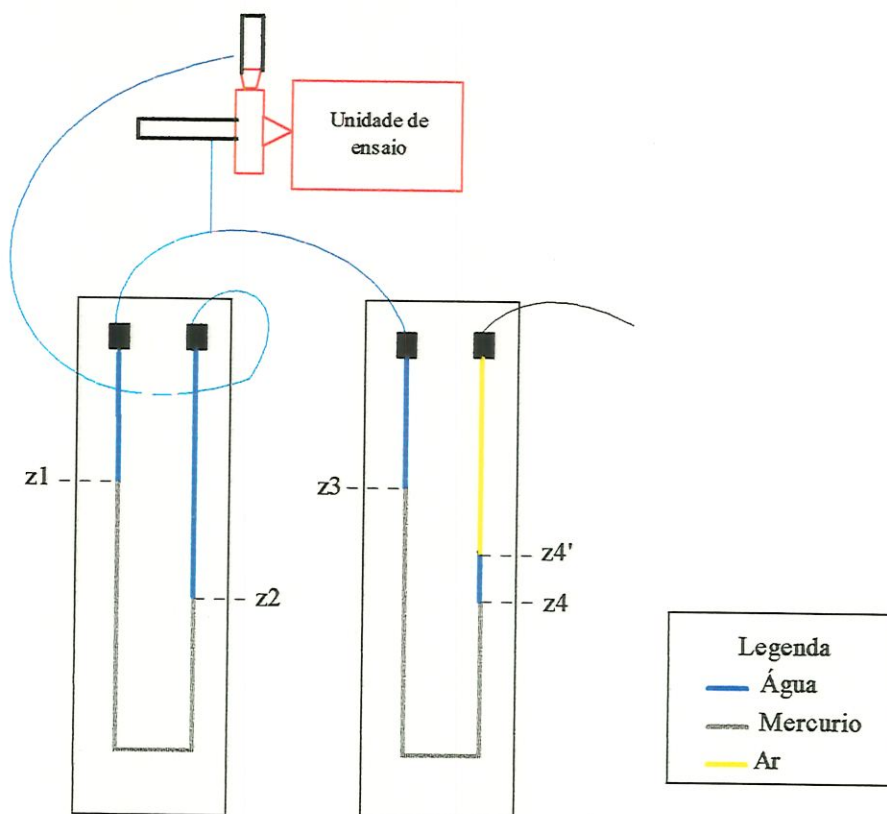


Figura 5.1: Esquema dos manômetros utilizados

Durante os experimentos realizou-se as medidas de pressão atmosférica através de um barômetro e notou-se que houve pouca variação de seu valor durante os experimentos. Adotou-se, então, para a realização de cálculos o valor médio obtido ao longo de cada experimento, os quais estão expressos no Anexo A.

Como a pressão de vapor da água varia de acordo com a temperatura, realizou-se a medida desta para todos os experimentos; utilizou-se para isso de um termômetro de mercúrio que media a temperatura da água do reservatório superior, após passar pela bomba invertida. De posse deste valor obteve-se, em literatura, o valor da pressão de vapor do líquido utilizado nos cálculos.

Ao se regular a vazão para cada experimento, notou-se que esta praticamente permanecia constante ao longo do teste, tendo variações muito pequenas (aproximadamente 0,2 %), as quais foram desprezadas e adotados os valores nominais da vazão para cada teste.

A seguir serão apresentadas algumas grandezas também utilizadas nos cálculos:

- Diâmetro da tubulação de recalque: 65 mm
- Diâmetro da tubulação de sucção: 78 mm
- Medida entre o centro do eixo da bomba invertida e o zero dos manômetros de coluna líquida utilizados ( $Z_s$ ): 3,727 m
- Diâmetro do rotor: 160 mm
- Aceleração da gravidade:  $9,81 \text{ m/s}^2$

Após realizada as coletas de dados, traçou-se, inicialmente, os gráficos de  $\text{NPSH}_d$  em função da altura total de elevação. Os ensaios foram realizados com vazão constante, e ao se reduzir a pressão da água no recalque da bomba invertida vê-se que o trecho inicialmente constante tende a decrescer.

Observou-se, em alguns experimentos, que o trecho horizontal não se constitui de uma linha horizontal única, mas de várias linhas horizontais bastante próximas, o que pode vir a causar dúvida de qual valor se deve adotar como referência ( $H_m$ ), pois estas variações podem ocasionar erros na detecção da cavitação.

Adotou-se, como critério padrão para todos os experimentos, utilizar como valor de referência o valor obtido do trecho linear com maior número de pontos, ou seja, o trecho linear que se apresentou estável para uma faixa mais ampla de NPSH. Um outro modo com o qual se poderia trabalhar seria com a obtenção de um ponto médio para  $H_m$ , mas este procedimento foi descartado.

Para se obter o ponto inicial de cavitação da bomba utilizou-se de metodologia apresentada pela norma ASME, a qual cita que a cavitação se torna significativa quando a altura manométrica varia em 3 %, ou seja,  $\frac{H}{H_m} = 0,97$ .

Durante os testes foram coletados os dados experimentais que após seriam processados, e, notou-se, que nem sempre foi possível a obtenção exata do ponto de



referência de 3 % (ou seja,  $\frac{H}{H_m} = 0,97$ ), sendo necessário a obtenção dos pontos através de métodos gráficos.

Fez-se inicialmente a interpolação linear entre o primeiro valor de  $H/H_m$  imediatamente menor que 0,97 e o primeiro valor imediatamente maior que 0,97 e comparou-se este valor com os resultados obtidos através de polinômios representativo dos valores próximos ao ponto de cavitação e notou-se que os resultados obtidos não apresentavam diferença significativa com relação a interpolação linear. Adotou-se então o método de interpolação linear como padrão para obtenção dos 3% de queda da altura total de elevação pois a obtenção de resultados pelo método linear é muito mais simples e rápida.

Como ilustração, vemos que para o teste representado pela Figura 5.5 (Teste 4), o qual foi realizado com rotação da bomba invertida de 1000 RPM e vazão de fluxo de água de  $-9 \text{ m}^3/\text{h}$ , o valor de NPSH para  $\frac{H}{H_m} = 0,97$  corresponde a 3,66 quando se utiliza o método de interpolação linear, já, ao se utilizar o método de polinômio, levando-se em conta apenas os cinco últimos pontos obtidos, encontrou-se um polinômio representativo deste trecho de curva com grau 4 e coeficiente de correlação 1 e, através de resolução da equação obtida vemos que o valor de NPSH para  $\frac{H}{H_m} = 0,97$  encontrado é de 3,60, ou seja, os valores obtidos se apresentam bastante próximos.

Nas figuras demonstradas a seguir estão expressos os resultados encontrados após o tratamento dos dados obtidos experimentalmente, sendo que tais figuras têm seus dados encontrados no Anexo B (ver número do teste). É bom salientar que os resultados deste anexo foram obtidos através de utilização de planilha eletrônica.

Todos os testes para uma mesma rotação e vazão foram realizados por no mínimo duas vezes e em momentos diferentes para se observar a repetibilidade dos resultados obtidos.



⇒ Curvas obtidas para a rotação de 1000 RPM:

a) Vazão de  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ :

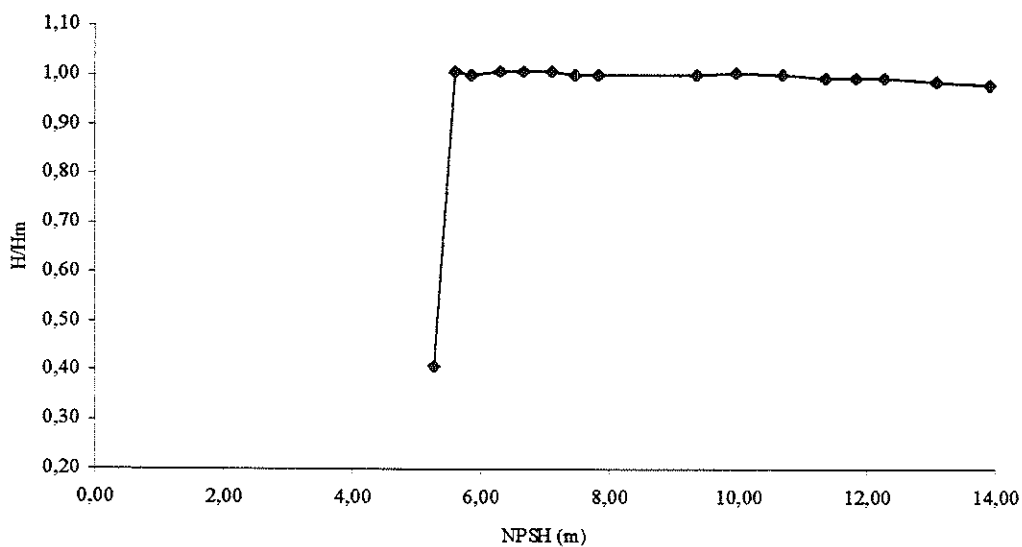


Figura 5.2: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1000 RPM (Teste 1)

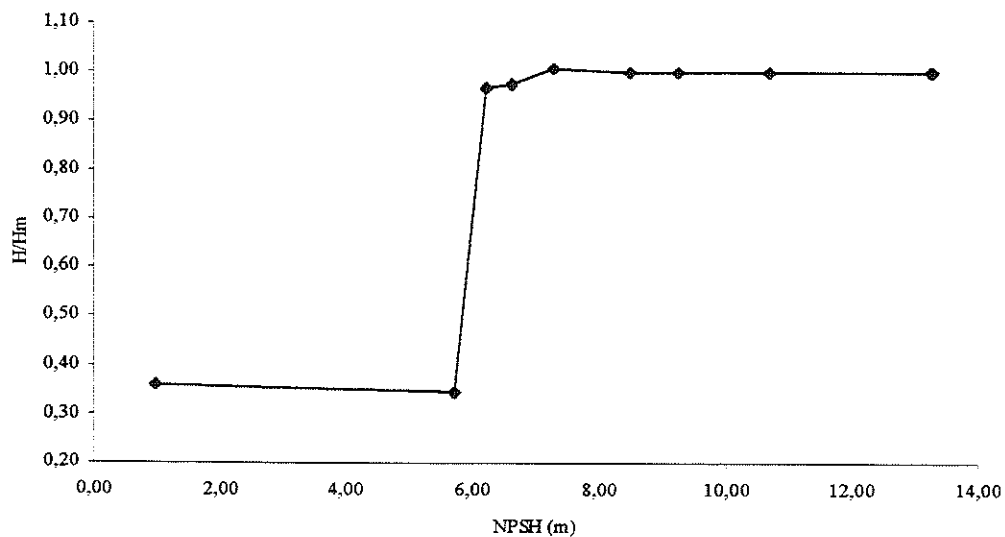


Figura 5.3: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1000 RPM (Teste 2)

b) Vazão de  $9 \text{ m}^3/\text{h}$ :

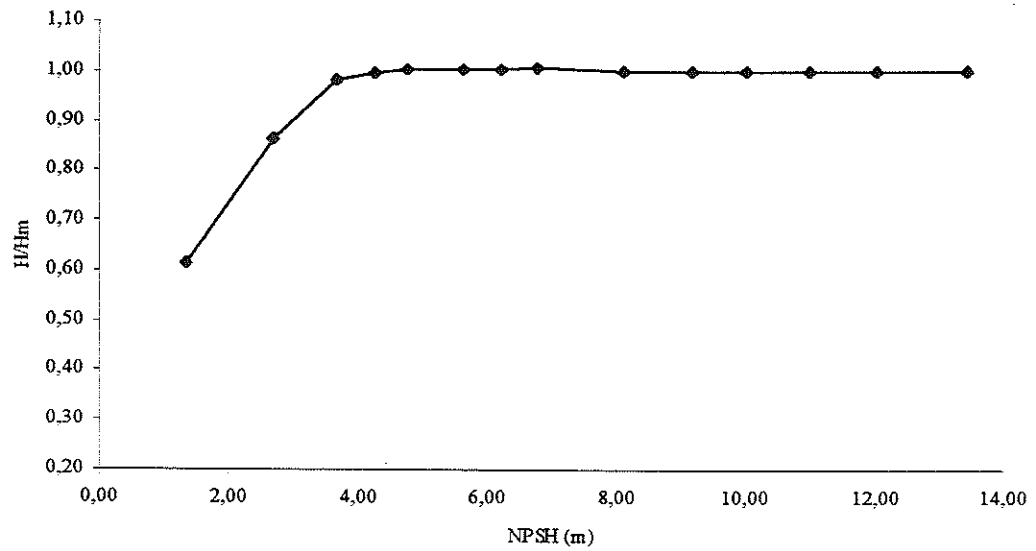


Figura 5.4: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $9 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de  $1000 \text{ RPM}$  (Teste 3)

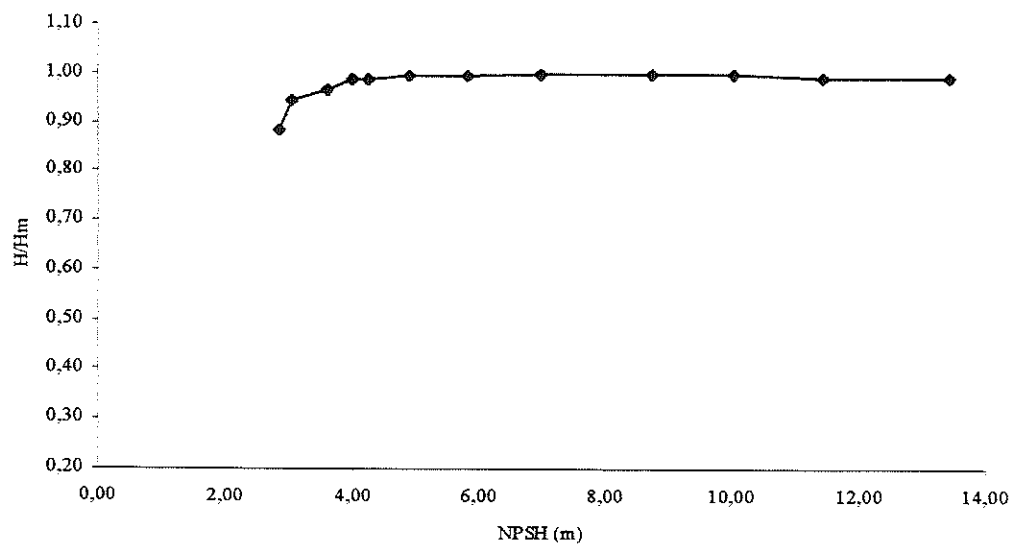


Figura 5.5: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $9 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de  $1000 \text{ RPM}$  (Teste 4)

c) Vazão de  $12 \text{ m}^3/\text{h}$ :

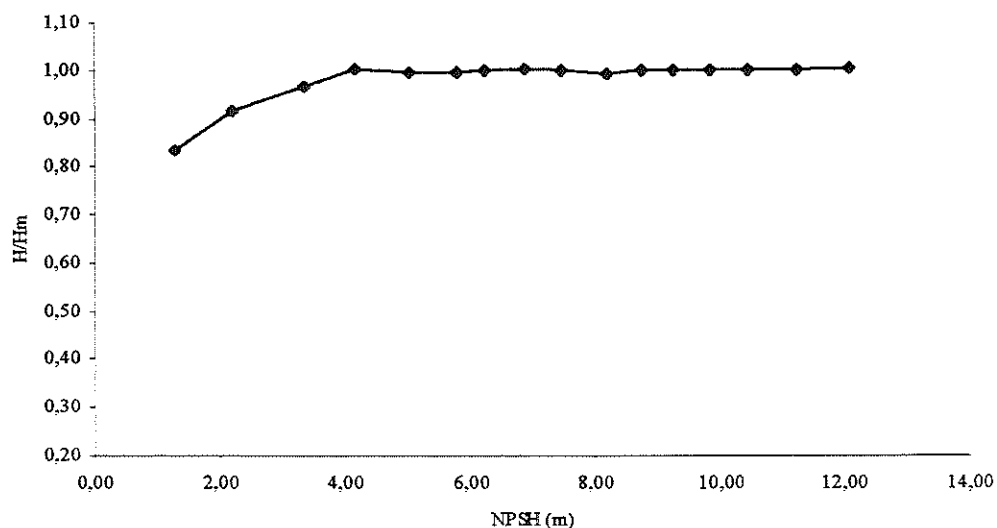


Figura 5.6: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1000 RPM (Teste 5)

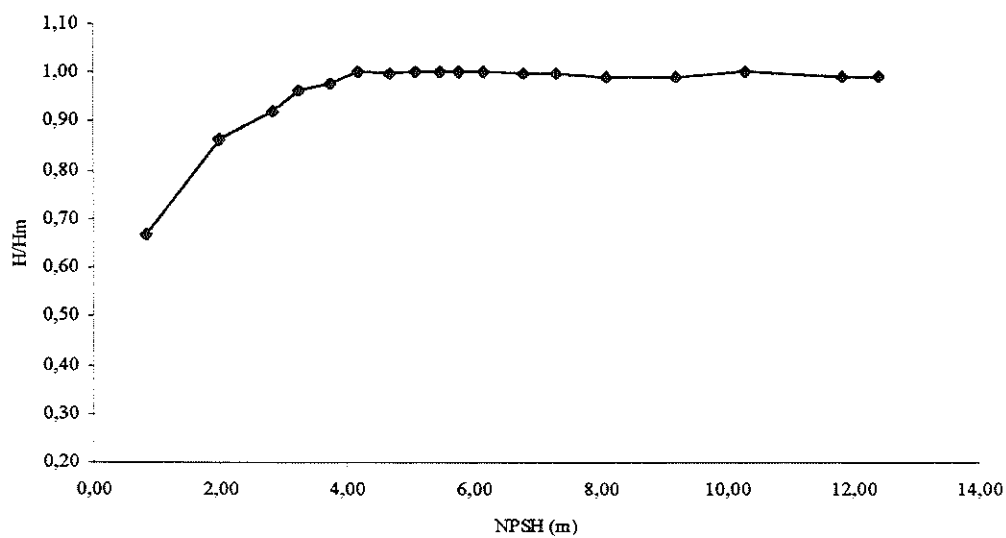


Figura 5.7: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1000 RPM (Teste 6)

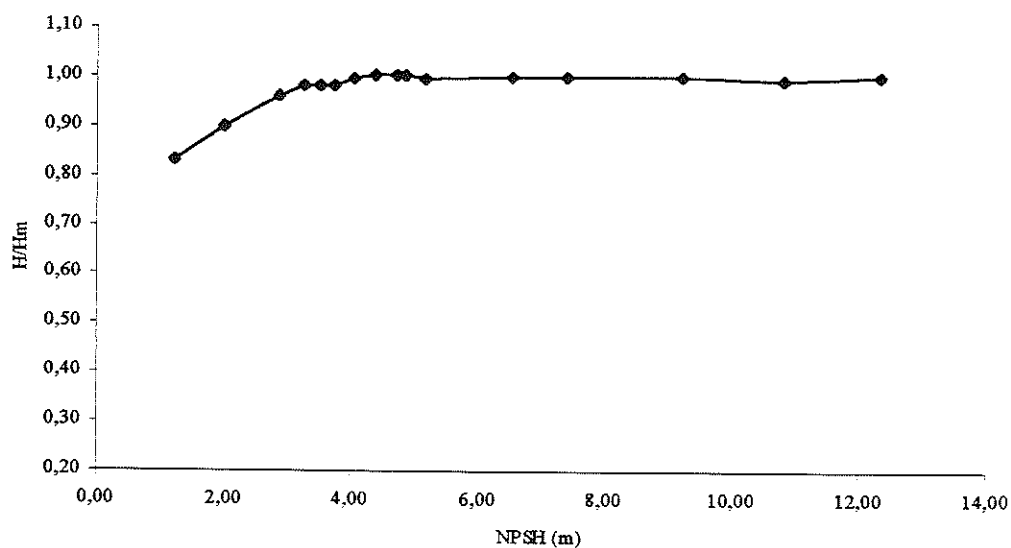


Figura 5.8: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1000 RPM (Teste 7)

*d) Vazão de  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ :*

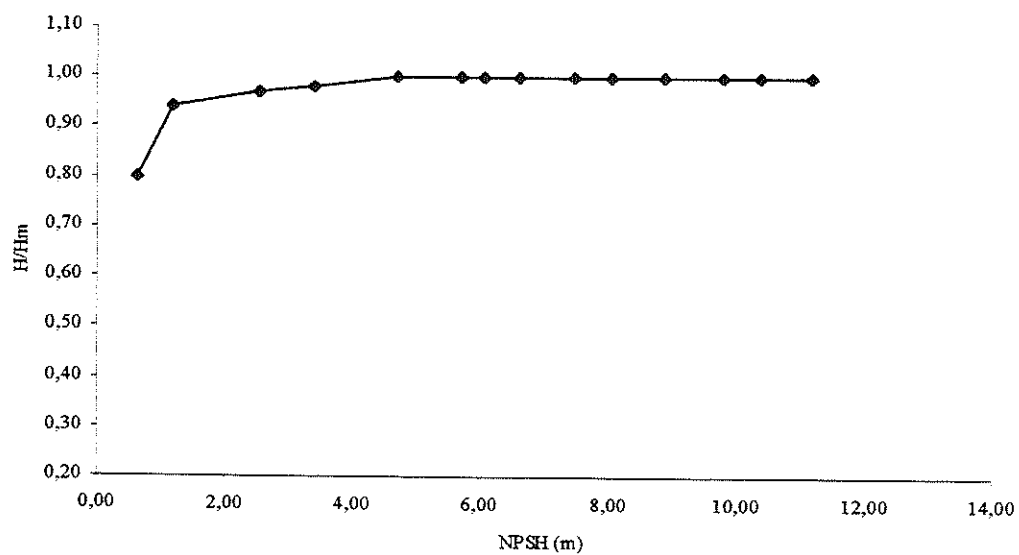


Figura 5.9: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1000 RPM (Teste 8)

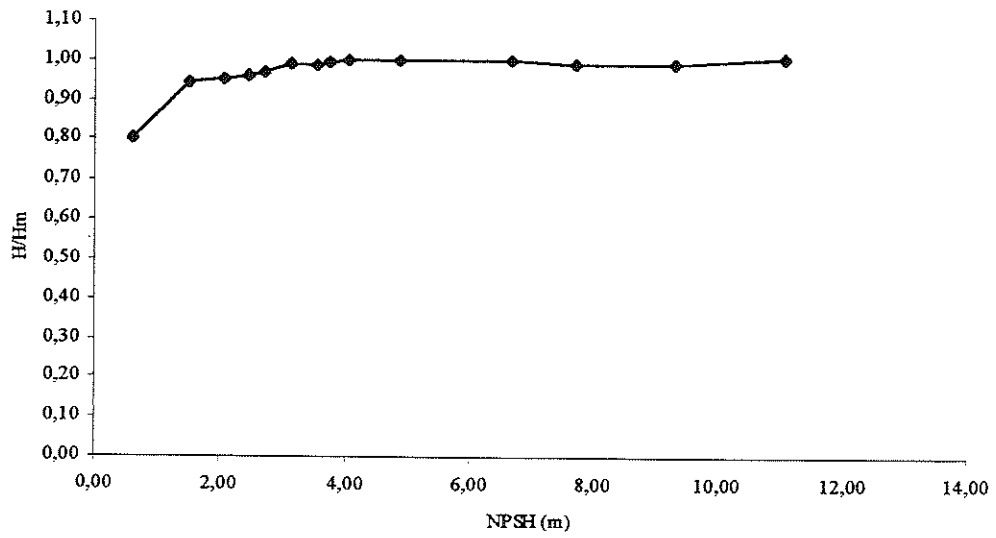


Figura 5.10: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1000 RPM (Teste 9)

e) Vazão de  $18 \text{ m}^3/\text{h}$ :

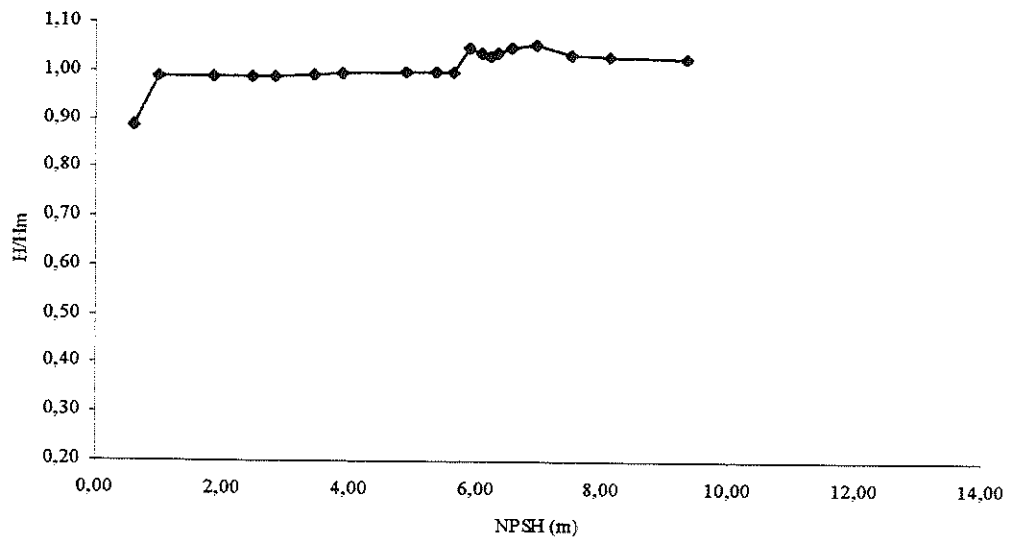


Figura 5.11: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1000 RPM (Teste 10)

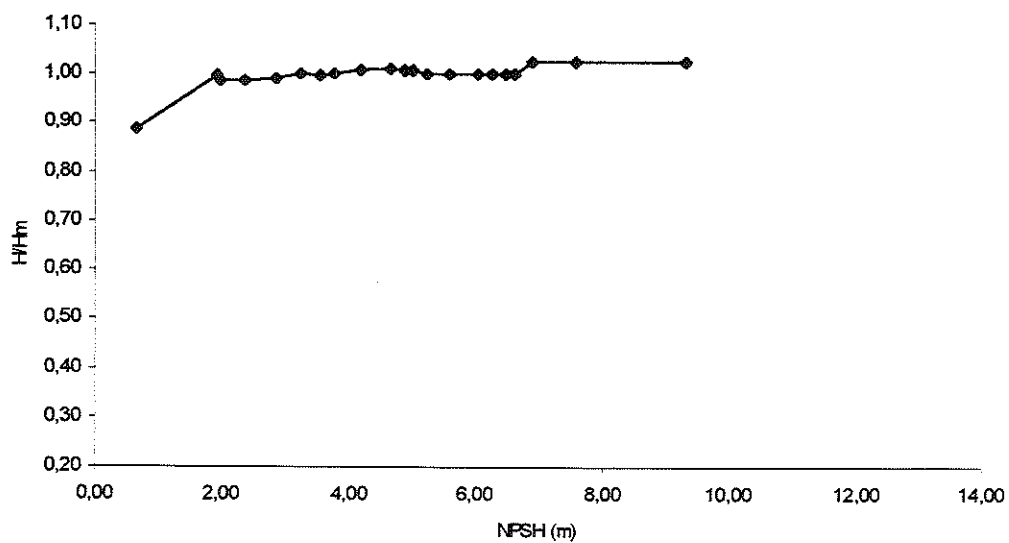


Figura 5.12: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1000 RPM (Teste 11)

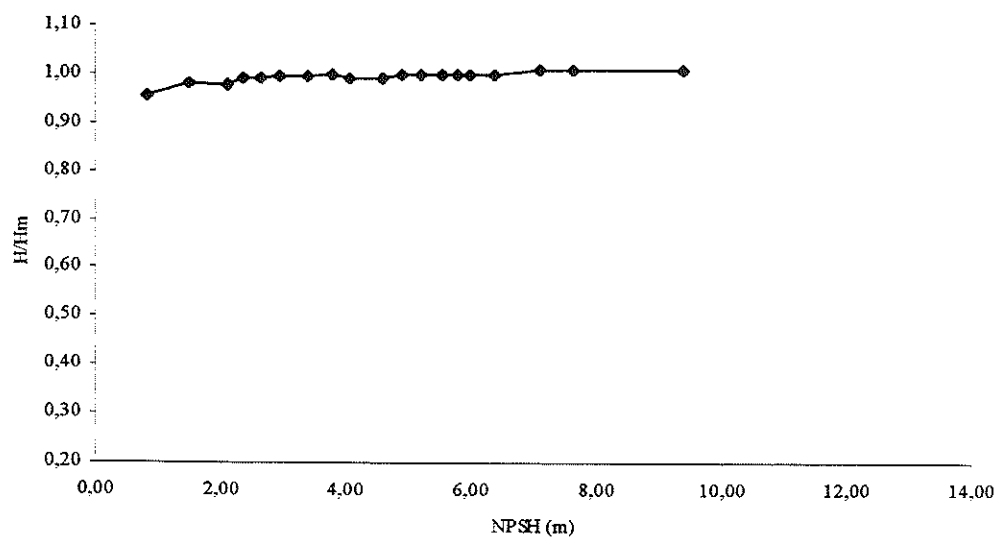


Figura 5.13: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1000 RPM (Teste 12)

⇒ Curvas obtidas para a rotação de 1200 RPM:

a) Vazão de  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ :

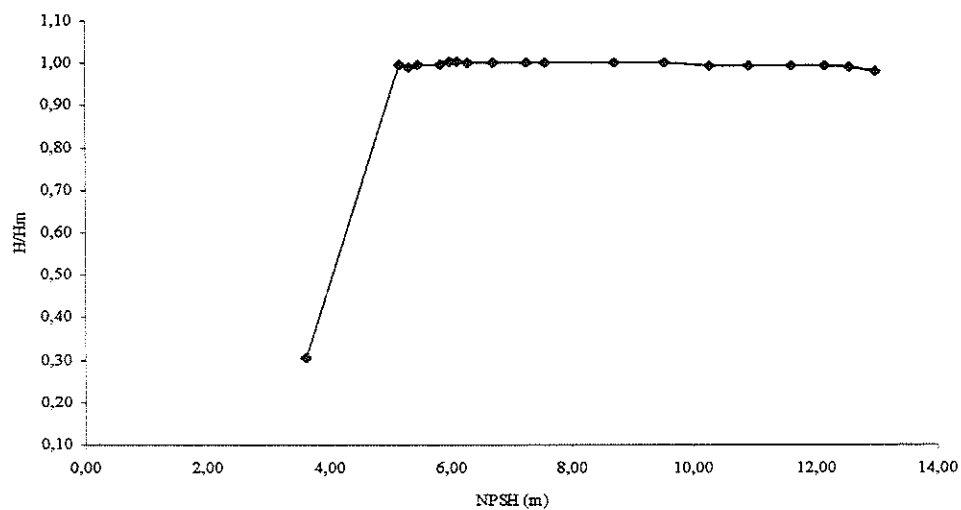


Figura 5.14: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1200 RPM (Teste 13)

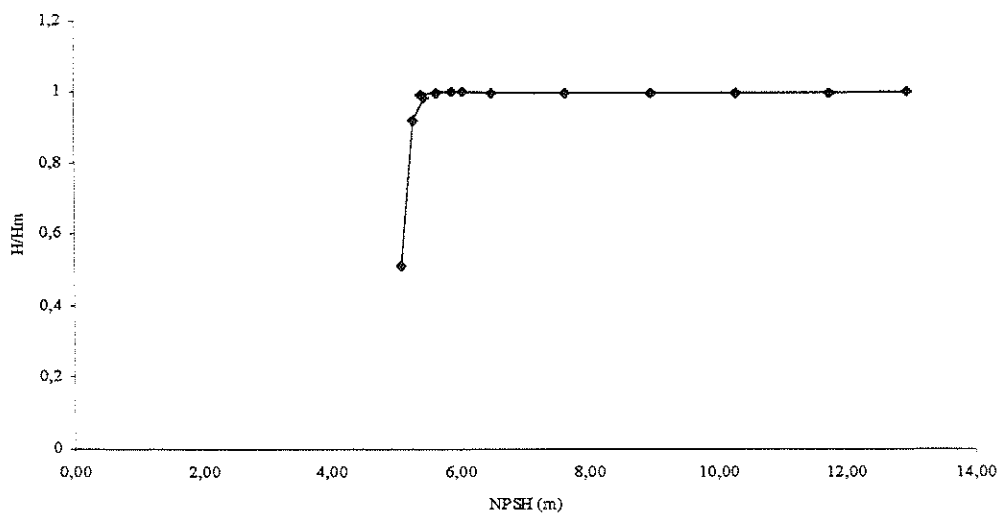


Figura 5.15: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1200 RPM (Teste 14)



b) Vazão de  $9 \text{ m}^3/\text{h}$ :

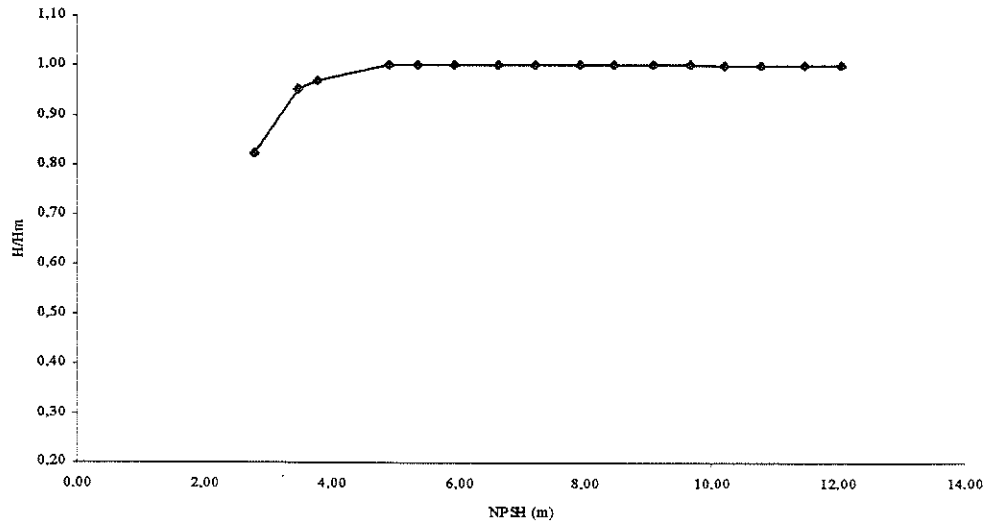


Figura 5.16: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $9 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1200 RPM (Teste 15)

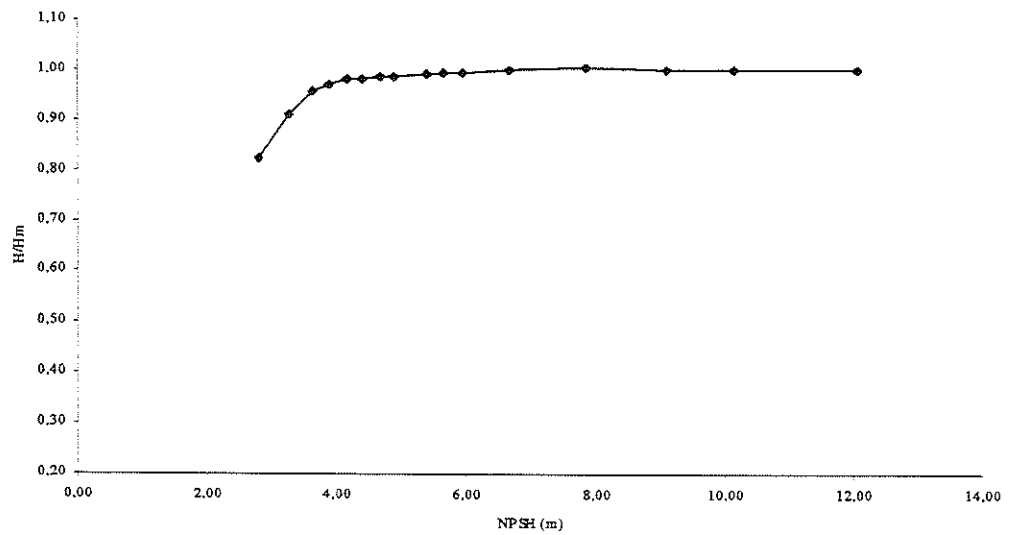


Figura 5.17: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $9 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1200 RPM (Teste 16)

c) Vazão de  $12 \text{ m}^3/\text{h}$ :

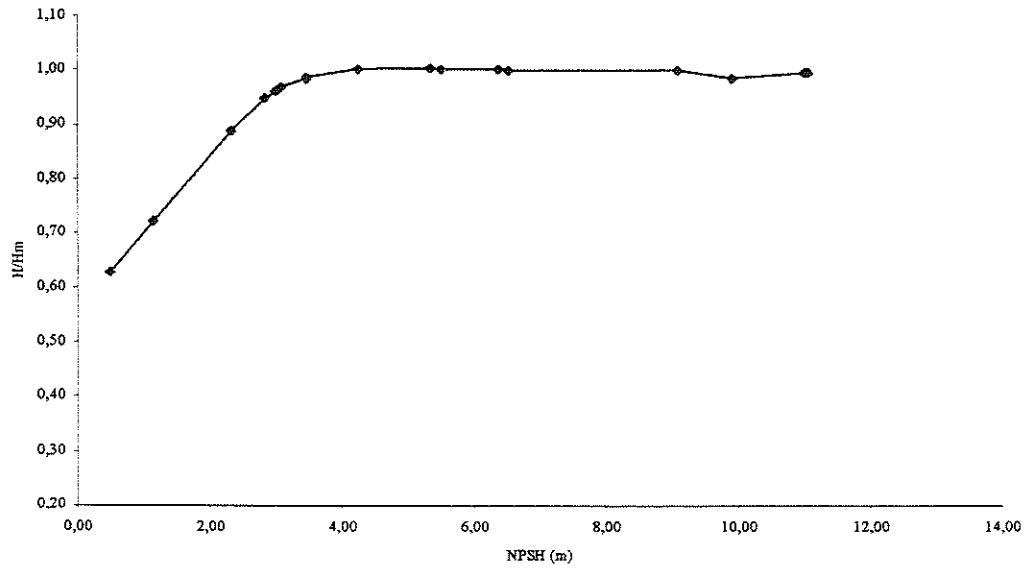


Figura 5.18: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1200 RPM (Teste 17)

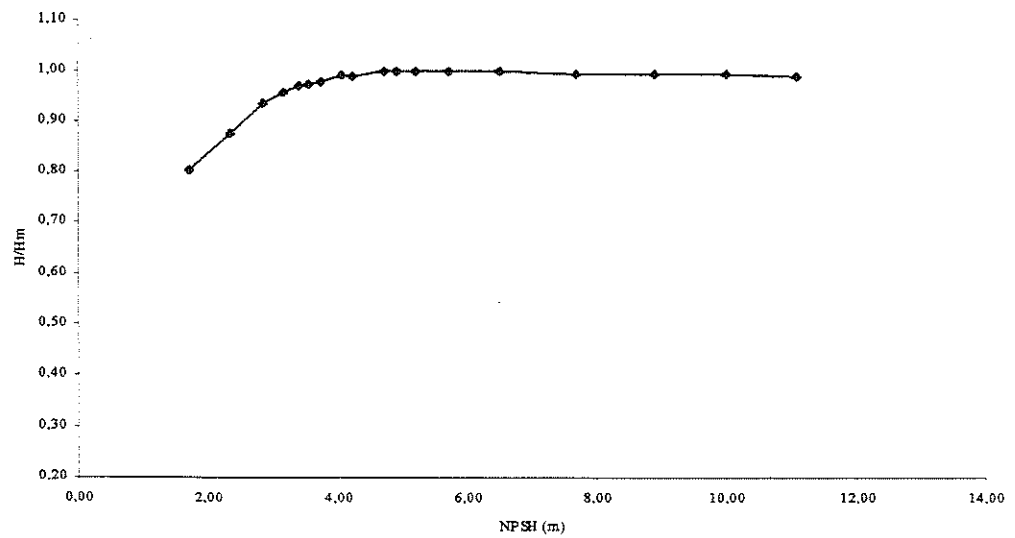


Figura 5.19: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1200 RPM (Teste 18)

d) Vazão de  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ :

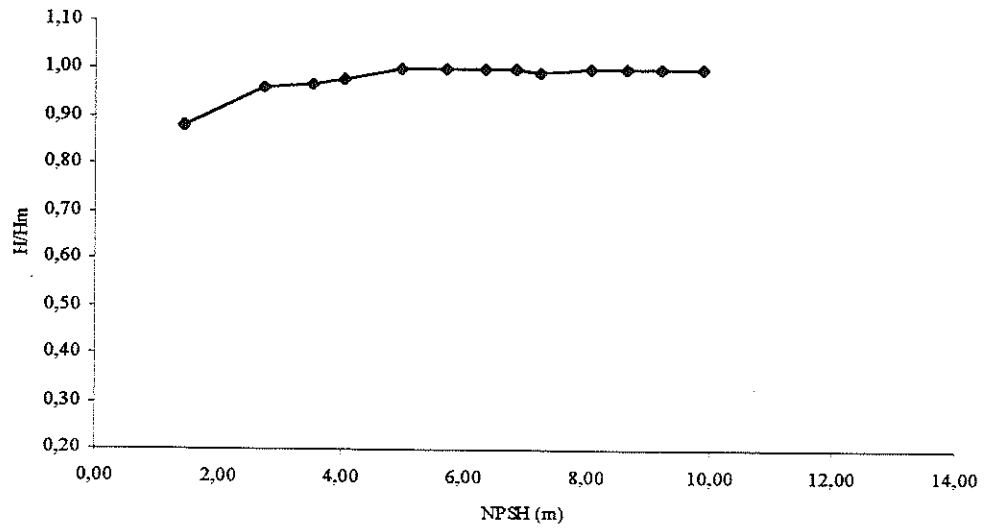


Figura 5.20: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1200 RPM (Teste 19)

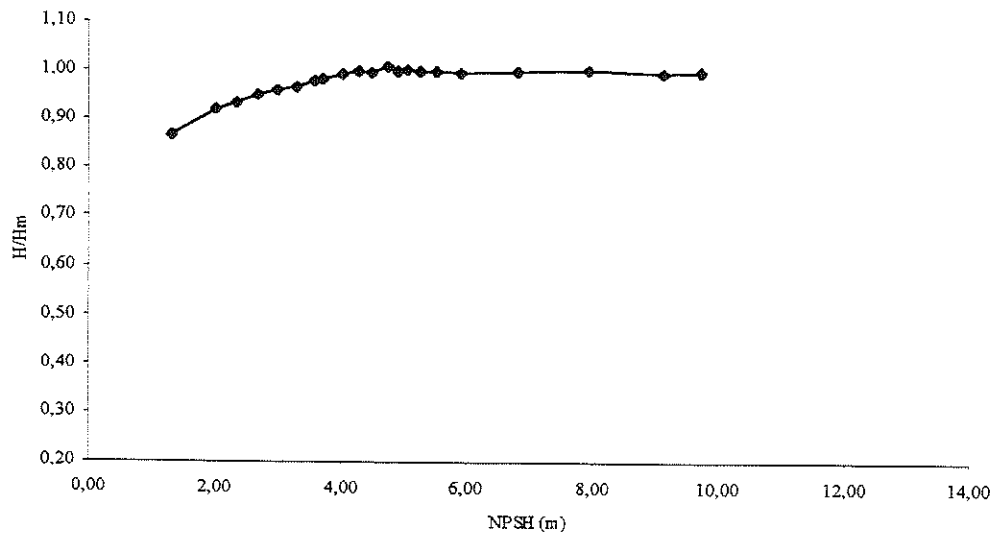


Figura 5.21: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1200 RPM (Teste 20)

e) Vazão de  $18 \text{ m}^3/\text{h}$ :

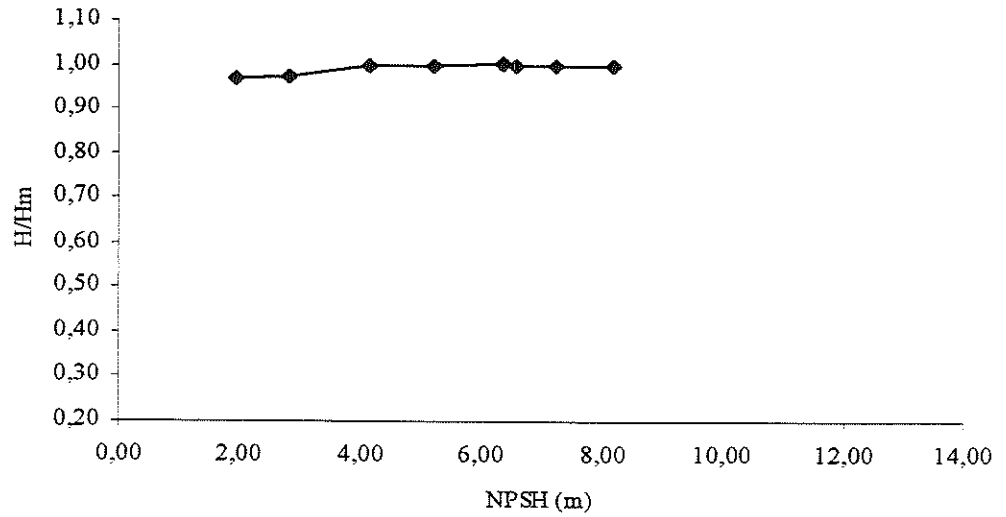


Figura 5.22: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $18 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1200 RPM (Teste 21)

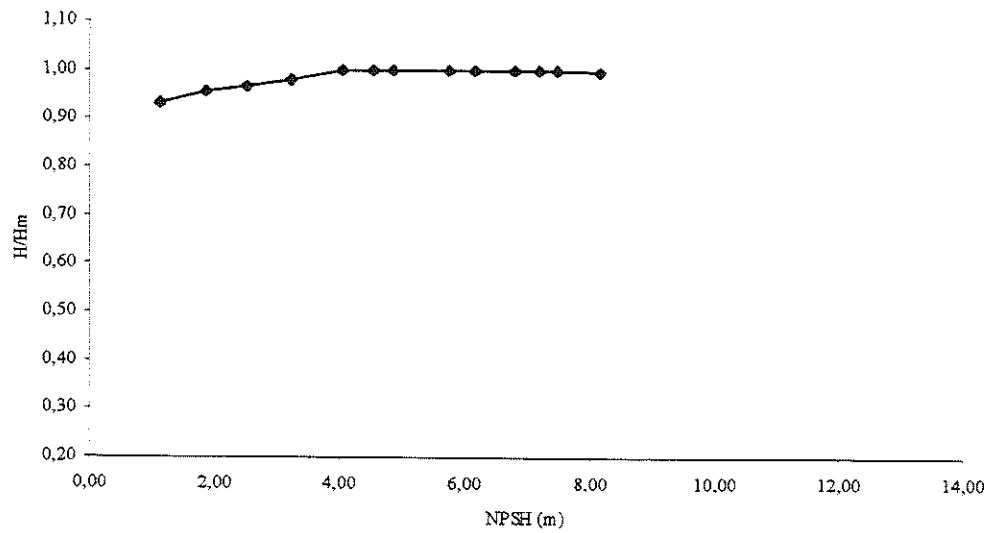


Figura 5.23: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $18 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1200 RPM (Teste 22)

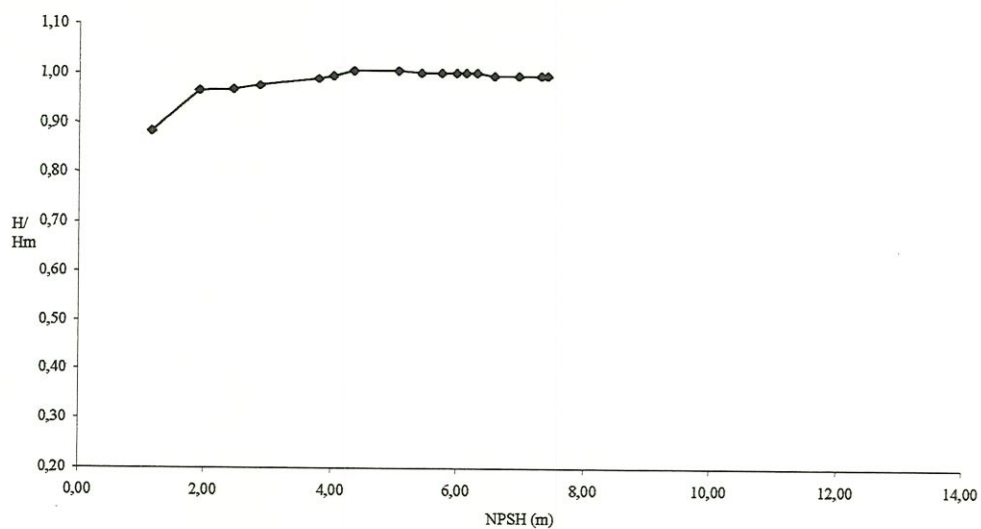


Figura 5.24: Curva de NPSH x  $H/H_m$  para a vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  e rotação de 1200 RPM (Teste 23)

Como citado anteriormente, pôde-se obter os valores de NPSH relacionado a  $H/H_m$  para as várias rotações e vazões. As Figuras 5.25 e 5.26 expressão os resultados obtidos, os quais são encontrados para cada vazão/rotação.

Os valores de NPSH em função da vazão utilizados para a elaboração das Figuras 5.25 e 5.26 são encontrados no Anexo C.

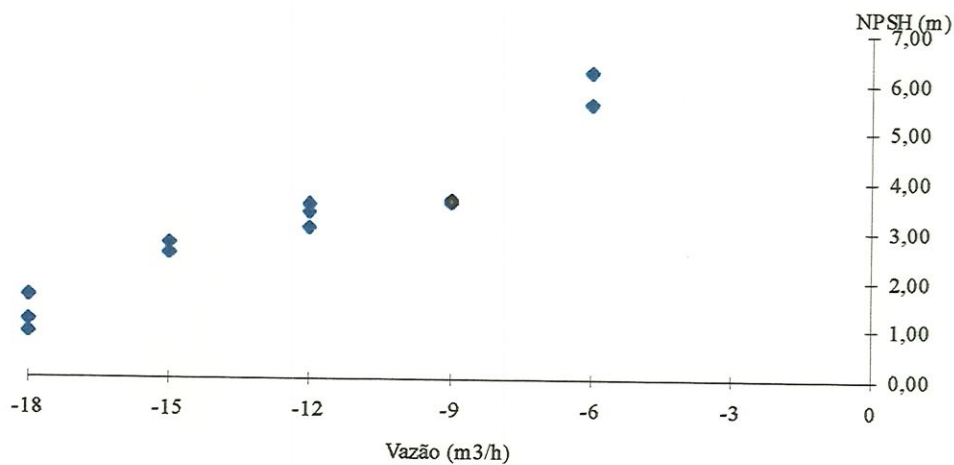


Figura 5.25: Figura de Q x NPSH para a rotação de 1000 RPM

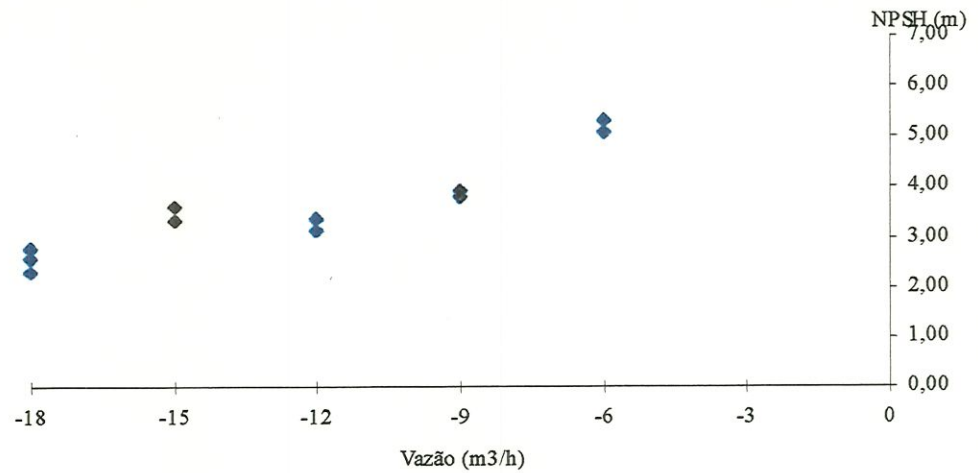


Figura 5.26: Figura de Q x NPSH para a rotação de 1200 RPM

Para os dados de ensaio, foram adimensionalizados os valores de NPSH e vazão, através do cálculo do coeficiente de NPSH e do coeficiente de vazão, e traçou-se a curva destes pontos, a qual é mostrada na Figura 5.27.

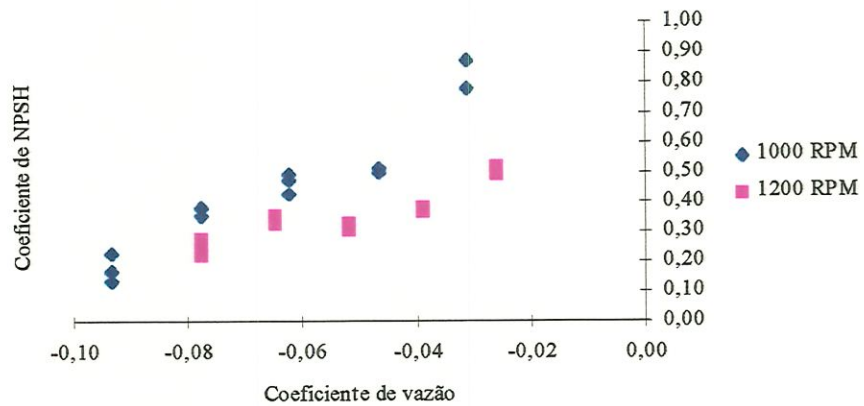


Figura 5.27: Figura do coeficiente de NPSH em função do coeficiente de vazão

Ao se observar a Figura 5.27, nota-se que existem dois pontos que se apresentam distantes do demais ( $(C_{NPSH}, \phi) = (-0,0311, 0,783)$  e  $(C_{NPSH}, \phi) = (-0,0311, 0,874)$ ), sendo então, realizada a sua retirada, encontrando-se, portanto, a Figura 5.28.

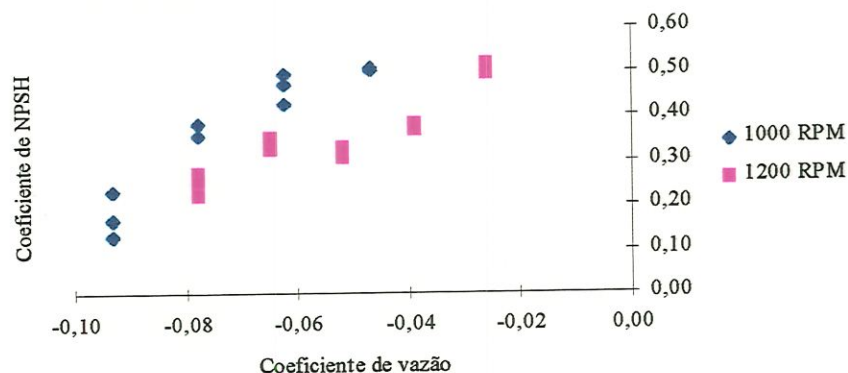


Figura 5.28: Figura do coeficiente de NPSH em função do coeficiente de vazão

Em trabalho realizado por Silva (1998), com a mesma bomba de ensaio utilizada neste trabalho, foi considerada a Figura 5.29 para a representação do  $C_{NPSH}$  em função de  $\phi$ . O referido autor estudou o efeito da cavitação no primeiro quadrante da bomba, com as rotações de 1350 rpm, 1400 rpm e 1440 rpm.

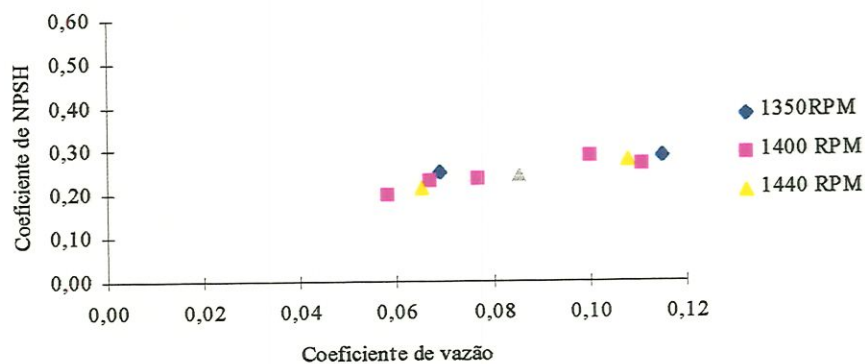


Figura 5.29: Figura de  $C_{NPSH}$  em função de  $\phi$  encontrado por Silva (1998)

A Figura 5.29 não representa a totalidade dos dados obtidos por Silva (1998) pois foi considerado que os pontos apresentados na Figura 5.30 não representavam a cavitação ocorrida na bomba e sim em um registro posicionado na sucção da mesma. Portanto, o referido autor desconsiderou os pontos apresentados na Figura 5.30, adotando apenas os pontos representados na Figura 5.29.

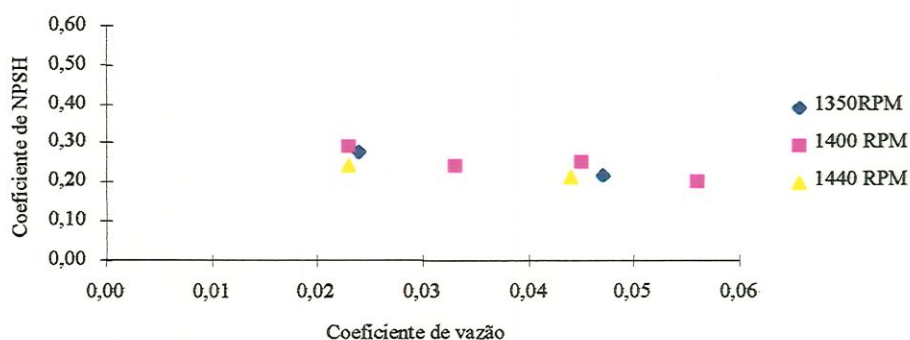


Figura 5.30: Figura do  $C_{NPSH}$  em função de  $\phi$  desprezado por Silva (1998)

Ao se colocar os dados representados nas Figuras 5.29 e 5.30 em um mesmo gráfico, encontra-se a Figura 5.31.

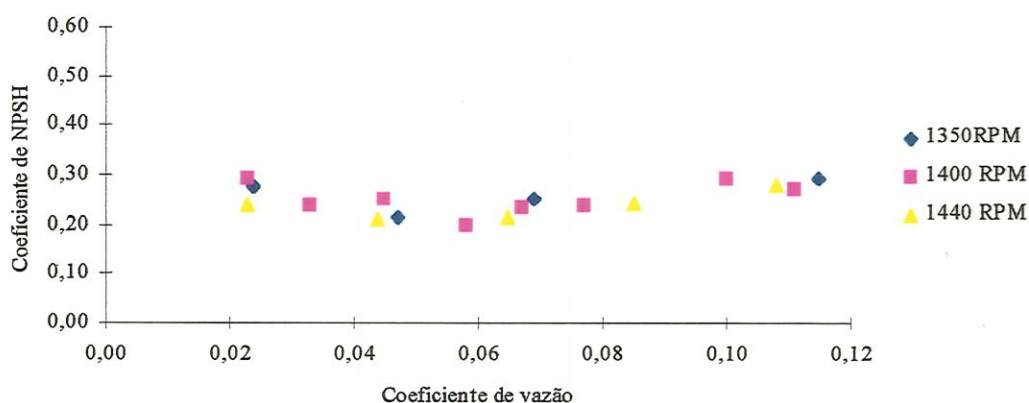


Figura 5.31: Totalidade dos valores de  $C_{NPSH}$  em função de  $\phi$  obtidos por Silva (1998)



Quando se coloca os pontos representados na Figura 5.31 juntamente com os pontos obtidos neste trabalho (Figura 5.28) encontra-se a Figura 5.32.

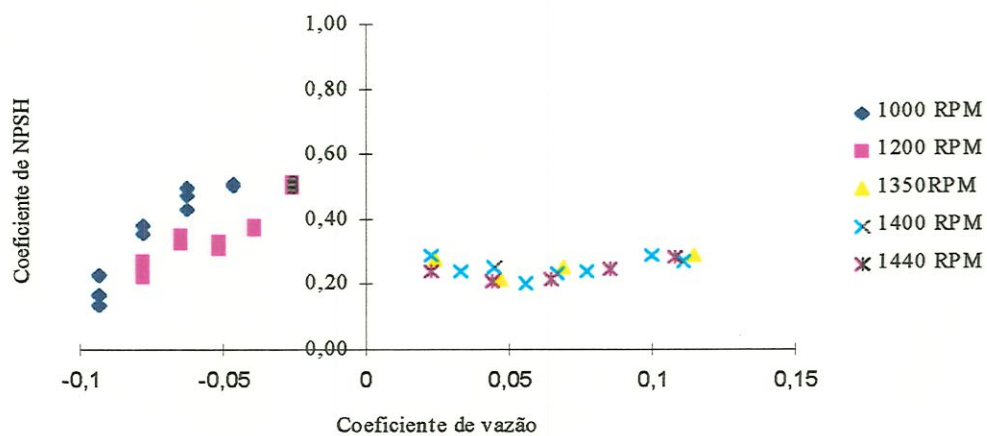


Figura 5.32: Figura do  $C_{NPSH}$  em função de  $\phi$  obtidos para o 1º e 2º quadrantes

## 6. Discussão e Conclusão

Como era esperado, houve pouca variação da temperatura da água utilizada durante o experimento, mesmo após um longo período de trabalho com o mesmo. Isto deveu-se ao grande volume de água existente no reservatório inferior, que permitiu que durante todos os experimentos pudessem ser trabalhados com o mesmo valor de temperatura.

Durante a realização dos testes experimentais, observou-se que ao se trabalhar com vazões compreendidas entre  $-9 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$ , conseguia-se operar e controlar o equipamento mais facilmente, devido ao fato deste apresentar-se mais estável, podendo-se assim, obter um melhor controle dos registros utilizados.

O equipamento utilizado neste trabalho foi montado utilizando-se registros tipo gaveta, os quais ocasionaram dificuldade de controle, pois para baixas vazões o registro permanecia praticamente fechado, dificultando a variação da perda de carga no sistema; já para altas vazões, ao se realizar pequenas variações nos mesmos ocasionava-se bruscas mudanças das condições de operação.

Segundo a norma ASME deve ser realizada a obtenção de no mínimo três pontos experimentais no trecho linear e quatro pontos no trecho decrescente da curva de  $H/H_m$  em função do NPSH. Entretanto, nem sempre foi possível o atendimento deste requisito, principalmente para altas e baixas vazões, pois nestes casos a curva de NPSH apresenta um decréscimo mais acentuado do que para as demais curvas, o que pode ser observado em figuras anteriormente apresentadas.

A norma ASME também recomenda que seja realizada a detecção da cavitação quando a altura manométrica decresce em 3 %. Esta norma foi desenvolvida para ensaios realizados no primeiro quadrante da bomba. Observou-se que se pode utilizar este critério para o segundo quadrante, pois após este ponto, a bomba não trabalha nas suas condições normais de operação, vindo a apresentar o comportamento típico de bombas que trabalham sob cavitação (ruído típico, formação de bolhas, trepidação).

A dispersão dos pontos obtidos foi maior no segundo do que no primeiro quadrante, isto é devido ao fato de que quando se trabalha com vazões negativas a bomba foge das suas condições normais de operação, ou seja, não trabalha nas condições para a qual a bomba fora projetada.

Mesmo com a dispersão observada no segundo quadrante, pode-se notar que os pontos obtidos para a rotação de 1000 rpm ficaram situados acima dos pontos de 1200 rpm, o que nos leva a supor que a dependência do Número de Reynolds no segundo quadrante é mais acentuada do que no primeiro quadrante, já que o Coeficiente de NPSH depende do Número de Reynolds. Para se ter informações mais detalhadas e precisas, seria interessante a realização de um maior número de ensaios.

Sabe-se que algumas bombas ao trabalharem no primeiro quadrante mostram a influência do Número de Reynolds, pois quando este cresce as curvas decrescem, sendo possível que isto venha a ocorrer no segundo quadrante, necessitando-se da realização de mais ensaios para se verificar a ocorrência deste comportamento.

Muitas vezes, no primeiro quadrante, despreza-se a curva de NPSH quando esta começa a crescer, ao se diminuir a vazão. Muitos técnicos não consideram este trecho por acreditar que a cavitação esteja ocorrendo em pontos do sistema diferentes da bomba (como por exemplo em válvulas, acessórios, etc.). Entretanto, este trabalho mostra que a curva tende realmente a crescer e que as curvas do primeiro e segundo quadrantes devam se ligar no ponto de coeficiente de vazão nulo.

Deve-se salientar que o equipamento utilizado não ofereceu condições para se detectar o valor de NPSH para vazão nula, pois para esta vazão não se consegue trabalhar com o referido banco de ensaios.

De uma maneira geral, pode-se observar que esta metodologia se mostrou adequada para ensaios de cavitação, podendo ser aplicada em outros testes.

## **7. Recomendações**

É bom salientar que a detecção dos pontos experimentais não apresentou problema. Seria interessante a troca dos registros utilizados por registros mais precisos, pois em algumas situações o registro utilizado se torna impróprio para o teste. Poderia-se utilizar registros menores e trabalhar-se em paralelo.

No caso particular da utilização de uma bomba invertida para outros experimentos, recomenda-se que sejam realizados ensaios de cavitação para estas máquinas, lembrando que o valor do Coeficiente de NPSH medido neste trabalho, se situou no patamar próximo aos valores obtidos para o primeiro quadrante da bomba.

### Anexo A - Dados obtidos experimentalmente

Tabela A1: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-6 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 1)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
683	424	378	962	1168	24	9,44
684	423	411	931	1135	24	9,44
686	423	441	900	1105	24	9,44
686	423	458	883	1088	24	9,44
686	423	477	866	1070	24	9,44
687	422	503	840	1045	24	9,44
687	421	531	812	1018	24	9,44
687	422	553	789	995	24	9,44
687	422	612	730	936	24	9,44
687	422	621	713	918	24	9,44
688	421	639	702	906	24	9,44
688	421	658	687	892	24	9,44
688	421	670	673	878	24	9,44
687	422	686	654	860	24	9,44
688	421	697	647	852	24	9,44
610	502	710	634	839	24	9,44

Tabela A2: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-6 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 2)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
684	425	364	907	1045	25	9,43
684	425	399	942	1011	25	9,43
684	425	496	844	912	25	9,43
684	425	552	791	858	25	9,43
684	425	582	762	830	25	9,43
685	424	627	716	784	25	9,43
681	428	653	690	758	25	9,43
680	429	669	675	743	25	9,43
601	512	687	656	725	25	9,43
603	510	870	477	544	25	9,43

Tabela A3: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-9 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 3)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
677	432	393	950	1017	25	9,43
676	431	446	897	966	25	9,43
677	432	486	857	925	25	9,43
677	432	523	819	887	25	9,43
677	432	555	787	856	25	9,43
677	432	596	747	814	25	9,43
678	431	648	696	764	25	9,43
678	432	669	674	742	25	9,43
678	432	691	653	720	25	9,43
678	432	725	619	687	25	9,43
677	433	744	600	668	25	9,43
675	435	766	578	646	25	9,43
661	450	804	540	608	25	9,43
631	481	855	490	557	25	9,43

Tabela A4: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-9 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 4)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
677	432	392	950	1018	25	9,43
677	432	468	873	942	25	9,43
678	431	522	820	888	25	9,43
678	431	571	771	839	25	9,43
678	431	639	704	771	25	9,43
678	432	683	660	727	25	9,43
678	432	719	625	691	25	9,43
677	433	744	600	667	25	9,43
678	434	753	591	658	25	9,43
675	436	769	576	643	25	9,43
672	439	790	555	623	25	9,43
665	447	798	548	616	25	9,43

Tabela A5: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 5)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
681	427	451	891	1096	24	9,43
681	428	484	860	1063	24	9,43
681	428	512	830	1035	24	9,43
681	428	536	807	1012	24	9,43
681	428	559	785	990	24	9,43
681	428	578	765	970	24	9,43
680	429	599	743	948	24	9,43
681	428	628	716	921	24	9,43
682	428	651	696	899	24	9,43
681	428	676	671	873	24	9,43
681	429	693	653	858	24	9,43
681	429	720	624	829	24	9,43
682	428	754	591	796	24	9,43
678	433	784	560	765	24	9,43
671	439	829	516	721	24	9,43
661	450	864	482	688	24	9,43

Tabela A6: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 6)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
672	436	431	909	977	25	9,44
672	436	453	887	955	25	9,44
673	435	512	828	896	25	9,44
672	436	554	787	854	25	9,44
672	436	596	745	813	25	9,44
673	436	627	715	782	25	9,44
673	436	647	696	763	25	9,44
674	436	671	672	738	25	9,44
674	436	685	657	724	25	9,44
674	436	697	645	713	25	9,44
674	436	712	630	698	25	9,44
674	437	728	616	683	25	9,44
674	436	747	596	664	25	9,44
671	439	764	578	646	25	9,44
670	441	783	559	628	25	9,44
665	446	798	545	613	25	9,44
658	453	831	514	580	25	9,44
635	477	875	470	537	25	9,44

Tabela A7: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 7)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
673	434	436	907	974	25	9,44
672	435	493	848	916	25	9,44
673	434	554	788	855	25	9,44
673	434	623	719	787	25	9,44
674	435	657	686	753	25	9,44
673	435	709	633	701	25	9,44
676	436	721	622	689	25	9,44
676	436	727	617	684	25	9,44
676	436	740	604	671	25	9,44
675	437	752	592	660	25	9,44
674	439	765	581	648	25	9,44
673	438	774	572	639	25	9,44
673	438	783	562	629	25	9,44
671	442	799	548	614	25	9,44
664	449	833	514	581	25	9,44
655	457	862	486	552	25	9,44

Tabela A8: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 8)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
670	438	479	863	929	25	9,43
670	438	509	832	899	25	9,43
670	438	532	811	878	25	9,43
670	438	568	776	844	25	9,43
670	438	599	745	813	25	9,43
670	438	621	722	790	25	9,43
670	438	653	689	758	25	9,43
670	438	676	668	736	25	9,43
670	438	689	655	723	25	9,43
670	438	727	617	684	25	9,43
670	443	778	567	632	25	9,43
668	443	810	535	602	25	9,43
665	447	863	484	551	25	9,43
649	464	884	463	530	25	9,43



Tabela A9: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 9)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
667	440	483	859	927	25	9,43
666	442	551	792	859	25	9,43
668	444	612	731	799	25	9,43
669	443	652	691	759	25	9,43
669	443	721	623	691	25	9,43
669	443	752	593	660	25	9,43
668	443	764	581	648	25	9,43
667	444	772	573	640	25	9,43
668	444	788	558	624	25	9,43
665	446	804	542	609	25	9,43
664	447	813	532	600	25	9,43
663	448	828	517	584	25	9,43
662	449	850	495	562	25	9,43
646	465	885	462	527	25	9,43

Tabela A10: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 10)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
667	442	551	792	858	24	9,44
668	442	598	746	812	24	9,44
668	441	621	723	789	24	9,44
671	439	643	701	767	24	9,44
670	440	658	686	752	24	9,44
669	441	666	678	744	24	9,44
668	442	670	673	739	24	9,44
669	441	676	668	734	24	9,44
670	440	684	661	727	24	9,44
665	446	693	652	718	24	9,44
665	446	703	641	706	24	9,44
665	446	721	623	688	24	9,44
664	446	760	585	651	24	9,44
664	447	776	568	635	24	9,44
664	448	800	544	611	24	9,44
664	448	814	530	597	24	9,44
664	448	837	507	573	24	9,44
664	448	870	475	541	24	9,44
653	459	885	460	526	24	9,44

Tabela A11: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 11)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
669	439	550	790	858	25	9,43
669	439	617	726	793	25	9,43
669	439	643	698	766	25	9,43
666	442	653	688	756	25	9,43
666	442	659	683	750	25	9,43
666	442	667	674	742	25	9,43
666	442	675	666	734	25	9,43
667	443	692	649	718	25	9,43
667	443	707	635	704	25	9,43
668	442	716	627	696	25	9,43
668	442	721	623	690	25	9,43
669	442	730	614	681	25	9,43
669	443	747	596	664	25	9,43
668	444	764	581	648	25	9,43
667	444	772	573	641	25	9,43
668	444	784	561	628	25	9,43
667	445	799	546	613	25	9,43
667	446	818	527	595	25	9,43
667	446	833	512	580	25	9,43
668	445	860	538	554	25	9,43
655	457	883	462	530	25	9,43

Tabela A12: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1000 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 12)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
668	439	548	793	860	25	9,43
668	439	616	727	794	25	9,43
668	439	636	707	774	25	9,43
667	440	663	679	748	25	9,43
667	440	678	664	733	25	9,43
667	440	686	656	725	25	9,43
667	440	696	647	714	25	9,43
668	441	709	636	702	25	9,43
668	441	721	623	689	25	9,43
667	442	732	612	679	25	9,43
667	442	752	592	660	25	9,43
669	442	764	581	648	25	9,43
669	443	779	566	632	25	9,43
669	443	795	550	616	25	9,43
668	443	807	538	605	25	9,43
668	443	818	528	595	25	9,43
666	444	827	518	586	25	9,43
667	444	850	494	562	25	9,43
665	448	876	469	536	25	9,43

Tabela A13: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de  $-6 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 13)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
732	376	408	932	1000	25	9,43
734	374	424	916	984	25	9,43
734	373	440	902	968	25	9,43
734	373	461	881	948	25	9,43
734	373	488	854	922	25	9,43
734	373	513	830	897	25	9,43
735	372	542	802	868	25	9,43
735	372	573	770	838	25	9,43
735	372	616	726	794	25	9,43
736	373	627	715	783	25	9,43
736	373	649	694	762	25	9,43
736	373	665	678	747	25	9,43
737	372	672	672	740	25	9,43
737	372	676	666	734	25	9,43
736	374	682	661	729	25	9,43
736	374	697	648	716	25	9,43
735	375	702	641	709	25	9,43
736	374	709	636	703	25	9,43
611	500	765	574	647	25	9,43

Tabela A14: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de  $-6 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 14)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
732	375	410	931	998	25	9,43
732	376	456	885	952	25	9,43
732	376	511	830	897	25	9,43
732	376	562	780	848	25	9,43
732	376	613	728	797	25	9,43
732	376	656	685	754	25	9,43
733	376	674	668	736	25	9,43
733	376	681	662	729	25	9,43
732	377	690	653	720	25	9,43
731	378	699	644	711	25	9,43
730	379	705	638	705	25	9,43
718	391	692	651	718	25	9,43
645	463	683	661	728	25	9,43

Tabela A15: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de  $-9 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 15)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
733	377	445	897	964	25	9,43
733	377	468	875	943	25	9,43
733	377	494	849	916	25	9,43
733	377	517	828	894	25	9,43
733	376	537	806	873	25	9,43
733	376	559	785	852	25	9,43
733	376	583	760	827	25	9,43
733	376	603	740	809	25	9,43
733	376	631	713	781	25	9,43
733	376	653	691	759	25	9,43
734	377	679	665	732	25	9,43
733	376	701	642	711	25	9,43
734	377	719	625	692	25	9,43
729	383	762	582	650	25	9,43
726	386	773	570	639	25	9,43
702	408	800	545	612	25	9,43

Tabela A16: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de  $-9 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 16)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
729	378	445	897	964	25	9,43
730	379	518	824	892	25	9,43
730	379	558	786	853	25	9,43
731	378	606	738	806	25	9,43
730	379	651	692	760	25	9,43
729	380	678	664	733	25	9,43
729	380	689	652	721	25	9,43
728	380	699	643	710	25	9,43
727	381	719	624	690	25	9,43
728	382	727	615	683	25	9,43
727	383	738	605	672	25	9,43
727	383	747	596	663	25	9,43
725	385	758	587	653	25	9,43
723	387	768	577	643	25	9,43
715	396	782	563	628	25	9,43
700	411	798	544	612	25	9,43

Tabela A17: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 17)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
722	383	482	856	946	23	9,43
722	383	486	855	943	23	9,43
720	385	523	808	897	23	9,43
723	383	554	777	864	23	9,43
724	384	657	684	771	23	9,43
725	384	663	679	768	23	9,43
725	384	696	646	733	23	9,43
725	383	703	640	728	23	9,43
725	384	744	597	686	23	9,43
722	386	774	567	656	23	9,43
722	387	775	568	655	23	9,43
719	389	788	554	641	23	9,43
719	389	788	553	641	23	9,43
717	390	792	549	647	23	9,43
715	392	799	544	631	23	9,43
705	403	817	524	610	23	9,43
677	432	863	480	567	23	9,43
661	448	887	455	543	23	9,43

Tabela A18: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 18)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
725	383	482	860	929	25	9,43
726	382	523	818	886	25	9,43
726	382	566	777	844	25	9,43
726	382	612	731	799	25	9,43
727	381	658	685	754	25	9,43
727	381	688	656	724	25	9,43
728	382	707	636	704	25	9,43
727	381	718	625	692	25	9,43
727	381	726	617	684	25	9,43
725	383	744	599	665	25	9,43
726	383	751	592	659	25	9,43
724	385	763	581	647	25	9,43
723	386	771	574	641	25	9,43
723	387	777	568	635	25	9,43
720	389	786	560	627	25	9,43
717	393	798	547	615	25	9,43
707	404	817	528	596	25	9,43
695	417	842	504	571	25	9,43

Tabela A19: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 19)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
725	385	529	814	881	25	9,43
725	385	555	789	857	25	9,43
725	385	578	768	834	25	9,43
725	385	600	745	812	25	9,43
724	386	631	714	781	25	9,43
725	385	647	699	766	25	9,43
725	385	666	679	746	25	9,43
725	385	690	655	723	25	9,43
725	385	718	627	693	25	9,43
722	389	754	593	659	25	9,43
720	391	773	573	639	25	9,43
719	392	804	542	609	25	9,43
706	407	855	494	560	25	9,43

Tabela A20: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 20)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
723	385	534	807	875	25	9,43
723	386	557	785	853	25	9,43
724	385	602	739	808	25	9,43
724	386	646	696	763	25	9,43
724	387	681	663	729	25	9,43
724	386	696	647	714	25	9,43
724	386	706	637	704	25	9,43
725	386	713	629	697	25	9,43
724	386	719	623	692	25	9,43
726	384	725	617	682	25	9,43
724	387	735	607	673	25	9,43
724	386	742	600	665	25	9,43
723	387	753	590	656	25	9,43
722	389	764	578	647	25	9,43
721	390	770	574	642	25	9,43
719	392	782	563	630	25	9,43
717	393	794	552	618	25	9,43
716	395	805	540	607	25	9,43
713	398	818	527	595	25	9,43
711	400	830	514	583	25	9,43
702	409	858	488	554	25	9,43

Tabela A21: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 21)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
716	392	594	747	835	24	9,42
717	392	632	712	799	24	9,42
717	392	656	687	774	24	9,42
717	391	666	678	766	24	9,42
716	392	707	634	722	24	9,42
717	392	749	594	682	24	9,42
713	396	800	544	632	24	9,42
712	398	834	511	599	24	9,42

Tabela A22: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 22)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
719	387	596	745	866	24	9,42
720	387	622	719	839	24	9,42
720	387	633	708	828	24	9,42
720	387	648	693	813	24	9,42
720	387	672	668	789	24	9,42
720	387	688	652	773	24	9,42
720	387	723	618	739	24	9,42
720	387	733	606	727	24	9,42
720	387	754	588	708	24	9,42
717	391	784	560	630	24	9,42
715	394	812	529	651	24	9,42
714	396	837	505	625	24	9,42
710	400	866	477	597	24	9,42

Tabela A23: Valores obtidos experimentalmente para rotação de 1200 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 23)

z1 (mmHg)	z2 (mmHg)	z3 (mmHg)	z4 (mmHg)	z4'	Temperatura da água (°C)	Patm (m.c.a.)
716	392	624	718	781	25	9,43
716	392	628	714	777	25	9,43
716	392	641	701	769	25	9,43
716	392	656	686	754	25	9,43
717	391	667	675	743	25	9,43
717	391	673	669	738	25	9,43
717	391	679	663	732	25	9,43
717	391	688	654	723	25	9,43
717	391	700	642	700	25	9,43
718	390	714	628	686	25	9,43
718	390	741	601	669	25	9,43
716	392	753	589	658	25	9,43
715	393	762	579	647	25	9,43
714	396	798	546	612	25	9,43
713	398	815	529	596	25	9,43
712	398	835	509	576	25	9,43
699	412	864	481	550	25	9,43



## Anexo B - Resultados obtidos

Tabela B1: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-6 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 1)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
3,268	4,799	13,93	0,978
3,293	3,960	13,09	0,985
3,318	3,161	12,29	0,993
3,318	2,716	11,84	0,993
3,318	2,244	11,37	0,993
3,343	1,564	10,69	1,000
3,356	0,832	9,96	1,004
3,343	0,242	9,37	1,000
3,343	-1,304	7,82	1,000
3,343	-1,650	7,48	1,000
3,369	-2,027	7,10	1,008
3,369	-2,470	6,66	1,008
3,369	-2,811	6,32	1,008
3,343	-3,270	5,86	1,000
3,369	-3,505	5,62	1,008
1,367	-3,846	5,28	0,409

Tabela B2: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-6 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 2)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
3,267	4,160	13,28	1,000
3,267	4,126	13,24	1,000
3,267	1,570	10,69	1,000
3,267	0,142	9,26	1,000
3,267	-0,629	8,49	1,000
3,293	-1,822	7,30	1,008
3,192	-2,503	6,62	0,977
3,167	-2,908	6,21	0,969
1,127	-3,393	5,73	0,345
1,178	-8,135	0,98	0,360

Tabela B3: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-9 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 3)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
3,100	4,308	13,43	1,000
3,100	2,922	12,05	1,000
3,100	1,873	11,00	1,000
3,100	0,890	10,02	1,000
3,100	0,052	9,18	1,000
3,100	-1,010	8,12	1,000
3,125	-2,358	6,77	1,008
3,112	-2,922	6,20	1,004
3,112	-3,486	5,64	1,004
3,112	-4,376	4,75	1,004
3,087	-4,873	4,25	0,996
3,037	-5,450	3,68	0,980
2,671	-6,445	2,68	0,862
1,903	-7,769	1,36	0,614

Tabela B4: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-9 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 4)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
3,100	4,322	13,45	0,992
3,100	2,318	11,44	0,992
3,125	0,916	10,04	1,000
3,125	-0,368	8,76	1,000
3,125	-2,137	6,99	1,000
3,112	-3,290	5,84	0,996
3,112	-4,220	4,91	0,996
3,087	-4,874	4,25	0,988
3,087	-5,110	4,02	0,988
3,024	-5,516	3,61	0,968
2,948	-6,065	3,06	0,944
2,760	-6,261	2,86	0,883

Tabela B5: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 5)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
3,225	2,913	12,06	1,004
3,212	2,074	11,22	1,000
3,213	1,315	10,46	1,000
3,213	0,700	9,85	1,000
3,213	0,111	9,26	1,000
3,212	-0,401	8,75	1,000
3,187	-0,965	8,18	0,992
3,213	-1,697	7,45	1,000
3,225	-2,261	6,89	1,004
3,212	-2,917	6,23	1,000
3,200	-3,373	5,77	0,996
3,200	-4,108	5,04	0,996
3,225	-4,985	4,16	1,004
3,112	-5,784	3,36	0,969
2,948	-6,950	2,20	0,918
2,684	-7,852	1,30	0,835

Tabela B6: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 6)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
2,998	3,273	12,42	0,992
2,998	2,696	11,84	0,992
3,023	1,151	10,30	1,000
2,998	0,063	9,21	0,992
2,998	-1,037	8,11	0,992
3,010	-1,836	7,31	0,996
3,010	-2,347	6,80	0,996
3,023	-2,976	6,17	1,000
3,023	-3,356	5,79	1,000
3,023	-3,669	5,48	1,000
3,023	-4,062	5,08	1,000
3,010	-4,455	4,69	0,996
3,023	-4,966	4,19	1,000
2,948	-5,425	3,74	0,975
2,910	-5,921	3,26	0,963
2,784	-6,302	2,84	0,921
2,608	-7,141	2,01	0,863
2,016	-8,293	0,85	0,667

Tabela B7: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 7)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
3,036	3,182	12,33	1,000
3,010	1,662	10,81	0,992
3,036	0,076	9,22	1,000
3,036	-1,730	7,42	1,000
3,036	-2,609	6,54	1,000
3,023	-3,984	5,16	0,996
3,048	-4,285	4,86	1,004
3,048	-4,429	4,72	1,004
3,048	-4,770	4,38	1,004
3,023	-5,083	4,06	0,996
2,985	-5,397	3,75	0,983
2,985	-5,633	3,51	0,983
2,985	-5,883	3,27	0,983
2,910	-6,276	2,89	0,958
2,733	-7,165	2,01	0,900
2,519	-7,913	1,23	0,830

Tabela B8: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 8)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
2,962	2,040	11,19	1,000
2,962	1,242	10,39	1,000
2,962	0,666	9,82	1,000
2,962	-0,262	8,89	1,000
2,962	-1,074	8,08	1,000
2,962	-1,664	7,49	1,000
2,962	-2,515	6,63	1,000
2,962	-3,092	6,06	1,000
2,962	-3,432	5,72	1,000
2,962	-4,429	4,72	1,000
2,900	-5,754	3,40	0,979
2,874	-6,590	2,56	0,970
2,786	-7,951	1,20	0,941
2,371	-8,502	0,65	0,800

Tabela B9: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 9)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
2,900	1,938	11,088	1,004
2,862	0,169	9,319	0,991
2,862	-1,429	7,722	0,991
2,887	-2,477	6,674	1,000
2,887	-4,271	4,880	1,000
2,887	-5,070	4,080	1,000
2,874	-5,385	3,766	0,996
2,849	-5,594	3,556	0,987
2,862	-6,001	3,149	0,991
2,799	-6,419	2,731	0,969
2,774	-6,668	2,483	0,961
2,748	-7,062	2,089	0,952
2,723	-7,638	1,512	0,943
2,320	-8,530	0,621	0,804

Tabela B10: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 10)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
2,893	0,168	9,35	1,027
2,905	-1,050	8,13	1,031
2,918	-1,653	7,53	1,036
2,981	-2,229	6,95	1,058
2,956	-2,622	6,56	1,049
2,930	-2,832	6,35	1,040
2,905	-2,950	6,23	1,031
2,930	-3,094	6,08	1,040
2,956	-3,290	5,89	1,049
2,817	-3,526	5,65	1,000
2,817	-3,802	5,38	1,000
2,817	-4,274	4,90	1,000
2,805	-5,281	3,90	0,996
2,792	-5,713	3,46	0,991
2,779	-6,342	2,84	0,987
2,779	-6,708	2,47	0,987
2,779	-7,312	1,87	0,987
2,779	-8,163	1,01	0,987
2,502	-8,556	0,62	0,888

Tabela B11: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 11)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
2,956	0,155	9,32	1,026
2,956	-1,561	7,61	1,026
2,956	-2,268	6,90	1,026
2,880	-2,530	6,64	1,000
2,880	-2,675	6,49	1,000
2,880	-2,897	6,27	1,000
2,880	-3,106	6,06	1,000
2,880	-3,551	5,62	1,000
2,880	-3,930	5,24	1,000
2,905	-4,152	5,02	1,009
2,905	-4,272	4,90	1,009
2,918	-4,508	4,66	1,013
2,905	-4,966	4,20	1,009
2,880	-5,385	3,78	1,000
2,867	-5,593	3,57	0,996
2,880	-5,909	3,26	1,000
2,855	-6,302	2,87	0,991
2,842	-6,799	2,37	0,987
2,842	-7,192	1,98	0,987
2,867	-7,230	1,94	0,996
2,553	-8,502	0,67	0,886

Tabela B12: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1000 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 12)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
2,943	0,220	9,39	1,009
2,943	-1,534	7,63	1,009
2,943	-2,058	7,11	1,009
2,918	-2,777	6,39	1,000
2,918	-3,170	6,00	1,000
2,918	-3,380	5,79	1,000
2,918	-3,630	5,54	1,000
2,918	-3,945	5,22	1,000
2,918	-4,273	4,89	1,000
2,893	-4,560	4,61	0,991
2,893	-5,083	4,08	0,991
2,918	-5,385	3,78	1,000
2,905	-5,779	3,39	0,996
2,905	-6,198	2,97	0,996
2,893	-6,511	2,66	0,991
2,893	-6,786	2,38	0,991
2,855	-7,034	2,13	0,978
2,867	-7,651	1,52	0,983
2,792	-8,319	0,85	0,957

Tabela B13: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de  $-6 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 13)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
4,489	3,875	12,99	0,981
4,539	3,456	12,57	0,992
4,552	3,062	12,18	0,994
4,552	2,513	11,63	0,994
4,552	1,807	10,92	0,994
4,552	1,164	10,28	0,994
4,577	0,417	9,53	1,000
4,577	-0,407	8,71	1,000
4,577	-1,547	7,57	1,000
4,577	-1,835	7,28	1,000
4,577	-2,398	6,72	1,000
4,577	-2,816	6,30	1,000
4,602	-2,987	6,13	1,005
4,602	-3,119	6,00	1,005
4,564	-3,263	5,86	0,997
4,564	-3,628	5,49	0,997
4,539	-3,787	5,33	0,992
4,564	-3,944	5,17	0,997
1,404	-5,487	3,63	0,307

Tabela B14: Resultados obtidos através de cálculos para a rotação de 1200 RPM e vazão de  $-6 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 14)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
4,501	3,836	12,95	1,003
4,489	2,630	11,75	1,000
4,489	1,189	10,31	1,000
4,489	-0,132	8,99	1,000
4,489	-1,481	7,64	1,000
4,489	-2,608	6,51	1,000
4,501	-3,067	6,05	1,003
4,501	-3,237	5,88	1,003
4,476	-3,473	5,64	0,997
4,451	-3,709	5,41	0,992
4,426	-3,866	5,45	0,986
4,124	-3,526	5,29	0,919
2,298	-3,276	5,10	0,512

Tabela B15: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1200 RPM e vazão de  $-9 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 15)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
4,497	2,932	12,06	0,997
4,497	2,344	11,47	0,997
4,497	1,662	10,79	0,997
4,497	1,086	10,21	0,997
4,510	0,535	9,66	1,000
4,510	-0,027	9,10	1,000
4,510	-0,670	8,46	1,000
4,510	-1,192	7,93	1,000
4,510	-1,913	7,21	1,000
4,510	-2,489	6,64	1,000
4,510	-3,171	5,95	1,000
4,510	-3,759	5,37	1,000
4,510	-4,219	4,91	1,000
4,371	-5,345	3,78	0,969
4,296	-5,646	3,48	0,952
3,716	-6,328	2,80	0,824

Tabela B16: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1200 RPM e vazão de  $-9 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 16)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
4,434	2,932	12,06	1,000
4,434	1,021	10,15	1,000
4,434	-0,001	9,12	1,000
4,459	-1,258	7,87	1,006
4,434	-2,450	6,68	1,000
4,409	-3,170	5,96	0,994
4,409	-3,472	5,65	0,994
4,396	-3,723	5,40	0,991
4,371	-4,234	4,89	0,986
4,371	-4,455	4,67	0,986
4,346	-4,731	4,39	0,980
4,346	-4,967	4,16	0,980
4,296	-5,229	3,90	0,969
4,245	-5,491	3,63	0,957
4,031	-5,858	3,27	0,909
3,653	-6,315	2,81	0,824



Tabela B17: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1200 RPM e vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 17)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
4,295	1,931	11,08	0,994
4,295	1,865	11,00	0,994
4,245	0,761	9,91	0,983
4,307	-0,053	9,09	0,997
4,308	-2,616	6,52	0,997
4,320	-2,757	6,38	1,000
4,320	-3,624	5,51	1,000
4,333	-3,793	5,34	1,003
4,320	-4,893	4,24	1,000
4,257	-5,679	3,47	0,985
4,245	-5,680	3,47	0,983
4,182	-6,034	3,10	0,968
4,182	-6,047	3,09	0,968
4,144	-6,142	3,01	0,959
4,093	-6,309	2,84	0,948
3,829	-6,809	2,33	0,886
3,111	-7,986	1,15	0,720
2,707	-8,627	0,51	0,627

Tabela B18: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1200 RPM e vazão de  $-12 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 18)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
4,332	1,965	11,10	0,988
4,358	0,876	10,01	0,994
4,358	-0,224	8,91	0,994
4,358	-1,429	7,71	0,994
4,383	-2,633	6,50	1,000
4,383	-3,406	5,73	1,000
4,383	-3,918	5,22	1,000
4,383	-4,207	4,93	1,000
4,383	-4,416	4,72	1,000
4,332	-4,889	4,25	0,988
4,345	-5,071	4,07	0,991
4,295	-5,373	3,76	0,980
4,269	-5,568	3,57	0,974
4,257	-5,725	3,41	0,971
4,194	-5,948	3,19	0,957
4,106	-6,275	2,86	0,937
3,841	-6,772	2,36	0,876
3,527	-7,415	1,72	0,805

Tabela B19: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1200 RPM e vazão de  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 19)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
4,322	0,745	9,90	1,000
4,322	0,078	9,23	1,000
4,322	-0,499	8,65	1,000
4,322	-1,088	8,06	1,000
4,297	-1,900	7,25	0,994
4,322	-2,306	6,84	1,000
4,322	-2,817	6,33	1,000
4,322	-3,445	5,71	1,000
4,322	-4,181	4,97	1,000
4,234	-5,097	4,05	0,980
4,184	-5,608	3,54	0,968
4,159	-6,419	2,73	0,962
3,806	-7,716	1,43	0,881

Tabela B20: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1200 RPM e vazão de  $-15 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 20)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
4,297	0,588	9,74	1,000
4,284	-0,001	9,15	0,997
4,310	-1,193	7,96	1,003
4,297	-2,334	6,82	1,000
4,284	-3,225	5,93	0,997
4,297	-3,630	5,52	1,000
4,297	-3,892	5,26	1,000
4,310	-4,088	5,06	1,003
4,297	-4,245	4,91	1,000
4,347	-4,406	4,74	1,012
4,284	-4,667	4,48	0,997
4,297	-4,851	4,30	1,000
4,272	-5,125	4,03	0,994
4,234	-5,424	3,73	0,985
4,209	-5,555	3,60	0,979
4,159	-5,856	3,29	0,968
4,121	-6,158	2,99	0,959
4,083	-6,459	2,69	0,950
4,007	-6,799	2,35	0,933
3,957	-7,126	2,02	0,921
3,730	-7,835	1,32	0,868

Tabela B21: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1200 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 21)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
4,139	-0,964	8,19	0,997
4,152	-1,920	7,24	1,000
4,152	-2,562	6,59	1,000
4,164	-2,810	6,35	1,003
4,139	-3,925	5,23	0,997
4,152	-4,998	4,16	1,000
4,051	-6,321	2,84	0,976
4,013	-7,198	1,96	0,967

Tabela B22: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1200 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 22)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
4,240	-0,984	8,17	0,997
4,252	-1,666	7,49	1,000
4,252	-1,954	7,20	1,000
4,252	-2,347	6,81	1,000
4,252	-2,988	6,17	1,000
4,252	-3,408	5,75	1,000
4,252	-4,311	4,85	1,000
4,252	-4,600	4,56	1,000
4,252	-5,111	4,05	1,000
4,164	-5,919	3,24	0,979
4,101	-6,642	2,52	0,964
4,064	-7,285	1,87	0,956
3,963	-8,031	1,13	0,932

Tabela B23: Resultados obtidos através de cálculos para  
a rotação de 1200 RPM e vazão de  $-18 \text{ m}^3/\text{h}$  (Teste 23)

H (m)	$h_s$ (m.c.a.)	NPSH	H/Hm
4,139	-1,762	7,41	0,994
4,139	-1,866	7,30	0,994
4,139	-2,202	6,97	0,994
4,139	-2,595	6,57	0,994
4,164	-2,883	6,28	1,000
4,164	-3,039	6,13	1,000
4,164	-3,197	5,97	1,000
4,164	-3,432	5,74	1,000
4,164	-3,758	5,41	1,000
4,189	-4,125	5,04	1,006
4,189	-4,822	4,35	1,006
4,139	-5,135	4,03	0,994
4,114	-5,386	3,78	0,988
4,064	-6,290	2,88	0,976
4,026	-6,735	2,43	0,967
4,013	-7,259	1,91	0,964
3,673	-8,003	1,16	0,882

### Anexo C - Valores de NPSH obtidos

Tabela C1: Valores de NPSH obtidos  
para a rotação de 1000 RPM

Número do teste	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	NPSH (m)
1	-6	5,6
2	-6	6,25
3	-9	3,6
4	-9	3,66
5	-12	3,4
6	-12	3,55
7	-12	3,07
8	-15	2,54
9	-15	2,74
10	-18	0,95
11	-18	1,64
12	-18	1,19

Tabela C2: Valores de NPSH obtidos  
para a rotação de 1200 RPM

Número do teste	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	NPSH (m)
13	-6	5,11
14	-6	5,26
15	-9	3,81
16	-9	3,93
17	-12	3,15
18	-12	3,39
19	-15	3,63
20	-15	3,35
21	-18	2,29
22	-18	2,79
23	-18	2,59

### Referências Bibliográficas

- ANSI/ASME Centrifugal pumps, performance test codes PTC 8.2. 1990. 78p.
- ARENS, H.G.; PORTO, R. M. Modelo numérico para a determinação e curvas adimensionais de desempenho de bombas, a partir de dados de catálogo. *Revista DAE*, n.154. 1998.
- ARNDT, R.E.A.; ELLIS, C.R.; PAUL, S. Preliminary investigation of the use of air injection to mitigate cavitation erosion. s.l.: s.ed., 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. *MB 1032 – Bombas hidráulicas de fluxo (classe C) - Ensaios de desempenho e de cavitação*. Rio de Janeiro: s.ed. 1989.
- AZEVEDO NETO, J.M. *Manual de Hidráulica*. 7.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. v.1
- BLASER, J.R.; BOULTON-STONE, J.M.; THOMS, N.H. *Bubble dynamics and interface phenomena*. London: Kluwer Academic, 1993.
- CHAUDHRY, M. H. *Applied hydraulic transients...*: s.l.: Van Nostrand Reinhold Company, 1987.
- CREDER, H. *Instalações hidráulicas e sanitárias*. 5.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1991.
- EQUIPE – BOMBAS HIDRAULICAS. *Manual técnico e curvas características, bombas centrifugas*.

- GIKAS, I. *Tópicos de cavitação*. São Paulo, 1986. 271p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HICKS, T. G.; EDWARDS, T.W. *Pump application engineering*. New York: McGraw Hill, 1971.
- INNOCENTI, J. R. *Utilização de seis pontos particulares para melhorar a estimativa das curvas completas de bombas centrífugas*. São Carlos, 1997. 82p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO DIS 2548 – Pumps – Code for acceptance tests class C*.
- KERR, S. L. ; Determination of the relative resistance to cavitation erosion by vibratory method – Trans. ASME, Vol 59.
- KNAPP, R. T. ; DAILY, J. W.; HAMMITT, F. G. *Cavitation*. New York: MCGraw Hill, 1970.
- KSB – BOMBAS HIDRÁULICAS S. A. *Manual técnico e curvas características, bombas centrífugas*. 1985.
- LAURIA, D. *Máquinas de fluxo*. São Paulo: Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 1997
- LUCARELLI, D. L. *Bombas e sistemas de recalque CETESB*. São Paulo: s.ed., 1974.
- MACYNTIRE, A. J. *Bombas e instalações de bombeamento*. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1987. 798p.

- MORAES JUNIOR., D. *Transporte de líquido e gases*. São Carlos: UFSCar , 1988. 149p. v.1: Transporte de líquidos : bombas.
- MOUSSON, J. M., Pitting resistance of metals under cavitation conditions – Trans. ASME vol 59, 1937
- PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. *Manual de Engenharia Química*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.
- PORTO, R.M. *Cavitação em bombas*. São Carlos: Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, 1991.
- ROMA, W. N. L.; MAUAD, F. F. *Introdução às bombas hidráulicas de fluxo*. São Carlos: Universidade de São Paulo, Departamento de Hidráulica e Saneamento, 1993. 54p.
- SILVA, B. da; GRAÇA, F. das. *Uma metodologia alternativa para realização de ensaios de cavitação em bombas centrífugas de pequena altura total de elevação e estudo do coeficiente de NPSH*. São Carlos: Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, 1988.
- STEPANNOFF, A. J. *Cavitation in centrifugal pumps*. *Transactions of the Asme*, v.67, n.7, p.539-552, 1945.
- STEPANNOFF, A. J. *Centrifugal and axial flow pumps: theory design, and application*. London: Chapman and Hall, 1957.
- STEPANNOFF, A. J. *Pumps and blowers – two – phase flow*. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1965.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. *III Curso de bombas hidráulicas*. Belo Horizonte, 1972.



WOOD, G.M. et al. *Cavitation in fluid machinery*. New York: The American Society Of Mechanical Engineers, 1965.