

**UMA METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA A REALIZAÇÃO
DE ENSAIOS DE CAVITAÇÃO EM BOMBAS CENTRÍFUGAS
DE PEQUENA ALTURA TOTAL DE ELEVAÇÃO E ESTUDO DO
COEFICIENTE DE NPSH**

Fernando das Graças Braga da Silva

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

DEDALUS - Acervo - EESC



31100036428

Class.	<u>Lex - EESC</u>
Curr.	<u>S567</u> p ✓
Tombo	<u>T 215/98</u>

31100036428

st 0987517

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

S586m Silva, Fernando das Graças Braga da
Uma metodologia alternativa para a realização de ensaios de cavitação em bombas centrífugas de pequena altura total de elevação e estudo do coeficiente de NPSH / Fernando das Graças Braga da Silva. -- São Carlos, 1998.

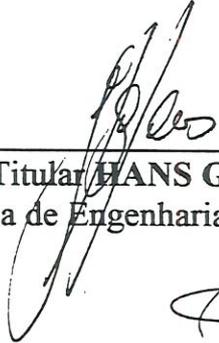
Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Hans George Arens.

1. Cavitação. 2. NPSH. 3. Bombas centrífugas.
I. Título.

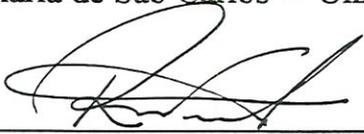
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **FERNANDO DAS GRAÇAS BRAGA DA SILVA**

Dissertação defendida e aprovada em 26-6-1998
pela Comissão Julgadora:



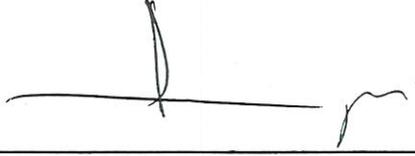
Prof. Titular **HANS GEORGE ARENS (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



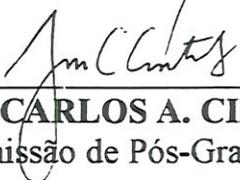
Prof. Doutor **RODRIGO DE MELO PORTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



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

À minha família, por todo
apoio e compreensão e, principalmente,
ao meu pai Armênio, pelos conselhos nos
momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela bolsa concedida.

A todos os professores, funcionários e colegas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho.

A todos os funcionários da Biblioteca Central, da Escola de Engenharia de São Carlos, que sempre contribuíram com dedicação total.

Em especial: ao Sr. Edson Cornetta, pelo apoio, engenhosidade e boa vontade que contribuíram muito na fase experimental do trabalho; ao Professor Rodrigo de Melo Porto pelo apoio dado no laboratório de Hidráulica; ao Professor Woodrow Nelson Lopes Roma e ao Sr. Valdecir Aparecido de Arruda pelos conselhos relativos a informática, a Sra. Irma Gualtieri pelo apoio durante a permanência na cidade de São Carlos e a Ana Cláudia por todo carinho e compreensão nos últimos meses.

Especialmente, agradeço ao professor, orientador e amigo Hans George Arens, pelo seu apoio total, atenção e paciência em todos os instantes do trabalho, com o qual este se tornou agradável e sem este apoio não seria possível de realiza-lo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE FIGURAS-FOTO.....	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Justificativa da pesquisa.....	3
1.3 Objetivos do trabalho	4
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1 Cavitação	5
2.1.1 Aspectos gerais de cavitação	5
A- Histórico	5
B- Introdução.....	6
C- Conceituação.....	6
D- Ocorrência de cavitação	8

E- Parâmetro de cavitação.....	14
F- Início da cavitação e seu desenvolvimento nos últimos anos	22
2.2 Considerações sobre bombas hidráulicas.....	23
2.2.1 Dedução de “Coeficiente de NPSH” e outros adimensionais ligados a bombas hidráulicas centrífugas.....	23
A- Teorema de Buckingham.....	23
B- Determinação dos coeficientes adimensionais para bombas centrífugas e o “Coeficiente de NPSH”	24
2.2.2 Generalidades.....	29
2.2.3 Classificação das máquinas hidráulicas.....	32
2.2.4 Definição de bomba hidráulica.....	33
2.2.5 Classificação geral das bombas hidráulicas.....	33
2.2.6 Classificação das bombas hidrodinâmicas ou turbo-bombas.....	35
2.2.7 Associação de bombas em série e paralelo	37
2.3 Modelos e Protótipos	39
2.3.1 Histórico	39
2.3.2 Generalidades.....	39
2.3.3 Semelhança Física.....	40
2.4 Ensaio de cavitação descritos por normas técnicas	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 Apresentação do banco de ensaios.....	44
3.2 Montagem do banco de ensaios e ensaios preliminares.....	52
3.2.1 Retirada de ar da linha (processo de sangria)	52
3.2.2 Problemas detectados durante os ensaios iniciais.....	54

3.2.3 Trabalho especial realizado na gaxeta da bomba.....	54
A- Introdução	54
B- Serviço realizado na bomba ensaiada	55
3.3 Sequência de ensaios propriamente ditos	58
3.4 Observações complementares a respeito da metodologia alternativa.....	60
3.5 Outras formas de detecção de cavitação feitas em laboratório	61
3.5.1 Observação de bolhas na superfície do reservatório que contém a tubulação de sucção e de recalque	61
3.5.2 Observação de mudança de ruído no comportamento da bomba.....	62
3.5.3 Observação de redução de vazão	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1 Introdução.....	63
4.2 Descrição das principais grandezas medidas e calculadas	64
4.3 Determinação do NPSH requerido.....	72
4.3.1 Forma de determinação do NPSH requerido	72
4.3.2 Principais dificuldades encontradas na determinação gráfica do NPSH requerido.....	73
4.3.3 Recomendações da ASME com relação aos pontos adotados.....	76
4.3.4 Considerações gerais adotadas para a determinação do NPSH requerido.....	77
4.3.5 Determinação do NPSH requerido para os casos ensaiados.....	78
4.3.6 Comentários adicionais.....	103
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	124
ANEXOS	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	170

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Duas instalações (a e b) recomendadas pelas normas técnicas	2
FIGURA 02 - Redução do NPSH, através do fechamento de válvula de controle, sendo a queda de vazão compensada com a bomba auxiliar	3
FIGURA 03 - Perda de metal provocado pela cavitação, variação com o tempo.....	11
FIGURA 04 - Perda de metal com relação ao impacto do jato de água	12
FIGURA 05 - Parâmetro de cavitação NPSH	15
FIGURA 06 - Formato geral da função NPSH requerido x Vazão	18
FIGURA 07 - Curvas $\Psi(\phi)$, $\eta(\phi)$ e $C_{NPSH}(\phi)$ de uma bomba KSB Meganorm 50-160 - $D_r=174\text{mm}$, 1750 rpm ($q_n=52\text{m}^3/\text{h}$ $h_n=12\text{m}$ $\text{pot}_n=3,2\text{ HP}$) 3500 rpm ($\text{pot}_n=24\text{ HP}$)	31
FIGURA 08 - Curvas $\Psi(\phi)$, $\eta(\phi)$ e $C_{NPSH}(\phi)$ de uma bomba KSB Meganorm 100-200 - $D_r=219\text{mm}$, 1750 rpm ($\text{pot}_n=16\text{ HP}$) 3500 rpm ($\text{pot}_n=128\text{ HP}$)	32
FIGURA 09 - Esquema de uma máquina hidráulica	33
FIGURA 10 - Sistema hidrodinâmico rotativo de uma bomba hidráulica de fluxo	34
FIGURA 11 - Esquema de sistema hidrodinâmico fixo de uma bomba hidráulica de fluxo.....	34
FIGURA 12 - Foto de bomba centrífuga.....	36
FIGURA 13 - Rotores fechados de bomba centrífuga	36
FIGURA 14 - Rotor aberto de bomba centrífuga	36
FIGURA 15 - Operação de duas bombas iguais em série e em paralelo	38
FIGURA 16 - Esquema de ensaio de cavitação através de redução de pressão na entrada da bomba através de válvula de controle, Norma - ASME.....	42

FIGURA 17 - Esquema de ensaios de cavitação, redução de pressão através de variação do nível de água (a) e válvula de controle (b), Normas ABNT E ISO	43
FIGURA 18 - Esquema de instalação para ensaio de cavitação através de válvula de controle e variação de temperatura de acordo com as normas: Normas ABNT E ISO	43
FIGURA 19 - Esquema geral do banco de ensaios.....	44
FIGURA 20 - Esquema geral isométrico do banco de ensaios.....	48
FIGURA 21 - Esquema dos manômetros utilizados em relação à bomba.....	49
FIGURA 22 - Esquema geral de peça acoplada a gaxeta	55
FIGURA 23 - Esquema de uma gaxeta	56
FIGURA 24 - Detalhe 1, da da figura 22	56
FIGURA 25 - Formato geométrico e posicionamento de entrada e saída de água.....	56
FIGURA 26 - Corte longitudinal da peça fabricada no laboratório mostrando o canal utilizado para injeção de água.....	57
FIGURA 27 - Ilustração de retentor utilizado para evitar o vazamento de água	57
FIGURA 28 - Esquema dos manômetros utilizados em relação à bomba, com indicação de grandezas envolvidas	63
FIGURA 29 - Dispersão de valores de pressão atmosférica	67
FIGURA 30 - Formato geral teórico da função $H \times N.P.S.H_d$, com uma vazão mantida constante	73
FIGURA 31 - Formato geral obtido da função $H \times NPSH_{disp}$	75
FIGURA 32 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 6 m ³ / h.....	78
FIGURA 33 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 12 m ³ / h.....	79
FIGURA 34 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 18 m ³ / h.....	80
FIGURA 35 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 24 m ³ / h - ponto desprezado	81
FIGURA 36 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 24 m ³ / h.....	82
FIGURA 37 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 24 m ³ / h - detalhe figura 36.....	82

FIGURA 38 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 30 m ³ / h	83
FIGURA 39 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 6 m ³ / h	84
FIGURA 40 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 9 m ³ / h	85
FIGURA 41 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 12 m ³ / h	86
FIGURA 42 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 15 m ³ / h	87
FIGURA 43 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 18 m ³ / h	88
FIGURA 44 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 21 m ³ / h	89
FIGURA 45 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 24 m ³ / h	90
FIGURA 46 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 27 m ³ / h	91
FIGURA 47 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 30m ³ / h	92
FIGURA 48 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 6 m ³ / h	93
FIGURA 49 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 12 m ³ / h	94
FIGURA 50 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 18 m ³ / h- posição do detalhe da figura 50	95
FIGURA 51 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 18 m ³ / h- detalhe da figura 50	95
FIGURA 52 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 18 m ³ / h- posição do detalhe da figura 52	96
FIGURA 53 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 18 m ³ / h- detalhe da figura 52	97
FIGURA 54 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 24 m ³ / h	98
FIGURA 55 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 30 m ³ / h	99
FIGURA 56 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - 1350 rpm	100
FIGURA 57 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - 1400 rpm	101
FIGURA 58 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - 1440 rpm	102
FIGURA 59 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - transformação de 1350 - 1400 rpm - pontos homólogos.....	105
FIGURA 60 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - transformação de 1440 - 1400 rpm - pontos homólogos.....	106
FIGURA 61 - Gráfico NPSH requerido x Vazão transformação de 1350 - 1400 rpm - pontos eliminados -pontos homólogos.....	107

FIGURA 62 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - transformação de 1440 - 1400 rpm - pontos eliminados -pontos homólogos.....	108
FIGURA 63 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - 1350 e 1440 rpm transformados para 1400, além do próprio 1400 rpm obtido	108
FIGURA 64 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - ajuste dos pontos relativos as rotações 1350, 1440 rpm corrigidos para 1400 rpm e os próprios valores de 1400 rpm.....	109
FIGURA 65 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - ajuste dos pontos relativos as rotações 1350, 1440 rpm corrigidos para 1400 rpm e os próprios valores de 1400 rpm, retirado os pontos	110
FIGURA 66 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão - rotações 1350, 1400 e 1440 rpm.	111
FIGURA 67 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão - rotações 1350, 1400 e 1440 rpm - pontos retirados	111
FIGURA 68 - Gráfico de $C_{NPSH} \times \phi$ - ajuste dos pontos relativos as rotações 1350, 1440 rpm corrigidos para 1400 rpm e os próprios valores de 1400 rpm, retirado os pontos	112
FIGURA 69 - Gráfico de Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão - rotações 1350, 1400 e 1440 rpm - registro de sucção totalmente aberto.....	112
FIGURA 70 - Gráfico de Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão - rotações 1350, 1400 e 1440 rpm - registro de sucção 10 voltas fechadas	113
FIGURA 71 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão e Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão para bomba (Potência :5,60 HP)	114
FIGURA 72 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão e Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão para bomba (Potência :8,10 HP).....	114

FIGURA 73 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão e Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão para bomba (Potência : 91 HP).....	115
FIGURA 74 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão e Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão para bomba (Potência : 132 HP).....	115
FIGURA 75 - Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão para diferentes Reynolds.....	116
FIGURA 76 - Cavitação incipiente, convenção visual - exemplo 1.....	119
FIGURA 77 - Cavitação incipiente, convenção visual - exemplo 2.....	119
FIGURA 78 - Cavitação incipiente e cavitação aos 3% -fonte teórica	120
FIGURA 79 - Coeficiente de NPSH x Coeficiente de Vazão , valores obtidos.....	120
FIGURA 80 - Comparação entre Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão, para cavitação incipiente (a) e cavitação aos 3% (b).....	122

LISTA DE FIGURAS-FOTO

FIGURA-FOTO A - Vertedor utilizado no reservatório.....	45
FIGURA-FOTO B - Detalhe da peça acoplada a gaxeta, tacômetro e vista geral do conjunto moto - bomba.....	45
FIGURA-FOTO C - Detalhe de entrada de tubulação de sucção e recalque da bomba no reservatório, além da tubulação de alimentação.....	47
FIGURA-FOTO D - Detalhe da bomba em série (booster) entrando no reservatório.....	47
FIGURA-FOTO E - Manômetros de coluna líquida utilizados.....	50
FIGURA-FOTO F - Medidor eletromagnético de vazão instalado.....	50
FIGURA-FOTO G - Medidor de vazão eletromagnético, painel digital de leitura.....	50
FIGURA-FOTO H - Visor digital para leitura de rotação.....	51
FIGURA-FOTO I - Painel de ligação e regulagem de rotação da bomba.....	51
FIGURA-FOTO J - Bomba de pequeno porte utilizada para retirada de ar da tubulação antes do início dos ensaio “processo de sangria”.....	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Rotações e vazões ensaiadas	59
TABELA 02 - Valores de pressão atmosférica obtidas ao longo dos ensaios	66
TABELA 03 - Original da Norma alemã (DIN), para obtenção da pressão de vapor da água	69
TABELA 04 - Pressão de vapor da água, em função da temperatura (Obtida a partir da tabela 3).....	70
TABELA 05 - Gráficos de NPSH requerido x Vazão: (a) 1400 rpm - valores obtidos - (b) 1350 rpm - valores obtidos- (c) 1350 - 1400 rpm - pontos homólogos	104
TABELA 06 - Gráficos de NPSH requerido x Vazão: (a) 1440 rpm - valores obtidos-(b) 1440 - 1400 rpm - pontos homólogos	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME - The American Society Mechanical Engineering

DIN - Deutche Industrie - Norm

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ISO - International Organization for Standardization

LISTA DE SIMBOLOS

- $^{\circ}\text{C}$ - graus celsius
 C_{NPSH} - coeficiente de NPSH
 D_r - diâmetro da tubulação de recalque, m
 D_s - diâmetro de tubulação de sucção, m
 g - aceleração da gravidade, m / s^2
 h_1 - leitura manométrica relativa a posição 1 indicada, mHg
 h_2 - leitura manométrica relativa a posição 2 indicada, mHg
 h_3 - leitura manométrica relativa a posição 3 indicada, mHg
 h_4 - leitura manométrica relativa a posição 4 indicada, mHg
 h_4' - leitura manométrica relativa a posição 4' indicada, mHg
 h_n - Altura total de elevação - ponto nominal, mca
 H - Altura total de elevação, m
 H_{atm} - Pressão atmosférica absoluta, mca
 H_{man} - altura manométrica, mca
 H_s - altura total de sucção, m
 H_v - carga de vapor absoluta, mca
 K - número tipo
 K - kelvin
 L - comprimento, m
 NPSH - Net Positive Suction Head, m
 $\text{NPSH}_{3\%}$ - NPSH requerido aos 3% de queda de energia total de elevação, m
 NPSH_d - NPSH disponível, m
 NPSH_r - NPSH requerido, m
 p_1 - pressão na entrada da bomba, mca
 p_{atm} - pressão atmosférica local, mca
 Pot - Potência, Hp
 pot_1 - potência relativa a rotação 1, Hp
 pot_2 - potência relativa a rotação 2, Hp
 Pot_n - potência - ponto nominal, Hp

P_s - pressão de sucção da bomba, mca

p_v - pressão de vapor de um líquido, mca

q - vazão, m^3 / s

q_1 - Vazão relativa a rotação 1, m^3 / s

q_2 - Vazão relativa a rotação 2, m^3 / s

q_n - Vazão - ponto nominal, m^3 / s

Q - Vazão, m^3 / s

$\frac{P_s}{\gamma}$ - energia de pressão na entrada da bomba, mca

r - raio do rotor, m

r_1 - raio do rotor de bomba 1, m

r_2 - raio do rotor de bomba 2, m

R - raio do rotor, m

Rey - Número de Reynolds

T - Temperatura ambiente, ° C

T_a - temperatura da água, ° C

$\frac{V_r^2}{2g}$ - energia cinética na saída da bomba, mca

$\frac{V_s^2}{2g}$ - energia cinética da entrada da bomba, mca

X - número tipo dividido por 2

Δh_s - perda de carga na sucção, m

Δp - diferença de pressão, Kgf / m^2

ω - rotação, rpm

ω_1 - rotação 1, rpm

ω_2 - rotação 2, rpm

ω_n - rotação - ponto nominal, rpm

ρ_v - massa específica da água em forma de vapor, Kg / m^3

ρ_a - massa específica da água, Kg / m^3

γ - peso específico do líquido, Kgf / m^3

γ_a - peso específico da água, Kgf / m^3

γ_{Hg} - peso específico do mercúrio, Kgf / m^3

η - rendimento

η_1 - rendimento da bomba 1

η_2 - rendimento da bomba 2

n_s - velocidade específica

η_n - rendimento - ponto nominal

Ψ - Coeficiente de pressão

Ψ_n - Coeficiente de pressão - ponto nominal

ϕ - Coeficiente de vazão

ϕ - Coeficiente de vazão

ϕ_n - Coeficiente de vazão - ponto nominal

μ - viscosidade dinâmica, $\text{Kg} / \text{m} \cdot \text{s}$

ν - Viscosidade cinemática da água, $10^{-6} \text{m}^2 / \text{s}$

RESUMO

Silva, Fernando das G. Braga da (1998). 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, 1998. 193 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A cavitação, sob todos os aspectos, é indesejável nas máquinas de fluxo em geral, provocando consequências como: erosão dos componentes estruturais, ruído, alteração no comportamento da máquina, etc...

A fim de caracterizar as condições para que ocorra boa “aspiração” do líquido, minimizando ou eliminando totalmente os efeitos acima mencionados, ocasionados pela cavitação sobre bombas e instalações de bombeamento, foi introduzido o conceito de *NPSH**.

As curvas de *NPSH requerido*, normalmente em função da vazão, são obtidas através de ensaios de cavitação.

Existem metodologias em normas técnicas para se realizar este ensaio, sendo que estas nem sempre são de fácil aplicação, principalmente no ensaio de modelos.

No trabalho, desenvolveu-se uma metodologia alternativa para se realizar os ensaios de cavitação de bombas de pequeno porte, fazendo uma discussão dos resultados obtidos e chegando a resultados finais muito bons. Foi introduzido também o termo Coeficiente de *NPSH* e aplicado para algumas bombas, discutindo os resultados e enfatizando a sua importância.

* Parâmetro de cavitação (Net Positive Suction Head), definido no início do século.

Palavras-chave: cavitação; bombas centrífugas; *NPSH*.

ABSTRACT

Silva, Fernando das G. Braga da . An alternative methodology to perform cavitation tests in centrifuge pumps of small total elevation height and to study *NPSH* coefficient. São Carlos, 1998. 193 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The cavitation, under all aspects, its undesirable in flow machines as a rule, provoking consequences as : structural components erosion, noise, machine behavior alterations, etc.

In order to to characterize the conditions in which good liquid “suction” occurs, minimizing or totally eliminating the effects quoted above, caused by cavitation over pumps and pumping installations, it was introduced the *NPSH** concept.

The curves of required *NPSH*, normally versus outflow, are obtained through cavitation tests.

There are methodologies in technical pattern to accomplish such test, but these don't be easy to apply, principally in model tests.

In this work, one develops an alternative methodology to accomplish the cavitation tests in small sized centrifuge pumps, doing a discussion of the obtained results and arriving to final very good results. It was introduced, too, the term *NPSH* coefficient and it was applied to some pumps, the results were discussed and its importance was emphasized.

* Cavitation Parameter (Net Positive Suction Head), defined in begin of the century.

Keywords : cavitation, centrifuge pumps, *NPSH*.

1- INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades

O levantamento das curvas de desempenho $H(q)$, $Pot(q)$ e do parâmetro de cavitação $NPSH_r(q)$ de bombas centrífugas de médio e de grande porte, muitas vezes precisa ser feito através de ensaios realizados em modelos reduzidos. A igualdade que deve existir entre os coeficientes adimensionais do protótipo e do modelo, em alguns casos, pode implicar em valores pequenos para as dimensões do próprio modelo, bem como das demais grandezas envolvidas, como a vazão q , a altura total de elevação H e a rotação ω .

Os valores baixos assumidos por q , H , Pot e ω normalmente não acarretam grandes dificuldades operacionais. Podem, entretanto, trazer dificuldades para o levantamento da curva de cavitação $NPSH_r(q)$.

De fato, rotações e alturas totais de elevação pequenas podem trazer dificuldades para se colocar a bomba em condições de cavitação, nas proximidades do seu ponto de maior rendimento.

A metodologia mais adequada, recomendada pelas normas técnicas (*ASME PTC 8.2-1990*, *ISO/DIS 2548*, *DIN 24260* e *ABNT MB 1032*) para a realização desses ensaios (figura 1.a), é utilizar-se um poço de nível variável, que permita a variação do $NPSH$ disponível na bomba, sem alterar praticamente a vazão do sistema. Isso de fato é possível desde que se

mantenha a altura geométrica nula e sem que haja mudanças no comprimento da canalização. Entretanto, se as perdas totais nas canalizações forem grandes, elas podem impedir que se atinja a vazão nominal, e a determinação do *NPSH requerido* pela bomba no seu ponto nominal ficará prejudicada.

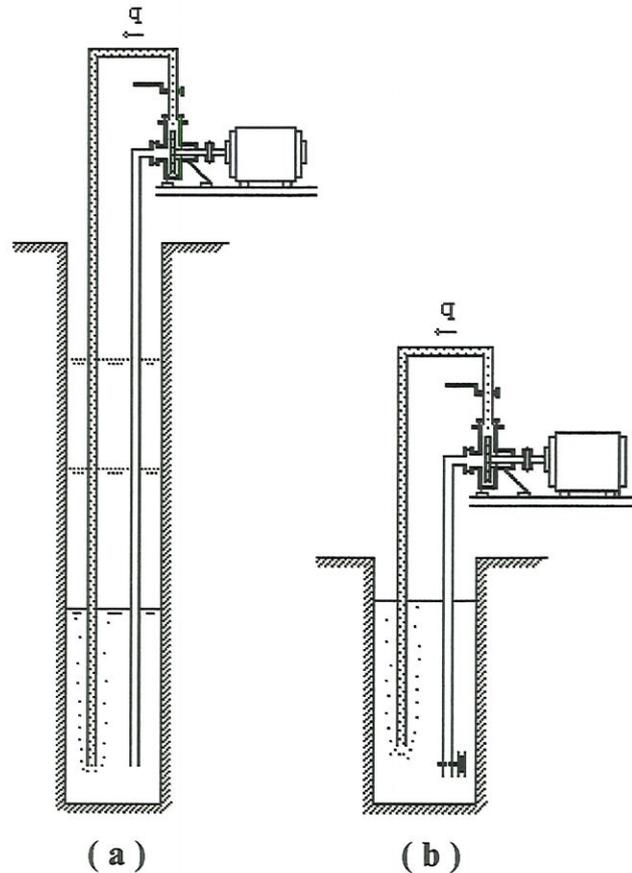


Figura 1 - Duas instalações (a e b) recomendadas pelas normas técnicas
a-) Redução do NPSH através da variação do nível de água
b-) Redução do NPSH através de fechamento de válvula de controle

Os resultados obtidos com a montagem da figura 1.b, geralmente são ainda piores, uma vez que a diminuição do $NPSH_d$ é feita através do fechamento do registro de controle, o que reduz a vazão ainda mais.

Uma solução viável para se aumentar a vazão é utilizar-se uma bomba auxiliar, inserida em série a jusante da unidade de ensaio, agindo como bomba aceleradora (booster), com seu registro atuando como elemento de controle da vazão, como mostra a figura 2.

O presente trabalho trata de um ensaio de cavitação, a ser realizado empregando-se essa metodologia, e tem como finalidade testar a confiabilidade dos principais parâmetros medidos. Além disso, mostra a dificuldade de se obter valores de $NPSH_r$, sem a realização de ensaios em laboratório.

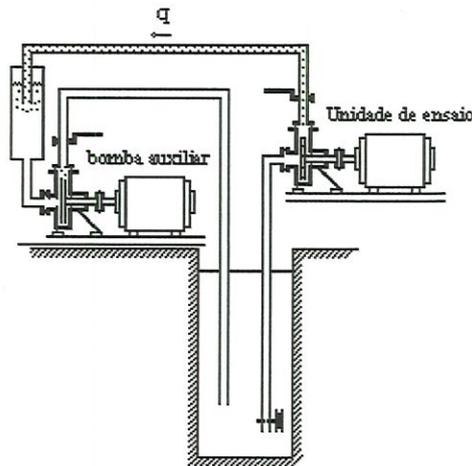


Figura 2 - Redução do $NPSH_r$, através do fechamento de válvula de controle, sendo a queda de vazão compensada com a bomba auxiliar.

1.2- Justificativa da pesquisa

Justifica-se este trabalho, no sentido de pesquisar uma nova metodologia para a realização do ensaio de cavitação de bombas centrífugas de pequena altura total de elevação.

Além do ensaio para bombas de pequena altura total de elevação, estas poderiam ser usadas para o ensaio de modelos de bombas de grande porte.

Este fato é muito interessante para os fabricantes (que normalmente realizam os ensaios de cavitação), pois, bombas de pequena altura total de elevação são de fácil disponibilidade e facilitam a execução da instalação, ao contrário das bombas de grande porte, que necessitam de espaços físicos maiores para a instalação além de outros inconvenientes e principalmente, com esta metodologia, conseguimos ensaiar bombas de pequena altura total de elevação no ponto de funcionamento ótimo, o que torna-se difícil com as metodologias tradicionais.

1.3- Objetivos do trabalho

O presente plano de pesquisa visa:

- Desenvolver e testar um banco de ensaios de cavitação de bombas de pequeno porte, usando a metodologia alternativa, conforme o esquema indicado na figura 2;
- Apresentar e aplicar o “Coeficiente de *NPSH*” a algumas bombas, mostrando sua importância.

2- REVISÃO DE LITERATURA

2.1-) Cavitação

2.1.1 -) Aspectos gerais de cavitação

A-) Histórico

Arndt¹ apud GIKAS (1986), afirma que a origem do termo “cavitação” parece se dever a R.E. Froude e está ligado às cavidades ou bolhas que, em determinadas circunstâncias surgem no seio de um líquido e que podem apresentar diversas formas e dimensões.

Wislicenus² apud GIKAS (1986), cita que o termo surgiu pela primeira vez na Inglaterra em 1894 ligado a ensaios do contratorpedeiro “Daring” analisados por “Barnaby”; cita também artigos de O.Reynolds de 1873-1874 com a provável primeira descrição do fenômeno da cavitação observada em hélices de navios.

¹ ARNDT, R.E.A. - Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. TECHNICAL PAPER. ST. ANTHONY FALLS LAB; 1981(109)

² _____ & WISLICENUS, G.F. - Cavitation State of Knowledge. Illinois, ASME Fluids Eng., 1969.

B-) Introdução

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

Máquinas e instalações hidráulicas estão sujeitas à cavitação em regiões de baixa pressão, entrada de bombas e saída de turbinas, ou quaisquer regiões do escoamento líquido onde pode-se ter pressões próximas daquela de vaporização.

O estudo de cavitação pode ser dividido em dois ramos: o fenomenológico, onde interessa a identificação e o combate à cavitação e seus efeitos e o teórico, onde interessa o equacionamento do fenômeno visando a sua quantificação sob condições de equilíbrio, desenvolvimento e colapso das bolhas. Um estudo completo envolve ambos os ramos.

C-) Conceituação

A cavitação caracteriza-se pela formação de uma fase de vapor de líquido em regiões submetidas a pressões reduzidas, mantida a temperatura do meio constante. Do ponto de vista dos processos físicos envolvidos, a cavitação e a ebulição são fenômenos semelhantes. Diferencia-os apenas o fato de um processo ser consequente à elevação de temperatura, mantida a pressão constante (ebulição); e o outro ser consequente à redução de pressão, mantida a temperatura constante.

Os processos de cavitação estão longe de uma condição de equilíbrio termodinâmico, exigindo pressões locais inferiores às de vaporização para sua ocorrência.

À temperatura de 293,3 K (20° C) a pressão de vapor da água equivale a $p_v = 2,37 \times 10^3$ Pa (aprox. -9,5 mca). Assim, a massa específica nas mesmas condições será de $\rho_v = 0,017$ Kg / m³. À mesma temperatura, a massa específica da água líquida é igual a $\rho_a = 998,3$ Kg / m³, mais de 58700 vezes superior. Na região de cavitação, durante os processos de vaporização e condensação, a massa específica de fluido varia entre ρ_v e ρ_a , o que permite avaliar a energia envolvida no processo.

A ocorrência de cavitação está condicionada à presença de núcleos livres de vapor e/ou gás no meio fluido e que participam como indutores de vaporização nas regiões submetidas às pressões de vapor do líquido. A cavitação irá apenas ocorrer se estes núcleos tornarem-se instáveis e crescerem quando submetidos a uma redução de pressão.

Com relação à constituição dos núcleos de cavitação, as primeiras tentativas de explicá-lo basearam-se no postulado da existência de buracos ou vazios no seio dos líquidos, de caráter permanente, sem nenhuma molécula em seu interior; J. FRENKEL apud GIKAS (1986), em 1946, enuncia tal postulado e admitiu que o raio desses buracos era de ordem de grandeza da metade do espaçamento médio intermolecular.

KNAPP³ apud GIKAS (1986), cita ainda com referências de Frenkel e outros pesquisadores, seus contemporâneos (W. Doring, 1937; R. Furth, 1940; J.C. Fisher, 1948) que tais vazios seriam originados por flutuações térmicas randômicas e teriam diâmetros teóricos da ordem de 10⁻⁸ cm.

³ KNAPP, R.T.; DAILY, J.W. & HAMMITT, F.G. - Cavitation. New York, McGraw-Hill, 1970.

Podem-se então considerar como núcleos de cavitação :

- Gás dissolvido ou não dissolvido, capturado em fendas existentes no líquido.
- Impurezas ou contaminantes, em suspensão ou dissolvidos no líquido; podem influir na cavitação dependendo de como alteram as propriedades físicas do líquido.

LAURIA (1997), explica que formadas nas regiões de baixa pressão do escoamento, as micro-bolhas são carregadas pelo mesmo e, atingindo campos de pressão mais elevada, onde implodem. A região de cavitação apresenta a formação e colapso de micro-bolhas de vapor e gases, induzindo vibrações de amplo espectro de frequências elevadas. Como consequência desta implosão desenvolvem-se um micro-jato que, incidindo sobre superfícies sólidas, as erode.

“Dentre as várias áreas de pesquisa, que atualmente se desenvolvem na engenharia hidráulica, a cavitação aparece como uma das mais complexas, seja pelo entendimento do fenômeno, pela variedade muito grande de parâmetros que a influenciam, pelas diversas formas em que se apresenta ou seja ainda pela extrema dificuldade de simular através de modelo e de corrigir os efeitos escala que apresenta” (BORSARI, 1986, p.6)

D-) Ocorrência de cavitação

A ocorrência de cavitação em escoamentos induz a comportamentos e ruídos bastante característicos e que são usados para a sua identificação.

A ocorrência de cavitação em máquinas e instalações hidráulicas conduz a uma deterioração do escoamento local, sendo sempre prejudicial ao mesmo.

A erosão de partes sólidas, citada anteriormente, faz sentir-se apenas após longo período de ataque devido às reduzidas dimensões dos micro-jatos e, por isso, aos reduzidos esforços por ele induzidos.

IDENTIFICAÇÃO

As principais indicações de ocorrência de cavitação são:

-Ruído típico e vibrações : De acordo com STEPANOFF (1957), isso é causado pelo súbito colapso das bolhas de vapor tão logo elas alcançam a zona de alta pressão dentro da bomba, quanto maior a bomba, maior o ruído e a vibração.

De acordo com LAURIA (1997), a cavitação desenvolvida, caracterizada por frequências de formação e colapso de bolhas na faixa audível, induz à sensação de estar acontecendo um esfregar de areia contra as paredes. Tal ruído pode e deve ser usado para identificar escoamentos cavitantes. É conveniente lembrar que, em certos casos, torna-se difícil identificar tal ruído dentre muitos que ocorrem em instalações. No início da cavitação as frequências situam-se fora da faixa audível ao ouvido humano.

-Queda de desempenho : Devido ao bloqueio parcial do escoamento líquido pelas bolhas formadas, verifica-se uma alteração para pior das condições de desempenho de máquinas e instalações.

Tal prejuízo evidencia-se em:

- **Redução da altura total de elevação:** Tal redução torna-se detectável apenas quando sob cavitação plena, sendo o padrão de referência para determinação do parâmetro *NPSH*.

- **Redução da vazão em bombas:** Pelas mesmas razões expostas no item anterior.

A redução de altura total de elevação e da vazão numa máquina, devido à cavitação, conduz a uma queda do rendimento.

O deslocamento do escoamento, assim como a instabilidade de alta frequência que caracteriza a nuvem de cavitação induzem a uma operação instável da máquina. Esta instabilidade evidencia-se em vibrações inconvenientes das partes girantes.

- **Bloqueio da vazão em válvulas:** Elevadas velocidades locais consequentes a uma grande redução de área de escoamento e pequena redução de vazão, induzem baixas pressões e o bloqueio do escoamento por parte da nuvem de cavitação. Normalmente isto ocorre devido à má seleção da válvula.

COMBATE

Identificado o caráter nefasto da cavitação, deve-se lançar mão de procedimentos que permitam eliminá-la ou, pelo menos, reduzir seus efeitos. Deve-se lembrar que existem situações em que torna-se impossível a eliminação da ocorrência de cavitação, podendo apenas tentar minimizar a sua atuação.

Os procedimentos de combate à cavitação são de vários tipos sendo que alguns deles são citados abaixo:

Aumento da pressão estática local: Este é o procedimento mais simples, onde a pressão local mais elevada irá contribuir para uma eliminação da cavitação. Apesar de ser um procedimento aparentemente simples, o aumento da pressão estática local corresponde a uma alteração na instalação (elevação

do nível do reservatório inferior ou recalque de fluido a pressões superiores à local).

Escolha de material resistente: De acordo com STEPANOFF (1957), diferentes materiais resistem à erosão por cavitação de modos diferentes.

A composição química, o tratamento térmico dos metais e também as condições de superfície influem na quantidade de material corroído pela cavitação. O comportamento dos metais sob cavitação equipara-se àquele de corrosão por fadiga. Quaisquer ranhuras, entalhes, falhas ou cantos agudos na superfície dos metais atacados por cavitação aceleram o início da formação de buracos.

SCHROETER⁴ apud STEPANOFF (1957), executou ensaios em diferentes materiais sob cavitação num conduto em forma de Tubo de Venturi construído para esse fim. Uma velocidade de 60,05 m/s foi mantida em todos os ensaios. A figura 3, mostra alguns materiais testados por Schroeter

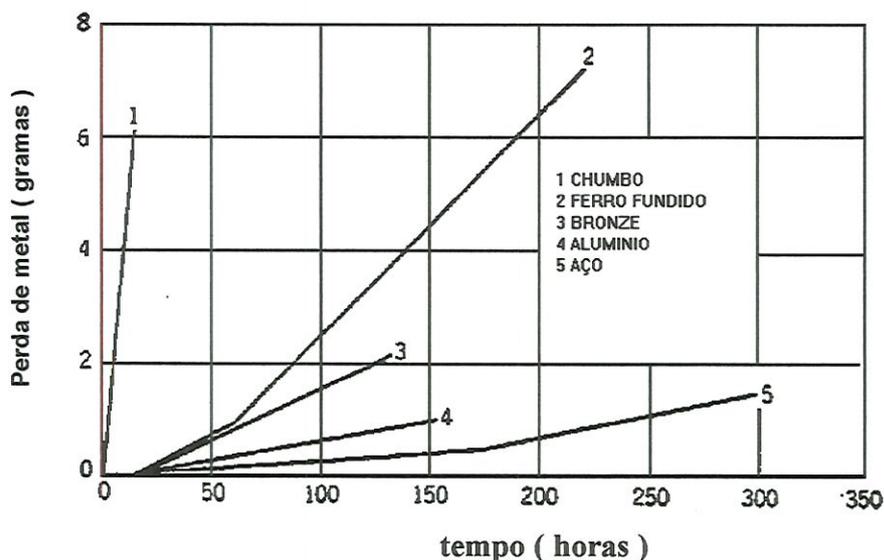


Figura 3 -Perda de metal provocado pela cavitação, variação com o tempo

⁴ H. SCHROETER and R. OLDENBOURG, - Versuche zur Frage der Werkstoffanfressung durch Kavitation.

DE HALLER apud STEPANOFF (1957), descobriu que o comportamento dos vários metais durante ensaios com impacto direto por queda e com cavitação é análogo. Em ambos os casos a destruição do metal é causada pelo “martelamento de água”. Embora o mecanismo de golpes de água contra metais seja diferente, o resultado é bem similar.

Num aparato especial parecendo uma roda de turbina a vapor, De Haller executou ensaios de erosão em um número de materiais, e seus resultados, reproduzidos na figura 4, estão de acordo com Schroeter.

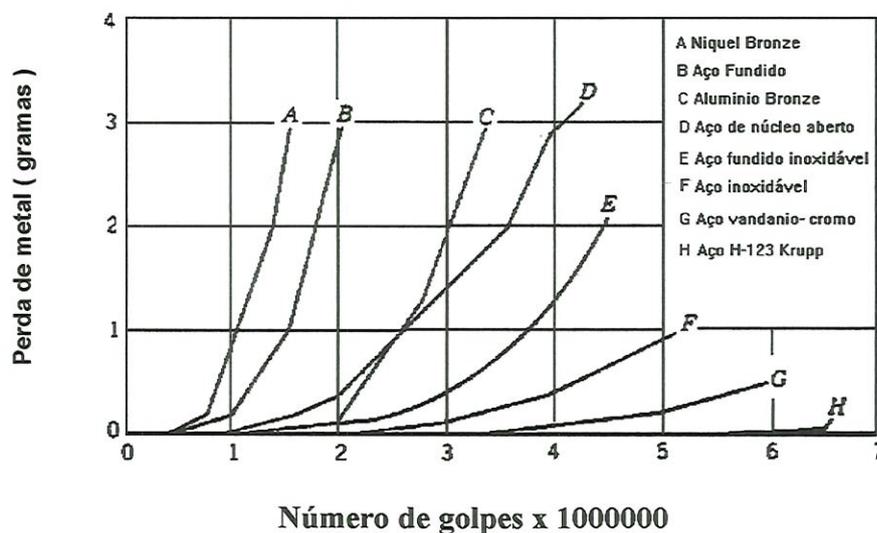


Figura 4 - Perda de metal com relação ao impacto do jato de água

O método de Haller de ensaiar materiais para resistência à cavitação requer apenas um curto tempo para produzir formação de buracos por cavitação.

KERR⁵ apud STEPANOFF (1957), ensaiou 80 materiais para cavitação em água do mar num aparato vibratório especial desenvolvido pelo “Instituto de Tecnologia de Massachusetts”. Esses ensaios mostram que o dano de cavitação foi levemente maior por água do mar do que por água doce. Foi descoberto também que a temperatura da água tem um marcante efeito sobre a perda de metal por cavitação, ou seja, com o aumento da temperatura aumenta a perda de metal por cavitação. Em maiores temperaturas a quantidade de ar dissolvido na água é reduzida, e assim o “Efeito Almofada” de golpes do “martelo de água” é reduzido, enquanto que ao mesmo tempo tende a aumentar a formação de bolhas de vapor.

MOUSSON⁶ apud STEPANOFF (1957), demonstrou o efeito benéfico da admissão de pequenas quantidades de ar, sobre o dano de metal pela cavitação.

Mousson e Kerr forneceram extensos dados de ensaio, que são muito úteis na seleção de materiais quando a cavitação é esperada.

De acordo com LAURIA (1997), o procedimento de escolha de material resistente à cavitação desconsidera as condições de escoamento, concentrando-se apenas na seleção do material mais resistente à sua ação. Com isso, a incidência de cavitação se mantém com os intervalos de manutenção mais espaçados devido à resistência do material selecionado. Ligas de aço inoxidável (Cr-Ni) é uma das mais indicadas para tal serviço.

Injeção de ar comprimido: Esta medida é tomada especificamente para atenuar os efeitos da cavitação. Este procedimento impõe um aumento localizado de pressão, enquanto o colchão de ar injetado protege a superfície contra o ataque erosivo.

⁵ KERR, S.L.- Determination of the Relative Resistance to Cavitation Erosion by Vibratory Method - Trans. A.S.M.E., Vol.59, 1937, p.373

⁶ MOUSSON, J.M. - Pitting Resistance of Metals Under Cavitation Conditions - Trans. A.S.M.E. Vol. 59, 1937, p.399.

O ar serve como “almofada”, quando as bolhas de vapor se quebram.

E-) Parâmetros de cavitação

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

Ao longo do desenvolvimento dos estudos sobre cavitação impuseram-se dois parâmetros de aplicação específica. O parâmetro utilizado para bombas hidráulicas é o *NPSH*.

- NPSH (Net Positive Suction Head)

O *NPSH* foi definido no início do século, mantendo-se inclusive como referência universal.

Normalmente, ao falarmos de *NPSH* falamos em *NPSH disponível* e *NPSH requerido*, os quais serão descritos abaixo:

NPSH disponível

O *NPSH disponível* é uma característica da instalação, definido como a energia que o líquido possui em um ponto imediatamente antes do flange de sucção da bomba, acima da pressão de vapor. Em outras palavras, corresponde à carga absoluta positiva total tomada no flange de entrada da bomba. É definido com a leitura manométrica absoluta no flange de entrada, referida a um plano definido, conforme mostrado na figura 5 subtraída da pressão de vapor .

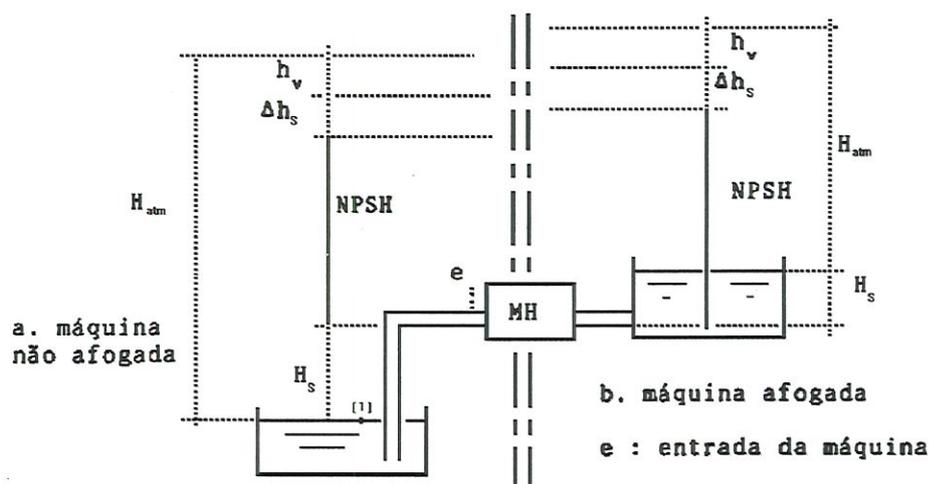


fig. 5.1 Determinação gráfica do NPSH

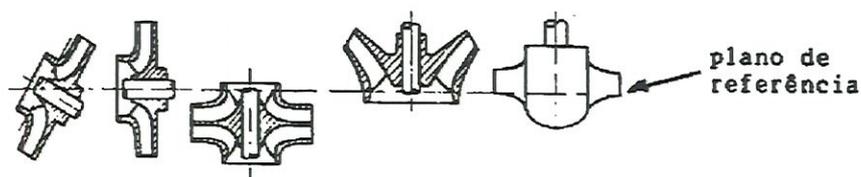


fig. 5.2 Planos de referência para NPSH

Figura 5 - Parâmetro de cavitação NPSH

Na figura 5.1, verifica-se que a participação da altura de sucção H_s na determinação do *NPSH* disponível depende do tipo de instalação da máquina. Observa-se que em máquinas afogadas H_s contribui para um aumento da carga estática, reduzindo a sensibilidade à cavitação do sistema. Em máquinas não afogadas H_s reduz a carga estática do sistema à entrada da máquina, contribuindo para um aumento de sensibilidade do sistema à cavitação.

Sendo o *NPSH* disponível uma carga absoluta, originária da pressão absoluta, deve-se conhecer a pressão atmosférica local para a sua determinação.

O levantamento experimental da curva (*NPSH* x *Q*) para cada máquina deve ser feito a partir das condições impostas pelo escoamento.

A partir de experimentos, o *NPSH disponível* é calculado por :

$$NPSH_d = \frac{P_{e_a}}{\gamma} + \frac{v_e^2}{2g} - \frac{P_{v_a}}{\gamma} \quad (1)$$

com: p_{e_a} = pressão absoluta no flange de entrada da máquina

p_{v_a} = pressão de vapor (absoluta)

v_e = velocidade no flange de entrada da máquina

γ = peso específico do líquido

Por outro lado, a máquina hidráulica deve estar associada a uma instalação. A pressão de entrada na máquina será função de cada instalação e, com isso, o próprio *NPSH*. A determinação do *NPSH* disponível a partir da instalação é feito compondo as variáveis mostradas na figura 5.1 , e expressa como segue:

Considerando o plano de referência passando por (1), conforme a figura 5.1, e aplicando a equação da energia entre a superfície do reservatório e a entrada da bomba, considerando-se a bomba não-afogada, chega-se a:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_{e_a}}{\gamma} + \frac{v_e^2}{2g} + H_s + \Delta h_s \quad (2)$$

onde:

$$\frac{P_1}{\gamma} = Ha \quad (\text{pressão atmosférica , leitura barométrica local})$$

$$\frac{v_1^2}{2g} = 0 \quad (\text{nível constante})$$

$$z_1 = 0$$

$$z_e = H_s$$

$$\Delta h_s \quad (\text{somatória de todas as perdas de carga até a entrada da bomba})$$

chamando $\frac{P_{v_a}}{\gamma}$ de h_v

fica:

$$H_a - H_s - \Delta h_s = \frac{P_{e_a}}{\gamma} + \frac{v_e^2}{2g} \quad (3)$$

Comparando (1) com (3) a expressão do *NPSH disponível* pela instalação torna-se:

$$NPSH_d = H_a - H_s - \Delta h_s - h_v \quad (4)$$

Se a bomba estiver afogada, um desenvolvimento análogo leva a:

$$NPSH_d = H_a + H_s - \Delta h_s - h_v \quad (5)$$

A equação (1) permite a determinação do *NPSH disponível* a partir das características de projeto da máquina, sendo função apenas da vazão através da máquina.

Por sua vez (4) e (5) determinam o *NPSH disponível* a partir das características construtivas da instalação, sendo função das inúmeras variáveis que participam da definição do escoamento, tais como, velocidade, diâmetro, comprimento etc...

Portanto, as expressões (1), (4) e (5) fornecem valores de *NPSH disponível*.

O *NPSH disponível* pode ser alterado a partir de um redimensionamento da instalação (quando possível).

NPSH requerido

O *NPSH requerido* “é uma característica da bomba, fornecida pelo fabricante, definida como a energia requerida pelo líquido para chegar, a partir do flange de sucção vencendo as perdas de carga dentro da bomba, ao ponto onde ganhará energia e será recalcado.

O *NPSH requerido* depende dos elementos de projeto da bomba, diâmetro do rotor, rotação, rotação específica, sendo, em geral fornecido pelo fabricante através de uma curva em função da vazão como na figura 6, constituindo-se junto com as curvas $H=f(Q)$ e $Pot=f(Q)$ uma das curvas características da bomba.

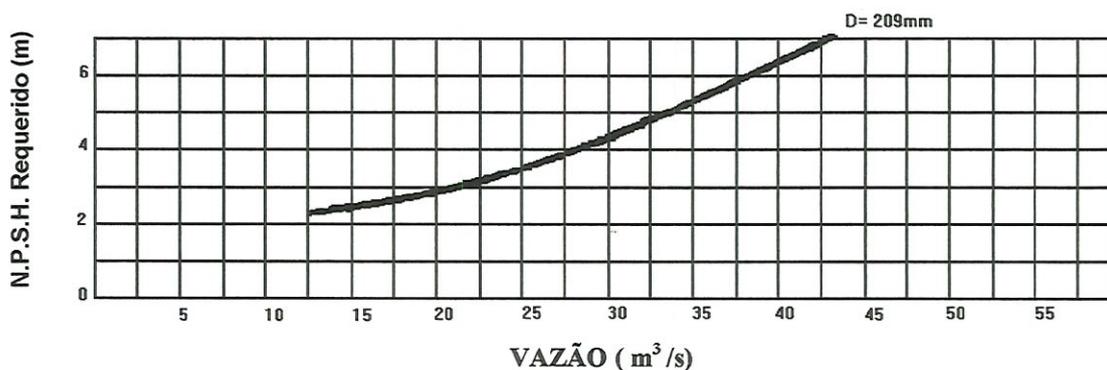


Figura 6 - Formato geral da função NPSH requerido x Vazão

Observando-se as equações (4) e (5), verifica-se que, para a pressão atmosférica, pressão de vapor e altura estática de sucção fixas, o *NPSH disponível* pela instalação diminui com o aumento da perda de carga total na tubulação de sucção. Deste modo, para um mesmo diâmetro, comprimento e rugosidade do material, o *NPSH disponível* é uma função decrescente com a vazão, diferentemente do *NPSH requerido* pela bomba, que é uma função crescente com a vazão.

Para um bom funcionamento do sistema elevatório, é necessário que, para a vazão recalçada, se verifique a desigualdade: $NPSH_d > NPSH_r$

(PORTO, 1997, p.144)

De acordo com LAURIA (1997) , da comparação entre o *NPSH requerido* e o *NPSH disponível* pode-se estabelecer critérios de análise de ocorrência de cavitação

Se:

- a-) $NPSH_d < NPSH_r$ ocorrerá cavitação
- b-) $NPSH_d > NPSH_r$ não ocorrerá cavitação
- c-) $NPSH_d = NPSH_r$ ocorrerá cavitação (limite teórico de não cavitação)

A certeza existe apenas na afirmação (a) . Em (b) a não ocorrência irá depender de quanto maior *NPSH disponível* é com relação ao *NPSH requerido*.

Para o caso (c) ocorre uma interpretação confusa, provocada pela forma de determinação do *NPSH requerido*. Esta determinação será vista a seguir, mas pode-se adiantar que os valores de *NPSH requerido* são obtidos experimentalmente em condições de cavitação plena. O desconhecimento deste fato leva alguns a considerar, erroneamente, a igualdade $NPSH_d = NPSH_r$ como indicação de não cavitação.

Desenvolvimento da cavitação

O desenvolvimento da cavitação em máquinas e instalações hidráulicas será descrito a partir do ensaio mais comum para determinação do *NPSH* de uma bomba.

Este ensaio, de forma geral, é desenvolvido a partir dos passos seguintes:

- a-) Operação da bomba em circuito fechado, alimentando o próprio reservatório de sucção;
- b-) manutenção de vazão constante durante o ensaio.

O ensaio é desenvolvido reduzindo-se o $NPSH_d$ a partir de um valor onde não ocorre cavitação. A sequência de eventos daí decorrentes é apresentada , conforme segue:

- 1- O $NPSH$ disponível é reduzido gradativamente, por meio da redução da pressão interna no reservatório de sucção;
- 2- A primeira manifestação da cavitação evidencia-se com a formação de bolhas no escoamento, em frequências inaudíveis;
- 3- Reduzindo-se ainda mais o $NPSH$ disponível, o evento seguinte corresponde ao início de geração de ruído , indicando estarem as frequências de formação e implosão das bolhas na faixa audível;
- 4- Reduções subsequentes de $NPSH_d$ permitem atingir condições de início da erosão das superfícies em contato com as bolhas, em função da resistência mecânica do material (Observe-se que até este evento, a menos do desenvolvimento do ruído típico, que pode facilmente ser coberto pelos ruídos naturais da instalação, nenhuma manifestação de detecção externa ocorreu);
- 5- Próximo às condições de maiores taxas de erosão e ruído, inicia-se o primeiro evento de fácil detecção externa, a redução da altura total de elevação consequente à cavitação;
- 6- A partir da condição 5 , observa-se para pequenas reduções de $NPSH_d$, queda acentuada da carga fornecida pela bomba.

A queda da altura total de elevação em 3% é considerada por norma como o $NPSH_r$ para a vazão de ensaio.

Deve-se notar que :

-A tendência moderna é de a substituição do termo *NPSH requerido* ($NPSH_r$), por *NPSH três por cento* ($NPSH_{3\%}$). Tal substituição evidencia a real condição de cavitação agente.

- A igualdade $NPSH_d = NPSH_r$ ($NPSH_{3\%}$) corresponde a uma situação de cavitação intensa, conforme indicado na figura 5.1

F-) Início da cavitação e seu desenvolvimento nos últimos anos (*Cavitation Inception*)

De acordo com ROOD (1991), do ponto de vista do pesquisador, é desejável identificar, entender, prever e controlar os mecanismos físicos do início da cavitação. Existe uma grande quantidade de informações empíricas nos fenômenos de início de cavitação, e muitas regras empíricas foram formuladas para orientar projetos de engenharia. As regras são geralmente baseadas nas correlações entre medidas em modelos e observações das características de escala total e seu desempenho. Devido haver uma necessidade de entender melhor os fenômenos de escala do modelo, e de fato desenvolver técnicas de previsão, as investigações durante os últimos 20 anos têm se focalizado nos efeitos ambientais e de fluido real no idealizado início da cavitação. O resultado dessas investigações foi a identificação de interações complexas de fluxo viscoso e bolhas levando ao início da cavitação. A meta para futura pesquisa de cavitação é entender e controlar esses processos complexos.

Durante os últimos 20 anos, a pesquisa em início de cavitação foi caracterizada por um desenvolvimento progressivo. A década de 70, principalmente, produziu pesquisa dirigida em descobrir e classificar efeitos reais de fluido viscoso no processo de início de cavitação, tais como separação laminar e turbulência. No começo dos anos 80, esses processos foram examinados de perto e mostraram ser mais complexos do que previamente assumido. Contudo, o maior impulso da pesquisa nos anos 80 foi dirigido em descobrir os efeitos da distribuição do tamanho e concentração dos núcleos ativos, um aspecto do processo de início que foi também mostrado como sendo mais complexo do que previamente assumido.

2.2-) Considerações sobre bombas hidráulicas

2.2.1-) Dedução de “Coeficiente de NPSH” e outros adimensionais ligados a bombas hidráulicas centrífugas

A-) Teorema de Buckingham

De uma maneira geral, quando em um fenômeno físico estiverem envolvidas n grandezas G_1, G_2, \dots, G_n , os coeficientes adimensionais procurados podem ser obtidos através do “Teorema dos coeficientes adimensionais”.

Este teorema devido a Buckingham é também conhecido como “Teorema dos π ”.

O teorema dos π pode ser enunciado da maneira que se segue:

Seja G_1, G_2, \dots, G_n um conjunto de grandezas físicas e constantes dimensionais e k o número de grandezas fundamentais em termos das quais se exprimem as n grandezas G_i . Se um fenômeno físico puder ser considerado como uma função $F(G_1, G_2, \dots, G_n) = 0$ das grandezas G_i independentes, também poderá ser considerado como uma função adimensional $\mathcal{O}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-k}) = 0$ de $n-k$ coeficientes adimensionais π_i independentes quaisquer, da forma:

$$\pi_i = A_i G_1^{\alpha_1} G_2^{\alpha_2} \dots G_n^{\alpha_n} \quad (6)$$

onde A_i é um número puro.

Uma observação importante que deve ser feita relativamente à determinação do conjunto dos $n-k$ coeficientes adimensionais π . O teorema dos π estabelece que os coeficientes π_i sejam independentes entre si, isto é, que nenhum deles possa ser obtido através dos produtos possíveis de quaisquer potências dos restantes.

Assim deve-se ter:

$$\pi_i \neq \pi_i^{\beta_1} \pi_2^{\beta_2} \dots \pi_{i-1}^{\beta_{i-1}} \pi_{i+1}^{\beta_{i+1}} \dots \pi_{n-k}^{\beta_{n-k}} \quad (7)$$

com β_j ($j=1,2,\dots,i-1,i+1,\dots,n-k$) inteiramente arbitrário.

Para a obtenção do conjunto dos coeficientes π_i independentes entre si é usual a escolha do chamado “sistema probásico” de grandezas, isto é, a escolha das grandezas envolvidas no fenômeno que podem formar um produto adimensional. Demonstra-se também que o número dessas grandezas é igual ao número de grandezas fundamentais envolvidas no fenômeno, de modo que, escolhidas k grandezas quaisquer pode-se verificar imediatamente se elas constituem ou não um sistema probásico através do exame de determinante D de ordem k cujas linhas são compostas das dimensões daquelas k grandezas ordenadamente em relação às k grandezas fundamentais.

O determinante D sendo nulo implicará na impossibilidade das grandezas escolhidas constituírem um sistema probásico. O determinante D diferente de zero significa que as grandezas envolvidas constituem o sistema probásico procurado.

B-) Determinação dos coeficientes adimensionais para bombas centrífugas e o “Coeficiente de NPSH”

No caso das bombas hidráulicas em que além das grandezas ρ , ω e R estão envolvidas a viscosidade cinemática ν , a vazão Q e a diferença de pressão ΔP correspondente à altura total de elevação, sendo seis as grandezas físicas envolvidas no fenômeno. Como tais grandezas são expressas em termos das três fundamentais: força, comprimento e tempo, três coeficientes adimensionais podem descrever o fenômeno.

Escolhendo o sistema ρ , ω e R como probásico e combinando-o com cada uma das restantes grandezas se obtém o conjunto dos coeficientes adimensionais:

$$\pi_1 = \rho^{\alpha_1} \omega^{\alpha_2} R^{\alpha_3} \Delta P \quad (8)$$

$$\pi_2 = \rho^{\beta_1} \omega^{\beta_2} R^{\beta_3} Q \quad (9)$$

$$\pi_3 = \rho^{\gamma_1} \omega^{\gamma_2} R^{\gamma_3} v^{-1} \quad (10)$$

E essas equações dimensionais, adotando o sistema internacional de unidades (SI):

As unidades fundamentais são massa (M), comprimento (L) e tempo (T).

A fórmula dimensional correspondente a (8) é :

$$[\pi_1] = [\rho]^{\alpha_1} [\omega]^{\alpha_2} [R]^{\alpha_3} [\Delta P] \quad (11)$$

$$M^0 L^0 T^0 = (ML^{-3})^{\alpha_1} (T^{-1})^{\alpha_2} (L)^{\alpha_3} ML^{-1} T^{-2}$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^{\alpha_1} L^{-3\alpha_1} T^{-\alpha_2} L^{\alpha_3} ML^{-1} T^{-2}$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^{\alpha_1+1} L^{-3\alpha_1+\alpha_3-1} T^{-\alpha_2-2}$$

Da homogeneidade dimensional dessa igualdade, temos:

$$\alpha_1 + 1 = 0; -3\alpha_1 + \alpha_3 - 1 = 0; -\alpha_2 - 2 = 0$$

Resolvendo o sistema de equações resulta que:

$$\alpha_1 = -1$$

$$\alpha_2 = -2$$

$$\alpha_3 = -2$$

Substituindo os valores encontrados para os α , na equação (11) obtemos:

$$\pi_1 = \rho^{-1} \omega^{-2} R^{-2} \Delta P;$$

assim:

$$\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho(\omega R)^2} \quad (12)$$

A fórmula dimensional correspondente a (9) é :

$$[\pi_2] = [\rho]^{\beta_1} [\omega]^{\beta_2} [R]^{\beta_3} Q \quad (13)$$

$$M^0 L^0 T^0 = (ML^{-3})^{\beta_1} (T^{-1})^{\beta_2} (L)^{\beta_3} L^3 T^{-1}$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^{\beta_1} L^{-3\beta_1} T^{-\beta_2} L^{\beta_3} L^3 T^{-1}$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^{\beta_1} L^{-3\beta_1 + \beta_3 + 3} T^{-\beta_2 - 1}$$

Da homogeneidade dimensional dessa igualdade, temos:

$$\beta_1 = 0; -3\beta_1 + \beta_3 + 3 = 0; -\beta_2 - 1 = 0$$

Resolvendo o sistema de equações resulta que:

$$\beta_1 = 0$$

$$\beta_2 = -1$$

$$\beta_3 = -3$$

Substituindo os valores encontrados para os β , na equação (13) obtemos:

$$\pi_2 = \rho^0 \omega^{-1} R^{-3} Q$$

assim:

$$\pi_2 = \frac{Q}{\omega R^3} \quad (14)$$

A fórmula dimensional correspondente a (10) é :

$$[\pi_3] = [\rho]^{\gamma_1} [\omega]^{\gamma_2} [R]^{\gamma_3} \nu^{-1} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 M^0 L^0 T^0 &= (ML^{-3})^{\gamma_1} (T^{-1})^{\gamma_2} (L)^{\gamma_3} (L^2 T^{-1})^{-1} \\
 M^0 L^0 T^0 &= M^{\gamma_1} L^{-3\gamma_1} T^{-\gamma_2} L^{\gamma_3} L^{-2} T \\
 M^0 L^0 T^0 &= M^{\gamma_1} L^{-3\gamma_1 + \gamma_3 - 2} T^{-\gamma_2 + 1}
 \end{aligned}$$

Da homogeneidade dimensional dessa igualdade, temos:

$$\gamma_1 = 0; -3\gamma_1 + \gamma_3 - 2 = 0; -\gamma_2 + 1 = 0$$

Resolvendo o sistema de equações resulta que:

$$\gamma_1 = 0$$

$$\gamma_2 = 1$$

$$\gamma_3 = 2$$

Substituindo os valores encontrados para os ∞ na equação (15) obtemos:

$$\pi_3 = \rho^0 \omega R^2 \nu^{-1};$$

assim:

$$\pi_3 = \frac{\omega R^2}{\nu} \quad (16)$$

O coeficiente π_1 é usualmente chamado de coeficiente de pressão e representado pela letra grega Ψ ; o coeficiente π_2 , coeficiente de vazão e representado por ϕ ; π_3 é o número de Reynolds referido a velocidade angular do rotor.

O comportamento das bombas poderá, sistematicamente, ser estudado por

$$\phi(\psi, \varphi, Re y) = 0 \quad (17)$$

Neste trabalho, tratando-se do estudo da cavitação em bombas hidráulicas centrífugas, achou-se interessante definir um coeficiente denominado coeficiente de *NPSH*.

O coeficiente de *NPSH* (C_{NPSH}) é proveniente do coeficiente de pressão definido acima.

Na definição do Coeficiente de $NPSH$, a pressão é substituída pela leitura de $NPSH$, e toda a fórmula é dividida pelo peso específico da água, resultando assim denominadores e numeradores em mca e é descrito como se segue abaixo:

Partindo da expressão π_1 ,

$$\psi = \frac{\Delta P}{\rho(\omega R)^2} \quad (18)$$

dividindo numerador e denominador pelo peso específico da água γ tem-se:

$$C_{NPSH} = \frac{\frac{\Delta P}{\gamma}}{\frac{\rho}{\gamma}(\omega R)^2} \quad (19)$$

lembrando que $\frac{\rho}{\gamma} = \frac{1}{g}$ (aceleração da gravidade) substituímos:

$$C_{NPSH} = \frac{g\Delta P}{(\omega R)^2} \quad (20)$$

e finalmente substituindo a pressão em mca por $NPSH$, também em mca , chegamos finalmente a expressão:

$$C_{NPSH} = \frac{gNPSH}{(\omega R)^2} \quad (21)$$

2.2.2-) Generalidades

O desempenho das bombas centrífugas é tradicionalmente representado pelas curvas dimensionais $H(q)$, $\eta(q)$ e $pot(q)$, tendo como parâmetro a velocidade angular da bomba ω e o raio do rotor r e onde as grandezas $q(m^3/s)$, $h(m)$, $pot(cv)$, η são respectivamente a vazão, a altura total de elevação, a potência no eixo da máquina e o rendimento. Essas curvas se transformam nas curvas adimensionais $\Psi(\phi)$ e $\eta(\phi)$, conforme deduzidas no item anterior, onde:

$$\Psi = \frac{gh}{(\omega r)^2} \quad (22)$$

$$\phi = \frac{q}{\omega r^3} \quad (23)$$

$$\eta = \frac{ghq}{pot} \quad (24)$$

e descrevem o desempenho da bomba independente das dimensões envolvidas. Se os valores de q , h , w , pot e η correspondentes ao ponto de maior rendimento (ponto nominal) forem representados por q_n , h_n , ω_n , pot_n , η_n ($\eta_n = \eta_{máx}$) segue que:

$$\Psi_n = \frac{gh_n}{(\omega_n r)^2} \quad (25)$$

$$\phi_n = \frac{q_n}{\omega_n r^3} \quad (26)$$

e

$$\eta_n = \frac{gh_n q_n}{Pot_n} \quad (27)$$

A bomba pode ainda ser caracterizada pelo parâmetro n_s (velocidade específica) obtido pelo produto $\phi_n^\alpha \psi_n^\beta$ onde α e β são calculados visando torná-lo independente das dimensões geométricas envolvidas, representadas pelo raio do rotor r . Mostra-se que:

$$n_s = \frac{\omega_n \sqrt{q_n}}{h_n^{3/4}} \quad (28)$$

Muitos fabricantes incluem nos seus catálogos técnicos uma curva adicional $NPSH_r(q)$ que fornece o mínimo valor requerido para a grandeza $NPSH$ (Net Positive Suction Head) para evitar a cavitação na máquina. É então que podemos definir o parâmetro adimensional, conforme deduzido no item anterior:

$$C_{NPSH} = \frac{g NPSH}{(\omega r)^2} \quad (29)$$

e o coeficiente C_s , que corresponde ao parâmetro n_s definido anteriormente e que está associado ao valor de $NPSHr_n$ do ponto nominal. Dessa forma C_s fica definido como

$$C_s = \frac{\omega_n \sqrt{q_n}}{NPSHr_n^{3/4}} \quad (30)$$

As expressões (22) (23) e (24) aplicadas a duas situação fisicamente semelhantes, fornecem finalmente as relações entre pontos homólogos:

$$q_2 = q_1 \frac{\omega_2}{\omega_1} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^3 \quad (31)$$

$$h_2 = h_1 \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \quad (32)$$

$$pot_2 = pot_1 \frac{\omega_2^3}{\omega_1^3} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^5 \quad (33)$$

$$\eta_2 = \eta_1 \quad (34)$$

É claro que essas expressões que interligam dois pontos homólogos quaisquer, só são válidas quando se despreza a influência do número de Reynolds $Re_y = \frac{\rho \omega r}{\mu}$, uma hipótese que nem sempre é verdadeira.

Se a influência de Re_y também for desconsiderada na curva que interliga C_{NPSH} com o coeficiente ϕ , tem-se de (29) que:

$$NPSHr_2 = NPSHr_1 \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \quad (35)$$

As figuras 7 e 8 mostram as curvas adimensionais de duas bombas centrífugas de um conhecido fabricante, calculadas a partir dos dados de catálogo

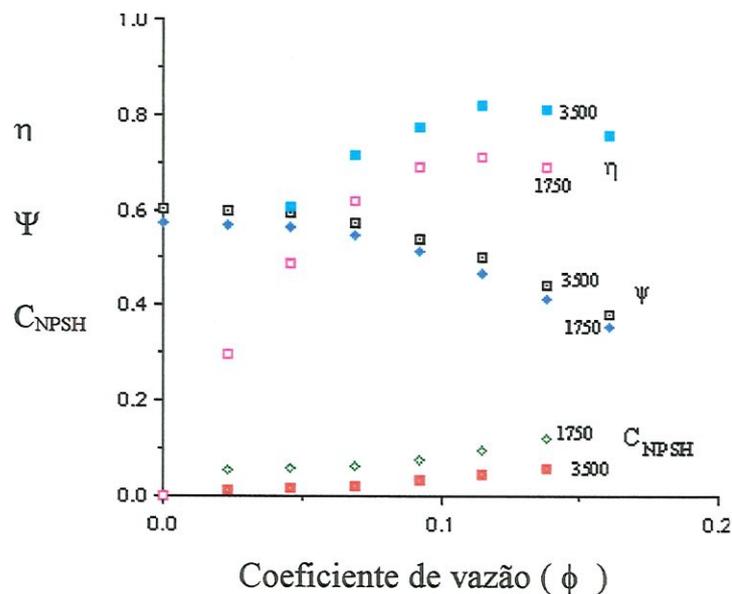


Figura 7- Curvas $\psi(\phi)$, $\eta(\phi)$ e $C_{NPSH}(\phi)$ de uma bomba KSB Meganorm 50-160 - Dr=174mm. 1750 rpm ($q_n=52m^3/h$ $h_n=12m$ $pot_n=3,2$ HP) 3500 rpm ($pot_n=24$ HP)

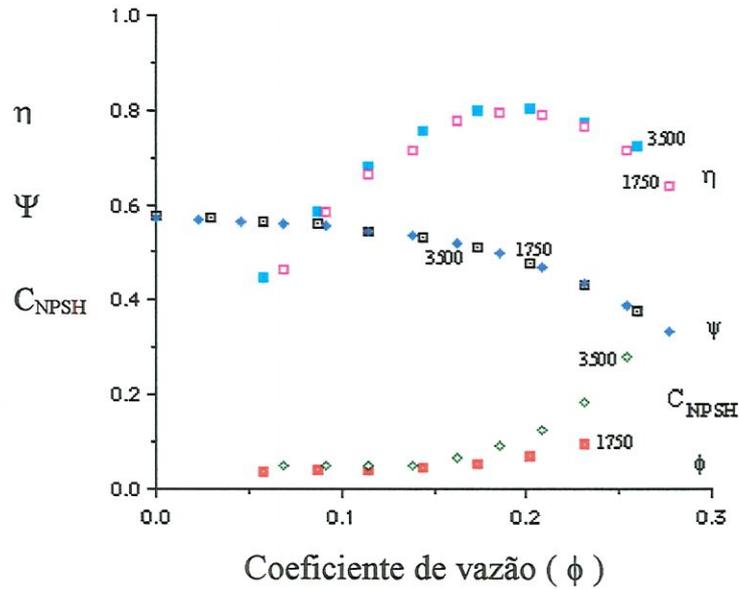


Figura 8- Curvas $\psi(\phi)$, $\eta(\phi)$ e $C_{NPSH}(\phi)$ de uma bomba KSB Meganorm 100-200 - $D_r=219\text{mm}$, 1750 rpm ($\text{pot}_n=16\text{ HP}$) 3500 rpm ($\text{pot}_n=128\text{ HP}$)

Nota-se claramente que os desvios observados com a unidade de 3,2 HP ($q_n=52\text{m}^3/\text{h}$ $H_n=12\text{m}$ $\text{pot}_n=3,2\text{ HP}$) são bem mais acentuados do que os obtidos nos ensaios de unidades maiores, principalmente os desvios do coeficiente de cavitação. Portanto, as unidades menores, quando representam um modelo qualquer, devem ser ensaiadas com cuidados redobrados.

2.2.3-) Classificação das máquinas hidráulicas

Basicamente podemos dividir em 2 grupos:

- Máquinas Motrizes
- Máquinas Geratrizes ou operatrizes

No nosso caso, portanto, interessa o estudo das máquinas geratrizes (bombas), ou seja, aquelas que recebem trabalho mecânico e o transformam em energia hidráulica, conforme indicado na figura 9.

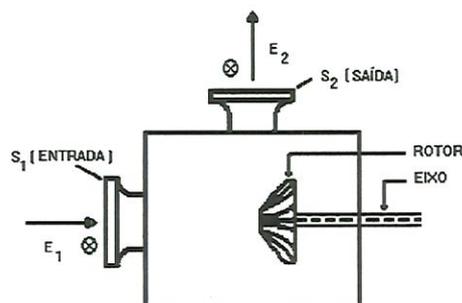


Figura 9- Esquema de uma máquina hidráulica

2.2.4-) Definição de bomba hidráulica

“Bomba hidráulica é uma máquina, através da qual escoo água, que recebe energia mecânica, fornecida por outra máquina, e a transforma em energia hidráulica, comunicando ao fluido um acréscimo de energia com a finalidade de transportá-lo de uma região de menor potencial para outra de maior potencial.

2.2.5-) Classificação geral das bombas hidráulicas

A forma de comunicação da energia ao líquido permite classificar as bombas hidráulicas em:

- Bombas de Deslocamento Positivo ou Alternativas
- Bombas Hidrodinâmicas ou Turbo Bombas
- Bombas Especiais

No trabalho, empregou-se bombas hidrodinâmicas, as quais são descritas a seguir:

Bombas Hidrodinâmicas

São bombas caracterizadas em transferir quantidades de movimento para o líquido através de um elemento rotativo dotado de pás, denominado rotor.

Este é o tipo de bomba que encontra maior aplicação na indústria em geral, e é o tipo de bomba estudado neste trabalho (figuras 10 e 11).

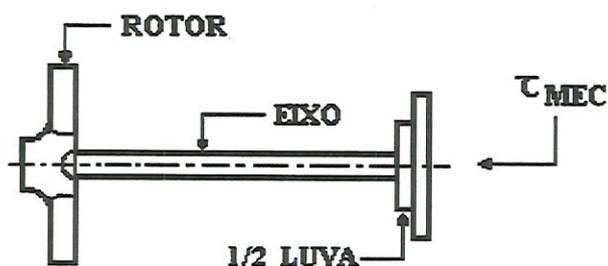


FIGURA 10- Sistema hidrodinâmico rotativo de uma bomba hidráulica de fluxo

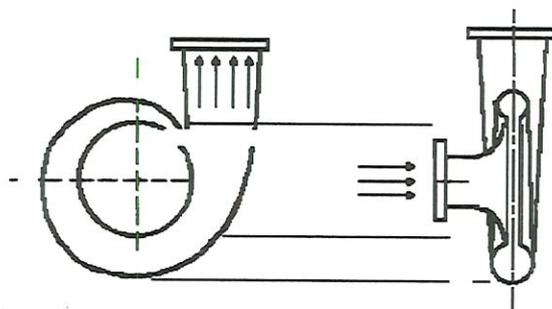


FIGURA 11 - Esquema de sistema hidrodinâmico fixo de uma bomba hidráulica de fluxo

2.2.6-) Classificação das bombas hidrodinâmicas ou turbo- Bombas

O rotor, ao transferir energia para o líquido, força o mesmo a seguir uma trajetória pelo seu interior. De acordo com a forma da trajetória as bombas são classificadas em:

- Bomba de Fluxo Misto
- Bomba Axial ou Propulsora
- Bomba Centrífuga ou Radial

Sendo então, esta última citada a de interesse, no trabalho.

Bombas Centrífugas

O fluido chega ao rotor seguindo um caminho paralelo ao eixo, sendo imediatamente defletido para uma trajetória radial, quando adentra às pás.

O líquido flue no rotor seguindo linhas de corrente contidas no plano normal ao eixo. Geralmente as bombas do tipo radial são construídas com pás de simples curvatura, podendo o rotor ser aberto ou fechado. Elas têm um largo campo de aplicação e devido à estrutura simples do rotor são adequadas à construção seriada, tornando-as de baixo custo.

Estas normalmente são aplicadas para águas limpas, utilizadas para vazões de 5 a 500 litros/segundo ou mais, e aplicadas para grandes, médias e baixas alturas manométricas” (ROMA, 1993, p.7-p.12)

Na figura 12, é mostrada a foto de uma bomba centrífuga, e nas figuras 13 e 14, rotores abertos e fechados da mesma.

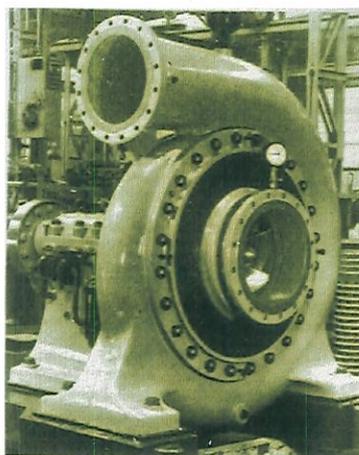


Figura 12 - Foto de bomba centrífuga



Figura 13 - Rotores fechados de bomba centrífuga



Figura 14 - Rotor abierto de bomba centrífuga

2.2.7-) Associação de bombas em série e paralelo

Associação em série

“Neste esquema a entrada da segunda bomba é conectada à saída da primeira bomba de modo que a mesma vazão passa através de cada bomba, mas as alturas de elevação de cada bomba são somadas para produzir a altura total de elevação do sistema.

Associação em paralelo

Neste esquema cada bomba recalca a mesma parte da vazão total do sistema, mas a altura total de elevação do sistema é a mesma de cada uma das bombas.

Se duas ou mais bombas funcionam em série, a curva característica do sistema é dada pela soma das ordenadas das curvas $H = f(Q)$ correspondentes, para cada bomba, em uma mesma vazão.

Se duas ou mais bombas funcionam em paralelo, a curva característica do conjunto é obtida somando-se as abcissas das curvas características $H = f(Q)$ correspondentes, para cada bomba, em uma mesma altura de elevação.

A figura 15 apresenta a construção das curvas características de um sistema em série e em paralelo, para duas bombas iguais, e os pontos de interesse.

Na figura 15, a partir da curva característica de uma bomba, a característica combinada de duas bombas iguais em série é obtida duplicando-se, na vertical, os valores de H_y , para cada vazão, enquanto que a característica da associação em paralelo, é obtida duplicando-se, na horizontal, os valores de Q_x , para cada altura total de elevação”.

(PORTO, 1997, p.133)

É importante salientar, que na associação em série o aumento de altura total de elevação é mais significativo que o aumento de vazão, contudo nesta associação, também existem um certo aumento de vazão, conforme mostrado na figura 15.

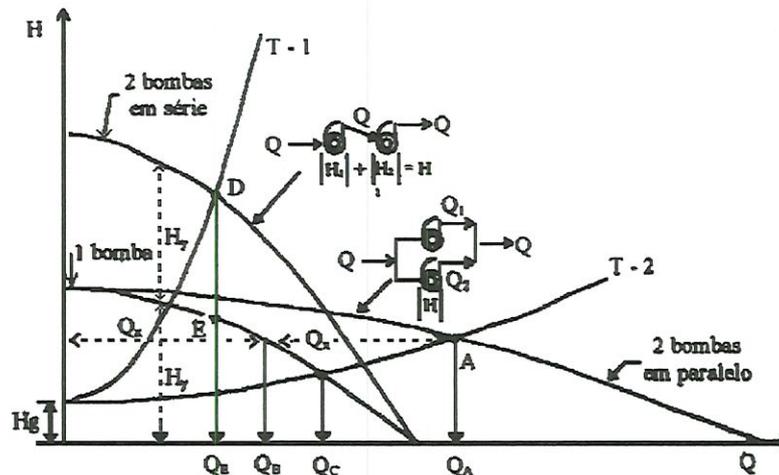


Figura 15 - Operação de duas bombas iguais em série e em paralelo

Problemas relativos a cavitação de bombas funcionando em série

YEDIDIAH (1996), comenta que, quando várias bombas operam em série, uma ou mais podem falhar se uma bomba ativa a montante é quebrada ou paralisada. A parada da bomba a montante reduz a pressão na entrada da próxima bomba causando cavitação. Se existem bombas adicionais além desta a jusante, essas podem também falhar. A primeira bomba a jusante é incapaz de desenvolver a carga requerida devido à cavitação na bomba a montante.

2.3 -) Modelos e Protótipos

2.3.1-) Histórico

MARTINS (1979), menciona que a notícia mais precisa que se tem da aplicação da teoria dos modelos remonta a Mariotte (1679) e a primeira teoria a respeito foi publicada por Newton e ampliada por Bertrand (1848).

2.3.2-) Generalidades

De acordo com SUTTON (1968), o advento de instalações de bombeamento cada vez maiores, os testes de máquinas tornaram-se impossíveis em um progressivo aumento de número de casos. Desta forma, o desempenho de bombas deve ser avaliado ou por testes no local ou por testes de modelo em escala. As dificuldades experimentais associadas a inadequados locais para os teste são bem conhecidas, e contrastam fortemente com a precisão que é possível num bom laboratório.

O principal problema é a previsão precisa de desempenho de protótipo nos testes de modelos. Um número considerável de leis de escala foram propostos ao longo dos anos , procedendo principalmente na indústria de turbinas.

De acordo com VIEIRA (1956), os modelos além de muito mais baratos que o protótipo se prestam a estudos mais completos e permitem modificações eventuais bem menos onerosas. Pode-se determinar diretamente e rapidamente as disposições à adotar para seu funcionamento, seu rendimento, sua economia etc..

Graças às informações obtidas no modelo a construção real poderá ser empreendida com segurança e rapidez, evitando tentativas e erros dispendiosos.

Os resultados das medidas experimentais, bem como as conclusões devem respeitar algumas condições ao serem transportados para o protótipo, são as chamadas condições de semelhança. As condições de semelhança traduzem-se em certas analogias entre o protótipo e o modelo: analogias geométricas, cinemática e dinâmica.

2.3.3-) Semelhança Física

Se dois sistemas forem tais que exista escala dos comprimentos e escala do tempo, eles são chamados cinematicamente semelhantes. Se ainda existir a escala das massas, eles são chamados mecanicamente semelhantes.

Todos os tipos de semelhança entre dois sistemas, além da geométrica, tais como cinemática, mecânica etc., são semelhanças físicas

É muito difícil de se conseguir a semelhança física total entre o modelo e protótipo, porém constroem-se modelos que fornecem indicações sobre o comportamento do protótipo que se aproximam bastante daquelas do comportamento do modelo.

Portanto podemos definir que modelo e protótipo são dois sistemas fisicamente semelhantes.

2.4-) Ensaio de cavitação descritos por normas técnicas

Não se encontrou na literatura uma metodologia de associação de bombas em série para realização de ensaio de cavitação de bombas centrifugas radiais.

As metodologias mais comuns para a realização dos ensaios de cavitação em bombas centrifugas são dados pelas normas:

- The American Society of Mechanical Engineers (ASME) PTC - 8.2 -1990
- International Organization for Standardization -ISO/DIS 2548 - 1990.
- Deutsche Industrie-Norm - DIN 24260 - 1952
- Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT) - MB - 1032 - 1989

De forma geral e resumida, abaixo passaremos a descrever alguns dos principais aspectos das metodologias acima indicadas clássicas, para a realização do ensaio de cavitação.

1- O tipo de ensaio mais utilizado, é o ensaio que provoca cavitação, reduzindo-se o $NPSH_d$, até que apareçam alterações mensuráveis no desempenho da bomba.

O critério de aceitação a ser utilizado, de acordo com a ABNT e ISO é de :

- queda máxima de 3%+X% na altura total de elevação ou no rendimento da bomba (n), determinada vazão.

- queda máxima de 3%+X% na vazão da bomba (Q) ou no rendimento da bomba (n), à determinada altura total de elevação .

Onde X é um adimensional que depende da: altura total de elevação, vazão, rotação da bomba e aceleração da gravidade e pode ser expresso, pela fórmula abaixo:

$$X = \frac{K}{2}, \text{ sendo}$$

$$K = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{(g \cdot H)^{\frac{3}{4}}} \quad (36)$$

A norma (ASME) considera simplesmente a queda de 3% da altura total de elevação.

2- Os métodos de variação do $NPSH_d$ basicamente utilizados nessas normas são:

A-) A bomba é instalada em sistema fechado, onde a altura total na entrada (H_I) é alterada, variando-se a pressão na entrada (p), ou a temperatura do líquido, até que ocorra cavitação (figura 18).

B-) A bomba succiona o líquido de um tanque aberto, cujo nível pode ser variado, através da tubulação livre de obstáculo (figura 17.a).

C-) A pressão na entrada da bomba (p_I) é variada através de válvula de controle manual, instalada na tubulação de sucção, a uma cota mais baixa possível (figura 17.b).

3-) O limite de erro considerado, é de 5,3% ou 0,2 m, o que for maior, desde que a medição de pressão na entrada da bomba tenha sido efetuada com manômetros de coluna líquida, que foram os utilizados.

4-) Os pontos de tomada de pressão, tanto na entrada, quanto na saída, foram localizados a dois diâmetros a montante e a jusante, respectivamente.

A seguir, são apresentados, algumas das figuras, de algumas normas.

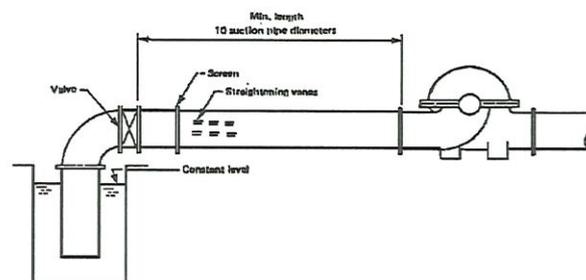


Figura 16 - Esquema de ensaio de cavitação através de redução de pressão na entrada da bomba através de válvula de controle, Norma - ASME

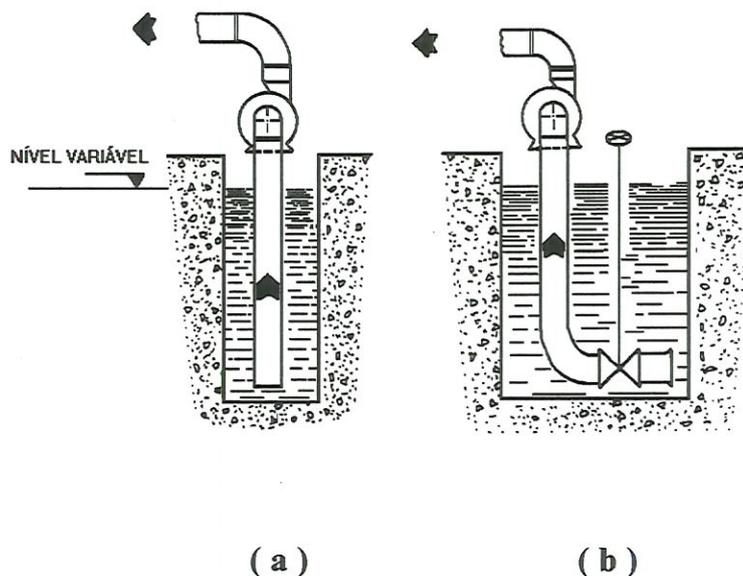


Figura 17 - Esquema de ensaios de cavitação, redução de pressão através de variação do nível de água (a) e válvula de controle (b), Normas - ABNT E ISO.

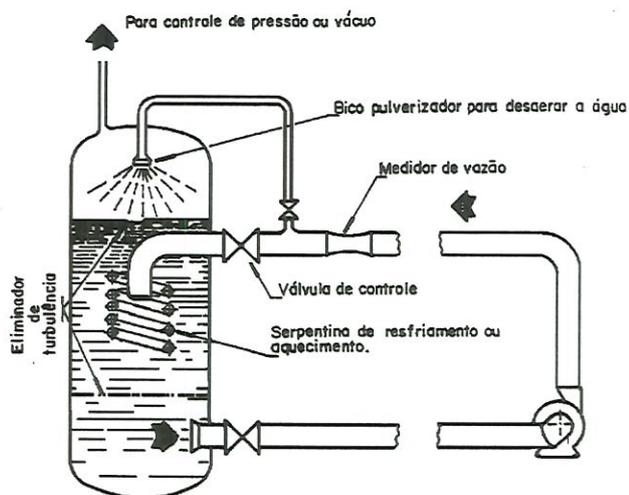


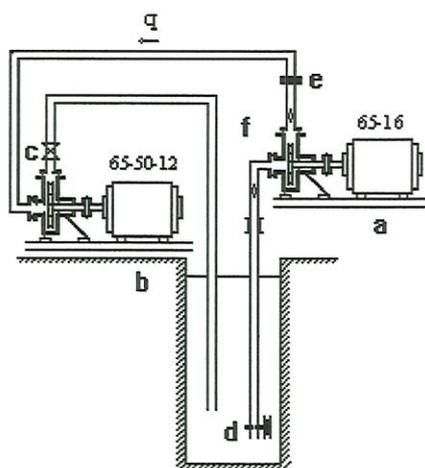
Figura 18 - Esquema de instalação para ensaio de cavitação através de válvula de controle e variação de temperatura de acordo com as normas: Normas - ABNT E ISO

3 - Materiais e métodos

3.1 - Apresentação do banco de ensaios

O banco de ensaios foi montado no Laboratório de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP e é composto, de forma geral, de um reservatório trabalhando com nível constante (vertedor, figura-foto A) e duas bombas centrífugas radiais em série (figura 19).

Foi utilizada, como unidade de ensaio, a bomba centrífuga (KSB ETA 65-16 $D_r=160$ mm - figura-foto B).



- a - bomba ensaiada
- b - bomba auxiliar
- c - registro de recalque
- d - registro de sucção
- e - medidor de vazão
- f - pontos de tomada de pressão

Figura 19 - Esquema geral do banco de ensaios



Figura-Foto A - Vertedor utilizado no reservatório



Figura-Foto B - Detalhe da peça acoplada a gaxeta, tacômetro e vista geral do conjunto moto - bomba

Pelas figuras-foto C e D, a seguir, pode-se ver as fotos da instalação indicada no esquema da figura 19.

Com esta configuração, foram realizados ensaios de cavitação, conforme recomendações de um conjunto de normas para realização deste tipo de ensaio. As normas utilizadas são: ASME, ISO/DIS, DIN e ABNT , sendo que grande parte dos procedimentos citados são comuns em todas, conforme mostrado no item 2.4

Uma bomba Equipe EQ 65-50-12 (3500 rpm) está inserida no sistema (figura-foto D), atuando como unidade auxiliar, para manter uma vazão constante durante a fase de redução do $NPSH_d$, provocada pelo fechamento do registro situado na sucção da bomba ensaiada, conforme mostrado na figura 19.

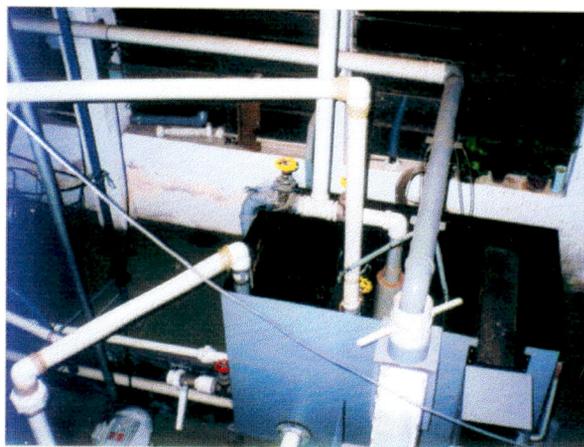


Figura-Foto C - Detalhe de entrada de tubulação de sucção e recalque da bomba no reservatório, além da tubulação de alimentação.

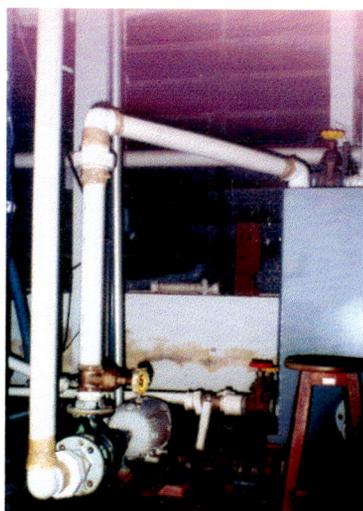
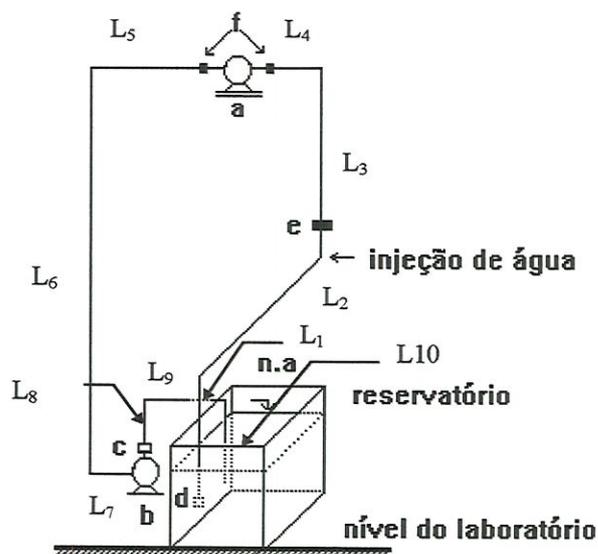


Figura-Foto D - Detalhe da bomba em série (booster) entrando no reservatório

A seguir é mostrado um esquema isométrico (figura 20) do banco de ensaios:



- a - bomba ensaiada .
- b - bomba auxiliar .
- c - registro de recalque .
- d - registro de sucção .
- e - medidor de vazão .
- f - pontos de tomada de pressão.

Figura 20- Esquema geral isométrico do banco de ensaios

onde:

$L_1 = 1,24 \text{ m}$; $L_2 = 2,16 \text{ m}$; $L_3 = 2,05 \text{ m}$; $L_4 = 0,61 \text{ m}$; $L_5 = 0,80 \text{ m}$; $L_6 = 4,17 \text{ m}$

$L_7 = 0,27 \text{ m}$; $L_8 = 0,96 \text{ m}$; $L_9 = 1,09 \text{ m}$; $L_{10} = 0,43 \text{ m}$

Obs: Com relação aos diâmetros, estes são todos de 2,5 polegadas; com exceção do diâmetro do tubo, relativo a L_4 , o qual é de 3,0 polegadas.

As medidas das grandezas físicas envolvidas q (vazão), ω (rotação), p_{atm} (pressão atmosférica local), T_a (temperatura da água) e T (temperatura ambiente) foram feitas, respectivamente, com uma instrumentação apropriada, previamente calibrada, e consta basicamente de :

- a-) piezômetros e manômetros diferenciais (figura-foto E);
- b-) um medidor de vazão eletromagnético (figuras-foto F e G);
- c-) Tacômetro eletrônico (visor digital e painel de variação de rotação, figuras-fotos H e I);
- d-) Termômetros e barômetros.

A figura 21, abaixo, mostra o posicionamento dos manômetros e respectivas tomadas de pressão, em relação à bomba.

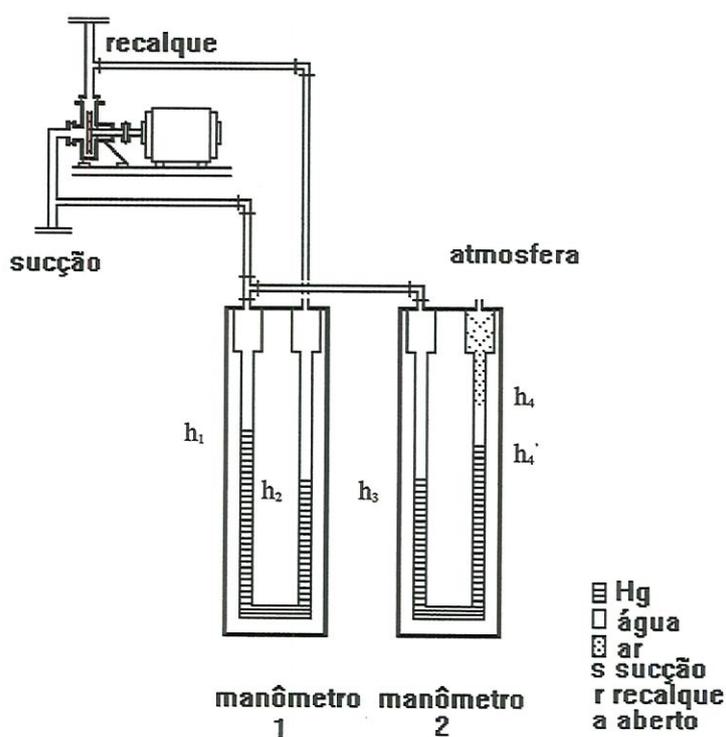


Figura 21 - Esquema dos manômetros utilizados em relação à bomba

Convém ainda mencionar que, além dos equipamentos utilizados já mencionados acima, o material da tubulação utilizada é PVC de conexões rosqueáveis ; para injeção de água para a retirada de ar da tubulação, foi utilizada uma bomba Ksb Hydrobloc 500 (figura-foto J).

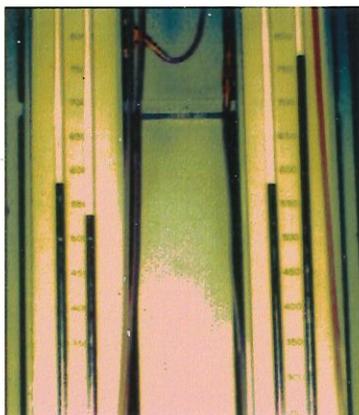


Figura-Foto E - Manômetros de coluna líquida utilizados



Figura-Foto F - Medidor eletromagnético de vazão instalado



Figura-Foto G - Medidor de vazão eletromagnético, painel digital de leitura



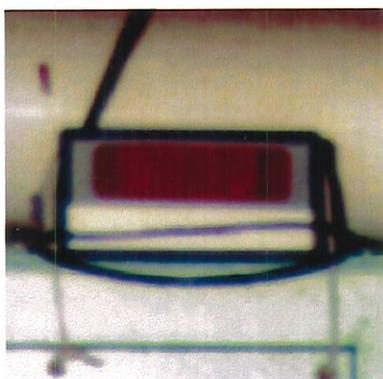


Figura-Foto H - Visor digital para leitura de rotação



Figura-Foto I - Painel de ligação e regulação de rotação da bomba

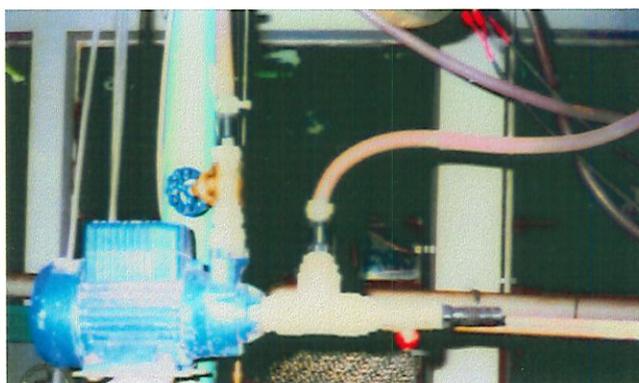


Figura-Foto J - Bomba de pequeno porte utilizada para retirada de ar da tubulação antes do início dos ensaio “processo de sangria”

3.2- Montagem do banco de ensaios e ensaios preliminares

Montado o banco de ensaios, conforme descrito no item 3.1, iniciou-se o procedimento experimental preliminar.

O primeiro procedimento então nos ensaios, envolvendo escoamento forçado, é o processo de retirada de ar de toda a linha ensaiada - “processo de sangria”, pois se este não for feito, o ar já existente na linha misturado com o líquido irá interferir no processo de leitura dos instrumentos (no caso, medidor eletromagnético de vazão, manômetros etc..)

3.2.1- Retirada de ar da linha (processo de sangria)

De acordo com as figuras 19 e 20, foi instalado no sistema uma bomba centrífuga de pequeno porte, com a finalidade de injetar água na linha.

Com a injeção de água, e através do controle dos registros (recalque e de sucção), o ar contido na canalização é eliminado.

Os pontos de tomada de pressão (sucção e recalque), conforme indicados nas figuras 19 e 20, são ligados ao manômetro de coluna líquida.

Inicialmente, deixamos os manômetros abertos, sendo assim submetidos à pressão atmosférica.

O registro de sucção é fechado para impedir que, no momento de injeção de água, conforme figuras 19 e 20, a água saia da tubulação.

O registro de recalque é também totalmente fechado, para provocar uma pressão máxima nos pontos de tomada de pressão, no momento da entrada da água injetada, provocando assim a expulsão do ar.

A vazão de água injetada pela bomba de pequeno porte deve ser apenas suficiente para expulsar o ar de linha, sendo que, se esta for exagerada, pode gerar danos nos equipamentos, além de expulsar o mercúrio dos manômetros. Por isto, esta vazão foi controlada cautelosamente.

Iniciada a injeção de água na linha através da bomba de pequeno porte, observa-se bolhas de ar saindo através das mangueiras transparentes que saem dos pontos de tomada de pressão e chegam até os “caça bolhas” dos manômetros.

Considera-se que as bolhas estejam totalmente eliminadas, a partir do momento que não se detecta mais bolhas de ar nas mangueiras e nos caça bolhas dos manômetros de mercúrio.

É conveniente se fazer uma vistoria por toda a extensão das mangueiras, e balançá-las para que, se por ventura algum ar estiver ainda na rede, este seja totalmente eliminado.

Após chegar-se à conclusão de que todo o ar fora eliminado, fecha-se os manômetros de mercúrio com cautela, juntamente com o registro da bomba de pequeno porte, para injeção de água. Isto deve ser feito com cautela, porque se a bomba para injeção de água for bruscamente fechada, a pressão no interior da tubulação pode reduzir-se a valores tais, que esta se torne menor que a pressão atmosférica e o ar pode voltar à linha. Também deve-se tomar o cuidado para que os manômetros de mercúrio não sejam fechados bruscamente, pois isto pode provocar a expulsão de mercúrio do manômetro, além de outros danos.

Durante esta operação de sangria, ligou-se a bomba ensaiada com uma baixa rotação, para também auxiliar na expulsão de ar da linha.

Após devidamente fechado os manômetros e a bomba de injeção da água desligada, são iniciados os preparativos para o ensaio.

3.2.2- Problemas detectados durante os ensaios iniciais

Nos primeiros ensaios, notou-se que, apesar de um procedimento de sangria bem feito, havia a presença de ar na linha (constatado pelas bolhas de ar identificadas visualmente nas mangueiras).

Então, concluiu-se, inicialmente, que havia entrada de ar externo da tubulação, supondo que o mesmo fosse oriundo ou das conexões da tubulação ou da gaxeta da bomba ensaiada.

Como o problema de entrada de ar na gaxeta era um problema mais delicado de se tratar, inicialmente desmontou-se a tubulação, tentando vedar as juntas com produtos indicados para este tipo de material, tais como cola e silicone .

Porém, após um adequado processo de sangria, os resultados continuaram insatisfatórios, repetindo-se, assim, o desmonte da tubulação, novamente sem sucesso.

Tentou-se até a colocação de fitas plásticas nas juntas, para impedir a entrada de ar.

Chegou-se à conclusão de que realmente o problema concentrava-se na entrada de ar na gaxeta, sendo, portanto, necessário um trabalho especial.

3.2.3- Trabalho especial realizado na gaxeta da bomba

A-) Introdução

Devido ao fato de que em um ensaio de cavitação trabalhamos com baixas pressões , é fundamental para este que a bomba utilizada seja uma bomba especial, no caso, bomba submersa.

Devido ao fato de no trabalho não se dispor desta, foi necessário se fazer alguns ajustes na bomba disponível para se chegar às características de tal bomba.

B- Serviço realizado na bomba ensaiada

Acoplou-se uma peça (figuras 22, 24, 25, e 26) no eixo da bomba próximo à gaxeta, sendo que esta permite a entrada de água por uma extremidade e saída pela outra.

O problema reside na entrada de ar através da gaxeta da bomba. O objetivo do acoplamento da peça com injeção de água é a formação de uma camada de água na entrada da gaxeta, impedindo a entrada de ar (figura 26).

O sistema é composto de uma chapa de metal (figura 22). Nesta existe um canal (figura 26), que permite que a água entre e circule pelo mesmo.

Para que a água que circula dentro da peça não saia pelo lado oposto ao desejado, foi colocado retentores (figura 27).

Na figura 23, é mostrado o esquema de uma gaxeta usual.

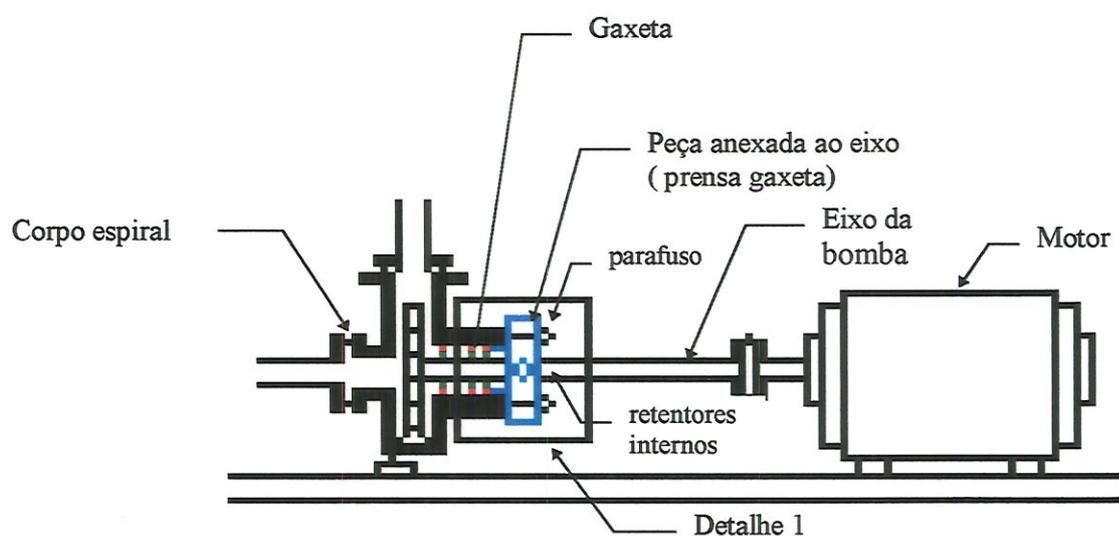


Figura 22 - Esquema geral da peça acoplada a gaxeta

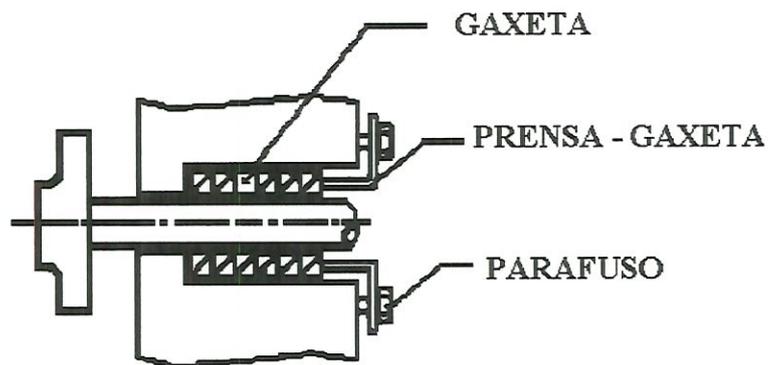
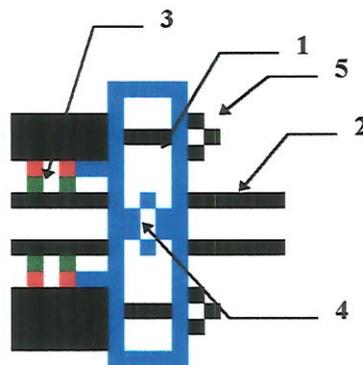


Figura 23 - Esquema de uma gaxeta



- 1 - Peça anexada (prensa - gaxeta)
- 2 - Eixo da bomba
- 3 - Gaxeta
- 4 - Orifício para entrada de água
- 5 - Parafuso

Figura 24 - Detalhe 1, da figura 22

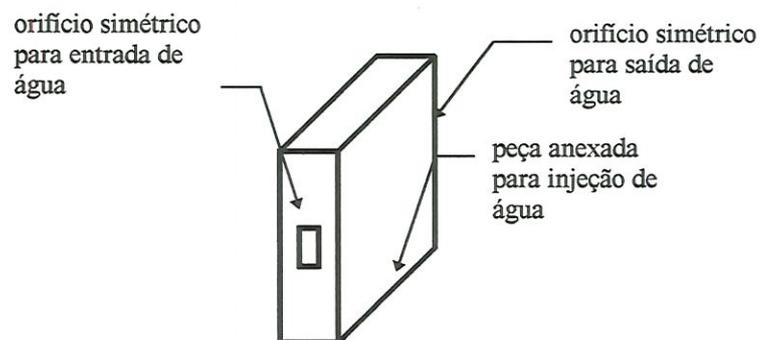


Figura 25 - Formato geométrico e posicionamento de entrada e saída de água

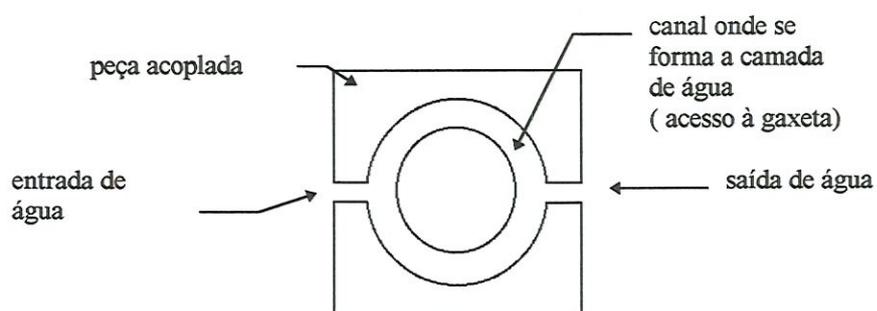


Figura 26 - Corte longitudinal da peça fabricada no laboratório mostrando o canal utilizado para injeção de água

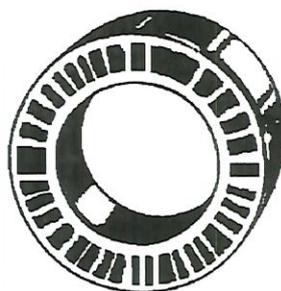
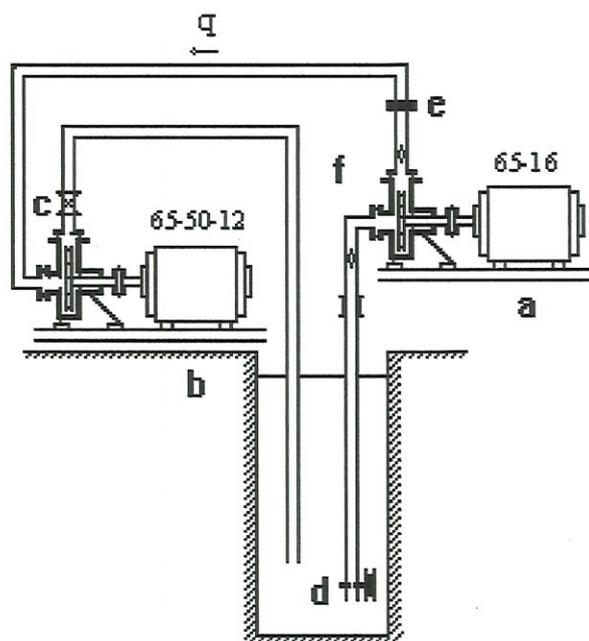


Figura 27 - Ilustração de retentor utilizado para evitar o vazamento de água

3.3 - Sequência de ensaios propriamente ditos

A partir do momento que o sistema foi devidamente “sangrado”, conforme descrito em 3.2.1, iniciaram-se os ensaios, abrindo -se totalmente o registro de sucção e aumentando a rotação da bomba ensaiada. Logo a seguir, é ligada a bomba em série e aberto o registro de recalque.



É iniciado o ensaio, com o registro de sucção totalmente aberto, usando-se o registro de recalque e o painel de controle da bomba ensaiada para controlar, respectivamente, a vazão e a rotação desejada.

Os ensaios foram realizados para as seguintes vazões e rotações, mantidas constantes durante o ensaio:

rotação 1350 rpm	rotação 1400 rpm	rotação 1440 rpm
vazão ensaiada (m ³ / h)	vazão ensaiada (m ³ / h)	vazão ensaiada (m ³ / h)
6	6	6
12	9	12
18	12	18
24	15	24
30	18	30
	21	
	24	
	27	
	30	

Tabela 1 - Rotações e vazões ensaiadas

Então fixada uma rotação para cada vazão, os ensaios são conduzidos, reduzindo-se a pressão na entrada da bomba ensaiada através do fechamento do registro situado na sucção da bomba. Cada porcentagem de fechamento deste registro equivale às leituras nos manômetros, que conduzem a valores de: H , H_s , $NPSH_d$ e $NPSH_r$.

O controle da vazão é efetuado através do controle do registro, situado no recalque da bomba; e o controle da rotação, através de indicador digital, situado no painel de controle da bomba.

A cada leitura, tomou-se a precaução de se verificar as leituras de rotação e vazão, para se ter certeza de que estas se mantiveram constantes durante o ensaio.

A cada porcentagem de fechamento do registro, tentou-se também adotar uma convenção visual no início da cavitação, observando, assim, bolhas que apareciam na superfície do reservatório.

E assim esta detecção, é apresentada nos resultados.

3.4 - Observações complementares a respeito da metodologia alternativa

De forma geral, grande parte dos detalhes relativos à instalação, como tomadas de pressão, material utilizado e o procedimento de ensaio, está de acordo com as normas existentes a respeito de cavitação.

Tratando-se de uma metodologia alternativa para a realização de ensaios de cavitação, as principais modificações existentes em relação às normas são citadas a seguir:

a-) O registro instalado na tubulação de sucção da bomba ensaiada foi colocado em posição afogado, fato este que propiciou a possibilidade de se tentar detectar as fases de desenvolvimento da cavitação, através de bolhas de ar, formadas na superfície do reservatório durante o ensaio.

Este fato é ilustrado, em forma de figura, na norma ABNT e ISO (figura 17), mas não devidamente especificado e não mencionado na norma ASME (figura 16).

b-) O processo de colocação de uma bomba em série para a realização de ensaios de cavitação, não foi encontrado em normas técnicas.

Com isto, é possível manter a vazão nominal da bomba com a redução da pressão, provocada pelo fechamento do registro situado na sucção da bomba. Pois, com o fechamento do registro situado na sucção (necessário para a ocorrência de cavitação na bomba), no caso de bombas de pequeno porte, impede que se ensaie a bomba no seu ponto nominal.

c-) Com a adoção de um registro situado próximo à bomba em série, é possível manter a vazão constante durante o ensaio de cavitação, fato este comentado em normas.

3.5 - Outras formas de detecção de cavitação feitas em laboratório

Devido ao grande interesse da detecção da cavitação, e como parte do estudo do “Coeficiente de *NPSH*”, além da tradicional detecção através do desvio de 3% da altura total de elevação ou do rendimento, que normalmente é indicado em normas e que é o ponto onde a cavitação oferece perigo à instalação, durante o ensaio buscou-se formas alternativas de se detectar a ocorrência do processo.

3.5.1- Observação de bolhas na superfície do reservatório que contém a tubulação de sucção e de recalque

Um outro método de detecção de cavitação, foi a observação de formação de bolhas de ar na superfície do reservatório.

Inicialmente, imaginou-se que podia fornecer imprecisão no resultados ao se detectar cavitação desta forma, pois as bolhas formadas pela ocorrência de cavitação poderiam ser confundidas com as bolhas que se formam quando a tubulação em circuito fechado retorna a água succionada para o reservatório, formando bolsas de ar; além do fato de o fenômeno envolver um grande numero de variáveis.

Porém, os resultados obtidos mostraram uma tendência bem definida.

3.5.2- Observação de mudança de ruído no comportamento da bomba

Outro método que se lançou mão, foi a detecção da cavitação através de ruído, mas, em acordo com a revisão de literatura, esta ficou comprometida, devido a não adoção de aparelhos especiais para gravação e ampliação do som e ao barulho natural existente no laboratório.

3.5.3- Observação de redução de vazão

Foram instalados dois medidores de vazão eletromagnéticos, um à montante da bomba e outro à jusante, para se comparar a leitura dos dois, para verificar uma eventual diferença entre leituras causada pelas bolhas de ar formadas no processo de cavitação.

Observou-se que a vazão não variou , desprezando, portanto, esta forma de detecção.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1- Introdução

De acordo com o Anexo 1, para determinadas vazões e rotações fixadas e lidas, respectivamente, no medidor eletromagnético e no tacômetro, e também fixadas porcentagens de fechamento do registro, foram feitas as leituras manométricas conforme o que é mostrado na figura abaixo, ou seja, h_1 , h_2 , h_3 , h_4 e h_4' .

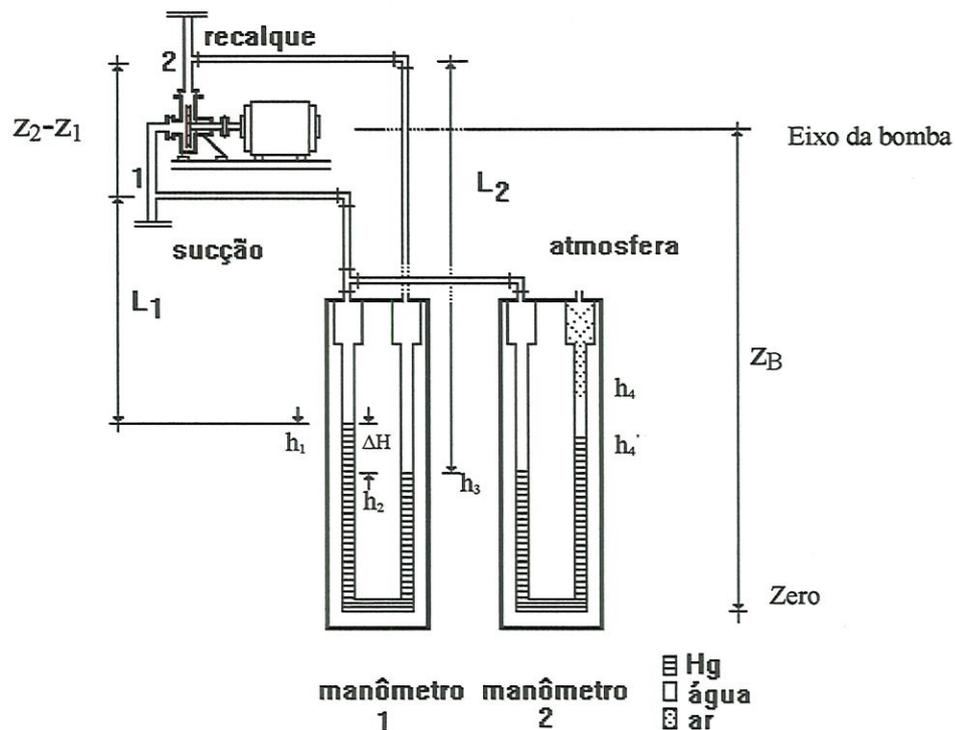


Figura 28 - Esquema dos manômetros utilizados em relação à bomba, com indicação de grandezas envolvidas

A partir das leituras manométricas mostradas acima, determinamos os valores da pressão de sucção (P_s), altura total de elevação (H), *NPSH disponível* e a partir de análise o *NPSH requerido*, através de formulações, conforme segue:

4.2 Descrição das principais grandezas medidas e calculadas

A seguir são mostradas as expressões matemáticas das grandezas:

Altura total de elevação (H)

Esta pode ser definida, aplicando manometria, entre os pontos 1 e 2, a partir da figura 28, como segue:

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + \gamma_a \cdot L_1 + \Delta H \cdot \gamma_{Hg} - \gamma_a \cdot L_2 \Rightarrow \\ p_2 - p_1 &= \gamma_a \cdot (L_1 - L_2) + \Delta H \cdot \gamma_{Hg} \end{aligned} \quad (37)$$

pela figura, podemos, também obter a seguinte relação:

$$L_2 - \Delta H - L_1 = (z_2 - z_1) \Rightarrow L_1 - L_2 = (z_1 - z_2) - \Delta H$$

substituindo, na equação (37), chegamos que:

$$\begin{aligned} p_2 - p_1 &= \gamma_a \cdot (z_1 - z_2 - \Delta H) + \Delta H \cdot \gamma_{Hg} \Rightarrow \\ p_2 + \gamma_a \cdot z_2 - p_1 - \gamma_a \cdot z_1 &= \Delta H \cdot (\gamma_{Hg} - \gamma_a) \end{aligned}$$

dividindo todos os termos por γ_a :

$$\left(\frac{p_2}{\gamma_a} + z_2 \right) - \left(\frac{p_1}{\gamma_a} + z_1 \right) = \Delta H \cdot \left(\frac{\gamma_{Hg} - \gamma_a}{\gamma_a} \right) \quad (38)$$

lembrando, que :

$$H_1 = \frac{P_1}{\gamma_a} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \Rightarrow \frac{P_1}{\gamma_a} + z_1 = H_1 - \frac{v_1^2}{2g}$$

da mesma forma:

$$H_2 = \frac{P_2}{\gamma_a} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \Rightarrow \frac{P_2}{\gamma_a} + z_2 = H_2 - \frac{v_2^2}{2g}$$

substituindo na equação 38, chegamos a :

$$H_2 - H_1 = 12,6 \cdot \Delta H + \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right) \quad (39)$$

sendo, que $H_2 - H_1$, representa a altura total (H).

portanto :

$$H = 12,6 \cdot \Delta H + \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right) \quad (40)$$

Vale lembrar, que; $(12,6 \cdot \Delta H)$, representa a altura manométrica. Devido ao fato de a altura manométrica (H_{man}), se aproximar de H , muitos fabricantes indicam esta em seus catálogos. Além do fato, que a altura total de elevação coincide com a altura manométrica, no caso de diâmetros iguais na sucção e recalque da bomba

Mas para efeito de norma trabalha-se com a altura total de elevação H , a qual será mantida como referência neste trabalho.

Pressão de sucção (P_s)

Na figura 28, aplicando-se a manometria, chega-se à expressão mostrada a seguir:

$$P_s = patm + (h_4 - h_{4'}) \cdot \gamma_a - (h_3 - h_{4'}) \cdot \gamma_{Hg} - (Z_B - h_3) \cdot \gamma_a \quad (41)$$

transformando para (mca), fica:

$$\frac{P_s}{\gamma_a} = \frac{patm}{\gamma_a} + (h_4 - h_{4'}) - (h_3 - h_{4'}) \cdot \frac{\gamma_{Hg}}{\gamma_a} - (Z_B - h_3) \quad (42)$$

ou

$$\frac{P_s}{\gamma_a} = \frac{patm}{\gamma_a} + (h_4 - h_{4'}) - 13,6 \cdot (h_3 - h_{4'}) - (Z_B - h_3) \quad (43)$$

Pressão atmosférica

Foram efetuadas muitas leituras barométricas ao longo dos ensaios, mas, devido à pouca variação das leituras, trabalhou-se com suas médias, e os resultados apresentados a seguir:

Número da Informação	Leitura Barométrica (mm Hg)	Pressão Atmosférica (mca)
1	694,5	9,44
2	696,0	9,46
3	695,3	9,45
4	692,5	9,41
5	693,1	9,42
6	690,5	9,39
7	692,6	9,41
8	692,5	9,41
9	692,5	9,41
10	694,5	9,44
11	694,5	9,44
12	696,5	9,47
13	693,5	9,43
14	696,5	9,47
15	695,5	9,45
16	693,5	9,43

Tabela 2 - Valores de pressão atmosférica local obtidos ao longo dos ensaios

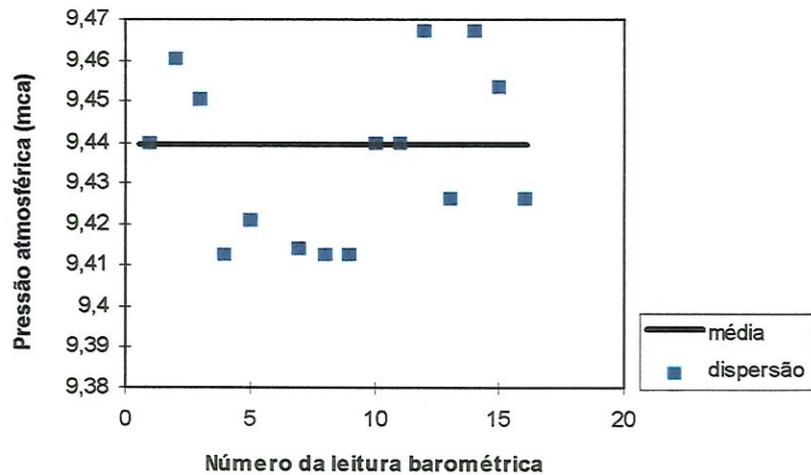


Figura 29 - Dispersão de valores de pressão atmosférica

Considerando-se, entre os valores obtidos de pressão atmosférica, um desvio padrão de 0,02313 *mca*, se poderá trabalhar com uma média de pressão atmosférica, sendo obtido o valor de 9,439 *mca*, sendo aproximado, conforme mostrado no anexo2 para 9,44 *mca*.

NPSH disponível

Dentre as diversas fórmulas para se chegar a esta grandeza, será utilizada a apresentada abaixo, que aparece na norma ISO / DIS 2548 e alterando somente os termos, de acordo com o apresentado na revisão de literatura:

$$NPSH_{disponível} = H_1 + \frac{P_b}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} \quad (44)$$

$\frac{P_b}{\gamma}$ é a pressão atmosférica (mca); $\frac{P_v}{\gamma}$ pressão de vapor do líquido (mca) e

H_1 = energia total na entrada da bomba

Pressão de vapor do líquido (pv)

A pressão de vapor da água, depende da temperatura. Percebeu-se que a temperatura da água apresentou valores entre 25 e 25,5 °C durante os ensaios, sendo adotado 25 °C, para todos os cálculos.

A partir desse valor de temperatura, ao utilizarmos as tabelas 3 e 4 a seguir, chegamos a um valor de pressão de vapor.

Complementando então, adotamos que : $\frac{P_b - P_v}{\gamma_a} = cte$, e de valor igual

a: 9,119 *mca*

Temperatura °C	Pressão de vapor da água mbar									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
-4	4,55	4,51	4,48	4,44	4,41	4,37	4,35	4,31	4,28	4,24
-3	4,89	4,87	4,83	4,79	4,76	4,72	4,68	4,65	4,61	4,59
-2	5,28	5,24	5,20	5,16	5,12	5,08	5,04	5,01	4,97	4,93
-1	5,68	5,64	5,60	5,56	5,52	5,47	5,44	5,39	5,36	5,32
0	6,11	6,07	6,03	5,97	5,93	5,89	5,84	5,80	5,76	5,72
1	6,56	6,51	6,47	6,42	6,38	6,33	6,29	6,24	6,20	6,16
2	7,05	7,11	7,16	7,21	7,25	7,31	7,36	7,41	7,47	7,52
3	7,57	7,63	7,68	7,73	7,79	7,85	7,91	7,96	8,01	8,06
4	8,13	8,19	8,24	8,31	8,36	8,43	8,48	8,53	8,60	8,65
5	8,72	8,79	8,84	8,91	8,96	9,03	9,09	9,16	9,21	9,26
6	9,35	9,41	9,48	9,53	9,61	9,66	9,75	9,81	9,86	9,95
7	10,01	10,08	10,15	10,23	10,29	10,36	10,43	10,51	10,57	10,65
8	10,72	10,80	10,87	10,95	11,01	11,08	11,17	11,24	11,32	11,40
9	11,48	11,55	11,63	11,71	11,79	11,87	11,95	12,03	12,11	12,19
10	12,27	12,36	12,44	12,52	12,61	12,69	12,77	12,87	12,95	13,04
11	13,12	13,21	13,29	13,39	13,47	13,56	13,65	13,75	13,84	13,93
12	14,01	14,11	14,20	14,29	14,39	14,48	14,59	14,68	14,77	14,87
13	14,97	15,07	15,17	15,27	15,36	15,47	15,57	15,67	15,77	15,88
14	15,97	16,08	16,19	16,29	16,40	16,51	16,61	16,72	16,83	16,93
15	17,04	17,16	17,27	17,37	17,49	17,60	17,72	17,83	17,95	18,06
16	18,17	18,29	18,41	18,52	18,64	18,76	18,88	19,00	19,12	19,25
17	19,37	19,49	19,61	19,73	19,87	19,99	20,12	20,24	20,37	20,51
18	20,63	20,76	20,89	21,03	21,16	21,29	21,43	21,56	21,69	21,83
19	21,96	22,11	22,24	22,39	22,52	22,67	22,80	22,95	23,09	23,23
20	23,37	23,52	23,67	23,81	23,96	24,11	24,25	24,41	24,56	24,71
21	24,67	25,01	25,17	25,32	25,48	25,64	25,80	25,95	26,11	26,27
22	26,43	26,60	26,76	26,92	27,08	27,25	27,41	27,59	27,75	27,92
23	28,09	28,25	28,43	28,60	28,77	28,95	29,12	29,31	29,48	29,65
24	29,84	30,01	30,19	30,37	30,56	30,75	30,92	31,11	31,29	31,48
25	31,68	31,87	32,05	32,24	32,44	32,63	32,83	33,01	33,21	33,41
26	33,61	33,81	34,01	34,21	34,41	34,61	34,83	35,03	35,24	35,44
27	35,65	35,87	36,08	36,28	36,49	36,71	36,93	37,15	37,36	37,57
28	37,80	38,03	38,24	38,47	38,69	38,92	39,15	39,37	39,60	39,83
29	40,05	40,29	40,52	40,76	41,00	41,23	41,47	41,71	41,95	42,19
30	42,43	42,68	42,92	43,17	43,41	43,67	43,92	44,17	44,43	44,68
31	44,93	45,19	45,44	45,71	45,96	46,23	46,49	46,75	47,01	47,28
32	47,56	47,83	48,09	48,37	48,64	48,92	49,19	49,47	49,75	50,03
33	50,31	50,60	50,88	51,16	51,45	51,73	52,03	52,32	52,61	52,91
34	53,20	53,51	53,80	54,11	54,41	54,71	55,01	55,32	55,63	55,93
35	56,24	56,55	56,87	57,17	57,49	57,81	58,13	58,45	58,77	59,11
36	59,43	59,76	60,08	60,41	60,75	61,08	61,41	61,75	62,08	62,43
37	62,77	63,11	63,45	63,80	64,15	64,49	64,85	65,20	65,56	65,91
38	66,27	66,63	66,99	67,35	67,72	68,08	68,45	68,83	69,19	69,56
39	69,95	70,32	70,69	71,07	71,45	71,84	72,23	72,61	73,00	73,39
40	73,79	74,17	74,57	74,97	75,37	75,77	76,17	76,59	76,99	77,40
41	77,81	78,23	78,64	79,05	79,47	79,89	80,32	80,73	81,16	81,59
42	82,03	82,45	82,89	83,32	83,76	84,20	84,64	85,08	85,53	85,97
43	86,43	86,88	87,33	87,79	88,25	88,71	89,17	89,64	90,11	90,57
44	91,04	91,52	91,99	92,47	92,95	93,43	93,91	94,40	94,88	95,37
45	95,87	96,36	96,85	97,35	97,85	98,36	98,85	99,36	99,86	100,39
46	100,89	101,41	101,93	102,45	102,97	103,51	104,04	104,57	105,09	105,63
47	106,17	106,71	107,25	107,79	108,33	108,89	109,44	109,99	110,55	111,11
48	111,67	112,23	112,80	113,37	113,93	114,51	115,08	115,65	116,24	116,83
49	117,41	118,00	118,59	119,17	119,79	120,37	120,99	121,57	122,19	122,80

Tabela 3 - Original de Norma alemã (DIN), para obtenção de valores de pressão de vapor da água

Temperatura (° C)	Pressão de vapor da água (mbar)	Pressão de vapor da água (mca)
0	6,11	0,062
1	6,56	0,067
2	7,05	0,072
3	7,57	0,077
4	8,13	0,083
5	8,72	0,089
6	9,35	0,095
7	10,01	0,102
8	10,72	0,109
9	11,48	0,117
10	12,27	0,125
11	13,12	0,134
12	14,01	0,143
13	14,97	0,153
14	15,97	0,163
15	17,04	0,174
16	18,17	0,185
17	19,37	0,197
18	20,63	0,210
19	21,96	0,224
20	23,37	0,238
21	24,87	0,253
22	26,43	0,269
23	28,09	0,286
24	29,84	0,304
25	31,68	0,321
26	33,61	0,343
27	35,65	0,363
28	37,8	0,385
29	40,05	0,408
30	42,43	0,433
31	44,93	0,458
32	47,56	0,485
33	50,31	0,513
34	53,2	0,542
35	56,24	0,573
36	59,43	0,606
37	62,77	0,640
38	66,27	0,676
39	69,95	0,713
40	73,79	0,752
41	77,81	0,793
42	82,03	0,836
43	86,43	0,881
44	91,04	0,928
45	95,87	0,977
46	100,89	1,029
47	106,17	1,082
48	111,67	1,138
49	117,41	1,197

Tabela 4 - Pressão de vapor da água, em função da temperatura (Obtida a partir da tabela 3)

Então, a partir da tabela 2 , chegamos que a pressão atmosférica média adotada é de 9,44 *mca*.

Outras grandezas utilizadas para os cálculo iniciais:

- diâmetro da tubulação de sucção = 78,5 mm;
- diâmetro da tubulação de recalque = 65,3 mm;
- medida entre o eixo da bomba e o zero dos manômetros de coluna líquida utilizados = 3,731 m (Z_B);
- raio do rotor = 80 mm;
- pressão de vapor do líquido = 0,321 *mca*
- aceleração da gravidade = 9,81 m /s²

4.3- Determinação do NPSH requerido

4.3.1 - Forma de determinação do NPSH requerido

Com relação aos ensaios de cavitação, normalmente os fabricantes fornecem em catálogos gráficos de *NPSH_r* x *Vazão*, para diversos modelos de bombas e rotações.

Então, para validar a metodologia alternativa para ensaios de cavitação é feita a análise de tais gráficos obtidos no trabalho.

No item 2.4, apresentou-se algumas maneiras de se detectar a cavitação. Entre estas, foi adotada a metodologia indicada pela ASME, ou seja:

- Traçou-se gráficos de *NPSH disponível* x *Altura total de elevação (H)*;
- Ensaio a vazão constante, ao reduzirmos gradativamente a pressão na entrada da bomba, observamos que, de acordo com a figura 30, a função se mantém, inicialmente horizontal (trecho horizontal);
- Com a redução progressiva de pressão, a função tende a decrescer (figura 30 - trecho decrescente);
- Quando a função atingir 3% de queda em relação à porção horizontal do valor da altura total de elevação, o valor de *NPSH disponível* (abscissa), correspondente ao ponto dos 3%, equivale ao *NPSH requerido*.

A figura 30 indica o comportamento geral teórico da função $H \times NPSH_d$

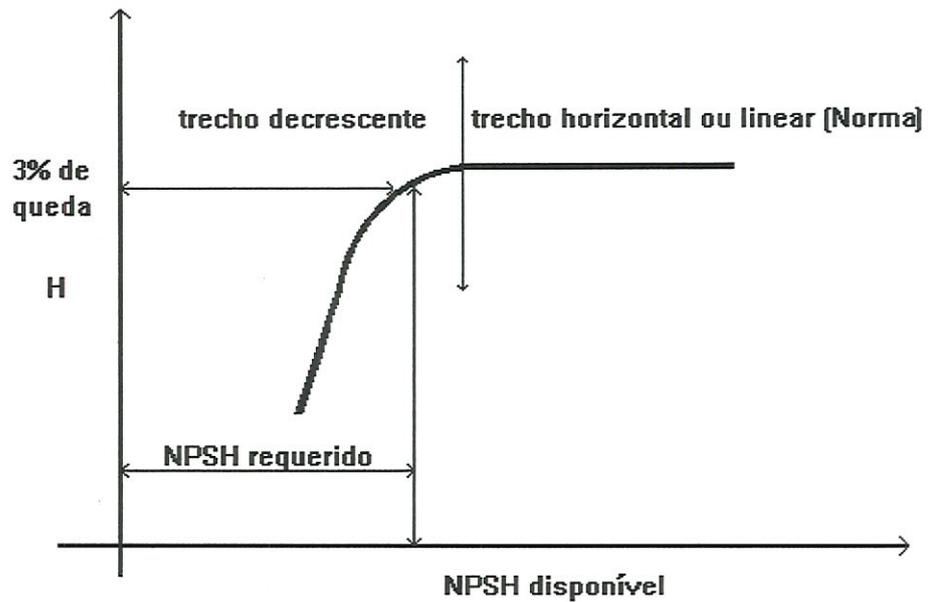


Figura 30 - Formato geral teórico da função $H \times N.P.S.H_d$, com uma vazão mantida constante

4.3.2- Principais dificuldades encontradas na determinação gráfica do NPSH requerido

Os resultados experimentais obtidos mostraram que a função $H \times NPSH_d$, não possui uma forma tão bem definida, como a mostrada na figura 30, a qual aparece em bibliografias básicas. Ou seja, o trecho horizontal não se constitui de uma linha horizontal única, mas de várias horizontais, conduzindo a uma curva decrescente (figura 31). Os desvios entre os trechos horizontais, tem valor baixo.

Conforme descrito na literatura, para se determinar o *NPSH requerido*, é necessário se partir de um referencial horizontal.

A adoção da referência para a determinação do *NPSH requerido* deve ser tomada de forma criteriosa, pois pequenas variações para bombas de

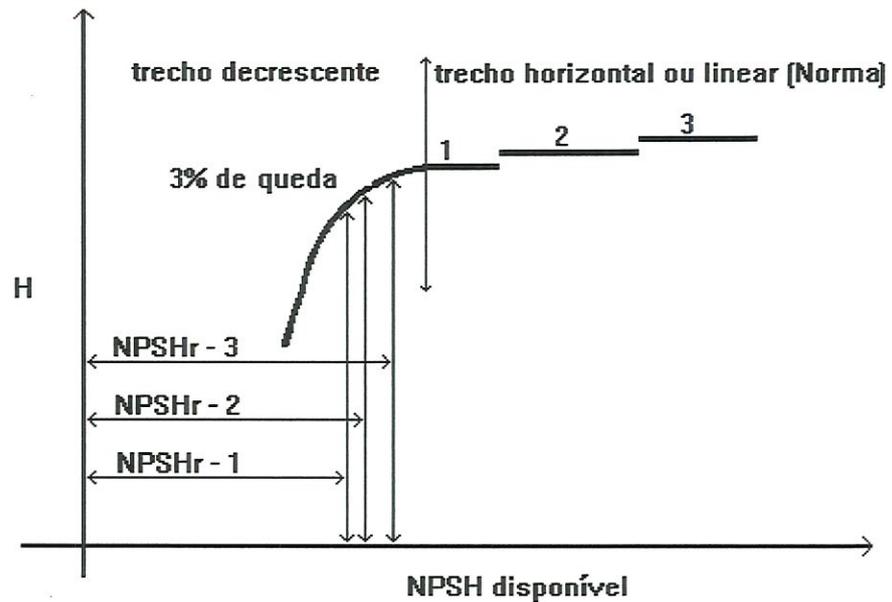
pequeno porte (utilizadas como modelo) podem significar grandes variações para bombas maiores.

Surge, então, a dúvida a respeito de qual “nuvem horizontal de pontos” deve-se partir para se chegar aos 3% de desvio.

Poder-se -ia fazer uma média entre as “nuvens de pontos” horizontais, para se chegar a pontos intermediários ou, então, adotar uma das porções horizontais de pontos de referência.

Para efeito de análise, é conveniente se adotar um critério padrão, para escolha de pontos de referência

Apesar da análise da metodologia não ser importante à obtenção de valores que dêem segurança total à instalação, será adotado como referência para determinação dos 3% de queda da altura total de elevação (o que conduzirá ao valor do *NPSH requerido*) a porção horizontal de maior valor nas ordenadas, pois como mostrado na figura 31, esta conduzirá a um valor máximo para o *NPSH requerido*, o que maximizaria a segurança da instalação real.



Obs: $NPSH_{r, 3} > NPSH_{r, 2} > NPSH_{r, 1}$

Figura 31 - Formato geral obtido da função $H \times NPSH_{disp}$.

Outra dificuldade encontrada foi a obtenção do valor de *NPSH requerido*, exatamente aos 3%.

Esta dificuldade ocorreu devido ao fato dos dados não serem processados simultaneamente ao ensaio e, também, à sensibilidade do equipamento durante a cavitação intensa.

Portanto, foi necessário adotar-se uma função de ajuste entre os pontos obtidos em laboratório, para se obter o ponto exato de 3% de queda da altura total de elevação.

Estas funções foram adotadas de forma que conduzam a resultados mais coerentes possíveis.

4.3.3- Recomendações da ASME com relação aos pontos adotados

A ASME fixou algumas recomendações com relação aos pontos da função $H \times NPSH \text{ disponível}$, as quais serão descritas a seguir:

- Devem ser tomados 8 pontos, no mínimo, para a determinação da curva $H \times NPSH \text{ disponível}$, sendo que no mínimo 3 pontos devem estar no trecho horizontal da curva, um ponto de desvio de no mínimo 10% (queda de H) e 4 pontos ou mais para definir a forma da curva entre o último ponto e o trecho horizontal.

Apesar destas recomendações constarem apenas em uma das quatro normas consultadas, e ter se tomado conhecimento destas durante o ensaio, procurou-se seguir estas, na maioria das vezes, cumprindo-as.

Tais recomendações são importantes, pois é relevante definir bem o trecho horizontal e o trecho decrescente da curva, para se ter uma idéia do comportamento da função.

Para a determinação da curva de ajuste, acredita-se que não se deva passar muito de 10% de desvio, porque estes pontos utilizados no ajuste da função podem não ter grande precisão, pois, a partir de certo instante do ensaio, a cavitação é intensa e pode produzir valores oriundos de um escoamento extremamente irregular, causado por cavitação intensa.

4.3.4) Considerações gerais adotadas para a determinação do NPSH requerido

- Será considerado como referência para determinação do *NPSH requerido* a queda de 3% da altura total de elevação.

- Será considerado o trecho horizontal (figura 31) de maior ordenada como referência para a queda da altura total de elevação.

- Os pontos apresentados a seguir, em forma gráfica, representam parte dos pontos obtidos em ensaio, sendo que os valores de todos os pontos se apresentam no anexo 1.

- Observa-se que a função que melhor se adapta a todos os casos são polinômios ou um ajuste linear entre os dois pontos em que se encontram os 3% de queda do desempenho .

- Procurar-se-a manter o último ponto considerado na faixa de 10% de queda de H .

4.3.5-) Determinação do NPSH requerido para os casos ensaiados

A partir de agora, então, será mostrada a forma com a qual se chegará a valores de *NPSH requerido*, através dos 3% de queda de *H* (figura 31).

- Rotação :1350 rpm

Vazão : 6 m³ / h

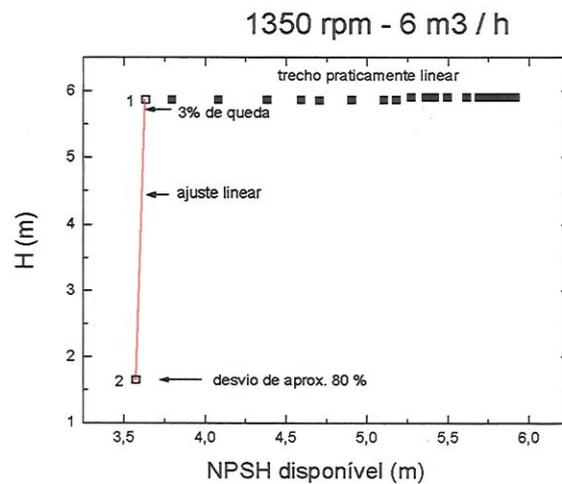


Figura 32 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 6 m³ / h

Neste caso, observa-se que para todos os pontos e para o intervalo especificado, a função mais coerente será um ajuste linear, pois alguns polinômios testados não conduzem a uma curva coerente, apresentando grandes oscilações. Além do mais, em ensaios complementares realizados (anexo 1) entre os dois últimos pontos, notou-se a tendência de uma função realmente linear.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

$$\text{Ponto 1} = (\text{NPSH}_d, H) = (3,64 ; 5,87)$$

$$\text{Ponto 2} = (\text{NPSH}_d, H) = (3,58 ; 1,64)$$

Em relação ao patamar máximo de valores de 5,90 m, o valor de H , para o qual será encontrado o valor do $NPSH$ requerido correspondente aos 3%, corresponde a 5,73 m.

Considerando um ajuste linear chegaremos ao valor de $NPSH$ requerido equivalente a 3,63 m.

- Rotação :1350 rpm

Vazão : 12 m³ / h

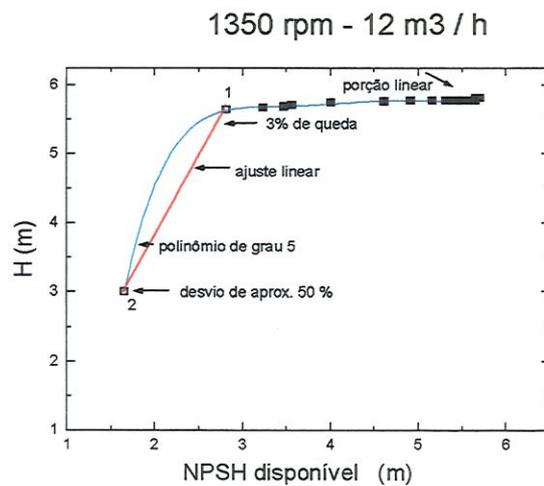


Figura 33 - Determinação de $NPSH$ requerido : 1350 rpm, 12 m³ / h

Observa-se, neste caso, que o último ponto se afasta muito dos 3%, caindo em um desvio de quase 50%, bem maior que os 10% estipulados. Este fato ocorreu devido à falta de processamento simultâneo dos dados.

É observado que uma função do 5º grau se adapta bem à nuvem de pontos, entretanto, analogamente ao item anterior, foram realizados ensaios (anexo 1) complementares neste intervalo para determinação do comportamento dos pontos e é observado que estes pontos conduzem a uma função próxima a uma reta. Portanto um ajuste linear é o mais indicado neste caso.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

Ponto 1 = $(NPSH_d, H) = (2,82 ; 5,65)$

Ponto 2 = $(NPSH_d, H) = (1,65 ; 2,99)$

Em relação ao patamar máximo de valores de 5,81 m, o valor de H , para o qual será encontrado o valor do $NPSH$ requerido correspondente aos 3%, equivale a 5,64 m.

Considerando um ajuste linear se chegará ao valor de $NPSH$ requerido correspondente a **2,81 m**.

- Rotação :1350 rpm

Vazão : 18 m³ / h

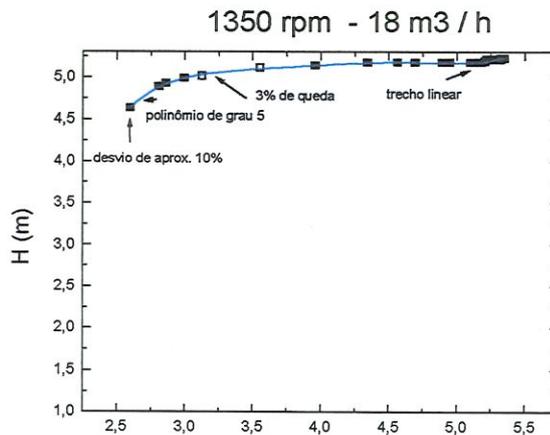


Figura 34 - Determinação de $NPSH$ requerido : 1350 rpm, 18 m³ / h

Observa-se, no gráfico, que um polinômio de 5^o grau se adapta bem aos pontos em estudo de forma geral, principalmente na região de interesse.

Portanto o polinômio adotado é apresentado abaixo:

$$H = 0,07218NPSH_d^5 - 1,48109NPSH_d^4 + 12,06672NPSH_d^3 - 48,84435NPSH_d^2 + 98,40774NPSH_d - 74,01 \quad (45)$$

Para um valor de $H = 5,07\text{m}$ que corresponde a 3% de queda da altura total de elevação, chega-se a um valor de **3,30 m**, que representa o *NPSH requerido*.

- Rotação :1350 rpm

Vazão : 24 m³ / h

Observa-se, inicialmente, que o ponto indicado aberto é desprezado, pois a tendência da altura total de elevação é de diminuir ou de se manter e não de aumentar com a redução de pressão.

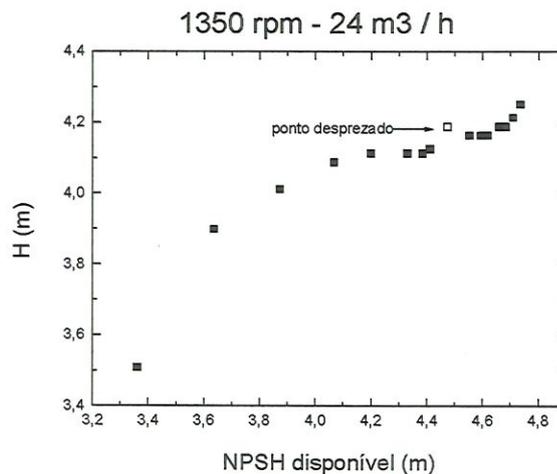


Figura 35 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 24 m³ / h - ponto desprezado

Percebe-se que o intervalo em que se constata os 3% é pequeno, analogamente ao que ocorre com o gráfico anterior, como mostrado na figura.

A função polinomial de 3º grau descrita (figura 36) se adapta bem aos pontos mas, vendo o detalhe (figura 37), observa-se que, devido ao intervalo ser pequeno, o melhor ajuste ainda é um ajuste linear.

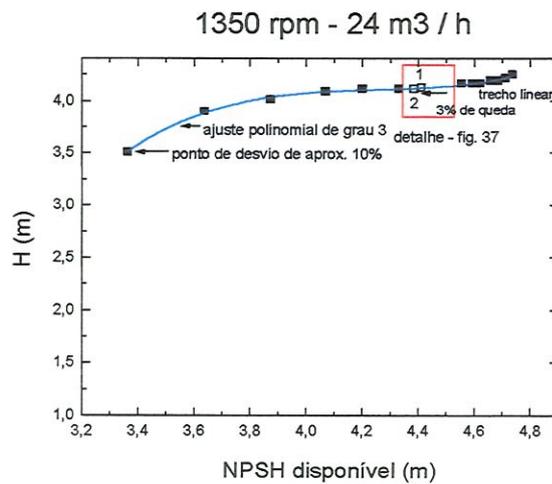


Figura 36 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 24 m³ / h.

Observa-se, pelo detalhe, que entre os pontos de 3% de queda, a função não conduz ao resultado real.

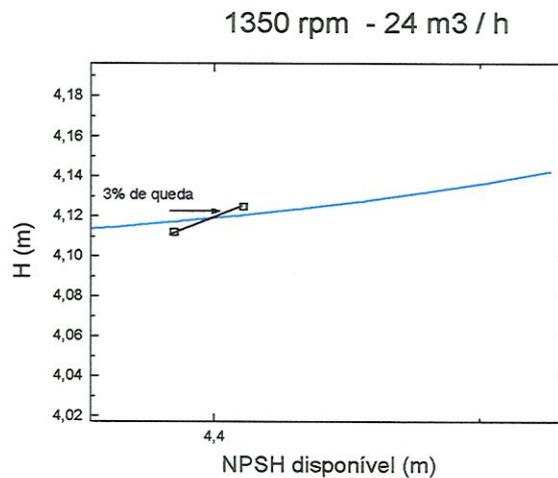


Figura 37 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 24 m³ / h - detalhe figura 36

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

$$\text{Ponto 1} = (\text{NPSH}_d, H) = (4,41 ; 4,12)$$

$$\text{Ponto 2} = (\text{NPSH}_d, H) = (4,38 ; 4,11)$$

Em relação ao patamar máximo de valores de 4,13 m, o valor de H , para o qual será encontrado o valor do *NPSH requerido* correspondente aos 3%, corresponde a **4,12 m**.

Considerando um ajuste linear, chega-se ao valor de *NPSH requerido* correspondente a **4,41 m**.

- Rotação :1350 rpm

Vazão : 30 m³ / h

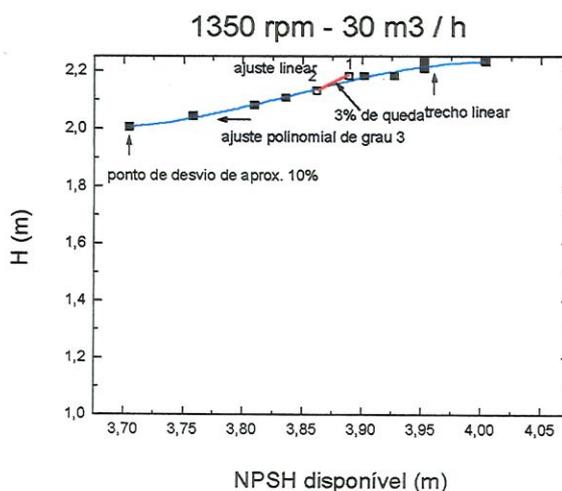


Figura 38 - Determinação de NPSH requerido : 1350 rpm, 30 m³ / h.

A função plotada representa um polinômio de 3^o grau, que se pode descrever como uma das melhores a se adaptar aos pontos experimentais, sendo que polinômios com graus maiores que três, testados, conduzem a resultados que praticamente coincidem com os de grau 3.

Observa-se, pelo gráfico, que apesar da função polinomial ser uma função que abrange todos os pontos de interesse, o ajuste linear entre os dois pontos que contém os 3% de queda de *H* apresenta resultado mais coerente que os da polinomial. Isto se deve, principalmente, ao fato do intervalo entre os dois pontos de interesse ser muito pequeno; portanto, no caso, o que melhor conduzirá aos 3% seria um ajuste linear.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

$$\text{Ponto 1} = (\text{NPSH}_d, H) = (3,89 ; 2,18)$$

$$\text{Ponto 2} = (\text{NPSH}_d, H) = (3,86 ; 2,13)$$

Em relação ao patamar máximo de valores, o valor de H para o qual será encontrado o valor do $NPSH$ requerido correspondente aos 3%, corresponde a 2,16 m e se chega, então, a um ajuste linear com o valor de **3,881 m**.

- Rotação :1400 rpm

Vazão : 6 m³ / h

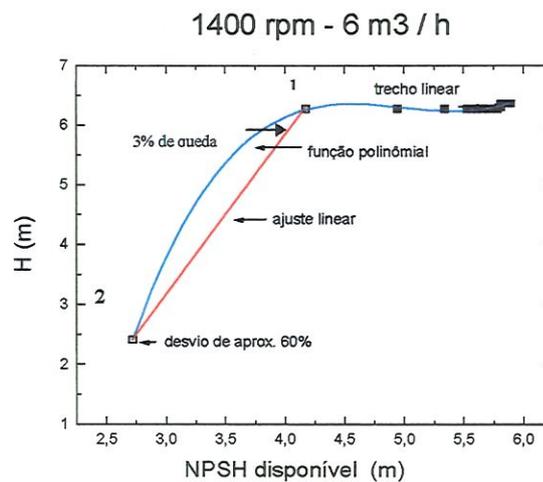


Figura 39 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 6 m³ / h.

Uma função polinomial se adapta bem à nuvem de pontos mas, de acordo com os ensaios intermediários (anexo 1) realizados também neste item, vemos que o melhor ajuste se aproxima de um linear.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

$$\text{Ponto 1} = (\text{NPSH}_d, H) = (4,18 ; 6,31)$$

$$\text{Ponto 2} = (\text{NPSH}_d, H) = (2,72 ; 2,40)$$

Em relação ao patamar máximo de valores de 6,36 m, o valor de H , para o qual será encontrado o valor do *NPSH requerido* correspondente aos 3%, corresponde a **4,12 m**.

- Rotação :1400 rpm

Vazão : 9 m³ / h

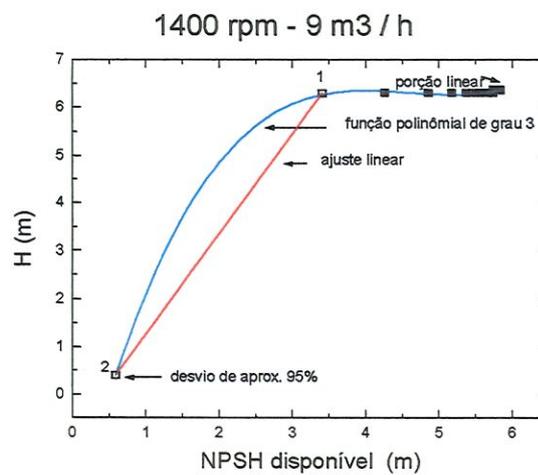


Figura 40 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 9 m³ / h.

Observa-se que o ajuste de uma função de 3^o grau se adapta bem mas analogamente ao ocorrido ao item anterior, o melhor ajuste é um ajuste linear.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

$$\text{Ponto 1} = (\text{NPSH}_d, H) = (3,41 ; 6,29)$$

$$\text{Ponto 2} = (\text{NPSH}_d, H) = (0,59 ; 0,39)$$

Em relação ao patamar máximo de valores de 6,36 m, o valor de H , para o qual será encontrado o valor do *NPSH requerido* correspondente aos 3%, corresponde a **3,36 m**.

- Rotação :1400 rpm

Vazão : 12 m³ / h

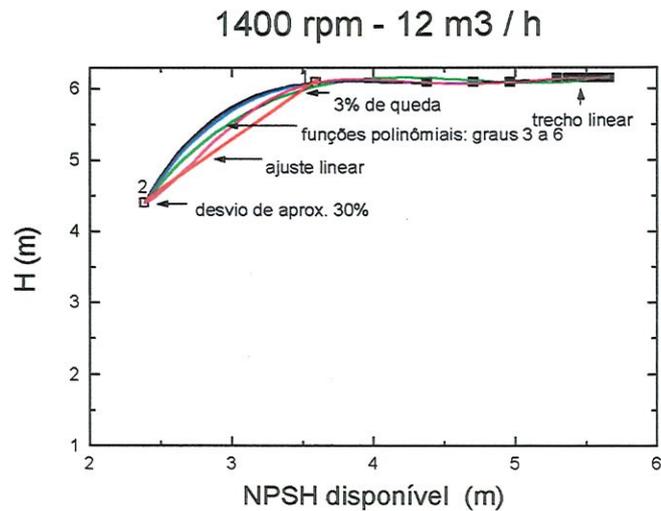


Figura 41 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 12 m³ / h.

De acordo com a figura acima, alguns polinômios se adaptam bem à nuvem de pontos mas, de acordo com o ocorrido nos itens anteriores, vê-se que o que se adapta melhor mesmo é um ajuste linear.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

$$\text{Ponto 1} = (\text{NPSH}_d, H) = (3,59 ; 6,09)$$

$$\text{Ponto 2} = (\text{NPSH}_d, H) = (2,39 ; 4,40)$$

Em relação ao patamar máximo de valores de 6,15 m, o valor de H , para o qual será encontrado o valor do *NPSH requerido* correspondente aos 3%, equivale a **3,51 m**.

- Rotação :1400 rpm

Vazão : 15 m³ / h

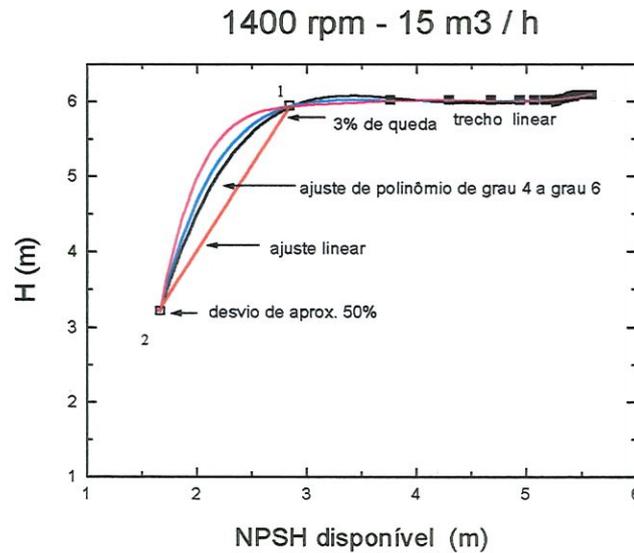


Figura 42 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 15 m³ / h.

As funções polinomiais de 4^o grau em diante se adaptam bem à nuvem de pontos porém, de acordo com os ensaios complementares intermediários (anexo 1) também aqui realizados, observa-se que o que se adapta melhor à nuvem de pontos é um ajuste linear.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

Ponto 1 = (NPSH_d, H) = (2,84 ; 5,94)

Ponto 2 = (NPSH_d, H) = (1,66 ; 3,22)

Em relação ao patamar máximo de valores de 6,09 m, o valor de H para o qual será encontrado o valor do *NPSH requerido* correspondente aos 3%, equivale a **2,83 m**.

- Rotação :1400 rpm

Vazão : 18 m³ / h

Idem ao item anterior .

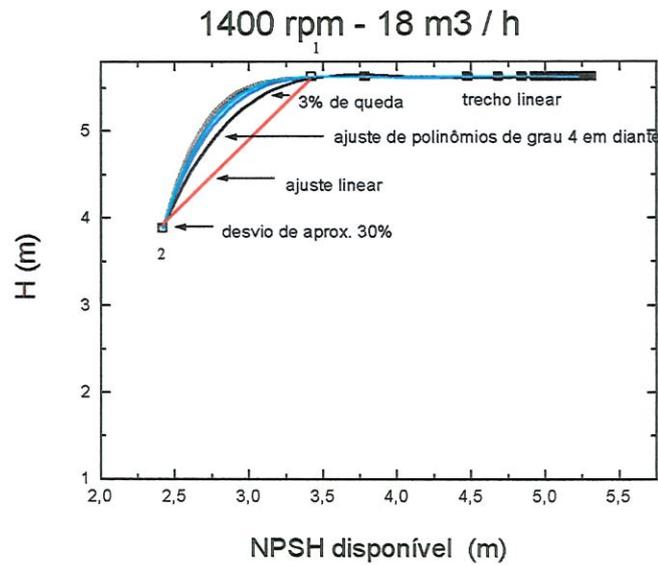


Figura 43 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 18 m³ / h.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

Ponto 1 = (NPSH_d, H) = (3,42; 5,63)

Ponto 2 = (NPSH_d, H) = (2,42; 3,88)

Em relação ao patamar máximo de valores de 5,63m, o valor de H , para o qual será encontrado o valor do $NPSH$ requerido correspondente aos 3%, corresponde a **3,33 m**.

- Rotação :1400 rpm

Vazão : 21 m³ / h

Observa-se que a função polinomial de 3^o grau se adapta bem à nuvem de pontos e ao intervalo especificado, portanto é adotada.

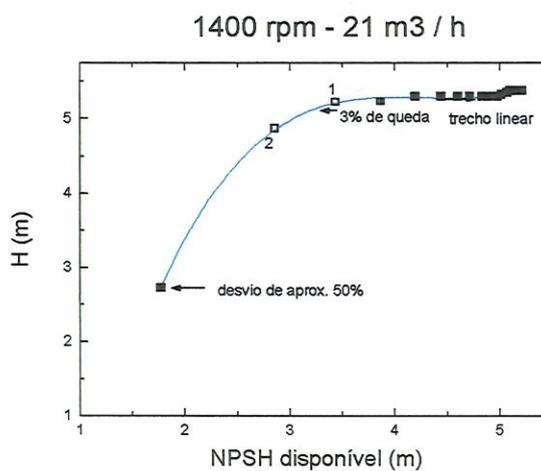


Figura 44 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 21 m³ / h.

A função adotada é mostrada abaixo:

$$H = 0,1663352NPSH_d^3 - 2,137431NPSH_d^2 + 9,1206362NPSH_d - 7,63721 \quad (46)$$

e o valor do *NPSH disponível* é igual a **3,43 m**.

- Rotação :1400 rpm

Vazão : 24 m³ / h

Observa-se que uma função do 3^o grau se adapta bem à nuvem de pontos e a região de interesse; portanto, esta função é suficiente para se determinar o *NPSH requerido* analogamente ao que ocorreu no item anterior.

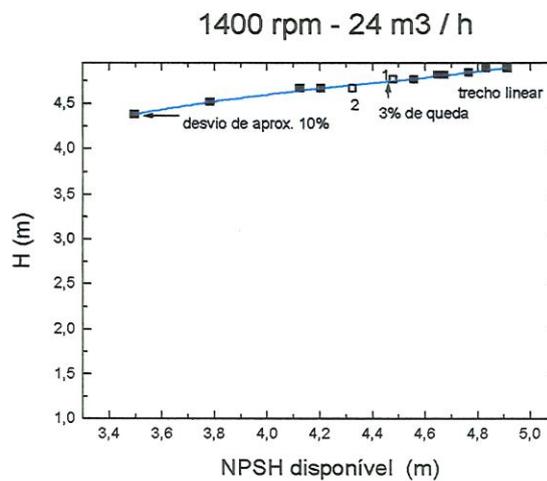


Figura 45 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 24 m³ / h.

Abaixo é mostrada a função adotada:

$$H = 0,104358NPSH_d^3 - 1,37205NPSH_d^2 + 6,32097NPSH_d - 5,410217 \quad (47)$$

e o valor do *NPSH requerido* correspondente é igual a **4,46 m**.

- Rotação :1400 rpm

Vazão : 27 m³ / h

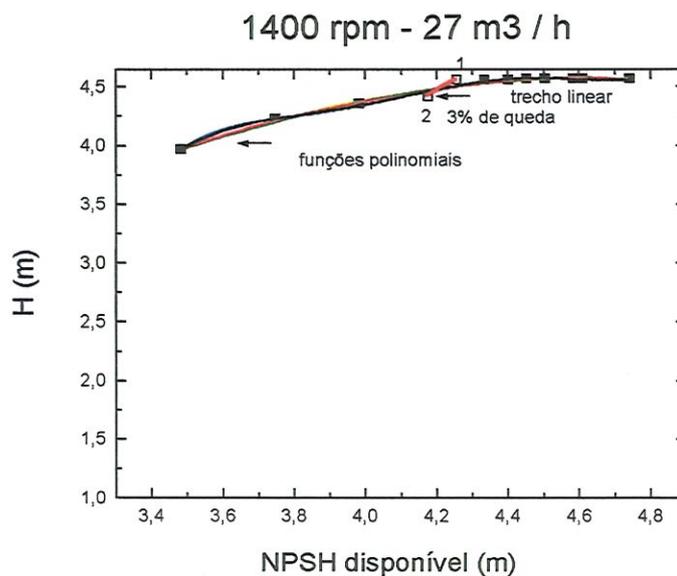


Figura 46 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 27 m³ / h

Observa-se que, dos polinômios testados para analisar a função, nenhum apresenta resultado satisfatório entre os pontos de interesse.

Portanto, é conveniente se adotar uma ajuste linear entre os pontos de interesse, o que com certeza conduz a um bom resultado.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

Ponto 1 = (NPSH_d,H) = (4,26 ; 4,56)

Ponto 2 = (NPSH_d,H) = (4,18 ; 4,42)

Em relação ao patamar máximo de valores de 4,57m, o valor de H para o qual será encontrado o valor do *NPSH requerido* correspondente aos 3%, equivale a **4,18 m**.

- Rotação :1400 rpm

Vazão : 30 m³ / h

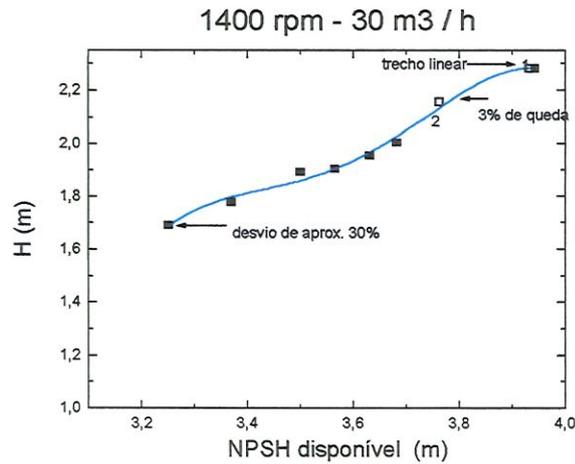


Figura 47 - Determinação de NPSH requerido : 1400 rpm, 30 m³ / h

Estava se adotando pontos de até um desvio de aproximadamente 10% em relação à altura total de elevação, conforme explicado anteriormente, porém neste caso, 10% de queda abrange apenas 4 pontos, por isso achou-se necessário utilizar mais pontos para completar um mínimo de 8. Então, adotou-se 9 pontos.

Observa-se que uma função do 4^o grau se adapta bem à nuvem de pontos, portanto é a adotada.

A função é a seguinte :

$$H = -14,1027NPSH_d^4 + 202,1424NPSH_d^3 - 1084,4048NPSH_d^2 + 2581,2847NPSH_d - 2299,2499 \quad (48)$$

e o valor do valor procurado é igual a **3,82m**.

- Rotação :1440 rpm

Vazão : 6 m³ / h

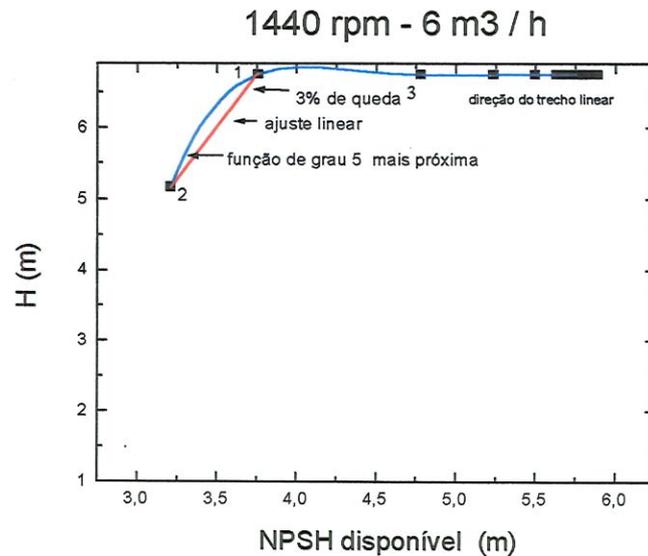


Figura 48 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 6 m³ / h

Observa-se que o ajuste da função azul de 5^o grau se adapta bem à nuvem de pontos, com exceção de entre os pontos 1-3 esta começa a subir. Portanto, é indicado um ajuste linear, mesmo entre os dois últimos pontos. Além do mais, em ensaios complementares (anexo 1) com vazões baixas, apresentou-se esta tendência linear.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

$$\text{Ponto 1} = (\text{NPSH}_d, H) = (3,76 ; 6,75)$$

$$\text{Ponto 2} = (\text{NPSH}_d, H) = (3,21 ; 5,16)$$

Em relação ao patamar máximo de valores de 6,75m, o valor de H para o qual será encontrado o valor do *NPSH requerido* correspondente aos 3%, equivale a 6,54 m.

Considerando um ajuste linear, chega-se ao valor de *NPSH requerido* correspondente a **3,69 m**.

- Rotação : 1440 rpm

Vazão : 12 m³ / h

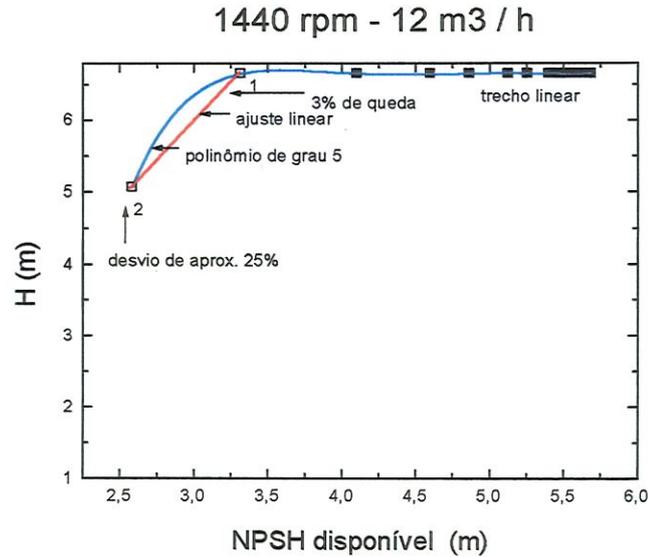


Figura 49 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 12 m³ / h

De maneira idêntica ao ocorrido no item anterior, observa-se que uma função do 5º grau se adapta bem aos pontos, mas, devido à experiência com ensaios anteriores (anexo 1), é adotado o ajuste linear.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

$$\text{Ponto 1} = (\text{NPSH}_d, H) = (3,32 ; 6,65)$$

$$\text{Ponto 2} = (\text{NPSH}_d, H) = (2,58 ; 5,07)$$

Em relação ao patamar máximo de valores de 6,65 m, o valor de H , para o qual será encontrado o valor do *NPSH requerido* correspondente aos 3%, equivale a 6,45 m.

Considerando um ajuste linear, chega-se ao valor de *NPSH requerido* correspondente a **3,22 m**.

- Rotação :1440 rpm

Vazão : 18 m³ / h

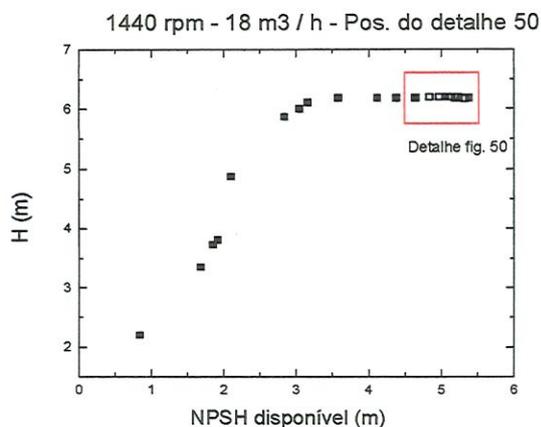


Figura 50- Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 18 m³ / h- posição do detalhe da figura 50

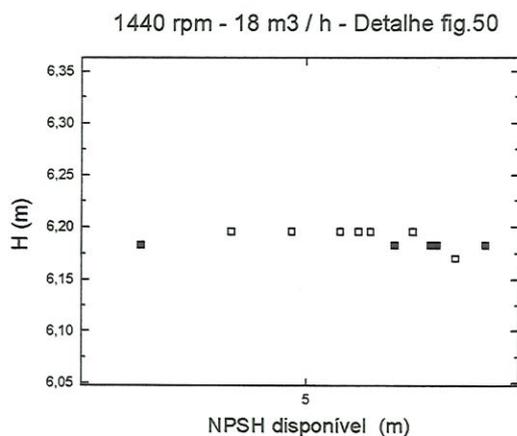


Figura 51 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 18 m³ / h- detalhe da figura 50

Observa-se, inicialmente, que os pontos abertos se comportam de forma errônea, ou seja a tendência dos pontos é de se manterem numa direção e depois apresentarem um comportamento decrescente uniforme.

Mas aparecem oscilações, como mostrado nas figuras 50 e 51, então, estes pontos que apresentam oscilações são eliminados por estarem, sem restar dúvidas, errados

Eliminados os pontos, observa-se que, apesar de aparentemente a função em azul do 4º grau (figura 52) parecer descrever corretamente a função, ampliando (figura 53), observa-se que esta passa fora do que seriam os pontos coerentes para este intervalo.

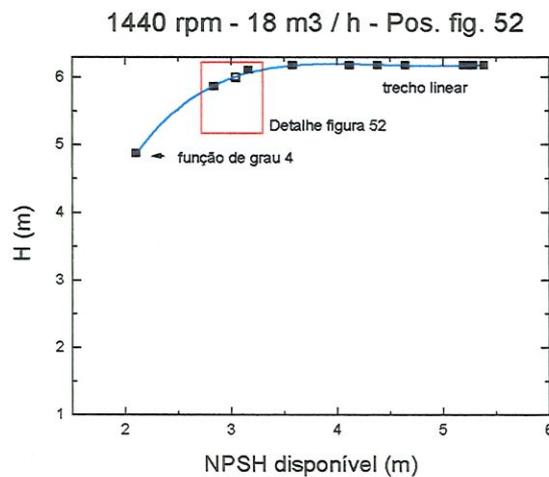


Figura 52 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 18 m³ / h- posição do detalhe da figura 52

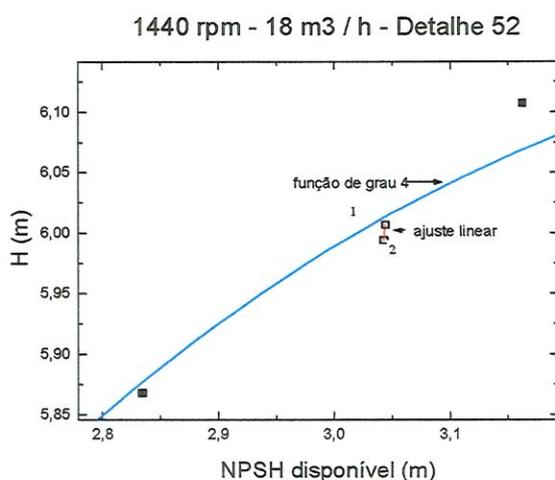


Figura 53 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 18 m³ / h- detalhe da figura 52

A diferença entre os dois pontos especificados do intervalo é mínima, e todas as funções possíveis não passam pelos 2 pontos de interesse; portanto, a única solução é de se adotar um ajuste linear

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

Ponto 1 = (NPSH_d, H) = (3,04; 6,01)

Ponto 2 = (NPSH_d, H) = (3,04 ; 5,99)

Em relação ao patamar máximo de valores de 6,18 m, o valor de H para o qual será encontrado o valor do *NPSH requerido* correspondente aos 3%, equivale a 5,99 m.

Considerando um ajuste linear, chega-se ao valor de *NPSH requerido* correspondente a **3,04 m**.

- Rotação :1440 rpm

Vazão : 24 m³ / h

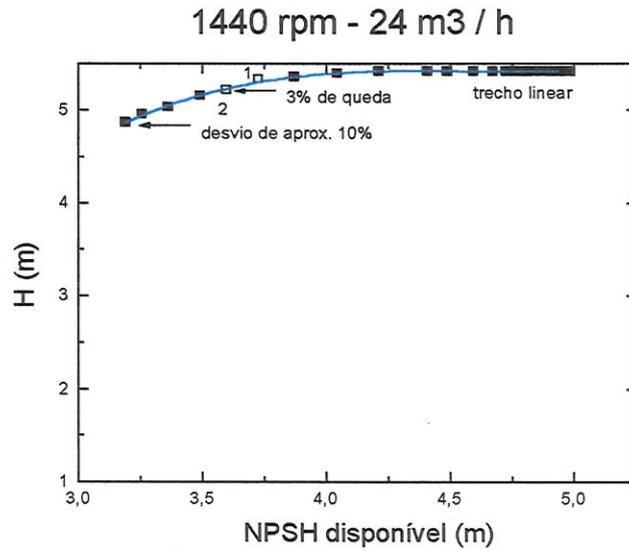


Figura 54 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 24 m³ / h

Percebe-se que o ajuste com um polinômio do 4^o grau se adapta bem à nuvem de pontos sendo este de valor igual a:

$$H = 0,01834NPSH_d^4 - 0,09115NPSH_d^3 - 1,06240NPSH_d^2 + 8,38779NPSH_d - 10,0194 \quad \text{..... (49)}$$

E o valor correspondente ao *NPSH requerido* igual a **3,64 m**.

- Rotação :1440 rpm

Vazão : 30 m³ / h

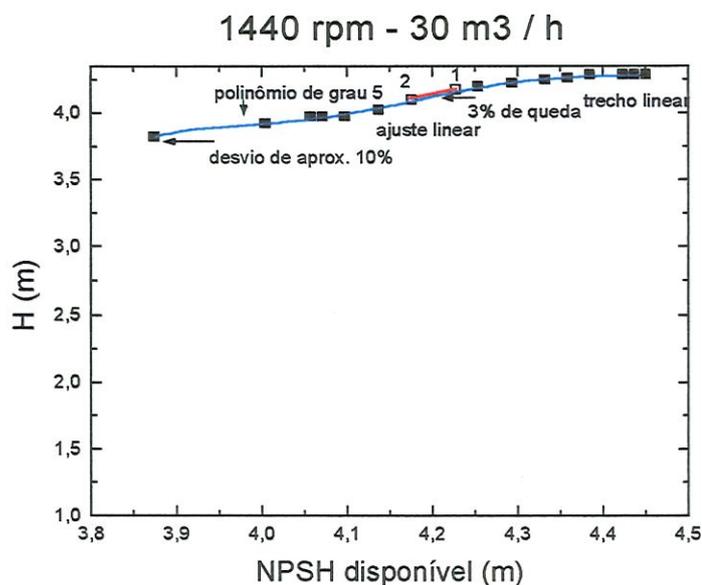


Figura 55 - Determinação de NPSH requerido : 1440 rpm, 30m³ / h

Observa-se, neste caso, que a função que melhor se adapta a todos os pontos seria uma função do 5^o grau, mas mesmo esta não está muito dentro da realidade, no intervalo de interesse; portanto, é mais conveniente se adotar também um ajuste linear entre os 2 pontos.

Considerando um ajuste linear entre os pontos:

Ponto 1 = (NPSH_d,H) = (4,23; 4,17)

Ponto 2 = (NPSH_d,H) = (4,18 ; 4,09)

Em relação ao patamar máximo de valores de 4,28 m, o valor de H para o qual será encontrado o valor do *NPSH requerido* correspondente aos 3%, equivale a 4,16 m.

Considerando um ajuste linear, chega-se ao valor de *NPSH requerido* correspondente a **4,22 m**.

Chega-se então, a partir da análise feita acima, valores de *NPSH requerido x Vazão*, para cada rotação ensaiada.

ROTAÇÃO : 1350 RPM	
VAZÃO (m ³ /h)	NPSH REQUERIDO (m)
6	3,63
12	2,81
18	3,30
24	4,41
30	3,88

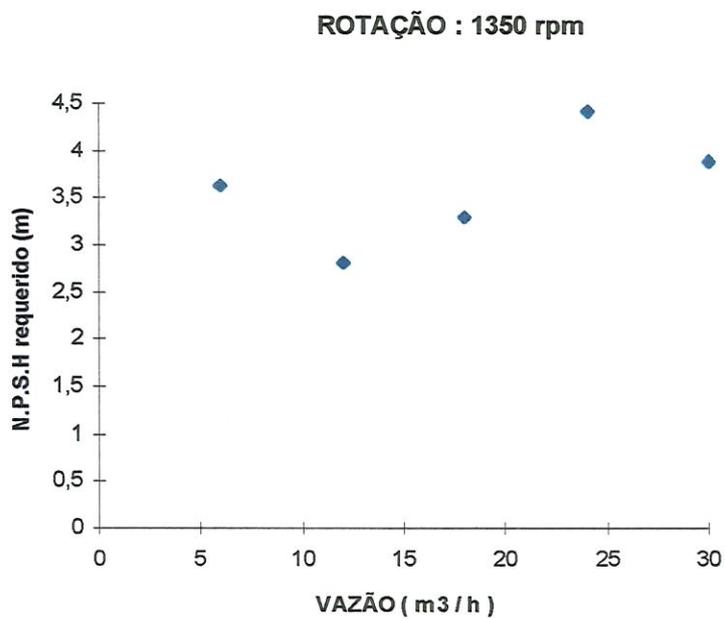


Figura 56 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - 1350 rpm



ROTAÇÃO : 1400 RPM	
VAZÃO (m ³ / h)	NPSH REQUERIDO (m)
6	4,12
9	3,36
12	3,51
15	2,83
18	3,33
21	3,43
24	4,46
27	4,18
30	3,82

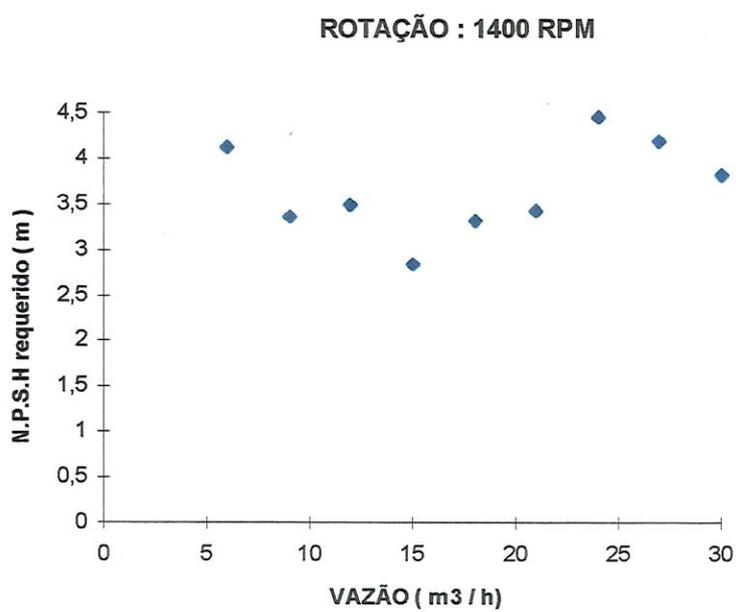


Figura 57 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - 1400 rpm

ROTAÇÃO : 1440 RPM	
VAZÃO (m ³ / h)	NPSH REQUERIDO (m)
6	3,69
12	3,22
18	3,04
24	3,64
30	4,22

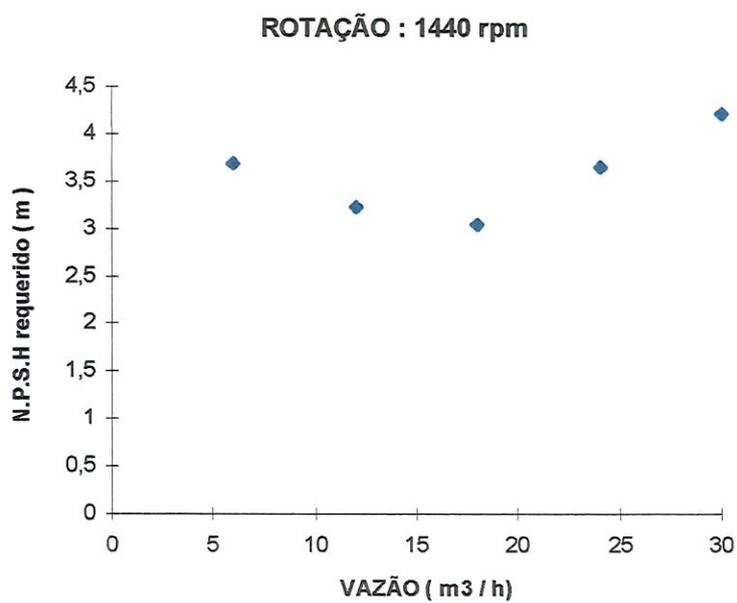


Figura 58 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - 1440 rpm

4.3.6- Comentários adicionais

É interessante para efeito de análise dos resultados, utilizando uma rotação de referência, transformar-se pontos obtidos em outras rotações para esta rotação de referência através dos pontos homólogos.

A norma, ISO-DIS 2548, permite o uso desta formulação, desde que a diferença de velocidade de rotação, entre a rotação de referência e a ensaiada, não exceda $\pm 25\%$.

A diferença de velocidade de rotação, é calculada através da fórmula:

$$100 \cdot \left(\frac{n - n_G}{n_G} \right) = \Delta v \quad (50)$$

onde n = rotação ensaiada

n_G = rotação de referência

No caso : $n = 1350$ rpm e 1440 rpm, e $n_G = 1400$ rpm

Para 1350 rpm:

$$\Delta v_{1350} = -3,57 \%$$

Para 1440 rpm:

$$\Delta v_{1440} = 2,85 \%$$

Portanto : Δv_{1350} e Δv_{1440} atendem a variação de $\pm 25\%$, então podemos aplicar os pontos homólogos.

Assim é mostrado como segue:

Rotação : 1400 rpm valores obtidos	
VAZÃO (m ³ / h)	NPSH req. (m)
6	4,12
9	3,36
12	3,50
15	2,83
18	3,33
21	3,43
24	4,46
27	4,18
30	3,82

(a)

ROTAÇÃO : 1350 rpm valores obtidos	
VAZÃO (m ³ / h)	NPSH req. (m)
6	3,63
9	-
12	2,81
15	-
18	3,30
21	-
24	4,41
27	-
30	3,88

(b)

ROTAÇÃO: 1350-1400 (r p m)	
valores corrigidos - pontos homólogos	
VAZÃO (m ³ / h)	NPSH req. (m)
6,22	3,91
12,44	3,03
18,67	3,55
24,89	4,74
31,11	4,17

(c)

Tabela 5 - Gráficos de NPSH requerido x Vazão: (a) 1400 rpm - valores obtidos
(b) 1350 rpm valores obtidos (c) 1350- 1400 rpm - pontos homólogos

Utilizou-se como referência, a rotação de 1400 rpm, pois é a rotação com maior número de pontos obtidos em laboratório.

Então, plotando o gráfico de *NPSH requerido x Vazão* para os valores e 1400 rpm obtidos com os pontos de 1350 rpm corrigidos para a vazão de referência de 1400 rpm.

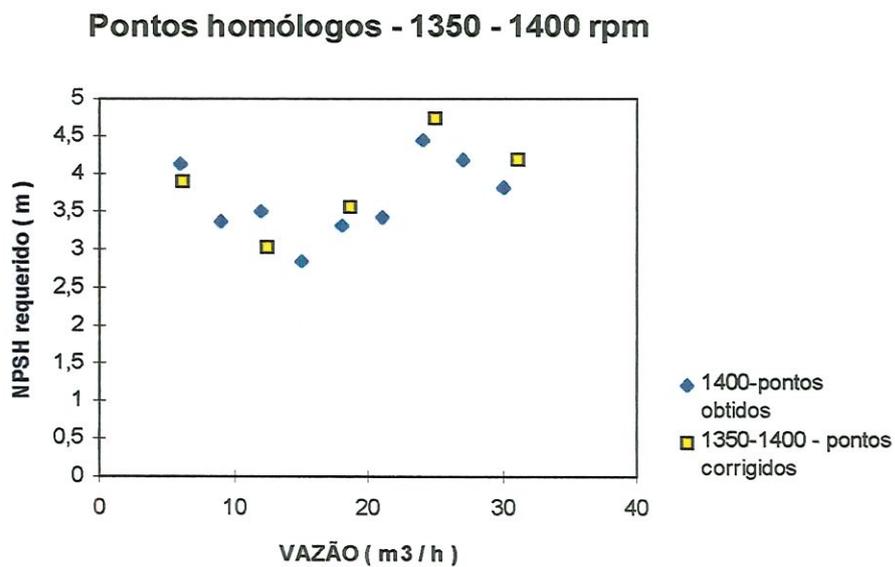


Figura 59 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - transformação de 1350 - 1400 rpm - pontos homólogos

ROTAÇÃO : 1440 rpm valores obtidos	
VAZÃO (m ³ / h)	NPSH req. (m)
6	3,69
9	
12	3,22
15	
18	3,04
21	
24	3,64
27	
30	4,22

(a)

ROTAÇÃO: 1440-1400 (r p m)	
valores corrigidos - pontos homólogos	
VAZÃO (m ³ / h)	NPSH req. (m)
5,83333	3,49
11,66667	3,05
17,50000	2,88
23,33333	3,44
29,16667	3,99

(b)

Tabela 6 - Gráficos de NPSH requerido x Vazão: (a) 1440 rpm - valores obtidos
(b) 1350- 1400 rpm - pontos homólogos

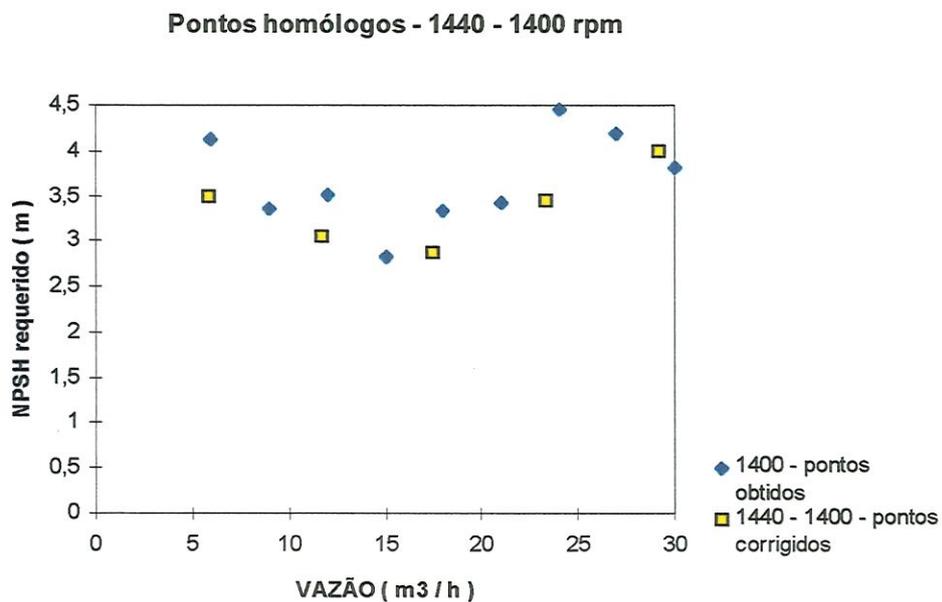


Figura 60 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - transformação de 1440 - 1400 rpm - pontos homólogos

Pelos resultados obtidos, acha-se que, para as vazões abaixo de $15 \text{ m}^3 / \text{h}$, esteja cavitando no registro de sucção e não na bomba devido ao fato de que para se obter baixas vazões é necessário fechar bastante o registro e com isso a pressão neste ponto é reduzida; portanto, estes pontos serão eliminados em nível de resultado. Então, os gráficos ficam da seguinte forma:

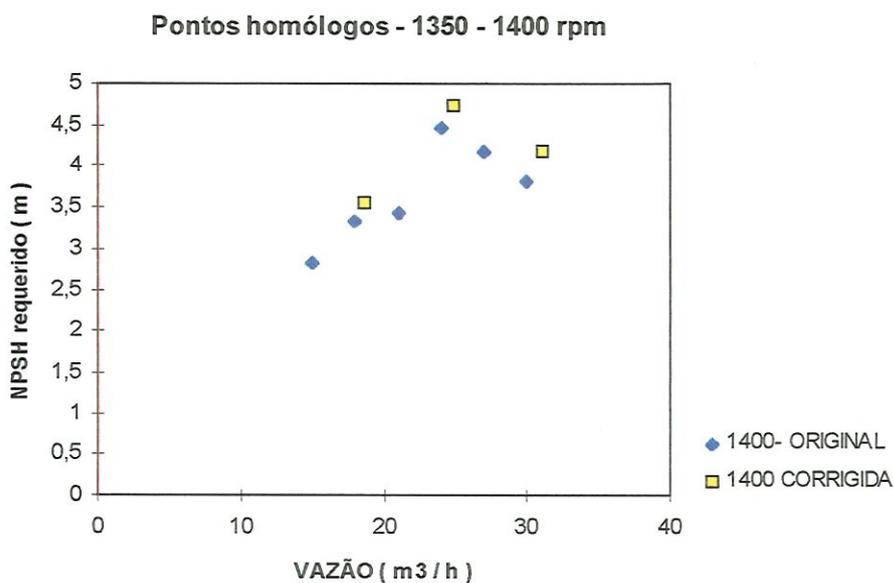


Figura 61 - Gráfico NPSH requerido x Vazão transformação de 1350 - 1400 rpm - pontos eliminados - pontos homólogos

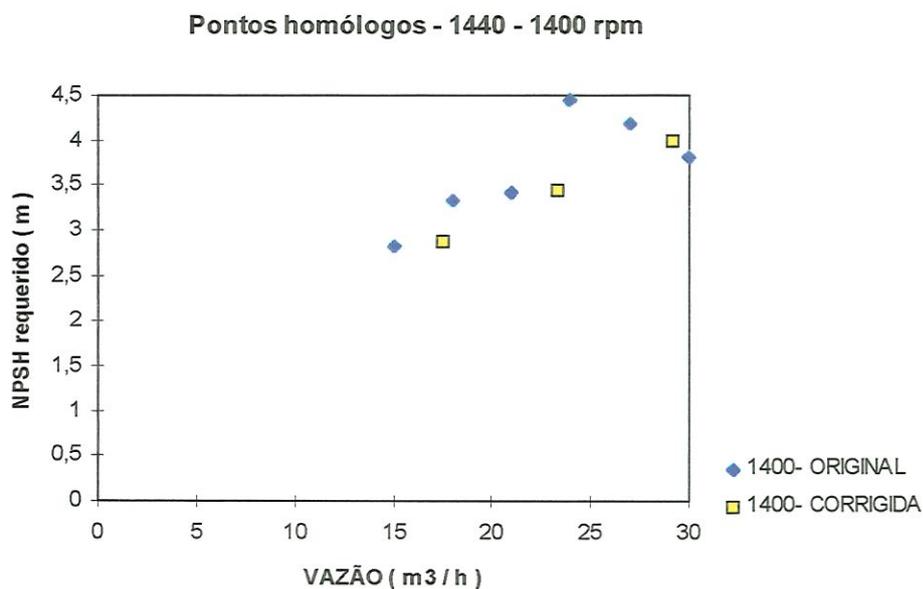


Figura 62 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - transformação de 1440 - 1400 rpm - pontos eliminados - pontos homólogos

Plotando junto os pontos de 1400 rpm com os pontos de 1350 rpm e 1440 rpm corrigidos para 1400 rpm, fica da seguinte forma:

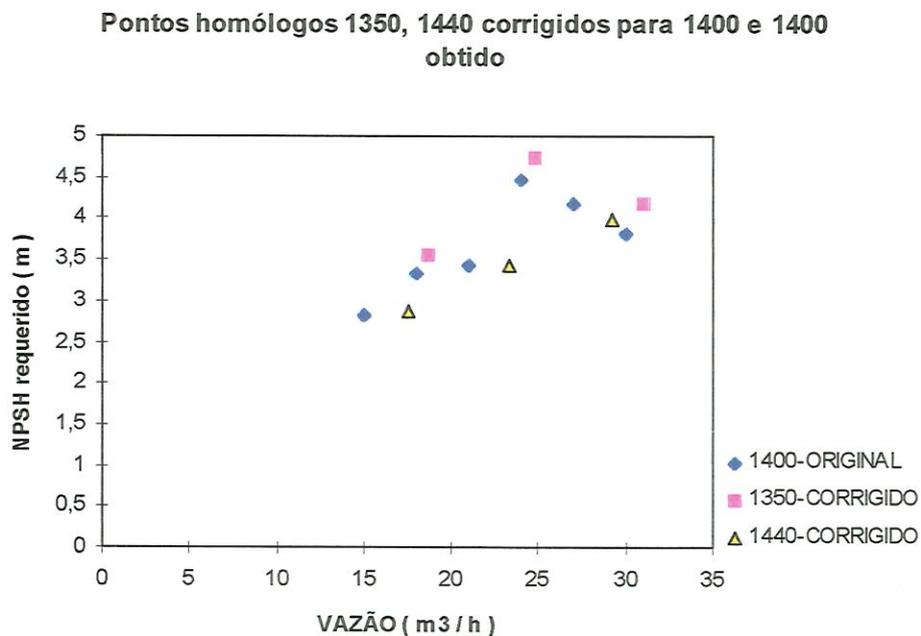


Figura 63 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - 1350 e 1440 rpm transformados para 1400, além do próprio 1400 rpm obtido

Plotando todos os pontos juntos, pode-se ajustar uma função que descreva a nuvem de pontos, antes eliminamos os pontos mostrados abaixo, devido a se afastarem dos demais, e provavelmente trazerem erros (outliers). Essa função se aproxima de uma reta, e é mostrada abaixo:

VAZÃO (m ³ / h)	NPSH req. (m)
15,00000	2,829
17,50000	2,876
18,00000	3,327
18,66667	3,550
21,00000	3,428
23,33333	3,441
24,00000	4,457
24,88889	4,740
27,00000	4,185
29,16666	3,986
30,00000	3,824
31,11111	4,173

← pontos excluídos

Ajuste de todos os pontos 1350, 1440 corrigidos e 1400 obtidos

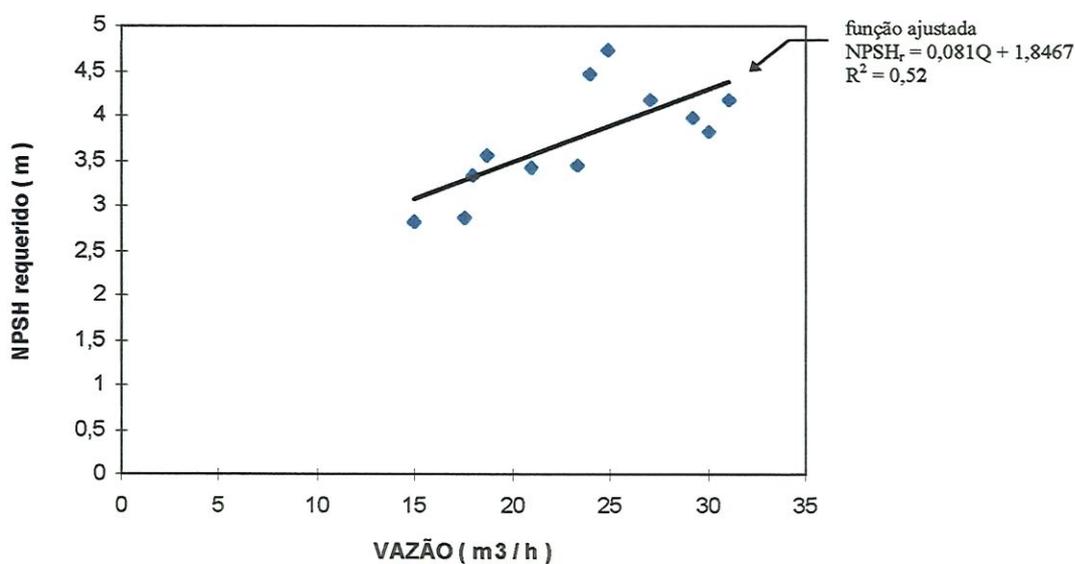


Figura 64 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - ajuste dos pontos relativos as rotações 1350, 1440 rpm corrigidos para 1400 rpm e os próprios valores de 1400 rpm

Considerando coerente a eliminação de 2 pontos acima, o novo ajuste ficaria como segue abaixo:

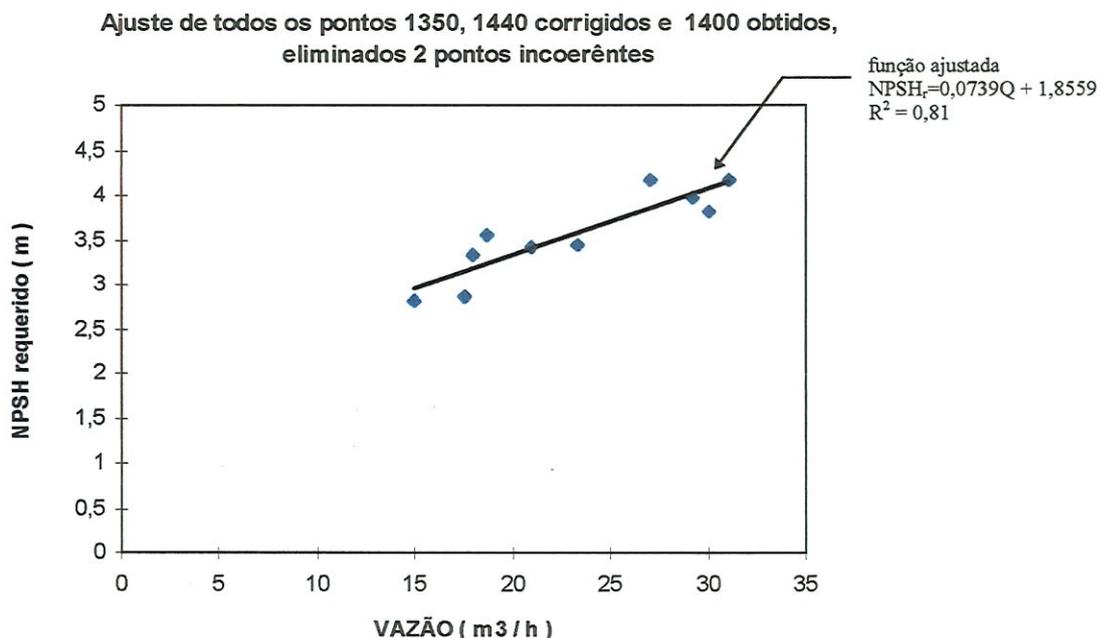


Figura 65 - Gráfico NPSH requerido x Vazão - ajuste dos pontos relativos as rotações 1350, 1440 rpm corrigidos para 1400 rpm e os próprios valores de 1400 rpm, retirado os pontos

É observado, então, que o ajuste se torna melhor após eliminados os pontos.

Após esta análise, vê-se que de forma geral a função tende a um valor crescente, que no caso foi ajustado como uma reta, mas podia ser uma outra função tal como um polinômio, apresentando comportamento próximo ao que se presencia em catálogos.

Para os dados do ensaio, também foram adimensionalizados os valores de *NPSH* e de vazão e traçados os gráficos, para cada rotação, e são mostrados juntos a seguir:

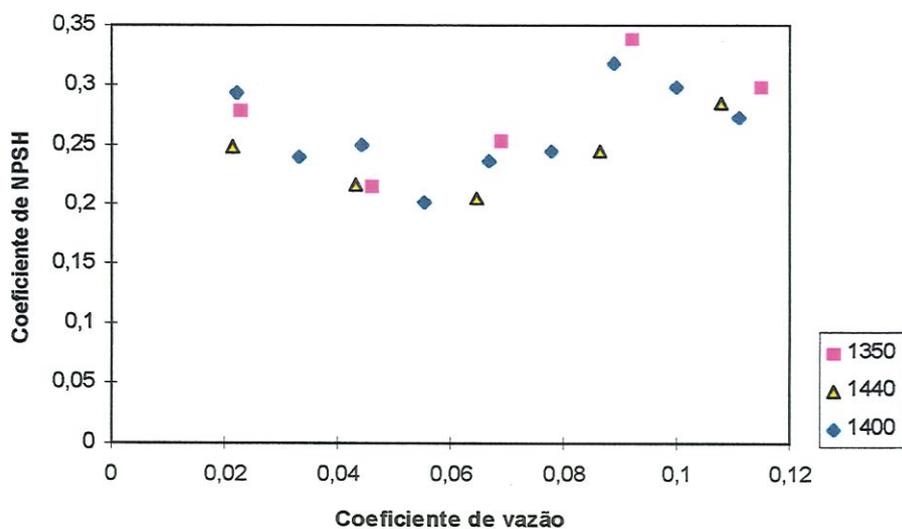


Figura 66 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão - rotações 1350, 1400 e 1440 rpm

Analogamente ao que foi realizado dimensionalmente, são retirados os pontos com vazões correspondentes abaixo de $15 \text{ m}^3 / \text{h}$, e também os dois pontos abertos abertos indicados (figura 67).

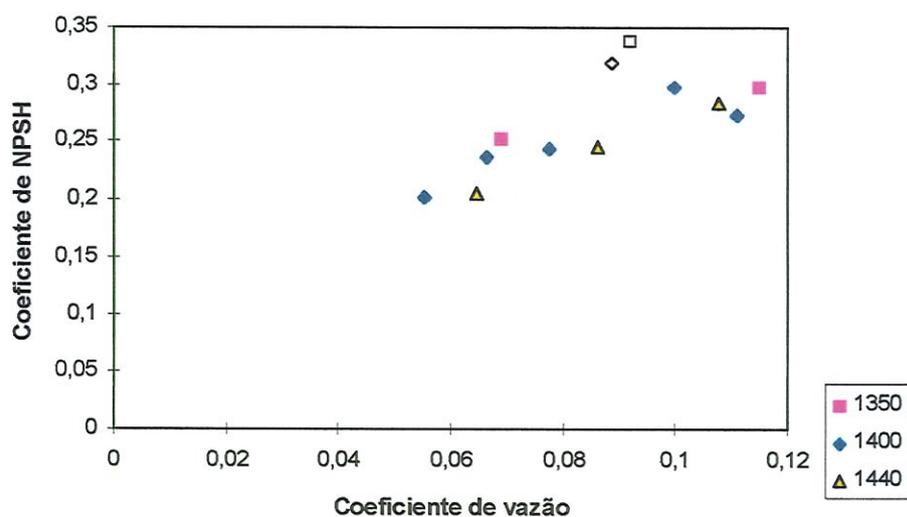


Figura 67 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão rotações 1350, 1400 e 1440 rpm - pontos retirados

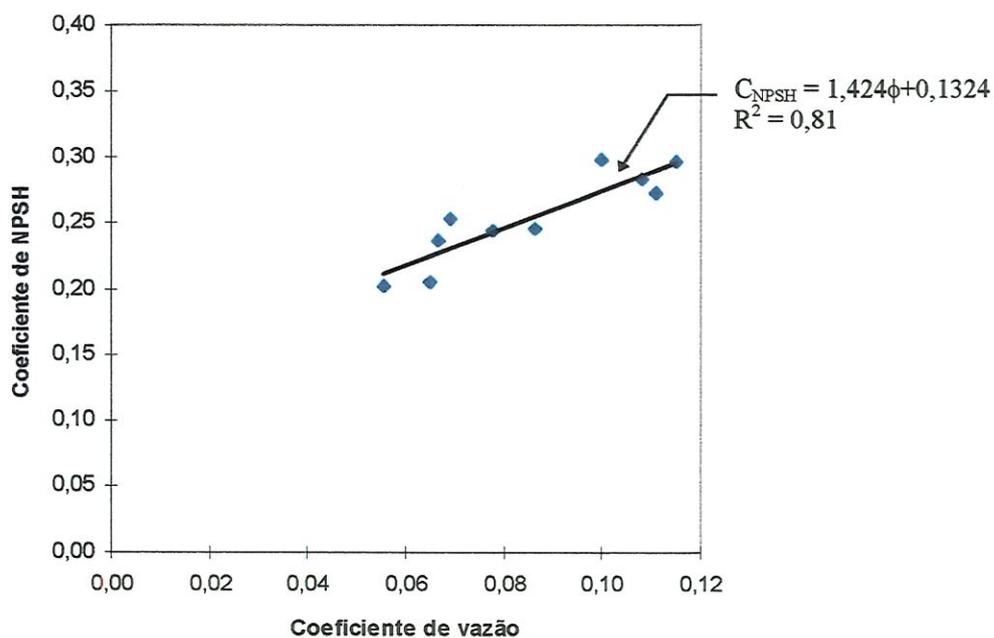


Figura 68 - Gráfico $C_{NPSH} \times \phi$ - ajuste dos pontos relativos as rotações 1350, 1440 rpm corrigidos para 1400 rpm e os próprios valores de 1400 rpm, retirado os pontos

Para os ensaios realizados, foram também plotados os gráficos de $\Psi \times \phi$, mostrados a seguir:

Registro totalmente aberto

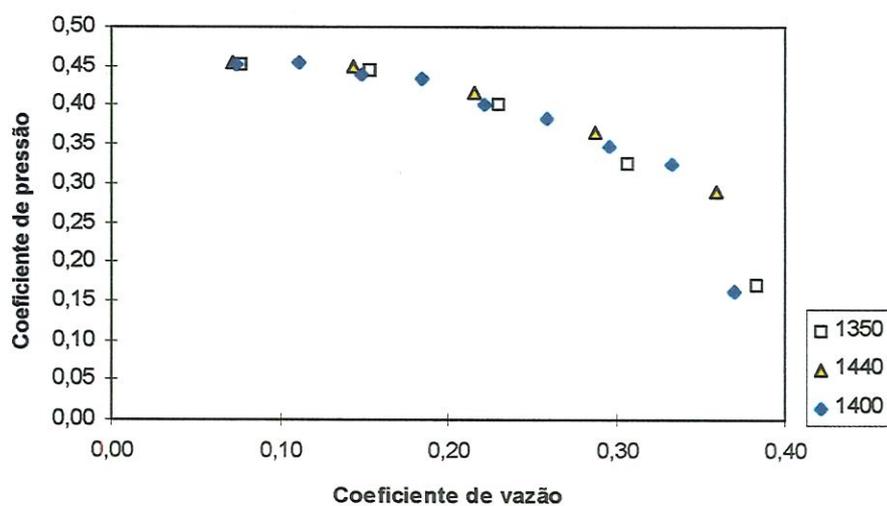


Figura 69 - Gráfico de Coeficiente de Pressão \times Coeficiente de Vazão - rotações 1350, 1400 e 1440 rpm - registro de sucção totalmente aberto

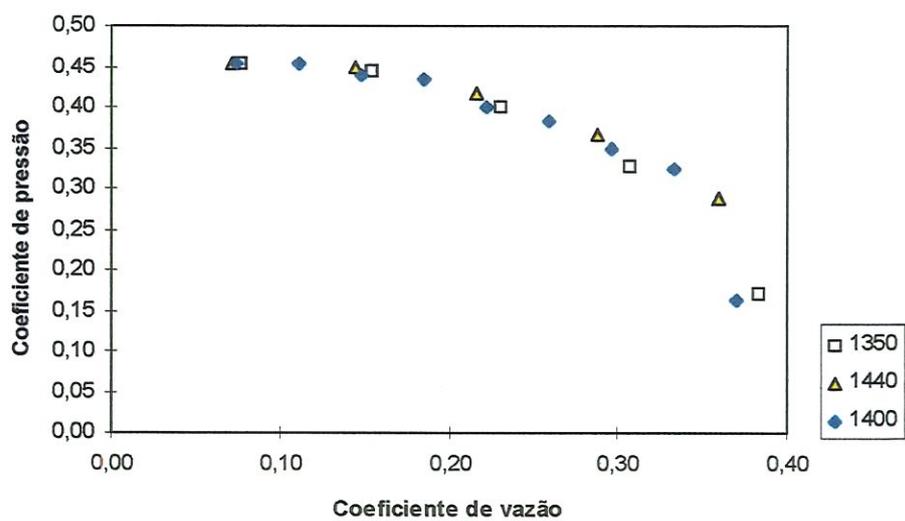
Registro com 10 voltas fechadas

Figura 70 - Gráfico de Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão - rotações 1350, 1400 e 1440 rpm - registro de sucção 10 voltas fechadas

De fato, os resultados obtidos de $\Psi \times \phi$ são coerentes quando comparados a resultados obtidos a partir de dados de catálogos de fabricantes. Abaixo são apresentados quatro gráficos principais obtidos a partir de dados de catálogos de um conhecido fabricante, sendo que mais resultados estão no Anexo 3.

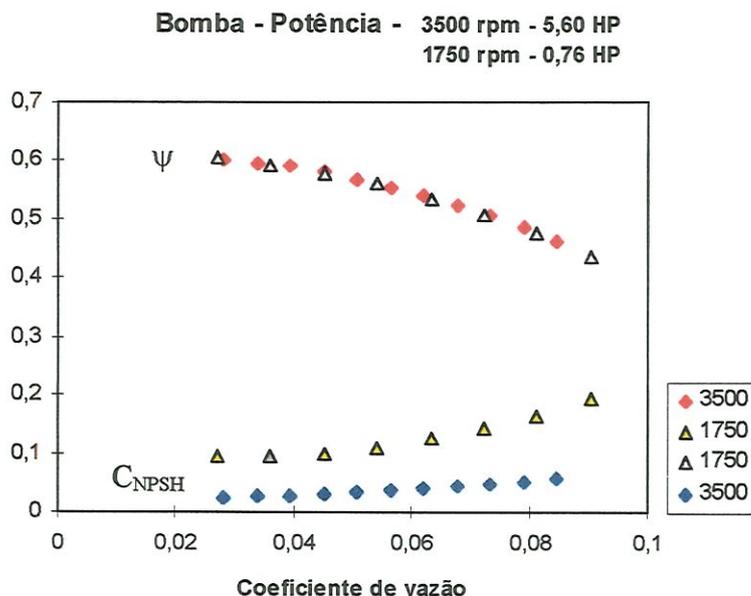


Figura 71 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão e Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão para bomba (Potência : 5,60 HP).

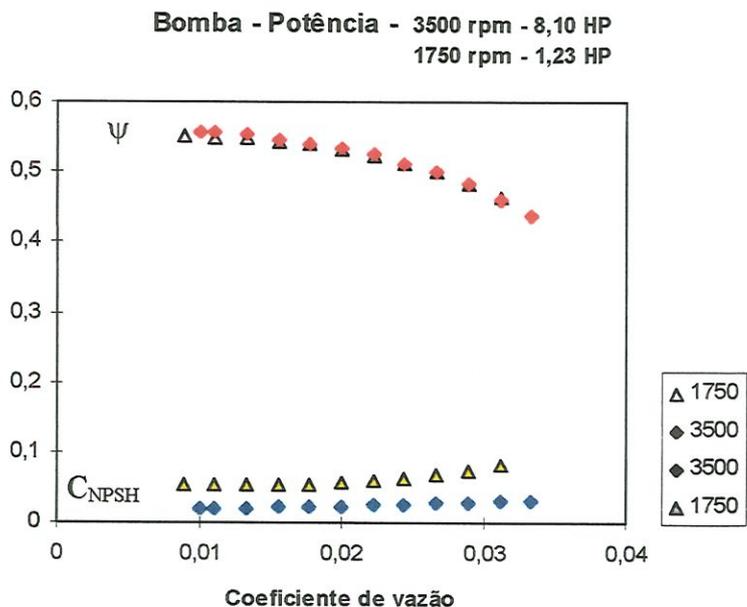


Figura 72 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão e Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão para bomba (Potência : 8,10 HP).

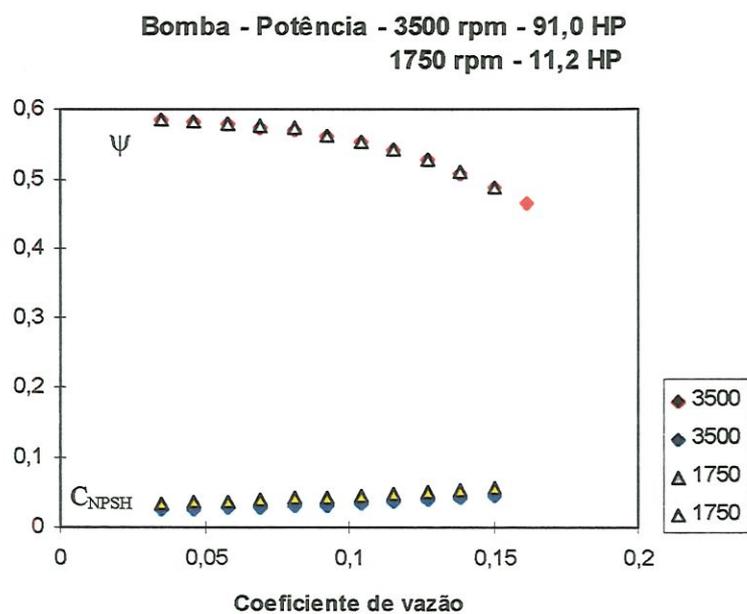


Figura 73 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão e Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão para bomba (Potência : 91 HP).

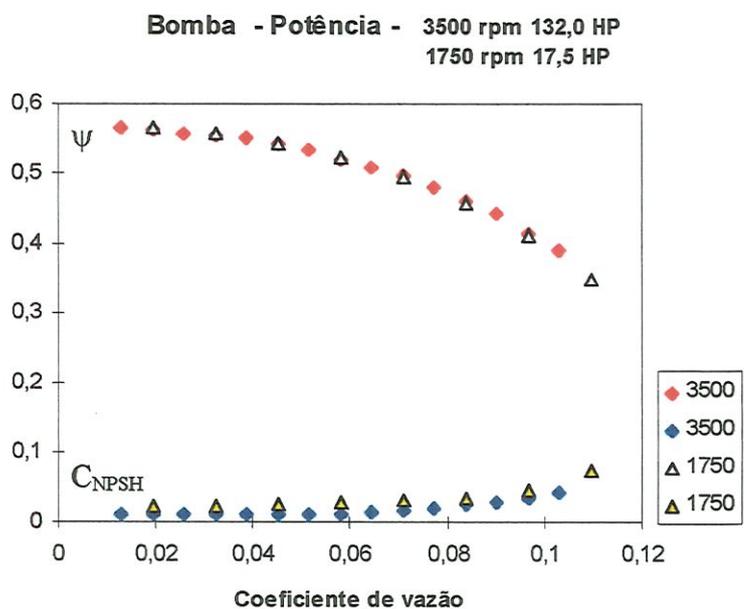


Figura 74 - Gráfico de Coeficiente de NPSH requerido x Coeficiente de Vazão e Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão para bomba (Potência : 132 HP).

Então, de acordo com a bibliografia, a função $\Psi \times \varnothing$, praticamente independente do Número de Reynolds, ou seja, de acordo com a figura abaixo, para vários Reynolds, os pontos de $\Psi \times \varnothing$ quase que coincidem, ou seja, tanto $\Psi \times \varnothing$ obtido com os dados obtidos através de ensaios e os obtidos através de catálogos, apresentaram resultados de acordo com a figura 75, baseada em referências bibliográficas.

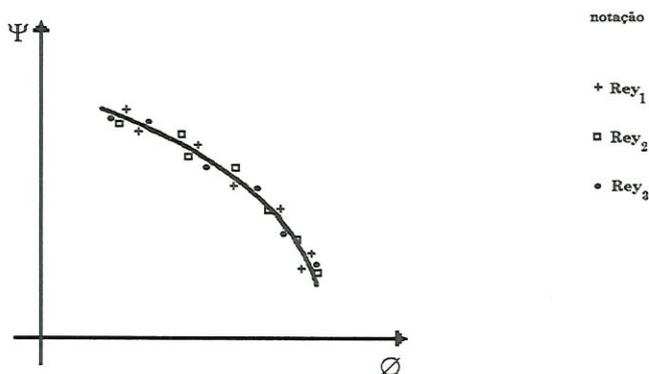


Figura 75 - Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão para diferentes Reynolds

O coeficiente de *NPSH* (C_{NPSH}), na verdade, é um coeficiente de pressão (Ψ). Porém, observa-se que, pelas figuras 71 a 74, que $C_{NPSH} \times \varnothing$, para cada bomba com diferentes Reynolds, apresentam significativas variações, ou seja, ao contrário do que ocorre com $\Psi \times \varnothing$.

Convém salientar que, no caso, a variação de Reynolds se deve à variação de rotação, contanto que não haja troca de líquido e que a vazão, permaneça, constante ao longo do ensaio, sendo que o diâmetro das seções em determinados pontos também não varia durante o ensaio.

Então no caso de $\Psi = \frac{g \cdot H}{(\omega \cdot R)^2}$ e $\phi = \frac{Q}{\omega \cdot R^3}$, respectivamente

coeficientes de pressão e de vazão, pode-se prever vazões e alturas totais de elevação, para quaisquer valores de rotação e raio do rotor com grande precisão, sem a necessidade de novos ensaios.

Pois, se o comportamento de Ψ x ϕ for próximo para diferentes números de Reynolds, pode-se igualar os coeficientes adimensionais, conforme mostrado abaixo:

$$\Psi = cte = \frac{H_1}{(\omega_1 \cdot R_1)^2} = \frac{H_2}{(\omega_2 \cdot R_2)^2} \therefore H_1 = H_2 \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \quad (51)$$

$$\phi = cte = \frac{Q_1}{\omega_1 \cdot R_1^3} = \frac{Q_2}{\omega_2 \cdot R_2^3} \therefore Q_1 = Q_2 \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right) \cdot \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3 \quad (52)$$

Mas no caso de C_{NPSH} , pelos resultados obtidos, não se pode aplicar a teoria do pontos homólogos, pois é mostrado que C_{NPSH} não é tão constante quanto ϕ e Ψ .

Acha-se, então, que não se pode aplicar com precisão uma fórmula de pontos homólogos para o caso do Coeficiente de $NPSH$ (C_{NPSH}).

Acha-se que uma fórmula de pontos homólogos para o C_{NPSH} , somente poderia ser proposta com correções, ou seja sendo o fenômeno de cavitação um fenômeno complexo e envolvendo muitas variáveis, acha-se que para se chegar a esta fórmula, seria necessário fazer correções das principais variáveis que influem no fenômeno de cavitação, como : vórtices, alteração da temperatura do ambiente e, conseqüentemente da água durante o processo, ar dissolvido na água, entre outros.

Tratando-se de um fenômeno como cavitação, esta modelagem para se tornar bastante precisa exigiria uma modelagem complexa, mas seria alvo de futuros estudos.

Nos ensaios realizados, tentou-se fazer uma identificação visual do início da ocorrência de cavitação, através de observação de bolhas de ar, formadas no reservatório que contém a tubulação de sucção e recalque.

Tal fato, mostra que a 1ª indicação de cavitação ocorre com a formação de bolhas de ar na entrada da bomba.

Apesar da dificuldade de se detectar o início da cavitação, mesmo com equipamentos especiais, tais como “Luz Estroboscópica”, situada na sucção da bomba, entre outros equipamentos, fez-se a tentativa de observar as bolhas de ar formadas na superfície do reservatório, onde encontravam-se mergulhadas as tubulações de sucção e recalque da bomba.

Então, a cada porcentagem de fechamento do registro, foram anotadas as porcentagens de bolhas de ar observadas visualmente, através de uma convenção adotada preliminarmente.

Nesta convenção adotou-se a seguinte sequência:

- 1- Pouquíssimo ar (cor: preta)
- 2-Pouco ar (cor: azul)
- 3- Ar (cor: vermelho)
- 4- Intermediário entre ar e bastante ar (cor :amarelo)
- 5- Bastante ar (cor :cyan)

De acordo com alguns dos resultados apresentados no Anexo 3, é mostrado que os resultados obtidos apresentam-se coerentes, no sentido de que, à medida em que se reduz a pressão na entrada da bomba, a porcentagem de ar aumenta, ou seja, de acordo com a bibliografia, à medida que a pressão é reduzida na entrada da bomba, a tendência é a cavitação tornar-se mais acentuada, aumentando assim a formação de ar.

A seguir são apresentados alguns dos resultados do Anexo 2.

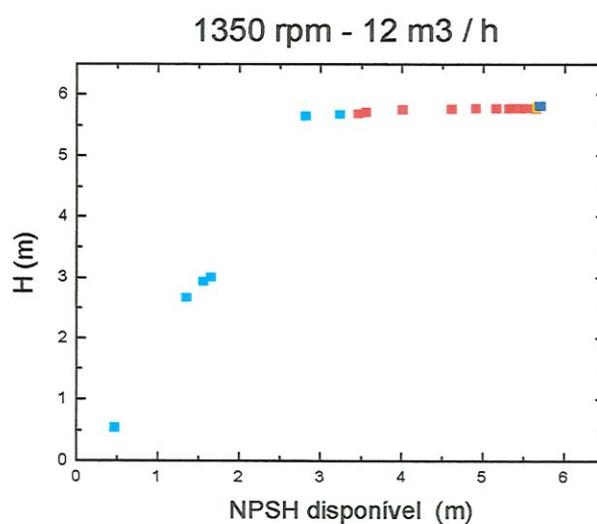


Figura 76 Cavitação incipiente, convenção visual - exemplo 1

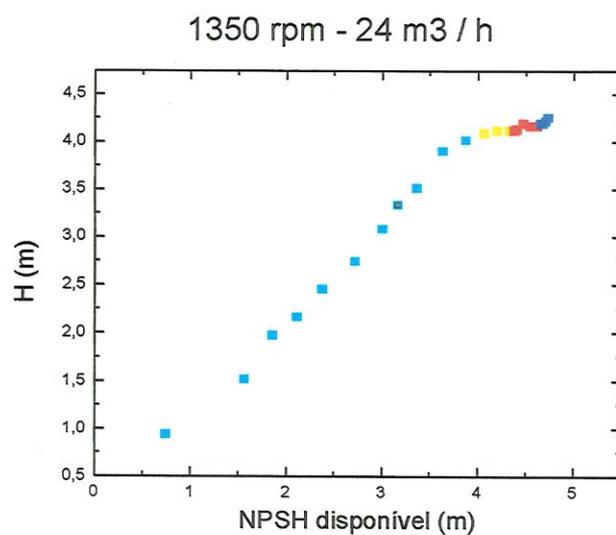


Figura 77- Cavitação incipiente, convenção visual - exemplo 2

Os mesmos coeficientes adimensionais foram plotados para a cavitação incipiente, e à cavitação de 3% .

De acordo com figura abaixo, o resultado esperado no traçado da curva $C_{NPSH \text{ incipiente}} \times \varnothing$ é de uma função crescente, não necessariamente linear, aproximadamente paralela e superior à função $C_{NPSH 3\%} \times \varnothing$.

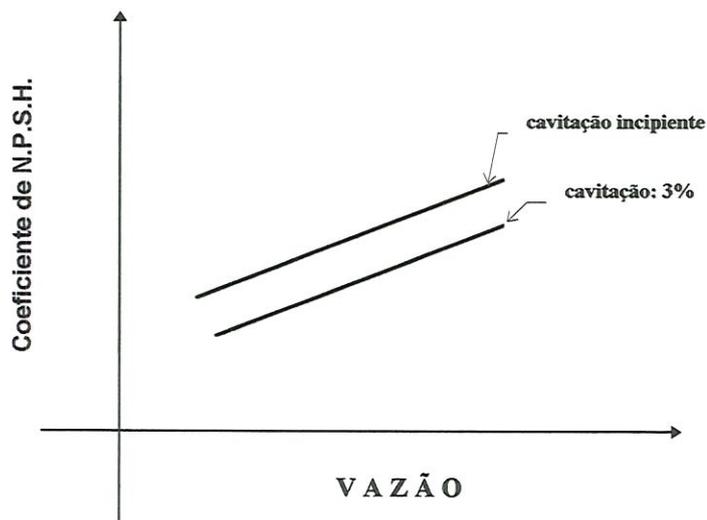


Figura 78 - Cavitação incipiente e cavitação aos 3% -fonte teórica

Entretanto, chegou-se a uma figura com um decaimento decrescente e constante, conforme mostrado abaixo:

Cavitação Incipiente

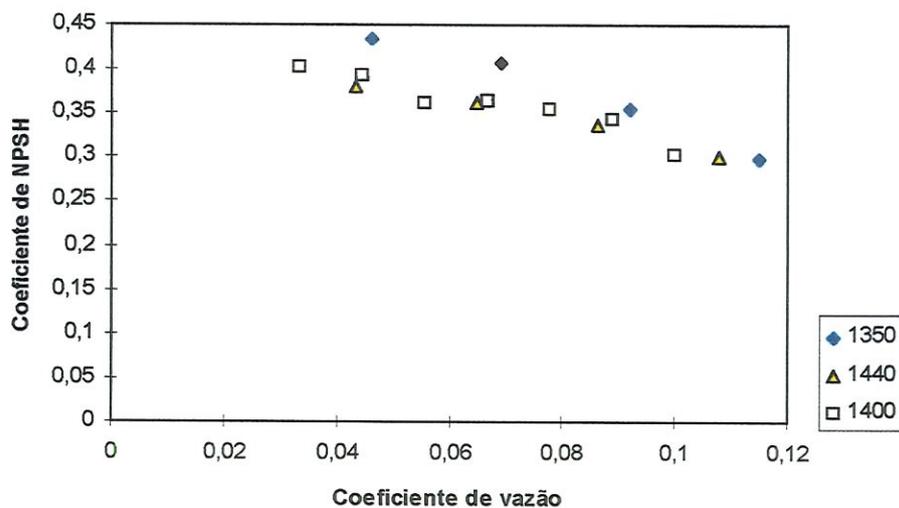


Figura 79 - Coeficiente de NPSH x Coeficiente de Vazão, valores obtidos

Inicialmente, concluiu-se que este formato decrescente seria originado de um grande erro na detecção visual. Entretanto, devido aos fatores apresentados abaixo, talvez este fato seja explicável:

1- Devido ao fato de não se ter achado referências bibliográficas mostrando gráficos desta natureza, oriundos de ensaios feitos em laboratório e não de suposições.

2- O formato das curvas parece ter um formato decrescente, mas bastante uniforme.

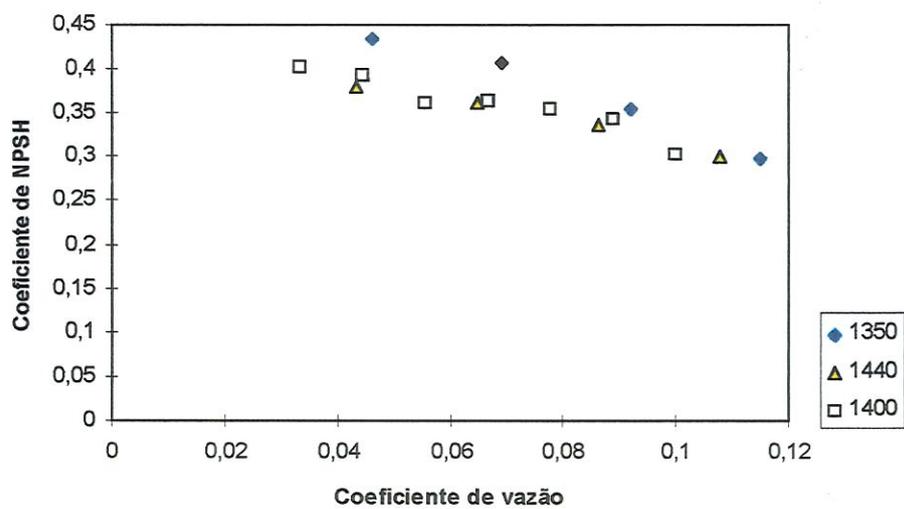
3- As curvas adimensionais se aproximam muito para diferentes Números de Reynolds.

Este item é bastante coerente devido ao fato de que durante a fase de cavitação incipiente, muitos fatores, que agem no fenômeno de cavitação aos 3%, ainda não começaram a se manifestar, tais como : turbulência, vórtices, ar e água dissolvidos, etc..

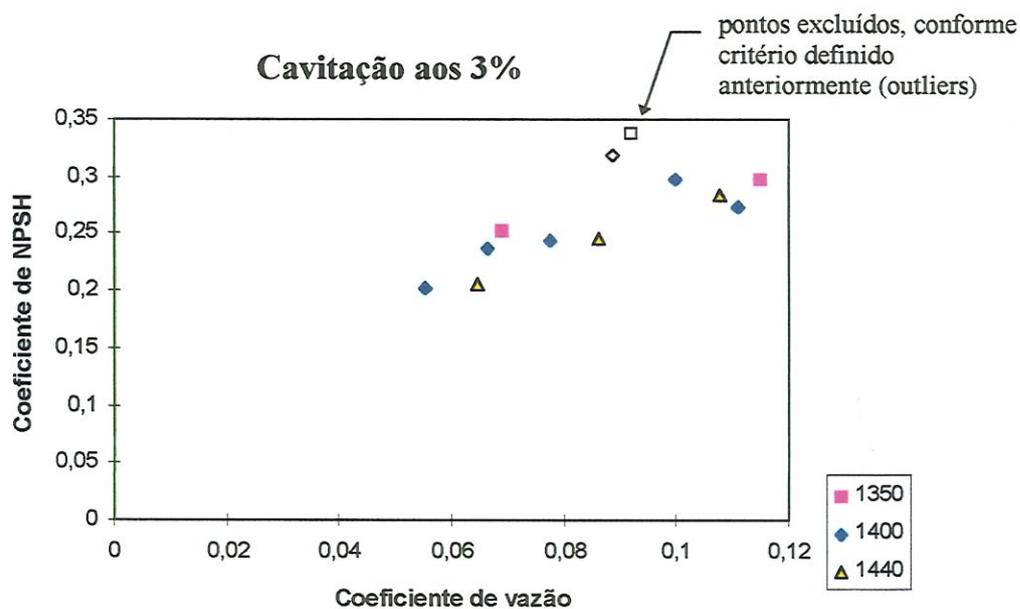
Então, o afastamento na curva $C_{NPSH\ 3\%} \times \varnothing$, para diferentes Reynolds, atribuído a esses parâmetros não ocorre na cavitação incipiente.

A seguir, são apresentados juntos os gráficos $C_{NPSH} \times \varnothing$, para cavitação incipiente e de 3%, para se notar, como os efeitos da cavitação incipiente são mais acentuados.

Cavitação Incipiente



(a)



(b)

Figura 80 - Comparação entre Coeficiente de Pressão x Coeficiente de Vazão, para cavitação incipiente (a) e cavitação aos 3% (b)

Mesmo com a retirada dos pontos, conforme mostrado anteriormente, é visível que o comportamento da função para a cavitação incipiente (figura 80a) é mais acentuado.

5 - Conclusões e recomendações

Conclusões:

1- O uso de uma bomba auxiliar em série é uma maneira cômoda de realizar ensaios de cavitação, uma vez que a detecção de cavitação pode ser realizada mantendo-se a vazão constante.

2- O comportamento da bomba auxiliar não apresenta mudanças significativas após a cavitação da unidade de ensaio.

3- Devido à sensibilidade dos equipamentos, durante a cavitação, e ao fato de os dados não serem processados em paralelo ao ensaio, fica praticamente impossível determinar o ponto experimental exato de 3% de queda da altura total de elevação, sendo então necessário um ajuste coerente de uma função à nuvem de pontos, de tal modo que cheguemos ao ponto de 3%.

4- A detecção dos 3% ou 3+x% é a detecção mais simples de cavitação. Há também outras técnicas, como: análise qualitativa de bolhas a jusante da bomba (no reservatório); o uso de dois medidores de vazão eletromagnéticos instalados antes e depois da bomba; detecção do ruído durante o ensaio, as quais são de mais difícil percepção.

5- A partir dos valores obtidos experimentalmente, mostra-se que o trecho horizontal das funções que representam $NPSH_r$ x $Vazão$ (figura 31), de forma geral, não se constitui de uma única reta horizontal, mas de algumas retas horizontais, até conduzir à uma função continuamente decrescente.

Devido a isso, a detecção dos 3% de queda de altura total de elevação, tomada como ponto para se determinar o $NPSH$ requerido, não é tão fácil quanto a mostrada em referências bibliográficas básicas.

6- Os resultados obtidos, traçando-se as curvas de $NPSH$ requerido x $Vazão$, conduzem a resultados satisfatórios comparados com catálogos de fabricantes, ou seja, apresentando um comportamento crescente.

7- Com o reservatório de grandes dimensões, a temperatura da água praticamente permaneceu constante durante os dias de realização dos ensaios, uma vez que a variação da pressão atmosférica não é significativa.

8- O ajuste dos pontos experimentais, para a determinação dos 3% de queda da altura total de elevação, na maioria dos casos, foi feito ou através de uma função polinomial, utilizando todos os pontos disponíveis; ou através de um ajuste linear entre os pontos de interesse.

9- Tanto Ψ x ϕ , para diferentes Reynolds, obtidos a partir de experimentos, quanto os obtidos através de dados de catálogo coincidem com a bibliografia. (figuras 71 a 74 e Anexo 3).

10- Adotou-se uma convenção, com relação às bolhas de ar observadas na superfície do reservatório, para a detecção da cavitação incipiente.

Apesar de uma série de fatores que poderiam afetar a precisão destas tais como : vórtices, turbulência no reservatório e devido a este ter em seu interior as tubulações de sucção e recalque, além de todos os fatores que

influem na cavitação, os resultados obtidos (figura 80) apresentam um formato coerente e mais acentuado que na cavitação aos 3%.

11- Devido ao fato de em comparação das curvas *NPSH requerido x Vazão* para diferentes Reynolds, de cavitação incipiente e cavitação aos 3%, observou-se que a função relativa à cavitação incipiente apresenta uma tendência melhor definida com relação à mesma função de cavitação aos 3% e, portanto, conclui-se que os pontos homólogos poderiam ser aplicados para a cavitação incipiente, e não para a cavitação aos 3% (que é a de interesse comercial).

Este fato é explicado devido à maior quantidade de fatores envolvidos na cavitação dos 3% do que os na cavitação incipiente.

Então, acha-se que uma expressão do tipo de pontos homólogos para se prever $NPSH_{3\%}$, a partir de outros dados, deveria ser acrescida de outros coeficientes, relativos a mais fatores que intervêm na cavitação plena.

Recomendações:

1- A partir da conclusão 3, é recomendado que se processe os dados em paralelo a realização dos ensaios, para se obter exatamente o ponto de 3% de queda da altura total de elevação, o que conduz ao NPSH requerido.

2- Para que não haja cavitação no registro de sucção, recomenda-se o uso de dois ou mais registros em série.

3- Considerando a conclusão 5, recomenda-se que seja adotada a reta horizontal com maior valor de H , isto principalmente para aplicações práticas. De acordo com o demonstrado, esta conduzirá a um valor de $NPSH_7$, a favor da segurança (figura 31).

4- Devido ao fato da ocorrência de cavitação estar associada a baixas pressões, é interessante que neste tipo de ensaio sejam utilizadas bombas especiais para baixa pressão do tipo submersa. Pois, se estas não forem utilizadas, ou não se lançar mão de alterações no equipamento, conforme efetuado, poderá ocorrer entrada de ar através da gaxeta, interferindo, assim, nos resultados finais do ensaio.

5 - Não é recomendável fazer a previsão de *NPSH requerido* de uma bomba a partir de dados de outra (através de pontos homólogos), como ocorre com a altura total de elevação, a vazão e o rendimento. Pois, de acordo com os resultados mostrados no Anexo 3, vê-se que as variações são significativas.

ANEXO - 1 - Tabela detalhada de valores obtidos e calculados

ROTAÇÃO : 1350 RPM

VAZÃO: 6 m³/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	vazão (m³/h)	vazão (m³/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1350	0,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	0,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	1,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	1,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	2,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	2,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	3,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	3,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	4,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	4,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	5,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	5,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	6,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	6,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	7,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,748	0,664	5,9034	6,2302	POUQ	5,9155
1350	7,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,746	0,661	5,9034	6,1904	POUQ	5,8757
1350	8,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,745	0,659	5,9034	6,1642	POUQ	5,8495
1350	8,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,682	0,745	0,659	5,9034	6,1642	PA	5,8495
1350	9,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,683	0,744	0,658	5,9034	6,1380	PA	5,8233
1350	9,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,685	0,744	0,658	5,9034	6,1128	PA	5,7981
1350	10,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,687	0,744	0,657	5,9034	6,0750	PA	5,7603
1350	10,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,689	0,743	0,655	5,9034	6,0236	PA	5,7089
1350	11,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,690	0,741	0,655	5,9034	6,0090	PA	5,6943
1350	11,50	6	0,0016667	0,790	0,322	0,692	0,739	0,651	5,9034	5,9314	PA	5,6167
1350	12,00	6	0,0016667	0,790	0,322	0,697	0,732	0,647	5,9034	5,8110	PA	5,4963
1350	12,13	6	0,0016667	0,790	0,322	0,700	0,730	0,644	5,9034	5,7334	PA	5,4187
1350	12,25	6	0,0016667	0,790	0,322	0,702	0,727	0,642	5,9034	5,6800	PA	5,3653
1350	12,38	6	0,0016667	0,790	0,322	0,707	0,725	0,640	5,9034	5,5898	PA	5,2751
1350	12,50	6	0,0016667	0,788	0,323	0,709	0,720	0,635	5,8656	5,4966	PA	5,1819

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	vazão (m3/h)	vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1350	12,63	6	0,0016667	0,788	0,323	0,712	0,718	0,632	5,8656	5,4190	PA	5,1043
1350	12,75	6	0,0016667	0,788	0,323	0,720	0,711	0,625	5,8656	5,2230	PA	4,9083
1350	12,88	6	0,0016667	0,787	0,323	0,726	0,701	0,616	5,8530	5,0240	PA	4,7093
1350	13,00	6	0,0016667	0,788	0,323	0,731	0,699	0,612	5,8656	4,9086	PA	4,5939
1350	13,13	6	0,0016667	0,788	0,323	0,740	0,693	0,605	5,8656	4,7010	PA	4,3863
1350	13,25	6	0,0016667	0,788	0,323	0,750	0,680	0,592	5,8656	4,3982	PA	4,0835
1350	13,38	6	0,0016667	0,788	0,323	0,762	0,670	0,582	5,8656	4,1110	PA	3,7963
1350	13,50	6	0,0016667	0,788	0,323	0,767	0,660	0,575	5,8656	3,9498	PA	3,6351
1350	13,63	6	0,0016667	0,620	0,490	0,767	0,664	0,570	1,6446	3,8908	PA	3,5761
1350	13,75	6	0,0016667	0,570	0,542	0,875	0,552	0,465	0,3594	1,0950	PA	0,7803
1350	13,88	6										

Trepidação

VAZÃO:12 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	vazão (m3/h)	vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1350	0,00	12	0,0033333	0,785	0,326	0,690	0,741	0,655	5,8097	6,0090	POUQ	5,7124
1350	0,50	12	0,0033333	0,785	0,326	0,690	0,741	0,655	5,8097	6,0090	POUQ	5,7124
1350	1,00	12	0,0033333	0,785	0,326	0,691	0,740	0,655	5,8097	5,9954	POUQ	5,6988
1350	1,50	12	0,0033333	0,785	0,326	0,692	0,738	0,653	5,8097	5,9556	PA	5,6590
1350	2,00	12	0,0033333	0,784	0,327	0,692	0,738	0,653	5,7845	5,9556	PA	5,6590
1350	2,50	12	0,0033333	0,783	0,327	0,692	0,738	0,653	5,7719	5,9556	PA	5,6590
1350	3,00	12	0,0033333	0,783	0,327	0,692	0,738	0,653	5,7719	5,9556	PA	5,6590
1350	3,50	12	0,0033333	0,783	0,327	0,692	0,738	0,653	5,7719	5,9556	PA	5,6590
1350	4,00	12	0,0033333	0,783	0,327	0,692	0,738	0,653	5,7719	5,9556	AR	5,6590
1350	4,50	12	0,0033333	0,783	0,327	0,692	0,738	0,653	5,7719	5,9556	AR	5,6590
1350	5,00	12	0,0033333	0,783	0,327	0,692	0,738	0,653	5,7719	5,9556	AR	5,6590
1350	5,50	12	0,0033333	0,783	0,327	0,692	0,738	0,653	5,7719	5,9556	AR	5,6590
1350	6,00	12	0,0033333	0,783	0,327	0,692	0,738	0,653	5,7719	5,9556	AR	5,6590
1350	6,50	12	0,0033333	0,783	0,327	0,693	0,737	0,652	5,7719	5,9294	AR	5,6328
1350	7,00	12	0,0033333	0,783	0,327	0,693	0,736	0,651	5,7719	5,9158	AR	5,6192
1350	7,50	12	0,0033333	0,783	0,327	0,695	0,735	0,649	5,7719	5,8644	AR	5,5678
1350	8,00	12	0,0033333	0,783	0,327	0,696	0,734	0,648	5,7719	5,8382	AR	5,5416
1350	8,50	12	0,0033333	0,783	0,327	0,697	0,733	0,648	5,7719	5,8246	AR	5,5280
1350	9,00	12	0,0033333	0,783	0,327	0,699	0,731	0,646	5,7719	5,7722	AR	5,4756
1350	9,50	12	0,0033333	0,783	0,327	0,701	0,729	0,644	5,7719	5,7198	AR	5,4232
1350	10,00	12	0,0033333	0,783	0,327	0,705	0,725	0,640	5,7719	5,6150	AR	5,3184
1350	10,50	12	0,0033333	0,783	0,327	0,712	0,720	0,635	5,7719	5,4588	AR	5,1622
1350	11,00	12	0,0033333	0,783	0,327	0,721	0,710	0,625	5,7719	5,2094	AR	4,9128
1350	11,50	12	0,0033333	0,783	0,328	0,732	0,700	0,613	5,7593	4,9096	AR	4,6130
1350	12,00	12	0,0033333	0,783	0,329	0,755	0,675	0,590	5,7467	4,3050	AR	4,0084
1350	12,25	12	0,0033333	0,781	0,330	0,772	0,669	0,572	5,7089	3,8580	AR	3,5614
1350	12,38	12	0,0033333	0,780	0,331	0,776	0,655	0,570	5,6837	3,7684	AR	3,4718
1350	12,50	12	0,0033333	0,780	0,332	0,785	0,646	0,561	5,6711	3,5326	BA	3,2360
1350	12,63	12	0,0033333	0,779	0,333	0,800	0,630	0,544	5,6459	3,1134	BA	2,8168
1350	12,75	12	0,0033333	0,675	0,439	0,845	0,589	0,500	2,9999	1,9510	BA	1,6544
1350	12,88	12	0,0033333	0,671	0,441	0,850	0,585	0,498	2,9243	1,8588	BA	1,5622
1350	13,00	12	0,0033333	0,659	0,450	0,857	0,575	0,489	2,6597	1,6472	BA	1,3506
1350	13,13	12	0,0033333	0,576	0,535	0,890	0,540	0,455	0,5429	0,7680	BA	0,4714
1350	13,25	12										

Trepidação

VAZÃO:18 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1350	0,00	18	0,0050000	0,760	0,350	0,705	0,725	0,640	5,2252	5,6150	PA-AR	5,3486
1350	0,50	18	0,0050000	0,760	0,350	0,706	0,724	0,639	5,2252	5,5888	PA-AR	5,3224
1350	1,00	18	0,0050000	0,760	0,350	0,706	0,724	0,639	5,2252	5,5888	PA-AR	5,3224
1350	1,50	18	0,0050000	0,760	0,351	0,706	0,724	0,639	5,2126	5,5888	AR	5,3224
1350	2,00	18	0,0050000	0,760	0,351	0,706	0,724	0,639	5,2126	5,5888	AR	5,3224
1350	2,50	18	0,0050000	0,760	0,351	0,707	0,723	0,638	5,2126	5,5626	AR	5,2962
1350	3,00	18	0,0050000	0,760	0,351	0,707	0,723	0,638	5,2126	5,5626	AR	5,2962
1350	3,50	18	0,0050000	0,760	0,351	0,707	0,722	0,637	5,2126	5,5490	AR	5,2826
1350	4,00	18	0,0050000	0,760	0,351	0,708	0,721	0,636	5,2126	5,5228	AR	5,2564
1350	4,50	18	0,0050000	0,760	0,351	0,710	0,720	0,635	5,2126	5,4840	AR	5,2176
1350	5,00	18	0,0050000	0,759	0,352	0,710	0,720	0,634	5,1874	5,4714	AR	5,2050
1350	5,50	18	0,0050000	0,758	0,352	0,711	0,719	0,633	5,1748	5,4452	AR	5,1788
1350	6,00	18	0,0050000	0,758	0,352	0,712	0,718	0,633	5,1748	5,4316	AR	5,1652
1350	6,50	18	0,0050000	0,758	0,352	0,713	0,717	0,631	5,1748	5,3928	AR	5,1264
1350	7,00	18	0,0050000	0,758	0,352	0,714	0,717	0,631	5,1748	5,3802	AR	5,1138
1350	7,50	18	0,0050000	0,758	0,352	0,714	0,717	0,630	5,1748	5,3676	AR	5,1012
1350	8,00	18	0,0050000	0,758	0,352	0,720	0,711	0,624	5,1748	5,2104	BA	4,9440
1350	8,50	18	0,0050000	0,758	0,352	0,722	0,709	0,622	5,1748	5,1580	BA	4,8916
1350	9,00	18	0,0050000	0,758	0,352	0,730	0,701	0,615	5,1748	4,9610	BA	4,6946
1350	9,50	18	0,0050000	0,758	0,352	0,735	0,695	0,610	5,1748	4,8290	BA	4,5626
1350	10,00	18	0,0050000	0,758	0,352	0,742	0,688	0,600	5,1748	4,6078	BA	4,3414
1350	10,50	18	0,0050000	0,756	0,353	0,757	0,670	0,586	5,1370	4,2244	BA	3,9580
1350	11,00	18	0,0050000	0,756	0,355	0,772	0,655	0,570	5,1118	3,8188	BA	3,5524
1350	11,13	18	0,0050000	0,751	0,358	0,790	0,642	0,555	5,0110	3,3900	BA	3,1236
1350	11,25	18	0,0050000	0,751	0,360	0,795	0,638	0,550	4,9858	3,2600	BA	2,9936
1350	11,38	18	0,0050000	0,748	0,362	0,800	0,630	0,545	4,9228	3,1260	BA	2,8596
1350	11,50	18	0,0050000	0,748	0,365	0,800	0,630	0,541	4,8850	3,0756	BA	2,8092
1350	11,63	18	0,0050000	0,738	0,375	0,810	0,620	0,535	4,6330	2,8640	BA	2,5976
1350	11,75	18	0,0050000	0,680	0,432	0,830	0,601	0,515	3,1840	2,3410	BA	2,0746
1350	11,88	18	0,0050000	0,646	0,462	0,852	0,575	0,490	2,3776	1,7228	BA	1,4564
1350	12,00	18	0,0050000	0,642	0,466	0,860	0,572	0,488	2,2768	1,5938	BA	1,3274
1350	12,13	18	0,0050000	0,635	0,480	0,868	0,565	0,478	2,0122	1,3600	BA	1,0936
1350	12,25	18	0,0050000	0,578	0,532	0,895	0,539	0,456	0,6388	0,7166	BA	0,4502
1350	12,38	18										

Trepidação

VAZÃO:24 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1350	0,00	24	0,0066667	0,720	0,391	0,730	0,700	0,615	4,2507	4,9600	PA	4,7359
1350	0,50	24	0,0066667	0,718	0,392	0,731	0,699	0,614	4,2129	4,9338	PA	4,7097
1350	1,00	24	0,0066667	0,718	0,392	0,731	0,699	0,614	4,2129	4,9338	PA	4,7097
1350	1,50	24	0,0066667	0,717	0,393	0,732	0,698	0,613	4,1877	4,9076	PA	4,6835
1350	2,00	24	0,0066667	0,717	0,393	0,732	0,698	0,613	4,1877	4,9076	PA	4,6835
1350	2,50	24	0,0066667	0,717	0,393	0,733	0,698	0,612	4,1877	4,8824	PA	4,6583
1350	3,00	24	0,0066667	0,717	0,393	0,733	0,698	0,612	4,1877	4,8824	PA	4,6583
1350	3,50	24	0,0066667	0,717	0,393	0,733	0,698	0,612	4,1877	4,8824	PA	4,6583
1350	4,00	24	0,0066667	0,716	0,394	0,735	0,697	0,611	4,1625	4,8436	AR	4,6195
1350	4,50	24	0,0066667	0,716	0,394	0,736	0,696	0,610	4,1625	4,8174	AR	4,5933
1350	5,00	24	0,0066667	0,716	0,394	0,737	0,694	0,608	4,1625	4,7776	AR	4,5535
1350	5,50	24	0,0066667	0,718	0,394	0,740	0,691	0,605	4,1877	4,6990	AR	4,4749
1350	6,00	24	0,0066667	0,715	0,396	0,742	0,690	0,602	4,1247	4,6350	AR	4,4109
1350	6,50	24	0,0066667	0,714	0,396	0,743	0,689	0,601	4,1121	4,6088	AR	4,3847
1350	7,00	24	0,0066667	0,714	0,396	0,745	0,685	0,599	4,1121	4,5544	AR-BA	4,3303
1350	7,50	24	0,0066667	0,714	0,396	0,750	0,680	0,594	4,1121	4,4234	AR-BA	4,1993
1350	8,00	24	0,0066667	0,713	0,397	0,755	0,675	0,589	4,0869	4,2924	AR-BA	4,0683
1350	8,50	24	0,0066667	0,710	0,400	0,762	0,669	0,581	4,0113	4,0974	BA	3,8733
1350	9,00	24	0,0066667	0,706	0,405	0,771	0,659	0,572	3,8979	3,8606	BA	3,6365
1350	9,25	24	0,0066667	0,690	0,420	0,782	0,649	0,562	3,5073	3,5860	BA	3,3619
1350	9,50	24	0,0066667	0,684	0,428	0,790	0,641	0,555	3,3309	3,3890	BA	3,1649
1350	9,75	24	0,0066667	0,675	0,439	0,797	0,632	0,550	3,0789	3,2288	BA	3,0047
1350	10,00	24	0,0066667	0,660	0,451	0,808	0,625	0,539	2,7387	2,9446	BA	2,7205
1350	10,25	24	0,0066667	0,650	0,464	0,820	0,612	0,525	2,4489	2,6040	BA	2,3799
1350	10,50	24	0,0066667	0,638	0,475	0,830	0,602	0,515	2,1591	2,3420	BA	2,1179
1350	10,75	24	0,0066667	0,630	0,482	0,840	0,595	0,505	1,9701	2,0830	BA	1,8589
1350	11,00	24	0,0066667	0,612	0,500	0,852	0,580	0,495	1,5165	1,7908	BA	1,5667
1350	11,25	24	0,0066667	0,588	0,522	0,882	0,550	0,462	0,9369	0,9670	BA	0,7429
1350	11,50	24							Trepidação			

VAZÃO:30 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1350	0,00	30	0,0083333	0,639	0,475	0,760	0,669	0,585	2,2309	4,1730	PA	4,0033
1350	0,50	30	0,0083333	0,639	0,475	0,762	0,668	0,583	2,2309	4,1216	PA	3,9519
1350	1,00	30	0,0083333	0,638	0,476	0,762	0,668	0,583	2,2057	4,1216	PA	3,9519
1350	1,50	30	0,0083333	0,637	0,477	0,763	0,668	0,582	2,1805	4,0964	PA	3,9267
1350	2,00	30	0,0083333	0,637	0,477	0,764	0,668	0,581	2,1805	4,0712	AR	3,9015
1350	2,50	30	0,0083333	0,637	0,477	0,765	0,668	0,581	2,1805	4,0586	AR	3,8889
1350	3,00	30	0,0083333	0,635	0,479	0,766	0,666	0,580	2,1301	4,0314	AR	3,8617
1350	3,50	30	0,0083333	0,634	0,480	0,767	0,665	0,579	2,1049	4,0052	AR	3,8355
1350	4,00	30	0,0083333	0,633	0,481	0,768	0,664	0,578	2,0797	3,9790	AR	3,8093
1350	4,50	30	0,0083333	0,631	0,482	0,770	0,663	0,576	2,0419	3,9276	AR	3,7579
1350	5,00	30	0,0083333	0,629	0,483	0,772	0,660	0,574	2,0041	3,8742	AR	3,7045
1350	5,50	30	0,0083333	0,628	0,485	0,775	0,658	0,572	1,9663	3,8092	AR	3,6395
1350	6,00	30	0,0083333	0,626	0,487	0,777	0,655	0,570	1,9159	3,7558	AR	3,5861
1350	6,50	30	0,0083333	0,622	0,490	0,782	0,650	0,565	1,8277	3,6248	AR	3,4551
1350	7,00	30	0,0083333	0,618	0,492	0,786	0,645	0,560	1,7521	3,5064	AR	3,3367
1350	7,50	30	0,0083333	0,612	0,498	0,790	0,640	0,557	1,6009	3,4132	AR	3,2435
1350	8,00	30	0,0083333	0,602	0,510	0,800	0,630	0,547	1,3237	3,1512	AR	2,9815
1350	8,50	30	0,0083333	0,590	0,522	0,812	0,620	0,534	1,0213	2,8262	AR	2,6565
1350	8,75	30	0,0083333	0,572	0,540	0,825	0,605	0,520	0,5677	2,4710	AR	2,3013
1350	9,00	30	0,0083333	0,566	0,546	0,832	0,600	0,512	0,4165	2,2770	AR	2,1073
1350	9,25	30	0,0083333	0,560	0,550	0,841	0,590	0,505	0,2905	2,0654	AR	1,8957
1350	9,50	30	0,0083333	0,555	0,556	0,850	0,582	0,495	0,1519	1,8180	BA	1,6483
1350	9,75	30	0,0083333	0,550	0,560	0,860	0,575	0,490	0,0385	1,6220	BA	1,4523
1350	10,00	30									Trepidação	

ROTAÇÃO : 1400 RPM**VAZÃO: 6 m3/h**

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	0,00	6	0,0016667	0,806	0,302	0,628	0,788	0,605	6,3570	6,2072	POUQ	5,8925
1400	2,00	6	0,0016667	0,806	0,302	0,630	0,788	0,605	6,3570	6,1820	POUQ	5,8673
1400	4,00	6	0,0016667	0,806	0,302	0,631	0,788	0,605	6,3570	6,1694	POUQ	5,8547
1400	4,50	6	0,0016667	0,806	0,302	0,632	0,788	0,605	6,3570	6,1568	POUQ	5,8421
1400	5,00	6	0,0016667	0,806	0,302	0,632	0,787	0,604	6,3570	6,1432	POUQ	5,8285
1400	5,50	6	0,0016667	0,806	0,302	0,632	0,787	0,604	6,3570	6,1432	POUQ	5,8285
1400	6,00	6	0,0016667	0,806	0,302	0,632	0,786	0,603	6,3570	6,1296	POUQ	5,8149
1400	6,50	6	0,0016667	0,806	0,302	0,632	0,785	0,603	6,3570	6,1286	POUQ	5,8139
1400	7,00	6	0,0016667	0,804	0,305	0,632	0,785	0,603	6,2940	6,1286	POUQ	5,8139
1400	7,50	6	0,0016667	0,804	0,305	0,632	0,784	0,602	6,2940	6,1150	POUQ	5,8003
1400	8,00	6	0,0016667	0,804	0,305	0,632	0,784	0,602	6,2940	6,1150	POUQ	5,8003
1400	8,50	6	0,0016667	0,803	0,306	0,632	0,784	0,601	6,2688	6,1024	POUQ	5,7877
1400	9,00	6	0,0016667	0,803	0,306	0,632	0,784	0,600	6,2688	6,0898	POUQ	5,7751
1400	9,50	6	0,0016667	0,803	0,306	0,635	0,784	0,600	6,2688	6,0520	POUQ	5,7373
1400	10,50	6	0,0016667	0,803	0,306	0,637	0,780	0,599	6,2688	6,0102	POUQ	5,6955
1400	11,00	6	0,0016667	0,804	0,306	0,640	0,778	0,596	6,2814	5,9326	POUQ	5,6179
1400	11,50	6	0,0016667	0,804	0,306	0,642	0,772	0,592	6,2814	5,8510	POUQ	5,5363
1400	12,00	6	0,0016667	0,804	0,304	0,650	0,768	0,585	6,3066	5,6580	PA	5,3433
1400	12,50	6	0,0016667	0,804	0,304	0,665	0,750	0,570	6,3066	5,2620	PA	4,9473
1400	13,00	6	0,0016667	0,804	0,304	0,694	0,722	0,540	6,3066	4,4906	PA	4,1759
1400	13,50	6	0,0016667	0,650	0,460	0,750	0,665	0,485	2,4006	3,0350	PA	2,7203
1400	14,00	6									Trepidação	

VAZÃO: 9 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	0,00	9	0,0025	0,806	0,302	0,685	0,745	0,660	6,3652	6,1390	POUQ	5,8318
1400	2,00	9	0,0025	0,806	0,302	0,685	0,745	0,660	6,3652	6,1390	POUQ	5,8318
1400	4,00	9	0,0025	0,806	0,302	0,686	0,744	0,659	6,3652	6,1128	POUQ	5,8056
1400	4,50	9	0,0025	0,806	0,302	0,687	0,743	0,658	6,3652	6,0866	POUQ	5,7794
1400	5,00	9	0,0025	0,806	0,302	0,687	0,743	0,658	6,3652	6,0866	POUQ	5,7794
1400	5,50	9	0,0025	0,806	0,302	0,687	0,743	0,658	6,3652	6,0866	POUQ	5,7794
1400	6,00	9	0,0025	0,806	0,302	0,687	0,742	0,657	6,3652	6,0730	POUQ	5,7658
1400	6,50	9	0,0025	0,806	0,302	0,687	0,741	0,655	6,3652	6,0468	POUQ	5,7396
1400	7,00	9	0,0025	0,804	0,304	0,687	0,741	0,655	6,3148	6,0468	POUQ	5,7396
1400	7,50	9	0,0025	0,804	0,304	0,687	0,741	0,655	6,3148	6,0468	PA	5,7396
1400	8,00	9	0,0025	0,804	0,305	0,688	0,740	0,655	6,3022	6,0332	PA	5,7260
1400	8,50	9	0,0025	0,804	0,305	0,690	0,739	0,655	6,3022	6,0070	PA	5,6998
1400	9,00	9	0,0025	0,804	0,305	0,691	0,739	0,654	6,3022	5,9818	PA	5,6746
1400	9,50	9	0,0025	0,804	0,305	0,692	0,737	0,652	6,3022	5,9420	AR	5,6348
1400	10,00	9	0,0025	0,804	0,305	0,692	0,735	0,650	6,3022	5,9148	AR	5,6076
1400	10,50	9	0,0025	0,804	0,305	0,696	0,731	0,646	6,3022	5,8100	AR	5,5028
1400	11,00	9	0,0025	0,804	0,305	0,700	0,728	0,640	6,3022	5,6810	AR	5,3738
1400	11,50	9	0,0025	0,804	0,305	0,710	0,720	0,635	6,3022	5,4840	AR	5,1768
1400	12,00	9	0,0025	0,804	0,305	0,722	0,710	0,622	6,3022	5,1590	AR	4,8518
1400	12,50	9	0,0025	0,804	0,305	0,745	0,685	0,600	6,3022	4,5670	AR	4,2598
1400	13,00	9	0,0025	0,804	0,306	0,780	0,655	0,570	6,2896	3,7180	AR	3,4108
1400	13,50	9	0,0025	0,570	0,540	0,885	0,546	0,460	0,3928	0,9000	BA	0,5928
1400	14,00	9										

Trepidação

VAZÃO:12 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	0,00	12	0,0033333	0,798	0,312	0,640	0,780	0,598	6,1499	5,9598	POUQ	5,6632
1400	2,00	12	0,0033333	0,798	0,312	0,640	0,780	0,598	6,1499	5,9598	POUQ	5,6632
1400	4,00	12	0,0033333	0,798	0,312	0,640	0,778	0,597	6,1499	5,9452	POUQ	5,6486
1400	4,50	12	0,0033333	0,798	0,312	0,640	0,776	0,595	6,1499	5,9180	POUQ	5,6214
1400	5,00	12	0,0033333	0,798	0,312	0,640	0,775	0,594	6,1499	5,9044	PA	5,6078
1400	5,50	12	0,0033333	0,798	0,312	0,640	0,775	0,594	6,1499	5,9044	PA	5,6078
1400	6,00	12	0,0033333	0,798	0,312	0,640	0,774	0,593	6,1499	5,8908	PA	5,5942
1400	6,50	12	0,0033333	0,798	0,312	0,640	0,774	0,592	6,1499	5,8782	PA	5,5816
1400	7,00	12	0,0033333	0,798	0,312	0,642	0,772	0,591	6,1499	5,8384	PA	5,5418
1400	7,50	12	0,0033333	0,798	0,312	0,642	0,771	0,590	6,1499	5,8248	AR	5,5282
1400	8,00	12	0,0033333	0,798	0,312	0,645	0,770	0,589	6,1499	5,7734	AR	5,4768
1400	8,50	12	0,0033333	0,798	0,312	0,647	0,769	0,588	6,1499	5,7346	AR	5,4380
1400	9,00	12	0,0033333	0,798	0,312	0,650	0,767	0,586	6,1499	5,6696	AR	5,3730
1400	9,50	12	0,0033333	0,798	0,312	0,652	0,765	0,582	6,1499	5,5920	AR	5,2954
1400	10,50	12	0,0033333	0,795	0,314	0,665	0,750	0,570	6,0869	5,2620	BA	4,9654
1400	11,00	12	0,0033333	0,795	0,314	0,675	0,742	0,560	6,0869	5,0020	BA	4,7054
1400	11,50	12	0,0033333	0,795	0,314	0,688	0,730	0,548	6,0869	4,6750	BA	4,3784
1400	12,00	12	0,0033333	0,795	0,314	0,720	0,700	0,520	6,0869	3,8890	BA	3,5924
1400	12,50	12	0,0033333	0,728	0,381	0,762	0,652	0,470	4,3985	2,6818	BA	2,3852
1400	13,00	12	0,0033333	0,577	0,530	0,840	0,580	0,400	0,6185	0,7450	BA	0,4484
1400	13,50	12										

Trepidação

VAZÃO:15 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	vazão (m3/h)	vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	0,00	15	0,0041667	0,795	0,315	0,695	0,734	0,650	6,0891	5,8760	POUQ	5,5930
1400	2,00	15	0,0041667	0,795	0,315	0,695	0,734	0,650	6,0891	5,8760	POUQ	5,5930
1400	4,00	15	0,0041667	0,795	0,315	0,697	0,731	0,648	6,0891	5,8226	POUQ	5,5396
1400	4,50	15	0,0041667	0,795	0,315	0,698	0,730	0,647	6,0891	5,7964	POUQ	5,5134
1400	5,00	15	0,0041667	0,795	0,315	0,700	0,728	0,645	6,0891	5,7440	POUQ	5,4610
1400	5,50	15	0,0041667	0,795	0,316	0,701	0,728	0,644	6,0765	5,7188	POUQ	5,4358
1400	6,00	15	0,0041667	0,795	0,317	0,701	0,728	0,644	6,0639	5,7188	POUQ	5,4358
1400	6,50	15	0,0041667	0,795	0,317	0,702	0,726	0,643	6,0639	5,6916	POUQ	5,4086
1400	7,00	15	0,0041667	0,795	0,318	0,703	0,725	0,642	6,0513	5,6654	PA	5,3824
1400	7,50	15	0,0041667	0,794	0,318	0,704	0,724	0,640	6,0387	5,6266	PA	5,3436
1400	8,00	15	0,0041667	0,793	0,318	0,706	0,723	0,639	6,0261	5,5878	PA	5,3048
1400	8,50	15	0,0041667	0,792	0,318	0,708	0,720	0,638	6,0135	5,5470	PA	5,2640
1400	9,00	15	0,0041667	0,792	0,318	0,711	0,718	0,634	6,0135	5,4568	PA	5,1738
1400	9,50	15	0,0041667	0,792	0,318	0,715	0,715	0,630	6,0135	5,3530	AR	5,0700
1400	10,00	15	0,0041667	0,793	0,317	0,721	0,710	0,626	6,0387	5,2220	AR	4,9390
1400	10,50	15	0,0041667	0,792	0,317	0,730	0,700	0,615	6,0261	4,9600	AR	4,6770
1400	11,00	15	0,0041667	0,792	0,318	0,745	0,685	0,601	6,0135	4,5796	AR	4,2966
1400	11,50	15	0,0041667	0,792	0,318	0,765	0,667	0,580	6,0135	4,0450	BA	3,7620
1400	12,00	15	0,0041667	0,790	0,322	0,800	0,630	0,545	5,9379	3,1260	BA	2,8430
1400	12,50	15	0,0041667	0,682	0,430	0,845	0,585	0,500	3,2163	1,9470	BA	1,6640
1400	13,00	15										

Trepidação

VAZÃO:18 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	0,00	18	0,0050000	0,775	0,333	0,653	0,765	0,582	5,6284	5,5794	PA	5,3130
1400	2,00	18	0,0050000	0,775	0,333	0,653	0,765	0,582	5,6284	5,5794	PA	5,3130
1400	4,00	18	0,0050000	0,775	0,333	0,655	0,763	0,580	5,6284	5,5270	PA	5,2606
1400	4,50	18	0,0050000	0,775	0,333	0,657	0,760	0,578	5,6284	5,4736	PA	5,2072
1400	5,00	18	0,0050000	0,775	0,333	0,657	0,760	0,578	5,6284	5,4736	PA	5,2072
1400	5,50	18	0,0050000	0,775	0,333	0,658	0,760	0,578	5,6284	5,4610	PA	5,1946
1400	6,00	18	0,0050000	0,775	0,333	0,660	0,758	0,575	5,6284	5,3960	AR	5,1296
1400	6,50	18	0,0050000	0,775	0,333	0,662	0,757	0,574	5,6284	5,3572	AR	5,0908
1400	7,00	18	0,0050000	0,775	0,333	0,663	0,756	0,573	5,6284	5,3310	AR	5,0646
1400	7,50	18	0,0050000	0,775	0,333	0,665	0,752	0,570	5,6284	5,2640	AR	4,9976
1400	8,00	18	0,0050000	0,775	0,333	0,668	0,750	0,568	5,6284	5,1990	BA	4,9326
1400	8,50	18	0,0050000	0,775	0,333	0,672	0,748	0,565	5,6284	5,1088	BA	4,8424
1400	9,00	18	0,0050000	0,775	0,333	0,677	0,741	0,558	5,6284	4,9506	BA	4,6842
1400	9,50	18	0,0050000	0,775	0,333	0,685	0,735	0,550	5,6284	4,7430	BA	4,4766
1400	10,50	18	0,0050000	0,775	0,333	0,710	0,710	0,522	5,6284	4,0502	BA	3,7838
1400	11,00	18	0,0050000	0,775	0,333	0,725	0,690	0,510	5,6284	3,6900	BA	3,4236
1400	11,50	18	0,0050000	0,705	0,402	0,762	0,655	0,470	3,8770	2,6848	BA	2,4184
1400	12,00	18	0,0050000	0,642	0,465	0,810	0,610	0,425	2,2894	1,4680	BA	1,2016
1400	12,50	18										

Trepidação

VAZÃO:21 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	0,00	21	0,0058333	0,765	0,345	0,657	0,721	0,580	5,3726	5,4598	PA	5,2131
1400	2,00	21	0,0058333	0,765	0,345	0,657	0,721	0,580	5,3726	5,4598	PA	5,2131
1400	4,00	21	0,0058333	0,765	0,345	0,661	0,718	0,578	5,3726	5,3812	PA	5,1345
1400	4,50	21	0,0058333	0,765	0,345	0,662	0,717	0,576	5,3726	5,3424	PA	5,0957
1400	5,00	21	0,0058333	0,764	0,346	0,663	0,717	0,575	5,3474	5,3172	PA	5,0705
1400	5,50	21	0,0058333	0,763	0,347	0,665	0,715	0,573	5,3222	5,2648	PA	5,0181
1400	6,00	21	0,0058333	0,762	0,348	0,667	0,713	0,572	5,2970	5,2250	AR	4,9783
1400	6,50	21	0,0058333	0,762	0,348	0,668	0,711	0,570	5,2970	5,1852	AR	4,9385
1400	7,00	21	0,0058333	0,762	0,348	0,670	0,709	0,568	5,2970	5,1328	AR	4,8861
1400	7,50	21	0,0058333	0,762	0,348	0,672	0,707	0,566	5,2970	5,0804	AR	4,8337
1400	8,00	21	0,0058333	0,762	0,348	0,675	0,703	0,560	5,2970	4,9630	AR	4,7163
1400	8,50	21	0,0058333	0,762	0,348	0,680	0,700	0,556	5,2970	4,8466	AR	4,5999
1400	9,00	21	0,0058333	0,762	0,348	0,686	0,694	0,550	5,2970	4,6894	AR	4,4427
1400	9,50	21	0,0058333	0,760	0,345	0,695	0,685	0,540	5,3096	4,4410	AR	4,1943
1400	10,00	21	0,0058333	0,759	0,350	0,708	0,672	0,528	5,2340	4,1130	BA	3,8663
1400	10,50	21	0,0058333	0,759	0,351	0,725	0,655	0,512	5,2214	3,6802	BA	3,4335
1400	11,00	21	0,0058333	0,745	0,365	0,747	0,633	0,490	4,8686	3,1038	BA	2,8571
1400	11,50	21	0,0058333	0,680	0,450	0,790	0,591	0,450	2,7266	2,0160	BA	1,7693
1400	12,00	21	0,0058333	0,577	0,535	0,840	0,541	0,400	0,6098	0,7060	BA	0,4593
1400	12,50	21										

Trepidação

VAZÃO:24 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	0,00	24	0,0066667	0,745	0,365	0,670	0,750	0,565	4,8933	5,1360	PA	4,9119
1400	2,00	24	0,0066667	0,745	0,365	0,670	0,750	0,565	4,8933	5,1360	PA	4,9119
1400	4,00	24	0,0066667	0,745	0,365	0,673	0,745	0,562	4,8933	5,0554	PA	4,8313
1400	4,50	24	0,0066667	0,743	0,367	0,677	0,743	0,561	4,8429	4,9904	PA	4,7663
1400	5,00	24	0,0066667	0,742	0,368	0,670	0,740	0,560	4,8177	5,0630	AR	4,8389
1400	5,50	24	0,0066667	0,742	0,368	0,680	0,738	0,557	4,8177	4,8972	AR	4,6731
1400	6,00	24	0,0066667	0,742	0,368	0,682	0,738	0,557	4,8177	4,8720	AR	4,6479
1400	6,50	24	0,0066667	0,740	0,370	0,684	0,735	0,552	4,7673	4,7808	AR	4,5567
1400	7,00	24	0,0066667	0,740	0,370	0,686	0,732	0,548	4,7673	4,7022	AR	4,4781
1400	7,50	24	0,0066667	0,736	0,375	0,692	0,729	0,542	4,6539	4,5480	AR	4,3239
1400	8,00	24	0,0066667	0,736	0,375	0,697	0,722	0,538	4,6539	4,4276	BA	4,2035
1400	8,50	24	0,0066667	0,736	0,374	0,700	0,718	0,535	4,6665	4,3480	BA	4,1239
1400	9,00	24	0,0066667	0,730	0,380	0,712	0,705	0,521	4,5153	4,0074	BA	3,7833
1400	9,50	24	0,0066667	0,725	0,386	0,725	0,695	0,512	4,3767	3,7202	BA	3,4961
1400	10,50	24	0,0066667	0,655	0,452	0,770	0,650	0,470	2,6631	2,5790	BA	2,3549
1400	11,50	24										

Trepidação

VAZÃO:27 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	0,00	27	0,0075	0,732	0,380	0,677	0,706	0,560	4,5684	4,9408	PA	4,7424
1400	2,00	27	0,0075	0,732	0,380	0,677	0,706	0,560	4,5684	4,9408	PA	4,7424
1400	4,00	27	0,0075	0,732	0,380	0,682	0,700	0,555	4,5684	4,8088	PA	4,6104
1400	4,50	27	0,0075	0,732	0,380	0,683	0,699	0,554	4,5684	4,7826	PA	4,5842
1400	5,00	27	0,0075	0,732	0,380	0,686	0,696	0,551	4,5684	4,7040	PA	4,5056
1400	5,50	27	0,0075	0,732	0,380	0,687	0,694	0,548	4,5684	4,6516	PA	4,4532
1400	6,00	27	0,0075	0,730	0,379	0,690	0,693	0,547	4,5558	4,6002	PA	4,4018
1400	6,50	27	0,0075	0,729	0,378	0,692	0,690	0,544	4,5558	4,5342	PA	4,3358
1400	7,00	27	0,0075	0,729	0,378	0,696	0,687	0,542	4,5558	4,4556	AR	4,2572
1400	7,50	27	0,0075	0,725	0,385	0,700	0,682	0,540	4,4172	4,3750	AR	4,1766
1400	8,00	27	0,0075	0,722	0,387	0,705	0,678	0,530	4,3542	4,1820	AR	3,9836
1400	8,50	27	0,0075	0,717	0,392	0,715	0,669	0,522	4,2282	3,9462	AR	3,7478

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	9,00	27	0,0075	0,706	0,402	0,725	0,657	0,512	3,9636	3,6822	AR	3,4838
1400	9,50	27	0,0075	0,692	0,420	0,738	0,648	0,500	3,5604	3,3582	AR	3,1598
1400	10,00	27	0,0075	0,660	0,450	0,760	0,625	0,480	2,7792	2,8060	BA	2,6076
1400	10,50	27	0,0075	0,625	0,485	0,787	0,595	0,450	1,8972	2,0578	BA	1,8594
1400	11,00	27	0,0075	0,570	0,540	0,822	0,560	0,415	0,5112	1,1408	BA	0,9424
1400	11,50	27	Trepidação									

VAZÃO:30 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	0,00	30	0,0083333	0,640	0,472	0,710	0,710	0,527	2,2816	4,1132	PA	3,9438
1400	2,00	30	0,0083333	0,640	0,472	0,711	0,711	0,527	2,2816	4,1016	PA	3,9322
1400	4,00	30	0,0083333	0,635	0,477	0,717	0,705	0,520	2,1556	3,9318	PA	3,7624
1400	4,50	30	0,0083333	0,628	0,482	0,720	0,700	0,517	2,0044	3,8512	PA	3,6818
1400	5,00	30	0,0083333	0,627	0,485	0,722	0,699	0,515	1,9540	3,7998	PA	3,6304
1400	5,50	30	0,0083333	0,625	0,487	0,725	0,697	0,513	1,9036	3,7348	PA	3,5654
1400	6,00	30	0,0083333	0,624	0,487	0,727	0,695	0,510	1,8910	3,6698	PA	3,5004
1400	6,50	30	0,0083333	0,620	0,492	0,732	0,690	0,505	1,7776	3,5388	PA	3,3694
1400	7,00	30	0,0083333	0,616	0,495	0,736	0,685	0,500	1,6894	3,4204	PA	3,2510
1400	7,50	30	0,0083333	0,612	0,500	0,742	0,680	0,494	1,5760	3,2642	PA	3,0948
1400	8,00	30	0,0083333	0,602	0,508	0,750	0,670	0,485	1,3492	3,0400	PA	2,8706
1400	8,50	30	0,0083333	0,595	0,520	0,762	0,660	0,475	1,1098	2,7528	PA	2,5834
1400	9,00	30	0,0083333	0,582	0,528	0,775	0,650	0,462	0,8452	2,4152	BA	2,2458
1400	9,50	30	0,0083333	0,550	0,560	0,800	0,620	0,436	0,0388	1,7426	BA	1,5732
1400	10,50	30	Trepidação									

ROTAÇÃO : 1440 RPM**VAZÃO:6 m3/h**

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1440	0,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	0,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	1,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	1,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	2,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	2,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	3,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	3,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	4,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	4,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	5,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	5,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	6,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	6,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	POUQ	5,8923
1440	7,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	PA	5,8923
1440	7,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	PA	5,8923
1440	8,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,681	0,750	0,661	6,7476	6,2070	PA	5,8923
1440	8,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,682	0,748	0,660	6,7476	6,1798	PA	5,8651
1440	9,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,684	0,746	0,658	6,7476	6,1274	PA	5,8127
1440	9,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,685	0,744	0,657	6,7476	6,1002	PA	5,7855
1440	10,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,687	0,743	0,660	6,7476	6,1118	PA	5,7971
1440	10,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,689	0,742	0,656	6,7476	6,0352	PA	5,7205
1440	11,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,690	0,739	0,655	6,7476	6,0070	PA	5,6923
1440	11,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,692	0,738	0,652	6,7476	5,9430	PA	5,6283
1440	12,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,698	0,730	0,648	6,7476	5,8090	PA	5,4943
1440	12,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,706	0,722	0,636	6,7476	5,5490	PA	5,2343
1440	13,000	6	0,0016667	0,823	0,288	0,725	0,707	0,620	6,7476	5,0930	PA	4,7783
1440	13,500	6	0,0016667	0,823	0,288	0,763	0,669	0,580	6,7476	4,0722	PA	3,7575
1440	13,625	6	0,0016667	0,760	0,351	0,785	0,650	0,560	5,1600	3,5240	PA	3,2093
1440	13,750	6										

Trepidação

VAZÃO:12 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1440	0,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,690	0,740	0,653	6,6539	5,9828	PA	5,6862
1440	0,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,690	0,740	0,653	6,6539	5,9828	PA	5,6862
1440	1,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,690	0,740	0,653	6,6539	5,9828	PA	5,6862
1440	1,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,690	0,740	0,653	6,6539	5,9828	PA	5,6862
1440	2,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,690	0,740	0,653	6,6539	5,9828	PA	5,6862
1440	2,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,690	0,740	0,653	6,6539	5,9828	PA	5,6862
1440	3,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,690	0,740	0,653	6,6539	5,9828	PA	5,6862
1440	3,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,690	0,740	0,653	6,6539	5,9828	PA	5,6862
1440	4,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,690	0,740	0,653	6,6539	5,9828	PA	5,6862
1440	4,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,690	0,740	0,653	6,6539	5,9828	PA	5,6862
1440	5,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,690	0,740	0,653	6,6539	5,9828	PA	5,6862
1440	5,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,691	0,740	0,653	6,6539	5,9702	PA	5,6736
1440	6,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,691	0,740	0,653	6,6539	5,9702	PA	5,6736
1440	6,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,692	0,738	0,652	6,6539	5,9430	AR	5,6464
1440	7,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,692	0,738	0,652	6,6539	5,9430	AR	5,6464
1440	7,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,695	0,735	0,650	6,6539	5,8770	AR	5,5804
1440	8,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,696	0,734	0,649	6,6539	5,8508	AR	5,5542
1440	8,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,697	0,733	0,648	6,6539	5,8246	AR	5,5280
1440	9,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,699	0,730	0,645	6,6539	5,7586	AR	5,4620
1440	9,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,701	0,728	0,642	6,6539	5,6936	AR	5,3970
1440	10,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,706	0,725	0,636	6,6539	5,5520	AR	5,2554
1440	10,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,712	0,720	0,632	6,6539	5,4210	AR	5,1244
1440	11,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,722	0,710	0,622	6,6539	5,1590	AR	4,8624
1440	11,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,732	0,698	0,612	6,6539	4,8950	AR	4,5984
1440	12,000	12	0,0033333	0,818	0,292	0,750	0,680	0,592	6,6539	4,3982	AR	4,1016
1440	12,500	12	0,0033333	0,818	0,292	0,780	0,650	0,562	6,6539	3,6122	AR	3,3156
1440	12,625	12	0,0033333	0,755	0,355	0,810	0,621	0,536	5,0663	2,8776	BA	2,5810
1440	12,750	12	0,0033333	0,695	0,415	0,842	0,590	0,502	3,5543	2,0150	BA	1,7184
1440	12,875	12	0,0033333	0,680	0,432	0,850	0,580	0,492	3,1511	1,7782	BA	1,4816
1440	13,000	12	0,0033333	0,640	0,472	0,870	0,560	0,478	2,1431	1,3298	BA	1,0332
1440	13,125	12	0,0033333	0,625	0,486	0,877	0,552	0,470	1,7777	1,1328	BA	0,8362
1440	13,250	12										

Trepidação

VAZÃO:18 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1440	0,000	18	0,0050000	0,798	0,312	0,702	0,727	0,640	6,1828	5,6548	AR-BA	5,3884
1440	0,500	18	0,0050000	0,798	0,312	0,702	0,727	0,640	6,1828	5,6548	AR-BA	5,3884
1440	1,000	18	0,0050000	0,798	0,312	0,702	0,727	0,640	6,1828	5,6548	AR-BA	5,3884
1440	1,500	18	0,0050000	0,798	0,312	0,702	0,727	0,640	6,1828	5,6548	AR-BA	5,3884
1440	2,000	18	0,0050000	0,798	0,312	0,702	0,727	0,640	6,1828	5,6548	AR-BA	5,3884
1440	2,500	18	0,0050000	0,798	0,312	0,702	0,727	0,640	6,1828	5,6548	AR-BA	5,3884
1440	3,000	18	0,0050000	0,798	0,312	0,702	0,727	0,640	6,1828	5,6548	AR-BA	5,3884
1440	3,500	18	0,0050000	0,798	0,312	0,702	0,727	0,640	6,1828	5,6548	AR-BA	5,3884
1440	4,000	18	0,0050000	0,798	0,312	0,702	0,727	0,640	6,1828	5,6548	AR-BA	5,3884
1440	4,500	18	0,0050000	0,797	0,312	0,705	0,725	0,638	6,1702	5,5898	AR-BA	5,3234
1440	5,000	18	0,0050000	0,798	0,312	0,707	0,723	0,637	6,1828	5,5500	AR-BA	5,2836
1440	5,500	18	0,0050000	0,798	0,312	0,707	0,722	0,636	6,1828	5,5364	AR-BA	5,2700
1440	6,000	18	0,0050000	0,799	0,312	0,709	0,721	0,635	6,1954	5,4976	AR-BA	5,2312
1440	6,500	18	0,0050000	0,798	0,312	0,711	0,720	0,634	6,1828	5,4588	AR-BA	5,1924
1440	7,000	18	0,0050000	0,799	0,312	0,713	0,718	0,632	6,1954	5,4064	AR-BA	5,1400
1440	7,500	18	0,0050000	0,799	0,312	0,714	0,717	0,631	6,1954	5,3802	AR-BA	5,1138
1440	8,000	18	0,0050000	0,799	0,312	0,716	0,715	0,630	6,1954	5,3404	AR-BA	5,0740
1440	8,500	18	0,0050000	0,799	0,312	0,719	0,711	0,625	6,1954	5,2356	AR-BA	4,9692
1440	9,000	18	0,0050000	0,799	0,312	0,725	0,706	0,621	6,1954	5,1046	AR-BA	4,8382
1440	9,500	18	0,0050000	0,798	0,312	0,731	0,700	0,612	6,1828	4,9096	AR-BA	4,6432
1440	10,000	18	0,0050000	0,798	0,312	0,741	0,690	0,602	6,1828	4,6476	AR-BA	4,3812
1440	10,500	18	0,0050000	0,798	0,312	0,751	0,678	0,592	6,1828	4,3836	AR-BA	4,1172
1440	11,000	18	0,0050000	0,798	0,312	0,771	0,669	0,570	6,1828	3,8454	BA	3,5790
1440	11,250	18	0,0050000	0,795	0,315	0,790	0,643	0,558	6,1072	3,4288	BA	3,1624
1440	11,375	18	0,0050000	0,792	0,320	0,793	0,638	0,552	6,0064	3,3104	BA	3,0440
1440	11,500	18	0,0050000	0,792	0,321	0,793	0,637	0,552	5,9938	3,3094	BA	3,0430
1440	11,625	18	0,0050000	0,786	0,325	0,800	0,630	0,543	5,8678	3,1008	BA	2,8344
1440	11,750	18	0,0050000	0,722	0,340	0,829	0,602	0,516	4,8724	2,3672	BA	2,1008
1440	11,875	18	0,0050000	0,705	0,408	0,836	0,595	0,509	3,8014	2,1838	BA	1,9174
1440	12,000	18	0,0050000	0,702	0,411	0,837	0,593	0,505	3,7258	2,1188	BA	1,8524
1440	12,125	18	0,0050000	0,686	0,425	0,845	0,585	0,500	3,3478	1,9470	BA	1,6806
1440	12,250	18	0,0050000	0,640	0,470	0,875	0,552	0,466	2,2012	1,1076	BA	0,8412
1440	12,375	18										

Trepidação

VAZÃO:24 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1440	0,000	24	0,0066667	0,767	0,345	0,721	0,710	0,625	5,4225	5,2094	AR-BA	4,9853
1440	0,500	24	0,0066667	0,767	0,345	0,722	0,709	0,624	5,4225	5,1832	AR-BA	4,9591
1440	1,000	24	0,0066667	0,767	0,345	0,722	0,708	0,623	5,4225	5,1696	AR-BA	4,9455
1440	1,500	24	0,0066667	0,767	0,345	0,722	0,708	0,622	5,4225	5,1570	AR-BA	4,9329
1440	2,000	24	0,0066667	0,767	0,345	0,723	0,707	0,621	5,4225	5,1308	AR-BA	4,9067
1440	2,500	24	0,0066667	0,767	0,345	0,723	0,707	0,621	5,4225	5,1308	AR-BA	4,9067
1440	3,000	24	0,0066667	0,767	0,345	0,723	0,707	0,621	5,4225	5,1308	AR-BA	4,9067
1440	3,500	24	0,0066667	0,767	0,345	0,723	0,706	0,620	5,4225	5,1172	AR-BA	4,8931
1440	4,000	24	0,0066667	0,767	0,345	0,725	0,705	0,619	5,4225	5,0784	AR-BA	4,8543
1440	4,500	24	0,0066667	0,767	0,345	0,726	0,704	0,618	5,4225	5,0522	AR-BA	4,8281
1440	5,000	24	0,0066667	0,767	0,345	0,727	0,703	0,617	5,4225	5,0260	AR-BA	4,8019
1440	5,500	24	0,0066667	0,767	0,345	0,728	0,702	0,615	5,4225	4,9872	AR-BA	4,7631
1440	6,000	24	0,0066667	0,767	0,345	0,730	0,701	0,614	5,4225	4,9484	AR-BA	4,7243
1440	6,500	24	0,0066667	0,767	0,345	0,731	0,699	0,611	5,4225	4,8960	AR-BA	4,6719
1440	7,000	24	0,0066667	0,767	0,345	0,735	0,695	0,609	5,4225	4,8164	AR-BA	4,5923
1440	7,500	24	0,0066667	0,767	0,345	0,739	0,691	0,605	5,4225	4,7116	AR-BA	4,4875
1440	8,000	24	0,0066667	0,767	0,345	0,742	0,686	0,602	5,4225	4,6310	AR-BA	4,4069
1440	8,500	24	0,0066667	0,767	0,345	0,750	0,680	0,595	5,4225	4,4360	AR-BA	4,2119
1440	9,000	24	0,0066667	0,766	0,346	0,755	0,675	0,587	5,3973	4,2672	AR-BA	4,0431
1440	9,250	24	0,0066667	0,765	0,348	0,762	0,665	0,581	5,3595	4,0934	AR-BA	3,8693
1440	9,500	24	0,0066667	0,764	0,349	0,767	0,660	0,575	5,3343	3,9498	AR-BA	3,7257
1440	9,625	24	0,0066667	0,758	0,352	0,772	0,656	0,570	5,2209	3,8198	AR-BA	3,5957
1440	9,750	24	0,0066667	0,756	0,355	0,777	0,652	0,567	5,1579	3,7150	AR-BA	3,4909
1440	9,875	24	0,0066667	0,751	0,360	0,781	0,648	0,561	5,0319	3,5850	AR-BA	3,3609
1440	10,000	24	0,0066667	0,748	0,363	0,786	0,645	0,558	4,9563	3,4812	AR-BA	3,2571
1440	10,125	24	0,0066667	0,744	0,366	0,789	0,641	0,556	4,8681	3,4142	AR-BA	3,1901
1440	10,250	24	0,0066667	0,728	0,381	0,795	0,632	0,550	4,4775	3,2540	AR-BA	3,0299
1440	10,375	24	0,0066667	0,718	0,392	0,802	0,628	0,541	4,2129	3,0484	AR-BA	2,8243
1440	10,500	24	0,0066667	0,707	0,401	0,809	0,621	0,536	3,9609	2,8902	AR-BA	2,6661
1440	10,625	24	0,0066667	0,706	0,402	0,810	0,620	0,535	3,9357	2,8640	AR-BA	2,6399
1440	10,750	24	0,0066667	0,680	0,430	0,825	0,605	0,520	3,2553	2,4710	AR-BA	2,2469
1440	11,000	24	0,0066667	0,661	0,448	0,836	0,592	0,505	2,7891	2,1304	AR-BA	1,9063
1440	11,250	24	0,0066667	0,630	0,480	0,860	0,570	0,481	1,9953	1,5036	AR-BA	1,2795
1440	11,500	24	0,0066667	0,590	0,520	0,880	0,550	0,461	0,9873	0,9796	AR-BA	0,7555
1440	11,750	24										

Trepidação

VAZÃO: 30m³/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m ³ /h)	Vazão (m ³ /s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1440	0,000	30	0,0083333	0,719	0,392	0,743	0,688	0,602	4,2847	4,6204	AR	4,4507
1440	0,500	30	0,0083333	0,719	0,392	0,743	0,688	0,602	4,2847	4,6204	AR	4,4507
1440	1,000	30	0,0083333	0,719	0,392	0,743	0,688	0,602	4,2847	4,6204	AR	4,4507
1440	1,500	30	0,0083333	0,719	0,392	0,743	0,687	0,601	4,2847	4,6068	AR	4,4371
1440	2,000	30	0,0083333	0,719	0,392	0,743	0,686	0,600	4,2847	4,5932	AR	4,4235
1440	2,500	30	0,0083333	0,719	0,392	0,745	0,685	0,599	4,2847	4,5544	AR	4,3847
1440	3,000	30	0,0083333	0,718	0,393	0,746	0,684	0,598	4,2595	4,5282	AR	4,3585
1440	3,500	30	0,0083333	0,718	0,394	0,747	0,683	0,597	4,2469	4,5020	AR	4,3323
1440	4,000	30	0,0083333	0,717	0,395	0,748	0,682	0,595	4,2217	4,4632	AR	4,2935
1440	4,500	30	0,0083333	0,716	0,396	0,750	0,680	0,594	4,1965	4,4234	AR	4,2537
1440	5,000	30	0,0083333	0,715	0,397	0,751	0,679	0,593	4,1713	4,3972	AR	4,2275
1440	5,125	30	0,0083333	0,712	0,400	0,753	0,678	0,591	4,0957	4,3458	AR-BA	4,1761
1440	5,250	30	0,0083333	0,708	0,402	0,755	0,677	0,590	4,0201	4,3070	AR-BA	4,1373
1440	5,375	30	0,0083333	0,706	0,404	0,757	0,675	0,589	3,9697	4,2672	AR-BA	4,0975
1440	5,500	30	0,0083333	0,706	0,404	0,758	0,674	0,588	3,9697	4,2410	BA	4,0713
1440	6,000	30	0,0083333	0,706	0,404	0,758	0,673	0,587	3,9697	4,2274	BA	4,0577
1440	6,500	30	0,0083333	0,704	0,406	0,760	0,670	0,585	3,9193	4,1740	BA	4,0043
1440	7,000	30	0,0083333	0,700	0,410	0,765	0,666	0,580	3,8185	4,0440	BA	3,8743
1440	7,250	30	0,0083333	0,698	0,414	0,767	0,663	0,577	3,7429	3,9780	BA	3,8083
1440	7,500	30	0,0083333	0,695	0,417	0,772	0,661	0,576	3,6673	3,9004	BA	3,7307
1440	7,750	30	0,0083333	0,691	0,420	0,775	0,658	0,571	3,5791	3,7966	BA	3,6269
1440	8,000	30	0,0083333	0,685	0,427	0,780	0,654	0,567	3,4153	3,6792	BA	3,5095
1440	8,250	30	0,0083333	0,682	0,430	0,782	0,649	0,564	3,3397	3,6112	BA	3,4415
1440	8,500	30	0,0083333	0,677	0,435	0,787	0,645	0,558	3,2137	3,4686	BA	3,2989
1440	8,750	30	0,0083333	0,661	0,450	0,795	0,635	0,550	2,8231	3,2570	BA	3,0873
1440	9,000	30	0,0083333	0,657	0,454	0,800	0,630	0,545	2,7223	3,1260	BA	2,9563
1440	9,250	30	0,0083333	0,641	0,470	0,811	0,620	0,532	2,3191	2,8136	BA	2,6439
1440	9,500	30	0,0083333	0,636	0,472	0,819	0,615	0,530	2,2309	2,6826	BA	2,5129
1440	9,750	30	0,0083333	0,617	0,492	0,832	0,600	0,512	1,7395	2,2770	BA	2,1073
1440	10,000	30	0,0083333	0,607	0,501	0,841	0,590	0,502	1,5001	2,0276	BA	1,8579
1440	10,250	30	0,0083333	0,570	0,540	0,868	0,565	0,480	0,5425	1,3852	BA	1,2155
1440	10,500	30	0,0083333	0,565	0,550	0,872	0,560	0,472	0,3535	1,2290	BA	1,0593
1440	10,750	30										

Trepidação

ROTAÇÃO : 1400 RPM- ENSAIOS COMPLEMENTARES (PONTOS INTERMEDIÁRIOS)

VAZÃO: 6 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	vazão (m3/h)	vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	13,000	6	0,0016667	0,807	0,305	0,732	0,700	0,612	6,3318	4,8970	POUQ	4,5823
1400	13,125	6	0,0016667	0,807	0,305	0,742	0,688	0,600	6,3318	4,6078	POUQ	4,2931
1400	13,250	6	0,0016667	0,807	0,305	0,750	0,680	0,592	6,3318	4,3982	POUQ	4,0835
1400	13,375	6	0,0016667	0,804	0,307	0,762	0,670	0,582	6,2688	4,1110	POUQ	3,7963
1400	13,500	6	0,0016667	0,800	0,310	0,778	0,650	0,565	6,1806	3,6752	POUQ	3,3605
1400	13,625	6	0,0016667	0,710	0,410	0,795	0,640	0,550	3,7866	3,2620	POUQ	2,9473
1400	13,750	6	0,0016667	0,580	0,530	0,820	0,615	0,530	0,6366	2,6700	POUQ	2,3553

VAZÃO: 9 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	13,000	9	0,0025000	0,802	0,308	0,780	0,650	0,562	6,2392	3,6122	BA	3,3050
1400	13,125	9	0,0025000	0,745	0,370	0,802	0,620	0,540	4,7398	3,0278	BA	2,7206
1400	13,250	9	0,0025000	0,725	0,385	0,812	0,615	0,530	4,2988	2,7708	BA	2,4636
1400	13,375	9	0,0025000	0,687	0,425	0,830	0,605	0,520	3,3160	2,4080	BA	2,1008
1400	13,500	9	0,0025000	0,660	0,452	0,835	0,599	0,512	2,6356	2,2382	BA	1,9310
1400	13,625	9	0,0025000	0,570	0,542	0,888	0,550	0,462	0,3676	0,8914	BA	0,5842

VAZÃO: 12 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	vazão (m3/h)	vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	12,000	12	0,0033333	0,800	0,310	0,759	0,670	0,590	6,2003	4,2496	AR-BA	3,9530
1400	12,250	12	0,0033333	0,800	0,310	0,772	0,660	0,570	6,2003	3,8238	AR-BA	3,5272
1400	12,500	12	0,0033333	0,800	0,311	0,782	0,648	0,560	6,1877	3,5598	BA	3,2632
1400	12,620	12	0,0033333	0,800	0,312	0,800	0,630	0,545	6,1751	3,1260	BA	2,8294
1400	12,750	12	0,0033333	0,762	0,350	0,810	0,620	0,535	5,2175	2,8640	BA	2,5674
1400	12,870	12	0,0033333	0,675	0,435	0,850	0,580	0,495	3,0503	1,8160	BA	1,5194
1400	13,000	12	0,0033333	0,670	0,442	0,852	0,580	0,491	2,8991	1,7404	BA	1,4438

VAZÃO: 15 m³/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m³/h)	Vazão (m³/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	11,000	15	0,0041667	0,792	0,318	0,745	0,685	0,601	6,0135	4,5796	AR	4,2966
1400	11,000	15	0,0041667	0,794	0,318	0,745	0,685	0,600	6,0387	4,5670	AR	4,2840
1400	11,250	15	0,0041667	0,792	0,320	0,755	0,675	0,590	5,9883	4,3050	BA	4,0220
1400	11,500	15	0,0041667	0,791	0,320	0,762	0,665	0,582	5,9757	4,1060	BA	3,8230
1400	11,750	15	0,0041667	0,791	0,320	0,774	0,657	0,572	5,9757	3,8208	BA	3,5378
1400	12,000	15	0,0041667	0,790	0,321	0,790	0,640	0,555	5,9505	3,3880	BA	3,1050
1400	12,250	15	0,0041667	0,745	0,365	0,815	0,615	0,530	4,8291	2,7330	BA	2,4500
1400	12,500	15	0,0041667	0,702	0,410	0,840	0,590	0,502	3,7203	2,0402	BA	1,7572
1400	12,750	15	0,0041667	0,580	0,531	0,892	0,540	0,450	0,6585	0,6798	BA	0,3968

VAZÃO: 18 m³/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	vazão (m³/h)	vazão (m³/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	11,000	18	0,0050000	0,780	0,331	0,772	0,659	0,572	5,7166	3,8480	POUQ	3,5816
1400	11,250	18	0,0050000	0,780	0,331	0,786	0,646	0,560	5,7166	3,5074	AR-BA	3,2410
1400	11,500	18	0,0050000	0,772	0,339	0,800	0,630	0,545	5,5150	3,1260	AR-BA	2,8596
1400	11,625	18	0,0050000	0,750	0,362	0,807	0,625	0,540	4,9480	2,9698	BA	2,7034
1400	11,750	18	0,0050000	0,738	0,375	0,818	0,615	0,530	4,6330	2,6952	BA	2,4288
1400	11,875	18	0,0050000	0,710	0,402	0,822	0,609	0,520	3,9400	2,5128	BA	2,2464
1400	12,000	18	0,0050000	0,680	0,431	0,840	0,590	0,505	3,1966	2,0780	BA	1,8116

VAZÃO: 21 m³/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m ³ /h)	Vazão (m ³ /s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	8,500	21	0,0058333	0,766	0,345	0,731	0,700	0,612	5,3852	4,9096	AR	4,6629
1400	8,750	21	0,0058333	0,766	0,345	0,735	0,696	0,609	5,3852	4,8174	AR-BA	4,5707
1400	9,000	21	0,0058333	0,766	0,345	0,740	0,691	0,604	5,3852	4,6864	AR-BA	4,4397
1400	9,250	21	0,0058333	0,766	0,345	0,745	0,685	0,599	5,3852	4,5544	"	4,3077
1400	9,500	21	0,0058333	0,766	0,345	0,749	0,683	0,596	5,3852	4,4642	"	4,2175
1400	9,750	21	0,0058333	0,766	0,345	0,755	0,679	0,590	5,3852	4,3090	"	4,0623
1400	10,000	21	0,0058333	0,766	0,345	0,760	0,672	0,585	5,3852	4,1760	"	3,9293
1400	10,250	21	0,0058333	0,764	0,347	0,770	0,665	0,575	5,3348	3,9170	"	3,6703
1400	10,500	21	0,0058333	0,761	0,350	0,775	0,655	0,570	5,2592	3,7810	"	3,5343
1400	10,750	21	0,0058333	0,758	0,352	0,785	0,645	0,560	5,1962	3,5190	"	3,2723
1400	10,875	21	0,0058333	0,747	0,362	0,797	0,631	0,547	4,9316	3,1900	"	2,9433
1400	11,000	21	0,0058333	0,745	0,370	0,800	0,630	0,545	4,8056	3,1260	"	2,8793
1400	11,120	21	0,0058333	0,710	0,400	0,810	0,621	0,536	3,9866	2,8776	"	2,6309
1400	11,250	21	0,0058333	0,692	0,420	0,825	0,605	0,520	3,5078	2,4710	"	2,2243
1400	11,375	21	0,0058333	0,670	0,442	0,835	0,598	0,510	2,9534	2,2120	"	1,9653
1400	11,500	21	0,0058333	0,668	0,445	0,840	0,595	0,507	2,8904	2,1082	"	1,8615

VAZÃO: 24 m³/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	vazão (m ³ /h)	vazão (m ³ /s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	4,000	24	0,0066667	0,750	0,361	0,723	0,708	0,620	5,0067	5,1192	AR	4,8951
1400	4,250	24	0,0066667	0,750	0,361	0,725	0,707	0,619	5,0067	5,0804	AR	4,8563
1400	4,500	24	0,0066667	0,750	0,361	0,726	0,705	0,618	5,0067	5,0532	AR	4,8291
1400	4,750	24	0,0066667	0,749	0,362	0,727	0,704	0,618	4,9815	5,0396	AR	4,8155
1400	5,000	24	0,0066667	0,749	0,362	0,728	0,703	0,617	4,9815	5,0134	AR	4,7893
1400	5,250	24	0,0066667	0,749	0,362	0,728	0,703	0,617	4,9815	5,0134	AR	4,7893
1400	5,500	24	0,0066667	0,748	0,362	0,729	0,702	0,616	4,9689	4,9872	AR	4,7631
1400	5,750	24	0,0066667	0,748	0,362	0,730	0,701	0,615	4,9689	4,9610	AR	4,7369
1400	6,000	24	0,0066667	0,748	0,362	0,732	0,700	0,614	4,9689	4,9222	AR	4,6981
1400	6,250	24	0,0066667	0,748	0,362	0,732	0,699	0,614	4,9689	4,9212	AR	4,6971
1400	6,500	24	0,0066667	0,748	0,362	0,733	0,698	0,613	4,9689	4,8950	AR	4,6709
1400	6,750	24	0,0066667	0,748	0,362	0,735	0,698	0,612	4,9689	4,8572	AR	4,6331

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	vazão (m3/h)	vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	7,000	24	0,0066667	0,748	0,362	0,737	0,697	0,610	4,9689	4,8058	AR	4,5817
1400	7,250	24	0,0066667	0,748	0,362	0,737	0,696	0,610	4,9689	4,8048	AR	4,5807
1400	7,500	24	0,0066667	0,748	0,362	0,739	0,694	0,609	4,9689	4,7650	AR	4,5409

VAZÃO: 27 m3/h

Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	5,500	27	0,0075000	0,730	0,381	0,740	0,692	0,605	4,5306	4,7000	AR	4,5016
1400	5,750	27	0,0075000	0,730	0,381	0,741	0,691	0,605	4,5306	4,6864	AR	4,4880
1400	6,000	27	0,0075000	0,730	0,381	0,743	0,688	0,603	4,5306	4,6330	AR	4,4346
1400	6,250	27	0,0075000	0,730	0,381	0,745	0,686	0,600	4,5306	4,5680	AR	4,3696
1400	6,500	27	0,0075000	0,730	0,381	0,747	0,685	0,598	4,5306	4,5166	AR	4,3182
1400	6,750	27	0,0075000	0,730	0,381	0,749	0,684	0,597	4,5306	4,4778	AR	4,2794
1400	7,000	27	0,0075000	0,729	0,382	0,750	0,684	0,594	4,5054	4,4274	AR	4,2290
1400	7,250	27	0,0075000	0,728	0,384	0,752	0,682	0,593	4,4676	4,3876	AR	4,1892
1400	7,500	27	0,0075000	0,728	0,384	0,755	0,679	0,591	4,4676	4,3216	AR	4,1232
1400	7,750	27	0,0075000	0,725	0,386	0,758	0,675	0,588	4,4046	4,2420	AR	4,0436
1400	8,000	27	0,0075000	0,723	0,389	0,761	0,672	0,585	4,3416	4,1634	AR	3,9650

VAZÃO: 30 m3/h

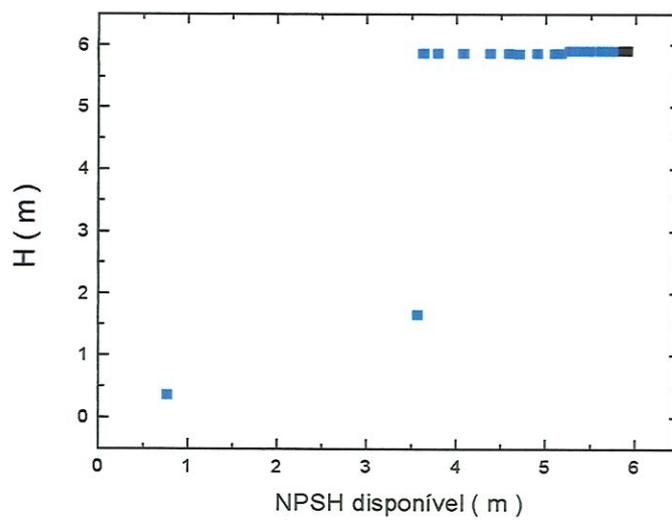
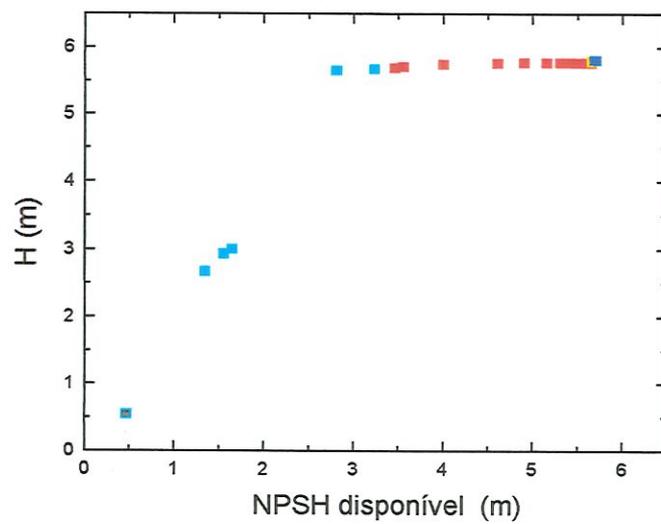
Rotação (rpm)	VOLTAS fech. reg. sucção	Vazão (m3/h)	Vazão (m3/s)	h1 (mHg)	h2 (mHg)	h3 (mHg)	h4 (mHg)	h4' (mHg)	H (mca)	Ps (mca)	Ar observado	NPSH DISP. (mca)
1400	0,000	30	0,0083333	0,705	0,406	0,742	0,689	0,602	3,9319	4,6340		4,4643
1400	0,500	30	0,0083333	0,705	0,406	0,742	0,689	0,602	3,9319	4,6340		4,4643
1400	1,000	30	0,0083333	0,705	0,406	0,742	0,689	0,602	3,9319	4,6340		4,4643
1400	1,500	30	0,0083333	0,705	0,406	0,745	0,687	0,602	3,9319	4,5892		4,4195
1400	2,000	30	0,0083333	0,705	0,406	0,746	0,687	0,602	3,9319	4,5816		4,4119
1400	2,500	30	0,0083333	0,705	0,406	0,746	0,686	0,602	3,9319	4,5806		4,4109
1400	3,000	30	0,0083333	0,705	0,407	0,747	0,685	0,599	3,9193	4,5292		4,3595
1400	3,500	30	0,0083333	0,705	0,407	0,747	0,683	0,597	3,9193	4,5020		4,3323
1400	4,000	30	0,0083333	0,704	0,410	0,750	0,681	0,595	3,8689	4,4370		4,2673
1400	4,500	30	0,0083333	0,701	0,412	0,752	0,680	0,594	3,8059	4,3982		4,2285

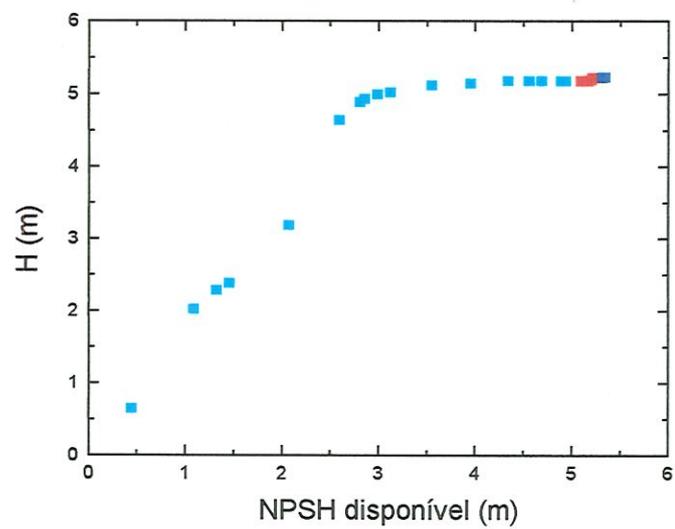
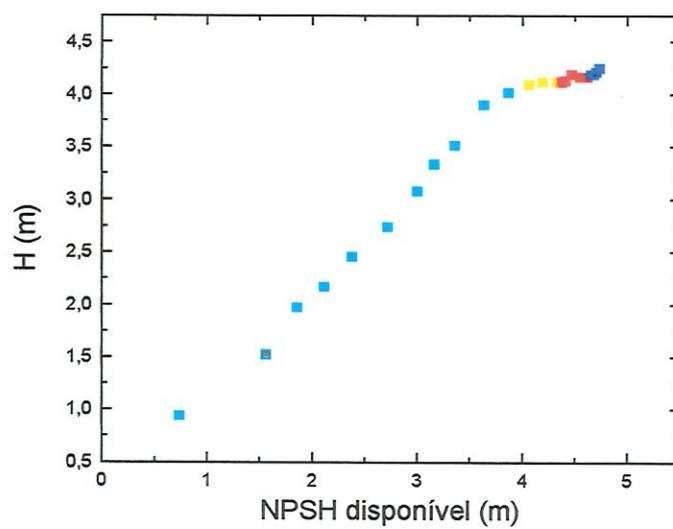


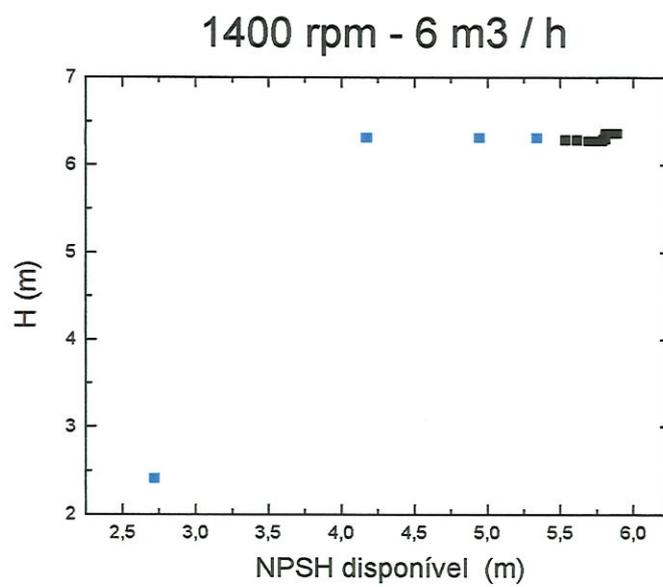
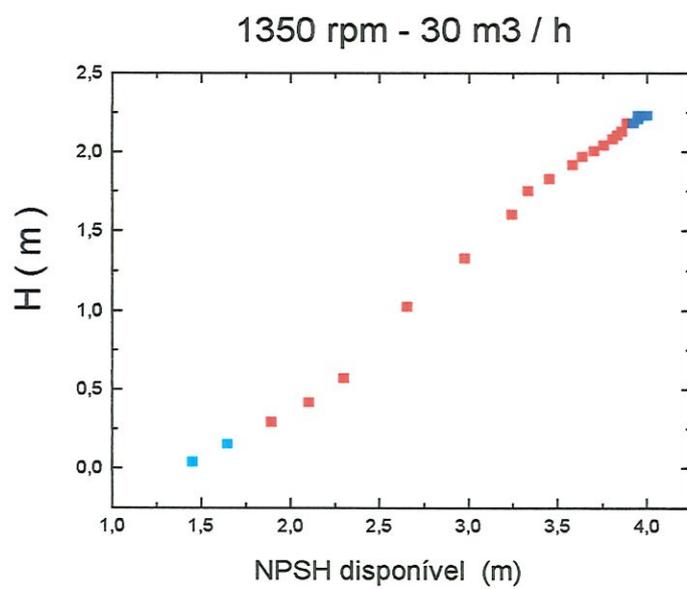
ANEXO - 2 - Gráficos de H x NPSH disponível, adotando-se a identificação da cavitação através de observação de bolhas de ar na superfície do reservatório

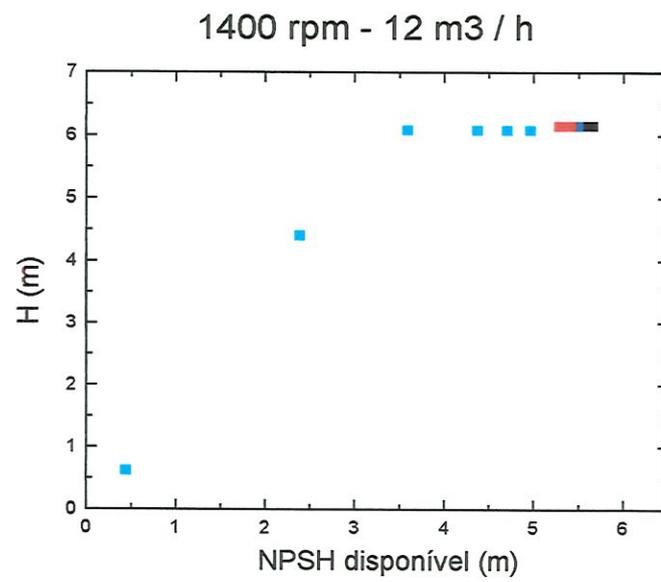
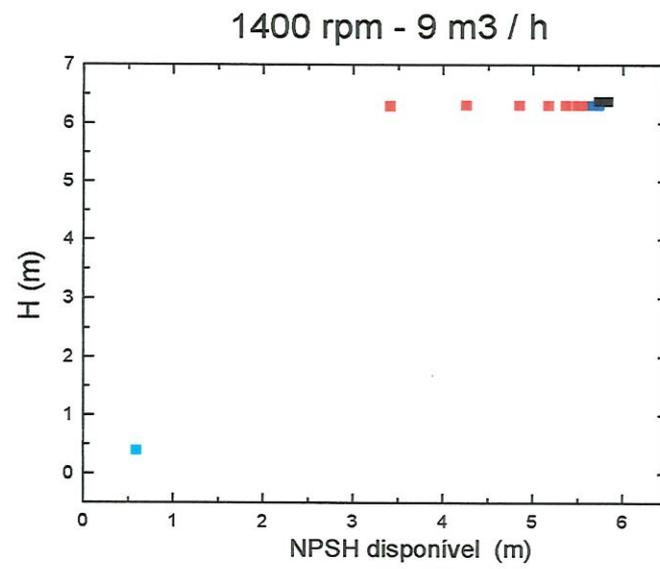
Convenção:

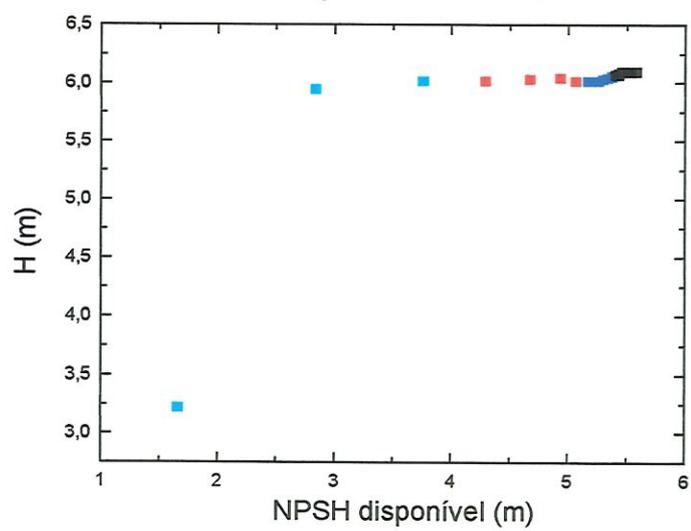
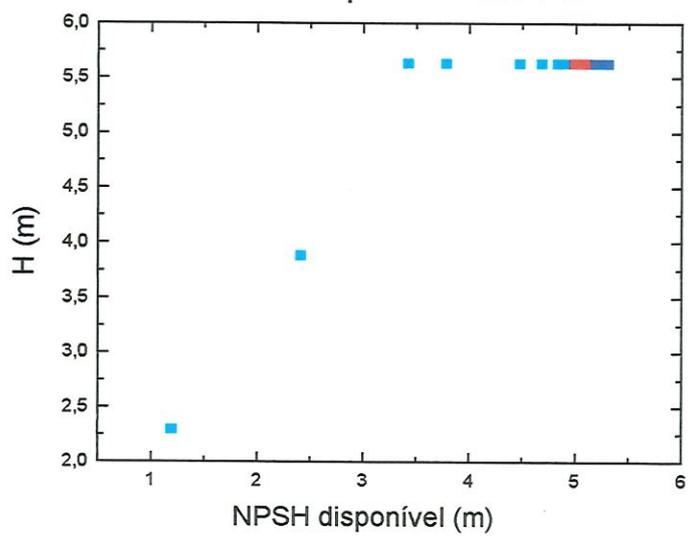
Cor	Descrição de bolhas de cavitação
preto	pouquíssimo ar
azul	pouco ar
vermelho	ar
amarelo	situação entre ar e bastante ar
cyan	bastante ar

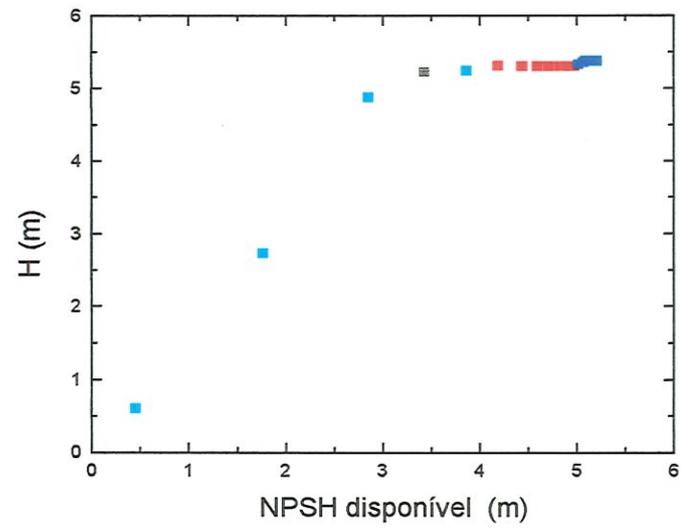
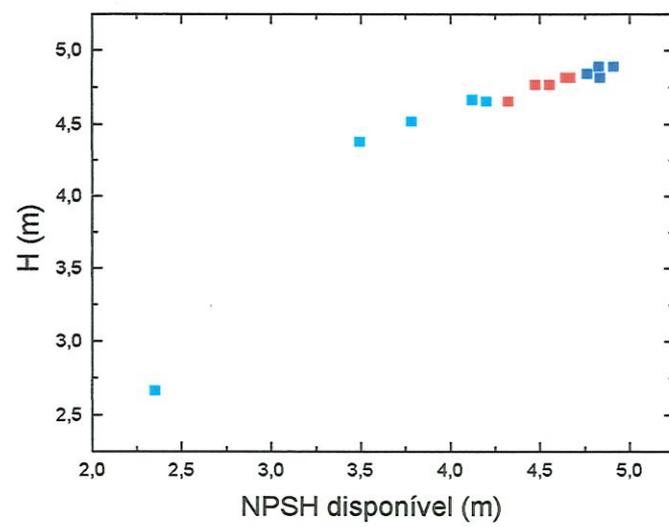
1350 rpm - 6 m³ / h1350 rpm - 12 m³ / h

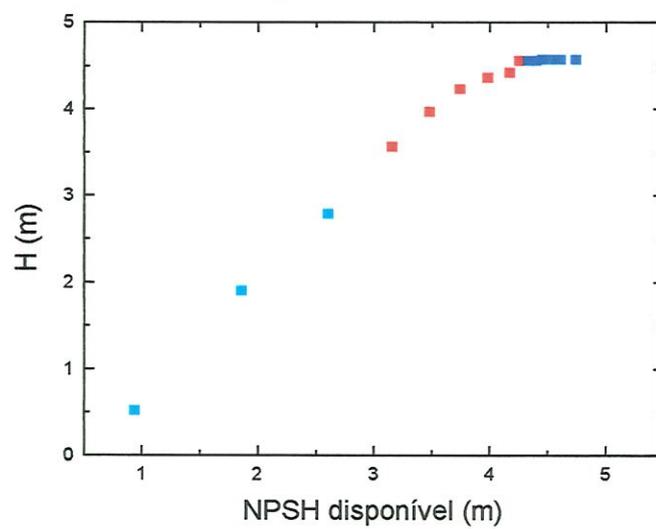
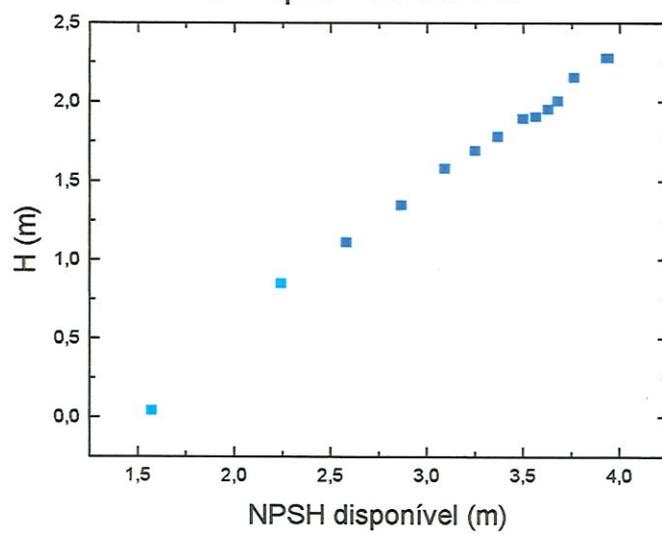
1350 rpm - 18 m³ / h1350 rpm - 24 m³ / h

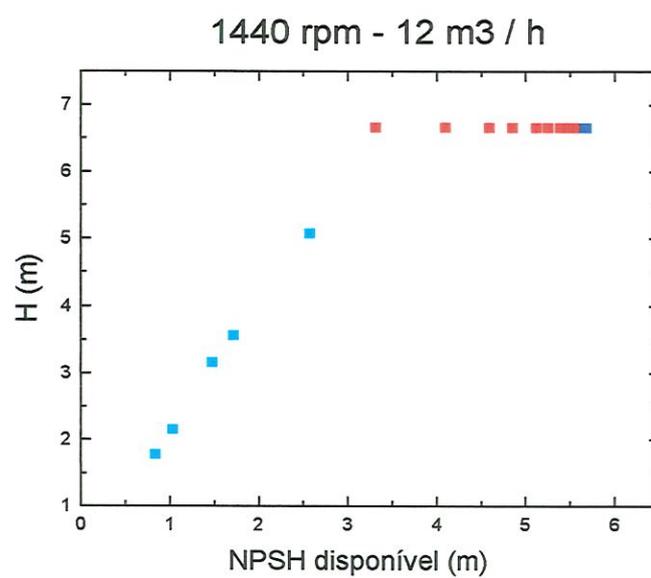
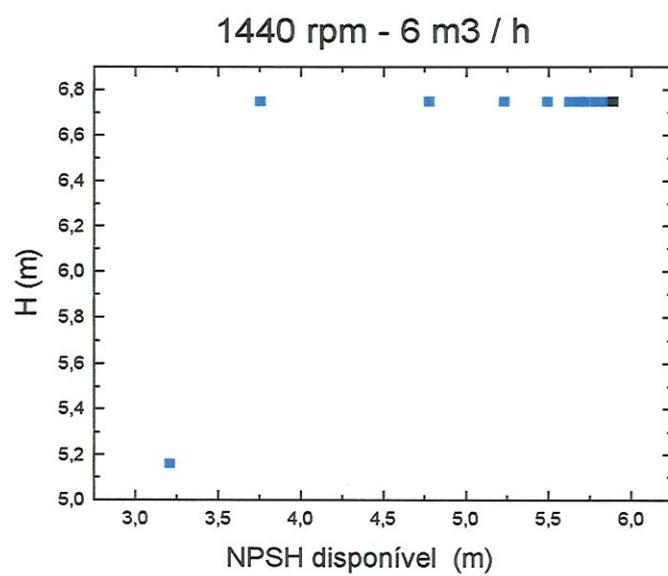


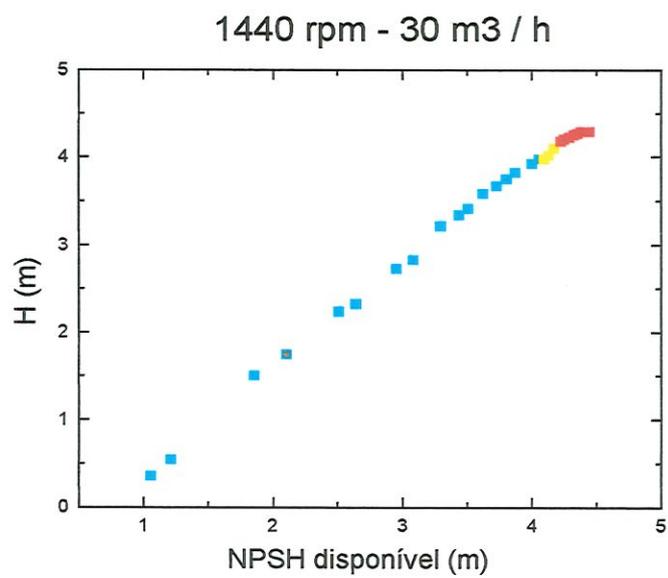
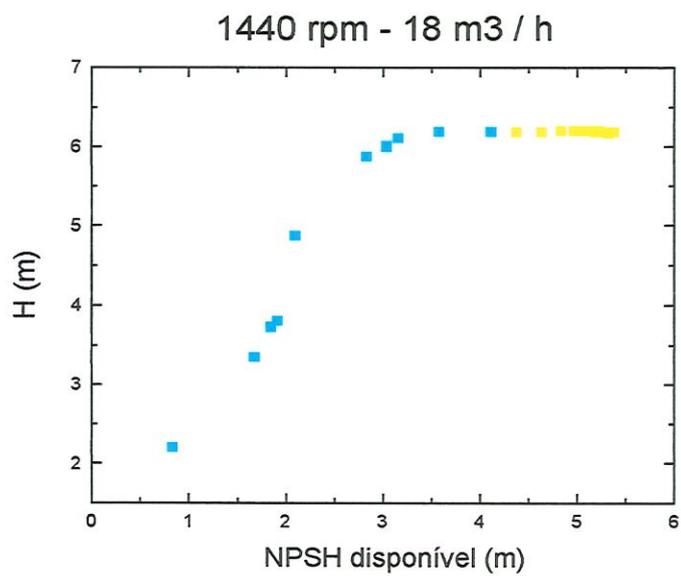


1400 rpm - 15 m³ / h1400 rpm - 18 m³ / h

1400 rpm - 21 m³ / h1400 rpm - 24 m³ / h

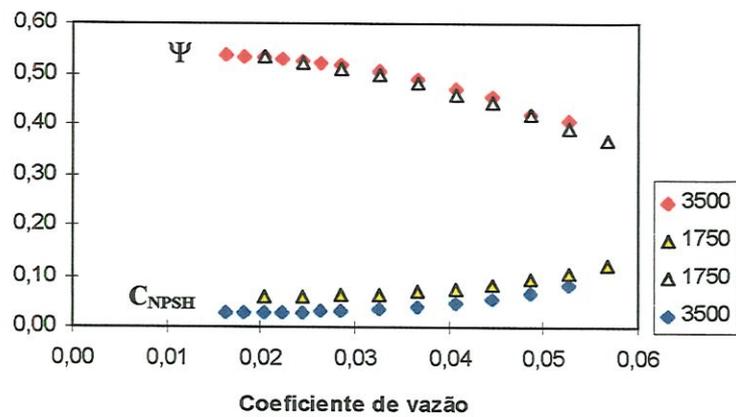
1400 rpm - 27 m³ / h1400 rpm - 30 m³ / h



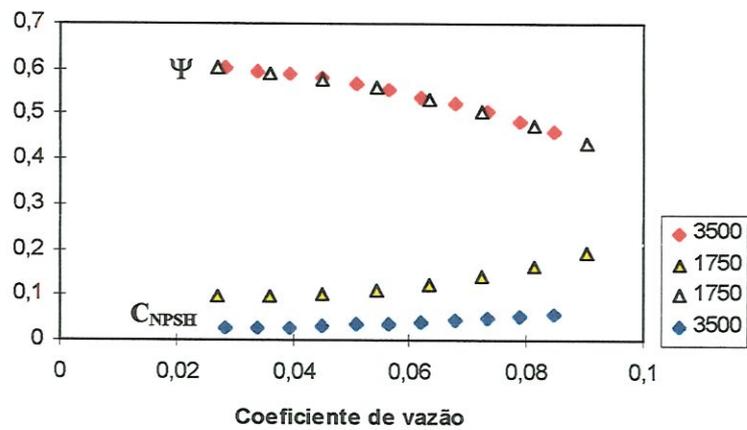


ANEXO - 3 - Gráficos relativos ao traçado de $C_{NPSH} \times \varnothing$ e $\Psi \times \varnothing$, para dados do catálogo.

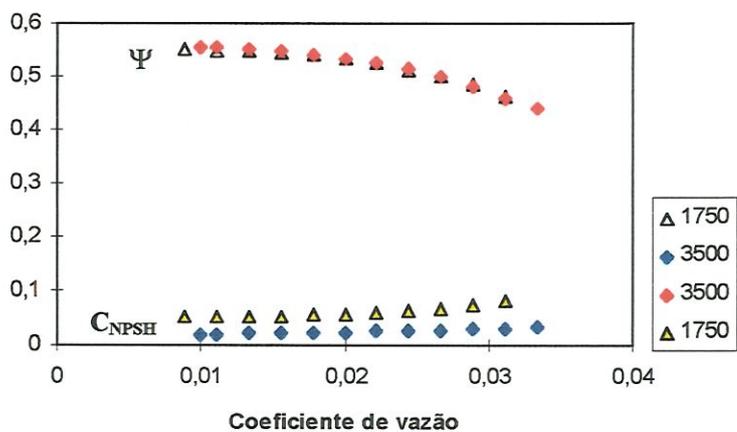
Bomba - Potência - 3500 rpm - 4,17 HP
1750 rpm - 0,59 HP



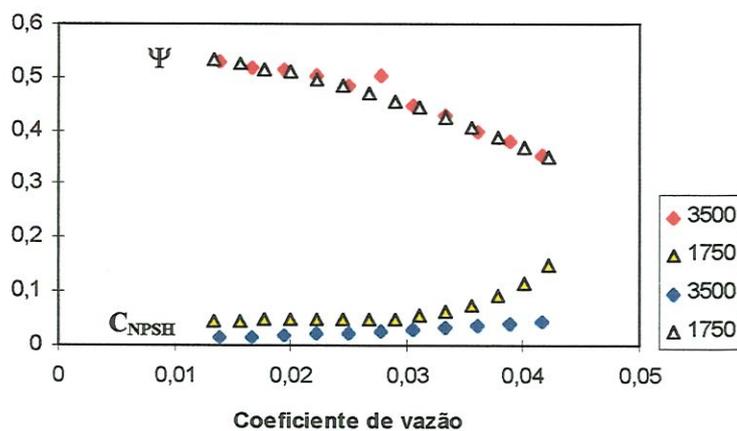
Bomba - Potência - 3500 rpm - 5,60 HP
1750 rpm - 0,76 HP



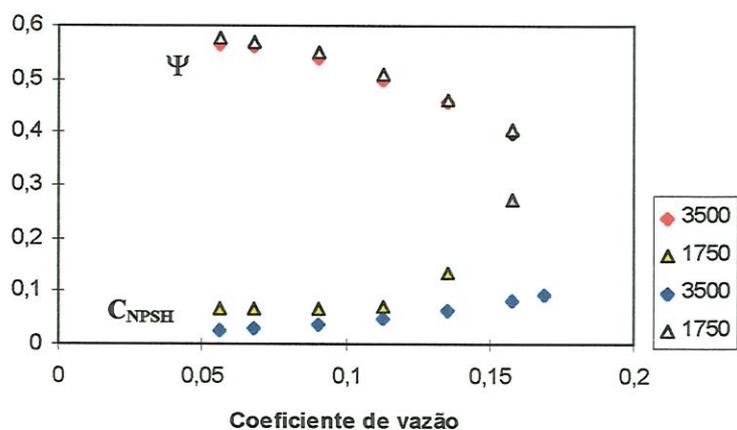
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 8,10 HP
1750 rpm - 1,23 HP**



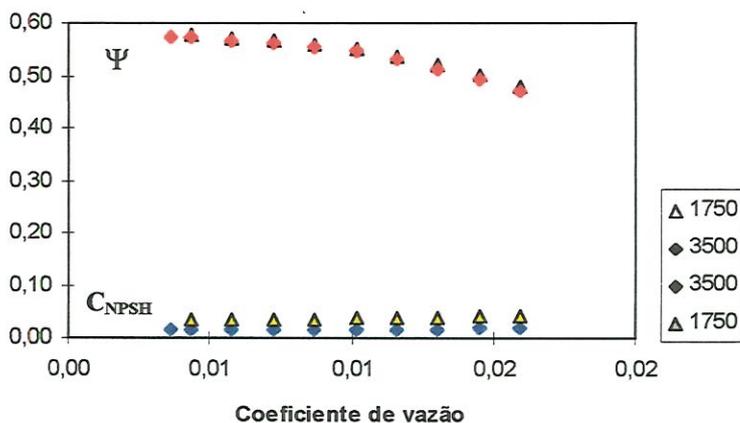
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 8,60 HP
1750 rpm - 1,20 HP**



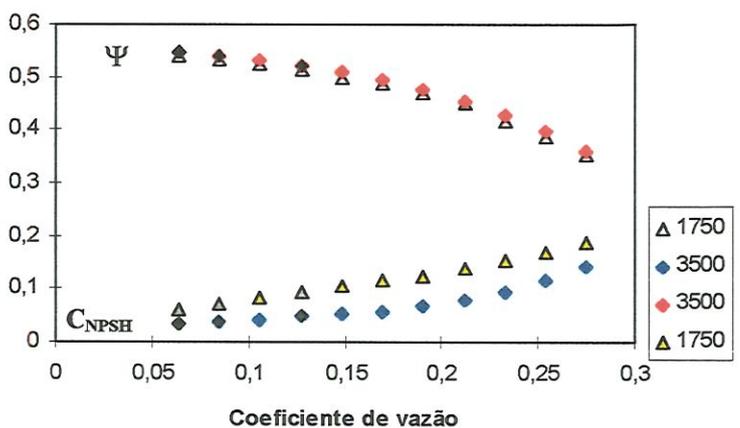
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 9,00 HP
1750 rpm - 1,42 HP**



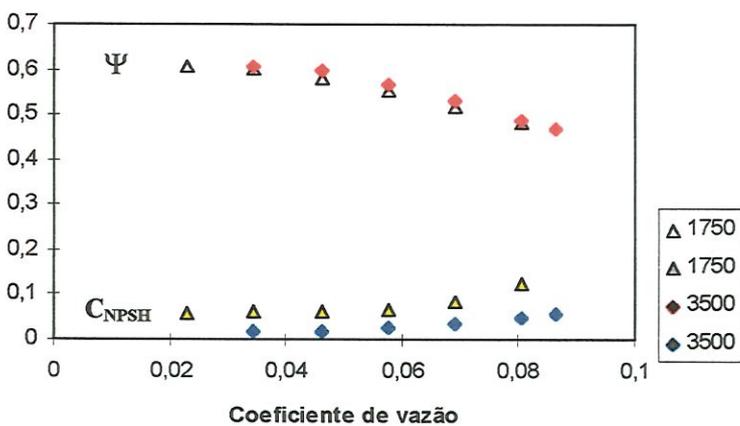
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 11,10 HP
1750 rpm - 1,42 HP**



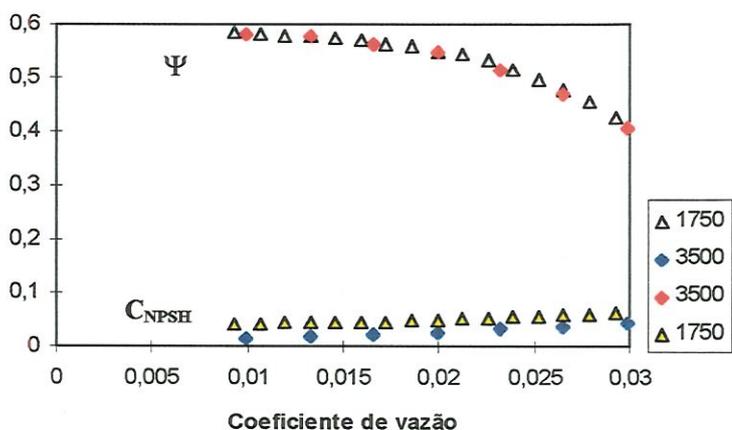
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 14,00 HP
1750 rpm - 1,93 HP**



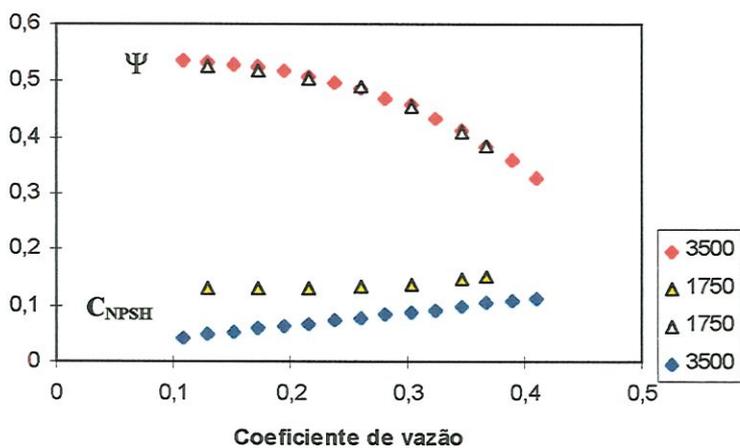
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 17,00 HP
1750 rpm - 2,20 HP**



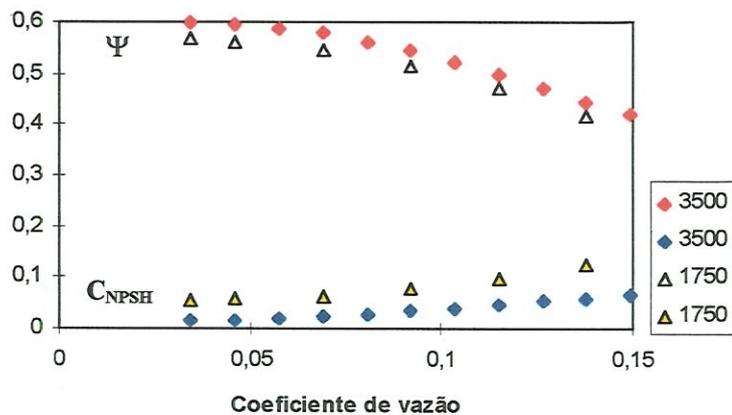
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 17,00 HP
1750 rpm - 2,26 HP**



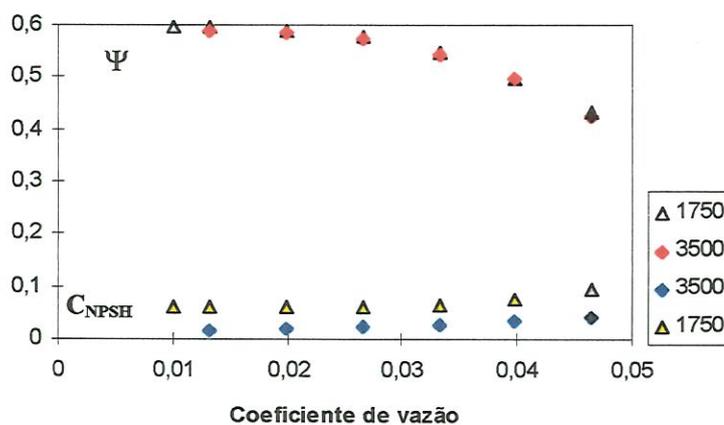
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 19,00 HP
1750 rpm - 2,65 HP**



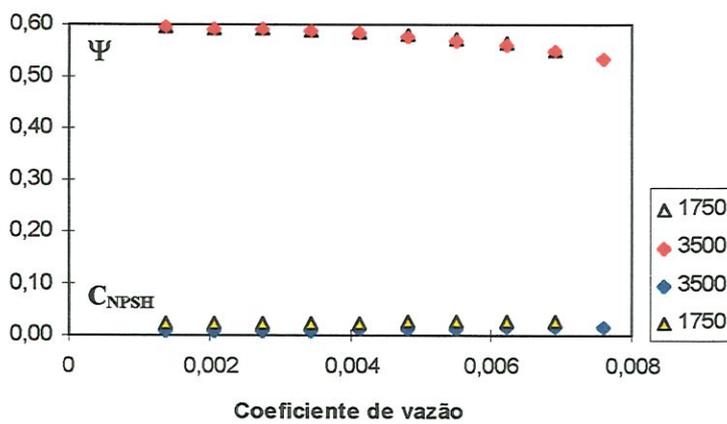
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 23,00 HP
1750 rpm - 3,20 HP**



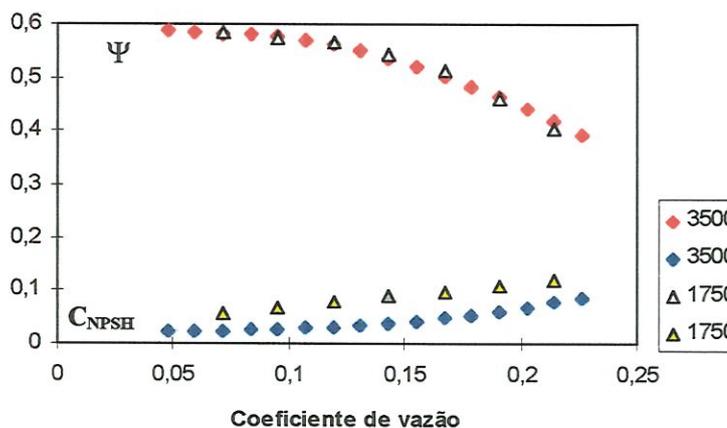
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 24,00 HP
1750 rpm - 3,50 HP**



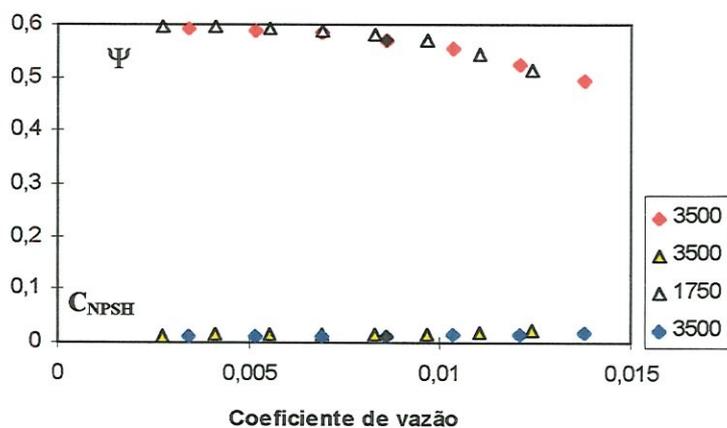
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 25,50 HP
1750 rpm - 3,55 HP**



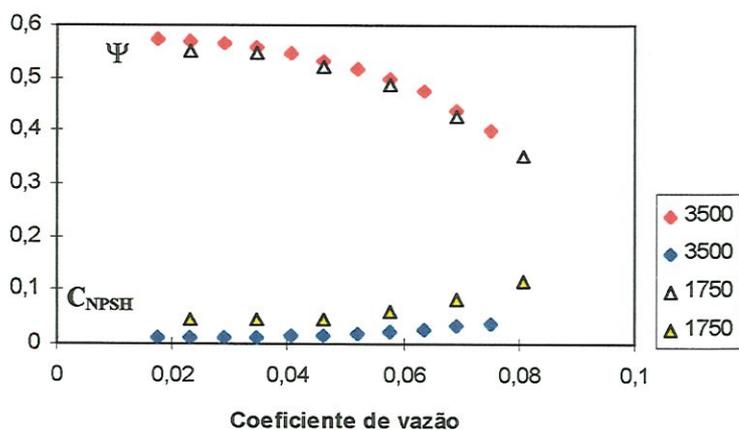
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 33,00 HP
1750 rpm - 4,10 HP**



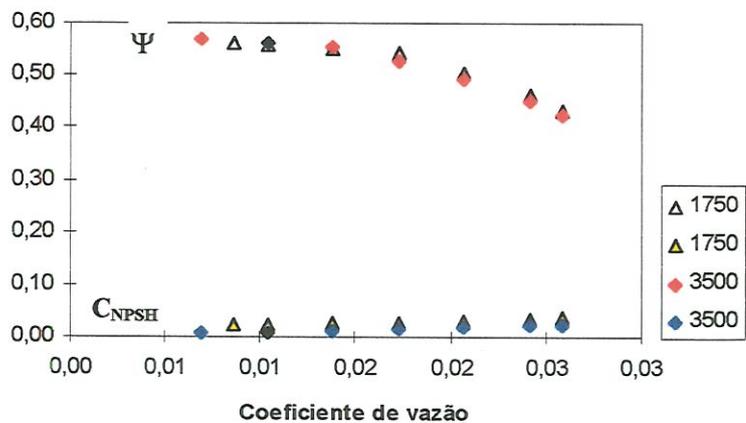
Bomba - Potência - 3500 rpm - 33,00 HP
1750 rpm - 4,10 HP



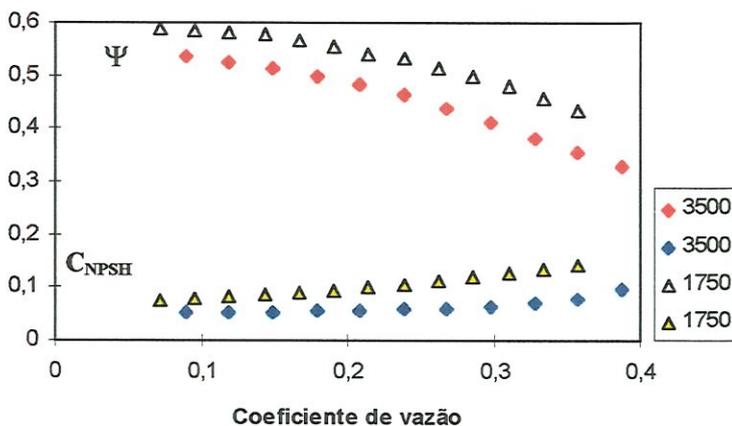
Bomba - Potência - 3500 rpm - 39,00 HP
1750 rpm - 5,40 HP



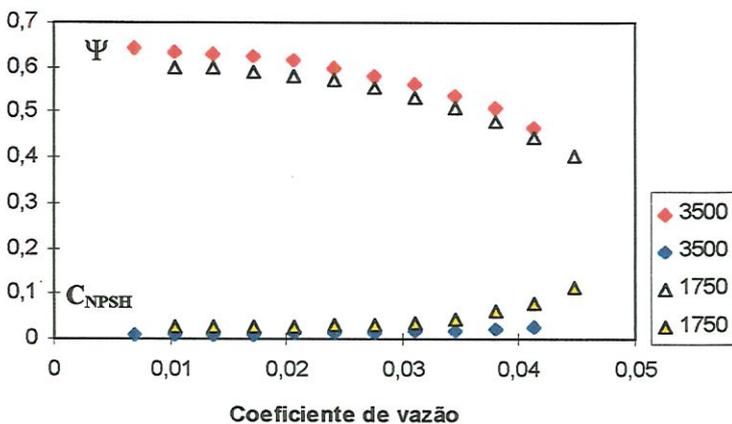
Bomba - Potência - 3500 rpm - 46,00 HP
1750 rpm - 5,80 HP



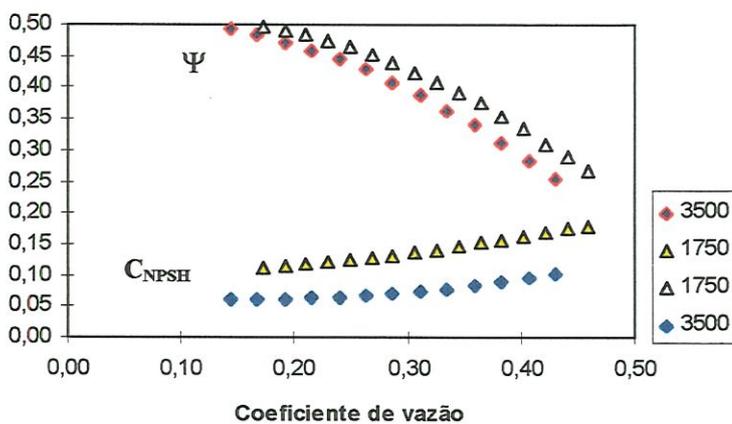
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 49,00 HP
1750 rpm - 6,80 HP**



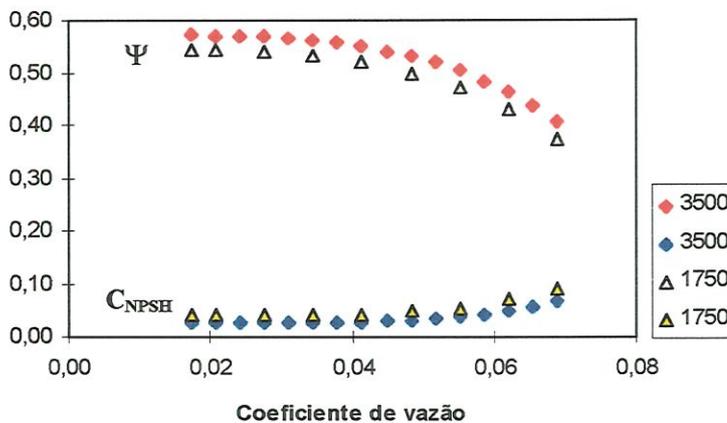
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 63,00 HP
1750 rpm - 8,10 HP**



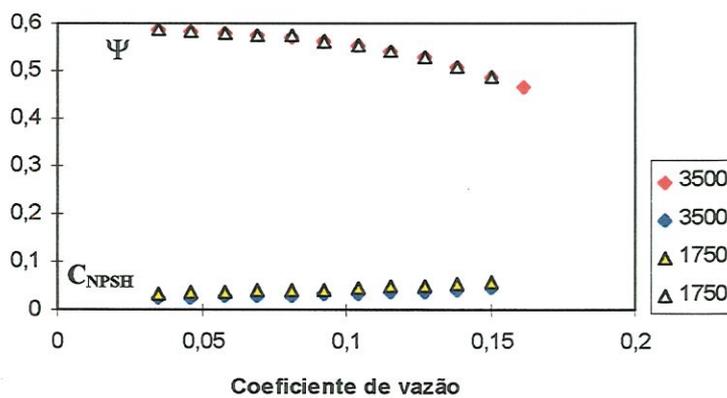
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 65,00 HP
1750 rpm - 9,50 HP**



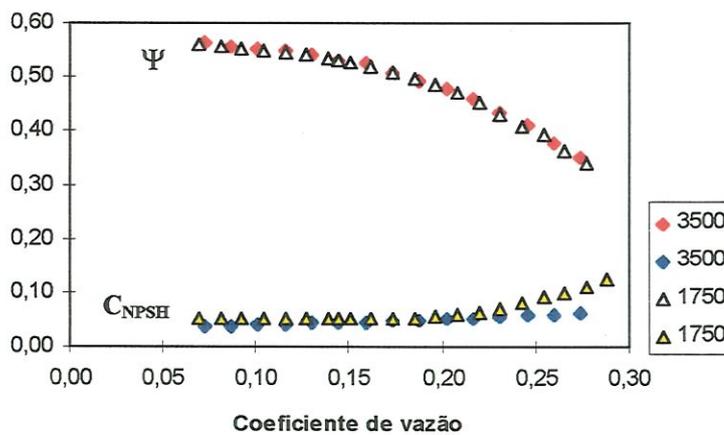
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 90,00 HP
1750 rpm - 11,50 HP**



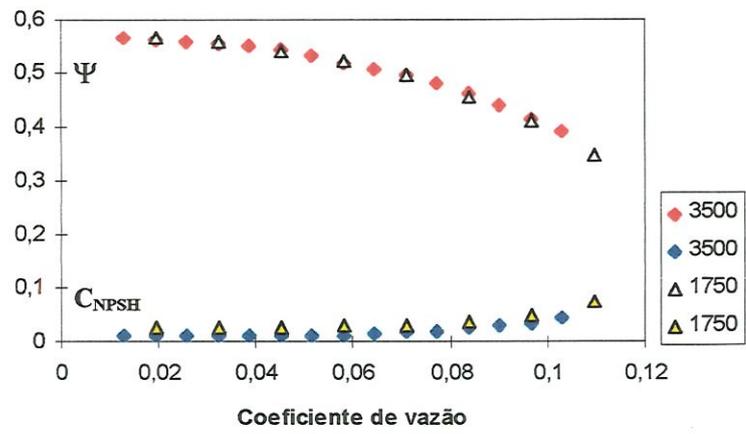
**Bomba - Potência - 3500 rpm - 90,00 HP
1750 rpm - 11,20 HP**



**Bomba - Potência - 3500 rpm - 129,00 HP
1750 rpm - 16,25 HP**



Bomba - Potência - 3500 rpm 132,0 HP
1750 rpm 17,5 HP



Referências bibliográficas

- APFEL, R.E. (1984). Acoustic Cavitation Inception. *Ultrasonics*, v.22, n.4, p.167 - 173, Jul.
- ARNDT, R.E.A.; ELLIS, C.R.; PAUL, S. (1995). Preliminary investigation of the use of air injection to mitigate cavitation erosion.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1989). MB 1032 - Bombas hidráulicas de fluxo (classe C) - Ensaios de desempenho e de cavitação. Rio de Janeiro.
- AZEVEDO NETO, J.M. (1973). Manual de Hidráulica Vol I - 7 ed. Editora Edgard Blucher. São Paulo.
- BRENNEN, C.E. ; MEISSNER, C ; HOFFMAN, G.S.; LO, E.Y. Scale Effects in the Dynamic Transfer Functions for Cavitating Inducers. *Journal of Fluids Engineering*, v.104, n.4, p.428-433, dez.
- CHAUDHRY, M.HANIF (1987). Applied Hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold Company,.
- CREDER, HÉLIO (1991). Instalações hidráulicas e sanitárias. 5.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora.
- DEUTSCHE INDUSTRIE - NORM (DIN). (1952). Sistema alemão de padronização e normalização
- EQUIPE - BOMBAS HIDRÁULICAS. Manual Técnico e Curvas Características, Bombas Centrífugas.

- FOX, ROBERT W.; MCDONALD, ALAN T. (1992). Introdução à Mecânica dos Fluidos. 4.ed. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan.
- GIKAS, IOANNIS (1986). Tópicos de Cavitação. São Paulo. 271p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- GULICH, J.F.; SULZER BROTHERS Ltd, A. ROSCH. (1989). Cavitation Erosion in Centrifugal Pumps. Chemical Engineering Progress, v.85, n.11 , p 68-73, Nov.
- INNOCENTI, J.R. (1997). Utilização de seis pontos particulares para melhorar a estimativa das curvas completas de bombas centrífugas. 82p. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (1972). ISO / DIS 2548 - Pumps - Code for acceptance Tests Classe C.
- KRISTAL, FRANK A. ; ANNET, F.A.(1953). Pumps. 2 ed. New York
- KSB- BOMBAS HIDRÁULICAS S.A. (1985). Manual Técnico e Curvas Características, Bombas Centrífugas.
- LAURIA, DOUGLAS. (1997). Máquinas de fluxo. . Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia mecânica.
- MARTINS, N.; PAULI, R.U.; MAUAD, FARID. C. (1979). Física para a universidade, vol.1, Análise dimensional. São Paulo, E.P.U.
- MACINTYRE, A.J. (1987).Bombas e Instalações de Bombeamento. 2^a ed. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan.
- MCNULTY, P.J.; PEARSSALL, I.S. (1982)- Cavitation Inception in Pumps. Journal of Fluids Engineering.

- MONTEIRO, K. C. (1972). Contribuição Experimental ao estudo da resistência das argamassas à cavitação acelerada. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MILLER, G.E. AND RYLANDER, H.G. (1976). Inception Cavitation from a Solid Surface .Journal of Engineering for Industry, v. 98, série B, n. 1, p.145-152.
- NAVARRO, JOSÉ LUIS GOMES (1935). Fenómenos de Cavitación en Hidráulica Hormigon y Acero .
- NEERKEN, RICHARD F. (1987). Progress in Pumps. Chemical Engineering
- NEVES, L.A.. (1993). Verificação do comportamento do coeficiente de perda de carga numa expansão brusca em escoamento acelerado. 146p. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PORTO, R. M. (1991). Cavitação em Bombas - publ. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PORTO, R.M. (1998). Escoamento Permanente em condutos forçados. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROMA, W.N.L. (1993). Introdução às bombas hidráulicas de fluxo - publ. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROOD, E.P. (1991). Review- Mechanisms of cavitation inception. Journal of Fluids Engineering, v. 113, p.163-175, jun.
- SILVESTRE, PASCHOAL.(1972). Curso de bombas hidráulicas. Departamento de Engenharia Hidráulica. E.E. UFMG.

- STEPANOFF, A.J. (1945). Cavitation in Centrifugal Pumps. Transactions of the Asme, v. 67, n. 7 p.539-552 , oct.
- STEPANOFF, A.J. (1957). Centrifugal and axial flow pumps: Theory design, and application. London, Chapman and Hall.
- STEPANOFF, A.J. (1965) Pumps and blowers - two- phase flow - 2^aed. New York, John Wiley & Sons.
- SUTTON, M (1968). Pump scale laws as affected by individual component losses. Proceeding Instn Mechanical Engineering.
- TEIXEIRA, H.A. (1973). Influência da concentração de areia nas curvas características das bombas centrífugas. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (1980). PTC 19.23 Guidance Manual on Model Testing. New York.
- THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (1990). PTC 8.2. Centrifugal Pumps, Performance Test Codes. New York.
- TURTON, R.K.(1995). Principles of Turbomachinery. 2^a ed.
- VANDERBOEGH, B.L. (1947). Model Tests of Granby Pumps. Transactions of the Asme, v.69, n. 5 , p.535-540, Jul .
- VENIT S.M., SCHLEIFERS S.M. (1992). Programming in true basic, West Publishing Company, St.Paul.

- VIEIRA, R.C.C.; ZAMBEL, A.R. Aplicação dos princípios da análise dimensional e semelhança no funcionamento das bombas hidráulicas. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- VIEIRA, RUI C.C. (1965). Máquinas de Fluxo, Tangenciais, Radiais e Axiais - Publ Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- VIEIRA, RUI.C.C. (1961) . Mecânica dos fluidos. São Carlos. Publ. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- WARD, T. (1968). Thermodynamic scale effects on pump suction performance. Proceeding Instn Mech Engrs, vol 182, p.42-47.
- WILKINS, CHRISTOPHER P.E.(1988). NPSH and Pump Selection : Two Practical Examples. Heating/Piping/Air Conditioning, v.60, n.10, p.55-58, Oct.
- WISLICENUS, G.F. (1956). Critical Considerations on Cavitation Limits of Centrifugal and Axial- Flow Pumps. Transactions of the Asme, vol.78, n.8, p.1707-1714, nov.
- WISLICENUS, GEORGE F. (1947). Fluid Mechanics of Turbomachinery .
- WYLIE E.B., STREETER V.L. (1982) Fluid Transients. Thomson - Shore. Dexter,MI.