



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

***ANÁLISE DO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO EM BOMBA
CENTRÍFUGA***

Welington Ricardo Coelho

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**

Orientador: Prof. Dr. João Batista Aparecido

Ilha Solteira, Janeiro de 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

C672a	Coelho, Welington Ricardo. Análise do fenômeno de cavitação em bomba centrífuga / Welington Ricardo Coelho. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2006 xxxii, 234 p. : il. (algumas fotos color.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006 Orientador: João Batista Aparecido Bibliografia: p. 143-148 1. Bombas centrífugas. 2. Máquinas hidráulicas. 3. Tubulação – Dinâmica dos fluidos. 4. Dinâmica dos fluidos. 5. Cavitação. 6. Análise dimensional.
-------	---

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise do Fenômeno de Cavitação em Bombas Centrífugas

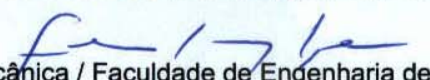
AUTOR: WELINGTON RICARDO COELHO

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOAO BATISTA APARECIDO

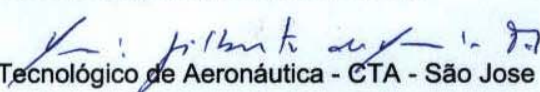
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOAO BATISTA APARECIDO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

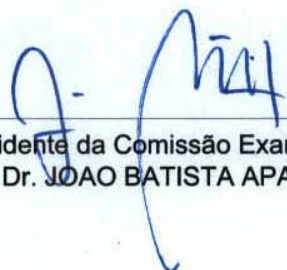
Prof. Dr. JOSE LUIZ GASCHE 

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. PAULO GILBERTO DE PAULA TORO 

Instituto de Estudos Avançados - IEAv - Centro Tecnológico de Aeronáutica - CTA - São Jose dos Campos/SP

Data da realização: 30 de janeiro de 2006.



Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. JOAO BATISTA APARECIDO

A meus pais João Coelho Baptista e Elisabeth Aparecida Priotto Coelho que me deram a possibilidade de obter uma ótima base em meus estudos e sempre me incentivaram na busca e obtenção de meus objetivos; a meus irmãos Alexandre Rodrigo Coelho e João Roberto Coelho pelo apoio e à minha noiva Eliana Tuzi Rodas pelo apoio, dedicação, cumplicidade, incentivo e muita compreensão em minhas “ausências” durante os finais de semana.

Agradecimentos

- Ao professor João Batista Aparecido, pela orientação, companheirismo, atenção e muita paciência com minha pessoa.
- Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica, em especial aos professores José Luis Gasche, Edson Del Rio Vieira, Sérgio Said Mansur e Adyles Arato Júnior pela atenção a mim prestada.
- A todos os técnicos do Laboratório de Engenharia Mecânica, em especial ao técnico Reginaldo Cordeiro, sem o qual não seria possível a execução deste projeto.
- Ao técnico responsável pela área de vibrações Carlos José Santana, pela colaboração e incentivo.
- Ao estagiário contratado pela FAPESP, Thiago de Castro Souza, pelo auxílio durante toda a execução do projeto.
- Aos colegas da pós-graduação, em especial, ao amigo José Ricardo Camilo Pinto, pela amizade e companheirismo.
- Aos amigos também da pós-graduação Odacir, Edlene e Rúbia pelo grande auxílio prestado durante todo o curso.
- A todos os funcionários do setor de pós-graduação pela compreensão, auxílio e principalmente pela educação com que sempre me receberam.
- Aos professores da ETE Philadelpho Gouvêa Netto, José Rubens Campos Fogaça, Giusepp Ricardo Passarini, Rubens Barreto Alvarenga, Manoel Abdala, José Ricardo Camilo Pinto, em especial, a Arnaldo Cecconi e Rolando Roberto Santoro, pela amizade e incentivo na realização deste projeto.
- A empresa Signartec Comercial Técnica Ltda, em especial ao amigo Fábio Signoretti e toda sua diretoria, que no início deste projeto, acreditou e me incentivou muito e pelo seu serviço de pós-venda e consultorias prestadas sem ônus.
- Aos meus amigos Airton Poloni Júnior e Lélia Poloni pelo enorme incentivo e auxílio técnico.

- Ao Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, CEETEPS, pelo incentivo concedido através do afastamento parcial de minhas atividades de docente na Unidade de Ensino Philadelpho Gouvêa Netto, para a realização deste projeto.
- A FUNDUNESP, pelo auxílio à pesquisa, Projeto 0022304, concedido para a execução deste projeto.
- A FAPESP, pelo auxílio à pesquisa, Projeto 03/10833-8, e pelo estagiário concedido para a execução deste projeto.
- Aos funcionários da biblioteca do Campus de Ilha Solteira, pela atenção, educação, presteza e obtenção de materiais solicitados.

Sumário

Lista de Tabelas	xi
Lista de Figuras	xv
Lista de Símbolos	xxiii
Resumo	xxix
Abstract	xxxi
Capítulo 1: Introdução	
1.1 – Considerações Iniciais	01
1.2 – Revisão Bibliográfica	03
1.3 – Objetivos	09
1.4 – Desenvolvimento do Trabalho	10
Capítulo 2: Cavitação	
2.1 – Cavitação	12
2.2 – Cavitação Pulsante	14
2.3 – Número de Thoma	16
2.4 – Conseqüências da Cavitação	18
2.5 – Prevenção da Cavitação em Bombas Centrífugas	20
2.6 – Tipos de Testes para Análise do Fenômeno de Cavitação	20
2.7 – Fatores que devem ser levados em conta em Estudos de Previsão da Taxa de Erosão por Cavitação	23
Capítulo 3: Metodologia	
3.1 – Metodologia	27
3.2 – Instalação Experimental	27
3.3 – Operação da Bancada de Testes	34

3.4 – Acionamento da Bancada	35
3.5 – Ensaios Preliminares	35

Capítulo 4: Energia de Bombeamento

4.1 – Alturas, H_l , H_m e H_u	37
4.2 – Altura Estática	38
4.3 – Alturas Dinâmicas	39
4.4 – Altura Manométrica, H_m	42
4.5 – Altura Útil de Elevação, H_u	44
4.6 – Altura Manométrica Obtida Diretamente do Visor de Instrumentos de Medição de Pressão, H_l	44
4.7 – Obtenção da Curva Característica da Bomba	46
4.8 – Resultados Obtidos na Determinação das Curvas Características das Alturas	48
4.8.1 – Resultados Obtidos na FASE 1	48
Análise de Energia na Sucção da Bomba	49
Análise de Energia na Descarga da Bomba	50
Alturas H_l , H_m e H_u em função da Vazão, Q ; Coeficiente de Pressão, ψ , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ ; e Coeficiente de Pressão, ψ , em função da Velocidade Específica, n_q	53
Alturas, H_l , H_m e H_u em função da Vazão, Q	53
Coeficiente de Pressão, ψ , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	58
Coeficiente de Pressão, ψ , em função da Velocidade Específica, n_q	61
Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	64
Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Velocidade Específica, n_q	65
Número de Reynolds Modificado, Re^* em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	65
Número de Reynolds Modificado, Re^* em função do Coeficiente de Velocidade Específica, n_q	66
4.8.2 – Resultados Obtidos na FASE 2	67
Análise de Energia na Sucção da Bomba	68
Análise de Energia na Descarga da Bomba	69

Alturas H_l , H_m e H_u em função da Vazão, Q ; Coeficiente de Pressão, ψ , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ ; e Coeficiente de Pressão, ψ , em função da Velocidade Específica, n_q	70
Alturas, H_l , H_m e H_u em função da Vazão, Q	70
Coeficiente de Pressão, ψ em função do Coeficiente de vazão, ϕ	75
Coeficiente de Pressão, ψ em função do Coeficiente de Velocidade Específica, n_q	77
Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	80
Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Velocidade Específica, n_q	81
Número de Reynolds Modificado, Re^* em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	82
Número de Reynolds Modificado, Re^* , em função do Coeficiente de Velocidade Específica, n_q	82
4.8.3 – Gráficos Comparativos entre as duas Fases	83
Alturas, H_m e H_u em função da Vazão, Q	83
Coeficiente de Pressão, ψ , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	84
Coeficiente de Pressão, ψ , em função do Coeficiente de Velocidade Específica, n_q	85
Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	86
Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Velocidade Específica, n_q	87
Número de Reynolds Modificado, Re^* , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	88
Número de Reynolds Modificado, Re^* , em função do Coeficiente de Velocidade Específica, n_q	88
Capítulo 5: NPSH Disponível	
5.1 – NPSH - <i>NET POSITIVE SUCTION HEAD</i>	90
5.2 – NPSH Disponível, $NPSH_{DISP}$	90
5.3 – Obtenção da Curva de NPSH Disponível	93
5.4 – Resultados Obtidos para o NPSH Disponível	94

5.4.1 – Resultados Obtidos na FASE 1	94
$NPSH_{DISP}$ em função da vazão, Q ; e τ_{DISP} em função da Vazão, Q	94
Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$ em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	97
Número de Thoma utilizando-se o $NPSH_{DISP}$, σ_{DISP} , em função da Velocidade Específica, n_q	97
5.4.2 – Resultados Obtidos na FASE 2	98
$NPSH_{DISP}$ e τ_{DISP} em função da Vazão, Q	99
Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$ em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	102
Número de Thoma utilizando-se o $NPSH_{DISP}$, σ_{DISP} em função da Velocidade Específica, n_q	103
5.4.3 – Gráficos Comparativos entre as duas Fases	104
$NPSH_{DISP}$ e τ_{DISP} em função da Vazão, Q	104
Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$ em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	106
Número de Thoma utilizando-se o $NPSH_{DISP}$, σ_{DISP} , em função da Velocidade Específica, n_q	106

Capítulo 6: NPSH Requerido

6.1 – NPSH Requerido	108
6.2 – Durabilidade de um Rotor em Cavitação	110
6.2.1 – Relacionamento entre os Diversos Tipos de $NPSH_{REQ}$ de uma Bomba	110
6.3 – Limites de Erros na Determinação do Valor $NPSH_{REQ}$ Garantido pelo Fabricante	117
6.4 – Influência da Temperatura e do Líquido no Valor $NPSH_{REQ}$	117
6.5 – Obtenção do $NPSH_{REQ}(3\%)$	117
6.6 – Generalização do Conceito $NPSH_{REQ}$	119
6.7 – Resultados Obtidos para NPSH requerido com Queda de 3%, $NPSH_{REQ}(3\%)$	120
6.8 – Detecção do Ponto de Cavitação	122
6.8.1 – Curvas Obtidas para a Rotação de 1400 RPM	123
6.8.2 – NPSH requerido em função da Vazão e Rotação	126
6.8.3 – Coeficiente de $NPSH_{REQ}$ em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	127
6.8.4 – Número de Thoma, σ , em função da Velocidade Específica, n_q	127
6.8.5 – Coeficiente de Pressão, ψ , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	128
6.8.6 – Coeficiente de Pressão, ψ , em função da Velocidade Específica, n_q	129

6.8.7 – Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	129
6.8.8 – Número de Reynolds, Re em função da Velocidade Específica, n_q	130
6.8.9 – Número de Reynolds Modificado, Re^* em função do Coeficiente de Vazão, ϕ	131
6.8.10 – Número de Reynolds Modificado, Re^* em função da Velocidade Específica, n_q	131
Capítulo 7: Discussão e Conclusão	
7.1 – Discussão e Conclusão	133
Referências Bibliográficas	143
Apêndice A - Análise de Incertezas	149
Apêndice B – Análise Dimensional	169
Apêndice C – Conversão de Unidades	179
Apêndice D – Tabelas de Valores Obtidos e Calculados no Experimento	187
Apêndice E – Tabela de Vazão Nominal para as Rotações Ensaçadas	233

Lista de Tabelas

Tabela 6.1 – Relação entre o $NPSH_{REQ}(CI)$, Obtido pela Medição do Nível de Pressão Sonora, e o $NPSH_{REQ}(3\%)$ para a Vazão de Projeto de Diferentes Tipos de Bombas. (Grist, 1974)	112
Tabela 6.2 – Relação entre o $NPSH_{REQ}(CI)$ e o $NPSH_{REQ}(3\%)$ para vários tipos de Bombas e para Vazões Menores, Iguais e Maiores que a de Projeto. (Mcnulty, 1982)	113
Tabela 6.3 – Vazões Mínimas Recomendadas para Bombas de Alta Energia para se ter $NPSH_{DISP} > NPSH_{REQ}(TEN)$. (Taylor, 1977)	115
Tabela 6.4 – Coeficiente de Vazão em função da Relação entre Vazão de Operação e Vazão de Projeto. (Grist, 1974).	116
Tabela 6.5 – Resultados obtidos para o $NPSH_{REQ}$ com as rotações de 1400, 1500 e 1600RPM.	125
Tabela A1 – Diâmetro externo e espessura Normalizada e Diâmetro Interno Calculado.	153
Tabela A2 – Incerteza para a área das tubulações de 1.1/4” e 3”.	154
Tabela A3 - Valores da incerteza da velocidade em um tubo de 1.1/4”.	155
Tabela A4 - Valores da incerteza da velocidade em um tubo de 3”.	156
Tabela A5 - Valores de Comprimento da Tubulação.	157
Tabela A6 - Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água.	159
Tabela A7 - Valores da incerteza do número de Reynolds em um tubo de 1.1/4”.	160
Tabela A8 - Valores da incerteza do número de Reynolds em um tubo de 3”.	161
Tabela D1 - Curva da bomba 1500 RPM - Fase 1.	188
Tabela D2 - Curva da bomba 1800 RPM - Fase 1.	189
Tabela D3 - Curva da bomba 1980 RPM - Fase 1.	189
Tabela D4 - Curva da bomba 11000RPM - Fase 2.	190

Tabela D5 - Curva da bomba 1300RPM - Fase 2.	190
Tabela D6 - Curva da bomba 1500RPM - Fase 2.	191
Tabela D7 - Curva da bomba 1600RPM - Fase 2.	191
Tabela D8 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 2.	192
Tabela D9 - Curva da bomba 1900RPM - Fase 2.	192
Tabela D10 - Curva da bomba 1980RPM - Fase 2.	193
Tabela D11 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 4 voltas.	194
Tabela D12 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 6 voltas.	194
Tabela D13 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 8 voltas.	194
Tabela D14 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 10 voltas.	195
Tabela D15 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 11 voltas.	195
Tabela D16 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 12 voltas.	195
Tabela D17 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 12,5 voltas.	196
Tabela D18 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 13 voltas.	196
Tabela D19 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 13,5 voltas.	196
Tabela D20 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 14 voltas.	197
Tabela D21 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 14,5 voltas.	197
Tabela D22 - Curva da bomba 1100RPM - Fase 2, Registro Fechado 11 voltas.	198
Tabela D23 - Curva da bomba 1100RPM - Fase 2, Registro Fechado 12 voltas.	198
Tabela D24 - Curva da bomba 1100RPM - Fase 2, Registro Fechado 13 voltas.	199
Tabela D25 - Curva da bomba 1100RPM - Fase 2, Registro Fechado 14 voltas.	199

Tabela D26 - Curva da bomba 1300RPM - Fase 2, Registro Fechado 11 voltas.	200
Tabela D27 - Curva da bomba 1300RPM - Fase 2, Registro Fechado 12 voltas.	200
Tabela D28 - Curva da bomba 1300RPM - Fase 2, Registro Fechado 13 voltas.	201
Tabela D29 - Curva da bomba 1300RPM - Fase 2, Registro Fechado 14 voltas.	201
Tabela D30 - Curva da bomba 1500RPM - Fase 2, Registro Fechado 11 voltas.	202
Tabela D31 - Curva da bomba 1500RPM - Fase 2, Registro Fechado 12 voltas.	202
Tabela D32 - Curva da bomba 1500RPM - Fase 2, Registro Fechado 13 voltas.	203
Tabela D33 - Curva da bomba 1500RPM - Fase 2, Registro Fechado 14 voltas.	203
Tabela D34 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 2, Registro Fechado 11 voltas.	204
Tabela D35 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 2, Registro Fechado 12 voltas.	204
Tabela D36 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 2, Registro Fechado 13 voltas.	205
Tabela D37 - Curva da bomba 1800RPM - Fase 2, Registro Fechado 14 voltas.	205
Tabela D38 - Valores de NPSH Requerido - 1400RPM, Fase 3.	206
Tabela D39 - Valores de NPSH Requerido - 1500RPM, Fase 3.	206
Tabela D40 - Valores de NPSH Requerido - 1600RPM, Fase 3.	206
Tabela D41 - Curva de NPSH (3%) 1400RPM - Fase 3, 12,475 m ³ /h.	207
Tabela D42 - Curva de NPSH (3%) 1400RPM - Fase 3, 14,16 m ³ /h.	209
Tabela D43 - Curva de NPSH (3%) 1400RPM - Fase 3, 16,55 m ³ /h.	211
Tabela D44 - Curva de NPSH (3%) 1400RPM - Fase 3, 18,235 m ³ /h.	213
Tabela D45 - Curva de NPSH (3%) 1500RPM - Fase 3, 12,475 m ³ /h.	215
Tabela D46 - Curva de NPSH (3%) 1500RPM - Fase 3, 16,695 m ³ /h.	217

Tabela D47 - Curva de NPSH (3%) 1500RPM - Fase 3, 18,235 m³/h.	219
Tabela D48 - Curva de NPSH (3%) 1500RPM Fase 3, 20,205 m³/h.	221
Tabela D49 - Curva de NPSH (3%) 1600RPM - Fase 3, 12,545 m³/h.	223
Tabela D50 - Curva de NPSH (3%) 1600RPM Fase 3, 16,695 m³/h.	225
Tabela D51 - Curva de NPSH (3%) 1600RPM Fase 3, 18,235 m³/h.	227
Tabela D52 - Curva de NPSH (3%) 1600RPM Fase 3, 20,135 m³/h.	229
Tabela D53 - Rotações médias ensaiadas por posição do registro de descarga, RG2.	231
Tabela E1 - Vazão Nominal da Bomba para as Rotações Ensaaiadas Tomando como Referência a Curva de 1750 RPM fornecida em Catálogo.	234
Tabela E2 - Vazão Nominal da Bomba para a Rotação de 1750 RPM obtida em Catálogo.	234

Lista de Figuras

Capítulo 1: Introdução

Figura 1.1 - Componentes de uma Bomba Centrífuga. (UFRN, 2005).	01
Figura 1.2 – Representação Esquemática do Ensaio de Cavitação Utilizando Dispositivo Vibratório. (Cuppari, 2002)	06
Figura 1.3 - Rotor de Bomba Centrífuga danificado pela Cavitação.	07

Capítulo 2: Cavitação

Figura 2.1 - Colapso de bolha em três Situações Características (Grein & Wyss, 1974).	13
Figura 2.2 – Fluxo em Sentido Inverso na Entrada de Sucção para Vazões bem Inferiores à de Projeto. (Mattos, 1998).	15
Figura 2.3 – Curva do Fator de Thoma (σ) $\times$ Velocidade Específica (n_q) (Mattos, 1998).	17
Figura 2.4 - Perda de Pressão no Bocal de Sucção e na Entrada do Rotor de uma Bomba. (McNulty & Pearsal, 1982).	20
Figura 2.5 – Variação do $NPSH_{DISP}$ Através da Modificação do Nível de Líquido do Reservatório de Sucção (Mattos, 1998).	21
Figura 2.6 - Variação do $NPSH_{DISP}$ Através do Fechamento na Sucção (Mattos, 1998).	22
Figura 2.7 - Variação do $NPSH_{DISP}$ por Modificação de Pressão e/ou Temperatura (Mattos, 1998).	23
Figura 2.8 - Variação da Altura de Elevação, da Taxa de Erosão por Cavitação e do Nível de Pressão Sonora em função do $NPSH$ disponível (Grist, 1974).	25
Figura 2.9 - Limites da Zona de Erosão por Cavitação (Grist, 1974).	25

Capítulo 3: Metodologia

Figura 3.1 – Esquema Geral da Bancada.	27
Figura 3.2 – Instalação da Placa Metálica de Separação dos Reservatórios de Sucção e Recalque.	28
Figura 3.3 – Bancada de Ensaios.	29
Figura 3.4 – Ponto de Tomada de Pressão na Sucção.	30
Figura 3.5 – Ponto de Tomada de Pressão no Recalque.	30
Figura 3.6 – Instalação dos Manômetros na Mesma Linha de Centro.	31

Figura 3.7 – Foto da Localização do Painel Elétrico, Inversor de Frequência e do Totalizador de Vazão.	31
Figura 3.8 – Registro Gaveta na Sucção (RGS) e Recalque (RGR2) Instalado Próximo ao Reservatório de Líquido.	32
Figura 3.9 – Local de Instalação do Registro de Recalque (RGR2) Próximo ao Reservatório de Líquido.	33
Figura 3.10 – Local de Instalação do Registro de Recalque, RGR1, Próximo ao Bocal de Saída da Bomba.	33
Figura 3.11 – Local de Instalação do Medidor de Vazão, MV, na Tubulação de Recalque.	34

Capítulo 4: Energia de Bombeamento

Figura 4.1 – Cotas de Referências.	38
Figura 4.2 – Altura Estática, Z_e .	39
Figura 4.3 - Altura Manométrica onde a Saída da Tubulação de Descarga Entra em um Reservatório pela sua parte Inferior, Contendo Líquido.	42
Figura 4.4 – Alternativas para a Linha de Sucção de uma Turbobomba.	43
Figura 4.5 – Altura Manométrica Aproximada com Instrumentos, H_l .	46
Figura 4.6 – Curva Característica para Rotação de 1750 RPM para a Bomba KSB MEGACHEM 32-200. (Manual KSB, 2003)	47
Figura 4.7 – Ilustração dos Volumes de Controle Utilizados na Análise de Energia da Sucção para a Bancada na Fase 1.	49
Figura 4.8 – Ilustração dos Volumes de Controle Utilizados na Análise de Energia na Descarga para a Bancada na Fase 1.	51
Figura 4.9 – Alturas (a) H_l , (b) H_m e (c) $H_u \times \text{Vazão}, Q$, Utilizando Manômetro Bourdon para Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	54
Figura 4.10 – Alturas, H_l , H_m e $H_u \times \text{Vazão}, Q$, para as Rotações de (a) 1500 RPM e (b) 1800 RPM e (c) 1980 RPM.	55
Figura 4.11 – Alturas, H_l , H_m e $H_u \times \text{Vazão}, Q$, para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	56
Figura 4.12 – Gráfico da altura $H_u \times \text{Vazão}, Q$, do Comportamento da Curva de 1800 RPM com o Registro de Sucção Fechado em 4; 6; 8; 10; 11; 12; 12,5; 13; 13,5; 14 e 14,5 voltas.	57

Figura 4.13 – Altura $H_u \times$ Vazão, Q , do Comportamento da Curva de 1800 RPM com o Registro de Sucção Fechado em (a) 11 voltas, (b) 12 voltas, (c) 13 voltas e (d) 14 votas.	58
Figura 4.14 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM, utilizando as Alturas (a) H_l , (b) H_m e (c) H_u .	59
Figura 4.15 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , Utilizando as Alturas H_l , H_m e H_u , para as Rotações de (a) 1500 RPM, (b) 1800 RPM e (c) 1980 RPM.	60
Figura 4.16 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , Utilizando as Alturas H_l , H_m e H_u , para as Rotações de 1500 RPM, 1800 RPM e 1980 RPM.	61
Figura 4.17 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as Alturas H_l , H_m e H_u com as Rotações de (a) 1500 RPM, (b) 1800 RPM e (c) 1980 RPM.	62
Figura 4.18 – Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as Alturas (a) H_l , (b) H_m e (c) H_u , para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	63
Figura 4.19 – Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as Alturas, H_l , H_m e H_u , com as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	64
Figura 4.20 – Número de Reynolds, Re , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	64
Figura 4.21 – Número de Reynolds, Re , $\times$ Coeficiente de Velocidade Específica, n_q , para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	65
Figura 4.22 – Número de Reynolds Modificado, Re^* , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	66
Figura 4.23 – Número de Reynolds, Re^* , $\times$ Coeficiente de Velocidade Específica, n_q , para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	66
Figura 4.24 – Esquema Geral da Bancada para os Testes Efetuados na Segunda Etapa do Projeto.	67
Figura 4.25 – Esquema Geral dos Manômetros -Fase 2.	68
Figura 4.26 – Ilustração das Cotas Utilizadas na Análise de Energia na Sucção.	69

Figura 4.27 – Ilustração das Cotas Utilizadas na Análise de Energia na Descarga.	69
Figura 4.28 – Alturas (a) H_m e (b) $H_u \times$ Vazão, Q , Utilizando Manômetro tubo U, para Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	71
Figura 4.29 - Alturas H_m , $H_u \times$ Vazão, Q para Rotações de (a) 1500 RPM, (b) 1800 RPM e (c) 1980 RPM.	72
Figura 4.30 – Alturas, H_m e $H_u \times$ Vazão, Q , para Rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.	73
Figura 4.31 – Altura, $H_u \times$ Vazão, Q , para a Bomba Ensaada com o Registro de Sucção Fechado em 11, 12, 13 e 14 voltas em (a) 1100 RPM, (b) 1300 RPM, (c) 1500 RPM e (d) 1800 RPM.	74
Figura 4.32 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para Rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM Utilizando as Alturas (a) H_m e (b) H_u .	75
Figura 4.33 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , Utilizando-se as Alturas H_m e H_u , para as Rotações de (a) 1500 RPM, (b) 1800 RPM e (c) 1980 RPM.	76
Figura 4.34 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , Utilizando-se as Alturas H_m e H_u , para as Rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.	77
Figura 4.35 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q , Utilizando-se as Alturas H_m e H_u para as Rotações de (a) 1500 RPM, (b) 1800 RPM, e (c) 1980 RPM.	78
Figura 4.36 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as Alturas (a) H_m e (b) H_u , nas Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	79
Figura 4.37 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as Alturas (a) H_m e (b) H_u nas Rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.	79
Figura 4.38 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as Alturas H_m e H_u nas Rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.	80
Figura 4.39 – Número de Reynolds, $Re \times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as Rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.	81

Figura 4.40 – Número de Reynolds, Re , $\times$ Coeficiente de Velocidade Específica, n_q , para as Rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.	81
Figura 4.41 – Número de Reynolds, Re^* , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	82
Figura 4.42 – Número de Reynolds, Re^* , $\times$ Coeficiente de Velocidade Específica, n_q , para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	83
Figura 4.43 - Alturas Manométricas, H_m e $H_u \times$ Vazão, Q , nas Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM Obtidos nas duas Fases desta Pesquisa.	84
Figura 4.44 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , Utilizando as Alturas H_m , e H_u para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM nas duas Fases do Projeto.	85
Figura 4.45 - Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as Alturas H_m e H_u nas duas Fases da Pesquisa.	86
Figura 4.46 – Número de Reynolds, Re , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as Rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.	87
Figura 4.47 – Número de Reynolds, Re , $\times$ Coeficiente de Velocidade Específica, n_q , para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	87
Figura 4.48 – Número de Reynolds, Re^* , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as Rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.	88
Figura 4.49 – Número de Reynolds, Re^* , $\times$ Coeficiente de Velocidade Específica, n_q , para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	89

Capítulo 5: NPSH Disponível

Figura 5.1 – Representação das Diversas Energias Envolvidas na Região de Sucção da Bomba (Macintyre, 1980).	91
Figura 5.2 - Definição do Plano de Referência em Diferentes Tipos de Rotores e de Montagens.	92
Figura 5.3 - Medida da Altura Geométrica de Sucção Z_1 . a) em Máquinas com Eixo Vertical; b) em Máquinas com Eixo Horizontal.	93
Figura 5.4 – Curva Característica de $NPSH_{DISP}$ em função da Vazão, Q .	93
Figura 5.5 – (a) $NPSH_{DISP} \times$ Vazão, Q e (b) $\tau_{DISP} \times$ Vazão, Q para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.	95

- Figura 5.6 – (a) $NPSH_{DISP} \times Vazão, Q$ e (b) $\tau_{DISP} \times Vazão, Q$ para a Rotação de 1800 RPM com o Registro de Sucção sendo Fechado. 96
- Figura 5.7 – Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP} \times Coeficiente de Vazão, \phi$, para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM. 97
- Figura 5.8 - Número de Thoma disponível, $\sigma_{DISP} \times Velocidade Específica, nq$, para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM baseado nas Alturas (a) H_l (b) H_m e (c) H_u . 98
- Figura 5.9 – (a) $NPSH_{DISP} \times Vazão, Q$, e (b) $\tau_{DISP} \times Vazão, Q$ para as Rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM. 99
- Figura 5.10 - $NPSH_{DISP} \times Vazão, Q$, para as Rotações de 1100, 1300, 1500 e 1800 RPM com o Registro de Sucção sendo Fechado em 11, 12, 13 e 14 voltas. 100
- Figura 5.11 - $NPSH_{DISP} \times Vazão, Q$, para a Rotação de (a) 1100 RPM, (b) 1300RPM, (c) 1500 RPM e (d) 1800 RPM, para os Registros sendo Fechados em 11, 12, 13 e 14 voltas. 101
- Figura 5.12 - $NPSH_{DISP} \times Vazão, Q$, para a Rotação de 1100, 1300, 1500 e 1800 RPM, para os Registros Fechados em (a) 11 voltas, (b) 12 voltas, (c) 13 voltas e (d) 14 voltas. 102
- Figura 5.13 - Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}, \times Coeficiente de Vazão, \phi$, para as rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM. 103
- Figura 5.14 - Número de Thoma disponível, $\sigma_{DISP} \times Velocidade Específica, nq$, para as Rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM para as Alturas (a) H_m e (b) H_u Utilizando o $NPSH_{DISP}$. 104
- Figura 5.15 – (a) $NPSH_{DISP} \times Vazão, Q$, e (b) $\tau_{DISP} \times Vazão, Q$ para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM. 105
- Figura 5.16 - $NPSH_{DISP} \times Vazão, Q$, para a Rotação de 1800 RPM, com o Registro de Sucção Fechado em 11, 12, 13 e 14 voltas. 105
- Figura 5.17 - Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}, \times Coeficiente de Vazão, \phi$, para as rotações (a) 1500, 1800 e 1980 RPM obtidos nas duas fases do projeto e (b) acrescentando as rotações de 1100, 1300, 1600, e 1900 RPM obtidas na segunda fase. 106
- Figura 5.18 - Número de Thoma disponível, $\sigma_{DISP} \times Velocidade Específica, nq$,

para as Rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM para as duas Fases do Projeto Utilizando o $NPSH_{DISP}$.	107
---	-----

Capítulo 6: NPSH Requerido

Figura 6.1 - Representação do $NPSH_{REQ}$ (a) Curva $H \times Q$ e (b) Curva $H \times NPSH_{DISP}$. (Mattos, 1998)	109
Figura 6.2 - Representação do $NPSH_{REQ}$ (Curva $NPSH \times Q$). (KSB, 2003)	109
Figura 6.3 – Nível de Ruído e Altura de Elevação em função do $NPSH_{DISP}$ em um Teste de Cavitação (Vlaming, 1981).	111
Figura 6.4 – Utilização da Margem de Segurança do $NPSH_{DISP}$ acima do $NPSH_{REQ}(3\%)$ para a Vazão de Projeto da Bomba. (Xavier, 1992)	114
Figura 6.5 – Relacionamento entre o $NPSH_{DISP}$ e o $NPSH_{REQ}(TEA)$ (Xavier, 1992).	116
Figura 6.6 – Curva da Taxa de Erosão em função do Fator de Correção R.	120
Figura 6.7 – Esquema Geral dos Manômetros Utilizados na Fase 3.	121
Figura 6.8 – Determinação de $NPSH_{REQ}$: 1400 RPM, 12,475 m ³ /h.	124
Figura 6.9 – $NPSH_{REQ} \times$ Vazão, Q, para as Rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.	126
Figura 6.10 – Coeficiente de $NPSH_{REQ}$, $CNPSH_{REQ}$, $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as Rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.	127
Figura 6.11 – Número de Thoma, $\sigma \times$ Velocidade Específica, n_q , para as Rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.	128
Figura 6.12 – Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de vazão, ϕ para as Rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.	128
Figura 6.13 – Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q para as Rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.	129
Figura 6.14 – Número de Reynolds, Re , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ para as Rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.	130
Figura 6.15 – Número de Reynolds, Re , $\times$ Velocidade Específica, n_q para as Rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.	130
Figura 6.16 – Número de Reynolds*, Re^* , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ para as Rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.	131
Figura 6.17 – Número de Reynolds*, Re^* , $\times$ Velocidade Específica, n_q para as Rotações	

de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM. 132

Capítulo 7: Discussão e Conclusão

Figura 7.1 – Alturas, H_l , H_m e $H_u \times$ Vazão, Q , obtidas na bancada para a primeira e segunda fase, comparadas com os dados do catálogo. 134

Figura 7.2 – Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as Curvas de (a) 1500, 1800, 1980 RPM Obtidos na Bancada Durante a Primeira Fase (b) 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM Obtidos na Bancada durante a Segunda Fase e 1750 RPM Obtido no Catálogo do Fabricante. 135

Figura 7.3 – Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as Curvas de (a) 1500, 1800, 1980 RPM Obtidos na Bancada durante a Primeira Fase (b) 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM Obtidos na Bancada durante a Segunda Fase e 1750 RPM Obtido no Catálogo do Fabricante. 136

Figura 7.4 – Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as Curvas de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM Obtidos na Bancada de Testes durante a Segunda Fase, 1750 RPM Obtido Usando os dados do Catálogo do Fabricante e Resultados Fornecidos por Stepanoff (1961). 137

Figura 7.5 – Ângulo de saída do líquido dos canais formados pelas pás de um rotor, β_2 . 138

Figura 7.6 – Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as Curvas de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM Obtidos na Bancada de Testes durante a Segunda Fase, 1750 RPM Obtido Usando os dados do Catálogo do Fabricante e Resultados Fornecidos por Stepanoff (1961). 139

Figura 7.7 – Número de Thoma, σ $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as Rotações de 1400, 1500 e 1600 RPM Obtidos nesta Pesquisa. 140

Figura 7.8 – Coeficiente de $NPSH_{REQ} \times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as Curvas de 1400, 1500 e 1600 RPM Obtidos na Bancada de Testes durante a Terceira Fase, 1350, 1400 e 1440 RPM Obtidos no Trabalho de Silva (1998) e nos dados do Catálogo do Fabricante. 141

Lista de Símbolos

A	área da seção.
b	coeficiente de vazão em função da relação $\frac{Q_{\text{operação}}}{Q_{\text{projeto}}}$.
C	coeficiente dependente da natureza (material e estado) das paredes do tubo de uma tubulação.
CNPSH _{DISP}	coeficiente adimensional para o NPSH disponível.
D	diâmetro da tubulação.
D _{ext}	diâmetro externo da tubulação.
D _{int}	diâmetro interno da tubulação.
e	espessura de parede da tubulação.
g	aceleração da gravidade.
h	perda de carga.
H	altura manométrica geral.
H _I	altura manométrica lida diretamente dos visores dos instrumentos de medição de pressão.
H _m	altura manométrica da bomba calculada por análise de energia.
H _{médio}	altura manométrica média obtida entre os maiores valores das alturas no início da curva para obtenção do NPSH _{REQ} .
H _n	altura calculada para uma rotação n qualquer a partir de uma altura e rotação conhecida.
H _{n1}	altura conhecida utilizada para o cálculo da altura H _n .
H _u	altura útil de elevação.
H _u (97%)	altura útil de elevação com queda de 3%.
H _d	altura manométrica de descarga.
H _s	altura manométrica de sucção.
h _{1→2}	perda de carga na tubulação de sucção.
h _{3→4}	perda de carga na tubulação de descarga.
h _{A→2}	perda de carga na tubulação de sucção entre o ponto de tomada de pressão e a seção do flange de entrada da bomba na Fase 1.

$h_{A \rightarrow 5}$	perda de carga no interior da mangueira utilizada na obtenção dos dados de sucção pelo manovacuômetro na Fase 1.
$h_{B \rightarrow 6}$	perda de carga no interior da mangueira utilizada na obtenção dos dados de descarga pelo manômetro na Fase 1.
$h_{3 \rightarrow B}$	perda de carga na tubulação de descarga entre a seção do flange de saída da bomba e o ponto de tomada de pressão na Fase 1.
ISM	incerteza do sistema de medição.
J	perda de carga unitária para o comprimento da tubulação.
K	constante qualquer.
L	comprimento de tubulação.
LC	linha imaginária adotada como sendo a posição de referência para os cálculos das cotas existentes nas formulações.
l_1, l_2, l_3 e l_4	medidas obtidas em milímetros no manômetro de coluna líquida tipo U para os cálculos das alturas e do $NPSH_{DISP}$.
m	número de indivíduos de uma população.
MM	média das medidas
M_j	medida referente a cada medição
n	rotação da bomba.
n_q	velocidade específica.
n_{qA}	velocidade específica utilizada por Escher Wyss.
n_s	velocidade específica utilizada por Stepanoff, Wislicenus e Widden.
$NPSH_{DISP}$	NPSH disponível.
$NPSH_{DISP}(3\%)$	NPSH disponível com queda de 3% na altura útil.
$NPSH_{DISP,0}$	NPSH disponível para a vazão $Q = 0 \text{ m}^3/\text{h}$ obtido através da equação (5.3).
$NPSH_n$	NPSH calculado para uma rotação n qualquer a partir de um NPSH e rotação conhecida.
$NPSH_{n1}$	NPSH conhecido utilizado para o cálculo do $NPSH_n$.
$NPSH_{REQ}$	NPSH requerido.
$NPSH^*_{REQ}$	NPSH requerido com valores suficientes para reduzir ou mesmo eliminar a cavitação. $NPSH_{REQ}$ generalizado.
$NPSH_{REQ}(0\%)$	NPSH requerido com queda de 0% na altura útil.
$NPSH_{REQ}(3\%)$	NPSH requerido com queda de 3% na altura útil.

$NPSH_{REQ}(10\%)$	NPSH requerido com queda de 10% na altura útil.
$NPSH_{REQ}(CI)$	NPSH requerido para cavitação incipiente.
$NPSH_{REQ}(TEA)$	NPSH requerido para taxa de erosão aceitável.
$NPSH_{REQ}(TEI)$	NPSH requerido para taxa de erosão incipiente.
$NPSH_{REQ}(TEM)$	NPSH requerido para taxa de erosão máxima.
$n_{S(U.S.)}$	velocidade específica no sistema inglês.
p_A	pressão absoluta no ponto de coleta de dados na tubulação de sucção utilizada na análise de energia.
p_B	pressão absoluta no ponto de coleta de dados na tubulação de descarga utilizada na análise de energia.
p_{amb}	pressão absoluta do ambiente.
P_n	potência calculada para uma rotação n qualquer a partir de uma potência e rotação conhecida.
P_{n1}	potência conhecida utilizada para o cálculo da potência P_n .
p_v	pressão de vapor do líquido bombeado.
p_x	pressão interna do tubo U para análise de energia na descarga da bomba.
p_y	pressão interna do tubo U para análise de energia na sucção da bomba.
p_1	pressão absoluta no reservatório de sucção.
p_2	pressão absoluta na seção do flange de entrada da bomba.
p_2^v	pressão relativa lida diretamente no visor do vacuômetro para pressões de sucção negativas.
p_2^m	pressão relativa lida diretamente no visor do manômetro para pressões de sucção positivas.
p_3	pressão absoluta na seção do flange de saída da bomba.
p_3^m	pressão relativa lida diretamente no visor do manômetro da tubulação de descarga.
p_4	pressão absoluta na saída da tubulação de descarga.
p_5	pressão absoluta do líquido lida no vacuômetro da tubulação de sucção.
$p_{5,amb}$	pressão do ambiente no ponto de tomada de pressão do vacuômetro.
p_5^v	pressão relativa do líquido lida diretamente no visor do vacuômetro da tubulação de sucção para pressões de sucção negativas.
p_6	pressão absoluta do líquido lida no manômetro da tubulação de descarga.
$P_{6,amb}$	pressão do ambiente no ponto de tomada de pressão do manômetro.

p_6^m	pressão relativa do líquido lida no manômetro da tubulação de descarga.
Q	vazão da bomba.
Q_n	vazão calculada para uma rotação n qualquer a partir de uma vazão e rotação conhecida.
Q_{n1}	vazão conhecida utilizada para o cálculo da vazão Q_n .
$Q_{\text{operação}}$	vazão de operação da bomba.
Q_{projeto}	vazão de projeto da bomba.
$Q_{\eta\text{máx}}$	vazão do ponto de melhor rendimento.
R_{DISP}	fator efetivo em instalações.
Re	número de Reynolds, independente da vazão.
Re^*	número de Reynolds modificado, dependente da vazão.
RM	resultado da medição.
R_{REQ}	fator multiplicativo para cálculo de $NPSH^*_{\text{REQ}}$ generalizado.
T	temperatura do líquido bombeado.
V	velocidade média do fluido.
V_1	velocidade média do fluido na superfície do líquido no reservatório de sucção.
V_2	velocidade média do fluido na seção do flange na entrada da bomba.
V_3	velocidade média do fluido na seção do flange na saída da bomba.
V_4	velocidade média do fluido na saída da tubulação de descarga.
V_5	velocidade média do fluido no interior da mangueira de ligação entre o ponto de tomada de pressão na sucção e o vacuômetro.
V_6	velocidade média do fluido no interior da mangueira de ligação entre o ponto de tomada de pressão na descarga e o manômetro.
V_A	velocidade média do fluido na tubulação de sucção da bomba no ponto de obtenção da pressão da Fase 1.
$V_{A,W}$	velocidade média do fluido na parede da tubulação de sucção da bomba no ponto de obtenção da pressão da Fase 1.
V_B	velocidade média do fluido na tubulação de descarga da bomba no ponto de obtenção da pressão da Fase 1.
$V_{B,W}$	velocidade média do fluido na parede da tubulação de descarga da bomba no ponto de obtenção da pressão da Fase 1.
ω	velocidade angular do rotor da bomba.

$x_1, x_2, \dots, x_n$	indivíduos de uma população.
$\hat{x}$	amostra de uma população.
X	média da população.
Z_1	cota referente ao nível do reservatório de sucção.
Z_2	cota referente à seção do flange de entrada da bomba.
Z_2^v	cota referente à leitura direta no manovacuômetro. Distância entre a linha de centro adotada como referência até o centro do manovacuômetro.
Z_3	cota referente à seção do flange de saída da bomba.
Z_3^m	cota referente à leitura direta no manômetro. Distância entre a linha de centro adotada como referência até o centro do manômetro.
Z_4	cota referente ao ponto médio da seção de saída do encanamento de descarga.
Z_5	cota referente à entrada de pressão no manovacuômetro.
Z_6	cota referente à entrada de pressão no manômetro.
Z_A	cota referente ao ponto de tomada de pressão na sucção da Fase 1.
Z_B	cota referente ao ponto de tomada de pressão na descarga da Fase 1.
Z_e	altura estática de elevação.
Z_{12}	diferença de cotas entre a seção do flange de entrada da bomba e o nível do líquido no reservatório de sucção, altura estática de sucção.
Z_{24}	diferença de cotas entre o ponto médio da seção de saída da tubulação de descarga e a seção do flange de entrada da bomba, altura estática de descarga.
Z_{34}	diferença de cotas entre o ponto médio da seção de saída da tubulação de descarga e a seção do flange de saída da bomba.
σ	número de Thoma.
σ_{DISP}	número de Thoma utilizando os valores de $NPSH_{DISP}$.
σ_{DISP}^*	número de Thoma utilizando os valores de τ_{DISP} .
σ	desvio padrão da população.
σ^2	variância da população.
δ	incerteza associada a medição de uma variável.
λ	fator experimental dependente do projeto da sucção da bomba.
ν	viscosidade cinemática.

μ	viscosidade dinâmica.
ρ	densidade do líquido bombeado.
γ	peso específico do líquido bombeado.
ρ_{Hg}	densidade do mercúrio no interior do manômetro de coluna líquida..
ρ_{H_2O}	densidade da água no interior das mangueiras do manômetro de coluna líquida.
τ_{DISP}	adimensional definido para o NPSH disponível, sendo $\tau_{DISP} = \frac{NPSH_{DISP}}{NPSH_{DISP,0}} .$
ψ	coeficiente adimensional de pressão.
$\psi(H_l)$	coeficiente adimensional de pressão utilizando os valores da altura H_l .
$\psi(H_m)$	coeficiente adimensional de pressão utilizando os valores da altura H_m .
$\psi(H_u)$	coeficiente adimensional de pressão utilizando os valores da altura H_u .
ϕ	coeficiente adimensional de vazão.
φ	constante utilizada no cálculo do número de Thoma obtida experimentalmente através de ensaios.
Δh_s	comprimento total lido no manômetro de coluna líquida tipo U para a sucção.
Δh_r	comprimento total lido no manômetro de coluna líquida tipo U para a descarga.
$\Delta M_{m\acute{a}x}$	variação máxima obtida entre todas as medidas.

Resumo

Coelho, Welington Ricardo (2006). Análise do Fenômeno de Cavitação em Bomba Centrífuga. Ilha Solteira, 2006. 234 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP.

Cavitação em bombas centrífugas é a formação de bolhas de vapor do fluido bombeado na região de sucção do equipamento. As bolhas de vapor formadas em algum local do escoamento, em geral na região de sucção da bomba, entrarão posteriormente em colapso. Este fenômeno é importante cientificamente, tecnicamente e economicamente. Cientificamente é interessante, pois envolve o escoamento de um fluido em estado líquido, simultaneamente ocorre a formação de bolhas de vapor, que também escoam juntamente ao fluido líquido. O processo de vaporização e condensação de um fluido é complexo, pois envolve mudança de fase, um fenômeno térmico não linear. Tecnicamente, é importante porque quando o escoamento se dá com cavitação os parâmetros hidrodinâmicos do escoamento bem como da bomba, em geral, são fortemente alterados na direção termodinâmica de maior produção de irreversibilidades. Economicamente, é custoso porque a cavitação, em geral, leva a perda de eficiência termodinâmica dos processos e em consequência haverá maior custo na produção de um dado bem, diminuindo a eficiência econômica e a competitividade da empresa. O escoamento com cavitação na sucção de bombas apresenta três aspectos danosos principais: cavitação pulsante com baixa vazão; cavitação não pulsante com baixa altura útil; e erosão cavitacional. A cavitação pulsante é caracterizada por grande formação de bolhas de forma transitória com baixa frequência e grande amplitude, gerando forças vibratórias importantes no sistema de bombeamento. A cavitação pulsante também causa colapso do fluxo de massa do fluido bombeado com valores que vão do fluxo normal da instalação até valores quase nulos, transitoriamente. Na cavitação pulsante a erosão cavitacional e a queda na altura útil são pequenas. Na cavitação não pulsante o fluxo de massa é estável, sem pulsações, porém há queda acentuada da altura útil. Neste caso a erosão cavitacional poderá ser moderada ou intensa, dependendo das condições do escoamento. Em todas as situações em que há cavitação no escoamento pode haver erosão cavitacional, no entanto, a erosão cavitacional intensa ocorre em condições do escoamento nas quais tanto a vazão quanto a altura útil sofrem pouca alteração. O colapso do fluxo de massa ou o colapso da altura útil causam danos imediatos e importantes ao processo, a erosão cavitacional, embora importante, causa danos apreciáveis apenas a médio e

longo prazo. Neste trabalho além de apresentar alguns aspectos introdutórios do funcionamento de bombas centrífugas com ou sem cavitação, mostra-se também resultados experimentais sobre a vazão, a rotação, e as pressões absolutas na entrada e na saída da bomba. Também foram medidas a pressão atmosférica e a temperatura do fluido de trabalho. Com os dados experimentais obtidos pode-se calcular grandezas, previstas no modelo conceitual, dimensionais ou adimensionais, tais como: altura útil, NPSH disponível, coeficiente de pressão, coeficiente de vazão, Número de Reynolds e velocidade específica. A partir de um conceito para o NPSH requerido, pode-se também estimar valores para esta grandeza, e, por conseguinte calcular as grandezas adimensionais correlatas, tais como: coeficiente de NPSH e Número de Thoma. Os resultados foram obtidos para diferentes valores da rotação da bomba. Para os resultados apresentados efetuou-se a estimativa estatística das incertezas associadas às grandezas estocásticas. Adicionalmente, os resultados obtidos foram comparados com aqueles disponíveis no catálogo do fabricante, bem como na literatura correlata.

PALAVRAS CHAVES

Bombas centrífugas, vazão, altura útil, altura manométrica, coeficiente de pressão, coeficiente de vazão, NPSH disponível, NPSH requerido, Número de Thoma, coeficiente de NPSH.

Abstract

Coelho, Welington Ricardo (20 06). Analysis of Cavitation Phenomenon in Centrifugal Pumps. Ilha Solteira, 2006. 234 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP.

Cavitation in centrifugal pumps is the development of vapor bubbles from the pumped liquid into equipment suction region. Vapor bubbles developed somewhere in the flow, generally in the pump suction, will afterwards along the flow to collapse. This phenomenon is scientifically, technically and economically important. Scientifically, it is interesting because involves the flow of a fluid on liquid state, and simultaneously happens vapor bubbles development that also flow together the liquid fluid. Fluid vaporization and condensation processes are complex because involves phase change, a non-linear thermal phenomenon. Technically, it is important because when the flow happens with cavitation the flow and pump hydrodynamic parameters, generally, are strongly modified toward bigger thermodynamic irreversibility production. Economically, it is expensive because cavitation, generally, leads to thermodynamic process efficiency loss, and consequently it will have bigger costs for production of a given good, then decreasing economic efficiency and company competitiveness. Flow with cavitation in the pump suction presents three main devastating aspects: surging cavitation with low flow rate; steady cavitation with low total head; and cavitation erosion. Surging cavitation is characterized by unsteady, low frequency and high amplitude, intense bubbles development, producing strong vibration forces into the pumping system. Surging cavitation also causes the collapse of pumped fluid mass flow rate with values that goes from the normal flow to values that almost reach the zero flow, unsteadily. In surging cavitation, the cavitation erosion and the breakdown in total head are small. In steady cavitation the mass flow rate, and even the flow rate, is steady, without pulsations, but there are important breakdown in pump total head. In this case, the cavitation erosion could be moderate or intense, depending on the flow condition. In all situations when there are flow cavitation could happens cavitation erosion, however, the intense cavitation erosion happens into the flow in which both flow rate and pump total head suffer little change. The mass flow rate collapse or the pump total head breakdown causes important and immediate damage to the plant process, the cavitation erosion, although important causes damage just at middle and long term. In this research beyond presenting some introducing aspects about centrifugal pumps operating with or without cavitation, it is shown also experimental results about flow rate, rotation, and absolute pressure at pump inlet and outlet. Besides, it was also measured the atmospheric pressure and working fluid temperature. By using

obtained experimental results, it was possible to compute some dimensional or dimensionless parameters, from the pump and pumping theory, such as: pump total head, NPSH available, pressure coefficient, flow rate coefficient, Reynolds Number and specific speed. Starting from some definition for NPSH required, it was possible also to estimate values for this parameter, and consequently to calculate the related dimensionless quantities, such as NPSH coefficient and Thoma Number. Results were obtained for different values of pump rotation. For results shown it was done the statistical evaluation of uncertainties associated to the stochastic variables. Additionally, the results obtained were compared to those ones available from producer catalog as well as from the technical literature.

KEYWORDS

Centrifugal pumps, flow rate, pump total head, manometer head, pressure coefficient, flow rate coefficient, NPSH available, NPSH required, Thoma Number, NPSH coefficient.

Capítulo 1: Introdução

Neste capítulo, descreve-se os principais componentes de uma bomba centrífuga, a revisão bibliográfica, os objetivos deste trabalho e seu desenvolvimento.

1.1 – Considerações Iniciais

Bombas são máquinas operatrizes hidráulicas que transferem energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro. Recebem energia de uma fonte motora qualquer e cedem parte desta energia ao fluido sob forma de energia de pressão, energia cinética ou energia potencial, isto é, aumentam a pressão do líquido, a velocidade ou ambas as grandezas.

Na Figura 1.1, pode-se visualizar o formato de construção de uma bomba centrífuga assim como seus principais componentes: rotor, bocal de sucção, bocal de recalque, voluta, carcaça, mancais e eixo.

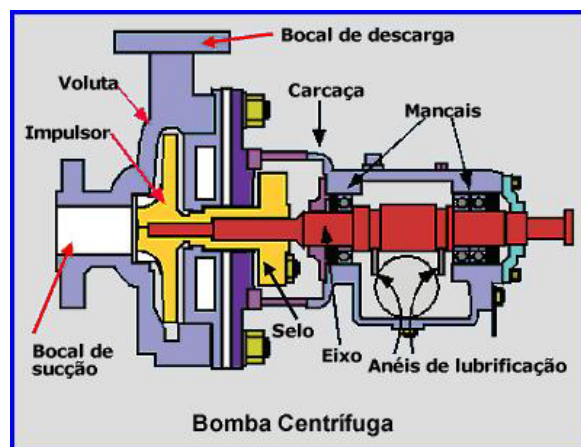


Figura 1.1 - Componentes de uma Bomba Centrífuga (Fonte: UFRN, 2005).

O rotor ou impulsor é o componente que transforma a energia de rotação em energia de velocidade e energia de pressão. O rotor consiste de paredes laterais, palhetas e cubo. Pode ser classificado em rotor de fluxo simples ou duplo; rotor fechado; rotor semi-aberto e rotor aberto.

O corpo espiral ou voluta é o componente que transforma a energia de velocidade que o rotor desenvolveu em energia de pressão. O corpo espiral possui áreas de seções crescentes em toda a volta do rotor até o bocal de descarga da bomba.

O eixo transmite o torque do acionador ao rotor. É projetado para que tenha uma deflexão máxima pré-estabelecida quando em operação.

A carcaça ou suporte de mancais em bombas de simples estágio são normalmente do tipo *back-pull-out*. Isto significa que o suporte do mancal junto com o rotor são desmontáveis para trás, sem remover a carcaça da bomba do local de instalação.

Os mancais têm a função de suportar o peso do corpo girante, forças radiais e axiais do rotor que ocorrem durante a operação.

Uma bomba centrífuga instalada inapropriadamente e operando na condição de cavitação por tempo prolongado está sujeita à ocorrência de diversos problemas, que podem afetar seriamente seu desempenho operacional e sua integridade mecânica. Portanto, é fundamental o conhecimento desse fenômeno, principalmente suas causas, efeitos e meios de previsão e controle, para quem se candidata a projetar, selecionar e acompanhar a operação de bombas centrífugas.

Uma simples descrição para o fenômeno de cavitação pode ser dada como: uma intensa formação de bolhas de vapor na região de baixa pressão da bomba, logo na entrada da sucção e posterior colapso destas bolhas na região de pressão mais alta, já dentro da bomba e mais precisamente no rotor.

A cavitação é um fenômeno complexo, freqüentemente encontrado em sistemas e máquinas hidráulicas operando com líquidos. Pela sua importância prática, tem sido objeto de inúmeros estudos de natureza teórica, numérica e, principalmente, experimental. Apesar disso, a dinâmica deste fenômeno e os mecanismos que lhe dão origem são, ainda hoje, pouco conhecidos em muitos de seus aspectos.

Um dos parâmetros importantes para verificar o desempenho de bombas centrífugas é o NPSH, que pode ser simplificado como: pressão mínima em termos absolutos, acima da pressão de vapor do líquido, a fim de evitar a formação de bolhas de vapor.

A pressão de vapor de um líquido a uma dada temperatura é aquela à qual o líquido coexiste em suas fases líquida e vapor.

Numa mesma temperatura, em condição de equilíbrio termodinâmico, quando se tem uma pressão maior que a pressão de vapor, haverá somente a fase líquida e quando se tem uma pressão menor que a pressão de vapor, haverá somente a fase vapor. A pressão de vapor de líquidos pode ser obtida de tabelas de pressão de vapor. Quando essa pressão é convertida para carga, através de sua divisão pelo peso específico, ρg , do líquido, ela é chamada de carga de pressão de vapor. Costuma-se designar por “carga” a energia por unidade de peso de líquido bombeado.

A pressão de vapor de um líquido cresce com o aumento da temperatura, assim, caso a temperatura seja elevada até um ponto no qual a pressão de vapor iguale, por exemplo, a pressão atmosférica, resultará na evaporação do líquido, ocorrendo o fenômeno da ebulição.

1.2 – Revisão Bibliográfica

Existe ampla oferta de material bibliográfico sobre o fenômeno da cavitação. Alguns trabalhos são bastante completos e oferecem uma visão panorâmica do assunto, facilitando sua compreensão, Tullis & Marschner (1968), Arndt (1981) e Gikas, (1986). Parte significativa das pesquisas realizadas foram efetivadas utilizando-se ferramentas de visualização experimental, onde observa-se a formação das bolhas de vapor nas regiões de baixa pressão e seus efeitos usando-se equipamentos transparentes, ou com partes transparentes.

Optou-se nesta revisão bibliográfica em comentar-se alguns trabalhos efetuados em diferentes áreas, mas sempre com a presença e tema principal o fenômeno da cavitação.

O colapso das bolhas de vapor ocorre muito próximo às paredes de válvulas de controle de vazão. As válvulas operadas neste tipo de condição estão sujeitas a severa erosão de suas superfícies internas. Infelizmente, esta é uma situação bastante freqüente e danosa para a operação de válvulas, Tullis & Marschner (1968).

A cavitação também ocorre em líquidos escoando no interior de tubulações, como nos sistemas hidráulicos de aviões. A formação de bolhas no interior do sistema hidráulico oferece uma séria restrição ao escoamento causando avarias em partes dos sistemas, ruído audível, vibrações, perdas de eficiência e operação errática do rotor hidráulico. Para redução destes efeitos sugere-se o emprego de tanques e válvulas de alívio, a redução das velocidades do líquido, o aumento das pressões no sistema, aumento das pressões de sucção nas bombas, diminuição de mudanças bruscas nas seções das tubulações, controle da temperatura e diminuição da pressão de vapor do líquido do sistema.

Apesar de numerosas descrições dos efeitos danosos da cavitação encontrados na literatura, em alguns poucos casos, a cavitação pode ter efeitos benéficos e ser aproveitada. Este é o caso descrito por Arndt (1981), em que a cavitação é utilizada no processo de homogeneização do leite e para limpeza de superfícies sólidas.

Também a EPA (U.S. Environmental Protection Agency, 1993) descreve (EPA Report EPA/540/AR-93/520) um sistema desenvolvido pela *Magnum Water Technology* para tratamento de águas utilizando-se radiação ultravioleta, peróxido de hidrogênio como oxidante e um sistema para produção de cavitação. Durante o processo de cavitação a água é decomposta em átomos

extremamente reativos de hidrogênio e radicais OH. A água contaminada de impurezas orgânicas é bombeada através de uma câmara de cavitação e a luz ultravioleta é produzida por lâmpadas de vapor de mercúrio. O sistema mostra-se extremamente eficiente. Máquinas para a produção de cavitação por meio de ultra-som são disponíveis comercialmente, inclusive de pequeno porte para aplicação doméstica.

A presença de fase gasosa no escoamento líquido implica em restrição ao escoamento, causando considerável perda de carga, sensível diminuição da vazão e pulsações de pressão indesejáveis no escoamento. Uma parte significativa da energia gasta pelas bombas é irreversivelmente perdida, aumentando sobremaneira os custos de bombeamento e dificultando o controle de vazão.

A presença de fase gasosa também interfere diretamente no funcionamento de alguns tipos de medidores de vazão como placas de orifício, medidores de turbinas, fio quente industriais e venturis. Também, a formação e o desprendimento das bolhas de vapor alteram as propriedades médias do líquido, dificultando o perfeito funcionamento da instrumentação, Delmée (1983). Alguns tipos de instrumentações para medidas de vazões implicam na presença de uma sonda composta de um obstáculo rígido imerso no escoamento, como os medidores de vazão a efeito vórtice (*vortex meter*) e os anemômetros de filme quente com sondas protegidas para aplicações industriais. Quando a velocidade do líquido for alta o suficiente, cavitação pode ocorrer na presença da sonda e os resultados obtidos da medição podem não apresentar consistência física - Goldstein (1983).

Para análise, tendo em vista a predição da ocorrência, ou não, de cavitação, pode-se consultar Gikas (1986). O estudo do fenômeno, bem como sua identificação, representa um alto grau de complexidade, ainda não completamente estabelecido, por vários fatores, tais como a não existência de uma metodologia garantida para a avaliação do fenômeno; as restrições de acesso físico a muitos equipamentos em operação, que dificulta a observação do fenômeno e finalmente, o grande número de variáveis físicas que influenciam diretamente e de forma dinâmica o fenômeno – Tillmann *et al.* (1998).

O elevado nível de ruído produzido caracteristicamente pela cavitação em ampla escala de frequências e as acentuadas vibrações decorrentes produzem rupturas das tubulações e em suas junções, devido principalmente à fadiga dos materiais. As vibrações produzidas podem implicar em grandes amplitudes de oscilação e, em alguns casos, partes das instalações se soltam de suas bases e fixações, produzindo efeitos danosos, praticamente impedindo sua operação, Sissom & Pitts (1988). A contabilização dos prejuízos não deve ficar apenas na soma da mão de

obra e dos materiais de reposição despendidos, mas também, devem-se acrescentar as perdas decorrentes de manter uma máquina, ou instalação completa fora de atividade, cessando sua operação.

Bistafa (1994), analisou e discutiu diversas formas de geração de pressões impulsivas quando uma cavidade se colapsa próximo a uma parede, demonstrando experimentalmente que o principal mecanismo de danos se deve à micro-cavidades produzidas pelo jato de líquido, que se colapsam junto à parede devido ao pulso de pressão gerado na fase final de contração da cavidade original. Bazanini e Bistafa (1994) compararam os estudos dos métodos de Ruggeri; Moore (1969), Stahl; Stepanoff (1956); Spraker (1965) e o *Hydraulic Institute* (1983) para o cálculo da correção do NPSH requerido utilizando diferentes fluidos. Em geral, os resultados não apresentaram grande discrepância entre si, porém o método que mais se aproximou dos resultados experimentais foi o de Stepanoff (1961), talvez porque este método seja próprio às bombas centrífugas e resulta de dados experimentais.

Cavitação provocada por vórtices tipo ferradura na saída de comportas, vertedouros e canais de dissipação provocam manutenções freqüentes nas centrais de geração de energia elétrica, como exposto por Ortiz *et al.* (1998). Neste aspecto, a erosão cavitacional sobre superfícies de concreto em usinas hidroelétricas é um assunto que demanda uma parte considerável da atenção dos projetistas deste tipo de instalação. A publicação de Monteiro (1972) destaca a preocupação dos engenheiros civis com este tipo de problema.

A erosão por cavitação depende de vários parâmetros geométricos, hidrodinâmicos e termodinâmicos, assim como das propriedades do material de construção das peças e do líquido bombeado. Apesar de já existirem milhares de artigos sobre o assunto “cavitação” e da intensa e contínua pesquisa, atualmente nenhum método confiável é conhecido para a previsão da taxa de perda de material devido à cavitação em bombas centrífugas ou em outras máquinas de fluxo.

Pesquisas experimentais para detecção de erosão por cavitação podem ser vistas em diversos trabalhos. Em sua grande maioria, estes ensaios são realizados a temperatura ambiente utilizando um dispositivo vibratório como descrito na Norma ASTM G32 (1986), na qual a freqüência de vibração deve ser mantida constante em 20 KHz e amplitudes de 50 μm .

Cuppari (2002) utilizou um dispositivo vibratório Telsonic SG 1000, com freqüência de 20 KHz, amplitude de 40 μm e temperatura de 20°C, analisando os efeitos da cavitação sobre ligas fundidas baseadas no sistema quaternário Fe-Cr-Ni-C e observou que as ligas estudadas neste trabalho apresentaram um melhor desempenho comparadas à materiais comumente utilizados em situações onde é necessária uma boa resistência à cavitação como o AISI 304.

Comparou também os resultados obtidos experimentalmente com o método dos elementos finitos, revelando-se este, uma ferramenta importante na determinação das tensões e deformações às quais as diferentes fases de uma microestrutura são submetidas na cavitação contribuindo para um melhor entendimento do mecanismo de desgaste.

Pelegriño (2004) também utilizou um dispositivo vibratório Telsonic SG 1000, com frequência de 20 KHz, amplitude de 40 μ m, temperatura de 20°C e água destilada em materiais de ferro fundido vermicular, cujos resultados mostraram que durante o desgaste a grafita é a primeira a ser arrancada, deixando cavidades expostas com cantos vivos que facilitam a posterior remoção de material. As simulações numéricas verificaram, também, a hipótese de que nas extremidades dos veios de grafita, ocorra a maior concentração de tensões. Já Ospina (2004), utilizou o mesmo tipo de equipamento com temperatura da água a 25°C e avaliou os resultados obtidos em aços inoxidáveis UNS 30403 e UNS 31803, concluindo que o controle do teor de nitrogênio, do tamanho de grão e da textura permitiu-se diminuir a taxa de perda de massa em erosão por cavitação em até 20 vezes para o aço duplex e até 8,5 vezes para o aço austenítico, em comparação com os materiais simplesmente solubilizados. Santos (2004) analisou o melhoramento dos aços inoxidáveis por meio de nitretação em altas temperaturas, utilizando um equipamento marca Fisherscope modelo H100, cujo tratamento de nitretação gasosa em alta temperatura melhorou marcadamente a resistência à cavitação. O aumento do teor de nitrogênio aumentou o tempo necessário para o início da deterioração por cavitação e diminuiu a taxa da perda de massa no regime estacionário.

O dispositivo vibratório utilizado nos trabalhos sobre cavitação encontra-se esquematizado na Figura 1.2.

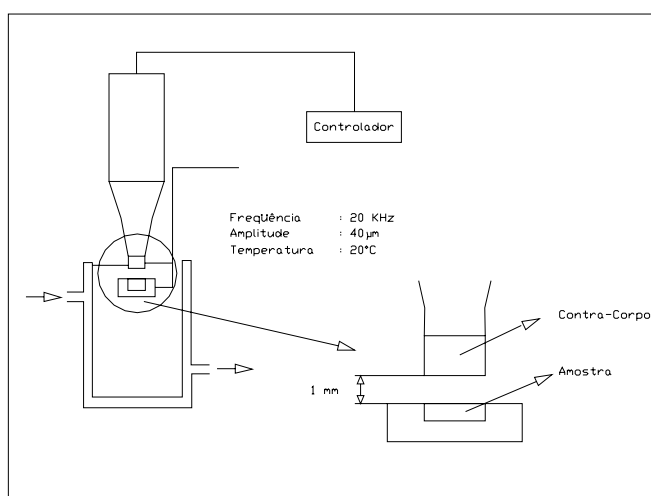


Figura 1.2 – Representação Esquemática do Ensaio de Cavitação Utilizando Dispositivo Vibratório. (Cuppari, 2002)

Com relação a bombas centrífugas, tem-se o trabalho de Martinez (2001) e Santos (2001) onde se construiu uma bancada didática para ensaios de turbo bombas de até 735,5 W de potência podendo-se obter, através desta bancada, a exploração das possibilidades de desempenho do equipamento em função de seus dados operacionais. Esta bancada pode ser levada em sala de aula devido suas reduzidas dimensões.

Assim como no trabalho de Martinez (2001), pode-se obter informações sobre bancadas didáticas de ensaios também em Macintyre (1983) e Carvalho (1982).

Se uma bomba opera sob condições de cavitação por um longo período de tempo, o desgaste resultante pode assumir proporções tais que partículas de metal soltam-se do seu rotor, conforme pode se observar na Figura 1.3. Esse desgaste pode ser determinado com base na redução do peso da peça em um determinado período de tempo, obtendo-se a taxa de perda de metal por cavitação ou taxa de erosão por cavitação.

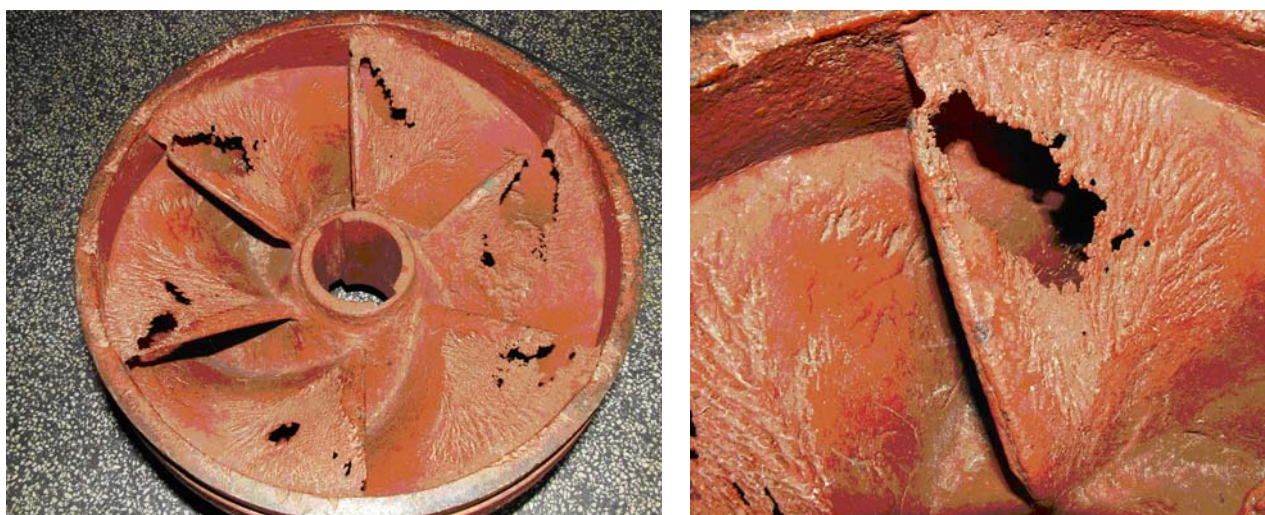


Figura 1.3 – Rotor de bomba centrífuga danificado pela cavitação.

Silva (1998) apresenta uma metodologia alternativa para a realização de ensaios de cavitação em bombas centrífugas de pequena altura total de elevação e um estudo do coeficiente de NPSH e de coeficientes adimensionais. Concluiu-se que 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 conduzindo-se a resultados satisfatórios comparados com catálogos de fabricantes.

Silva (2002) apresentou um trabalho sobre a obtenção das curvas características, no qual cita que estas curvas fornecidas pelos catálogos de fabricantes são corrigidas para uma nova

condição de trabalho de vazão, Q_{n1} , e altura total de elevação, H_{n1} , empregando-se as clássicas expressões dos pontos homólogos:

$$Q_n = Q_{n1} \frac{n}{n_1}, \quad (1.1)$$

$$H_n = H_{n1} \left(\frac{n}{n_1} \right)^2, \quad (1.2)$$

$$P_n = P_{n1} \left(\frac{n}{n_1} \right)^3. \quad (1.3)$$

Aplicando-as a todos os pontos $\{Q_{n1}, H_{n1}\}$, da curva do fabricante na rotação n_1 , determinam-se em seguida os pontos correspondentes $\{Q_n, H_n\}$ da curva n procurada.

Silva (2002) mostrou que o uso das expressões dos pontos homólogos produz bons resultados apenas na determinação das curvas $H(Q)$, principalmente quando o líquido bombeado é a água e que a sua aplicação nas curvas $NPSH(Q)$ fornece apenas uma estimativa grosseira da curva genérica procurada. Uma aparente dificuldade surge quando o projetista necessita da curva $NPSH_n(Q)$ para uma rotação qualquer e consultando-se o fabricante, este provavelmente sugerirá utilizar-se as mesmas expressões dos pontos homólogos mostrada pela Equação (1.2), substituindo-se os termos referentes as alturas (H_n e H_{n1}) pelos termos correspondentes ao $NPSH$, mostrado pela Equação (1.4),

$$NPSH_n = NPSH_{n1} \left(\frac{n}{n_1} \right)^2. \quad (1.4)$$

Este procedimento também é apresentado pelas normas técnicas especializadas, mas é apenas indicado para se efetuar o ajuste das curvas de cavitação padronizadas $NPSH_{n1}(Q)$, compensando as pequenas variações de rotação que ocorrem durante os ensaios de laboratório. Essas variações, porém, são limitadas em 3%, ou seja, o uso das expressões dos pontos homólogos só é permitido se a razão n/n_1 estiver compreendida no intervalo $0,97 < n/n_1 < 1,03$.

Timcke (2001) fez a análise e a comparação das curvas características de dois modelos de bombas padrões (com mesmas dimensões), de cinco fabricantes do parque industrial alemão e concluiu que os desvios mais significativos ocorreram no parâmetro de cavitação e $NPSH$.

Quando o assunto é sobre $NPSH$, o *Hydraulic Institute* (1983) diz que o $NPSH$ requerido ($NPSH_{REQ}$), pode ser obtido para uma queda de 3% do valor da altura manométrica ou no

rendimento da bomba, onde o valor encontrado para o NPSH disponível ($NPSH_{DISP}$) neste ponto é o NPSH com queda de 3% ($NPSH_{REQ(3\%)}$), multiplicado por uma constante adimensional que varia de acordo com a taxa de fluxo, com a velocidade de entrada do líquido no rotor da bomba e a sua energia de sucção. Muitos fabricantes adotam esta constante como sendo 1, mas o *Hydraulic Institute* (1983) afirma que esta constante pode ser de 2 até 20 vezes o valor de $NPSH_{REQ(3\%)}$ para o início da cavitação incipiente.

Gulich (1989) indica que os danos máximos causados em bombas de altas energias de sucção estão muito próximos aos danos causados pelo $NPSH_{REQ(3\%)}$. Em alguns casos de bombas, quando trabalha-se no limite do $NPSH_{REQ(3\%)}$, pode-se estar trabalhando dentro da faixa de cavitação máxima.

Budris & Mayleben (1998) mostram que as pulsações de pressões máximas na sucção geradas pela cavitação, para uma bomba trabalhando com uma taxa de fluxo de 100% da sua vazão nominal ocorrem para um valor de 1,4 do $NPSH_{REQ(3\%)}$. Quando esta mesma bomba trabalha com uma taxa de fluxo de 42%, ocorre o início da recirculação na sucção desta bomba e a margem utilizada para o $NPSH_{REQ}$ passa a ser de 2,3 do valor do $NPSH_{REQ(3\%)}$.

Terry (2001) afirma que este valor pode ir de 2 até 10 quando trabalha-se com uma vazão 20% acima da vazão nominal da bomba.

De acordo com as experiências realizadas pelos membros do *Hydraulic Institute*, desejando-se trabalhar com o equipamento livre de cavitação, na maioria dos casos deve-se trabalhar com uma margem de NPSH com valores entre 4 e 5 vezes maior que o $NPSH_{REQ(3\%)}$.

Por estas razões e dadas as dificuldades de predição da intensidade dos danos causados pela cavitação seu estudo é de grande importância, sendo também exposto em sala de aula como atividade de formação do engenheiro mecânico que deverá projetar, construir e operar tais sistemas.

1.3 – Objetivos

Devido a importância do fenômeno da cavitação, este trabalho tem a finalidade de:

- Analisar o processo de cavitação em bombas centrífugas;
- Verificar quais as consequências provocadas pelo processo de cavitação em todo o sistema;
- Verificar quais os métodos utilizados para amenizar sua ocorrência;
- Obter a curva característica da bomba e comparar com o catálogo do fabricante;

- Obter a curva característica da bomba utilizando a altura lida diretamente dos visores do manômetro e manovacuômetro, H_i ; da altura manométrica H_m ; e da altura manométrica útil, H_u , comparando-se seus resultados;
- Obter o $NPSH_{REQ}(3\%)$ para o equipamento;
- Variar a rotação da bomba, obter os dados e comparar com os dados obtidos da literatura correlata.

1.4 – Desenvolvimento do Trabalho

Esta dissertação é apresentada de uma forma em que se descreve separadamente cada tópico de interesse apresentando-se em seguida os resultados obtidos para cada tópico.

O Capítulo 2 apresenta um estudo geral sobre o fenômeno de cavitação, a descrição de como ocorre o surgimento da cavitação, quais os seus níveis de ocorrência, o parâmetro adimensional quantitativo do fenômeno, suas conseqüências, o que fazer para prevenir sua ocorrência, os tipos de testes existentes para a análise da cavitação e, também, quais os fatores que devem ser levados em conta em estudos de previsão da erosão de um material provocado por cavitação.

O Capítulo 3 mostra detalhadamente a descrição da bancada experimental montada para a realização do ensaio adotado neste projeto, a metodologia, seus principais acessórios, o seu princípio de funcionamento e operação para a obtenção dos dados necessários para análise.

O Capítulo 4 descreve como se procede para se obter os valores da altura manométrica de sistemas de bombeamento dependendo de sua instalação através de parâmetros físicos e termodinâmicos. Mostra-se também neste capítulo como se obter curvas características de uma bomba centrífuga utilizando rotações diferentes, construindo-se os resultados em gráficos correspondentes de vazão (Q) por altura manométrica (H), (Q×H). O estudo deste capítulo divide-se em duas fases com esquemas de obtenção de dados diferenciados. Na primeira fase utiliza-se um manômetro e um manovacuômetro tipo Bourdon, respectivamente, no recalque e na sucção do equipamento, enquanto, na segunda fase, substitui-se o manovacuômetro utilizado na sucção por um manômetro de coluna líquida tipo U, alterando-se também o local de sua instalação e mantendo o manômetro tipo Bourdon no recalque, mas alterando-se sua posição de instalação.

O Capítulo 5 refere-se ao cálculo do NPSH disponível fornecido pela instalação do equipamento em suas diferentes condições de operação. Também neste capítulo, utilizou-se os resultados obtidos nas duas fases citadas no Capítulo 4.

O capítulo 6 refere-se ao $NPSH_{REQ}$ e $NPSH_{REQ}(3\%)$, apresentando-se as normas mais utilizadas e demonstrando-se o procedimento para a obtenção dos dados experimentais. Descrevem-se também os efeitos danosos que a operação de equipamentos trabalhando fora da faixa de vazão nominal pode causar, afetando diretamente nos valores que devem ser adotados como segurança para o $NPSH_{REQ}(3\%)$.

O capítulo 7 conclui o trabalho, comparando-se os resultados obtidos com os resultados de outras pesquisas e com o catálogo do fabricante.

Capítulo 2: Cavitação

Apresenta-se aqui, uma visão geral sobre o fenômeno da cavitação abordando os seus níveis de ocorrência, o parâmetro adimensional quantitativo, suas consequências, a prevenção de sua ocorrência e os tipos de testes existentes para a análise da cavitação.

2.1 – Cavitação

A palavra cavitação deriva do latim *cavus* – cavidade – e significa a formação de bolhas de vapor em um líquido. No deslocamento de pistões, nos “Venturis”, no deslocamento de superfícies constituídas por pás, como sucede em bombas centrífugas, ocorre inevitavelmente uma diminuição na pressão do líquido bombeado, isto é, pressões reduzidas devido à própria natureza do escoamento ou ao movimento do líquido gerado pelas peças móveis.

Se a pressão absoluta no meio líquido baixar até atingir a pressão de vapor do líquido à temperatura em que este se encontra, inicia-se o processo de vaporização do mesmo. A vaporização é o fenômeno onde as substâncias começam a passar do estado líquido para o gasoso dependendo do estado termodinâmico em que se encontram. A temperatura, a uma determinada pressão onde este fenômeno ocorre, é conhecida como ponto de ebulição. Inicialmente, nas regiões de menor pressão, formam-se pequenas bolsas, bolhas ou cavidades, onde o líquido se vaporiza. Em seguida, as bolhas de vapor são conduzidas pelo fluxo líquido, provocado pelo elemento propulsor, atingindo regiões de pressão mais elevada, onde se processa o seu colapso, com a condensação, passagem de uma substância da fase vapor para a fase líquida, e o retorno ao estado líquido.

Quando a pressão atuante no líquido se torna maior que a pressão interna da bolha de vapor, devido à mudança de fase, as dimensões da mesma se reduzem bruscamente, ocorrendo o seu colapso e provocando o deslocamento do líquido circundante para seu interior.

Nem todas as bolhas de vapor que surgem no processo de vaporização conseguem liberar energia suficiente para voltar ao seu estado original líquido, após a condensação, e seguem o líquido pelo sistema.

As porções de líquido formadas pela condensação se chocam muito rapidamente umas de encontro às outras e de encontro às superfícies próximas que impedem seu deslocamento, como pode-se observar na Figura 2.1.

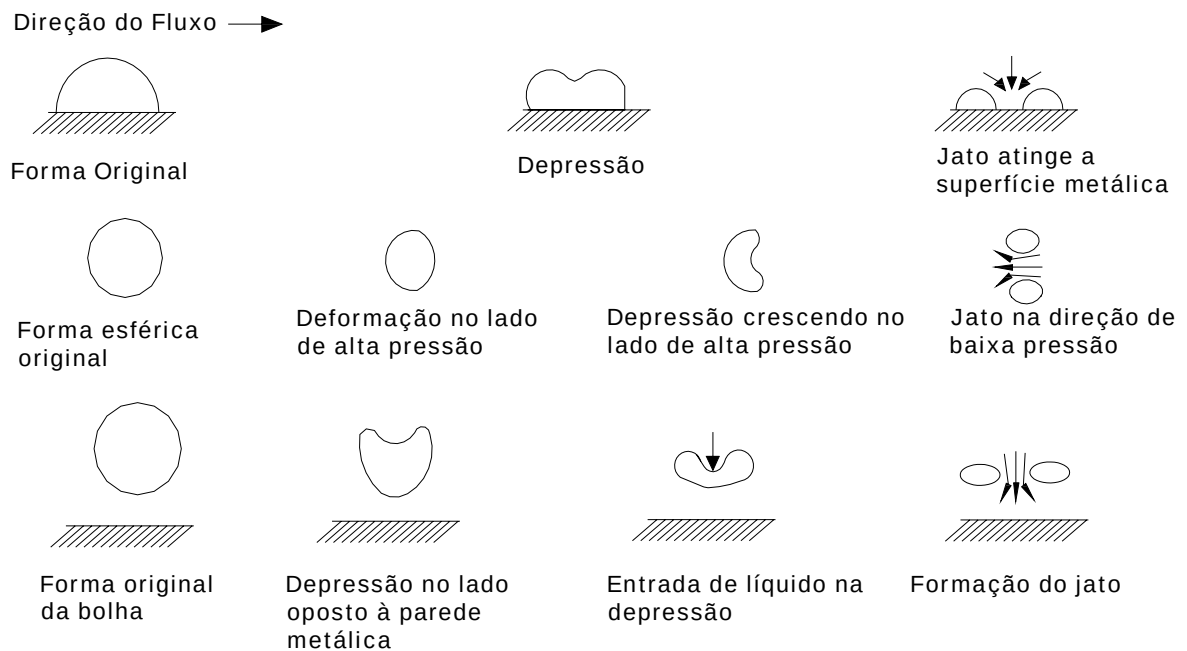


Figura 2.1 - Colapso de bolha em três situações características (Grein & Wyss, 1974).

As superfícies metálicas onde se chocam as pequenas porções de líquido resultantes da condensação são submetidas a atuação de forças complexas, oriundas da energia liberada dessas partículas, desagregando elementos de material de menor coesão, formando pequenos depressões. O prosseguimento desse fenômeno estabelece um aspecto esponjoso, rendilhado e corroído à superfície. É a erosão por cavitação. O desgaste pode assumir proporções tais que pedaços de material podem soltar-se das peças. Cada bolha de vapor assim formada tem um ciclo entre crescimento e colapso, da ordem de poucos milésimos de segundo e induz altíssimas pressões que atingem concentradamente a região afetada. Para se ter idéia desse processo, Grein & Wyss, (1974) e Knapp *et al.*, (1970) mencionam que este ciclo é repetido numa frequência que pode atingir a ordem de 25.000 bolhas por segundo e que a pressão provavelmente transmitida às superfícies metálicas adjacentes ao centro de colapso das bolhas pode atingir 1000 atm.

Um outro aspecto que merece atenção é que, tendo em vista o caráter cíclico do fenômeno, as ações mecânicas repetidas na mesma região metálica ocasionam um aumento local de temperatura de até 800°C.

Pode-se dividir a intensidade da cavitação em até quatro níveis distintos, variando de um estado do escoamento sem a ocorrência do fenômeno, até um nível da mais alta intensidade de cavitação. De acordo com Ball *et al.* (1975) estes níveis são:

- a) Cavitação incipiente: representa o início da cavitação quando seus primeiros efeitos tornam-se perceptíveis. Os ruídos são leves e intermitentes. Em muitos casos as vibrações decorrentes deste nível são muito leves e não produzem maiores efeitos ao funcionamento do sistema hidromecânico;
- b) Cavitação crítica: para este nível da cavitação os efeitos são caracterizados por seu regime constante com a produção de ruído contínuo semelhante a um chiado de toucinho fritando (*frying bacon noise*). Os efeitos prejudiciais da operação sob este nível de cavitação somente são observados para longos períodos de tempo de exposição. As vibrações são razoáveis, mas o nível de ruído aceitável para um serviço contínuo;
- c) Cavitação com perigo incipiente: neste nível, as implosões das cavidades de vapor produzem ruídos relativamente altos, mas tolerável nível de vibrações, entretanto produzindo pequenos danos físicos. No caso de superfícies irregulares ou rugosas, os níveis de perigo incipiente e crítico podem ser confundidos, como ocorre, em muitos casos, no escoamento no interior de válvulas de controle de vazão;
- d) Cavitação plenamente estabelecida: nesta condição, a pressão média imediatamente a jusante da região em análise, alcança valores da pressão de vapor do líquido. O escoamento é acompanhado de um nível excessivo de ruído e vibrações. Não sendo possível evitar a cavitação deste nível, deve-se utilizar um cuidadoso e elaborado procedimento ao operar sistemas nestas condições.

O estabelecimento destes níveis para cada caso específico deve ser acompanhado de longos e exaustivos testes experimentais. O estabelecimento dos níveis de cavitação para diferentes geometrias analisadas (bombas, válvulas, tubulações), onde ocorre o fenômeno de cavitação, e para cada diferente regime de escoamento somente é possível após a observação de ensaios experimentais. É importante ressaltar que na cavitação os efeitos de escala exercem influência importante, o que representa um grande transtorno para os ensaios experimentais.

2.2 – Cavitação Pulsante

Nos estudos sobre cavitação, Grist (1998) destaca como a cavitação pulsante em equipamentos pode alterar seu comportamento.

Para baixas vazões, com valores tipicamente abaixo de aproximadamente 50% da vazão nominal, o desalinhamento angular entre a trajetória do líquido que chega na entrada da bomba e

as pás do rotor é significativo. Isto é usualmente mais localizado na borda principal das pás do rotor próximas do diâmetro mais externo da aresta de sucção. Em muitos rotores uma recirculação desenvolve-se na região de baixa pressão, atrás de cada pá, tornando possível ao escoamento retornar ao tubo de entrada, na sua região de diâmetro mais externo, próximo à sua parede. Esta recirculação torna-se progressivamente mais forte à medida que a vazão é reduzida. Quando a pressão cai atrás da pá e, simultaneamente, a pressão na região de sucção é suficientemente baixa, então ocorre a cavitação.

A cavitação é normalmente suprimida em milissegundos quando entra em uma região com gradiente de pressão fortemente crescente, para escoamentos através dos canais formados pelas pás em condições próximas de sua melhor eficiência. Quando ocorre recirculação e escoamento reverso na tubulação próxima à sucção da bomba as bolhas de vapor encontram-se em um gradiente de pressão de pouca intensidade. Seu crescimento e colapso demora relativamente muito mais a ocorrer, e isto permite que se propaguem distâncias consideráveis de volta no tubo de sucção. Para vazões muito baixas e com uma configuração reta da tubulação de sucção o espiralamento da parte externa do líquido com bolhas pode deslocar-se à distância equivalente a vários diâmetros da tubulação, contrariamente à direção geral do escoamento, antes de retornar ao rotor. Um exemplo disto é mostrado na Figura 2.2.

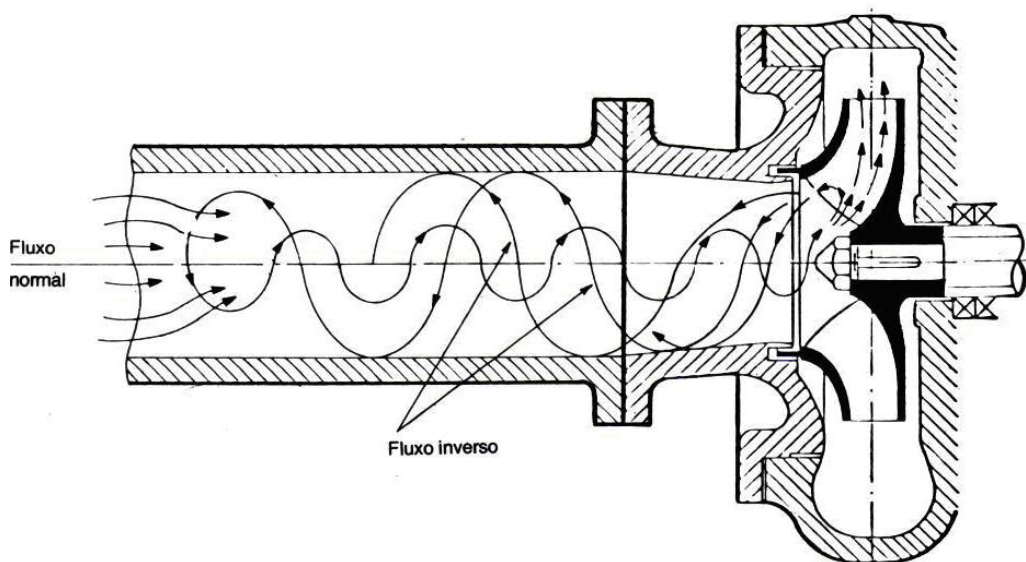


Figura 2.2 – Fluxo em sentido inverso na entrada de sucção para vazões bem inferiores à de projeto. (Mattos e Falco, 1998).

A produção de vapor na superfície da pá do rotor é descontinuada pelo escoamento de retorno da recirculação de bolhas de vapor carregadas pelo líquido. No todo, o processo torna-se instável. Um movimento periódico pulsante se estabelece e é predominantemente dependente da

freqüência de recirculação do líquido. Tipicamente, esta pulsação tem uma freqüência de 2 a 10 Hz.

Em toda a região onde existem baixos gradientes de pressão, na tubulação de entrada, esta cavitação pulsante pode persistir. Esta pulsação pode se propagar ao longo dos canais do rotor e chegar até a região de saída da bomba, para equipamentos que produzam, relativamente, pequenos incrementos de pressão entre sua saída e entrada, notadamente em canais indutores ou bombas axiais. Nos rotores de bombas centrífugas o escoamento do líquido que entra na região de alta pressão está desprovido de bolhas de vapor, as quais apareceram, cresceram e se colapsaram, em grande quantidade, anteriormente, na região de baixos gradientes de pressão e de baixa pressão.

Devido à grande produção de bolhas de vapor, em determinados momentos, da cavitação pulsante, o fluxo de massa torna-se muito pequeno. Isto provoca a interrupção momentânea do processo em andamento. Quando as bolhas de vapor entram em colapso o fluxo de massa é restabelecido, e assim sucessivamente, causando um escoamento de massa transitório ao longo do tempo.

Este fenômeno, indesejável porque fisicamente destrutivo e economicamente ruinoso, pode ser denominado como “colapso do fluxo de massa”.

Experimentos mostram que a intensidade da cavitação pulsante varia consideravelmente para diferentes tipos de rotores e diferentes configurações de tubulações de sucção. As pulsações de pressão resultantes das pulsações do escoamento produzem frequentemente vibrações intensas nas tubulações.

As variações abruptas no empuxo axial e no carregamento de torção no rotor da bomba, freqüentemente leva-se à falha do rolamento e ocasionalmente à ruptura do eixo.

É importante notar que esta forma de cavitação pulsante é: a) independente do projeto da instalação global, exceto a tubulação de sucção imediatamente anterior à entrada da bomba e b) é mais facilmente propagada nos casos em que o rotor e a tubulação de sucção permitem movimentos axialmente simétricos.

2.3 – Número de Thoma

O parâmetro de avaliação dos efeitos da cavitação mais tradicional é denominado de número de Thoma (σ), ou também conhecido como coeficiente de cavitação, que é o parâmetro adimensional quantitativo do fenômeno.

O número de Thoma mede a resistência do escoamento à ocorrência da cavitação. Quanto maior for (σ) menor será a possibilidade da ocorrência da cavitação. Se o número de Thoma diminui por decréscimo da pressão estática ou por aumento da velocidade do escoamento, o fenômeno passa a ter uma maior probabilidade de ocorrência.

O número de Thoma pode ser obtido para bombas centrífugas em função da rotação específica (n_q), que pode ser obtida utilizando a Equação (2.1),

$$n_q = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (2.1)$$

ou

$$n_q = \frac{30\omega\sqrt{Q}}{\pi H^{\frac{3}{4}}}, \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad n \text{ em rpm.} \quad (2.2)$$

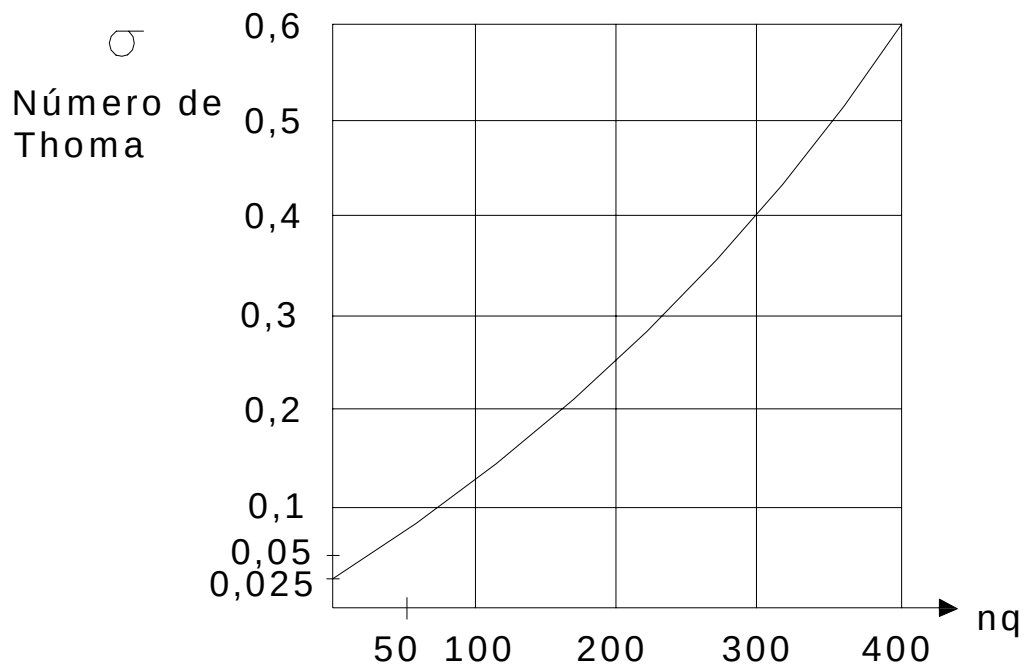


Figura 2.3 – Curva do Fator de Thoma (σ) × Velocidade Específica (n_q) (Mattos e Falco, 1998).

De acordo com Macintyre (1983), o fator de cavitação depende da velocidade específica da bomba e pode ser calculado utilizando a Equação (2.3), que foi determinada após um grande número de ensaios em bombas de projetos convencionais,

$$\sigma = \varphi \times n_q^{\frac{4}{3}} \quad (2.3)$$

A equação (2.3) pode ainda ser reescrita nas seguintes formas:

$$\sigma = \varphi \left(\frac{nQ^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.4)$$

ou

$$\sigma = \varphi \left(\frac{30\omega Q^{\frac{1}{2}}}{\pi H^{\frac{3}{4}}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.5)$$

onde,

$\varphi = 0,0011$ - para bombas centrífugas radiais, lentas e normais;

$\varphi = 0,0013$ - para bombas helicoidais e hélico-axiais;

$\varphi = 0,00145$ - para bombas axiais.

Para as Equações (2.4) e (2.5), se o rotor for de dupla sucção, usa-se $Q/2$, e se a bomba tiver vários estágios usa-se $H(\text{altura manométrica}) / (\text{n}^\circ \text{ de estágios})$.

Este método não é utilizado na prática, pois obtém-se apenas um valor de referência para o $NPSH_{REQ}$. Consultando-se o fabricante da bomba pode-se obter indicações precisas do $NPSH_{REQ}$.

Por definição, em muitas teorias, o número de Thoma é dado por

$$\sigma = \frac{NPSH_{REQ}}{H}. \quad (2.6)$$

2.4 – Conseqüências da Cavitação

Os efeitos da cavitação dependem do tempo a que o equipamento estará sob o efeito do fenômeno, da intensidade da cavitação, das propriedades do líquido e da resistência do material à erosão por cavitação. A cavitação causa ruído, vibração, alteração das curvas características e danificação ou “pitting” do material.

O ruído e a vibração são provocados principalmente pela instabilidade gerada pelo colapso das bolhas.

A alteração nas curvas características e, conseqüente, alteração no desempenho da bomba é devido à diferença de volume específico entre o líquido e o vapor, bem como à turbulência gerada pelo fenômeno. Esta alteração nas curvas é mais drástica no caso de bombas centrífugas,

pois neste caso, tendo em vista que o canal de passagem do líquido é restrito, a presença de bolhas influencia consideravelmente o desempenho do equipamento.

A danificação do material em uma bomba centrífuga geralmente ocorre no rotor, podendo também ocorrer nos corpos das bombas ou difusores. Geralmente, a região danificada no rotor esta situada na parte frontal da pá, caso a condição de operação esteja à esquerda da vazão correspondente ao ponto de melhor rendimento ou na parte traseira, caso esteja situado à direita. Deve-se ressaltar que a erosão por cavitação não ocorre no lugar onde as bolhas se formam, mas sim no local onde implodem.

O limite permissível para a cavitação em bombas centrífugas depende de diversos fatores, tais como:

- condições operacionais (temperatura do líquido, vazão, pressão);
- líquido bombeado;
- material do rotor e de outras peças internas;
- tempo durante o qual a bomba é operada em cavitação.

Os seguintes critérios para esse limite podem ser considerados:

- a) Início da cavitação, isto é, aparecimento das primeiras bolhas de vapor, que pode ser determinado visualmente ou com dispositivos de detecção acústica;
- b) Redução da altura de elevação da bomba em comparação com a operação isenta de cavitação, para a mesma vazão. Normalmente, indica-se essa redução em porcentagem da altura de elevação nas bombas de vários estágios em porcentagem da altura do primeiro estágio;
- c) Redução do rendimento em comparação com a operação isenta de cavitação, para a mesma vazão bombeada;
- d) Ruídos ou modificações do ruído em comparação com a operação isenta de cavitação, para a mesma vazão bombeada. Esses ruídos devem ser avaliados através de medições com instrumentos apropriados;
- e) Aumento do nível de vibração da bomba em comparação com a operação isenta de cavitação, para a mesma vazão bombeada;
- f) Desgaste nas peças internas da bomba, principalmente no rotor, devido à sua operação por tempo prolongado na condição de cavitação. Esse desgaste pode ser determinado com base na redução do peso da peça, obtendo-se a taxa de erosão por cavitação.

2.5 – Prevenção da Cavitação em Bombas Centrífugas

A cavitação ocorrerá em uma bomba centrífuga se a pressão na sucção cair ao nível da pressão de vapor do líquido bombeado ou abaixo dela. Formam-se bolhas de vapor, que são transportadas pelo fluxo e implodem quando a pressão torna a aumentar em alguma região à jusante no canal entre as pás do rotor. Logo, as regiões mais perigosas relativamente à cavitação na sucção de uma bomba centrífuga, são aquelas onde as pressões são baixas. Conforme será visto a seguir, essas regiões encontram-se nos canais do rotor, próximas da aresta de entrada das pás, conforme mostrado na Figura 2.4.

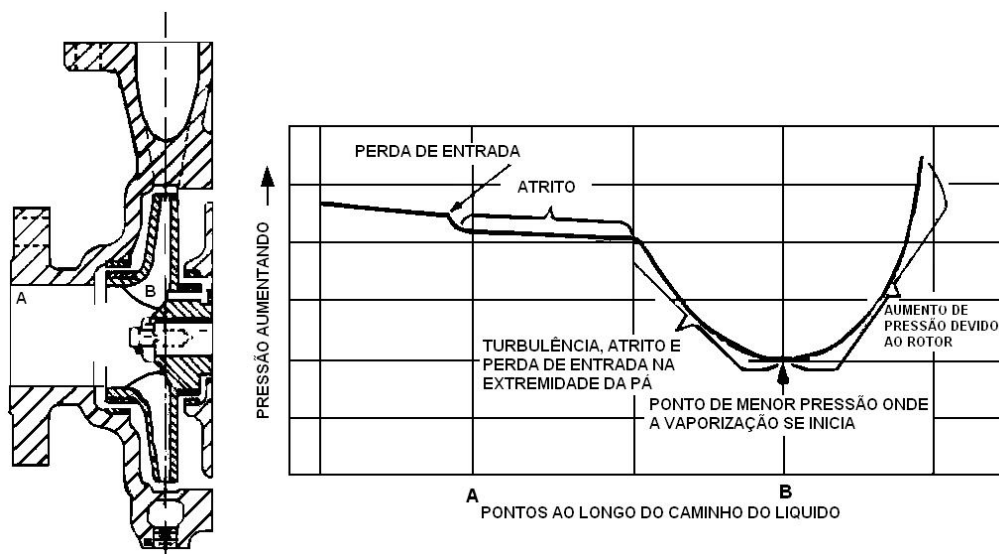


Figura 2.4 - Perda de pressão no bocal de sucção e na entrada do rotor de uma bomba centrífuga. (McNulty & Pearsal, 1982).

Para assegurar o bombeamento de líquidos sem que ocorra cavitação, deve sempre existir suficiente energia disponível no flange de sucção da bomba, de forma que o líquido consiga atingir as pás do rotor, após ter vencido as perdas entre o flange e as pás, sem se vaporizar. Já dentro do rotor, o líquido receberá energia das pás e sua pressão aumentará. Desta maneira, previne-se que o equipamento opere com cavitação.

2.6 – Tipos de Testes para Análise do Fenômeno de Cavitação

O teste de cavitação tem por finalidade a determinação do $NPSH_{REQ}$ para uma vazão pré-determinada, que normalmente é a vazão garantida ou de operação normal. Naturalmente, o teste pode ser repetido para outras vazões, podendo ser levantada a curva de teste de $NPSH_{REQ} \times Vazão(Q)$. A determinação do $NPSH_{REQ}$ é usualmente realizada de forma indireta,

induzindo a bomba à cavitação e computando-se o $NPSH_{DISP}$ que, no início da cavitação, coincide com o valor do $NPSH_{REQ}$.

Se no contrato de fornecimento do equipamento pelo fabricante ao cliente final for garantido o $NPSH_{REQ}$, esta garantia pode ser comprovada com um teste.

Em nenhum caso os testes de cavitação servem para comprovar que a bomba não sofrerá desgaste resultante de cavitação em todo o tempo de operação.

Existem dois tipos de testes de cavitação:

- a) teste que indicará apenas que a bomba está isenta de cavitação num grau suficiente, em relação aos dados operacionais objeto do acordo entre fabricante e cliente e, ao valor de $NPSH_{REQ}$ garantido;
- b) teste em que o valor $NPSH_{DISP}$ diminui até que os efeitos da cavitação na curva característica da bomba possam ser medidos.

O *Hydraulic Institute* (1982) propõe três tipos de arranjos para os testes de cavitação que podem ser efetuados com uma das aplicações apresentadas a seguir:

- a) A cavitação é induzida mediante a diminuição do nível de líquido e, conseqüente diminuição do $NPSH_{DISP}$, conforme mostrado na Figura 2.5;

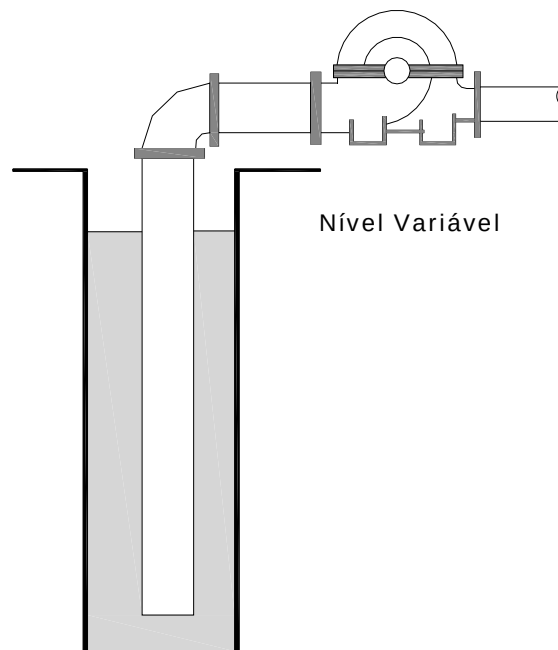


Figura 2.5 – Variação do $NPSH_{DISP}$ através da modificação do nível de líquido do reservatório de sucção (Mattos e Falco, 1998).

b) A cavitação é induzida mediante o fechamento da sucção, provocando um aumento das perdas de carga na sucção, e conseqüentemente, uma diminuição do $NPSH_{DISP}$. Neste caso, as pás ou chicanas colocadas após o filtro objetivam atenuar a turbulência gerada pelo fechamento. Considerando que a turbulência acelera a liberação de ar ou gases dissolvidos, este arranjo é conservador, sendo recomendado pelo *Hydraulic Institute* (1982) para moderadas alturas negativas de sucção e pequenas bombas. O esquema da Figura 2.6 apresenta a concepção da bancada experimental para este tipo de teste. Esta configuração será utilizada no presente trabalho;

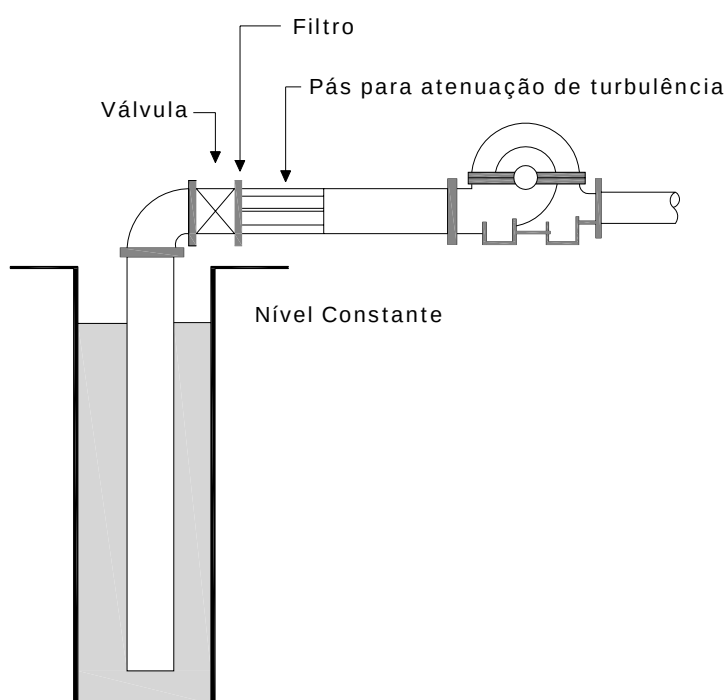


Figura 2.6 - Variação do $NPSH_{DISP}$ através do fechamento na sucção (Mattos e Falco, 1998).

c) A bomba é alimentada de um vaso fechado e o nível é mantido constante, conforme mostrado na Figura 2.7. Neste caso, o $NPSH_{DISP}$ é modificado mediante a variação da pressão de ar ou gás sobre o líquido, pela variação da temperatura de bombeamento ou por uma combinação destes fatores. O *Hydraulic Institute* (1982) recomenda particularmente este arranjo quando a temperatura de teste é a mesma da temperatura de operação ou quando a bomba succiona líquido de um vaso sujeito à pressão igual ou próxima da pressão de vapor. É possível variar os parâmetros e manter a vazão bombeada constante durante o teste.

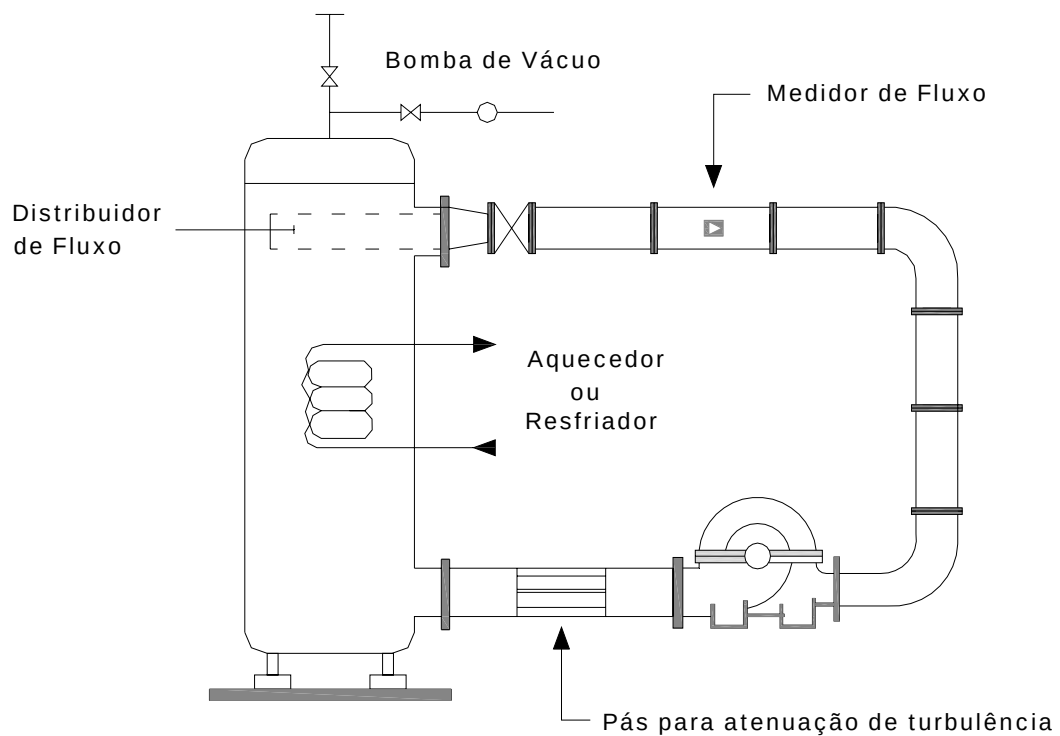


Figura 2.7 - Variação do $NPSH_{DISP}$ por modificação de pressão e/ou temperatura (Mattos e Falco, 1998).

2.7 - Fatores que devem ser levados em conta em estudos de previsão da taxa de erosão por cavitação

Pesquisas experimentais realizadas por Vlaming (1981), Karassik (1988), Gulich e Rosch (1988), Taylor (1977) e Grist (1974), determinaram quais os fatores de maior importância nos estudos de previsão da taxa de erosão, sendo estes:

a) Pressão disponível para implosão

A intensidade da erosão nas pás de um rotor é decisivamente influenciada pelo gradiente de pressão local na região de implosão das bolhas. Assim, em uma bomba com elevado valor de altura manométrica por estágio ($H/\text{estágio}$), a cavitação causa uma maior taxa de erosão do que em uma bomba com pequena altura manométrica por estágio ($H/\text{estágio}$). Também, verifica-se experimentalmente que a taxa de erosão para cavitação na face de pressão da pá é em torno de cinquenta vezes a que ocorre para cavitação na face de sucção;

b) Resistência à Cavitação do Material

O mecanismo preciso do dano de um material sob tensionamento por cavitação, que consiste de pulsos de tensão mecânica de alta frequência e de duração muito curta, ainda não é suficientemente entendido. Usando características dos materiais bem conhecidas tais como a dureza e a tensão admissível, a resistência à cavitação pode ser descrita somente com modesta precisão, por causa da grande dispersão dos valores obtidos.

Materiais diferentes têm resistência à erosão por cavitação também diferente, sendo que esta resistência não é somente função da composição química do material, mas também do processo mecânico e térmico de sua fabricação. Sabe-se que o aumento da dureza da superfície diminui a taxa de erosão, embora somente essa característica não seja um fator determinante da resistência do material à cavitação. Também, já foi confirmada a necessidade de um bom acabamento superficial para que o material tenha uma boa resistência à cavitação;

c) Extensão da Cavitação

O perigo da erosão por cavitação torna-se crítico quando o volume de bolhas de vapor aumenta e, conseqüentemente, a extensão da cavitação sobre as pás do rotor aumenta, pois, mais bolhas implodirão junto à parede em um determinado intervalo de tempo. Alguns autores chamam essa extensão de “comprimento da cavidade”, onde a palavra cavidade representa a nuvem de bolhas de vapor.

Se um teste de cavitação com vazão e velocidade de rotação constantes partir da condição de cavitação incipiente e diminuir o valor do $NPSH_{DISP}$ da instalação, causando um aumento do volume de bolhas de vapor geradas, ocorrerá o início do processo de erosão por cavitação. Diminuições adicionais do $NPSH_{DISP}$ aumentarão a taxa de erosão até ela atingir um ponto de intensidade máxima, que é anterior ao ponto de deterioração total do desempenho da bomba. Com posteriores diminuições do $NPSH_{DISP}$, a taxa de erosão diminui e isto provavelmente ocorre porque, nesta condição, existe nos canais do rotor grande quantidade de mistura “vapor e líquido” altamente compressível, que causa um efeito de amortecimento dos choques de condensação das bolhas. As Figuras 2.8 e 2.9 ilustram tais efeitos;

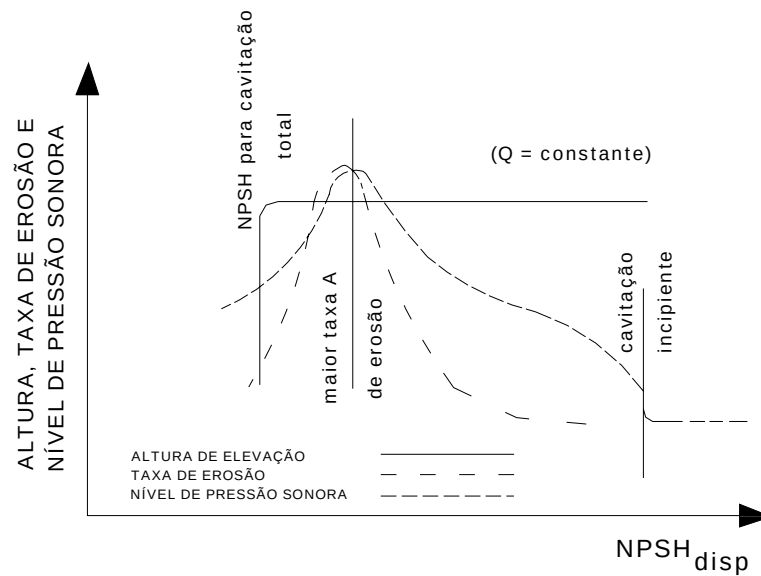


Figura 2.8 - Variação da altura de elevação, da taxa de erosão por cavitação e do nível de pressão sonora em função do NPSH disponível (Grist, 1974).

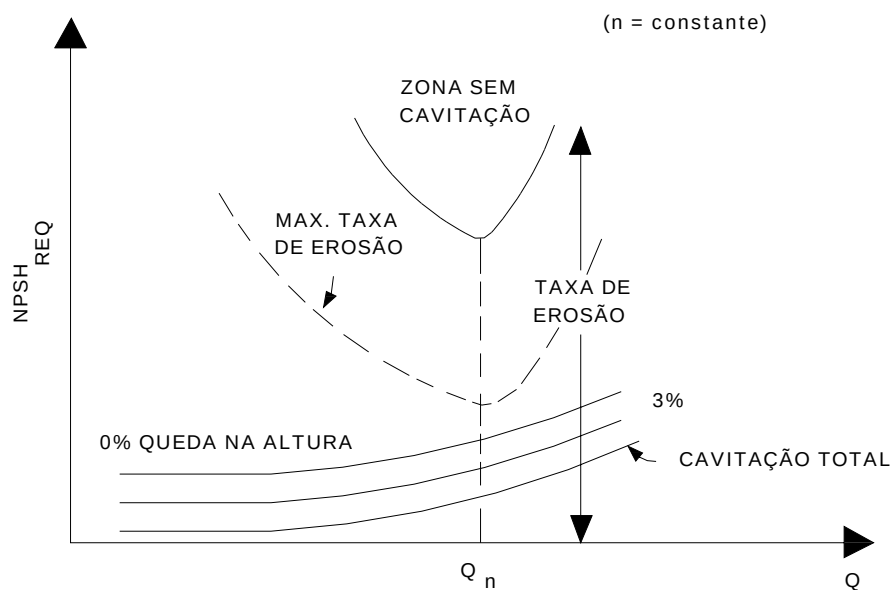


Figura 2.9 - Limites da zona de erosão por cavitação (Grist, 1974).

d) Pressão de Implosão

Esta pressão é gerada em consequência da implosão de bolhas de vapor individuais. Ela é responsável pela energia dos choques de condensação das bolhas e, portanto, quanto maior a pressão da implosão maior será a taxa de erosão por cavitação.

A pressão da implosão depende de diversos fatores, entre os quais, o mais importante é a relação entre o raio da bolha de vapor antes e depois da implosão. Quanto maior for essa relação maior será a pressão da implosão.

O raio inicial da bolha é função de diversos parâmetros hidrodinâmicos e termodinâmicos, que determinam o seu crescimento pela passagem na região de baixa pressão. Verifica-se, experimentalmente, que o tamanho das bolhas antes da implosão é fortemente influenciado pela velocidade de rotação, pelo tamanho da bomba, pela temperatura e pelas propriedades termodinâmicas do líquido bombeado e que o potencial destrutivo da implosão pode ser diminuído ou mesmo anulado se a quantidade de gás existente na bolha aumentar.

Isto é consequência da diminuição da pressão da implosão com o aumento do raio final da bolha e também devido ao amortecimento parcial dos choques de condensação pelo gás ou gases não condensáveis existentes ao final da implosão. Logo, a taxa de erosão por cavitação é grandemente influenciada pelo teor de gases – o mais comum é o ar – existente no líquido bombeado. O raio final da bolha será tanto maior quanto maior for o conteúdo de gás em seu interior;

e) Corrosão Provocada pelo Líquido Bombeado

A taxa de erosão por cavitação pode aumentar por efeito de corrosão química simultânea, se o líquido bombeado possuir alguma afinidade química com o material do rotor.

Capítulo 3: Metodologia

3.1 – Metodologia

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada nesta pesquisa e a justificativa para a instalação dos equipamentos e sua operação.

3.2 – Instalação Experimental

No presente trabalho, uma bomba centrífuga foi instalada em uma bancada para obtenção da curva característica, do $NPSH_{REQ}$ e $NPSH_{DISP}$. Os resultados são comparados com as curvas obtidas através das equações dos pontos homólogos. A representação esquemática da bancada pode ser vista na Figura 3.1.

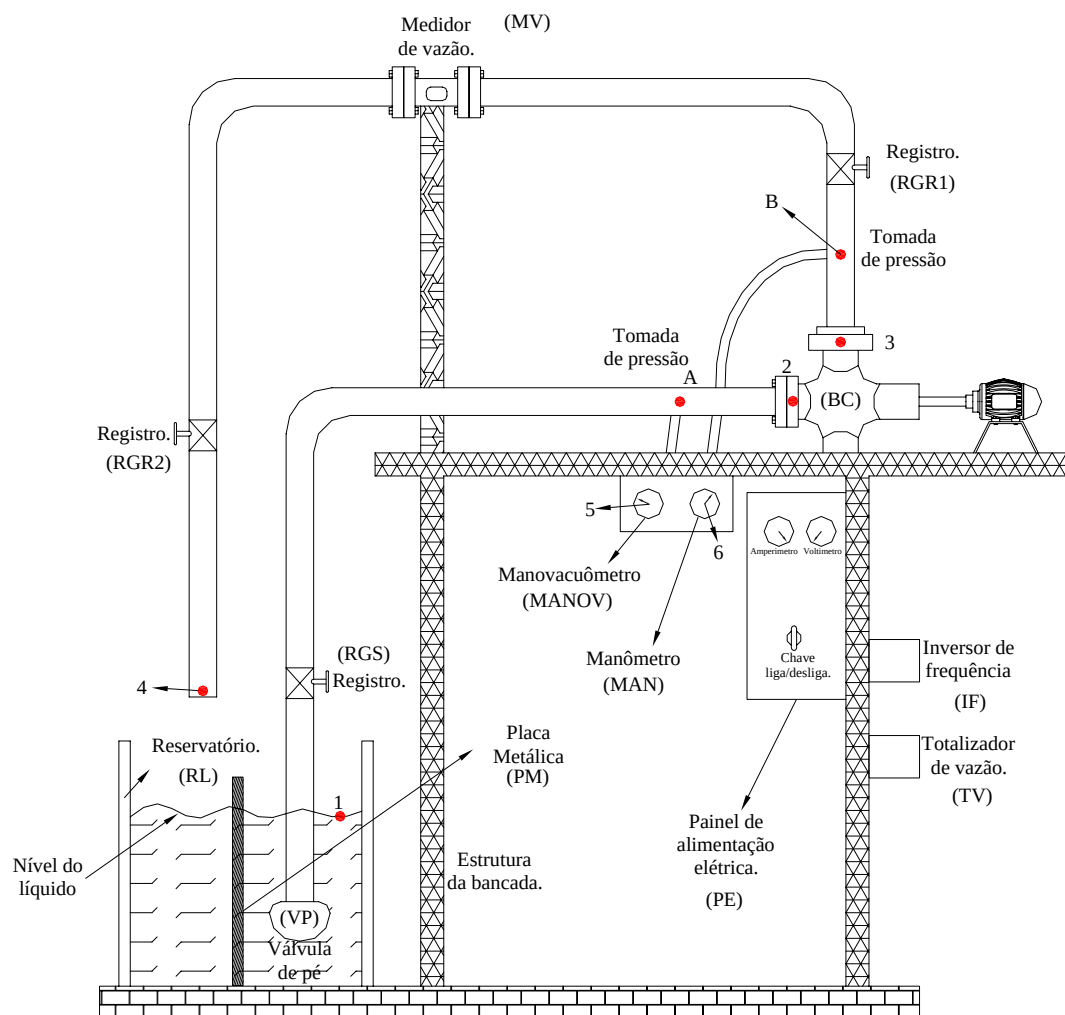


Figura 3.1 – Esquema geral da bancada.

Na bancada, utilizou-se um reservatório para o armazenamento do líquido a ser bombeado, RL, uma bomba centrífuga, BC, utilizada para o bombeamento do líquido, um registro gaveta, RGS, instalado na tubulação de sucção para estrangular o fluxo de líquido a ser bombeado, aumentando a perda de carga e, conseqüentemente diminuindo o $NPSH_{DISP}$, dois registros gaveta, RGR1 e RGR2, na tubulação de recalque para controle do fluxo bombeado e obtenção da curva característica, um medidor de vazão eletromagnético, MV, instalado na tubulação de recalque para a obtenção das vazões controladas pelos registros, um manômetro, MAN, instalado na linha de recalque para obtenção de pressão na saída da bomba, um manovacuômetro, MANOV, instalado na tubulação de sucção para obtenção da pressão na entrada da bomba, um painel elétrico, PE, para acionamento da bomba centrífuga, um inversor de frequência, IF, para controle de rotação, uma válvula de pé, VP, utilizada na tubulação de sucção e um totalizador de vazão, TV, para leitura das vazões.

Instalou-se uma placa metálica, PM, dividindo-se o reservatório de sucção pela metade, pois, optou-se por utilizar o mesmo reservatório para sucção e descarga do líquido bombeado, mantendo-se sempre constante seu nível.

Com a instalação da placa metálica evitou-se a geração de turbulência do líquido na metade do reservatório que contém a tubulação de sucção e também a possível entrada de bolhas de ar através da válvula de pé.

A turbulência anteriormente citada é provocada pelo retorno do líquido ao reservatório através da tubulação de recalque, pois o líquido sai da tubulação de recalque e retorna para o mesmo reservatório, agitando o líquido que o recebe, conforme observa-se na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Instalação da placa metálica de separação dos reservatórios de sucção e recalque.

A bancada de testes foi montada no laboratório de máquinas de fluxo da UNESP de Ilha Solteira, conforme observa-se na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Bancada de ensaios.

Os pontos onde foram inseridos os dispositivos para as tomadas de pressões na tubulação de sucção e de recalque são mostrados através das Figuras 3.4 e 3.5, obedecendo-se as Normas, que determinam que a distância das tomadas de pressões com relação à entrada, sucção, e saída, descarga, da bomba, devem ser de duas vezes o diâmetro da tubulação correspondente, caso esta tubulação seja do mesmo diâmetro do bocal de entrada ou saída da bomba e de quatro vezes o diâmetro para casos de tubulações maiores do que o bocal de entrada e saída da bomba.

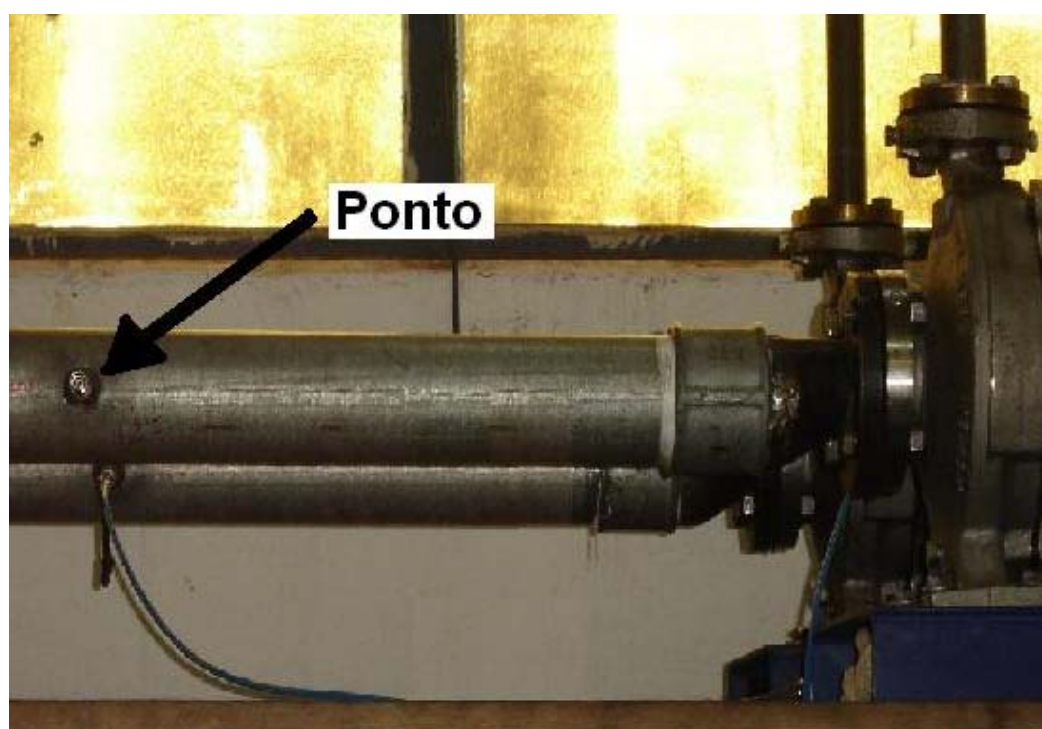


Figura 3.4 – Ponto de tomada de pressão na sucção.

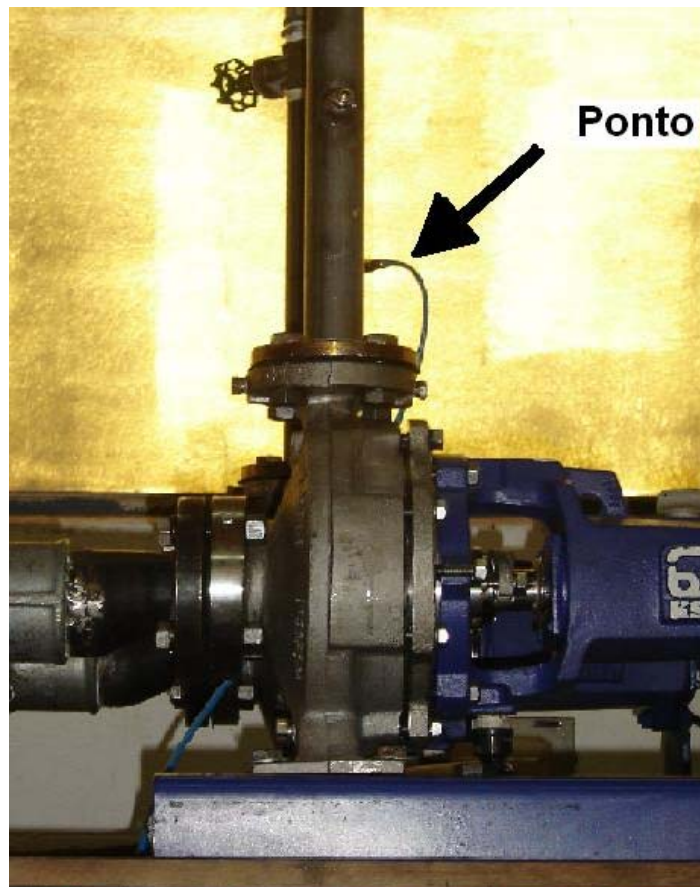


Figura 3.5 – Ponto de tomada de pressão no recalque.

Instalou-se o manômetro e o manovacuômetro no mesmo nível conforme observa-se na Figura 3.6.



Figura 3.6 – Instalação do manômetro e manovacuômetro na mesma linha de centro.

Além do manômetro e do manovacuômetro, instalou-se todos os equipamentos utilizados para obtenção de dados em posições favoráveis para suas respectivas leituras, para diminuir ao máximo os possíveis erros de leituras no momento de aquisição dos dados.

Observa-se o local de instalação do inversor de frequência, do totalizador de vazão e do painel de ligação na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Localização do painel elétrico, do inversor de frequência e do totalizador de vazão.

O registro de gaveta instalado na tubulação de sucção, RGS, tem por finalidade diminuir o valor do $NPSH_{DISP}$ na entrada da bomba, aumentando-se as perdas de carga na tubulação de sucção, através do fechamento do registro. A partir dos valores obtidos para o $NPSH_{DISP}$ e de uma definição específica para o $NPSH_{REQ}$, pode-se obter valores numéricos para esta grandeza, em função de cada vazão e rotação. Este é um dos tipos de ensaios apresentados anteriormente no capítulo 2, para a obtenção do $NPSH_{REQ}$. Os registros foram montados nas posições mostradas na Figura 3.8, considerando-se a facilidade ergonômica de operação do aparato experimental.

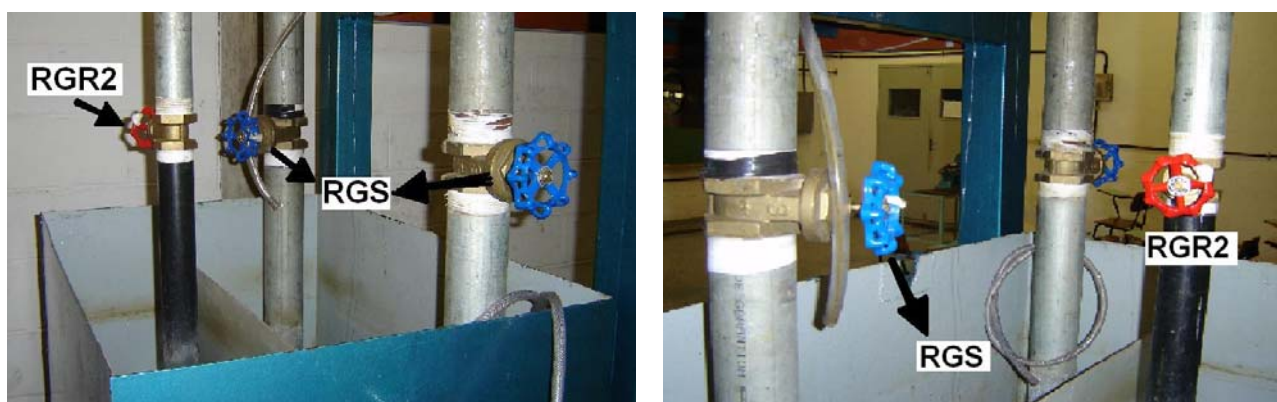


Figura 3.8 – Registros gaveta na sucção, RGS, e recalque, RGR2, instalados próximos ao reservatório de líquido.

Os registros de gaveta instalados na tubulação de recalque, RGR1 e RGR2, têm por finalidade o controle da vazão a ser bombeada para a obtenção da curva característica do equipamento através de seu estrangulamento. O local de instalação do registro RGR2 próximo ao reservatório, também foi escolhido levando-se em conta a sua acessibilidade e proximidade aos registros de sucção, mas com a descarga separada da sucção pela placa metálica, conforme observa-se na Figura 3.9 (a) e 3.9 (b).

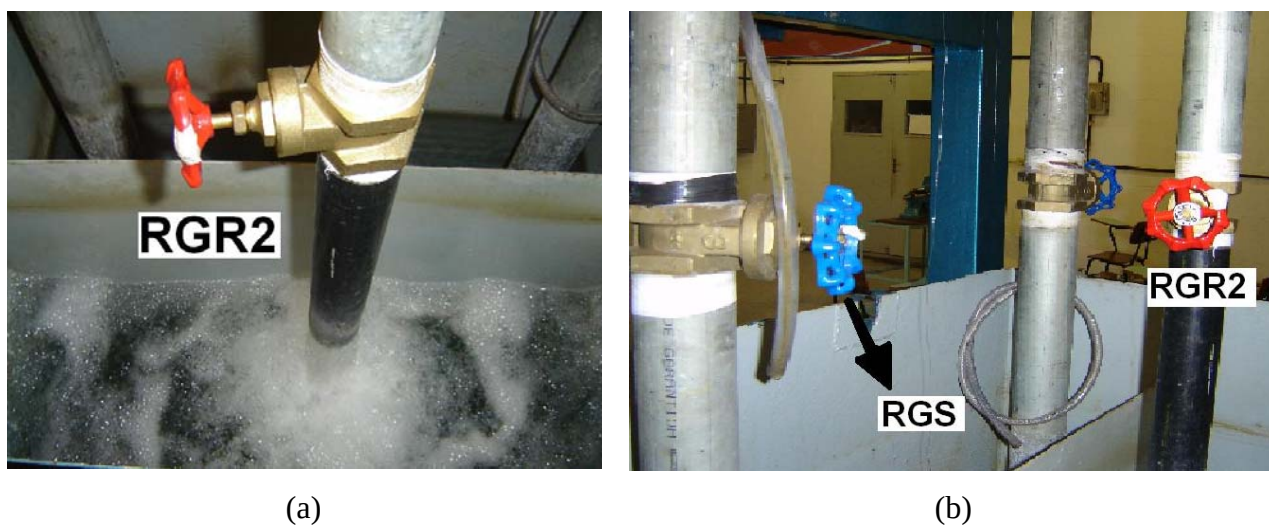


Figura 3.9 – Local de instalação do registro de recalque, RGR2, próximo ao reservatório de líquido.

Os registros de recalque, RGR1, podem ser observados na Figura 3.10.

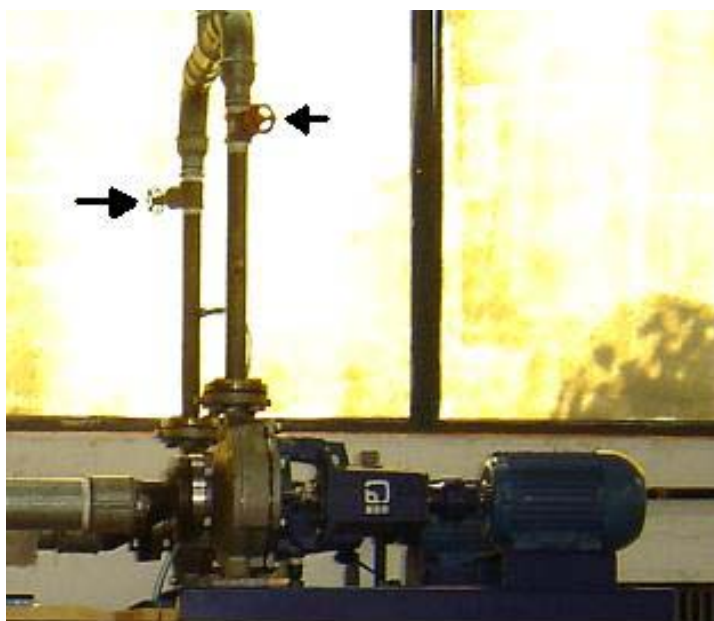


Figura 3.10 – Local de instalação do registro de recalque, RGR1, próximo ao bocal de saída da bomba.

Instalou-se o medidor de vazão na parte superior da tubulação de recalque, conforme observa-se na Figura 3.1 e na Figura 3.11, para a obtenção dos valores de vazão a ser bombeado pela bomba centrífuga. Para a obtenção destes valores, toda a área da tubulação deverá estar preenchida de líquido durante os ensaios. Observa-se em detalhe, Figura 3.11, o medidor de vazão instalado na tubulação.



Figura 3.11 – Local de instalação do medidor de vazão, MV, na tubulação de recalque.

A tubulação utilizada na parte da sucção do equipamento é de aço galvanizado com diâmetro de 3”, para que a velocidade do líquido não ultrapassasse 2 m/s e não interferisse na obtenção dos dados de pressão; velocidade esta considerada como máxima para um bom funcionamento de uma bomba centrífuga e evitando-se assim aumentar as possibilidades de que o equipamento venha à cavitatar durante a obtenção das curvas características de altura manométrica em função da vazão ($H \times Q$), sem cavitação.

A tubulação de recalque utilizada também é de aço galvanizado com diâmetro de 2” por ser esta a bitola correspondente ao medidor de vazão adquirido para o projeto.

3.3 - Operação da Bancada de Testes

O princípio de funcionamento da bancada de testes é simples, no qual a bomba centrífuga succiona o líquido do reservatório, RL, através da tubulação de sucção e o transporta para o local desejado, através da tubulação de recalque. No presente projeto, o líquido retorna ao reservatório inicial.

As alterações possíveis na bancada de testes durante o seu processo de operação, são as modificações da rotação do motor elétrico que aciona a bomba centrífuga e a alteração de suas condições operacionais de vazão e pressão através do estrangulamento dos registros de sucção e recalque dependendo dos resultados que se deseja obter.

3.4 - Acionamento da Bancada

O acionamento da bancada deve ser cercado de cuidados considerados essenciais para a segurança de operadores e para bom funcionamento do equipamento sem danos materiais seguindo-se alguns passos em sua execução:

- Passo 1: Observar a tubulação de sucção e o interior da bomba, verificando-se o estado em que ambas se encontram. Estas devem estar completamente preenchidas de água, caso não estejam, deve-se providenciar o preenchimento dos mesmos (escorva da bomba) com a bancada ainda sem alimentação de energia;
- Passo 2: Verificar a posição do registro de recalque, RGR2, que deve estar totalmente fechado;
- Passo 3: Verificar a posição do registro de sucção, RGS, que deve estar totalmente aberto;
- Passo 4: Para o acionamento da bancada, é necessário ligar a chave geral que energizará o painel de controle;
- Passo 5: Ligar o painel de controle que alimentará o inversor de frequência e o totalizador de vazão.

Após estas verificações, pode-se acionar o equipamento através do inversor de frequência, e na sequência abrindo-se gradativamente o registro de gaveta da tubulação de recalque, RGR2, observando-se o comportamento do equipamento. Caso se perceba que o comportamento do equipamento não esteja correto através de ruídos estranhos, deve-se proceder novamente todos os passos do procedimento de acionamento.

Se o equipamento estiver funcionando corretamente, parte-se para a realização do experimento e conseqüente obtenção dos dados.

3.5 - Ensaio Preliminares

Para o início dos ensaios, após a finalização da montagem da bancada, atentou-se para o acionamento do equipamento, seguindo-se os passos descritos anteriormente e constatou-se que o sistema estava operando corretamente.

Após o acionamento do equipamento, conferiu-se as mangueiras de ligação dos pontos de tomada de pressão até a entrada do manômetro e do manovacuômetro e constatou-se que ambos estavam completamente preenchidos com água, ou seja, sem bolha de ar ou vapor.

Testou-se os equipamentos instalados na bancada, principalmente o inversor de frequência, alterando-se a rotação do motor elétrico.

Com o funcionamento correto do equipamento, sem vazamentos em toda a tubulação, partiu-se para a obtenção dos dados.

Capítulo 4: Energia de Bombeamento

A operação normal de bombeamento consiste em fornecer energia ao líquido para que possa executar o trabalho representado pelo deslocamento de seu peso entre duas posições que se considerem, vencendo as resistências que se apresentarem em seu percurso, Macintyre (1982).

4.1 – Alturas, H_t , H_m e H_u

Para que se possa determinar uma condição de operação de uma bomba centrífuga, torna-se necessário determinar qual a energia por unidade de peso que o sistema solicitará em função da vazão bombeada. Esta energia por unidade de peso solicitada pelo sistema é então, para cada vazão, função da diferença de energia mecânica entre a sucção e a descarga. A energia mecânica do líquido em uma dada posição e estado termodinâmico é calculada em função de sua energia potencial, energia de pressão e energia cinética.

Assim sendo, para uma determinada vazão, a bomba deve fornecer uma quantidade de energia mecânica suficiente para compensar a altura manométrica útil do sistema, ou seja:

- compensar a altura geométrica, Z_e ;
- compensar as diferenças de pressões entre a descarga e a sucção;
- compensar as diferenças de energia cinética entre a descarga e a sucção;
- compensar as perdas de carga na sucção e descarga.

Para compreensão dos cálculos, adotou-se notação indicando-se a situação de cada grandeza considerada no estudo de sua respectiva parcela.

A convenção adotada baseou-se no trabalho de Aparecido (2000) e segue descrita abaixo:

- LC Linha imaginária adotada como sendo a posição de referência para os cálculos das cotas existentes nas formulações.
- 1 Cota utilizada para o nível do reservatório de sucção.
- 2 Cota utilizada para a seção do flange de entrada da bomba.
- 3 Cota utilizada para a seção do flange de saída da bomba.
- 4 Cota utilizada para o ponto médio da seção de saída do encanamento de descarga.
- 5 Cota utilizada para a tomada de pressão para o manovacuômetro.
- 6 Cota utilizada para a tomada de pressão para o manômetro.

As cotas descritas acima encontram-se esquematizadas na Figura 4.1.

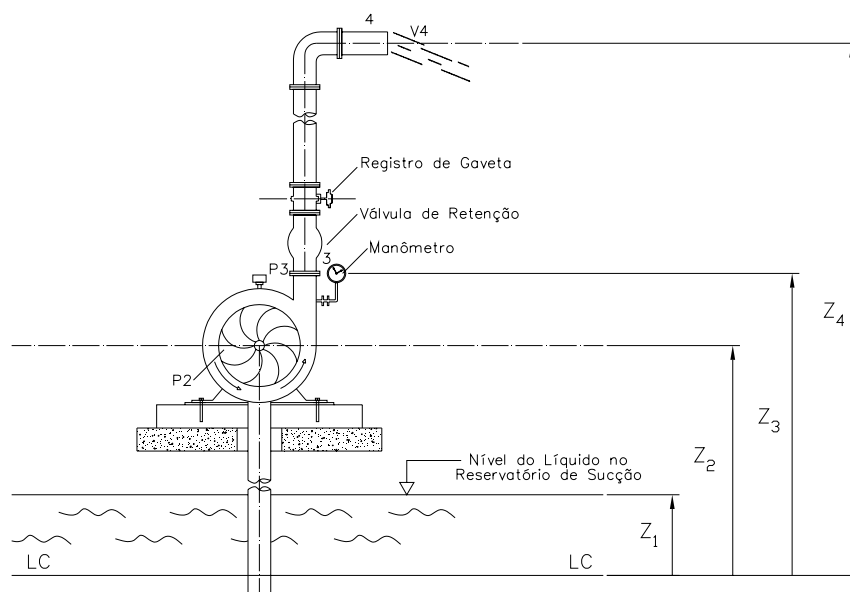


Figura 4.1 – Cotas de referências.

Para o cálculo da altura manométrica de um sistema de bombeamento deve-se atentar para alguns parâmetros de natureza física e também para parâmetros termodinâmicos, onde, através destas análises surgirão os valores necessários para o cálculo desejado.

4.2 - Altura Estática

A altura estática de um sistema de bombeamento é obtida através dos desníveis topográficos encontrados no local de instalação do equipamento, desde o nível do líquido no reservatório de sucção até a sua descarga no reservatório de destino, obtendo-se através desta análise os seguintes dados:

- **Altura geométrica ou altura estática de elevação, Z_e .**

Entende-se por altura estática de elevação, Z_e , como sendo a soma de cota entre o desnível de sucção, Z_{12} = altura estática de sucção, e o desnível de descarga do líquido, Z_{24} = altura estática de descarga, conforme observa-se na Figura 4.2 e sendo matematicamente representada pela Equação 4.1.

$$Z_e = Z_{12} + Z_{24} = Z_4 - Z_1 \quad (4.1)$$

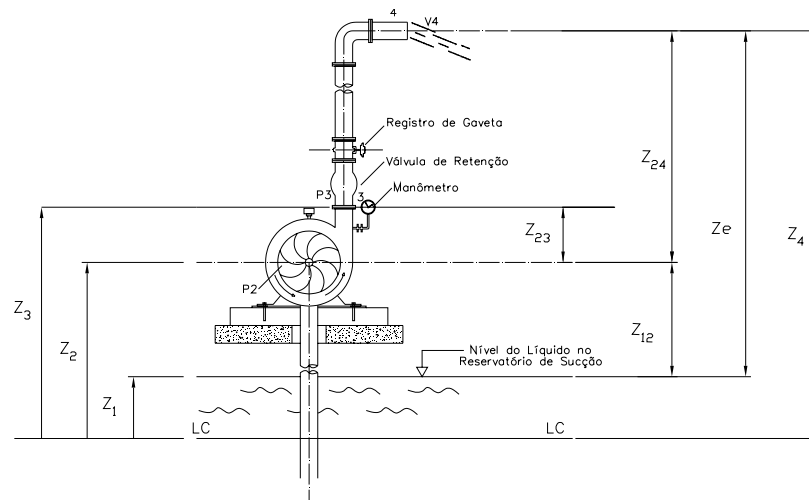


Figura 4.2 – Altura estática, Z_e .

Analisando-se o esquema mostrado na Figura 4.2, tem-se:

- **Altura estática de sucção, Z_{12}**

É a diferença de cotas entre o nível do centro da bomba e da superfície livre do reservatório de captação,

$$Z_{12} = Z_2 - Z_1. \quad (4.2)$$

- **Altura estática de descarga, Z_{24}**

É a diferença de cotas entre o nível em que o líquido é entregue ao meio ambiente, ou outro, ao sair pelo tubo de descarga, e o nível do centro da bomba,

$$Z_{24} = Z_4 - Z_2. \quad (4.3)$$

4.3 - Alturas Dinâmicas

A altura dinâmica de um sistema de bombeamento é obtida considerando-se os parâmetros mecânicos e termodinâmicos simultaneamente na análise determinando-se:

- **Altura manométrica de sucção, H_s**

Aplicando-se a equação da conservação da energia entre a superfície livre no reservatório inferior, e a seção de entrada da bomba, tem-se

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 + gh_{1 \rightarrow 2} \quad (4.4)$$

na qual $h_{1 \rightarrow 2}$ é a perda de carga provocada pelo escoamento do líquido no interior da tubulação de sucção.

Reescrevendo-se a Equação 4.4, isolando-se o termo $\frac{p_2}{\rho}$ tem-se a equação da pressão na entrada da bomba como sendo

$$\frac{p_2}{\rho} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 - \frac{V_2^2}{2} - gZ_2 - gh_{1 \rightarrow 2} \quad (4.5)$$

ou

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 - \frac{V_2^2}{2g} - Z_2 - h_{1 \rightarrow 2}. \quad (4.6)$$

Por definição, a altura manométrica de sucção é a diferença entre as pressões no nível do reservatório, ponto 1, e na entrada da bomba, ponto 2, sendo escrita

$$H_s = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g}. \quad (4.7)$$

Substituindo a Equação 4.6, da pressão na entrada da bomba, na Equação 4.7 tem-se a equação geral para o cálculo da altura de sucção

$$H_s = -\frac{V_1^2}{2g} - Z_1 + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_{1 \rightarrow 2} \quad (4.8)$$

ou

$$H_s = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 + h_{1 \rightarrow 2} \quad (4.9)$$

ou ainda

$$H_s = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_{12} + h_{1 \rightarrow 2}. \quad (4.10)$$

- **Altura manométrica de descarga, H_d**

Aplicando-se a equação da conservação da energia entre o bocal de saída da bomba, ponto 3, e a seção de saída da tubulação de descarga, ponto 4, obtém-se

$$\frac{p_3}{\rho} + \frac{V_3^2}{2} + gZ_3 = \frac{p_4}{\rho} + \frac{V_4^2}{2} + gZ_4 + gh_{3 \rightarrow 4}, \quad (4.11)$$

na qual $h_{3 \rightarrow 4}$ é a perda de carga provocada pelo escoamento do líquido no interior da tubulação de descarga.

Reescrevendo-se a Equação 4.11 e isolando-se o termo $\frac{p_3}{\rho}$ tem-se a equação da pressão na saída da bomba como sendo

$$\frac{p_3}{\rho} = \frac{p_4}{\rho} + \frac{V_4^2}{2} + gZ_4 + gh_{3 \rightarrow 4} - \frac{V_3^2}{2} - gZ_3 \quad (4.12)$$

ou

$$\frac{p_3}{\rho g} = \frac{p_4}{\rho g} + \frac{V_4^2}{2g} + Z_4 + h_{3 \rightarrow 4} - \frac{V_3^2}{2g} - Z_3. \quad (4.13)$$

Por definição, a altura de descarga é a diferença entre as pressões na saída da bomba, ponto 3, e na saída da tubulação de descarga para o ambiente, ponto 4, sendo escrita

$$H_d = \frac{p_3}{\rho g} - \frac{p_4}{\rho g}. \quad (4.14)$$

Substituindo a Equação 4.13, da pressão na saída da bomba, na Equação 4.14 tem-se a equação geral para o cálculo da altura de descarga

$$H_d = \frac{V_4^2}{2g} + Z_4 + h_{3 \rightarrow 4} - \frac{V_3^2}{2g} - Z_3 \quad (4.15)$$

ou

$$H_d = \frac{V_4^2 - V_3^2}{2g} + Z_4 - Z_3 + h_{3 \rightarrow 4} \quad (4.16)$$

ou ainda

$$H_d = \frac{V_4^2 - V_3^2}{2g} + Z_{34} + h_{3 \rightarrow 4}. \quad (4.17)$$

Para a análise da altura manométrica de descarga, H_d , dois casos devem ser considerados:

a) Tubulação de descarga entrega o líquido ao ambiente.

Para este caso, tem-se a descarga do líquido bombeado ao ambiente, conforme observa-se no ponto 4 da Figura 4.2, e analisando-se a Equação 4.17 para a altura de descarga, se o diâmetro

do flange de saída da bomba for igual ao diâmetro da tubulação de descarga na saída para o ambiente, $V_3 = V_4$, a Equação 4.17 pode ser reescrita como

$$H_d = (Z_4 - Z_3) + h_{3 \rightarrow 4}. \quad (4.18)$$

b) O líquido é conduzido pela tubulação a um reservatório superior de tal modo que, acima da boca do tubo de descarga, haja uma camada de líquido capaz de absorver toda a energia cinética devida à velocidade V_4 , conforme observa-se no ponto 4 da Figura 4.3.

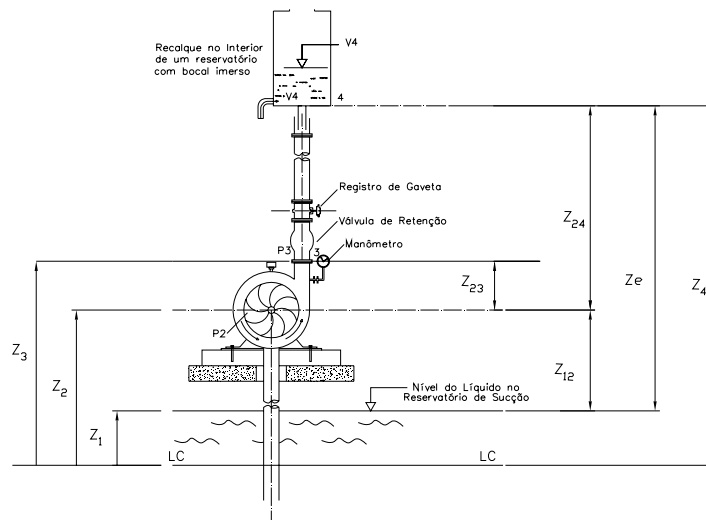


Figura 4.3 - Saída da tubulação de descarga entrando em reservatório de descarga pela sua parte inferior, contendo líquido.

Neste caso, a velocidade do fluido na superfície do reservatório de descarga, ponto 4, é nula, $V_4 = 0$, e a Equação 4.17 é reescrita como

$$H_d = -\frac{V_3^2}{2g} + Z_{34} + h_{3 \rightarrow 4}. \quad (4.19)$$

4.4 – Altura Manométrica, H_m

A altura manométrica, H_m , é a energia por unidade de peso que o sistema necessita para transportar o fluido do reservatório de sucção para o reservatório de descarga sob determinada vazão. A altura manométrica da bomba pode ser definida como a carga em termos de diferença de energia de pressão e de energia potencial a que está submetida a bomba e escrita como

$$H_m = \left(\frac{p_3}{\rho g} + Z_3 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + Z_2 \right). \quad (4.20)$$

Assim, pode-se obter a diferença de pressão entre a entrada e a saída da bomba, subtraindo as Equações (4.6) e (4.13) na Equação (4.20), resultando

$$H_m = \frac{p_4 - p_1}{\rho g} + \frac{V_4^2 - V_3^2}{2g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_4 - Z_3) + (Z_2 - Z_1) + (Z_3 - Z_2) + h_{1 \rightarrow 2} + h_{3 \rightarrow 4} \quad (4.21)$$

No caso de instalações onde os reservatórios de sucção e descarga são abertos e a tubulação de descarga entrega o líquido ao ambiente, as pressões p_1 e p_4 serão ambas a pressão ambiente de mesmo valor, e a Equação 4.21 pode ser reescrita como

$$H_m = \frac{V_4^2 - V_3^2}{2g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_4 - Z_3) + (Z_2 - Z_1) + (Z_3 - Z_2) + h_{1 \rightarrow 2} + h_{3 \rightarrow 4} \quad (4.22)$$

ou

$$H_m = \frac{V_4^2 - V_3^2}{2g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_4 - Z_1 + h_{1 \rightarrow 2} + h_{3 \rightarrow 4} . \quad (4.23)$$

Para estes cálculos, deve-se levar em conta o tipo de instalação que está sendo analisada e sempre atentar para o ponto por onde passa a linha de centro, LC. Para o caso onde adota-se a LC como sendo o centro da entrada do rotor, se a bomba estiver instalada acima do nível do reservatório, conforme observa-se no caso “A” da Figura 4.4, utiliza-se o valor da altura estática de sucção, $Z_{12} = Z_2 - Z_1$, com valores positivos. Caso a bomba esteja instalada abaixo do nível do reservatório, conforme observa-se no caso “B” da Figura 4.4, e sua tubulação de sucção encontra-se completamente preenchida com o líquido a ser bombeado, o valor da altura estática de sucção, $Z_{12} = Z_2 - Z_1$ será negativo.

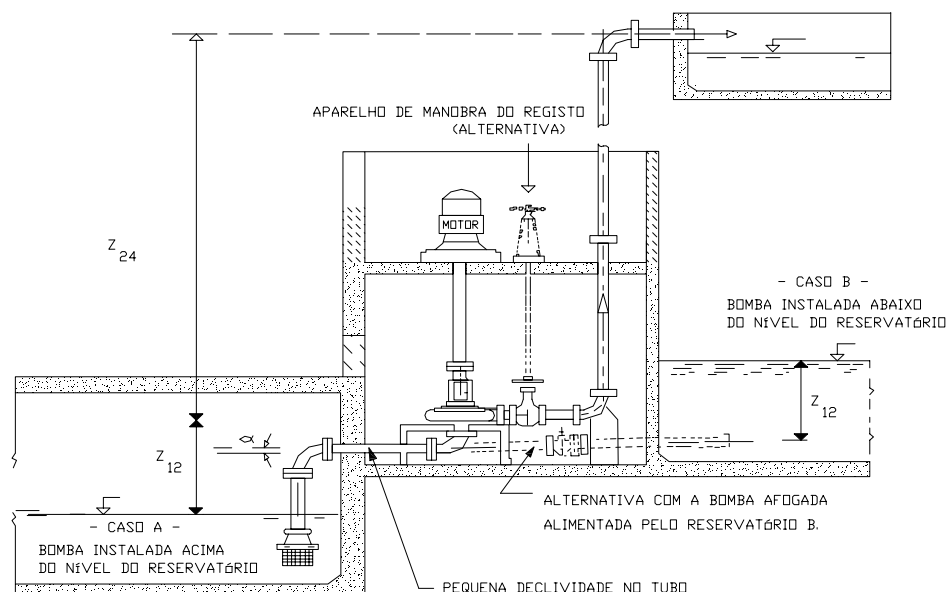


Figura 4.4 – Alternativa para as linhas de sucção de uma turbobomba, (Macintyre, 1982).

4.5 - Altura Útil de Elevação, H_u

A altura útil de elevação é a energia mecânica que a unidade de peso do líquido adquire em sua passagem pela bomba. Seu valor é calculado aplicando-se a equação da conservação da energia entre as seções de saída, ponto 3, e de entrada, ponto 2, da bomba. Devido a essa energia, o líquido escoar pela tubulação. O Hydraulic Institute (1982) define essa grandeza como altura total. Tem-se então que a altura útil é escrita conforme abaixo

$$H_u = \left(\frac{p_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} + Z_3 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right). \quad (4.24)$$

Substituindo-se os valores encontrados nas Equações 4.6 e 4.13 na Equação 4.24, tem-se que

$$H_u = \frac{p_4}{\rho g} + \frac{V_4^2}{2g} + Z_4 + h_{3 \rightarrow 4} - \frac{V_3^2}{2g} - Z_3 + \frac{V_3^2}{2g} + Z_3 - \frac{p_1}{\rho g} - \frac{V_1^2}{2g} - Z_1 + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_{1 \rightarrow 2} - \frac{V_2^2}{2g} - Z_2. \quad (4.25)$$

Comparando-se a equação acima com a equação obtida para H_m , pode-se concluir que

$$H_u = H_m + \frac{V_3^2 - V_2^2}{2g}. \quad (4.26)$$

Nota-se através da Equação (4.26) que se os diâmetros de entrada e saída da bomba forem iguais, $V_3 = V_2$, esta pode ser reescrita como $H_u = H_m$.

Quando os diâmetros das tubulações forem diferentes, tem-se quase sempre $V_3 > V_2$, indicando que H_u difere de H_m por levar em conta a variação de energia cinética do líquido ao atravessar a bomba, sendo que os resultados finais obtidos para a altura H_u serão maiores do que para H_m , que podem ser considerados significativos dependendo da bomba analisada e do regime de operação.

4.6 - Altura Manométrica Obtida Diretamente do Visor de Instrumentos de Medição de Pressão, H_l

Uma aproximação da altura manométrica também pode ser obtida utilizando-se os valores lidos diretamente no manômetro que encontra-se instalado na tubulação de descarga,

próximo a boca de saída, ponto 3, da bomba, e no vacuômetro ou manovacuômetro que encontra-se instalado na tubulação de sucção, próximo a entrada, ponto 2.

Estes instrumentos são utilizados em grande escala nas instalações de bombeamento e medem as pressões relativas existentes nas tubulações.

O manômetro fornece a diferença entre a pressão absoluta e a ambiente, de modo que se deve somar o valor da pressão de leitura do instrumento com o da ambiente do local de sua instalação para a obtenção da pressão absoluta, com a qual sempre trabalha-se, salvo referências em contrário.

Já o vacuômetro, mede a diferença entre a pressão ambiente e a absoluta, e neste caso, deve-se subtrair da pressão ambiente o valor da leitura no vacuômetro.

Como a altura H_l é uma aproximação da altura manométrica, Equação (4.18), o seu cálculo é realizado com a utilização dos valores lidos diretamente nos visores dos instrumentos de medição de pressão, onde substitui-se o valor da pressão absoluta na saída da bomba, $\frac{p_3}{\rho g}$, mais a distância de cota Z_3 , pela pressão lida diretamente no visor do manômetro, $\frac{p_3^m}{\rho g}$ mais a pressão ambiente e mais a nova cota até o centro do manômetro, Z_3^m sendo

$$\frac{p_3}{\rho g} + Z_3 = \frac{p_3^m + p_{amb}}{\rho g} + Z_3^m. \quad (4.27)$$

Na entrada da bomba, substitui-se o valor da pressão absoluta $\frac{p_2}{\rho g}$ mais a sua respectiva cota Z_2 , pela pressão ambiente menos a pressão lida diretamente no visor do vacuômetro, $\frac{p_2^v}{\rho g}$ mais a sua nova cota até o centro do vacuômetro, Z_2^v , sendo

$$\frac{p_2}{\rho g} + Z_2 = \frac{p_{amb} - p_2^v}{\rho g} + Z_2^v. \quad (4.28)$$

Substituindo-se estas novas Equações (4.27) e (4.28) na equação da altura manométrica, H_m , e renomeando H_m para H_l , tem-se

$$H_l = \frac{p_3^m + p_2^v}{\rho g} + Z_3^m - Z_2^v. \quad (4.29)$$

Para o caso particular, onde o manômetro e o vacuômetro encontrem-se instalados com seus centros na mesma cota Z , Figura 4.5, a Equação (4.30) resume-se a

$$H_l = \frac{p_3^m + p_2^v}{\rho g} \quad (4.30)$$

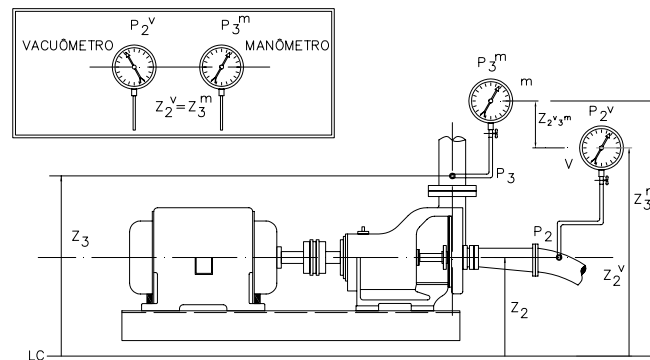


Figura 4.5 – Altura manométrica aproximada com instrumentos, H_l .

Para casos onde a pressão na sucção é positiva e obtida através de manômetros, a Equação (4.30) fica

$$H_l = \frac{p_3^m - p_2^m}{\rho g} \quad (4.31)$$

4.7 - Obtenção da Curva Característica da Bomba

Curvas características das bombas são representações gráficas que traduzem o funcionamento da bomba, obtidas através de experiências que fazem a bomba vencer diversas alturas manométricas com diversas vazões. A curva característica de uma bomba é traçada no gráfico de altura, $H_l - H_m - H_u \times$ Vazão, Q , e sua importância está na determinação do ponto de trabalho da bomba.

Para o cálculo da altura, H , pode-se adotar o procedimento teórico onde a obtenção da curva é separada em quatro passos:

1º Passo: Adota-se como referência para a obtenção da altura total uma equação apropriada conforme descrito anteriormente, H_l , H_m ou H_u . Como exemplo, determinou-se a Equação 4.24 referente a altura H_u .

Coloca-se a bomba em funcionamento, com o registro de descarga totalmente fechado, ou seja, $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$, e calcula-se a altura obtida pela bomba através da fórmula acima, anotando-se os

valores obtidos no manômetro, manovacuômetro e a distância entre os pontos de tomada de leitura das mesmas até o centro de referência do equipamento. Para este passo, as velocidades no interior das tubulações serão nulas por não existir deslocamento de fluido pelas tubulações, pois o registro encontra-se fechado.

Esta altura cuja vazão é igual à zero é normalmente conhecida como altura no “shut-off”. Este é o primeiro ponto ($H_{u,0}$, Q_0).

Trabalha-se neste projeto por opção própria com o rotor no diâmetro máximo fornecido pelo fabricante, $\phi = 209\text{mm}$.

2º Passo: Abre-se parcialmente o registro de descarga, obtendo-se assim uma nova vazão, a qual chama-se Q_1 obtido através do medidor de vazão.

3º Passo: Determina-se a altura correspondente, $H_{u,1}$, para a vazão fixada anteriormente.

Após o terceiro passo, retorna-se ao segundo passo, fixa-se outra vazão desejada e novamente volta-se ao terceiro passo calculando-se a altura correspondente para a nova vazão. Repete-se os passos 2 e 3 de acordo com o número de vazões adotadas dentro da faixa de operação da bomba, incluindo o ponto de vazão máxima, $Q_{\text{máx}}$, onde o registro de descarga encontra-se totalmente aberto

4º Passo: Desenha-se os pontos obtidos num gráfico $H_u \times Q$ obtendo-se assim a curva da bomba.

Na Figura 4.6 mostra-se exemplos de curvas características fornecidas por um determinado fabricante de bombas.

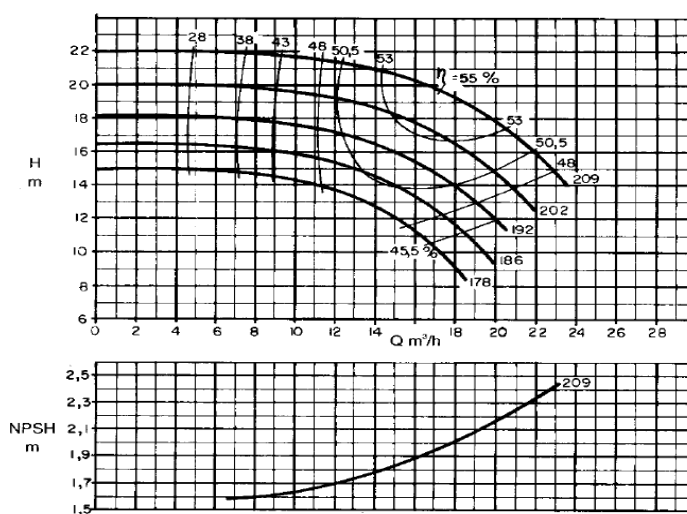


Figura 4.6 – Curva Característica fornecida pelo fabricante para a rotação de 1750 RPM para a bomba KSB MEGACHEM 32-200. (KSB, 2003)

4.8 - Resultados Obtidos na Determinação da Curva Característica das Alturas

Os resultados obtidos neste trabalho encontram-se agrupados para facilitar sua análise e compreensão de cada etapa.

Procedeu-se de acordo com a metodologia utilizada para a obtenção da altura, sendo que para sua determinação a bancada experimental contou com:

- manômetro para leitura de pressão de descarga da bomba;
- manovacuômetro para leitura de pressão na sucção da bomba;
- barômetro para leitura da pressão ambiente do local de ensaio;
- medidor de vazão eletromagnético para leitura da vazão da bomba;
- tacômetro para obtenção da rotação;
- termômetro para obtenção da temperatura do líquido de bombeamento;
- diâmetro original do rotor da bomba;
- um registro na linha de descarga para o controle da vazão da bomba.

As condições de operação da bomba centrífuga da bancada, operando sem cavitação, foram ajustadas de acordo com a curva característica da mesma, o qual foi fornecida pelo fabricante para comparação da mesma em processo de funcionamento. Após a aferição de todo o equipamento a ser utilizado no experimento, parte-se para a realização do mesmo.

Para o cálculo da altura adotou-se o procedimento teórico descrito na formulação, item 4.7.

O cálculo da altura constou de duas etapas, onde na primeira etapa utilizou-se na bancada um manovacuômetro tipo Bourdon para a obtenção da pressão na sucção, e, na segunda etapa da pesquisa, substituiu-se o manovacuômetro tipo Bourdon por um manômetro de coluna líquida tipo U.

4.8.1 – Resultados Obtidos na Fase 1

Na primeira fase desta pesquisa utilizou-se um manovacuômetro tipo Bourdon e o esquema geral da bancada conforme a Figura 3.1. Com esta configuração calculou-se as pressões no bocal de sucção na entrada da bomba, p_2 , e no bocal de descarga na saída da bomba, p_3 , utilizando-se como referência o trabalho de Aparecido (2000) para a análise de energia.

Análise de energia na sucção da bomba

Efetuuou-se a análise de energia na sucção da bomba para o cálculo da pressão p_2 na região de entrada da mesma para o esquema mostrado na Figura 4.7.

Volume de Controle da Sucção - Fase 1

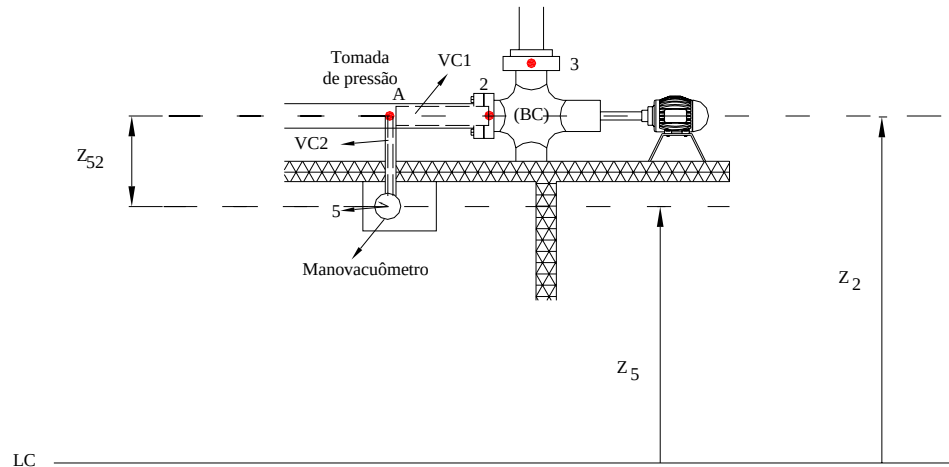


Figura 4.7 – Ilustração dos volumes de controle utilizados na análise de energia da sucção para a bancada na Fase 1.

Analisando-se a Figura 4.7, adotou-se como o volume de controle entre o ponto de tomada de pressão, ponto A, e a entrada da bomba, ponto 2, como sendo o volume de controle 1, VC1. Aplicando-se a equação da conservação de energia entre os pontos A e 2 tem-se

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{V_A^2}{2} + gZ_A = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 + gh_{A \rightarrow 2} \quad (4.32)$$

na qual $h_{A \rightarrow 2}$ é a perda de carga provocada pelo escoamento do líquido no interior da tubulação entre os pontos A e 2.

Isolando-se o termo referente à pressão na entrada da bomba tem-se

$$\frac{p_2}{\rho} = \frac{p_A}{\rho} + \frac{V_A^2}{2} + gZ_A - \frac{V_2^2}{2} - gZ_2 - gh_{A \rightarrow 2} \quad (4.33)$$

ou

$$\frac{p_2}{\rho} = \frac{p_A}{\rho} + \frac{V_A^2 - V_2^2}{2} + g(Z_A - Z_2) - gh_{A \rightarrow 2} \quad (4.34)$$

Sendo esta a equação da energia para o cálculo da pressão absoluta na entrada da bomba, p_2 .

Analisando-se também o volume de controle 2, VC2, referente ao ponto de tomada de pressão A na tubulação e o ponto de leitura no visor do manovacuômetro, ponto 5, e aplicando-se a equação da conservação de energia tem-se

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{V_{A,W}^2}{2} + gZ_A = \frac{p_5}{\rho} + \frac{V_5^2}{2} + gZ_5 + gh_{A \rightarrow 5}. \quad (4.35)$$

Isolando-se o termo referente à pressão na tomada de pressão, ponto A, tem-se

$$\frac{p_A}{\rho} = \frac{p_5}{\rho} + \frac{V_5^2}{2} + gZ_5 - \frac{V_{A,W}^2}{2} - gZ_A + gh_{A \rightarrow 5}. \quad (4.36)$$

Pode-se afirmar para esta análise que a velocidade ao longo da parede do duto no ponto A_W localizado na altura da parede da tubulação para esta análise de volume de controle é nula, pelo fato do líquido estar parado nesta região da parede do duto.

A velocidade no ponto 5 também é nula pois não existe deslocamento de fluido no interior da mangueira utilizada para coleta de pressão. Como não existe deslocamento de fluido no VC2, não existe também perda de carga neste trecho, resultando então a equação abaixo

$$\frac{p_A}{\rho} = \frac{p_5}{\rho} + g(Z_5 - Z_A). \quad (4.37)$$

Substituindo-se a Equação (4.37) na Equação (4.34), tem-se a equação geral para o cálculo da pressão de entrada no bocal da bomba, p_2

$$\frac{p_2}{\rho} = \frac{p_5}{\rho} + \frac{V_A^2 - V_2^2}{2} + g(Z_5 - Z_2) - gh_{A \rightarrow 2}. \quad (4.38)$$

Análise de energia na descarga da bomba

Assim como na análise de energia na sucção da bomba, efetuou-se a análise de energia na descarga da bomba para o cálculo da pressão p_3 no bocal de saída da mesma, de acordo com o esquema mostrado na Figura 4.8.

Volume de Controle na Descarga - Fase 1

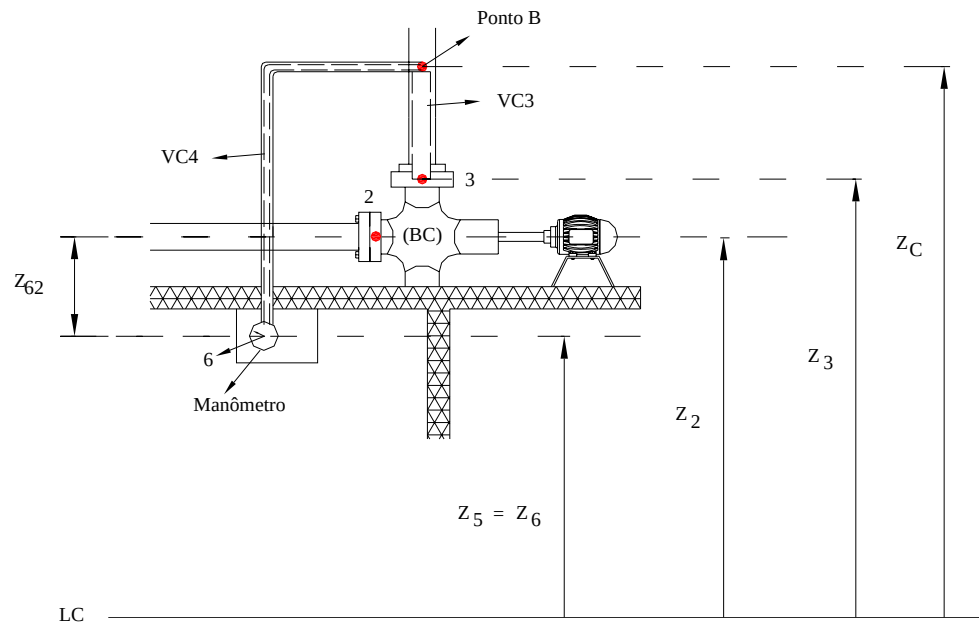


Figura 4.8 – Ilustração dos volumes de controle utilizados na análise de energia na descarga para a bancada na Fase 1.

Analisando-se a Figura 4.8, adotou-se como volume de controle entre o ponto de tomada de pressão, ponto B, e a saída da bomba, ponto 3, como sendo o volume de controle 3, VC3. Aplicando-se a equação da conservação de energia entre os pontos 3 e B tem-se

$$\frac{p_3}{\rho} + \frac{V_3^2}{2} + gZ_3 = \frac{p_B}{\rho} + \frac{V_B^2}{2} + gZ_B + gh_{3 \rightarrow B} \quad (4.39)$$

na qual $h_{3 \rightarrow B}$ é a perda de carga provocada pelo escoamento do líquido no interior da tubulação entre os pontos 3 e B.

Isolando-se o termo referente à pressão na saída da bomba tem-se

$$\frac{p_3}{\rho} = \frac{p_B}{\rho} + \frac{V_B^2 - V_3^2}{2} + g(Z_B - Z_3) + gh_{3 \rightarrow B}. \quad (4.40)$$

Sendo esta a equação da energia para o cálculo da pressão absoluta na saída da bomba, p_3 .

Analisando-se também o volume de controle 4, VC4, referente ao ponto de tomada de pressão B na tubulação e o ponto de leitura no visor do manômetro, ponto 6, e aplicando-se a equação da conservação de energia tem-se

$$\frac{p_B}{\rho} + \frac{V_{B,W}^2}{2} + gZ_B = \frac{p_6}{\rho} + \frac{V_6^2}{2} + gZ_6 + gh_{B \rightarrow 6}. \quad (4.41)$$

Isolando-se o termo referente à pressão na tomada de pressão, ponto B, tem-se

$$\frac{p_B}{\rho} = \frac{p_6}{\rho} + \frac{V_6^2}{2} + gZ_6 - \frac{V_{B,W}^2}{2} - gZ_B + gh_{B \rightarrow 6}. \quad (4.42)$$

Pode-se afirmar para esta análise que a velocidade ao longo da parede do duto no ponto B_w localizado na altura da parede da tubulação para esta análise de volume de controle é nula, pelo fato do líquido estar parado nesta região da parede do duto.

A velocidade no ponto 6 também é nula pois não existe deslocamento de fluido no interior da mangueira utilizada para coleta de pressão. Como não existe deslocamento de fluido no VC4, não existe também perda de carga neste trecho, resultando então a equação abaixo

$$\frac{p_B}{\rho} = \frac{p_6}{\rho} + g(Z_6 - Z_B). \quad (4.43)$$

Substituindo-se a Equação (4.43) na Equação (4.40), tem-se a equação geral para o cálculo da pressão de saída no bocal da bomba, p₃

$$\frac{p_3}{\rho} = \frac{p_6}{\rho} + \frac{V_B^2 - V_3^2}{2} + g(Z_6 - Z_3) + gh_{3 \rightarrow B}. \quad (4.44)$$

Todas as pressões contidas na presente formulação são em termos absolutos, portanto, para a utilização das pressões obtidas nos visores dos aparelhos de medições, manômetro e manovacuômetro ou vacuômetro, deve-se levar em conta a pressão ambiente.

Sendo assim, as Equações (4.38) e (4.44) tornam-se:

$$\frac{p_2}{\rho} = \frac{p_{5,amb} - p_5^v}{\rho} + \frac{V_A^2 - V_2^2}{2} + g(Z_5 - Z_2) - gh_{A \rightarrow 2}, \quad (4.45)$$

$$\frac{p_3}{\rho} = \frac{p_6^m + p_{6,amb}}{\rho} + \frac{V_B^2 - V_3^2}{2} + g(Z_6 - Z_3) + gh_{3 \rightarrow B}. \quad (4.46)$$

Após a análise de energia, substituiu-se os valores de p₂ e p₃ nas equações correspondentes das alturas obtidas diretamente dos visores dos manômetros, H_i; da altura manométrica, H_m; e da altura manométrica útil, H_u. Nas Figuras 3.1, 3.3 e 3.6 apresentadas no capítulo 3, observa-se que o manômetro e o manovacuômetro utilizados na Fase 1 estão

instalados à mesma altura, sendo $Z_5 = Z_6$. O reservatório de sucção e descarga são os mesmos e abertos com a saída da tubulação de descarga entregando o líquido bombeado ao ambiente no mesmo reservatório, mantendo o seu nível sempre constante, e portanto, as pressões $p_1 = p_4 = p_{amb}$, obtendo-se:

$$H_l = \frac{p_6^m + p_5^v}{\rho g}, \quad (4.47)$$

$$H_m = \frac{p_6^m + p_5^v}{\rho g} + \frac{V_B^2 - V_3^2}{2g} + \frac{V_2^2 - V_A^2}{2g} + h_{3 \rightarrow B} + h_{A \rightarrow 2}, \quad (4.48)$$

$$H_u = \frac{p_6^m + p_5^v}{\rho g} + \frac{V_B^2 - V_A^2}{2g} + h_{3 \rightarrow B} + h_{A \rightarrow 2}. \quad (4.49)$$

Alturas H_l , H_m e H_u em função da Vazão, Q ; Coeficiente de Pressão, ψ , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ ; e Coeficiente de Pressão, ψ , em função Velocidade Específica, n_q

Com os respectivos valores calculados para as alturas H_l , H_m e H_u , para três rotações diferentes, 1500 RPM, 1800 RPM e 1980 RPM, traçou-se os gráficos referentes a cada uma das rotações, conforme observa-se nas figuras a seguir.

Alturas, H_l , H_m e H_u em função da Vazão, Q

Observa-se na Figura 4.9 que o comportamento das curvas características é sempre o mesmo. Considerando-se a mesma bomba centrífuga, o aumento de rotação faz com que produza maiores alturas, H_l , H_m ou H_u e maiores vazões. Nestas curvas a bomba trabalha em condições normais de operação com o registro de sucção totalmente aberto e sem cavitação.

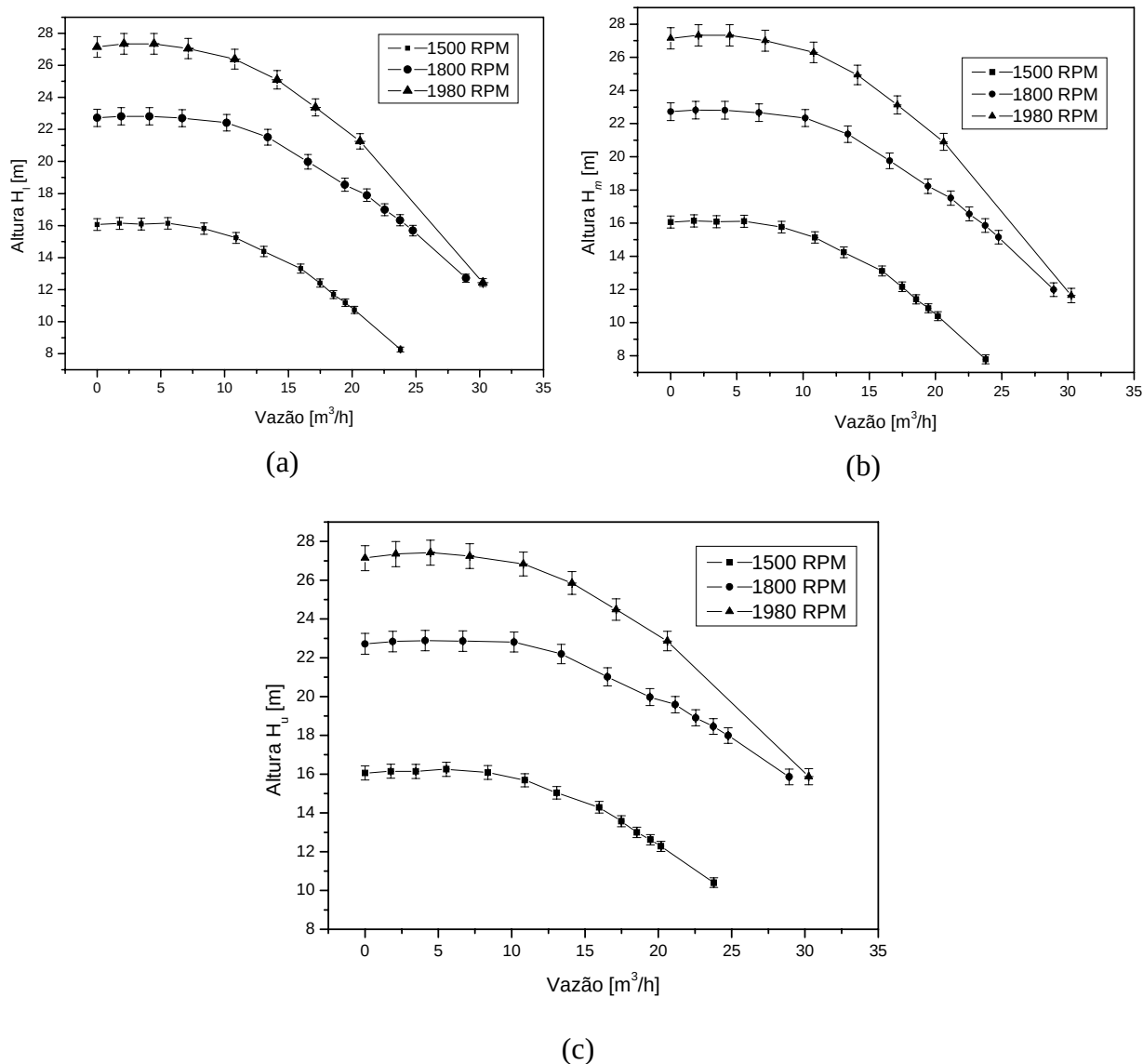


Figura 4.9 – Alturas (a) H_t , (b) H_m e (c) $H_u \times$ Vazão, Q , utilizando manômetro Bourdon para rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Na Figura 4.10, observa-se que a altura útil, H_u , apresenta sempre maiores valores e maiores vazões quando comparada com as alturas H_t e H_m , isto por ter em sua formulação o adicional referente às energias cinéticas fornecidas pelas velocidades na entrada e na saída da bomba. Devido a este acréscimo de valores, percebe-se que quanto maior a vazão bombeada, maior é a diferença entre as alturas em comparação, pois maiores são as velocidades. A altura H_t , por ser uma aproximação da altura H_m , apresenta sempre valores muito próximos entre ambas, em toda extensão da curva.

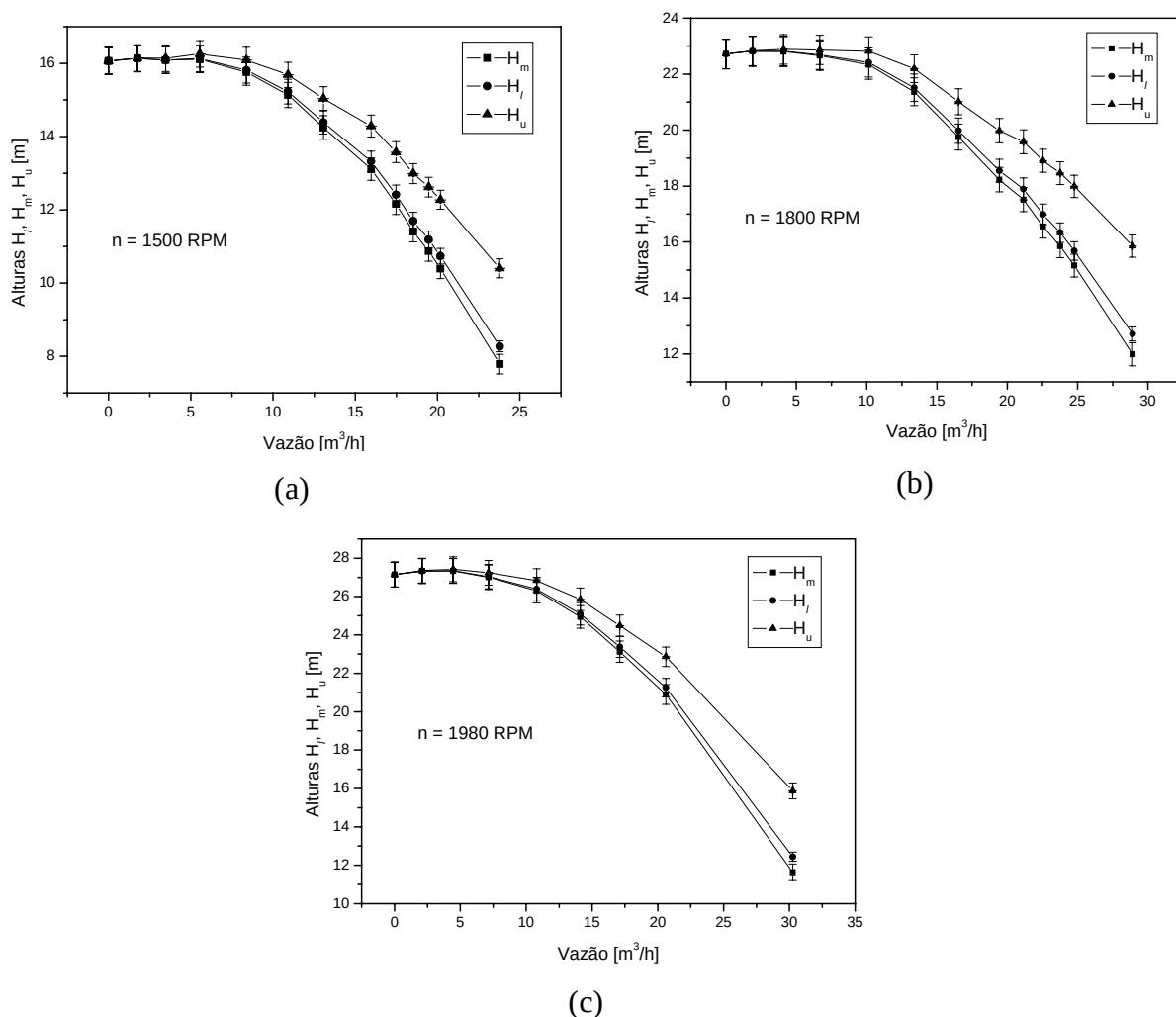


Figura 4.10 – Alturas, H_l , H_m e $H_u \times$ Vazão, Q , para as rotações de (a) 1500 RPM e (b) 1800 RPM e (c) 1980 RPM.

Na Figura 4.11, construiu-se as três curvas referentes às alturas H_l , H_m e H_u para as três rotações simultaneamente, e, observa-se que a altura útil, H_u , para a rotação de 1800 RPM, nos pontos localizados “após” a metade de sua curva, alcança valores superiores aos valores obtidos para as curvas referentes a H_l e H_m para a rotação de 1980 RPM.

Nota-se também na Figura 4.11 que semelhante ao que ocorre nas curvas da Figura 4.10, para pontos de pequenas vazões, as três alturas possuem praticamente o mesmo valor, e aumentando-se a vazão, aumenta-se a distancia entre a altura H_u e as alturas H_l e H_m devido a influência da soma das parcelas de energia cinética em sua formulação, conforme explicado anteriormente.

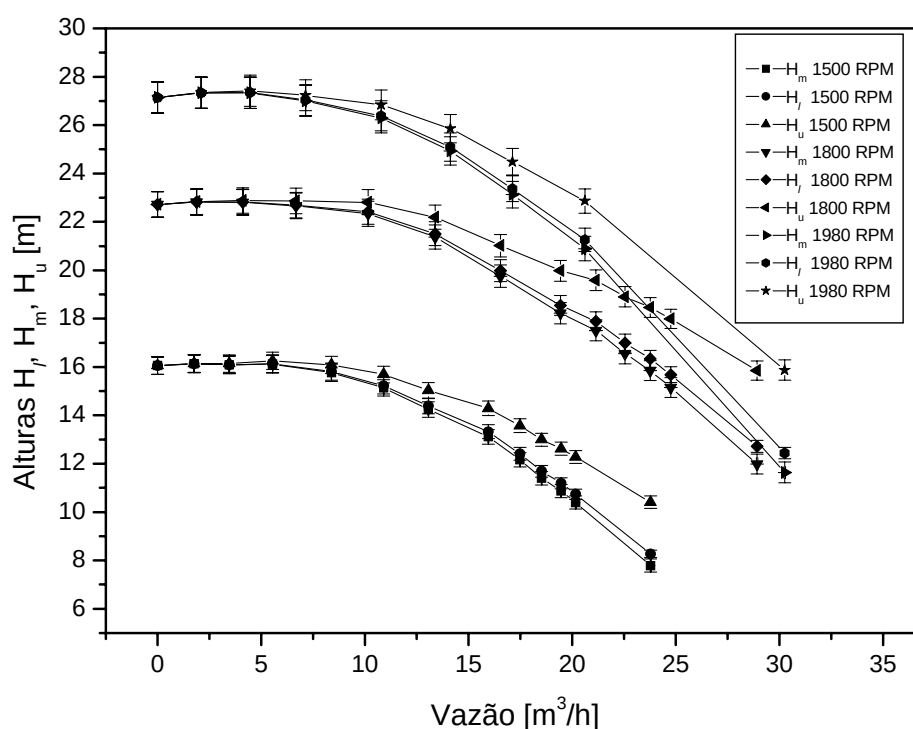


Figura 4.11 – Alturas, H_l , H_m e $H_u \times$ Vazão, Q , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Na Figura 4.12 construiu-se as curvas da altura, $H_u \times$ Vazão, Q , para a rotação de 1800 RPM, e observa-se o comportamento da bomba centrífuga operando com o registro de sucção aberto e também fechando em várias posições. É nítido que à medida que se fecha o registro de sucção a altura H_u diminui, atravessando mais precocemente a curva calculada para a representação da curva do equipamento com queda na altura H_u em 3%. Observa-se que quanto maior o número de voltas fechando-se o registro de sucção, menor é a altura H_u do equipamento e maior a possibilidade do mesmo operar com cavitação, pois segundo as normas, quando o equipamento atinge uma queda de 3% na altura útil com vazão constante, já iniciou o fenômeno da cavitação. Após a altura H_u ultrapassar a curva com queda de 3%, observa-se que ocorre uma queda brusca em seus valores.

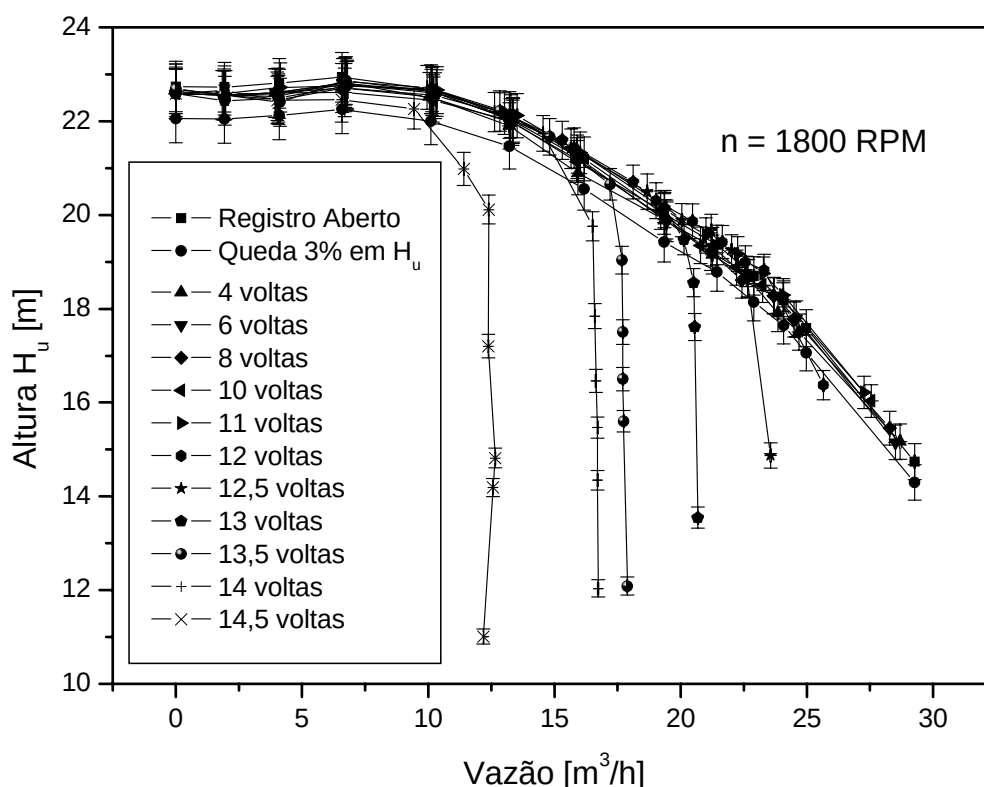


Figura 4.12 - Gráfico da altura $H_u \times$ Vazão, Q , do comportamento da curva para 1800 RPM com o registro de sucção fechado em 4; 6; 8; 10; 11; 12; 12,5; 13; 13,5; 14 e 14,5 voltas.

Mostra-se na Figura 4.13 apenas algumas das curvas típicas, para os quais há modificação quantitativa e qualitativa da curva característica quando deixa de operar em condições normais de trabalho.

O fechamento no registro de sucção tem a finalidade de gerar perdas de carga adicionais na tubulação de sucção imitando possíveis instalações do equipamento com diferentes combinações entre as alturas de sucção ou possíveis acessórios montados na linha de sucção que modifiquem sua condição de trabalho anterior. Com o registro de sucção fechado em 11 voltas, Figura 4.13 - (a), observa-se que a curva experimental para H_u não cruza a curva limite com queda de 3% na altura H_u e se mantém junto à curva normal, na qual o equipamento trabalha livre da ocorrência da cavitação.

Nas Figuras 4.13 - (b), (c) e (d) observa-se que a curva de H_u para os registros fechados em 12, 13 e 14 voltas cruzam a curva com queda de 3%, sendo as curvas com maiores quantidades de voltas de fechamento do registro de sucção, as que apresentam as menores vazões finais. Para estes casos, quando a bomba trabalhar com vazões onde a altura H_u for inferior a curva de H_u com queda de 3% para condições normais de operação, ocorrerá certamente o fenômeno de cavitação neste equipamento.

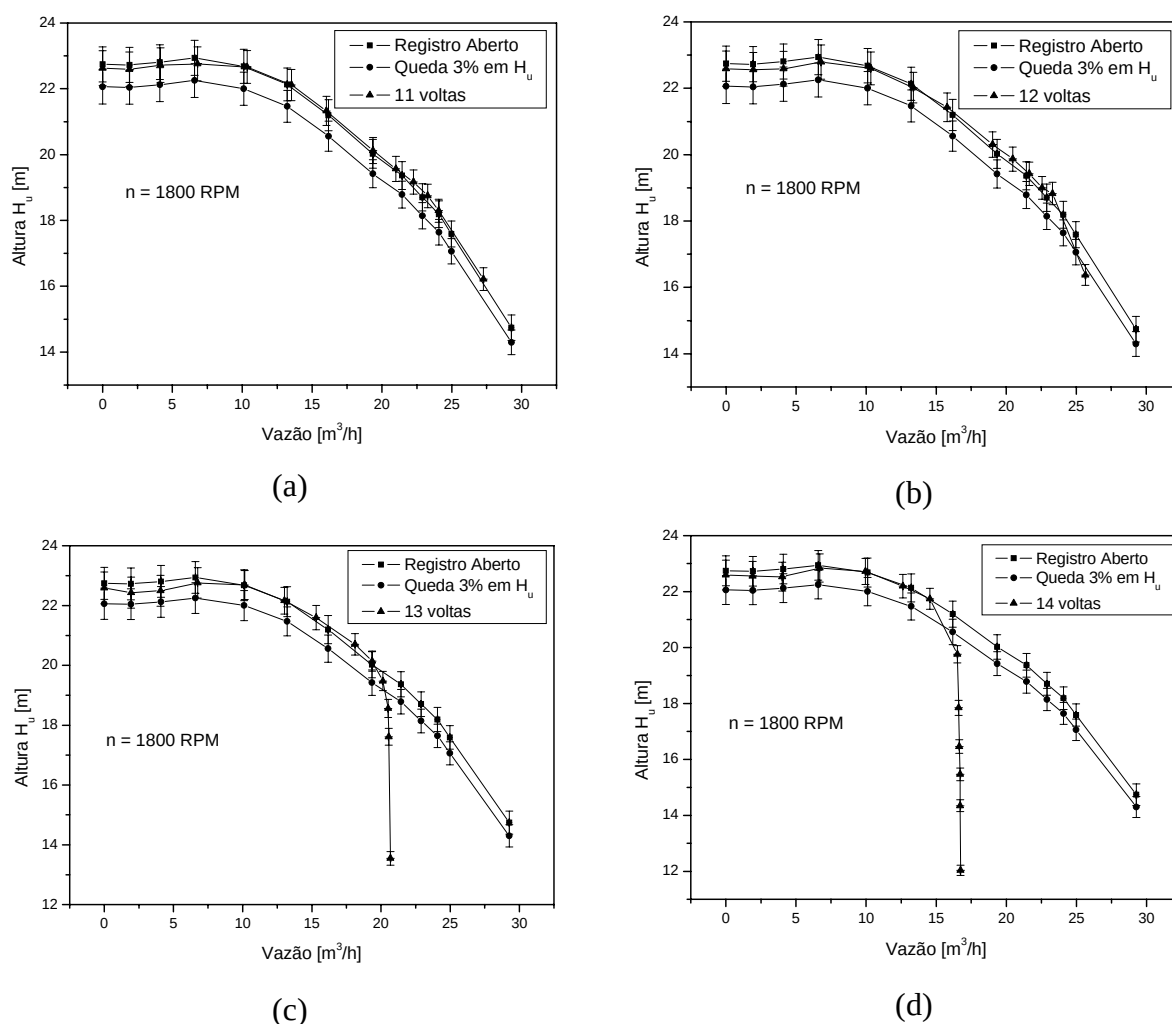


Figura 4.13 – Altura $H_u \times$ Vazão, Q , do comportamento da curva de 1800 RPM com o registro de sucção fechado em (a) 11 volts, (b) 12 volts, (c) 13 volts e (d) 14 votas.

Coeficientes de Pressão, ψ , em função do Coeficiente de vazão, ϕ

No Apêndice B deste trabalho, apresenta-se um estudo sobre análise adimensional e semelhança física aplicado a bombas centrífugas. Dentre os coeficientes analisados, encontram-se os coeficientes de pressão, ψ , e vazão, ϕ . Na Figura 4.14, mostra-se as curvas obtidas através dos coeficientes adimensionais para a pressão, ψ , e para o coeficiente de vazão, ϕ , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM, utilizando-se as alturas H_l , H_m e H_u separadamente. Observa-se que as curvas possuem o mesmo comportamento e seus valores encontram-se próximos.

O coeficiente de pressão, ψ , apresenta um comportamento aproximadamente retilíneo e constante com valores próximos a 1,2 para coeficientes de vazão, ϕ , na faixa de 0 a

aproximadamente 100, para todas as rotações e alturas. Quando o coeficiente de vazão está acima de 100, as curvas apresentam uma queda nos valores do coeficiente de pressão de modo linear, até valores do coeficiente da vazão próximos de 200. Para valores do coeficiente de vazão acima de 200, os valores dos coeficientes de pressão se distanciam para as diferentes rotações ensaiadas.

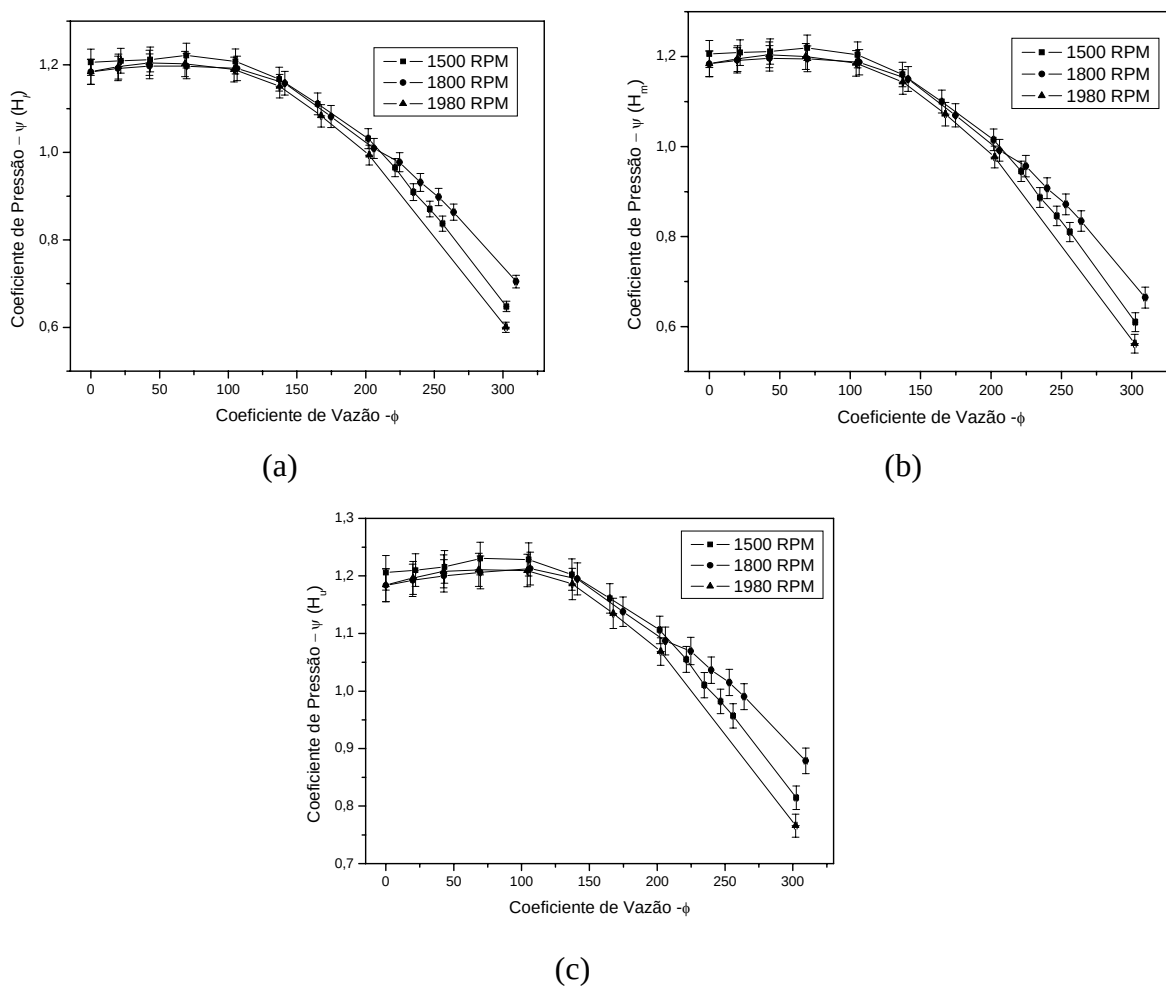


Figura 4.14 - Coeficiente de pressão, $\psi \times$ coeficiente de vazão, ϕ para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM, utilizando as alturas (a) H_l , (b) H_m e (c) H_u .

Observa-se na Figura 4.15 a comparação dos coeficientes de pressão, ψ , em função dos coeficientes de vazão, ϕ , fixando as diversas rotações ensaiadas, como parâmetro de comparação. Observa-se que a altura H_u , encontra-se destacada das curvas relativas às alturas H_l e H_m , mas todas as curvas apresentam o mesmo comportamento, para as diferentes rotações.

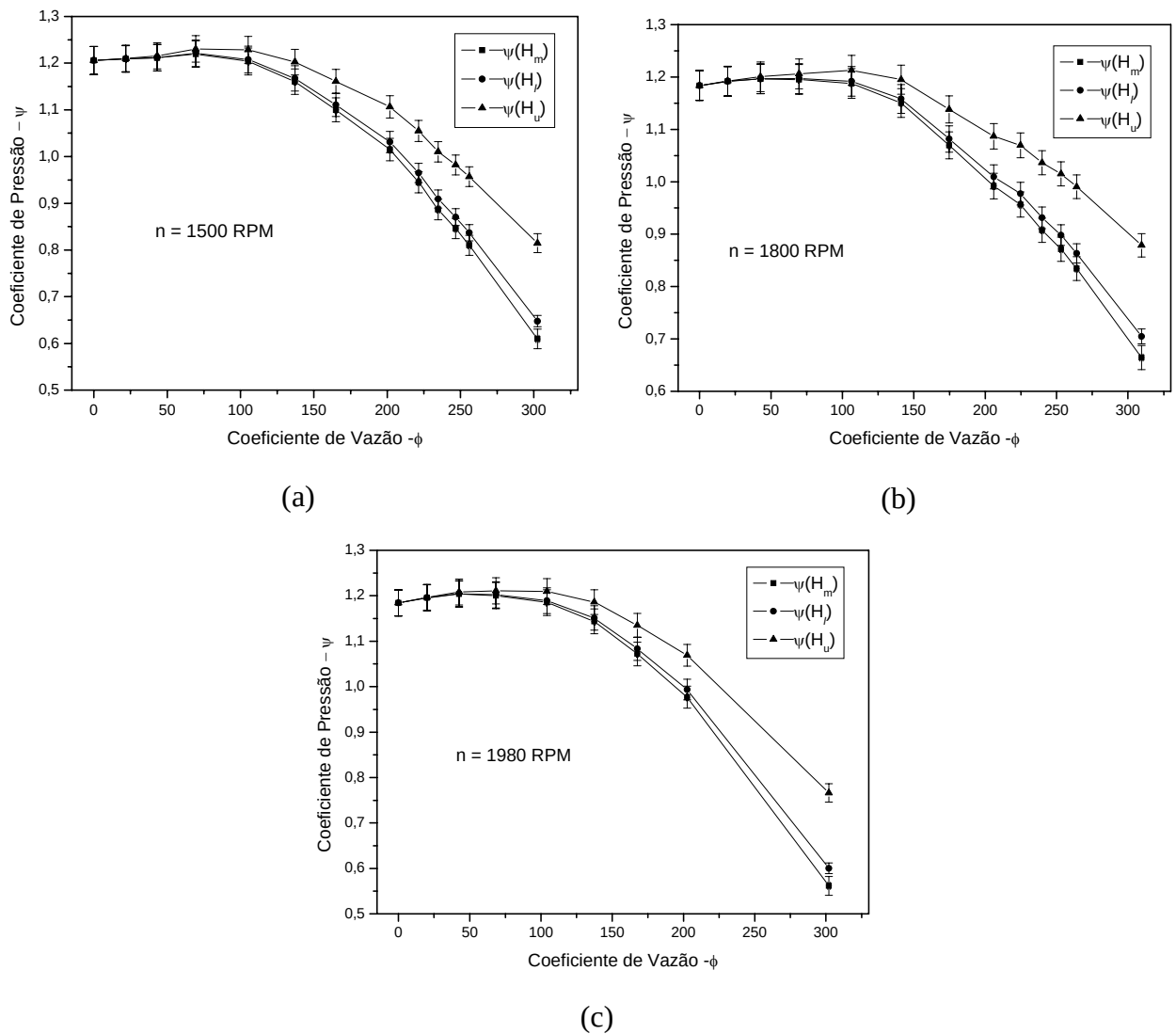


Figura 4.15 - Coeficiente de pressão, $\psi \times$ Coeficiente de vazão, ϕ , utilizando as alturas H_l , H_m e H_u , para as rotações de (a) 1500 RPM, (b) 1800 RPM e (c) 1980 RPM.

Na Figura 4.16, utilizou-se as três alturas nas três rotações acima citadas apenas para visualização geral do comportamento das curvas, sendo que os valores obtidos para as diferentes rotações e diferentes alturas são mais próximos para os valores dos coeficientes de vazão entre 0 e 100, e com o aumento dos coeficientes de vazão, a distância entre os valores obtidos para o coeficiente de pressão aumentam entre as rotações e alturas ensaiadas.

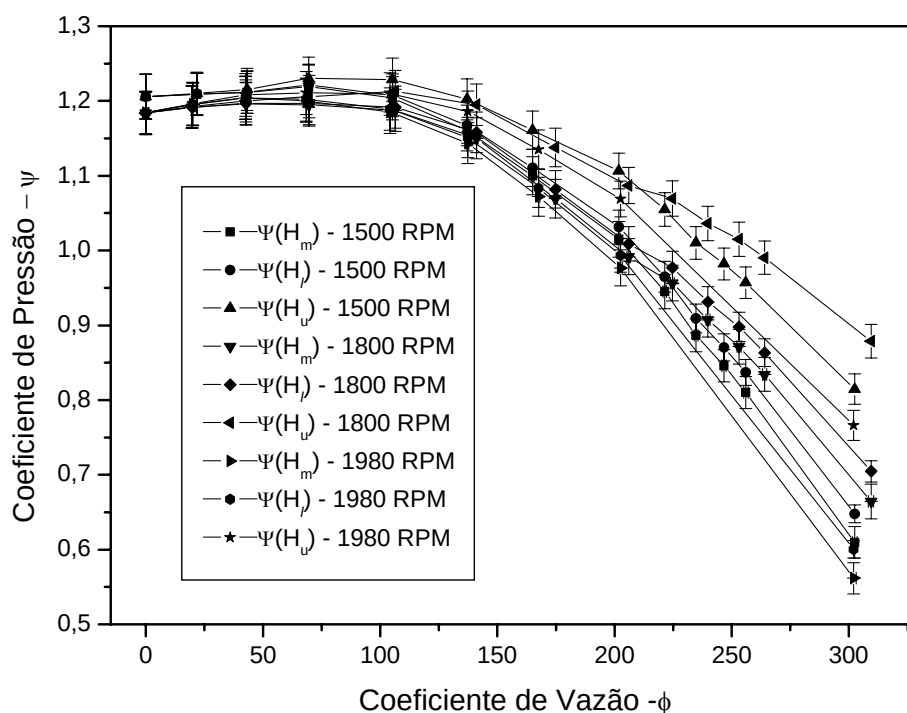


Figura 4.16 - Coeficiente de pressão, $\psi \times$ Coeficiente de vazão, ϕ , utilizando as alturas H_l, H_m e H_u, para as rotações de 1500 RPM, 1800 RPM e 1980 RPM.

Coeficientes de Pressão, ψ , em função da Velocidade Específica, n_q

Observa-se na Figura 4.17, que as curvas obtidas para o coeficiente de pressão, ψ , em função da velocidade específica, n_q , possuem o mesmo comportamento das curvas obtidas para o coeficiente de pressão pelo coeficiente de vazão. Os valores obtidos apresentam queda mais brusca para os coeficientes de pressão, ψ , entre 0,5 e 1,2. Quando se tem velocidades específicas, n_q , maiores do que 10, sendo o comportamento desta queda, praticamente, linear. Os valores obtidos para os coeficientes de pressão estão próximos a 1,2 para velocidades específicas entre 0 e aproximadamente 10, e seu comportamento também é linear e constante.

Os valores obtidos para os coeficientes de pressão utilizando-se a altura H_u são ligeiramente superiores aos valores obtidos utilizando-se as alturas H_l e H_m, que por se tratarem de uma aproximação entre si, conforme descrito no item 4.6, possuem praticamente os mesmos valores, em todas as rotações ensaiadas.

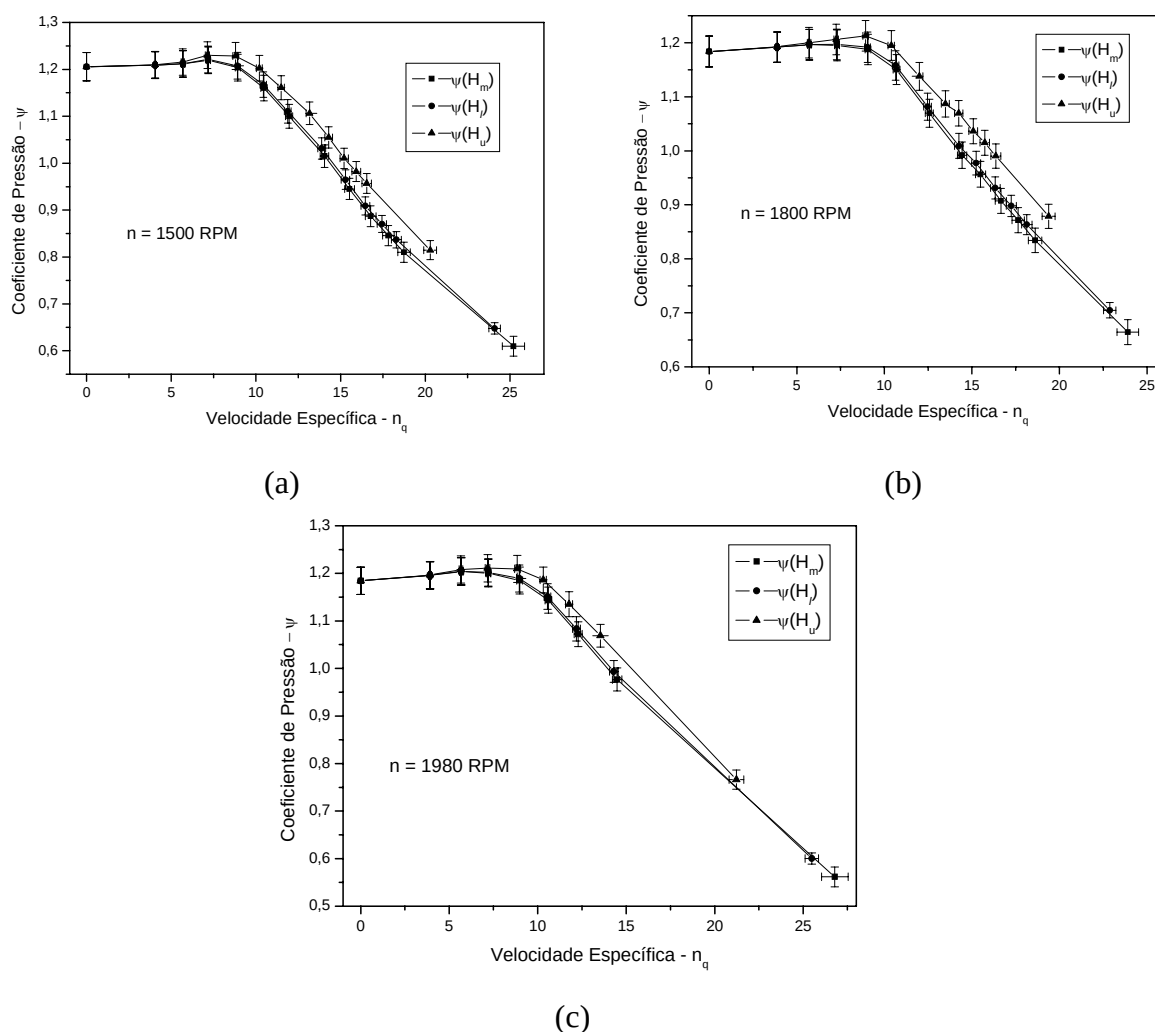


Figura 4.17 - Coeficiente de pressão, $\psi \times$ Velocidade específica, n_q , para as alturas H_l , H_m e H_u com as rotações de (a) 1500 RPM, (b) 1800 RPM e (c) 1980 RPM.

A Figura 4.18 apresenta as curvas das alturas H_l , H_m e H_u separadamente para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM. Observa-se que ocorre uma maior linearidade no comportamento das curvas para rotações diferentes. Os valores obtidos para os coeficientes de pressão, ψ , são praticamente os mesmos, próximos de 1,2, para as três rotações com valores de velocidades específica, n_q , entre 0 e 10 utilizando-se todas as alturas analisadas, (a) H_l , (b) H_m , e (c) H_u . Para valores da velocidade específica maiores do que 10, obtem-se coeficientes de pressão, ψ , cada vez menores e mais distantes entre si para cada altura analisada em todas as rotações. Quando a bomba trabalha com o registro de descarga totalmente aberto, os valores encontrados para as velocidades específicas e para os coeficientes de pressão encontram-se mais distantes entre si para as diferentes rotações. Os valores máximos encontrados para as velocidades específicas

foram aproximadamente 27,5 utilizando-se as altura (a) H_l e (b) H_m , e 22,5 utilizando-se a altura (c) H_u .

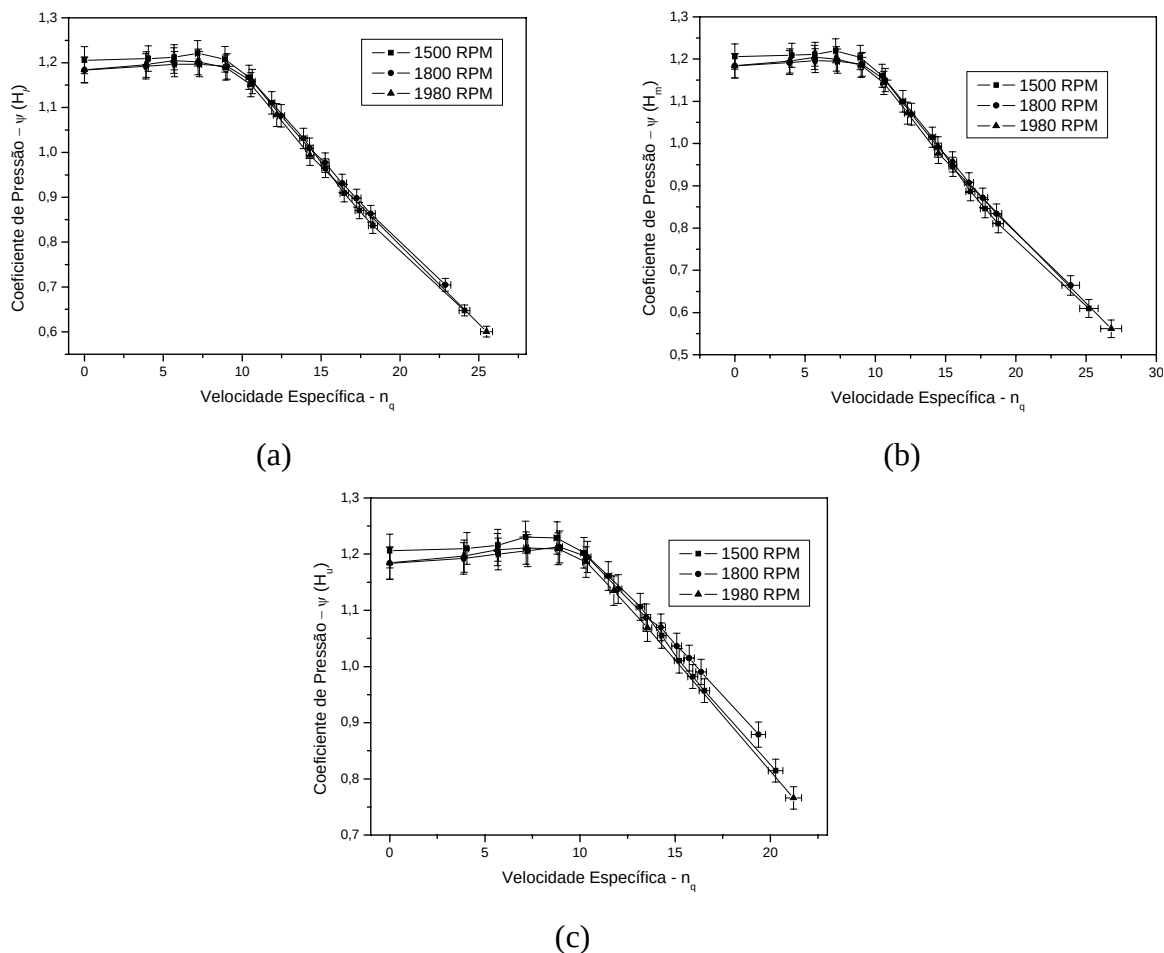


Figura 4.18 – Coeficiente de pressão, $\psi \times$ Velocidade específica, n_q , para as alturas (a) H_l , (b) H_m e (c) H_u , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Na Figura 4.19 obteve-se as curvas para o coeficiente de pressão, ψ , pela velocidade específica, n_q , para todas as alturas e rotações ensaiadas e observa-se que estas apresentaram maior linearidade para os comportamentos quando ocorre a queda nos valores dos coeficientes de pressão, ψ , do que para as curvas obtidas anteriormente para os coeficientes de pressão, ψ , pelos coeficientes de vazão, ϕ .

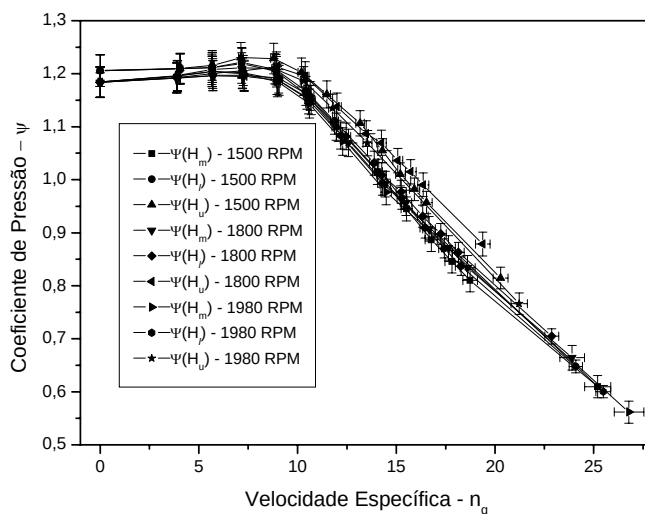


Figura 4.19 – Coeficiente de pressão, $\psi \times$ Velocidade específica, n_q , para as alturas, H_l , H_m e H_u , com as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Vazão, ϕ

Na Figura 4.20 construiu-se as curvas do número de Reynolds em função do coeficiente de vazão, ϕ , utilizando a fórmula $Re = \frac{\omega D^2}{\nu}$, onde ω é a velocidade angular, D o diâmetro do rotor da bomba e ν a viscosidade cinemática do líquido bombeado. Esta equação não depende, explicitamente, da vazão do equipamento. Observa-se que para esta formulação, o número de Re não oscila muito, sendo sua maior variação para a curva obtida para a rotação de 1980 RPM.

Todos os números de Reynolds obtidos são acima de 8×10^6 .

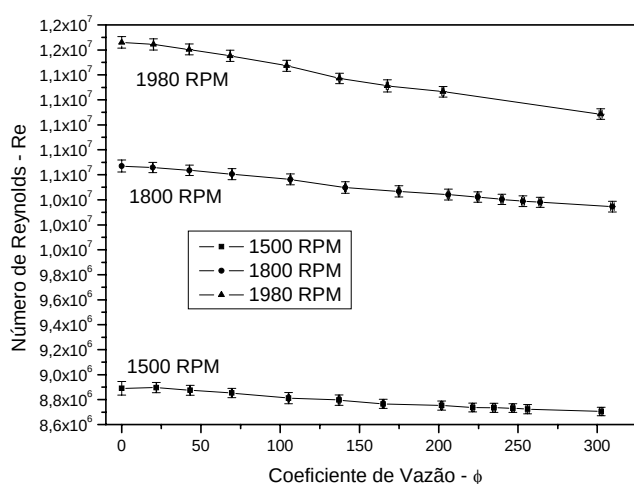


Figura 4.20 – Número de Reynolds, $Re \times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Velocidade Específica, n_q

Na Figura 4.21, semelhante ao item anterior, construiu-se as curvas do número de Reynolds utilizando a fórmula $Re = \frac{\omega D^2}{\nu}$ pelo coeficiente de velocidade específica, n_q . Observa-se que o comportamento das curvas aqui obtidas é semelhante ao obtido nas curvas de número de Reynolds em função do coeficiente da vazão, ϕ .

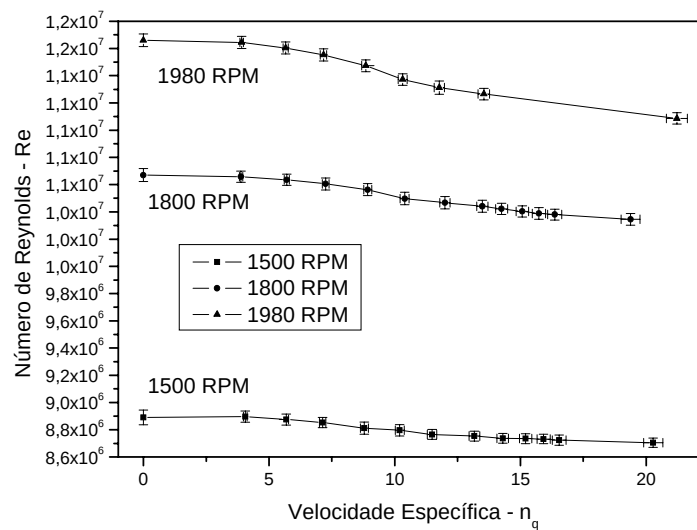


Figura 4.21 – Número de Reynolds, $Re \times$ Coeficiente de Velocidade específica, n_q , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Número de Reynolds Modificado, Re^* em função do Coeficiente de Vazão, ϕ

Na Figura 4.22 construiu-se as curvas do número de Reynolds modificado, Re^* , utilizando a fórmula $Re^* = \frac{Q}{\nu D}$ a qual depende, explicitamente, da vazão do equipamento, pelo coeficiente de vazão, ϕ . Observa-se que para esta formulação, o número de Re^* apresenta um comportamento linear e crescente, com uma variação entre $Re^* = 0$ até aproximadamente $Re^* = 3,5 \times 10^9$, sendo sua maior variação para a curva obtida para a rotação de 1980 RPM.

O menor valor não nulo do número de Reynolds é $Re^* = 1,95 \times 10^8$ obtido para a rotação de 1500 RPM.

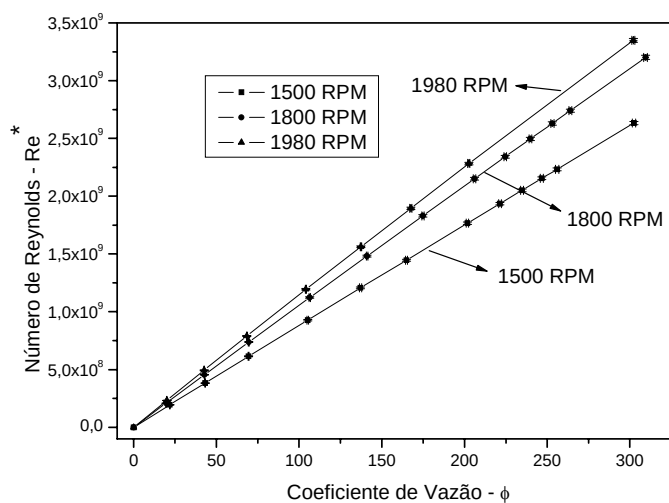


Figura 4.22 – Número de Reynolds Modificado, $Re^* \times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Número de Reynolds Modificado, Re^* em função Coeficiente de Velocidade Específica, n_q

Na Figura 4.23, semelhante ao item anterior, construiu-se as curvas do número de Reynolds utilizando a fórmula $Re^* = \frac{Q}{\nu D}$ a qual depende da vazão do equipamento pelo coeficiente de velocidade específica, n_q . Observa-se que para esta formulação, o número de Re^* possui um comportamento não linear.

Geralmente o número de Reynolds é muito alto, exceto para o caso de vazão nula, implicando que o escoamento é turbulento para todas as situações tratadas experimentalmente.

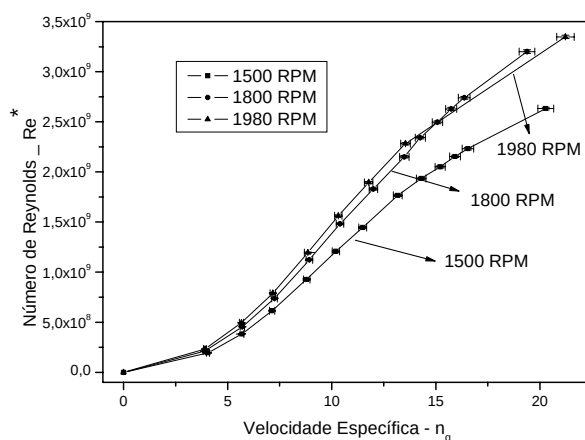


Figura 4.23 – Número de Reynolds, $Re^* \times$ Coeficiente de Velocidade específica, n_q , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

4.8.2 – Resultados Obtidos na Fase 2

Na segunda etapa desta pesquisa, substituiu-se o manovacuômetro que encontrava-se instalado na sucção da bancada por um manômetro de coluna de líquido tipo U, colocando-o na altura da linha de centro da entrada da bomba para a obtenção dos dados referentes à sucção. Posicionou-se o manômetro na mesma altura onde foi instalado o dispositivo para obtenção das tomadas de pressão de descarga, conforme observa-se na Figura 4.24 e repetiram-se os experimentos para a obtenção das alturas manométricas. Os valores lidos na sucção e na descarga foram substituídos, respectivamente, como sendo os valores de p_2 e p_3 .

Esquema geral da bancada - Fase 2

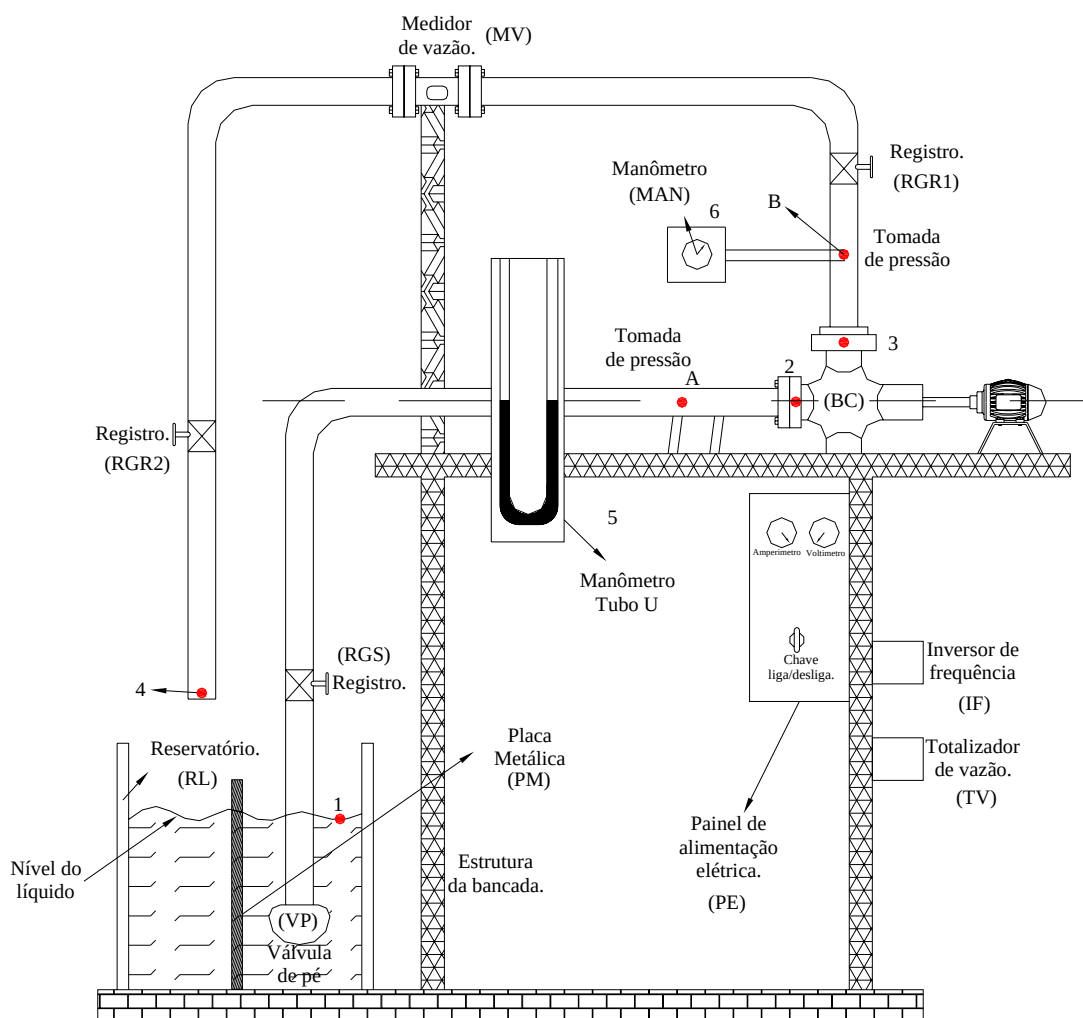


Figura 4.24 – Esquema geral da bancada para os testes efetuados na segunda etapa do projeto.

Calculou-se as pressões na entrada da bomba, p_2 , e na saída da bomba, p_3 , através da análise de energia conforme a seguir.

Análise de energia na sucção da bomba

Devido à necessidade de maior precisão na obtenção dos dados referentes à pressão de sucção, optou-se pela instalação de um manômetro de coluna de líquido tipo U. De acordo com as normas, instalou-se o dispositivo para a obtenção da pressão na sucção da bomba à uma distância de $2D$, duas vezes o diâmetro da tubulação. A pressão lida neste ponto é considerada a pressão na entrada, na região de sucção da bomba. A Figura 4.25 mostra um esquema geral utilizado para o cálculo das pressões.

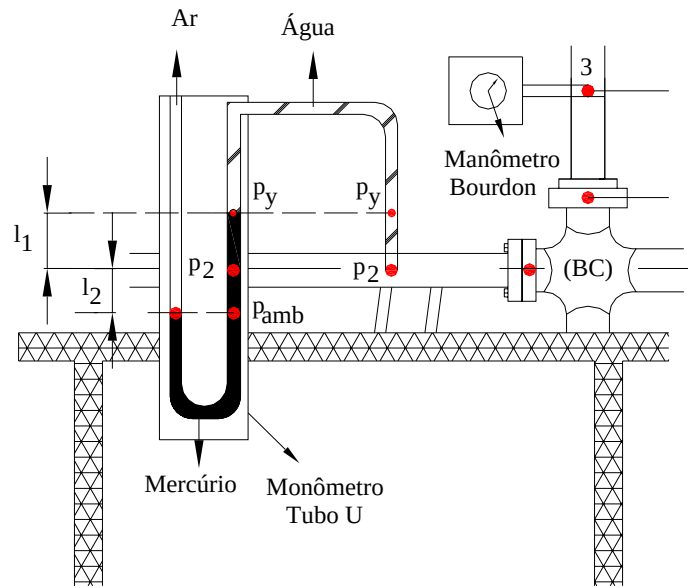


Figura 4.25 – Esquema geral dos manômetros -Fase 2.

Observando-se a Figura 4.25, efetuou-se a análise das condições operacionais, obtendo-se:

$$p_2 = p_y + \rho_{H_2O} g l_1 \quad \rightarrow \quad p_y = p_2 - \rho_{H_2O} g l_1 \quad (4.50)$$

e

$$p_{amb} = p_y + \rho_{HG} g (l_1 + l_2) \quad \rightarrow \quad p_y = p_{amb} - \rho_{HG} g (l_1 + l_2). \quad (4.51)$$

Igualando-se as duas equações, tem-se

$$p_2 = p_{amb} - \rho_{HG} g (l_1 + l_2) + \rho_{H_2O} g l_1. \quad (4.52)$$

Fazendo-se algumas manipulações matemáticas, pode-se concluir que

$$p_2 = p_{amb} - g (l_1 + l_2) (\rho_{HG} - \rho_{H_2O}) - \rho_{H_2O} g l_2 \quad (4.53)$$

ou

$$p_2 = p_{amb} - g \Delta h_s (\rho_{HG} - \rho_{H_2O}) - \rho_{H_2O} g l_2. \quad (4.54)$$

na qual $\Delta h_s = l_1 + l_2$.

Sendo esta, a equação da pressão absoluta na sucção da bomba para a Fase 2.

O manômetro de tubo U foi instalado na mesma altura do ponto de obtenção da pressão, o que indica que as cotas referentes a Z_2 , Z_A e Z_5 terão o mesmo valor numérico, conforme observa-se na Figura 4.26.

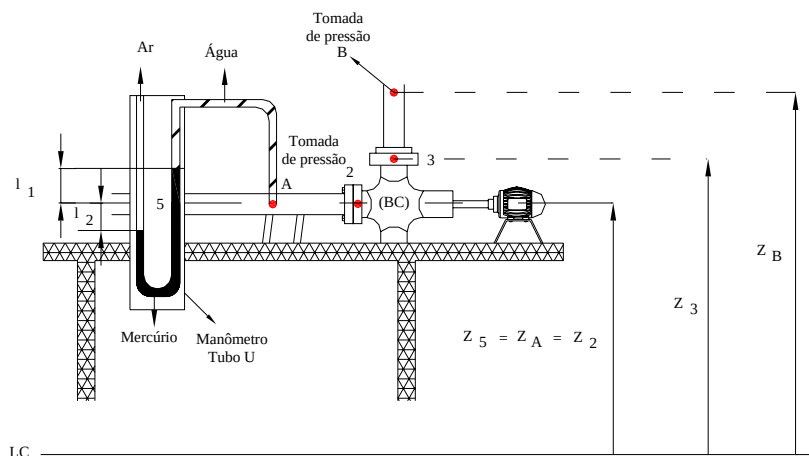


Figura 4.26 – Ilustração das cotas utilizadas na análise de energia na sucção.

Análise de energia na descarga da bomba

Procedeu-se para a análise da energia na descarga da bomba também de acordo com as normas, instalando-se o dispositivo para a obtenção da pressão de descarga à uma distância de 2D, obtendo-se assim a própria pressão lida no manômetro. Na descarga da bomba não trocou-se o manômetro utilizado na Fase 1 desta pesquisa, optando-se por mudar sua posição na mesma altura correspondente à cota de tomada de pressão, conforme observa-se na Figura 4.27, sendo então $Z_B = Z_6$.

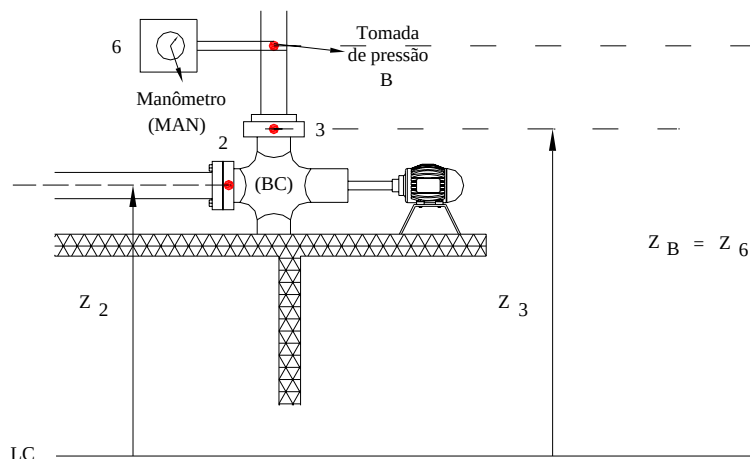


Figura 4.27 – Ilustração das cotas utilizadas na análise de energia na descarga.

Lembra-se que a medida obtida no visor do manômetro é a pressão relativa, e, para os cálculos tem-se que usar a pressão absoluta conforme a equação a seguir

$$p_3 = p_3^m + p_{amb}. \quad (4.55)$$

Após a análise de energia, substituiu-se os valores de p_2 e p_3 nas equações correspondentes da altura manométrica, H_m ; da altura útil, H_u ; e da altura obtida diretamente dos visores dos manômetros, H_l , para rotações diferentes e obteve-se os gráficos referentes a cada uma das rotações conforme observa-se nas figuras a seguir.

Ao substituir os valores das pressões p_2 e p_3 nas equações das alturas H_l , H_m e H_u citadas anteriormente, percebeu-se que nesta etapa da pesquisa, só apareceriam duas curvas características, pois as curvas referentes à H_m e H_l tornam-se as mesmas, por não utilizar-se a análise de energia entre o ponto de obtenção da pressão na tubulação de sucção e descarga, e o ponto de entrada e saída da bomba que segundo as normas, considera-se o mesmo valor.

Com esta modificação encontrou-se as novas equações correspondentes para as alturas H_m e H_u conforme abaixo:

$$H_m = \frac{p_3^m + g\Delta h_s(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) + \rho_{H_2O}gl_2}{\rho g} + Z_3 - Z_2, \quad (4.56)$$

$$H_u = \frac{p_3^m + g\Delta h_s(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) + \rho_{H_2O}gl_2}{\rho g} + \frac{V_3^2 - V_2^2}{2g} + Z_3 - Z_2. \quad (4.57)$$

Alturas H_l , H_m e H_u em função da Vazão, Q ; Coeficiente de Pressão, ψ , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ ; e Coeficiente de Pressão, ψ em função da Velocidade Específica, n_q

Com os valores calculados para as alturas H_m e H_u , em rotações diferentes, efetuou-se os gráficos referentes a cada uma das rotações, conforme observa-se nas figuras a seguir.

Alturas, H_l , H_m e H_u em função da Vazão, Q

Observa-se na Figura 4.28, semelhante ao que encontrou-se na Fase 1, Figura 4.9, que as curvas características tem sempre o mesmo padrão, sendo que nesta Fase 2, utilizou-se um manômetro de coluna líquida tipo U para tomada de pressão na sucção. Rotações maiores

apresentam alturas e vazões maiores para a mesma bomba centrífuga em qualquer uma das alturas calculadas, H_m ou H_u . Nestas curvas a bomba trabalha em condições normais de operação com o registro de sucção totalmente aberto e sem cavitação.

Conforme mencionado anteriormente, nesta fase da pesquisa, encontra-se apenas as alturas H_m , sendo identificada em todos os gráficos para esta fase como sendo a altura manométrica, e a altura útil H_u .

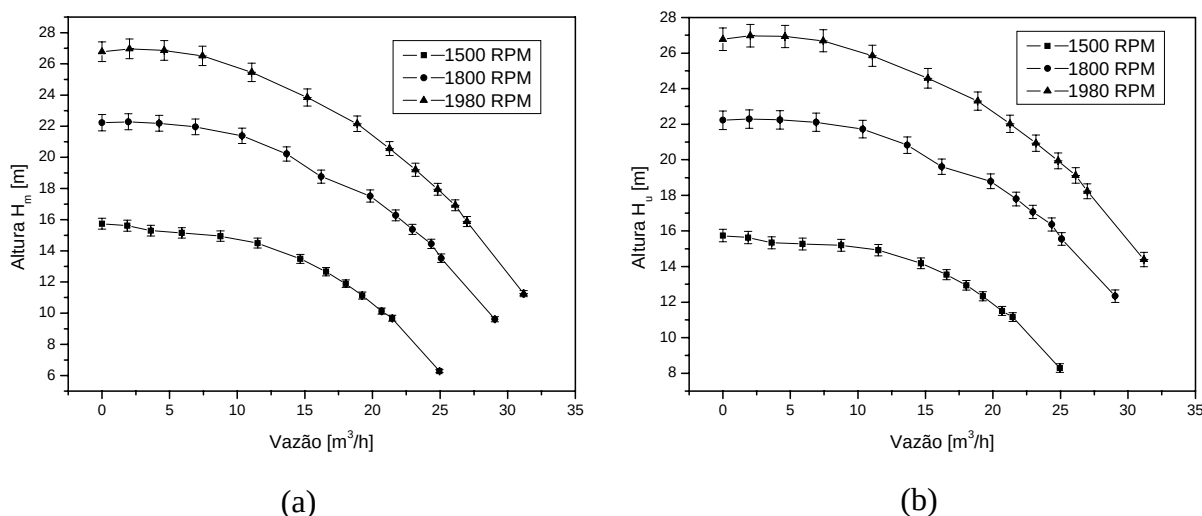


Figura 4.28 – Alturas (a) H_m e (b) $H_u \times$ Vazão, Q , utilizando manômetro tubo U na sucção, para rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Na Figura 4.29, observa-se que a altura útil, H_u , apresenta sempre valores maiores quando comparada com a altura H_m , isto por ter em sua formulação o adicional referente as energias cinéticas fornecidas pelas velocidades na entrada e na saída da bomba, semelhante à análise efetuada na primeira fase. Devido a este acréscimo, percebe-se que quanto maior a vazão da bomba, maior é a diferença entre as alturas em comparação, pois maiores serão as velocidades. Observa-se também através da Figura 4.29, que quanto maior a rotação da bomba, mais estável ela se torna, sem oscilações de alturas com o aumento das vazões.

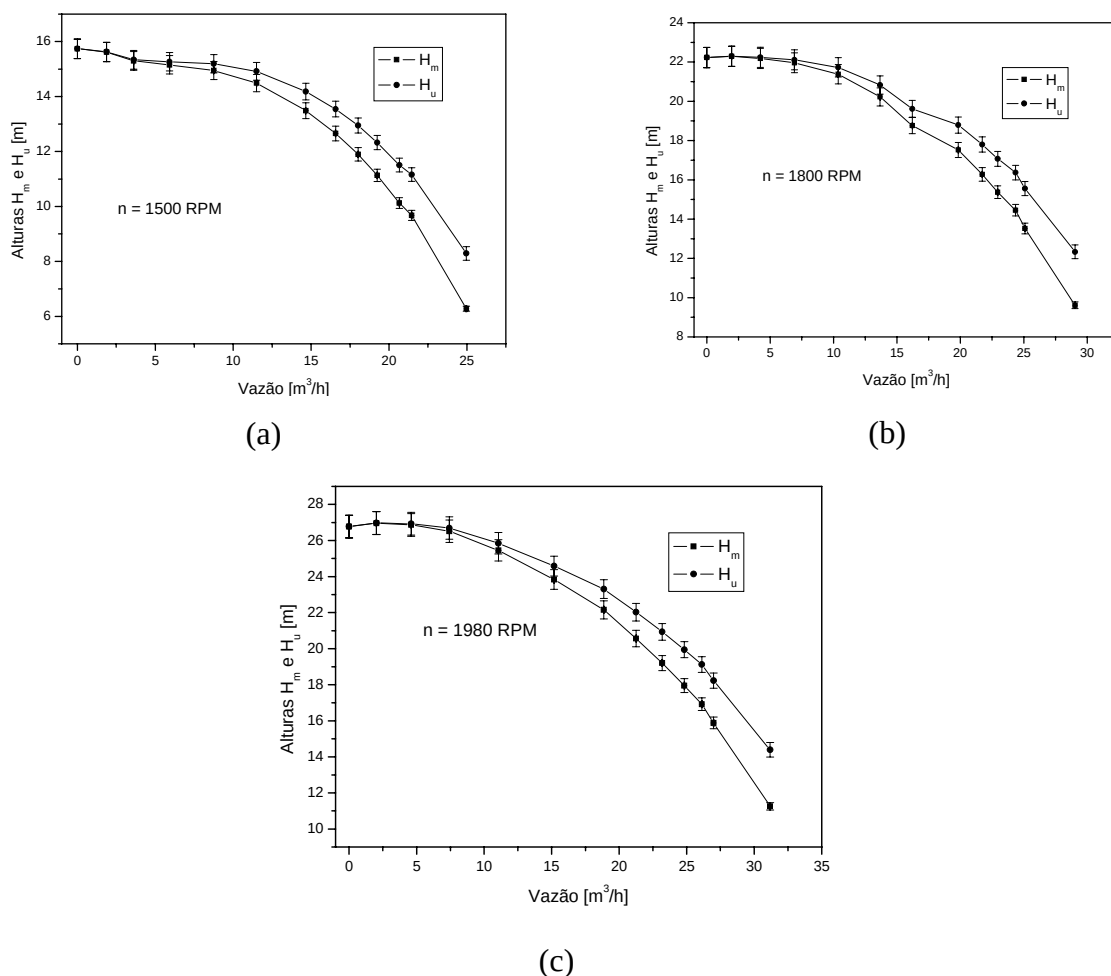


Figura 4.29 - Alturas H_m , $H_u \times$ Vazão, Q para rotações de (a) 1500 RPM, (b) 1800 RPM e (c) 1980 RPM.

Adicionalmente, na segunda fase desta pesquisa, obtiveram-se as curvas de 1100, 1300, 1600 e 1900 RPM que não foram obtidas anteriormente durante os ensaios realizados na Fase 1. Optou-se aqui por um número maior de rotações ensaiadas para uma melhor análise do comportamento da bomba.

Na Figura 4.30, construiu-se as curvas referentes às alturas H_m e H_u para todas as rotações conjuntamente, e, observa-se que para pontos de baixas vazões, as duas alturas H_m e H_u possuem praticamente o mesmo valor em cada rotação ensaiada, e aumentando-se a vazão bombeada, aumenta-se a distância entre os valores da altura H_u e da altura H_m , devido a influência da soma das parcelas de energia cinética gerada pelas velocidades na entrada e na saída da bomba em sua formulação, semelhante à Fase 1. Na construção destas curvas, a bomba trabalhou sempre com o registro de sucção totalmente aberto e controlando-se a vazão bombeada através do registro de descarga localizado próximo ao reservatório na tubulação de descarga,

sendo que para estes casos, devido à instalação do equipamento na bancada, a bomba opera para estas condições de trabalho sem o efeito da cavitação.

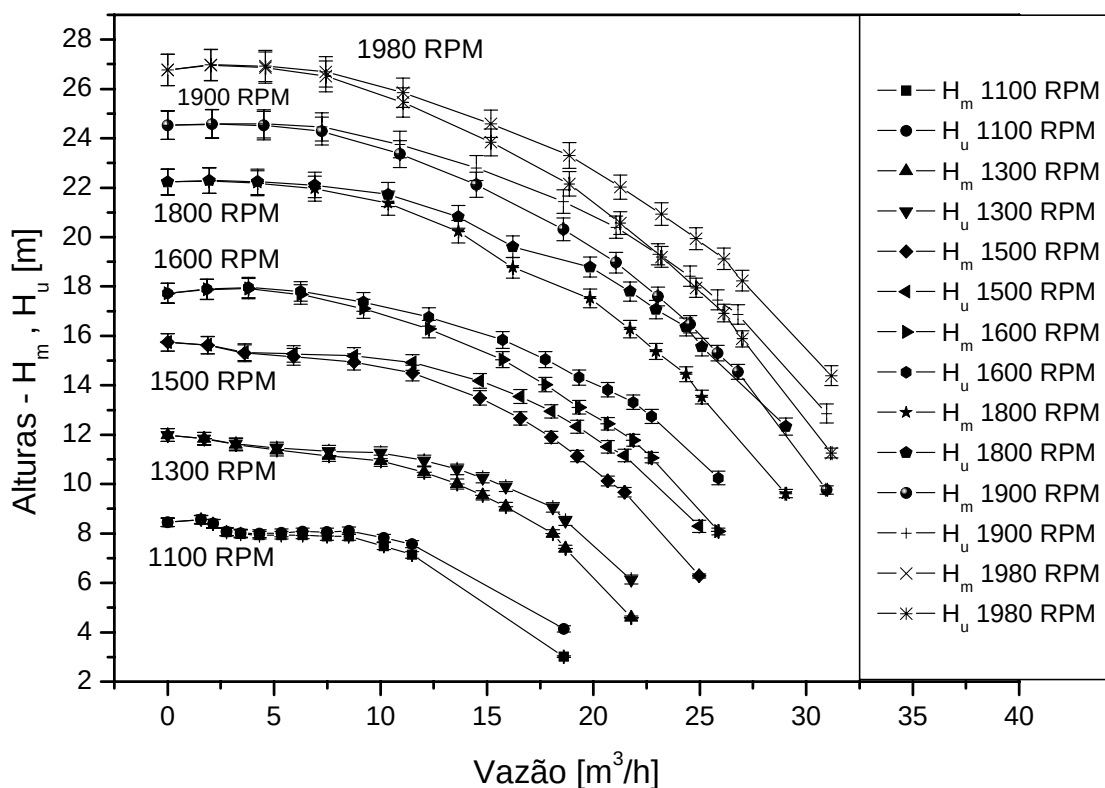


Figura 4.30 – Alturas, H_m e $H_u \times$ Vazão, Q , para rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.

Na Figura 4.31, mostra-se o comportamento das curvas de 1100, 1300, 1500 e 1800 RPM com o registro de sucção fechado em 11, 12, 13 e 14 voltas, e observa-se o comportamento da bomba centrífuga. É nítido que à medida que se fechou o registro de sucção, a altura H_u diminuiu, atravessando mais precocemente a curva calculada para a representação da curva do equipamento com queda na altura H_u em 3%.

Observa-se que quanto maior o número de voltas fechando-se o registro de sucção, menor é a altura H_u do equipamento e maior a possibilidade do mesmo operar com cavitação, pois segundo as normas, quando o equipamento atinge uma queda de 3% na altura útil com vazão constante, já iniciou-se o fenômeno da cavitação. Após a altura H_u ultrapassar a curva com queda de 3%, observa-se que ocorre uma queda brusca em seus valores.

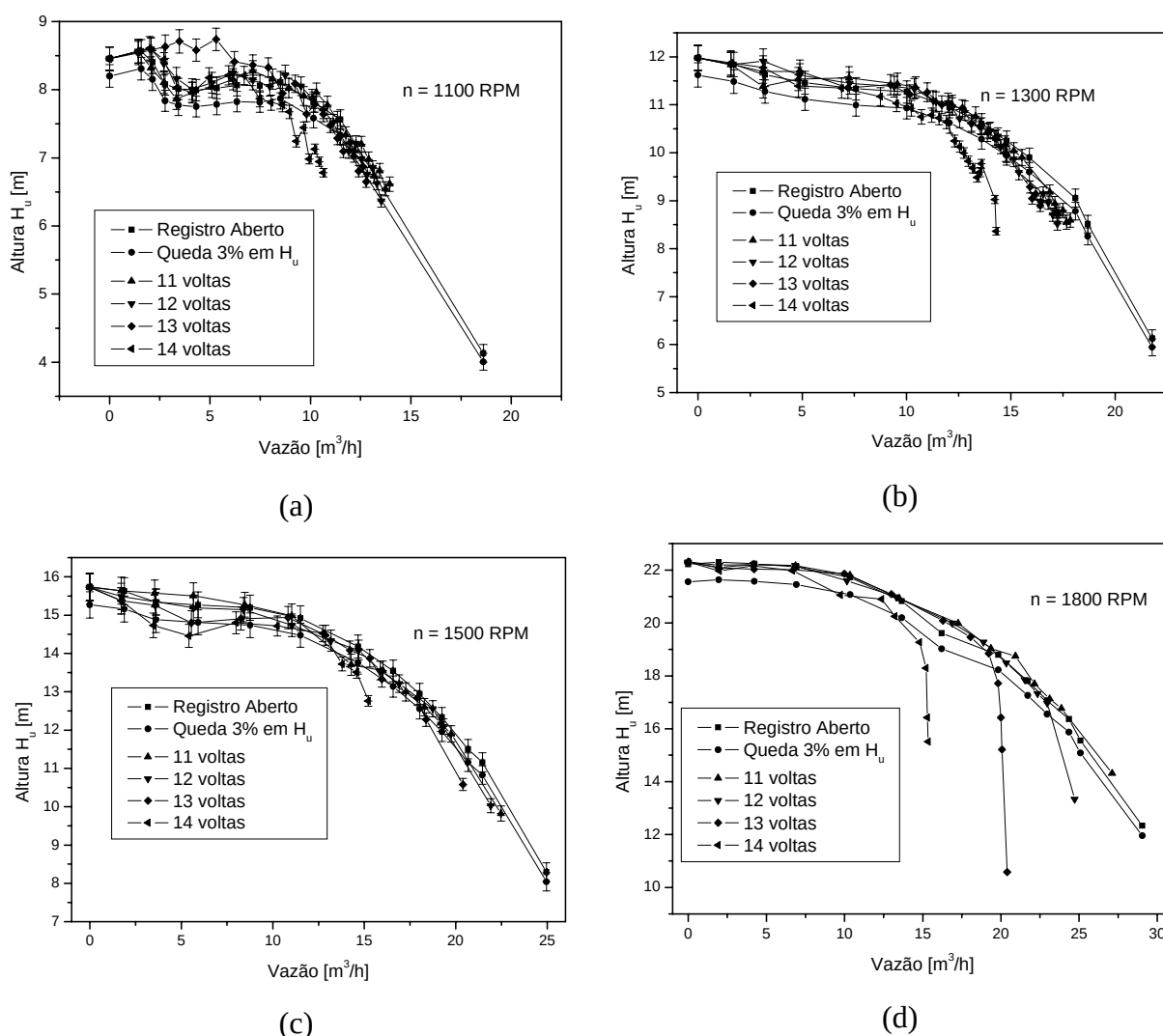


Figura 4.31 – Altura, $H_u \times$ Vazão, Q , para a bomba ensaiada com o registro de sucção fechado em 11, 12, 13 e 14 voltas em (a) 1100 RPM, (b) 1300 RPM, (c) 1500 RPM e (d) 1800 RPM.

Também observa-se na Figura 4.31, que no início as curvas características obtidas para as rotações de 1100, 1300 e 1500 RPM, a altura H_u apresenta uma queda em seus valores, na região próxima a $5\text{m}^3/\text{h}$, provavelmente ocasionada pela recirculação do fluido no bocal de sucção da bomba, fato este que pode ocorrer quando se tem equipamentos funcionando com vazões abaixo da vazão nominal para a qual o equipamento foi projetado.

Este fato pode ter sido agravado na obtenção dos valores de H_u nesta etapa do projeto devido ao fechamento parcial do registro de sucção.

Coeficientes de pressão, ψ em função do Coeficiente de vazão, ϕ

Para as Figuras 4.32, 4.33 e 4.34 referentes às curvas obtidas para o coeficiente de pressão, $\psi \times$ coeficiente de vazão, ϕ , valem os mesmos comentários efetuados para os resultados obtidos na primeira fase desta pesquisa. Nesta fase, observa-se na Figura 4.32, uma queda do coeficiente de pressão, ψ , na faixa de valores de coeficiente de vazão, ϕ , próximos de 50 a 100 para as rotações de 1100, 1300 e 1500 RPM.

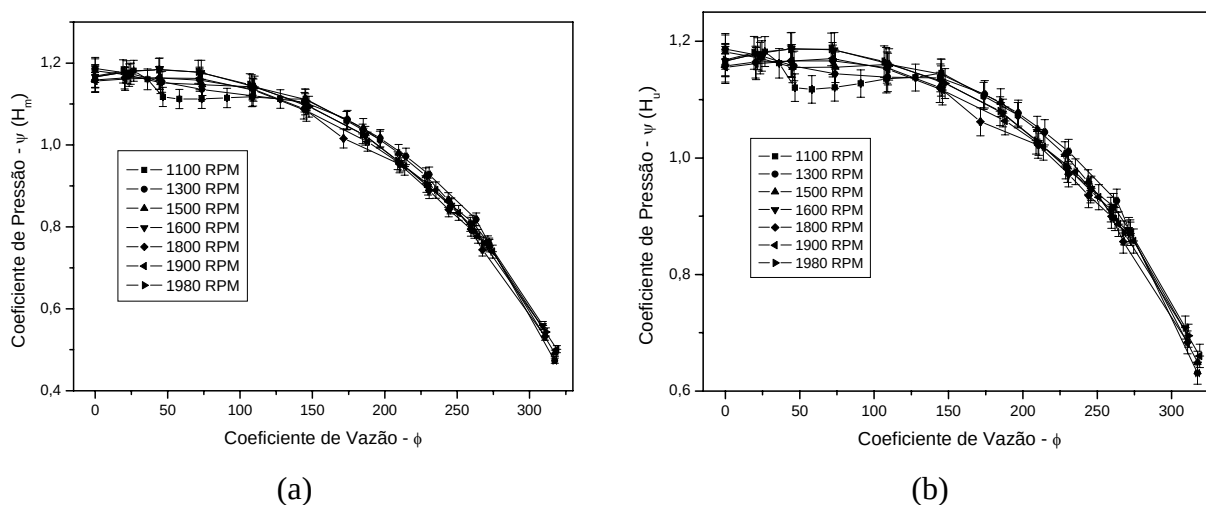


Figura 4.32 - Coeficiente de pressão, $\psi \times$ Coeficiente de vazão, ϕ , para rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM utilizando as alturas (a) H_m e (b) H_u .

Na Figura 4.33, observa-se que para as rotações de 1800 e 1980 RPM não surgiram as quedas nos valores do coeficiente de pressão, ψ , encontradas nas curvas de menor rotação, encontrando-se apenas uma instabilidade na curva de 1800 RPM para valores do coeficiente de vazão, ϕ , na faixa de 150 à 250.

O coeficiente de pressão, ψ , apresenta um comportamento retilíneo e constante com valores próximos a 1,2 para coeficientes de vazão, ϕ , na faixa de 0 a aproximadamente 100 para a rotação de 1800 RPM. Nas rotações de 1500 RPM e 1980 RPM, os valores dos coeficientes de pressão também estão próximos a 1,2, mas com um comportamento não tão linear mas com coeficientes de pressão praticamente iguais para as curvas utilizando as alturas H_m e H_u em todas as rotações. Quando o coeficiente de vazão está acima de 100, as curvas apresentam uma queda do coeficiente de pressão de modo linear, até coeficientes de vazão próximos de 200, e para valores do coeficiente de vazão acima de 200, os valores dos coeficientes de pressão se distanciam um pouco mais para as diferentes rotações ensaiadas quando se compara as alturas H_m e H_u , semelhante ao ocorrido para as curvas obtidas na Fase 1.

Para coeficientes de vazão sobre a faixa, de 0 a 300, uma curva que aproxima bem todos os dados é um polinômio de segundo grau.

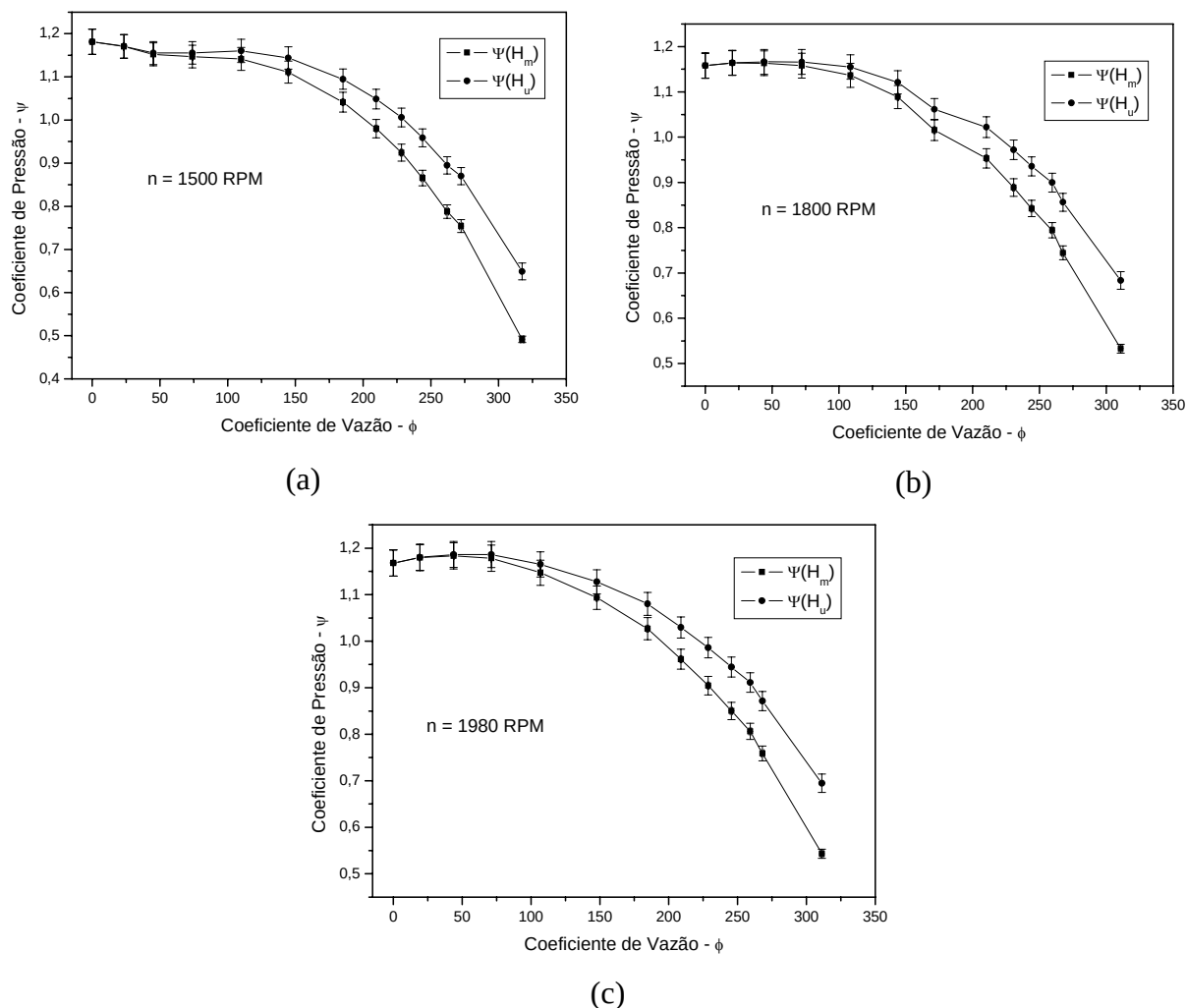


Figura 4.33 - Coeficiente de pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de vazão, ϕ , utilizando-se as alturas H_m e H_u , para as rotações de (a) 1500 RPM, (b) 1800 RPM e (c) 1980 RPM.

Na Figura 4.34 construiu-se as curvas de coeficiente de pressão, ψ , pelo coeficiente de vazão, ϕ , para as alturas H_m e H_u conjuntamente para todas as rotações ensaiadas nesta etapa da pesquisa.

Na Figura 4.34, utilizou-se as alturas nas rotações acima citadas apenas para visualização geral do comportamento das curvas, sendo que os valores obtidos para as diferentes rotações e diferentes alturas são mais próximos para os valores dos coeficientes de vazão entre 0 e 100. Com o aumento dos coeficientes de vazão, a distância entre os valores obtidos para o coeficiente de pressão aumenta entre as rotações e alturas ensaiadas. Observa-se que para valores do

coeficiente de vazão acima de 200, as curvas relativas à altura H_m separam-se das curvas relativas à altura H_u .

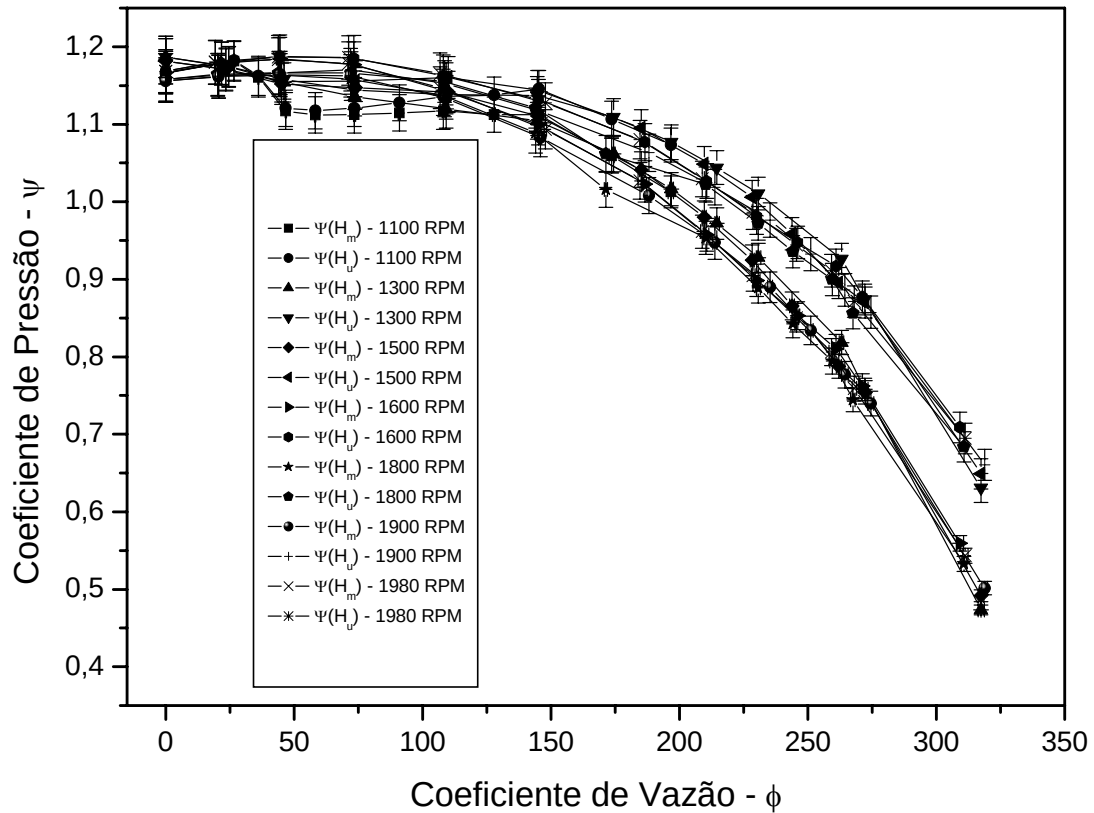


Figura 4.34 - Coeficiente de pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de vazão, ϕ , utilizando-se as alturas H_m e H_u , para as rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.

Coeficientes de pressão, ψ em função do Coeficiente de velocidade específica, n_q

Na Figura 4.35, observa-se que as curvas traçadas para o coeficiente de pressão, ψ , pelo coeficiente de velocidade específica, n_q , nesta Fase 2, apresentam comportamento semelhante ao obtido na Fase 1. Na Figura 4.35 item (a) 1500 RPM, os valores obtidos para o coeficiente de pressão, ψ , iniciam-se com uma pequena queda para valores da velocidade específica, n_q , de 0 à 7, mantêm-se constantes até $n_q = 10$, e iniciam uma queda brusca mas de forma linear para valores acima de $n_q = 10$. Na Figura 4.35 item (b) 1800 RPM, os valores do coeficiente de pressão, ψ , apresentam-se praticamente constantes para valores de n_q até aproximadamente 8, e para valores de n_q acima de aproximadamente 8, inicia-se a queda nos valores do coeficiente de pressão, ψ , para esta rotação ensaiada. No item (c) 1980 RPM da Figura 4.35, observa-se um

ligeiro aumento nos valores do coeficiente de pressão, ψ , para valores de n_q próximos a 3 e a queda brusca inicia-se para valores de velocidade específica, n_q , próximos e superiores a 8.

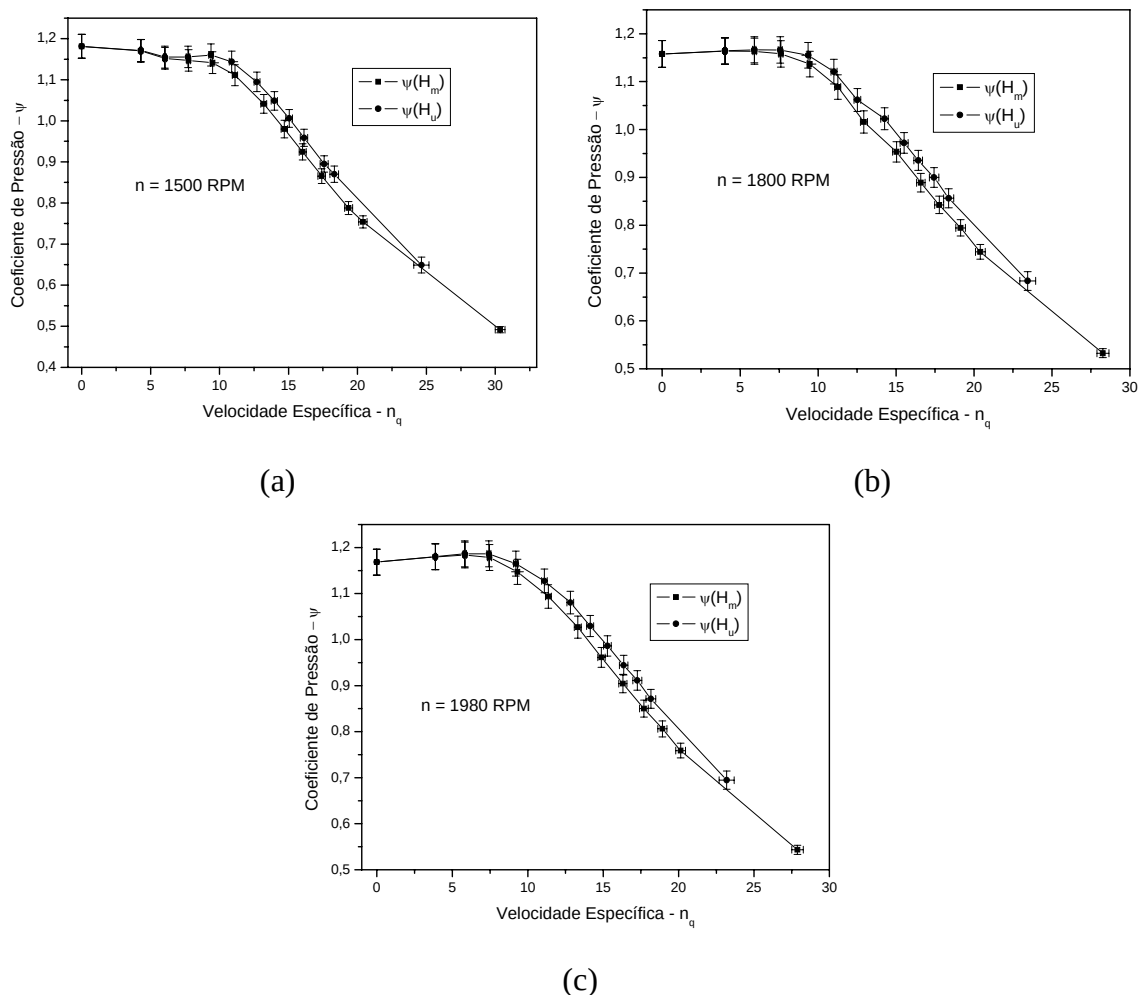
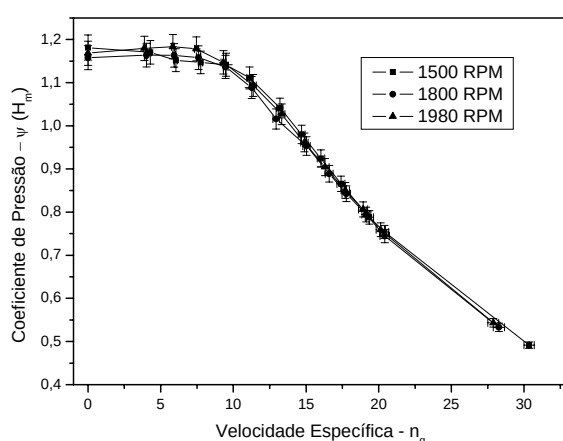
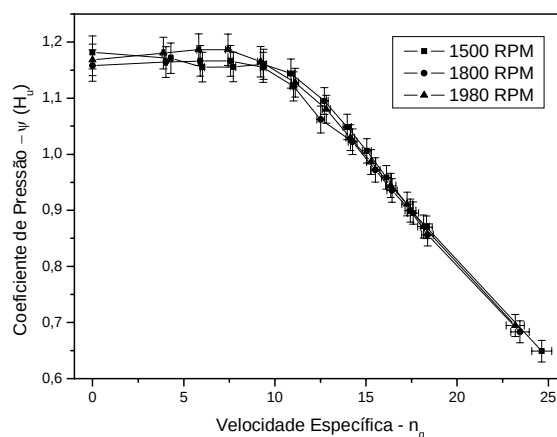


Figura 4.35 - Coeficiente de pressão, ψ , $\times$ Velocidade específica, n_q , utilizando-se as alturas H_m e H_u para as rotações de (a) 1500 RPM, (b) 1800 RPM, e (c) 1980 RPM.

Observa-se na Figura 4.36 que para valores da velocidade específica, n_q , entre 0 e aproximadamente 10, os valores obtidos para o coeficiente de pressão, ψ , apresentam uma pequena dispersão entre as rotações ensaiadas, e que para valores da velocidade específica, n_q , acima de 10, esta dispersão diminui e os valores do coeficiente de pressão, ψ , tem uma queda brusca, mas com comportamento linear tanto para as curvas obtidas utilizando-se a altura (a) H_m , quanto para as curvas utilizando a altura (b) H_u nas três rotações ensaiadas.



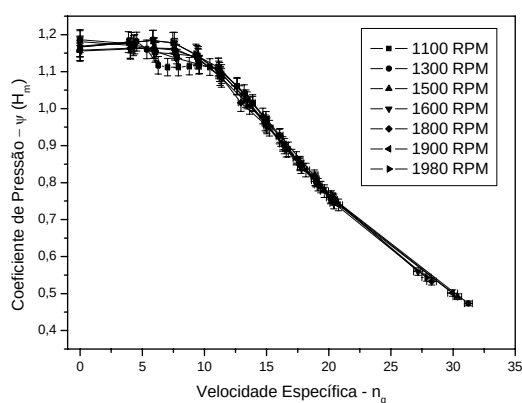
(a)



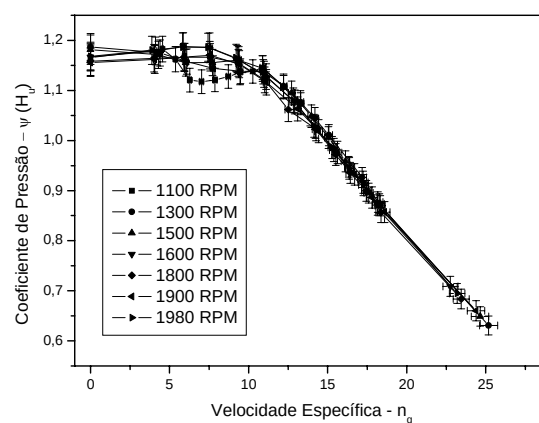
(b)

Figura 4.36 - Coeficiente de pressão, ψ , $\times$ Velocidade específica, n_q , para as alturas (a) H_m e (b) H_u , nas rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Na Figura 4.37 itens (a) e (b) observa-se que para valores da velocidade específica n_q entre 5 e 12,5 ocorreu uma queda nos valores do coeficiente de pressão, ψ , para as rotações de 1100, 1300 e 1500 RPM para as duas alturas, H_m e H_u , tornando seus valores mais dispersos. Para valores da velocidade específica, n_q , acima de 12,5, os valores do coeficiente de pressão, ψ , tornam-se menos dispersos para todas as rotações ensaiadas, iniciando-se uma queda com comportamento linear.



(a)



(b)

Figura 4.37 - Coeficiente de pressão, ψ , $\times$ Velocidade específica, n_q , para as alturas (a) H_m e (b) H_u nas rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.

Na Figura 4.38 construiu-se as curvas de coeficiente de pressão, ψ , pela velocidade específica, n_q , para as curvas ensaiadas utilizando-se as duas alturas, H_m e H_u , em todas as

rotações e observa-se que para valores de velocidade específica, n_q , entre 0 e aproximadamente 12,5, todas as curvas apresentaram valores para o coeficiente de pressão, ψ , entre 1,1 e 1,2. Para valores de velocidade específica entre aproximadamente 12,5 e 22,5 os valores do coeficiente de pressão apresentaram uma queda linear variando entre 1,1 e 0,75, e, para valores de velocidade específica, n_q , entre 22,5 à 35, os valores do coeficiente de pressão, ψ , variaram de aproximadamente 0,75 à 0,45, apresentando sempre um comportamento linear entre as fases analisadas.

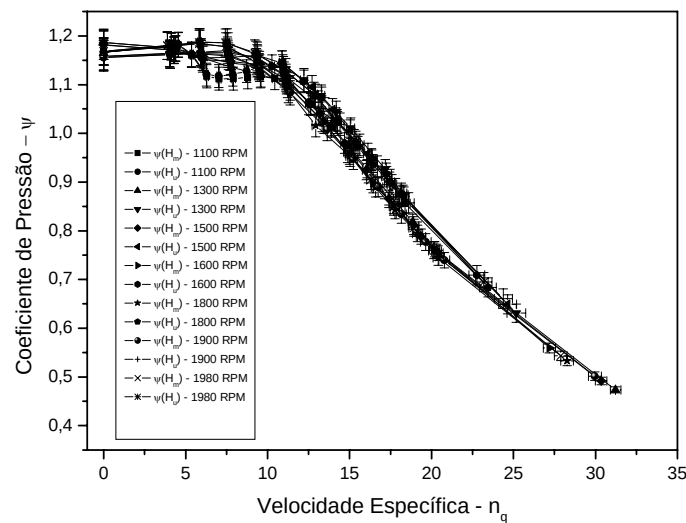


Figura 4.38 - Coeficiente de pressão, ψ , $\times$ Velocidade específica, n_q , para as alturas H_m e H_u nas rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.

Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Vazão, ϕ

Semelhante ao obtido na Fase 1, na Figura 4.39 construiu-se as curvas do número de Reynolds utilizando a fórmula $Re = \frac{\omega D^2}{\nu}$, a qual não depende explicitamente da vazão do equipamento, pelo coeficiente de vazão, ϕ . Observa-se que para esta formulação, o número de Re não oscila muito, sendo sua maior variação para a curva obtida para a rotação de 1980 RPM. Para as curvas de rotações mais baixas, o comportamento dos valores de Re são mais constantes. Esta variação ocorre devido à utilização de um motor elétrico assíncrono, sendo que quanto maior a carga aplicada em seu eixo, menor a rotação fornecida pelo mesmo. Embora a variação na rotação seja, numericamente, pequena.

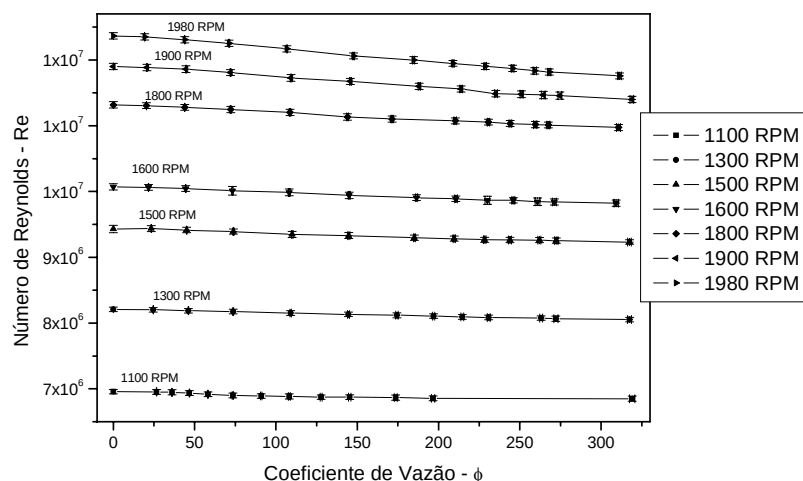


Figura 4.39 – Número de Reynolds, $Re \times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.

Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de velocidade específica, n_q .

Na Figura 4.40, semelhante ao item anterior, construiu-se as curvas do número de Reynolds, utilizando a fórmula $Re = \frac{\omega D^2}{\nu}$, pelo coeficiente de velocidade específica, n_q . Semelhante ao analisado anteriormente, o comportamento destas curvas é semelhante ao comportamento das curvas obtidas do número de Reynolds, Re , em função do coeficiente de vazão, ϕ .

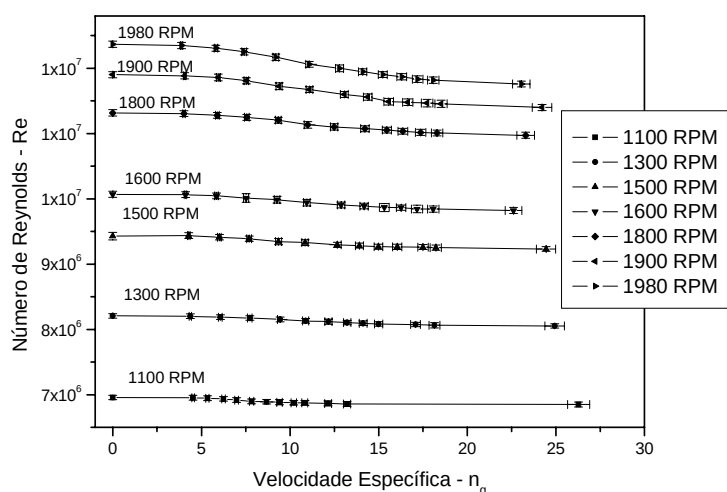


Figura 4.40 – Número de Reynolds, $Re \times$ Coeficiente de Velocidade específica, n_q , para as rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.

Número de Reynolds Modificado, Re^* em função do Coeficiente de Vazão, ϕ .

Na Figura 4.41 construiu-se as curvas do número de Reynolds, Re^* , utilizando a fórmula $Re^* = \frac{Q}{\nu D}$, a qual depende da vazão do equipamento, pelo coeficiente de vazão, ϕ . Observa-se que para esta formulação, o número de Re^* apresenta um comportamento linear e crescente, com uma variação entre $Re^* = 0$ até aproximadamente $Re^* = 3,5 \times 10^9$, sendo sua maior variação para a curva obtida para a rotação de 1980 RPM semelhante ao obtido na Fase 1.

O menor número de Reynolds não nulo foi de $Re^* = 1,85 \times 10^8$.

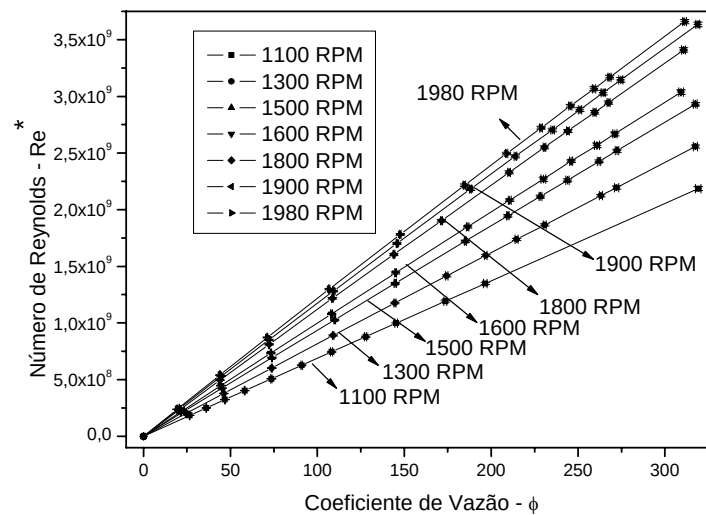


Figura 4.41 – Número de Reynolds, $Re^* \times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Número de Reynolds Modificado, Re^* , em função Coeficiente de Velocidade Específica, n_q .

Na Figura 4.42, semelhante ao item anterior, construiu-se as curvas do número de Reynolds, utilizando a fórmula $Re^* = \frac{Q}{\nu D}$, a qual depende da vazão do equipamento, pelo coeficiente de velocidade específica, n_q . Observa-se aqui que o comportamento das curvas é semelhante ao analisado anteriormente, sendo não linear.

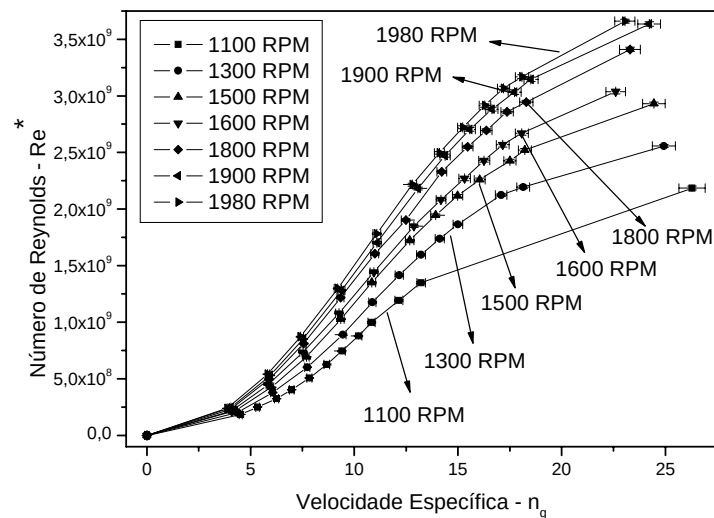


Figura 4.42 – Número de Reynolds, $Re^* \times$ Coeficiente de Velocidade específica, n_q , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

4.8.3 – Gráficos Comparativos entre as duas Fases

Após as análises efetuadas separadamente para cada fase desta pesquisa, resolveu-se comparar as curvas obtidas em cada fase para verificação do seu comportamento como um todo.

Alturas, H_m e H_u em função da Vazão, Q

Na Figura 4.43, observa-se que os valores obtidos para as curvas das alturas, H_m e H_u , pela vazão, Q , nas diferentes rotações, encontram-se próximos para as vazões iniciais, entre $Q = 0 \text{ m}^3/\text{h}$ e aproximadamente $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$. Para vazões maiores, a distância entre as curvas obtidas para as alturas H_m e H_u , se distanciam uma da outra em cada rotação separadamente, devido ao acréscimo da energia cinética gerado pelas velocidades do fluido na tubulação de entrada e saída da bomba, conforme mencionado anteriormente, nas curvas utilizando-se a altura útil H_u nas duas fases desta pesquisa.

Para a curva de 1500 RPM, observa-se que as curvas encontram-se com uma pequena dispersão em seus valores para vazões entre $Q = 0 \text{ m}^3/\text{h}$ e aproximadamente $Q = 12,5 \text{ m}^3/\text{h}$, utilizando-se as alturas H_m nas duas fases, e entre $Q = 0 \text{ m}^3/\text{h}$ e aproximadamente $Q = 17,5 \text{ m}^3/\text{h}$, utilizando-se as alturas H_u também nas duas fases. Após a vazão de $Q = 12,5 \text{ m}^3/\text{h}$, as alturas H_m obtidas nas duas fases, apresentam-se com o mesmo comportamento e uma dispersão menor entre seus valores. Observa-se o mesmo comportamento para as curvas de 1980 RPM obtidas nas duas fases, mudando-se apenas as vazões onde as curvas se aproximam.

Para as curvas de 1800 RPM observa-se uma dispersão maior entre os valores obtidos nas duas fases, não obtendo-se a aproximação observada anteriormente para as outras duas rotações ensaiadas, entre as respectivas alturas.

Observa-se também na Figura 4.43 que para todas as rotações ensaiadas, as curvas obtidas na Fase 1, utilizando-se o manovacuômetro Bourdon na tubulação de sucção da bomba, apresenta valores para as alturas H_m e H_u maiores do que os obtidos na Fase 2 desta pesquisa onde utilizou-se um manômetro de coluna de líquido tipo U.

Embora mais delicado para se utilizar, o manômetro de tubo U é mais preciso e leva a melhores resultados que os obtidos para manômetros e manovacuômetros do tipo Bourdon.

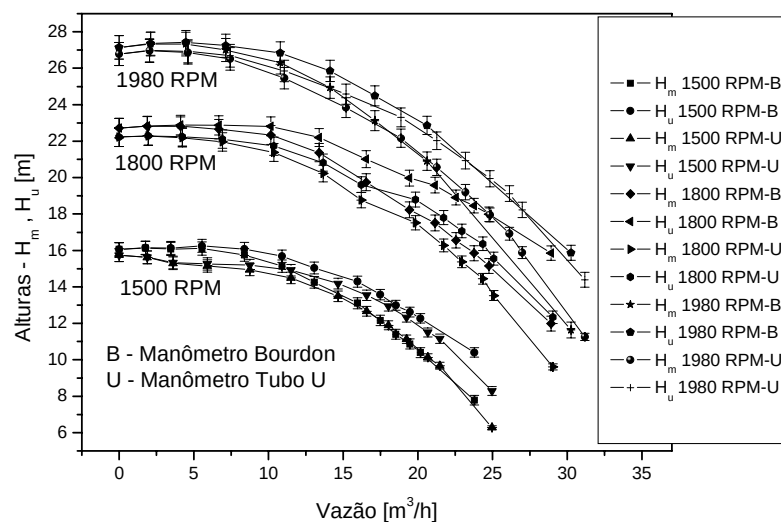


Figura 4.43 - Alturas Manométricas, H_m e $H_u \times$ Vazão, Q , nas rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM obtidos nas duas fases desta pesquisa.

Coeficientes de Pressão, ψ , em função do Coeficiente de vazão, ϕ

Na Figura 4.44, construiu-se as curvas do coeficiente de pressão, ψ , pelo coeficiente de vazão, ϕ , para as alturas H_m e H_u nas rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM obtidos nas duas fases desta pesquisa e, observa-se que os maiores valores de coeficiente de pressão, ψ , foram os obtidos também na Fase 1 utilizando-se a altura útil H_u e respectivamente para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM. O comportamento geral nas duas fases é semelhante ao já mencionado anteriormente.

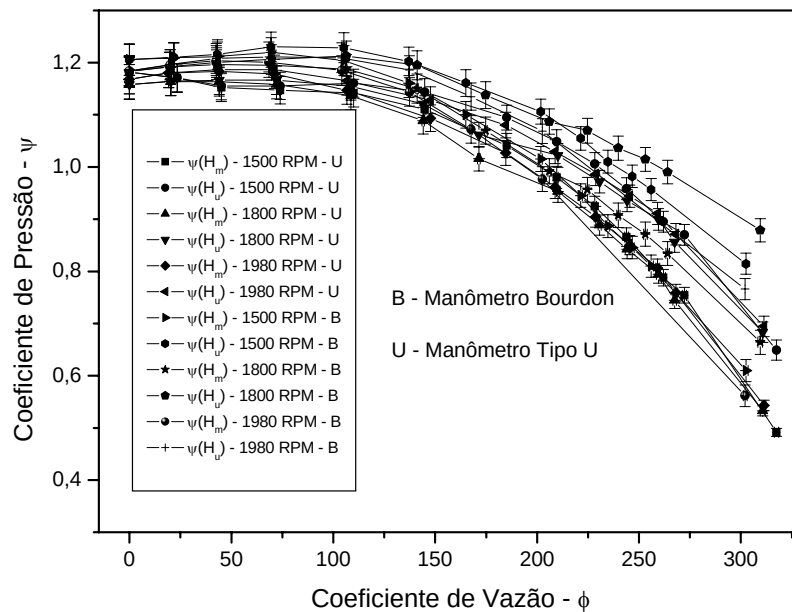


Figura 4.44 - Gráfico do coeficiente de pressão (ψ) $\times$ coeficiente de vazão (ϕ) utilizando as alturas H_m , e H_u para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM nas duas fases do projeto.

Coeficientes de pressão, ψ , em função do Coeficiente de velocidade específica, n_q

Na Figura 4.45 construiu-se as curvas de coeficiente de pressão, ψ , pela velocidade específica, n_q , e semelhante ao comentado nas duas fases, os valores obtidos para os coeficientes de pressão, ψ , para velocidades específicas, n_q , entre $n_q = 0$ e aproximadamente $n_q = 12,5$, apresentam-se constantes e comportamento linear, com valores aproximadamente entre $\psi = 1,1$ e $\psi = 1,3$ e com valor médio aproximado de $\psi = 1,2$. Para velocidades específicas acima de $n_q = 12,5$, os coeficientes de pressão apresentam uma queda para valores entre $\psi = 1,1$ à aproximadamente $\psi = 0,45$ mantendo um comportamento praticamente linear.

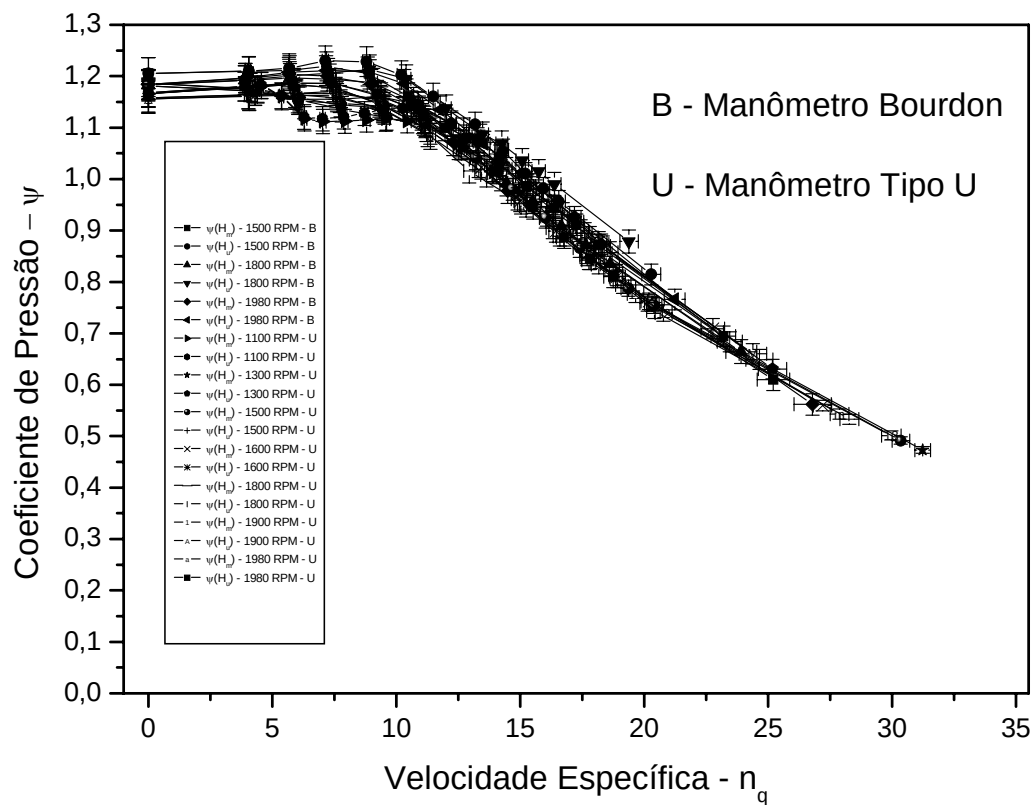


Figura 4.45 - Coeficiente de pressão, ψ , $\times$ Velocidade específica, n_q , para as alturas H_m e H_u nas duas fases da pesquisa.

Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Vazão, ϕ

Na Figura 4.46 construiu-se as curvas do número de Reynolds utilizando a fórmula $Re = \frac{\omega D^2}{\nu}$ a qual não depende explicitamente da vazão do equipamento pelo coeficiente de vazão, ϕ , para as rotações em comum nas duas fases. Observa-se que os valores obtidos para o número de Reynolds são sempre maiores para todas as rotações quando utilizou-se o manômetro de tubo U para a tomada de pressão na sucção, Fase 2.

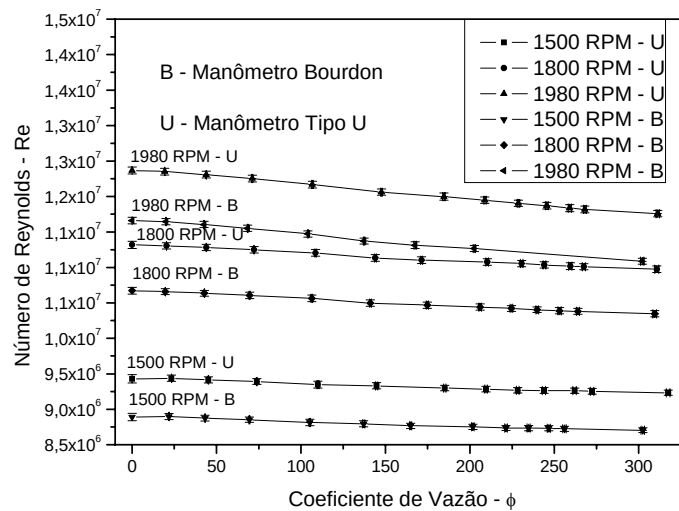


Figura 4.46 – Número de Reynolds, $Re \times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.

Número de Reynolds, Re em função do Coeficiente de Velocidade Específica, n_q .

Na Figura 4.47, semelhante ao item anterior, construiu-se as curvas do número de Reynolds utilizando a fórmula $Re = \frac{\omega D^2}{\nu}$ pelo coeficiente de velocidade específica, n_q , a qual não depende explicitamente da vazão do equipamento para as rotações em comum nas duas fases. Observa-se que para esta formulação, o número de Re possui uma variação maior quando as curvas são em função da velocidade específica para as maiores rotações.

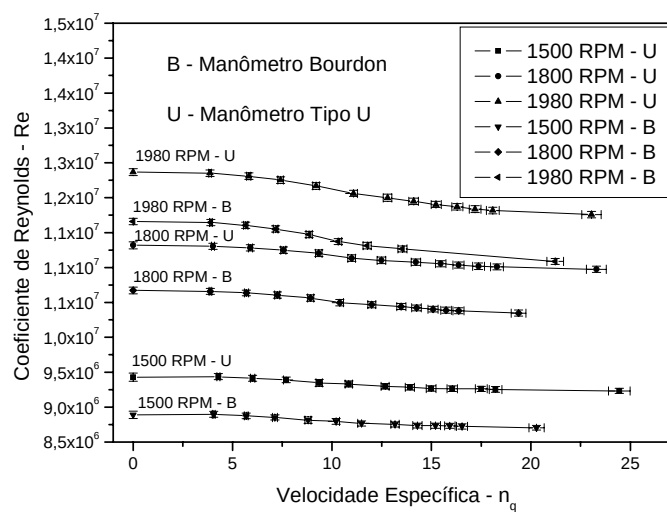


Figura 4.47 – Número de Reynolds, $Re \times$ Coeficiente de Velocidade específica, n_q , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Número de Reynolds Modificado, Re^* , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ

Na Figura 4.48 construiu-se as curvas do número de Reynolds, Re^* , utilizando a fórmula $Re^* = \frac{Q}{\nu D}$ a qual depende da vazão do equipamento pelo coeficiente de vazão, ϕ , para as rotações em comum nas duas fases. Observa-se que para esta formulação, o número de Re^* apresenta um comportamento linear e crescente, com uma variação entre $Re^* = 0$ até aproximadamente $Re^* = 3,5 \times 10^9$, sendo sua maior variação para a curva obtida para a rotação de 1980 RPM obtida na Fase 2. Observa-se que as curvas obtidas para as rotações analisadas separadamente estão sempre próximas.

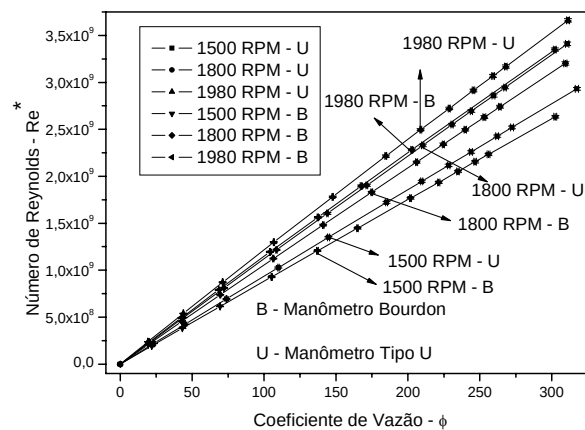


Figura 4.48 – Número de Reynolds, $Re^* \times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.

Número de Reynolds Modificado, Re^* , em função Coeficiente de Velocidade Específica, n_q

Na Figura 4.49, semelhante ao item anterior, construiu-se as curvas do número de Reynolds utilizando a fórmula $Re^* = \frac{Q}{\nu D}$ a qual depende da vazão do equipamento pelo coeficiente de velocidade específica, n_q . Observa-se que para esta formulação, o número de Re^* possui uma variação maior quando as curvas são em função da velocidade específica, e, neste caso, o comportamento das curvas não é linear, embora sempre crescente.

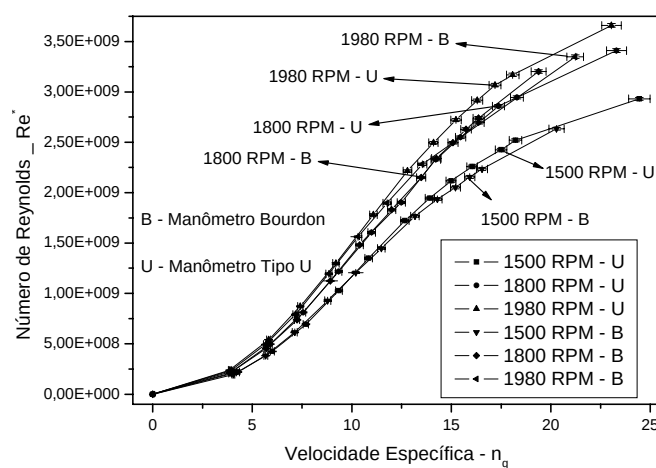


Figura 4.49 – Número de Reynolds, $Re^* \times$ Coeficiente de Velocidade específica, n_q , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Capítulo 5: NPSH Disponível

Um dos termos associados com bombas é o NPSH. A compreensão deste conceito é essencial para o projeto, seleção e uso de uma bomba.

A fim de caracterizar as condições para que ocorra boa sucção do líquido pela bomba, foi introduzido na terminologia de instalações de bombeamento o conceito de NPSH. Esta grandeza representa a disponibilidade de energia de pressão acima da pressão de vapor com que o líquido penetra no bocal de entrada da bomba. O termo NPSH é encontrado em publicações em língua inglesa. Em publicações em vários idiomas, conservou-se a designação NPSH, embora alguns autores utilizem o termo APLS “Altura Positiva Líquida de Sucção” ou “Altura de Sucção Absoluta”, em língua portuguesa.

5.1 – *NET POSITIVE SUCTION HEAD* – NPSH

Quando uma bomba centrífuga trabalha succionando de um reservatório cujo nível do líquido está abaixo do centro do bocal de sucção da bomba, ou seja, com aspiração negativa, além do cálculo da altura manométrica de sucção, que será utilizada no cálculo da altura manométrica total do sistema, é necessário também o cálculo do NPSH da instalação. Isso se dá porque a bomba tem um limite de sucção, e que está associado à pressão ambiente do local de instalação, à altura manométrica de sucção e a todas as características do líquido bombeado. Quando a bomba succiona, a pressão na tubulação e na entrada do equipamento é reduzida. Conseqüentemente a pressão ambiente no reservatório de sucção empurra o líquido para dentro da tubulação, realizando-se o bombeamento.

Para efeito de estudo e definição, o NPSH é dividido em NPSH requerido e NPSH disponível, sendo neste capítulo apresentado o $NPSH_{DISP}$ e, o NPSH requerido discutido no capítulo 6.

5.2 - NPSH Disponível, $NPSH_{DISP}$

O $NPSH_{DISP}$ é por definição a disponibilidade de energia do líquido acima da pressão de vapor ao entrar na bomba, a qual depende da maneira como esta encontra-se instalada e de suas condições operacionais. Define-se da seguinte forma

$$\text{NPSH}_{\text{DISP}} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 - \frac{p_v}{\rho g}, \quad Z_2 \equiv 0 \text{ m.} \quad (5.1)$$

O $\text{NPSH}_{\text{DISP}}$ é uma característica da instalação em que a bomba opera e da pressão do líquido no lado de sucção da bomba. Observa-se na Figura 5.1 a representação para o valor de $\text{NPSH}_{\text{DISP}}$ e das variáveis utilizadas no seu cálculo.

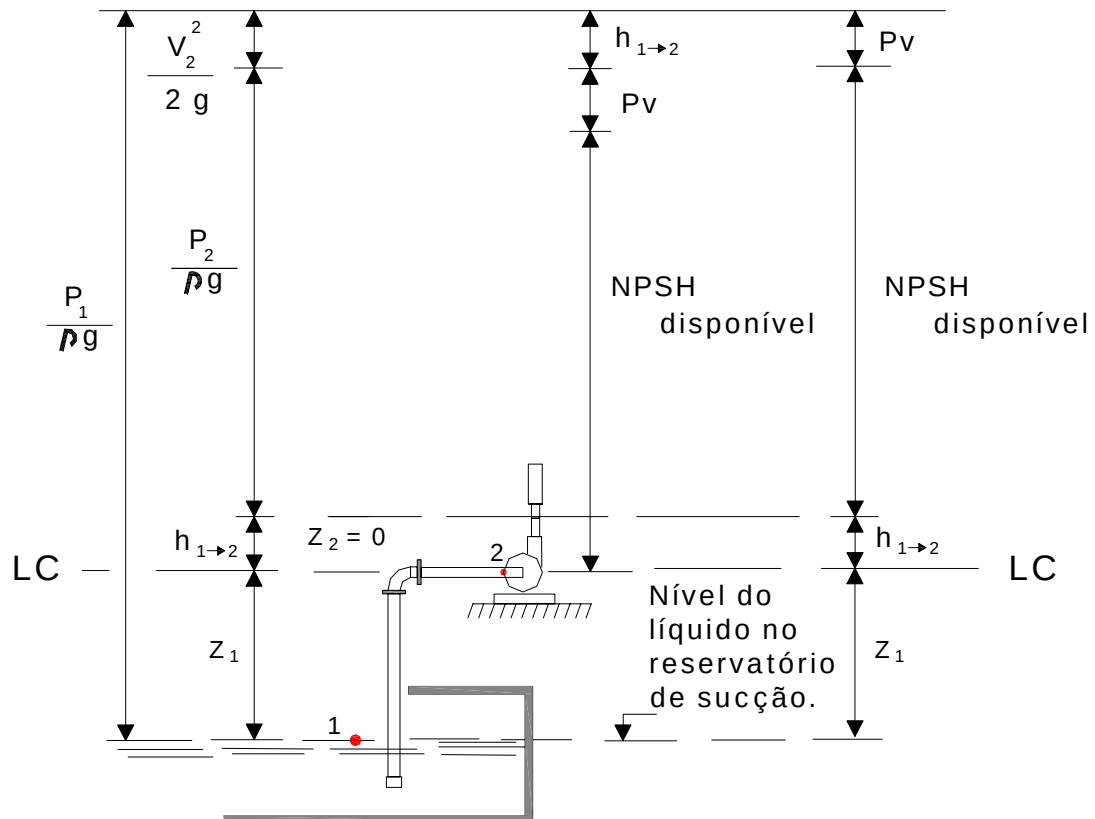


Figura 5.1 – Representação das diversas energias envolvidas na região de sucção da bomba (Macintyre, 1997).

Ao estudar-se as parcelas de energia numa instalação de bombeamento, vê-se que a equação da energia aplicada entre a superfície livre do líquido na captação e na entrada da bomba (suposta na altura de centro da bomba) resulta na Equação (4.9), obtida anteriormente nos cálculos da altura manométrica no capítulo 4, e através desta, obtém-se a pressão estática absoluta à entrada da bomba

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + (Z_1 - Z_2) - h_{1 \rightarrow 2}. \quad (5.2)$$

Substituindo-se o valor da Equação (5.2) na Equação (5.1) tem-se

$$\text{NPSH}_{\text{DISP}} = \frac{p_1 - p_v}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 - h_{1 \rightarrow 2}. \quad (5.3)$$

Através da Equação (5.3) para cálculo do $\text{NPSH}_{\text{DISP}}$, observa-se que a alteração de determinadas variáveis pode modificar o resultado final. Assim sendo, convém analisar a influência da altura estática de sucção, altitude do local da instalação, temperatura de bombeamento do líquido, tipo de líquido bombeado, tipo de entrada, diâmetro, comprimento e acessórios da linha de sucção, vazão e a pressão no reservatório de sucção.

O termo $\frac{p_1}{\rho g}$ refere-se à pressão atuante na superfície do líquido do reservatório de sucção. Em situações onde o reservatório é aberto e sofre apenas a ação da pressão atmosférica, esta será a pressão considerada. Para casos onde o reservatório é fechado ou encontra-se em outro ambiente que não a atmosférica, esta pressão será a pressão do ambiente onde o reservatório se encontra.

Para a análise de altura no equacionamento do $\text{NPSH}_{\text{DISP}}$ adotou-se a linha de referência como sendo o centro da entrada do bocal de sucção da bomba, e assim, tem-se que $Z_2 = 0$. Para casos em que o nível de líquido no reservatório de sucção encontra-se acima do plano de referência, o valor referente à cota geométrica Z_1 será positivo, diz-se que a bomba está afogada, e terá valores negativos em casos onde o nível de líquido no reservatório de sucção encontrar-se abaixo do plano de referência, conforme ilustrado na Figura 4.4.

O plano de referência utilizado nos equacionamentos para os cálculos das alturas manométricas e do valor de $\text{NPSH}_{\text{DISP}}$ são obtidos de acordo com os tipos de rotores utilizados e da maneira como encontram-se instalados, conforme mostra-se na Figura 5.2.

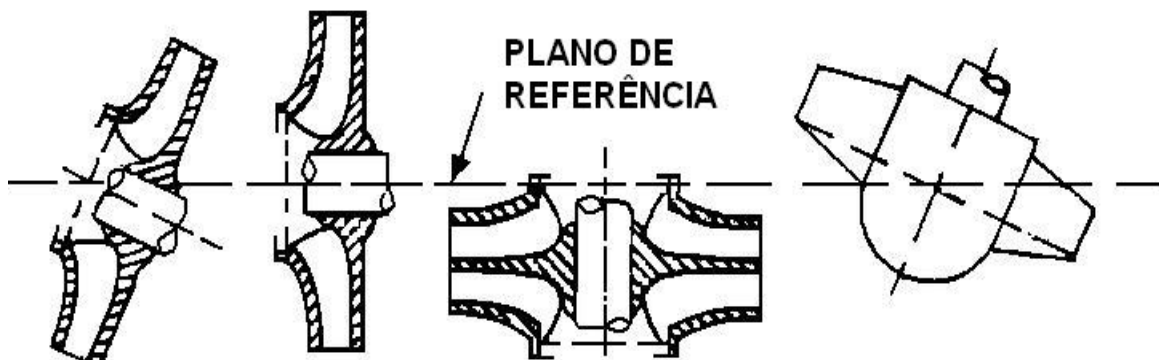


Figura 5.2 - Definição do plano de referência em diferentes tipos de rotores e de montagens.

No caso de bombas com eixo vertical, Z_1 caracteriza a altura do ponto mais elevado da aresta de entrada das pás do rotor (Figura-5.3a). Em bombas com eixo horizontal, pode-se

também medir Z_1 da mesma forma (Figura-5.3b), embora isto só se justifique em bombas de grande porte.

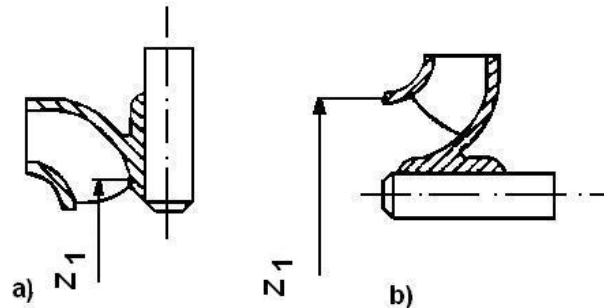


Figura 5.3 - Medida da altura geométrica de sucção Z_1 em: a) máquinas com eixo vertical e b) máquinas com eixo horizontal.

5.3 – Obtenção da Curva de NPSH Disponível

Para a determinação do $NPSH_{DISP}$ do sistema onde encontra-se instalado a bomba centrífuga, procede-se de forma análoga à obtenção da curva característica, alterando-se somente a equação tomada como referência, sendo aqui, utilizada a Equação (5.1).

Desta forma, traça-se uma figura com estes valores encontrados em função da vazão. A curva $NPSH_{DISP} \times$ Vazão será decrescente conforme ilustrado na Figura 5.4.

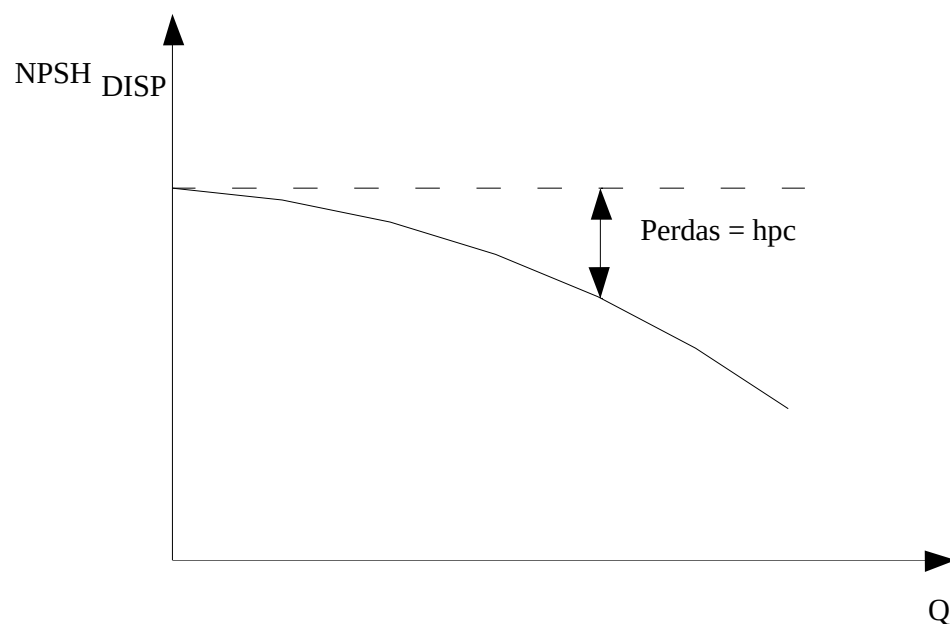


Figura 5.4 – Curva característica de $NPSH_{DISP}$ em função da Vazão, Q .

5.4 – Resultados Obtidos para o NPSH Disponível

Os cálculos referentes ao $NPSH_{DISP}$ também foram separados em duas fases, nos quais, após as substituições do valor referente à pressão absoluta na entrada da bomba $\left(\frac{p_2}{\rho g}\right)$ para os dois casos obteve-se as equações finais respectivamente para a Fase 1 e Fase 2 conforme segue:

Fase 1

$$NPSH_{DISP} = \frac{p_{5,amb} \pm p_{5,vac} - p_v}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_5 - h_{A \rightarrow 2}. \quad (5.4)$$

Na Equação (5.4) acima, caso a pressão de sucção esteja sendo medida com um manômetro, o sinal da equação será negativo, e, se estiver sendo feita com um vacuômetro, o sinal será positivo.

Fase 2

$$NPSH_{DISP} = \frac{p_{5,amb} + g\Delta h_s(\rho_{Hg} - \rho_{H2O}) - \rho_{H2O}gl_2 - p_v}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2. \quad (5.5)$$

5.4.1 – Resultados Obtidos na Fase 1

Na primeira etapa desta pesquisa, conforme descrito anteriormente, utilizou-se um manovacuômetro tipo Bourdon para a obtenção da pressão na tubulação de sucção da bomba adotando-se o esquema geral da bancada mostrado na Figura 3.1. Através das análises de energia citadas no capítulo 4 obteve-se a pressão na entrada da bomba, p_2 , o que resultou na Equação (5.4).

Com os valores de $NPSH_{DISP}$ calculados para cada rotação ensaiada, efetuou-se a construção das curvas desejadas.

$NPSH_{DISP}$ em função da Vazão, Q, e τ_{DISP} em função da Vazão, Q.

Observa-se na Figura 5.5 (a) que os valores obtidos para o $NPSH_{DISP}$ para as três rotações ensaiadas apresentam-se muito próximas. Estes resultados comprovam o descrito anteriormente de que o $NPSH_{DISP}$ é uma característica da instalação do equipamento e de sua condição de operação independente da rotação em que o equipamento se encontrar.

Na Figura 5.5 (b) traçou-se a curva de τ_{DISP} em função da vazão, Q , sendo o τ_{DISP} definido como um adimensional gerado entre a divisão do $NPSH_{DISP}$ obtido pelas equações (5.4) para a Fase 1 e (5.5) para a Fase 2 pelo $NPSH_{DISP,0}$ obtido pela equação (5.3) para a condição de vazão nula, $Q = 0 \text{ m}^3/\text{h}$, conforme mostra-se a seguir

$$\tau_{DISP} = \frac{NPSH_{DISP}}{NPSH_{DISP,0}}. \quad (5.6)$$

Observa-se na Figura 5.5 (b) que o seu comportamento é similar ao comportamento da curva de $NPSH_{DISP}$ em função da vazão. Observa-se também que através da equação (5.6), os valores obtidos pela divisão do $NPSH_{DISP}$ pelo valor do $NPSH_{DISP,0}$ tem que ser próximos de 1 para valores de vazão próximos de 0, o que nesta fase, ficaram próximos de 0,9. Isto deveu-se à imprecisão no instrumento de medição de pressão na sucção da bomba e acabou motivando a troca da referida instrumentação por outra de maior acurácia.

Para a obtenção destas curvas, trabalhou-se com o registro de sucção totalmente aberto, controlando-se a vazão bombeada pela bomba através do registro de recalque. Nesta etapa a bomba trabalhou sem o efeito da cavitação.

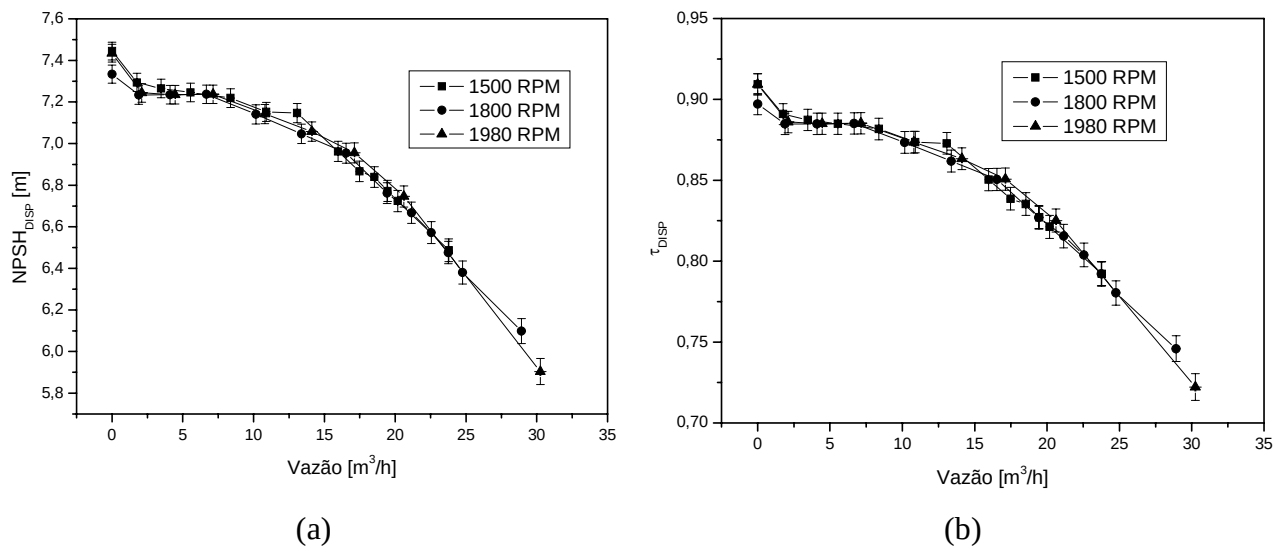
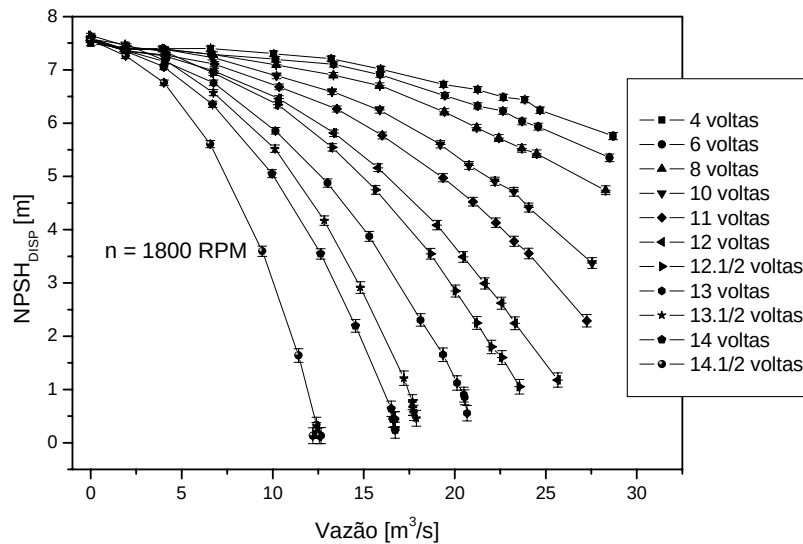


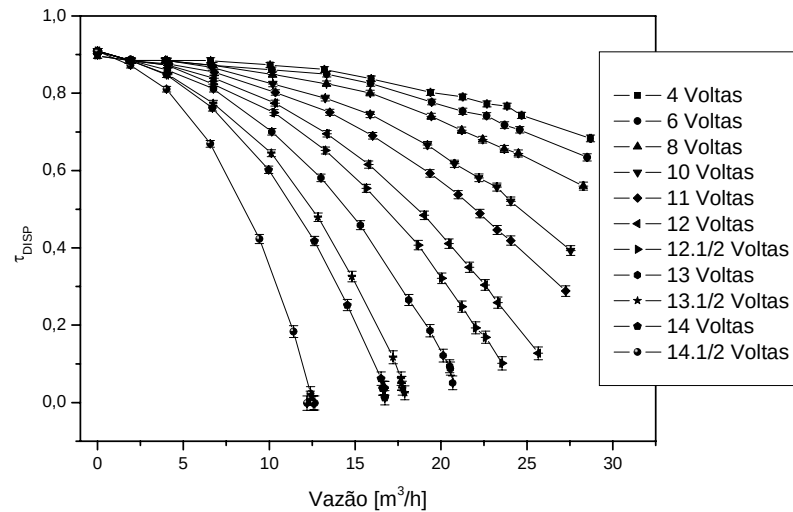
Figura 5.5 – (a) $NPSH_{DISP} \times \text{Vazão}, Q$ e (b) $\tau_{DISP} \times \text{Vazão}, Q$ para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Na Figura 5.6 (a) e (b), mostra-se o comportamento do $NPSH_{DISP}$ para diversas condições de fechamento do registro de sucção para a curva de 1800 RPM, simulando as possíveis formas de instalação do equipamento, sendo no item (b) utilizado o τ_{DISP} citado anteriormente.

O comportamento do $NPSH_{DISP}$ e do τ_{DISP} para as diferentes posições de fechamento no registro de sucção é semelhante ao comportamento das curvas de alturas $(H's) \times Vazão (Q)$, ou seja, quanto maior o número de voltas de fechamento no registro de sucção, menor é o valor do $NPSH_{DISP}$ e do τ_{DISP} para uma mesma vazão.



(a)



(b)

Figura 5.6 – (a) $NPSH_{DISP} \times Vazão, Q$ e (b) $\tau_{DISP} \times Vazão, Q$ para a rotação de 1800 RPM com o registro de sucção sendo fechado.

De acordo com o que foi discutido no capítulo sobre altura manométrica útil, após um determinado número de voltas de fechamento no registro de sucção, ocorre uma queda no valor da mesma, e, quando esta queda atinge o valor de 3%, já se iniciou o fenômeno de cavitação.

Portanto, analisando-se as curvas das alturas pela vazão da bomba, para as condições de operação onde ocorre esta queda de 3% ou maior, provavelmente o equipamento estará operando com cavitação.

Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$, em função do Coeficiente de Vazão, ϕ ,

Como esta pesquisa trata do estudo de cavitação em bombas centrífugas, torna-se interessante definir um Coeficiente denominado coeficiente de NPSH, o qual encontra-se definido no Apêndice B.

Traçou-se na Figura 5.7 o Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$, pelo coeficiente de vazão, ϕ , e observa-se que os valores obtidos para o coeficiente de $NPSH_{DISP}$ são praticamente constantes para cada rotação em separado. Observa-se que os maiores valores são obtidos respectivamente para as curvas de 1500, 1800 e 1980 RPM.

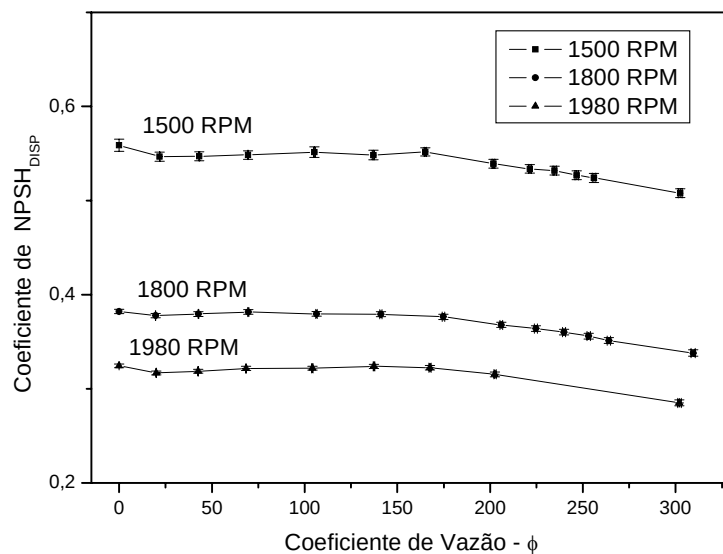


Figura 5.7 – Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP} \times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Número de Thoma utilizando-se o $NPSH_{DISP}$, σ_{DISP} , em função da Velocidade Específica, n_q

Optou-se aqui por desenvolver uma curva de número de Thoma disponível utilizando-se o $NPSH_{DISP}$ para a verificação de seu comportamento, resultando-se na Figura 5.8. Observando-se os valores da velocidade específica, n_q , entre $n_q = 0$ e $n_q = 7,5$ aproximadamente, verificou-se

que o número de Thoma disponível, $\sigma_{DISP} = \frac{NPSH_{DISP}}{H}$, apresenta ligeira queda em seus valores

para todas as alturas, (a) H_l , (b) H_m e (c) H_u , e, para valores maiores de $n_q = 7,5$ os valores do número de Thoma disponível tornam-se maiores. O comportamento das curvas apresentam sempre, para cada valor da velocidade específica, n_q , um valor correspondente ao número de Thoma maior para as rotações de menor valor. Quanto menor a rotação, maior o número de Thoma para cada velocidade específica, n_q analisada. Quanto maior o número de Thoma disponível, menor a possibilidade de ocorrer cavitação.

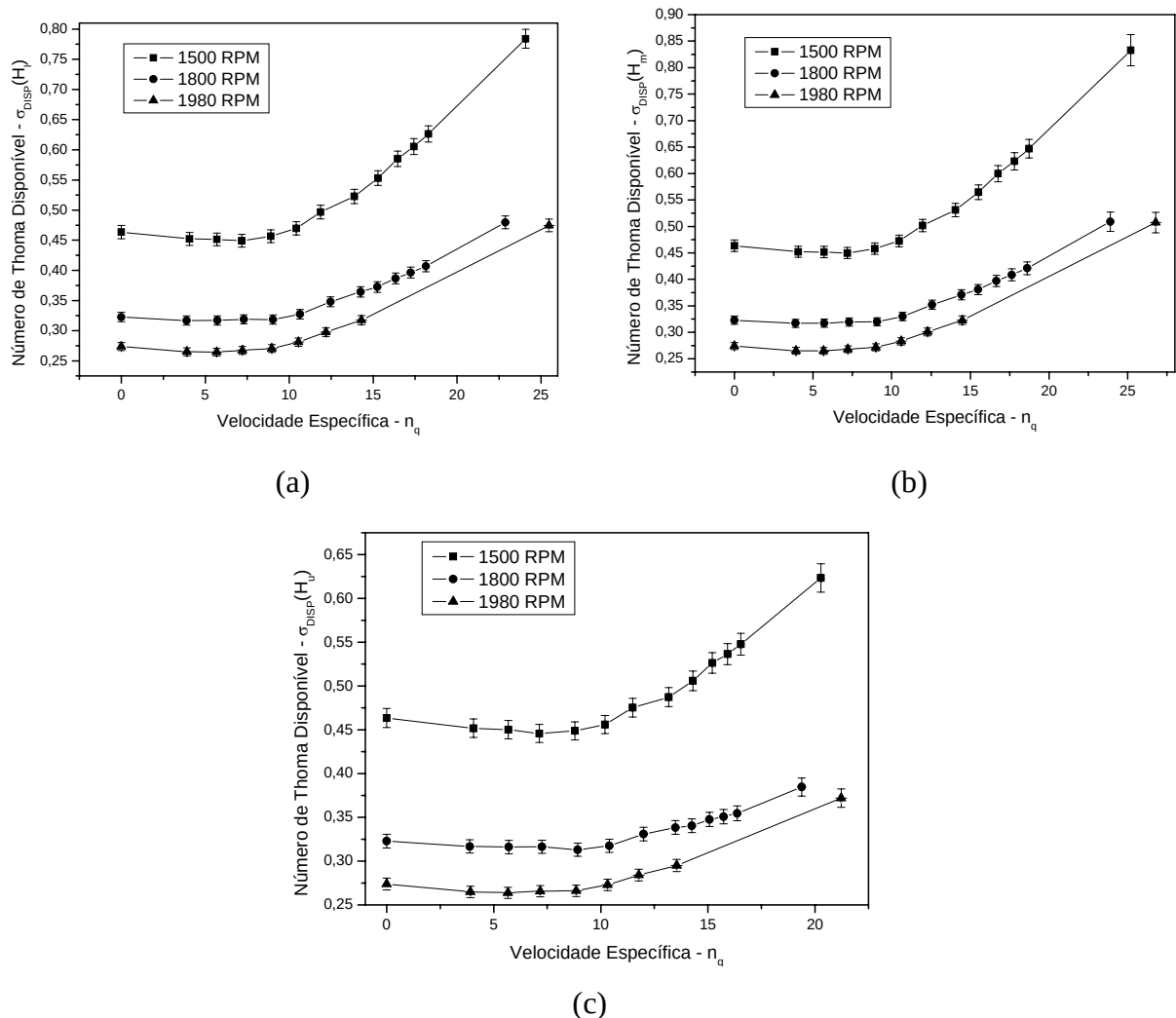


Figura 5.8 - Número de Thoma disponível, $\sigma_{DISP} \times$ Velocidade específica, n_q , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM baseado nas alturas (a) H_l (b) H_m e (c) H_u .

5.4.2 – Resultados Obtidos na Fase 2

Na segunda etapa desta pesquisa, conforme descrito anteriormente, substituiu-se o manovacômetro Bourdon que encontrava-se instalado na sucção da bancada por um manômetro de coluna de líquido tipo U, colocando-o na altura da linha de centro da entrada da bomba e do

ponto de tomada de pressão para a obtenção dos dados referentes à sucção da bomba, adotando-se nesta etapa o esquema geral da Figura 4.24. Através das análises de energia citadas no capítulo 4, calculou-se as pressões na entrada da bomba, p_2 , para esta etapa obtendo-se a Equação (5.5).

Com os valores de $NPSH_{DISP}$ calculados para cada rotação ensaiada, efetuou-se a construção das curvas desejadas.

$NPSH_{DISP}$ e τ_{DISP} em função da Vazão, Q

Observa-se na Figura 5.9 (a) que os valores obtidos para o $NPSH_{DISP}$ para as curvas ensaiadas nesta fase do projeto apresentam-se muito próximas, semelhante ao ocorrido na primeira fase, reafirmando que o $NPSH_{DISP}$ é uma característica da instalação do equipamento e de sua condição de operação, independente da rotação em que o equipamento se encontra.

Semelhante a Fase 1, para a obtenção destas curvas, trabalhou-se com o registro de sucção totalmente aberto, controlando-se a vazão bombeada através do registro de recalque. Nesta etapa a bomba trabalhou sem o efeito da cavitação.

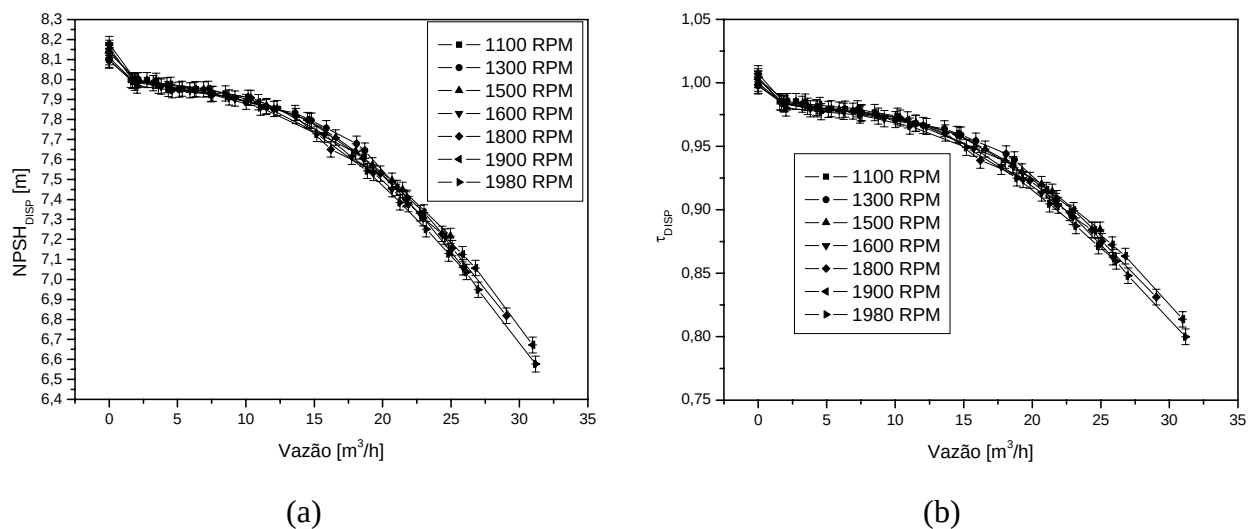


Figura 5.9 – (a) $NPSH_{DISP} \times$ Vazão, Q, e (b) $\tau_{DISP} \times$ Vazão, Q para as rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM

Na Figura 5.9 (b), semelhante a Fase 1, traçou-se a curva de τ_{DISP} em função da vazão, Q, chegando-se às mesmas conclusões anteriormente citadas, sendo o seu comportamento similar ao das curvas obtidas para o $NPSH_{DISP}$ em função da vazão. Nesta fase, diferente do ocorrido na Fase 1, observa-se também que através da equação (5.6), os valores obtidos pela divisão do

$NPSH_{DISP}$ pelo valor do $NPSH_{DISP,0}$ são próximos de 1 para valores de vazão próximos de 0, indicando que os valores aqui obtidos são mais precisos devido à utilização de um manômetro tipo U para a tomada de pressão na sucção.

Na Figura 5.10, construiu-se as curvas do $NPSH_{DISP}$ pela vazão, Q para as rotações ensaiadas de 1100, 1300, 1500, e 1800 RPM com o registro de sucção sendo fechado em 11, 12, 13 e 14 voltas. Observa-se que os valores obtidos para as diferentes rotações estão muito próximos para cada posição de fechamento do registro de sucção, e, que quanto maior o número de voltas, menor o valor obtido para o $NPSH_{DISP}$, comparando-se com a mesma vazão, assim como na primeira fase deste projeto. Nesta etapa da pesquisa, de acordo com o que foi discutido no capítulo sobre altura manométrica e comentado nos resultados da primeira fase, após um determinado número de voltas de fechamento no registro de sucção, ocorre uma queda no valor da altura, e, quando esta queda atinge o valor de 3%, certamente já se iniciou o fenômeno de cavitação. Portanto, analisando-se as curvas das alturas pela vazão da bomba, para as condições de operação onde ocorre esta queda de 3%, ou maior, provavelmente o equipamento estará operando com cavitação.

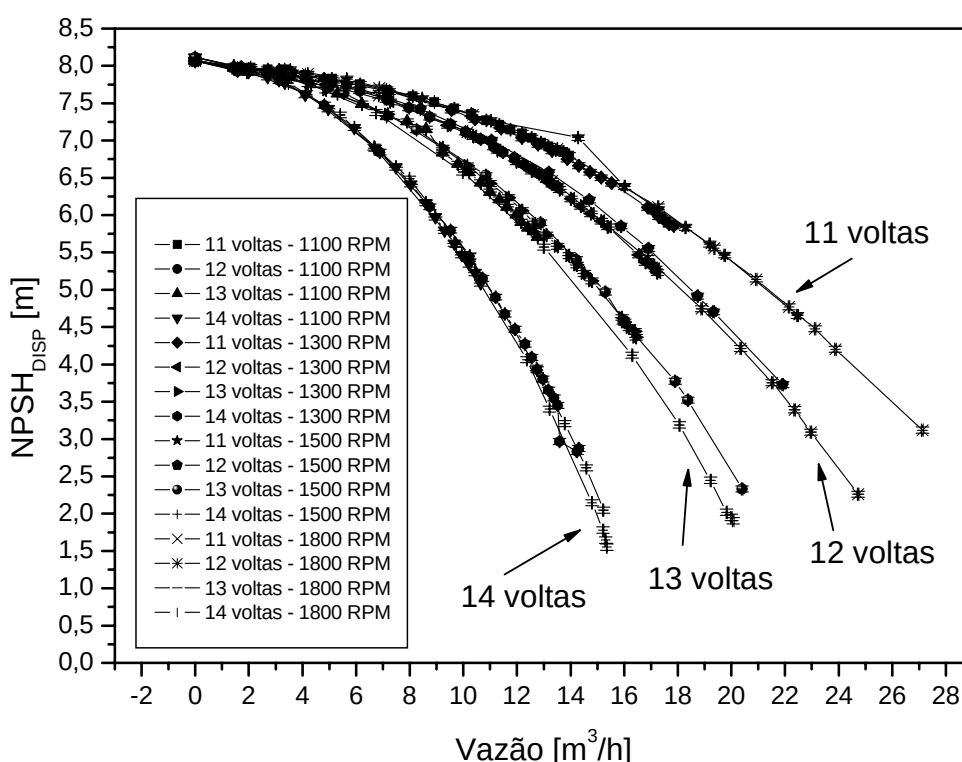


Figura 5.10 - $NPSH_{DISP} \times$ Vazão, Q , para as rotações de 1100, 1300, 1500 e 1800 RPM com o registro de sucção sendo fechado em 11, 12, 13 e 14 voltas.

Na Figura 5.11 construiu-se as curvas de $NPSH_{DISP}$ pela vazão, Q , para as rotações de (a) 1100 RPM, (b) 1300 RPM, (c) 1500 RPM e (d) 1800 RPM separadamente. Semelhante a observação anterior, quanto maior o número de voltas dadas no registro da tubulação de sucção, mais rapidamente ocorre a queda nos valores do $NPSH_{DISP}$ e maior é a possibilidade do equipamento operar com cavitação.

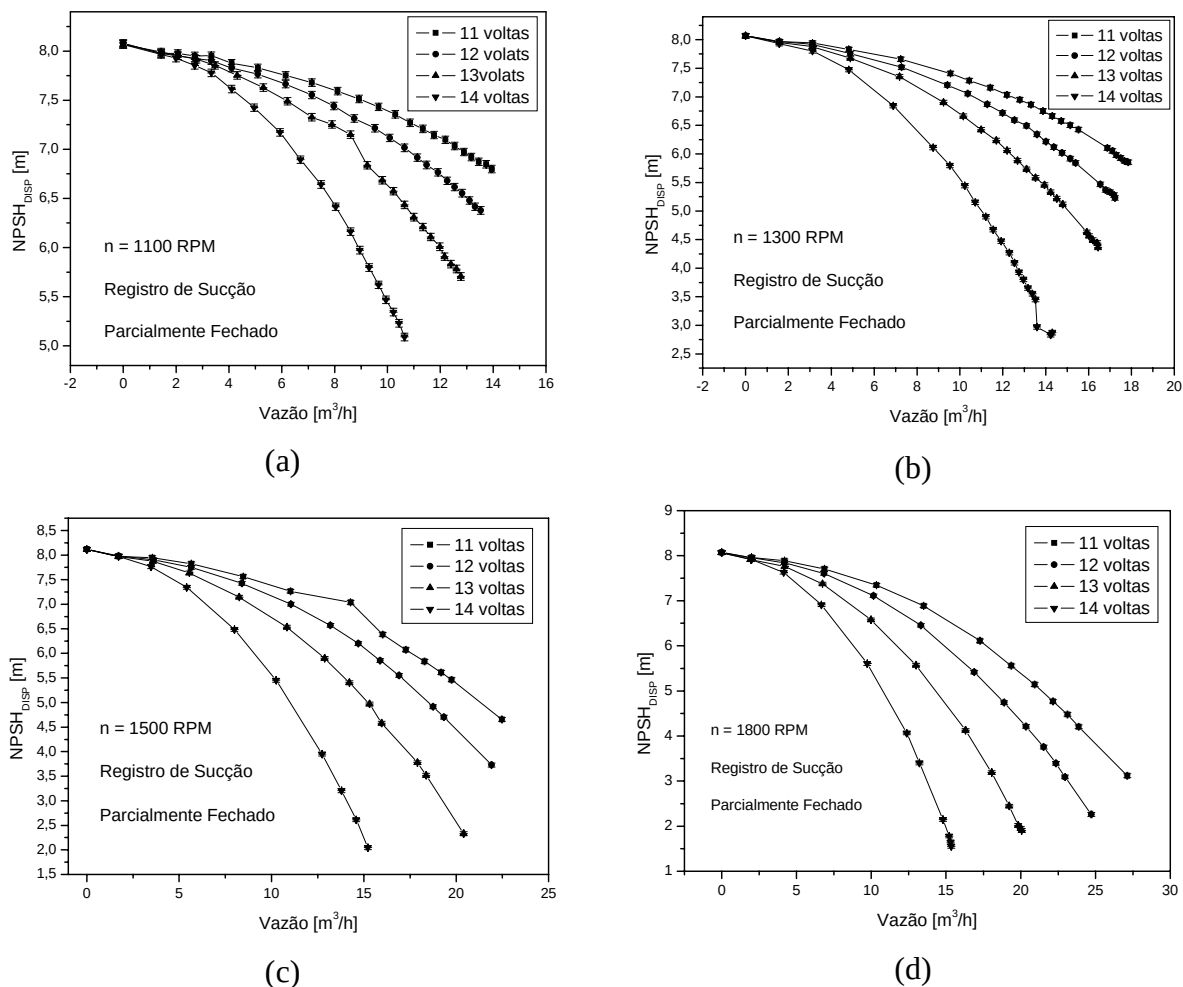
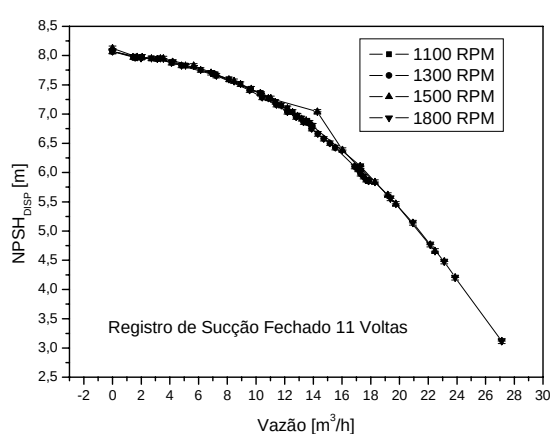
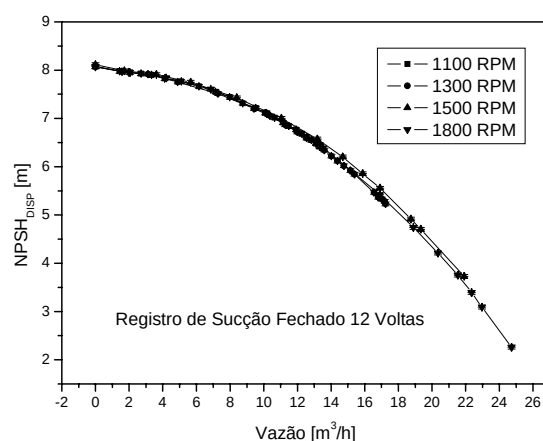


Figura 5.11 - $NPSH_{DISP} \times$ Vazão, Q , para a rotação de (a) 1100 RPM, (b) 1300RPM, (c) 1500 RPM e (d) 1800 RPM, para os registros sendo fechados em 11, 12, 13 e 14 voltas.

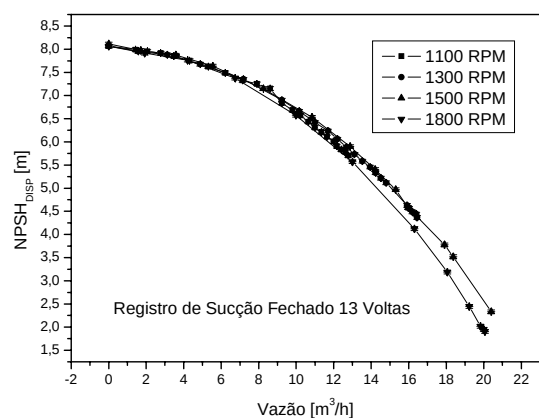
Na Figura 5.12 traçou-se as curvas de $NPSH_{DISP}$ pela vazão, Q , para as rotações de 1100, 1300, 1500 e 1800 RPM com o registro da tubulação de sucção fechado em (a) 11 voltas, (b) 12 voltas, (c) 13 voltas e (d) 14 voltas. Observa-se que para cada posição de fechamento do registro da tubulação de sucção os valores obtidos para os $NPSH_{DISP}$ em cada vazão analisada são praticamente os mesmos. Semelhante às análises anteriores, estes resultados confirmam as teorias encontradas nas literaturas básicas, onde afirma-se que o $NPSH_{DISP}$ é uma característica particular da instalação e da pressão de sucção e independente do equipamento de bombeamento.



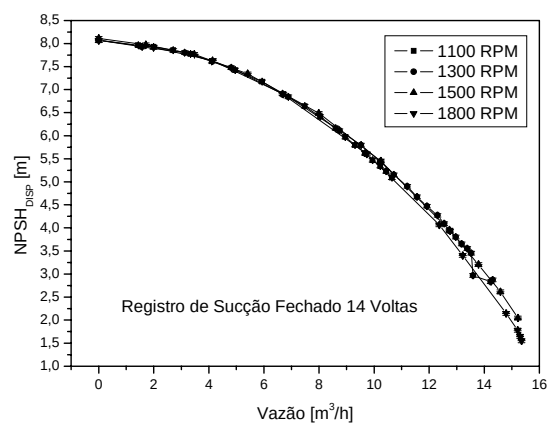
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.12 - $NPSH_{DISP} \times Vazão, Q$, para a rotação de 1100, 1300, 1500 e 1800 RPM, para os registros fechados em (a) 11 voltas, (b) 12 voltas, (c) 13 voltas e (d) 14 voltas.

Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$, em função do Coeficiente de Vazão, ϕ .

Faz-se aqui os mesmos comentários efetuados para a curva obtida na primeira etapa do projeto para o coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$, pelo coeficiente de vazão, ϕ , lembrando que nesta etapa do projeto foram estabelecidas as rotações de 1100, 1300, 1600 e 1900 RPM, que não foram ensaiadas na primeira etapa.

Traçou-se na Figura 5.13 o coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$, pelo coeficiente de vazão, ϕ , e semelhante ao observado na primeira fase, os valores obtidos para o coeficiente de $NPSH_{DISP}$ são praticamente constantes para cada rotação ensaiada e os maiores valores são obtidos respectivamente para as curvas de menor para maior rotação.

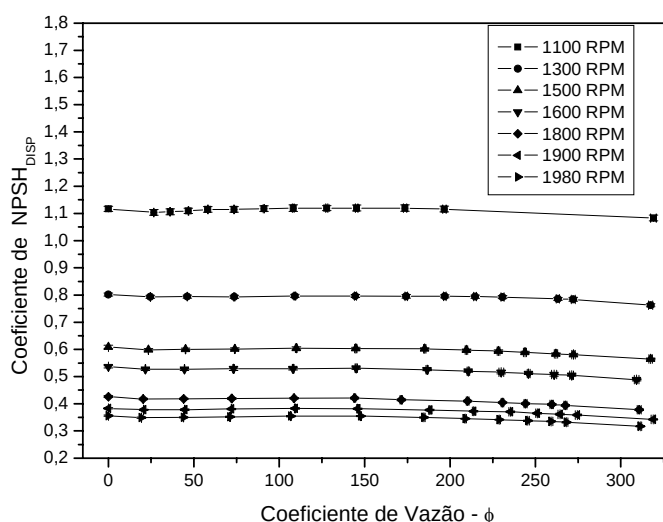


Figura 5.13 - Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$, $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM.

Número de Thoma utilizando-se o $NPSH_{DISP}$, σ_{DISP} em função da Velocidade Específica, n_q

Assim como na primeira etapa desta pesquisa, traçou-se as curvas de número de Thoma disponível, utilizando-se o $NPSH_{DISP}$, pela velocidade específica, n_q , para a verificação de seu comportamento. Na Figura 5.14 observa-se que com exceção da curva construída para a rotação de 1100 RPM, as demais curvas apresentam valores para o número de Thoma disponível constantes para cada rotação analisada, entre valores de velocidade específica de $n_q = 0$ até aproximadamente $n_q = 10$. Para valores acima de $n_q = 10$ o número de Thoma disponível sofre um aumento em seus valores. Como na formulação para o cálculo do número de Thoma disponível utiliza-se os valores das alturas H_m ou H_u , observa-se que as curvas montadas utilizando-se a altura H_m alcançou os maiores valores à medida que aumentava-se a velocidade específica. Para valores de velocidade específica $n_q = 0$ até aproximadamente $n_q = 10$, os valores obtidos entre a utilização das duas alturas em questão permanecem sempre muito próximos. Para os valores da velocidade específica acima de $n_q = 10$ aproximadamente, os valores obtidos para o número de Thoma disponível apresentam uma dispersão maior entre seus valores quando se compara as curvas traçadas para as diferentes alturas analisadas.

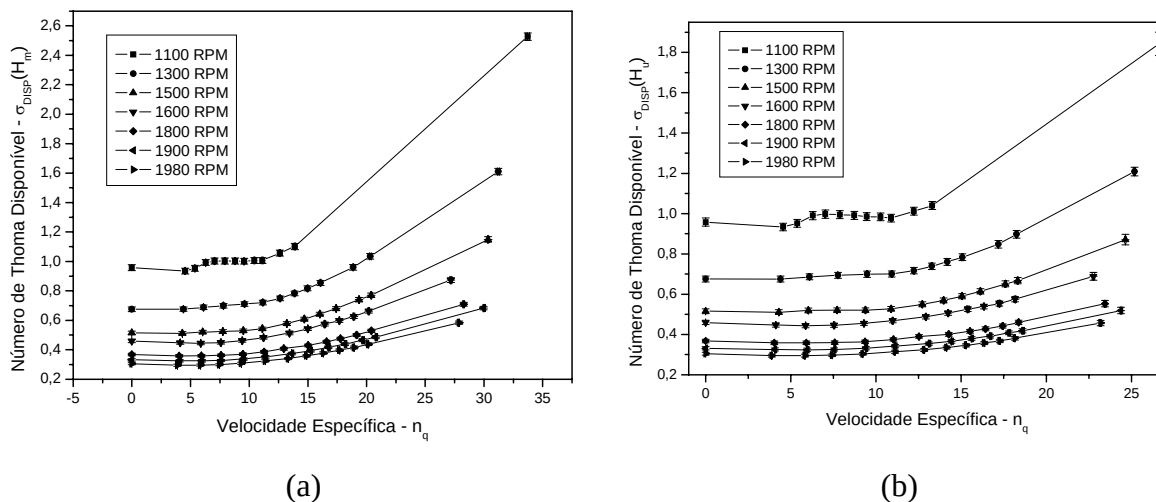


Figura 5.14 - Número de Thoma disponível, $\sigma_{DISP} \times$ Velocidade específica, n_q , para as rotações de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM para as alturas (a) H_m e (b) H_u utilizando o $NPSH_{DISP}$.

5.4.3 – Gráficos Comparativos entre as duas Fases

Após as análises efetuadas separadamente para cada fase desta pesquisa, resolveu-se comparar as curvas obtidas em cada fase para verificação do seu comportamento como um todo.

$NPSH_{DISP}$ e τ_{DISP} em função da Vazão, Q

Observa-se na Figura 5.15 (a) e (b) que os valores obtidos para o $NPSH_{DISP}$ e τ_{DISP} para a segunda fase deste projeto são maiores do que os valores obtidos na primeira fase, o que mostra que para o cálculo deste parâmetro, $NPSH_{DISP}$, necessita-se de equipamentos de maior precisão para a obtenção de dados. O medidor de pressão na sucção da bomba tem grande influência sobre o resultado final do $NPSH_{DISP}$. Assim, deve-se utilizar os melhores recursos disponíveis para medir esta grandeza. Esta foi a principal motivação para se interromper a Fase 1 e mudar para a Fase 2. Para uma maior segurança na operação do equipamento, em caso de dúvidas de qual valor de $NPSH_{DISP}$ utilizar, aconselha-se que utilize o menor valor obtido. Para que uma bomba trabalhe livre de cavitação, o $NPSH_{DISP} \geq NPSH_{REQ}$, portanto, utilizando-se o menor valor para o $NPSH_{DISP}$, e, este sendo maior do que o $NPSH_{REQ}$ pela bomba, garantir-se-á assim que o equipamento estará trabalhando em faixas livres dos efeitos da erosão por cavitação. Este assunto será mais bem discutido no capítulo a seguir.

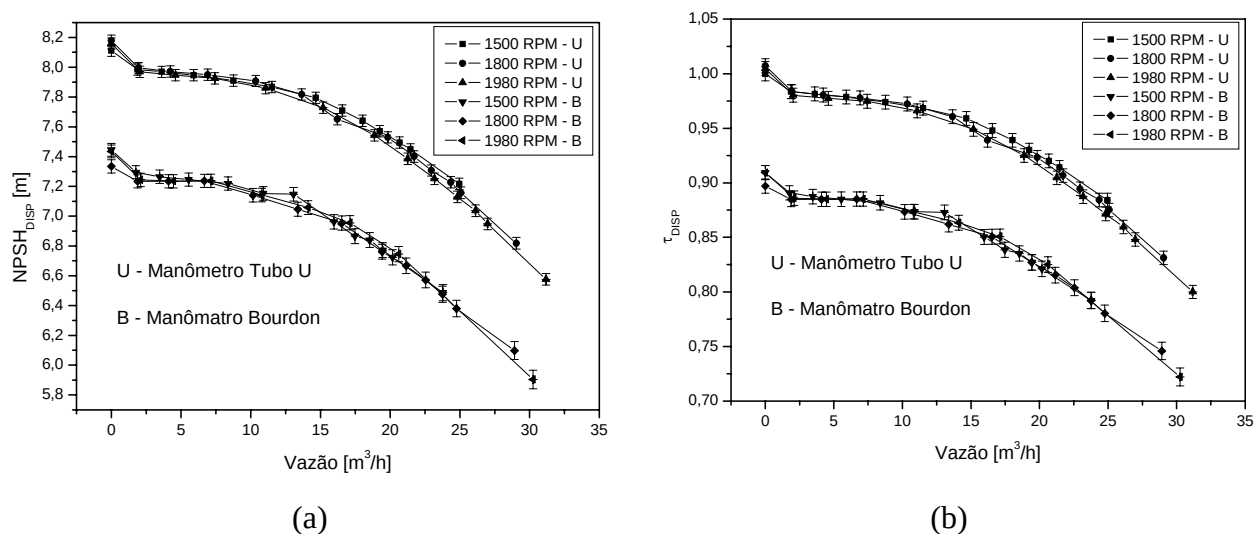


Figura 5.15 – (a) $NPSH_{DISP} \times Vazão, Q$, e (b) $\tau_{DISP} \times Vazão, Q$ para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM.

Na Figura 5.16 construiu-se as curvas de $NPSH_{DISP}$ pela vazão, Q , obtidas para a rotação de 1800 RPM nas duas etapas desta pesquisa com o registro da tubulação de sucção fechados em 11, 12, 13 e 14 voltas, observando-se a diferença de valores obtidos entre as duas fases no início das curvas. Esta diferença entre os valores obtidos em cada etapa, para cada posição de fechamento do registro da tubulação de sucção, diminuiu-se à medida que aumentou-se a vazão bombeada.

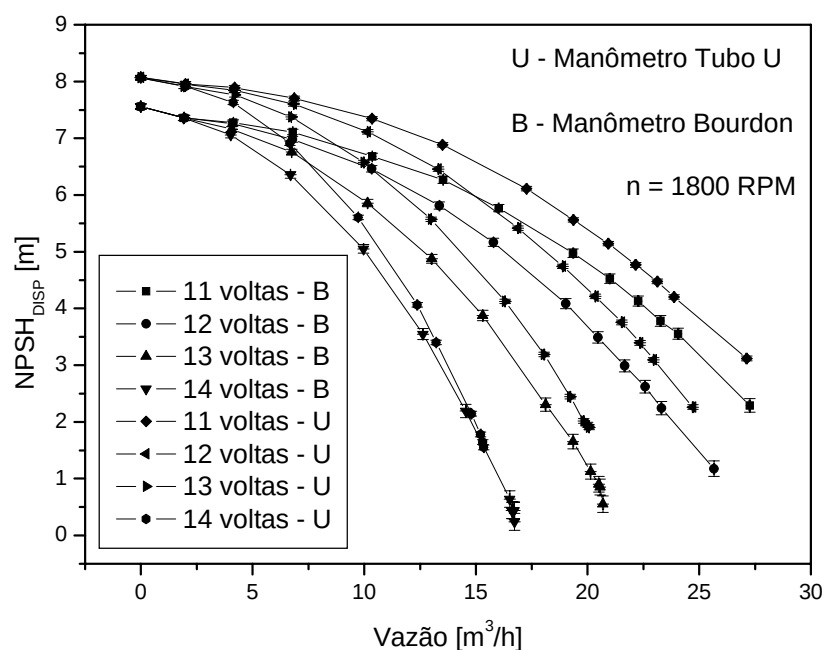


Figura 5.16 - $NPSH_{DISP} \times Vazão, Q$, para a rotação de 1800 RPM, com o registro de sucção fechado em 11, 12, 13 e 14 voltas.

Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$, em função do Coeficiente de Vazão, ϕ

Na Figura 5.17, faz-se os mesmos comentários efetuados para os gráficos correspondentes obtidos para as duas fases desta pesquisa. Na Figura 5.17 (a) construiu-se apenas as curvas obtidas para as rotações comuns às duas fases que são 1500, 1800 e 1980 RPM, e, na Figura 5.17 (b) mostra-se as curvas obtidas para todas as rotações ensaiadas na primeira e na segunda fase. Semelhante ao observado nas duas etapas desta pesquisa, os valores obtidos para o coeficiente de $NPSH_{DISP}$ são praticamente constantes para cada rotação ensaiada e os maiores valores são obtidos respectivamente para as curvas de menor para maior rotação.

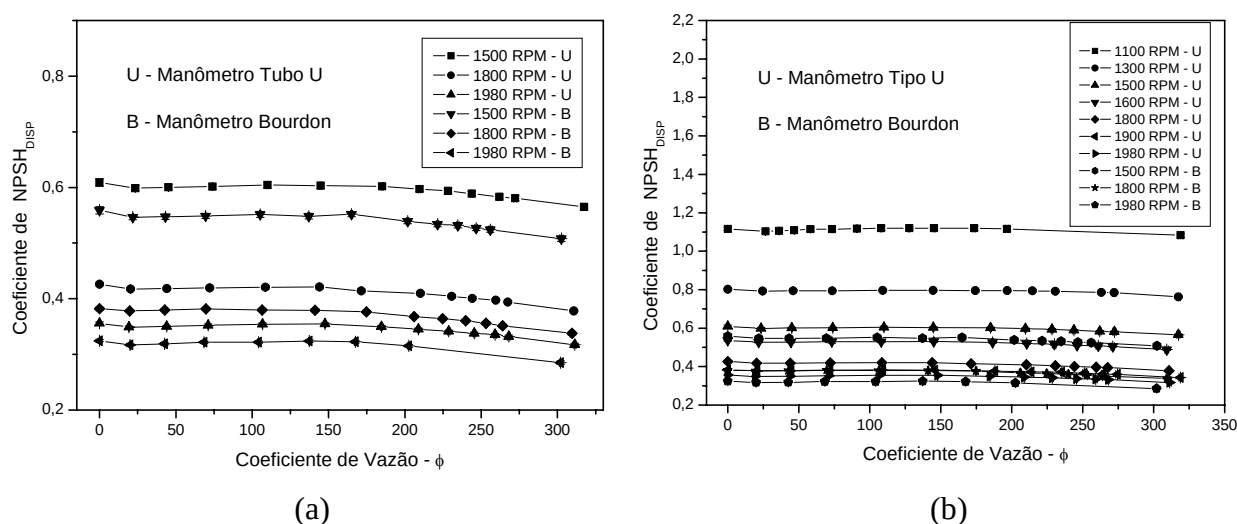


Figura 5.17 - Coeficiente de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$, $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as rotações (a) 1500, 1800 e 1980 RPM obtidos nas duas fases do projeto e (b) acrescentando as rotações de 1100, 1300, 1600, e 1900 RPM obtidas na segunda fase.

Número de Thoma utilizando-se o $NPSH_{DISP}$, σ_{DISP} , em função da Velocidade Específica, n_q

Traçou-se as curvas de número de Thoma disponível utilizando-se o $NPSH_{DISP}$ pela velocidade específica, n_q , na Figura 5.18 e observa-se que os valores para o número de Thoma disponível obtidos na segunda fase foram sempre maiores que os obtidos na primeira fase para cada rotação ensaiada. Semelhante às análises efetuadas anteriormente, as curvas traçadas utilizando-se a altura H_m alcança os maiores valores para o número de Thoma à medida que aumenta-se a velocidade específica nas duas etapas.

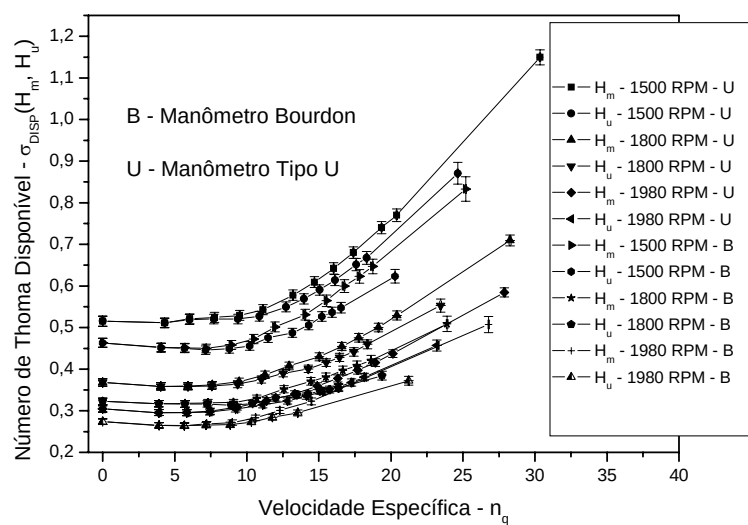


Figura 5.18 - Número de Thoma disponível, $\sigma_{DISP} \times$ Velocidade específica, n_q , para as rotações de 1500, 1800 e 1980 RPM para as duas fases do projeto utilizando o $NPSH_{DISP}$.

Capítulo 6: NPSH Requerido

A maioria das curvas características de bombas centrífugas inclui a curva do $NPSH_{REQ}$ em função da vazão. Esta curva é uma característica própria da bomba e pode ser obtida experimentalmente em bancadas de testes. O fabricante normalmente testa a bomba com água a diferentes capacidades, estrangulando-se o lado de sucção e/ou da descarga. A expressão NPSH representa a energia do líquido na sucção da bomba, acima da pressão de vapor deste líquido, na temperatura de bombeamento, com referência à linha de centro da bomba. Portanto, a finalidade prática do NPSH é impor limitações às condições de sucção da bomba, de modo a manter a pressão na entrada do rotor acima da pressão de vapor do líquido bombeado. A pressão mais baixa ocorre na entrada do rotor, portanto, mantendo-se a pressão na entrada do rotor superior à pressão de vapor, não ocorrerá vaporização na entrada da bomba evitando-se, assim, o fenômeno da cavitação. Define-se deste modo, as limitações de sucção de uma bomba mediante a curva de NPSH requerido.

6.1 - NPSH Requerido

Para definição do NPSH requerido de uma bomba é utilizada como critério a ocorrência de uma queda de 3% na altura útil para uma determinada vazão, conforme observa-se na Figura 6.1. Este critério é adotado pelo *Hydraulic Institute Standards* (1982) e pela *American Petroleum Institute* (API 610). Durante os ensaios para obtenção do $NPSH_{REQ}$, a vazão e a velocidade de rotação do motor elétrico são mantidas constantes, enquanto o $NPSH_{DISP}$ da instalação é gradativamente diminuído até que os efeitos da cavitação na curva característica da bomba possam ser medidos, com a queda da altura útil. Dessa forma, o valor do $NPSH_{DISP}$ para o qual ocorrer uma queda de 3% na altura de elevação é igual ao $NPSH_{REQ}$ da bomba, ou seja,

$$NPSH_{REQ}(3\%) \equiv NPSH_{DISP}(3\%).$$

Desde que a energia disponível na sucção do sistema de bombeamento iguale ou exceda os valores de $NPSH_{REQ}(3\%)$ não haverá colapso no fluxo de massa e não haverá colapso na altura útil. Deste modo, a bomba com funcionamento “normal” deve obedecer à seguinte relação

$$NPSH_{DISP} \geq NPSH_{REQ}.$$

Note que esta expressão não garante que não haverá cavitação, porém, garante que, seus efeitos, notadamente queda de 3% na altura útil, sejam, relativamente, pequenos em curto prazo. Em longo prazo, poderá haver a destruição progressiva do rotor, pela erosão cavitacional, até sua inutilização operacional completa.

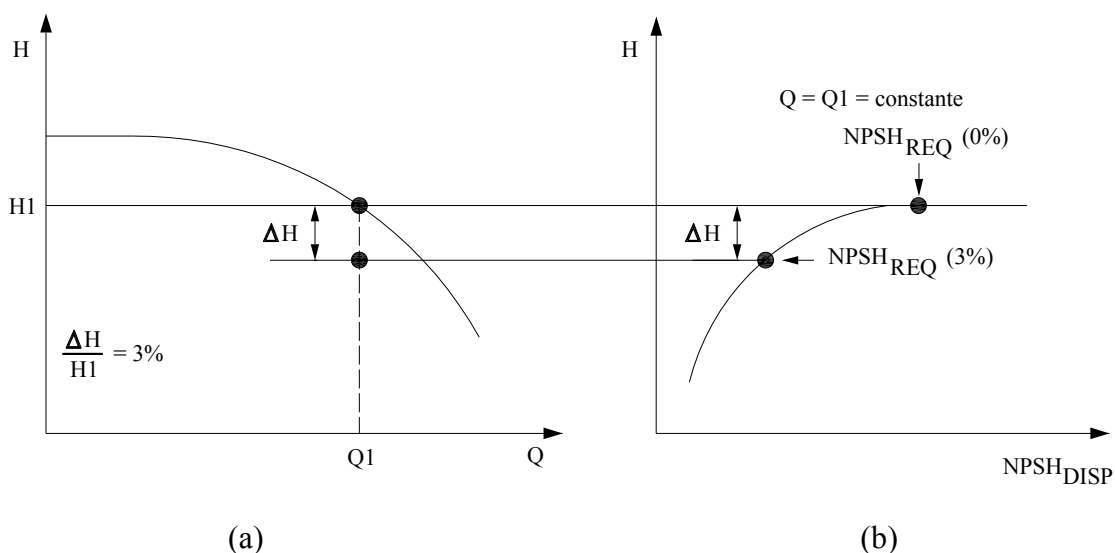


Figura 6.1 – Representação do $NPSH_{REQ}$ (a) Curva $H \times Q$ e (b) Curva $H \times NPSH_{DISP}$. (Mattos e Falco, 1998)

Observa-se na Figura 6.2 o comportamento do $NPSH_{REQ}$ em função da vazão, Q, quando o equipamento opera em condições normais, sem queda, $NPSH_{REQ}$ (0%), quando trabalha com uma queda de 3%, $NPSH_{REQ}$ (3%), e quando trabalha com cavitação com uma queda de 10%, $NPSH_{REQ}$ (10%).

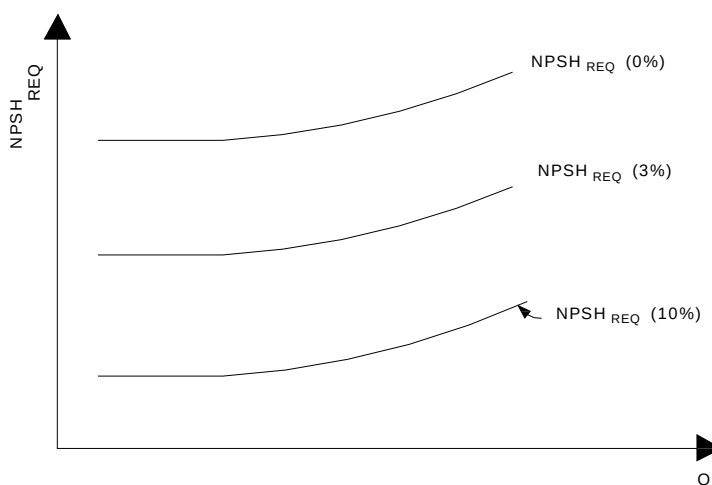


Figura 6.2 - Representação do $NPSH_{REQ}$ (Curva $NPSH \times Q$). (KSB, 2003)

O fabricante KSB (2003) sugere para aplicações em sistemas de bombeamento a seguinte relação entre o $NPSH_{DISP}$ e o $NPSH_{REQ}$

$$NPSH_{DISP} = \max \{ (1,1 \text{ a } 1,15) NPSH_{REQ}; 0,5m \}.$$

Através desta relação, o fabricante estima um valor máximo para o $NPSH_{DISP}$ para que não ocorra cavitação.

Naturalmente, por razões econômicas e operacionais é desejável que um equipamento de bombeamento necessite o menor $NPSH_{REQ}$ possível. Todos que tratam de bombeamento de líquidos devem estar atentos ao fenômeno cavitação.

6.2 – Durabilidade de um Rotor em Cavitação

A vida útil de um rotor operando em cavitação pode ser determinada através da taxa de erosão, que, conforme descrito anteriormente, depende de vários parâmetros, os quais podem não se ter o devido controle prévio, tornando-se a previsão desta taxa de erosão difícil de ser determinada ainda nos dias de hoje.

Apesar disto, é necessário o conhecimento de qual margem entre o $NPSH_{DISP}$ e o $NPSH_{REQ}(3\%)$ deve ser utilizado para a obtenção de uma vida aceitável para os componentes de uma bomba que venham a sofrer a ação da erosão por cavitação.

6.2.1 – Relação entre os Diversos Tipos de $NPSH_{REQ}$ de uma Bomba

Existe a possibilidade de se determinar o início da cavitação através da medição do nível de pressão sonora ou do nível de ruído em uma bomba, onde esta medição pode indicar, sob condições controladas, a grandeza relativa da erosão por cavitação. Existem também a possibilidade de determinação da cavitação por método visual.

A partir de um teste de cavitação onde são obtidas as curvas $H \times NPSH_{DISP}$ e o Nível de Ruído $\times NPSH_{DISP}$, pode-se obter a relação entre os diversos tipos de $NPSH_{REQ}$ de uma bomba, conforme observa-se na Figura 6.3.

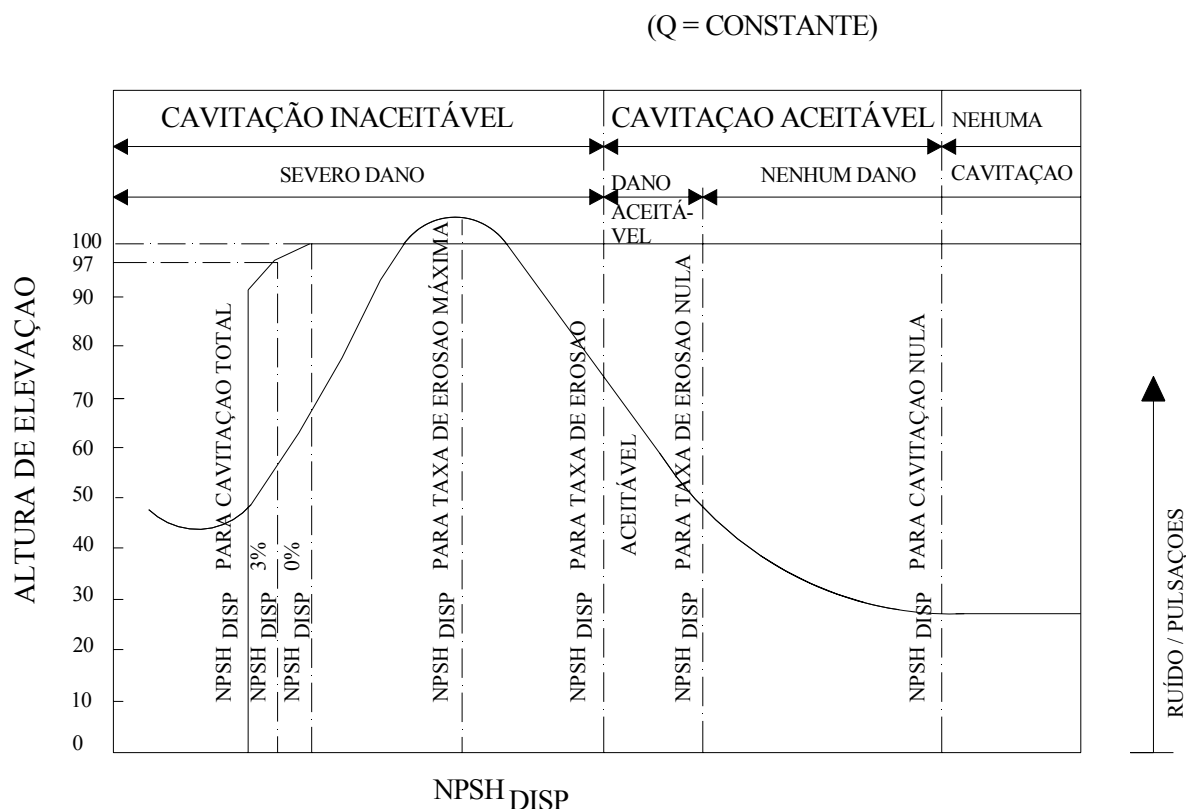


Figura 6.3 – Nível de ruído e altura de elevação em função do $NPSH_{DISP}$ em um teste de cavitação (Vlaming, 1981).

Conforme descrito no trabalho de Xavier (1992), analisando-se a Figura 6.3, pode-se concluir que o $NPSH_{REQ}$ para a cavitação incipiente, $NPSH_{REQ}(CI)$, de uma bomba é bem maior do que o seu $NPSH_{REQ}(3\%)$.

Xavier (1992) faz alguns comentários sobre a Figura 6.3 de extrema importância para o entendimento destes valores, os quais são descritos abaixo:

a) A relação de $NPSH_{REQ}(CI)/NPSH_{REQ}(3\%)$ possui valores bastante variados, que segundo Grist (1974), podem variar de 2 a 20 para bombas comerciais, dependendo do projeto do rotor, da relação entre a vazão de operação e a vazão de projeto e das propriedades termodinâmicas do líquido bombeado. Encontram-se alguns valores da relação de NPSH obtidos para a vazão de projeto em diversos tipos de bombas com diferentes projetos de rotores na Tabela 6.1 a seguir:

Tabela 6.1 – Relação entre o $NPSH_{REQ}(CI)$, obtido pela medição do nível de pressão sonora, e o $NPSH_{REQ}(3\%)$ para a vazão de projeto de diferentes tipos de bombas. (Grist, 1974)

Tipo de bomba	Velocidade de rotação (RPM)	Velocidade específica $n_{S(U.S.)}$	$\frac{NPSH_{REQ}(CI)}{NPSH_{REQ}(3\%)}$
Bomba de Alimentação de Caldeira (1º Estágio)	1500	1400	16,3
Sucção axial de 150 mm	3000	700	10,0
Dupla Sucção	992	2000	> 6,0
Bomba de Armazenamento A	-	800	2,6
Bomba de Armazenamento B	-	1700	>3,8
Bomba de Armazenamento C	2259	1800	>2,2
Bomba de Armazenamento D	2259	1800	>3,0
Bomba de Armazenamento E	2259	1800	2,5
Água de Resfriamento	1200	2740	5,0

Para vazões maiores ou menores que a de projeto, devem ser esperados valores diferentes para esta relação, conforme observa-se na Tabela 6.2.

Para obter-se ausência total de cavitação em uma bomba, os valores de $NPSH_{DISP}$ devem ser muito elevados, o que não é muito praticado devido à elevação dos custos do equipamento a ser adquirido ou até mesmo pela incapacidade de adequar-se sua instalação.

Tabela 6.2 – Relação entre o $NPSH_{REQ}(CI)$ e o $NPSH_{REQ}(3\%)$ para vários tipos de bombas e para vazões menores, iguais e maiores que a de projeto. (Mcnulty e Pearsall 1982)

Tipo de bomba	Velocidade específica $n_{S(U.S.)}$	Vazão como uma percentagem de $Q_{\eta\max}$ (%)	$\frac{NPSH_{REQ}(CI)}{NPSH_{REQ}(3\%)}$
Bomba de Alimentação de caldeira (com Difusor)	1440	100	13,3
Bomba de Processo (com difusor e voluta)	780	24	16,0
		66	11,3
		100	6,5
		120	4,6
Dupla Sucção (com voluta)	2395	120	3,7
		100	>5,6
Bomba de armazenamento (com difusor e voluta)	1372	100	5,0
		75	6,4
Bomba de Água de Resfriamento (modelo 1/5)	3370	100	6,5
		75	11,3
		50	9,1
Bomba de Água de Resfriamento (modelo 1/8)	3370	125	3,0
		100	6,6
		75	7,2
		50	8,0
Bomba de Água de Resfriamento (modelo 1/12)	3370	125	2,9
		100	7,0
		75	7,9
		50	7,1
Bomba de Processo (com voluta)	2495	120	2,6
		100	2,5
		60	3,0

b) O valor de $NPSH_{DISP}$ onde ocorre a taxa de erosão máxima é maior do que o valor correspondente à deterioração total do desempenho da bomba sob certas condições ainda não muito bem definidas. Encontram-se evidências de que o $NPSH_{REQ}$ para taxa de erosão máxima, $NPSH_{REQ}(TEM)$, é maior do que o $NPSH_{REQ}$ para taxa de erosão com 0% de queda, $NPSH_{REQ}(0\%)$, conforme observa-se na Figura 6.3. A taxa de erosão diminui para valores de $NPSH_{DISP}$ menores que o valor para taxa de erosão máxima, o que leva a concluir que em alguns casos, seria preferível não se ter uma margem muito grande do $NPSH_{DISP}$ acima do $NPSH_{REQ}(3\%)$, evitando-se atuar na faixa de taxas de erosão elevadas, onde pode-se ter $NPSH_{DISP} \cong NPSH_{REQ}(TEM)$, causando danos muito maiores no rotor do que se trabalhasse com o $NPSH_{DISP} \cong NPSH_{REQ}(3\%)$, conforme observa-se na Figura 6.4.

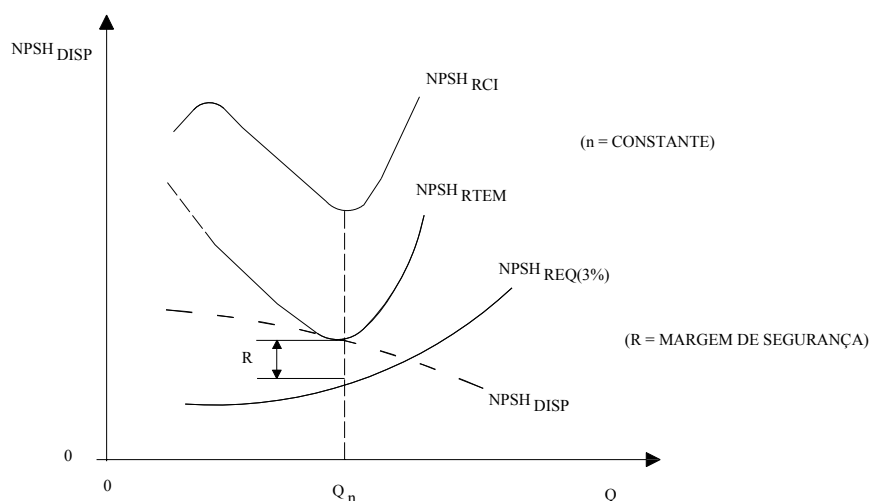


Figura 6.4 – Utilização da margem de segurança do $NPSH_{DISP}$ acima do $NPSH_{REQ}(3\%)$ para a vazão de projeto da bomba. (Xavier, 1992)

c) O $NPSH_{REQ}(CI)$ é bem maior do que o valor para o $NPSH_{REQ}$ para taxa de erosão incipiente, $NPSH_{REQ}(TEI)$, onde, se a bomba cavitara em níveis baixos e adotasse valores para o $NPSH_{DISP} = NPSH_{REQ}(TEI)$, o rotor continuaria a ter uma vida considerada longa à cavitação e seriam necessários valores bem mais baixos para o $NPSH_{DISP}$ de sua instalação. Normalmente, é difícil de conhecer-se o valor do $NPSH_{REQ}(TEI)$ de uma bomba.

Na Tabela 6.3 desenvolvida por Taylor (1977), a partir de dados experimentais, recomenda-se valores de vazões mínimas para uma operação contínua sem problemas de erosão por cavitação em bombas de elevadas alturas manométricas por estágio, maiores que 200 metros.

Estes valores recomendados são aproximações e servem somente como passo inicial para a proteção da bomba contra os danos causados pela cavitação.

Tabela 6.3 – Vazões mínimas recomendadas para bombas de alta energia para se ter $NPSH_{DISP} > NPSH_{REQ}(TEM)$. (Taylor, 1977)

Líquido e Tipo de Rotor	$NPSH_{DISP} > NPSH_{REQ}(3\%)$ em $Q\eta_{m\acute{a}x}$	Vazão Mínima recomendada. % de $Q\eta_{m\acute{a}x}$
Hidrocarboneto, rotor com simples ou dupla sucção	1.1 e maior	25%, ou valor recomendado pelo fabricante da bomba, se for maior
Água ou solução com água com rotor de simples sucção	2 ou menor 2,5 3 ou maior	35% 30% 25%
Água ou solução com água com rotor de dupla sucção	2 ou menor 2,5 3 ou maior	70% 60% 50%

d) Entre os níveis de início e de taxa máxima de erosão, encontra-se o valor do $NPSH_{REQ}$ para taxa de erosão aceitável. Devido a complexidade dos fatores que influenciam o processo de erosão por cavitação, o conhecimento prévio para o valor exato do $NPSH_{REQ}$ para taxa de erosão aceitável, $NPSH_{REQ}(TEA)$, de uma bomba, atualmente ainda não é conhecido. Esse valor de $NPSH_{REQ}$ é considerado ideal do ponto de vista das necessidades dos usuários de bombas, permitindo-se que se atinja uma vida aceitável para o rotor, utilizando-se um valor para o $NPSH_{DISP}$ bem menor do que o necessário para evitar-se por completo a erosão ou a cavitação.

Na Figura 6.5, observa-se também que a faixa de erosão aceitável requer valores de $NPSH_{REQ}$ bem maiores do que o valor para o $NPSH_{REQ}$ com queda de 3% na altura manométrica da bomba. Entretanto, evidências empíricas têm mostrado que, exceto nos casos particulares de bombas com elevadas alturas manométricas e elevadas potências de eixo, as bombas especificadas e aplicadas com base no $NPSH_{REQ}(3\%)$ tem operado com poucas dificuldades e com uma razoável expectativa de vida.

Conforme observa-se na Figura 6.5, a explicação para o fato mencionado acima é de que geralmente, alguma margem de segurança é adicionada pelo usuário na seleção do $NPSH_{DISP}$, e adotando-se $NPSH_{DISP} = NPSH_{REQ}(3\%) + \text{margem de segurança}$, pode-se obter valores para $NPSH_{DISP} \geq NPSH_{REQ}(TEA)$ em bombas de pequenas alturas manométricas por estágio.

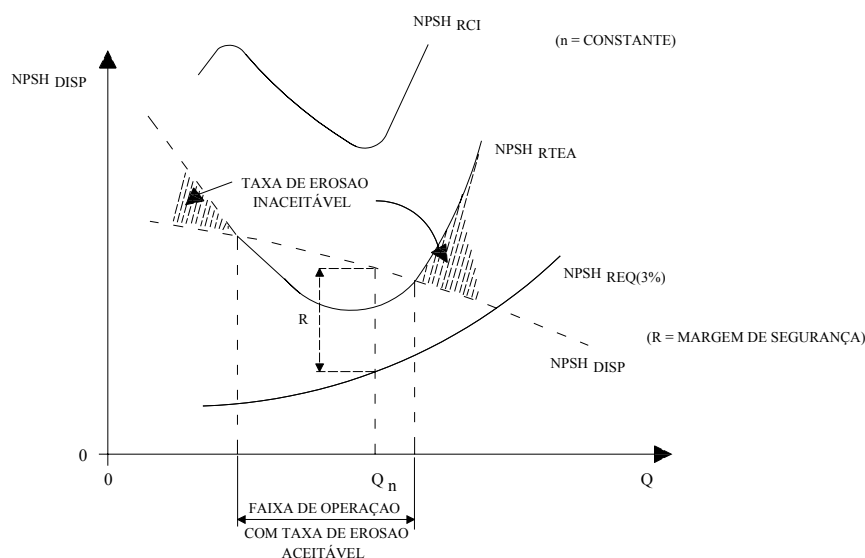


Figura 6.5 – Relacionamento entre o NPSH_{DISP} e o NPSH_{REQ}(TEA) (Xavier, 1992).

Para se estimar o valor do NPSH_{REQ}(TEA) de uma bomba, Grist (1974), recomenda as seguintes expressões empíricas:

- para velocidades de rotação iguais ou menores que 3.000RPM:

$$\text{NPSH}_{\text{REQ}}(\text{TEA}) \geq 3 \times b \times \text{NPSH}_{\text{REQ}}(3\%)$$

- para velocidades de rotação maiores que 3.000RPM

$$\text{NPSH}_{\text{REQ}}(\text{TEA}) \geq \left(2,5 + \frac{n}{6000} \right) b \times \text{NPSH}_{\text{REQ}}(3\%)$$

onde “b” é o coeficiente de vazão, conforme observa-se na Tabela 6.4 a seguir:

O coeficiente de vazão “b” leva em conta o aumento da taxa de erosão para vazões maiores ou menores que a de projeto, daí a importância de se selecionar uma bomba para operação em vazões próximas da sua vazão de projeto em aplicações onde é provável a ocorrência da cavitação.

Tabela 6.4 – Coeficientes de vazão em função da relação entre vazão de Operação e vazão de Projeto. (Grist, 1974).

$\frac{Q_{\text{operação}}}{Q_{\text{projeto}}} \%$	30-49	50-79	80-110	111-125
Coeficiente de Vazão “b”	3,0	2,0	1,0	4,0

As expressões referentes ao NPSH foram deduzidas a partir de dados experimentais sobre o processo de erosão por cavitação muito limitados, servindo assim, somente como orientação, para se evitar valores de $NPSH_{DISP}$ excessivamente baixos, o que acarretaria um sério dano por erosão cavitacional na bomba.

6.3 - Limites de Erros na Determinação do Valor $NPSH_{REQ}$ Garantido pelo Fabricante

Como margem máxima de erro na medição do valor $NPSH_{REQ}$ em testes, indica-se 5,3% do valor NPSH medido ou 0,2m, prevalecendo o maior valor conforme ABNT/MB-1032 (1989).

A execução de testes com líquidos em temperaturas elevadas ou próximas ao ponto crítico merece especial cuidado no contrato.

6.4 – Influência da Temperatura e do Líquido no valor do $NPSH_{REQ}$

Além da influência da altura de sucção e da vazão bombeada, o valor do NPSH é também influenciado pelas propriedades termodinâmicas do líquido transportado, que podem ser modificadas em um mesmo líquido em consequência da temperatura. Em misturas de líquidos, as propriedades termodinâmicas sofrem alteração em função da composição da mistura.

Nos hidrocarbonetos, por exemplo, o valor do $NPSH_{REQ}$ diminui em comparação com o da água fria, à medida que aumenta o peso específico, a pressão de vapor e a temperatura. Esta redução do valor $NPSH_{REQ}$ não é, na maioria dos casos, utilizada, mas considerada como segurança adicional benéfica.

6.5 – Obtenção do $NPSH_{REQ}(3\%)$

Um dos métodos de se determinar o $NPSH_{REQ}(3\%)$ é através de exaustivos ensaios utilizando-se testes adequados, os quais já foram citados no Capítulo 2.

As metodologias mais comuns utilizadas na realização destes ensaios são encontradas nas 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).

O tipo de ensaio de maior utilização é aquele que provoca cavitação reduzindo-se o $NPSH_{DISP}$ até que apareçam alterações no desempenho da bomba.

Esta etapa da pesquisa consiste na obtenção de grandezas para valores constantes de vazão e rotação da bomba ensaiada.

Após o equipamento estar em funcionamento, regula-se a rotação da bomba através do inversor de frequência. Para a rotação desejada, mantém-se o registro de sucção totalmente aberto e fecha-se o registro de recalque até se obter a vazão desejada para o teste. Espera-se então por aproximadamente 5 minutos, com o equipamento em funcionamento, e observa-se o seu comportamento. Verifica-se a estabilidade do equipamento através dos dados obtidos para a rotação e a vazão. Estando estes constantes, inicia-se a obtenção das medidas.

A primeira obtenção de medida deve ser para o equipamento com estabilidade operacional. Passa-se então, a realizar as alterações das condições operacionais do equipamento, através do estrangulamento do registro de sucção e abertura do registro de recalque, mantendo-se constante a vazão e a rotação da bomba.

Para cada alteração de fechamento/abertura dos registros, realiza-se as coletas das medidas. Este procedimento era realizado até a observação de que a bomba encontrava-se em pleno processo de cavitação, sendo este ponto detectado pela instabilidade do sistema, ruído típico, trepidação da tubulação, oscilação acentuada nos instrumentos de medição. A chamada cavitação pulsante.

As regulagens efetuadas nos registros de sucção e recalque devem ser feitas com muito cuidado e critério para obter-se o ponto de cavitação, pois variações bruscas podem ocasionar a não observação do provável início do fenômeno.

Entre a obtenção de dados para cada vazão estipulada e em sua posterior repetição, torna-se necessário a verificação e retirada de possíveis bolhas de vapor nas tubulações, formadas pela cavitação durante a obtenção dos dados.

Para a obtenção da curva de $NPSH_{REQ}(3\%)$, após os procedimentos iniciais para o acionamento da bancada, adotou-se a metodologia indicada pela ASME, onde, procedeu-se da seguinte forma:

- Adota-se as vazões de interesse para o cálculo do $NPSH_{REQ}(3\%)$;
- Com a bancada em funcionamento na vazão desejada, anota-se os valores indicados nos instrumentos, para os cálculos necessários, com o registro de sucção totalmente aberto e na vazão estipulada;

- Adota-se posições de estrangulamento no registro de sucção para todos os outros cálculos;
- Para cada vazão estipulada traçou-se um gráfico de $NPSH_{DISP} \times \text{Altura Útil}(H_u)$;

6.6 – Generalização do Conceito $NPSH_{REQ}$

Conforme mencionado anteriormente, o conceito de $NPSH_{REQ} \equiv NPSH_{DISP}(3\%)$ garante, relativamente à cavitação, apenas que o colapso máximo da altura útil, H_u , será de 3%. Mas poderá haver cavitação. Caso se deseje diminuir ou mesmo eliminar a cavitação, faz-se necessário generalizar o conceito de $NPSH_{REQ}$. Então seja $NPSH^*_{REQ}$ o $NPSH$ requerido com valores suficientes para reduzir ou mesmo eliminar a cavitação. Pelo já exposto é imediato que

$$NPSH^*_{REQ} \geq NPSH_{REQ}$$

e que, por conseguinte, um dado escoamento com pouca ou sem cavitação, deve obedecer à seguinte condição

$$NPSH_{DISP} \geq NPSH^*_{REQ}$$

Adicionalmente, pode-se definir o fator R_{REQ} , como segue

$$R_{REQ} \equiv \frac{NPSH^*_{REQ}}{NPSH_{REQ}}, \quad R_{REQ} \geq 1,$$

assim, uma vez conhecido R_{REQ} e $NPSH_{REQ}$ tem-se uma expressão para o cálculo do $NPSH$ requerido generalizado, $NPSH^*_{REQ}$, como segue

$$NPSH^*_{REQ} \equiv R_{REQ} \times NPSH_{REQ}$$

Pode-se também definir R_{DISP} , que é aquele que efetivamente ocorre em cada instalação de bombeamento. Assim R_{DISP} é a razão entre o $NPSH$ disponível, $NPSH_{DISP}$, e o $NPSH$ requerido, $NPSH_{REQ}$, portanto

$$R_{DISP} \equiv \frac{NPSH_{DISP}}{NPSH_{REQ}}, \quad R_{DISP} \geq 0.$$

Evidente que para $0 < R_{DISP} < 1$ haverá cavitação.

Segundo Floriancic [19--], a taxa de erosão cavitacional é, fortemente, dependente do fator R_{DISP} .

Na Figura 6.6 observa-se a taxa de erosão cavitacional em função do fator R_{DISP} , denominado simplesmente de R por aquele autor. Nota-se que a erosão cavitacional tem ponto de máximo para $R_{DISP} \cong 1,5$, assim mesmo aumentando o $NPSH_{DISP}$ a partir de $NPSH_{REQ}(3\%)$, pode-se, ainda aumentar a erosão cavitacional.

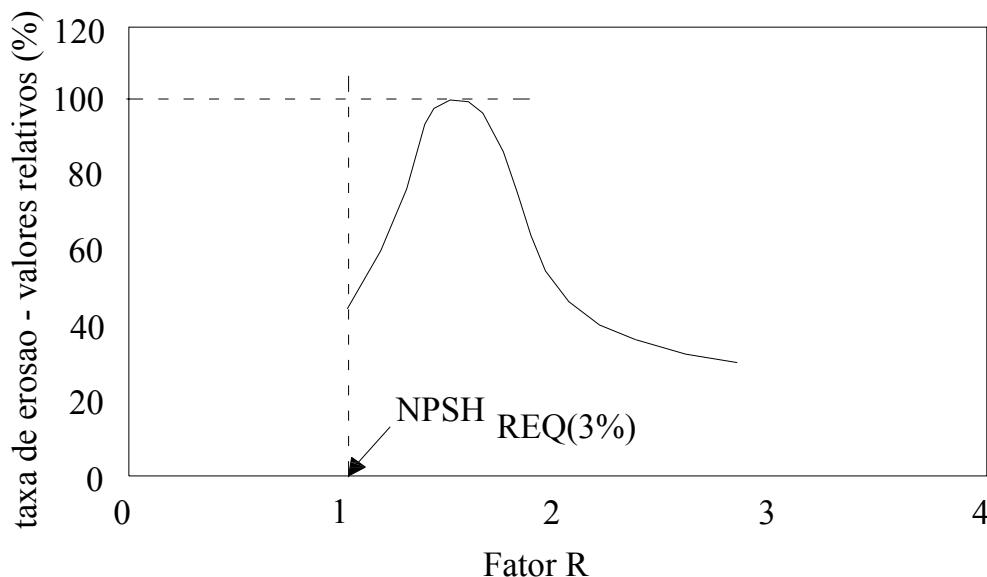


Figura 6.6 – Curva da taxa de Erosão em função do fator de correção R.

Grist (1998) afirma que para evitar a cavitação pulsante deve-se utilizar $R_{DISP} \geq 1,3$ e para evitar a cavitação geral deve-se usar $R_{DISP} \geq 3$.

Outros autores, Budris e Mayleben (1998), Erickson *et al* (2000), citam mesmo $R_{DISP} \geq 4$. Sob condições desfavoráveis existe na literatura indicações para uso de $R_{DISP} \geq 20$. Naturalmente, quanto maior for R_{DISP} , após o ponto de máximo, melhor será o controle da cavitação e o tempo de operação sem paralisação do processo, no entanto, o custo construtivo operacional das instalações também aumentarão com R_{DISP} .

6.7 – Resultados Obtidos para NPSH requerido com Queda de 3%, $NPSH_{REQ}(3\%)$

Para a determinação do $NPSH_{REQ}$ da bomba desta pesquisa, optou-se pela utilização de outro manômetro de coluna de líquido tipo U para a obtenção dos dados da pressão de descarga, obtendo-se maior precisão nos valores e, denominando-se esta etapa como Fase 3.

Conforme observa-se na Figura 6.7, utilizou-se a mesma instalação para a obtenção da pressão na sucção da bomba, e a equação para o cálculo da pressão absoluta nesta etapa é a mesma utilizada na Fase 2 sendo

$$p_2 = p_{amb} - g\Delta h_s(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) - \rho_{H_2O}gl_2. \quad (6.4)$$

Para a obtenção da pressão na descarga nesta etapa da pesquisa, observando-se a Figura 6.7 e efetuando-se as análises das condições operacionais, tem-se:

$$p_x = p_3 + \rho_{H_2O}gl_4 \quad (6.5)$$

e

$$p_x = p_{amb} + \rho_{Hg}g(l_3 + l_4). \quad (6.6)$$

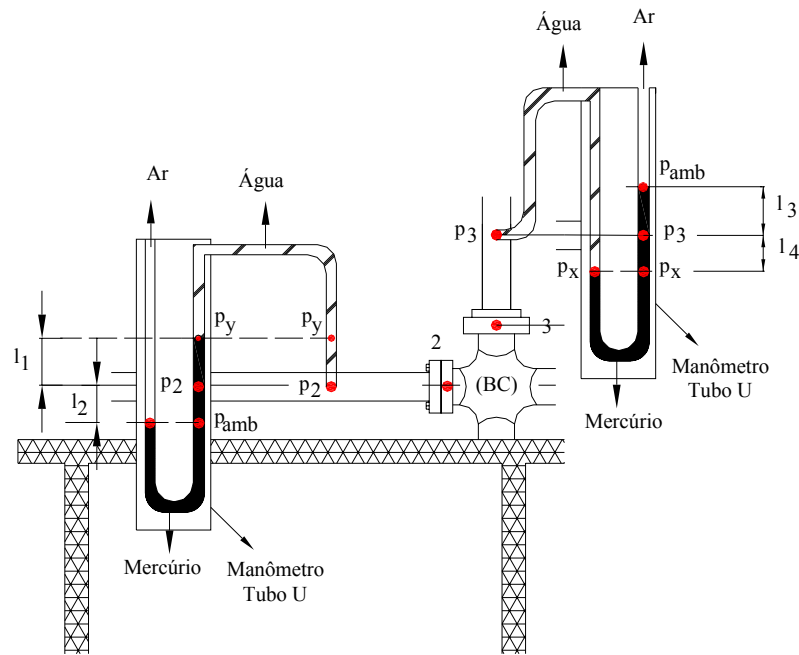


Figura 6.7 – Esquema geral dos manômetros utilizados na Fase 3.

Igualando-se as duas equações tem-se

$$p_3 = p_{amb} + \rho_{Hg}g(l_3 + l_4) - \rho_{H_2O}gl_4. \quad (6.7)$$

Fazendo-se algumas manipulações matemáticas, pode-se concluir que

$$p_3 = p_{amb} + \rho_{Hg}g(l_3 + l_4) - \rho_{H_2O}gl_4 + \rho_{H_2O}gl_3 - \rho_{H_2O}gl_3 \quad (6.8)$$

ou

$$p_3 = p_{amb} + g(l_3 + l_4)(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) + \rho_{H_2O}gl_3 \quad (6.9)$$

ou ainda

$$p_3 = p_{amb} + g\Delta h_r(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) + \rho_{H_2O}gl_3 \quad (6.10)$$

na qual $\Delta h_r = l_3 + l_4$.

Sendo esta a equação da pressão absoluta na descarga da bomba para a Fase 3.

O manômetro de tubo U da descarga também foi instalado na mesma cota do ponto de obtenção da pressão. Após as análises de energia, substituiu-se os valores de p_2 e p_3 nas equações correspondentes da altura útil, H_u , equação (4.22) e da equação (5.1) para o cálculo do $NPSH_{DISP}$.

Com esta modificação para esta etapa, encontrou-se as equações correspondentes para as alturas H_u e $NPSH_{DISP}$, dados por:

$$H_u = \frac{g\Delta h_r(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) + \rho_{H_2O}gl_3 + g\Delta h_s(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) + \rho_{H_2O}gl_2}{\rho g} + \frac{V_3^2 - V_2^2}{2g} + Z_3 - Z_2 \quad (6.11)$$

e

$$NPSH_{DISP} = \frac{p_{amb} - g\Delta h_s(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) - \rho_{H_2O}gl_2 - p_v}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2, Z_2 \equiv 0. \quad (6.12)$$

6.8 – Detecção do Ponto de Cavitação

De posse dos resultados de H_u e de $NPSH_{DISP}$ para cada vazão ensaiada em cada rotação, deve-se fazer uma análise para se saber qual o valor de H_u será utilizado como $H_{médio}$, valor este que será utilizado para indicar o decréscimo procurado de 3% da altura H_u de elevação. Dos valores obtidos para o $H_{médio}$, calcula-se a queda de 3% do seu valor, sendo também representado neste trabalho como $H_u(97\%)$.

Durante os experimentos, deseja-se a obtenção de um trecho de decréscimo suave da curva, obtendo-se assim o valor acurado do ponto de queda da altura de 3%. Na maioria dos casos, este decréscimo suave não é possível, então, através de pontos obtidos anteriormente e posteriormente ao decréscimo de 3%, torna-se necessário adotar-se um procedimento para a obtenção dos resultados, sendo um deles a utilização de métodos gráficos e estatísticos.

O método mais simples seria o cálculo, através de interpolação linear, entre o ponto imediatamente anterior e, imediatamente posterior ao valor do $H_{médio}$, onde se tem a queda de 3% da altura, $H_u(97\%)$.

Outro método seria a obtenção de um polinômio que se ajuste aos pontos pertencentes ao trecho curvilíneo do gráfico, podendo-se, então, obter o ponto de início da cavitação. Convém

salientar que deve-se testar polinômios de vários graus até se obter um que represente a curva da melhor maneira possível. Não se trata de análise, ou interpolação, meramente determinística, deve-se também levar em consideração a natureza estocástica das grandezas envolvidas.

Adotou-se nesta pesquisa como critério padrão para todos os experimentos, a utilização como valor de referência, os valores obtidos no trecho linear de maior valor para H_u , obtendo-se o valor de $H_{\text{médio}}$ para estes pontos.

Para obter-se o ponto inicial de cavitação da bomba, utilizou-se da metodologia apresentada pela norma ASME (1990), a qual cita que a cavitação torna-se significativa com a queda de 3% de altura útil.

Durante os testes foram coletados os dados experimentais e notou-se que nem sempre foi possível a obtenção acurada do ponto de referência de 3%, sendo necessário a obtenção dos pontos através de análise estatísticas. Adotou-se então o método de interpolação linear como padrão para a obtenção dos 3% de queda da altura, método este adotado também na maioria das curvas testadas por Silva (1998) e adotado no trabalho de Chiusoli (1998).

Nas figuras mostradas a seguir estão expressos os resultados encontrados após o tratamento dos dados obtidos experimentalmente.

6.8.1 – Curvas Obtidas para a Rotação de 1400 RPM

Para as curvas ensaiadas, adotou-se vazões de interesse as quais serão mostradas com seu respectivo ponto de queda de 3%. Além disso, será mostrada a forma com a qual chegou-se aos valores de $NPSH_{\text{REQ}}$. Calculou-se os valores das incertezas do $NPSH_{\text{REQ}}$ por meio de análises estatísticas em todos os pontos coletados.

- **Vazão: 12,475 m³/h**

Após análise inicial, onde testou-se um polinômio de segundo grau e verificou-se a proximidade dos valores obtidos para um ajuste linear da curva, optando-se conforme descrito anteriormente, pela utilização deste último para as análise seguintes.

Na Figura 6.8 (a), analisa-se os pontos imediatamente anterior e posterior à curva representativa de queda de 3% da altura $H_{\text{médio}}$, e através da interpolação linear entre os pontos analisados obtém-se o valor correspondente ao $NPSH_{\text{REQ}}$ para a vazão ensaiada.

$$\text{Ponto anterior} = (NPSH_{\text{DISP}}, H_u) = (3,25449 \pm 0,03967, 12,35625 \pm 0,06711) \text{ m},$$

Ponto posterior = $(NPSH_{DISP}, H_u) = (3,1227 \pm 0,03976, 12,18341 \pm 0,06696)$ m.

Com relação aos valores máximos obtidos no trecho linear do início da curva, o valor de $H_u(97\%)$ que representa a queda de 3% de $H_{médio}$, obtido conforme descrição anterior, corresponde a $(12,20947 \pm 0,06832)$ m, e o respectivo valor para $NPSH_{REQ} = (3,142567 \pm 0,094737)$ m.

Na Figura 6.8 (b) mostra-se os pontos analisados e a equação linear utilizada para os cálculos.

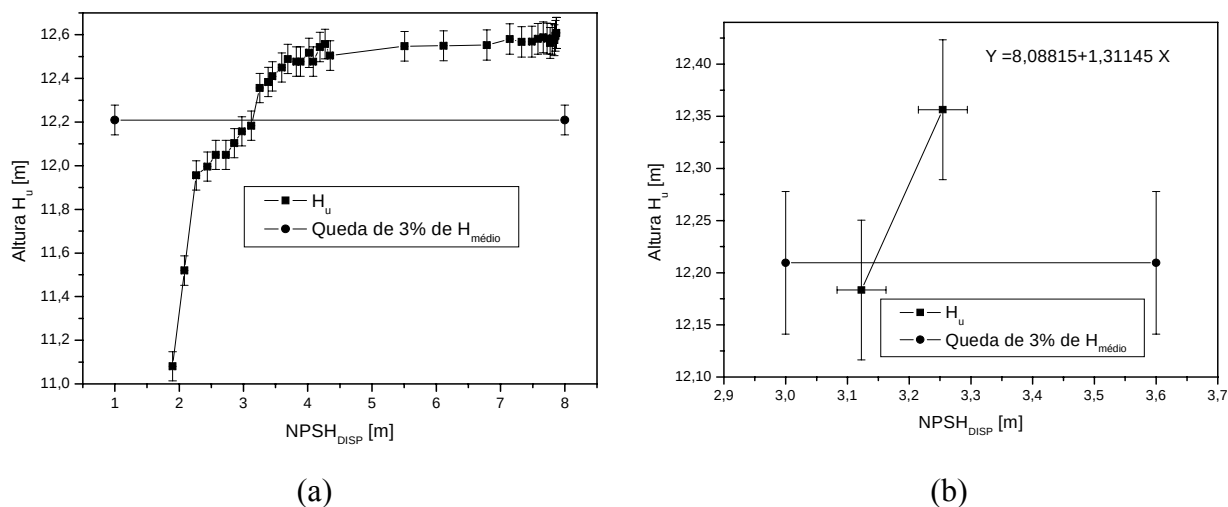


Figura 6.8 – Determinação de $NPSH_{REQ}$ para rotação de 1400 RPM e vazão de $12,475 \text{ m}^3/\text{h}$.

Utilizando-se o mesmo procedimento para diferentes vazões e rotações montou-se a Tabela 6.5 a seguir. Os valores de $H_{médio}$ obtidos para suas respectivas curvas encontram-se no apêndice D.

Tabela 6.5 – Resultados obtidos para o $NPSH_{REQ}(3\%)$ com as rotações de 1400, 1500 e 1600RPM.

Rotação (RPM)	Vazão (m³/h)	Ponto Anterior		Ponto Posterior			
		$NPSH_{DISP}$ (m)	H_u (m)	$NPSH_{DISP}$ (m)	H_u (m)	$H_u(97\%)$ (m)	$NPSH_{REQ}$ (m)
1400	12,475	3,25449	12,35625	3,12270	12,18341	12,20947	3,14257
		±	±	±	±	±	±
		0,03967	0,06711	0,03976	0,06696	0,06832	0,094737
1400	14,160	2,24475	11,77903	2,20573	10,94187	11,73019	2,24250
		±	±	±	±	±	±
		0,04022	0,08121	0,04025	0,08080	0,08035	0,04545
1400	16,550	1,83638	11,06622	1,66555	11,02618	11,04866	1,76147
		±	±	±	±	±	±
		0,04078	0,10563	0,04092	0,10575	0,10268	0,49200
1400	18,235	2,03763	10,47424	1,98391	10,42354	10,45660	2,01894
		±	±	±	±	±	±
		0,04064	0,12559	0,04069	0,12562	0,12156	0,18315
1500	12,475	3,60867	14,10828	3,47682	13,77615	14,04473	3,58344
		±	±	±	±	±	±
		0,03971	0,06942	0,03979	0,06890	0,07212	0,07158
1500	16,695	1,87935	12,96498	1,77387	12,87319	12,94102	1,85182
		±	±	±	±	±	±
		0,04102	0,10801	0,04110	0,10801	0,10680	0,16578
1500	18,235	1,97979	12,23464	1,83431	12,15556	12,20347	1,92244
		±	±	±	±	±	±
		0,04068	0,12610	0,04079	0,12614	0,12336	0,27452
1500	20,205	2,26182	11,32817	2,10380	10,62852	11,14101	2,21955
		±	±	±	±	±	±
		0,04003	0,15227	0,04016	0,15222	0,14773	0,07455
1600	12,545	3,17808	16,14628	2,98089	16,06419	16,11289	3,09786
		±	±	±	±	±	±
		0,03969	0,07300	0,03983	0,07277	0,07727	0,21272
1600	16,695	2,19582	15,26254	2,01231	14,11041	15,06522	2,16439
		±	±	±	±	±	±
		0,04046	0,10954	0,04061	0,10868	0,10919	0,05739
1600	18,235	1,82757	14,62026	1,65567	14,36824	14,41434	1,68711
		±	±	±	±	±	±
		0,04124	0,12732	0,04138	0,12722	0,12534	0,13120
1600	20,135	1,98228	13,58674	1,77133	13,38645	13,57919	1,97432
		±	±	±	±	±	±
		0,04118	0,15205	0,04135	0,15204	0,14849	0,21131

6.8.2 – NPSH requerido em função da Vazão e Rotação

Nas Figuras 6.9 (a), (b) e (c) apresenta-se as curvas de $NPSH_{REQ}$ em função da vazão e observa-se o comportamento do equipamento para as rotações e vazões ensaiadas. Para as vazões baixas, observa-se que os valores obtidos para o $NPSH_{REQ}$ são decrescentes com o aumento da vazão. Com o aumento da vazão, o $NPSH_{REQ}$ atinge valor mínimo e depois torna a aumentar. O comportamento geral, Figura 6.9, com os valores obtidos condiz com a literatura.

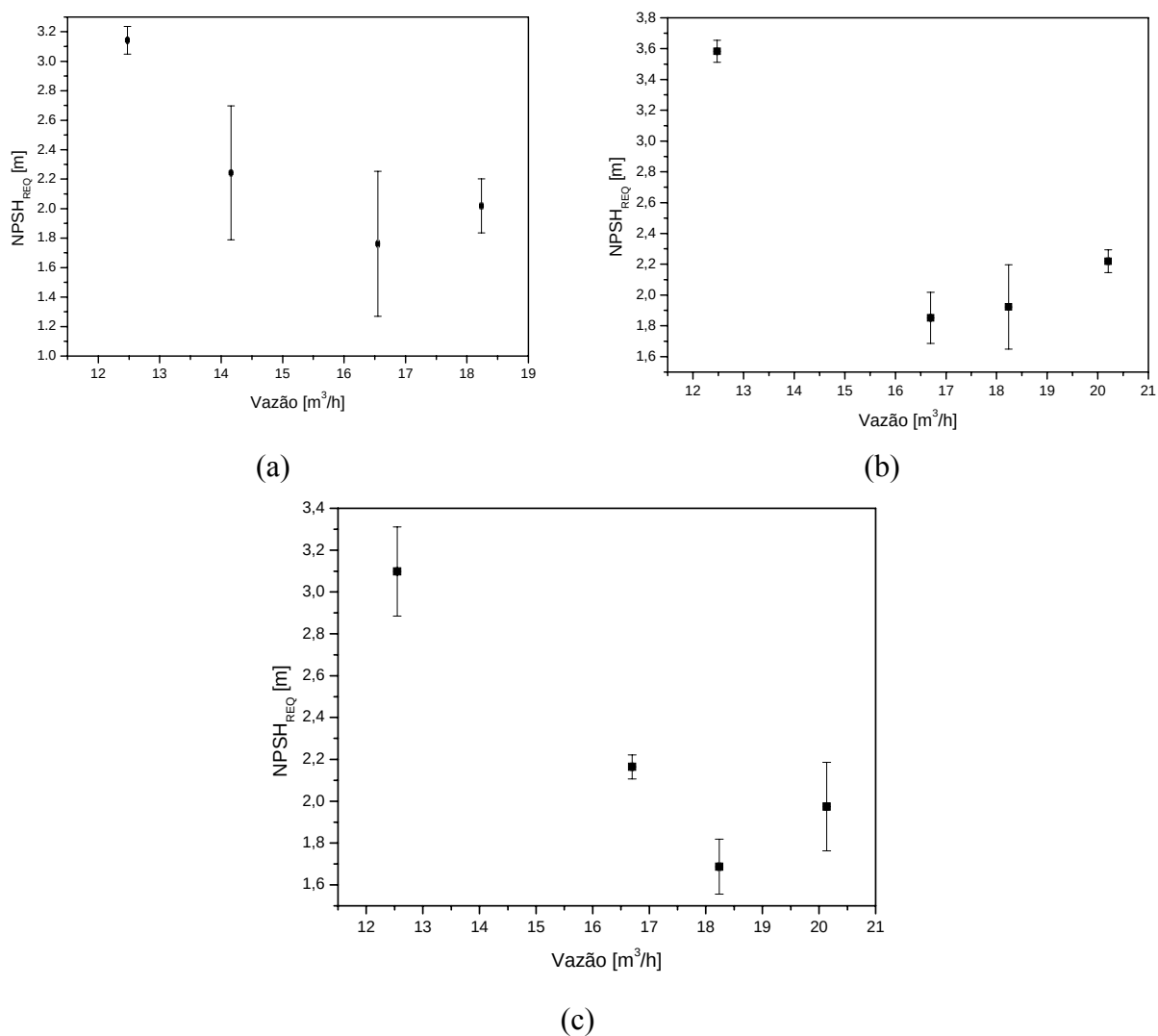


Figura 6.9 – $NPSH_{REQ} \times$ Vazão, Q, para as rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.

6.8.3 – Coeficiente de $NPSH_{REQ}$, $CNPSH_{REQ}$, em função do Coeficiente de Vazão, ϕ

Semelhante à análise do capítulo anterior, como esta pesquisa trata do estudo de cavitação em bombas centrífugas, torna-se interessante definir um coeficiente denominado Coeficiente de $NPSH$, definido no Apêndice B.

Este coeficiente adimensional torna possível comparações entre os trabalhos desenvolvidos nesta área.

Observa-se na Figura 6.10 que os valores obtidos para o Coeficiente de $NPSH_{REQ}$, $CNPSH_{REQ}$, para as três rotações ensaiadas apresentam-se próximos e com comportamento semelhante. As curvas obtidas nas rotações de 1400 e 1500 RPM obtiveram resultados na faixa de coeficientes de $NPSH_{REQ}$ com valores entre aproximadamente 0,28 e 0,14, enquanto a curva obtida da rotação de 1600 RPM encontra seus valores entre aproximadamente 0,21 e 0,11.

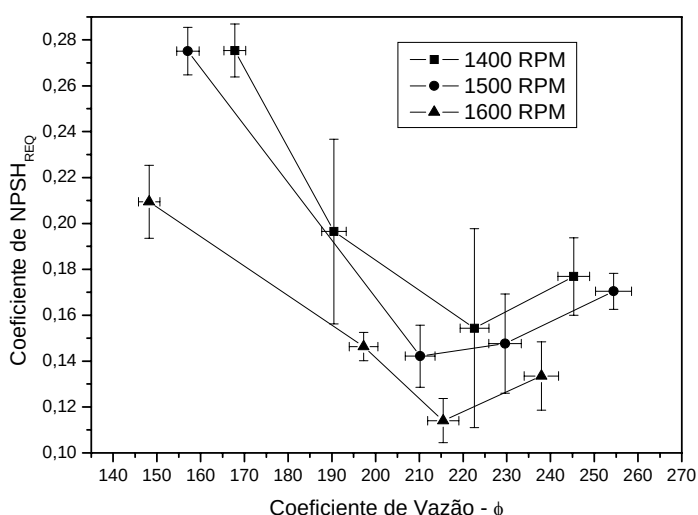


Figura 6.10 – Coeficiente de $NPSH_{REQ}$, $CNPSH_{REQ}$, $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.

6.8.4 – Número de Thoma, σ em função da Velocidade Específica, n_q .

Na Figura 6.11 apresenta-se as curvas do número de Thoma, σ , em função da velocidade específica, n_q . Observa-se que os valores obtidos são próximos aos valores do Coeficiente de $NPSH_{REQ}$ obtidos anteriormente, e seu comportamento muito parecido. Comparando-se os números de Thoma obtidos com o gráfico da Figura 2.3, observa-se que os valores encontram-se aproximadamente na faixa entre 0,26 e 0,11.

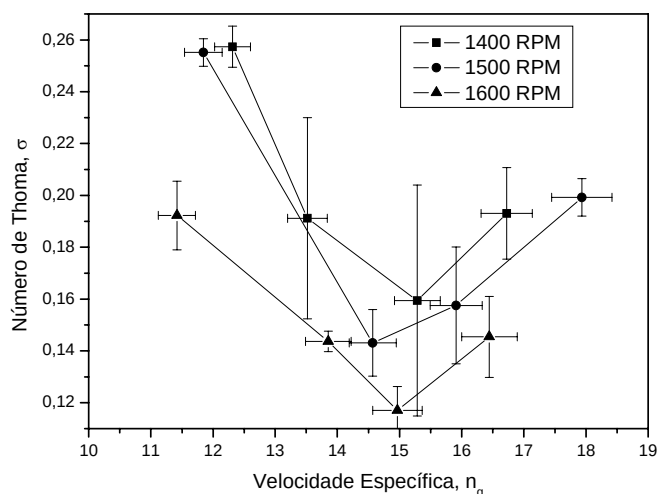


Figura 6.11 – Número de Thoma, $\sigma \times$ Velocidade Específica, n_q , para as rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.

6.8.5 – Coeficientes de Pressão, ψ , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ .

Na Figura 6.12, mostra-se que o comportamento das curvas obtidas através dos coeficientes adimensionais para a pressão, ψ , e para o coeficiente de vazão, ϕ , para as rotações ensaiadas, utilizando-se nesta etapa da pesquisa, somente a altura H_u , devido ser esta a altura correta para estes cálculos. Observa-se que elas possuem o mesmo comportamento e seus valores encontram-se também próximos.

O coeficiente de pressão, ψ , apresenta um comportamento quase retilíneo e com valores entre 0,9 e 1,08.

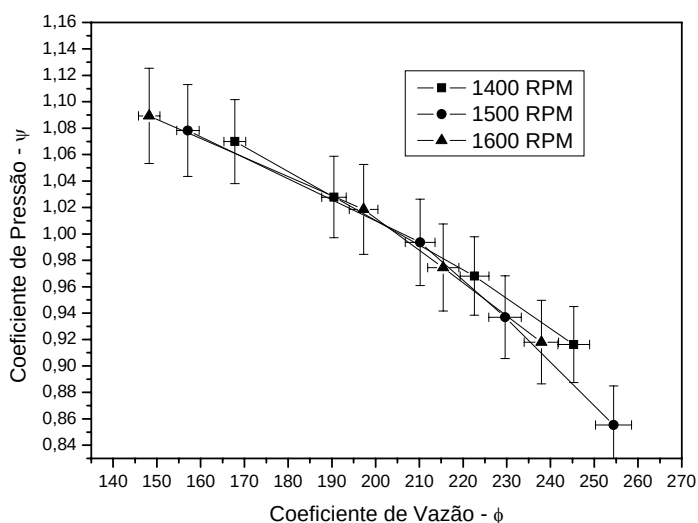


Figura 6.12 – Coeficientes de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de vazão, ϕ para as rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.

6.8.6 – Coeficientes de Pressão, ψ , em função da Velocidade Específica, n_q

Observa-se na Figura 6.13 que as curvas obtidas para o coeficiente de pressão em função da velocidade específica possuem o mesmo comportamento das curvas obtidas para o coeficiente de pressão pelo coeficiente de vazão.

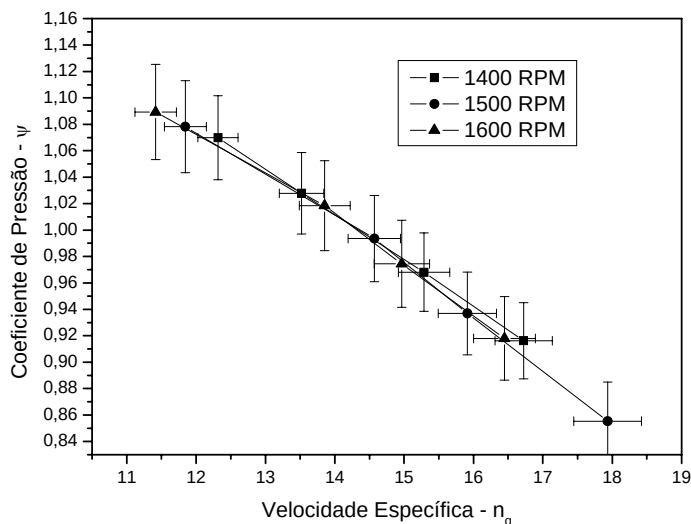


Figura 6.13 – Coeficientes de Pressão, ψ , x Velocidade Específica, n_q para as rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.

6.8.7 – Número de Reynolds, Re , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ

Na Figura 6.14 construiu-se as curvas do número de Reynolds em função do coeficiente de vazão, ϕ , utilizando-se a fórmula $Re = \frac{\omega D^2}{\nu}$, assim como anteriormente nas análises do Capítulo 4. Nesta etapa da pesquisa, Fase 3, utilizou-se os valores médios das rotações obtidos ao longo de toda curva nos cálculos dos coeficientes adimensionais. As variações máximas das rotações ensaiadas não ultrapassaram os 2% nesta etapa e 3% em relação a todas as rotações das etapas anteriores. Com esta formulação e esta consideração, observa-se que os valores obtidos são constantes devido à própria definição.

Os valores obtidos para o número de Reynolds estão compreendidos entre aproximadamente $8,6 \times 10^6$ e 10×10^6 . Para estes valores pode-se afirmar que o escoamento durante os testes é turbulento.

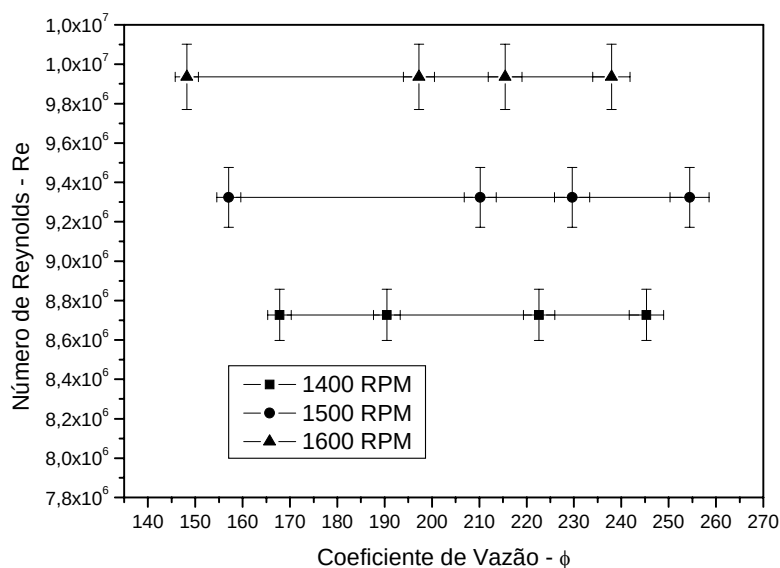


Figura 6.14 – Número de Reynolds, Re , x Coeficiente de Vazão, ϕ para as rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.

6.8.8 – Número de Reynolds, Re , em função da Velocidade Específica, n_q

Na Figura 6.15, também utiliza-se a fórmula $Re = \frac{\omega D^2}{\nu}$. Nota-se que o seu comportamento é idêntico ao do item 6.8.7.

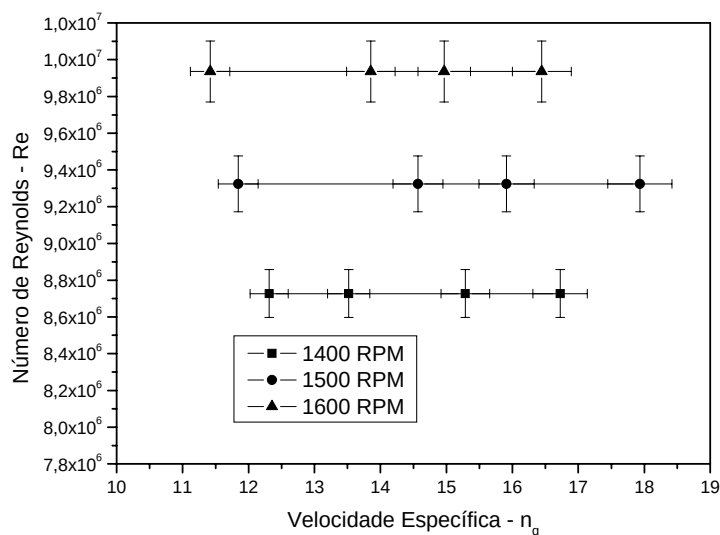


Figura 6.15 – Número de Reynolds, Re , x Velocidade Específica, n_q para as rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.

6.8.9 – Número de Reynolds Modificado, Re^* , em função do Coeficiente de Vazão, ϕ

Na Figura 6.16 construiu-se as curvas do número de Reynolds modificado, Re^* , em função do coeficiente de vazão, ϕ , utilizando-se a fórmula $Re^* = \frac{Q}{\nu D}$, o qual depende da vazão do equipamento. Observa-se que, para esta formulação, o número de Re apresenta um comportamento totalmente linear e crescente, com uma variação entre $Re^* = 1,4 \times 10^9$ até aproximadamente $Re^* = 2,4 \times 10^9$.

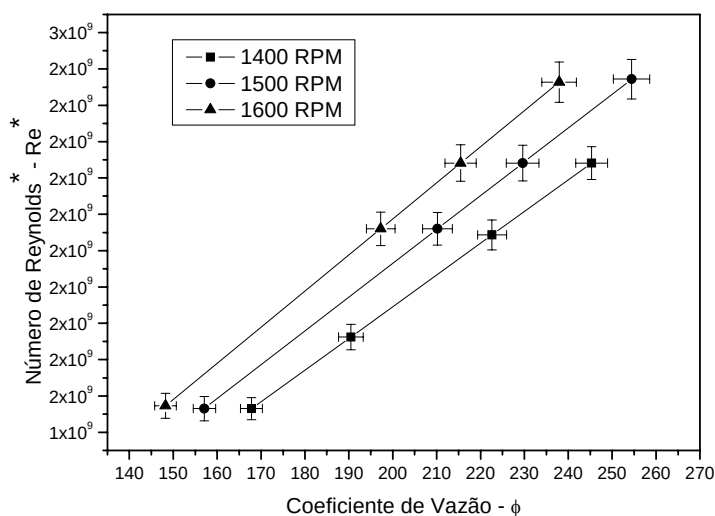


Figura 6.16 – Número de Reynolds*, Re^* , x Coeficiente de Vazão, ϕ para as rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.

6.8.10 – Número de Reynolds Modificado, Re^* , em função da Velocidade Específica, n_q .

Na Figura 6.17 construiu-se as curvas do número de Reynolds, Re^* , em função da velocidade específica, n_q , utilizando-se a fórmula $Re^* = \frac{Q}{\nu D}$, a qual depende da vazão do equipamento. Observa-se que para esta formulação, o número de Re apresenta um comportamento quase linear e crescente parecido com o analisado no item 6.8.9.

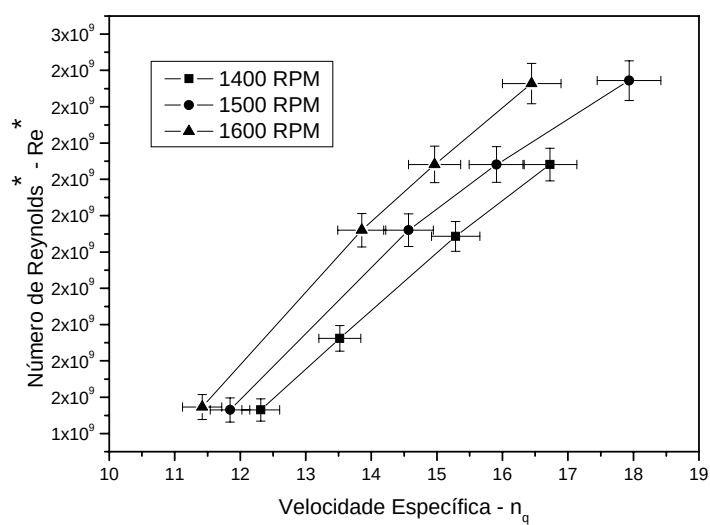


Figura 6.17 – Número de Reynolds*, Re^* , x Velocidade Específica, n_q para as rotações de (a) 1400 RPM, (b) 1500 RPM e (c) 1600 RPM.

Capítulo 7: Discussão e Conclusão

O estudo dos fenômenos da cavitação permite que se conclua a respeito de numerosos aspectos de bombas centrífugas, desde seu projeto até o controle de sua operação. A seguir serão apresentadas as principais conclusões relacionadas aos objetivos desta pesquisa.

7.1 – Discussão e Conclusão

Durante o experimento, houve pouca variação da temperatura da água utilizada, mesmo após um longo período de trabalho. Isto deveu-se aos dados terem sido obtidos após a estabilização da temperatura da água do reservatório, quando o equipamento já encontrava-se em operação, variando entre 33°C e 36°C.

Houve também pouca variação da pressão atmosférica, pressão do ambiente no local dos ensaios, durante os testes, cujos valores oscilaram entre 972 mbar a 977 mbar.

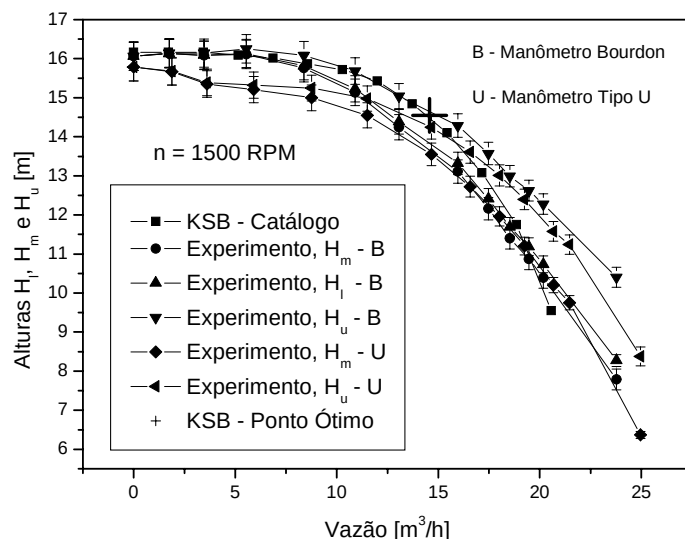
Com os dados obtidos no catálogo do fabricante, calcularam-se os coeficientes de pressão e de vazão, apresentando-os a seguir juntamente aos valores obtidos na bancada de testes.

Na Figura 7.1 (a), apresenta-se as curvas das alturas H_l , H_m e H_u em função da vazão para a rotação de 1500 RPM obtidas no experimento e, através das equações dos pontos homólogos, a curva com os dados de catálogo. Observa-se que os valores das alturas obtidas na primeira fase são maiores e encontram-se mais próximos da curva de catálogo. As alturas que mais se aproximaram do ponto ótimo foram as alturas úteis, H_u , calculadas nas duas fases, sendo que a altura útil calculada na primeira fase possui um valor um pouco acima da altura do ponto ótimo e a altura útil da segunda fase apresentou um valor um pouco abaixo.

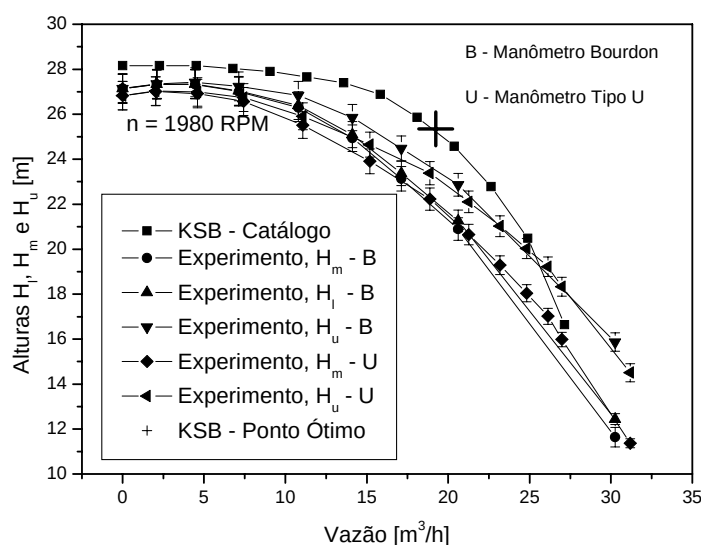
Aqui, considera-se ponto ótimo aquele na curva característica da altura útil, H_u , em função da vazão, Q , para uma dada rotação, que possui o maior rendimento, sendo nesta pesquisa calculado pelos valores obtidos do catálogo do fabricante para a vazão nominal da bomba na rotação de 1750 RPM. A tabela com as vazões nominais para cada rotação ensaiada encontra-se no Apêndice E, sendo obtidas com a utilização dos pontos homólogos usando-se os dados da curva de 1750 RPM.

Na Figura 7.1 (b), efetua-se comparações semelhantes aquelas da Figura 7.1 (a), para a rotação de 1980 RPM. Observa-se aqui, que o comportamento obtido nas duas fases é similar ao comportamento observado para a rotação de 1500 RPM, sendo que para esta rotação de 1980

RPM, ambos os valores do experimento encontram-se abaixo do valor da altura para o ponto ótimo. O valor obtido na primeira fase foi o mais próximo.



(a)



(b)

Figura 7.1 – Alturas, H_l , H_m e $H_u \times$ Vazão, Q , obtidas na bancada para a primeira e segunda fase comparadas com os dados do catálogo.

Na Figura 7.2 (a) observa-se que a curva formada pelos coeficientes de pressão em função dos coeficientes de vazão obtidos dos dados de catálogo apresenta discordância quantitativa, 10%, com os valores obtidos na bancada de testes na primeira fase desta pesquisa. Isto deve-se ao fato de que a curva de altura útil, H_u , em função da vazão, apresenta valores maiores que os obtidos nos experimentos. Consequentemente, os valores respectivos do coeficiente de pressão são menores. Para valores de coeficientes de vazão acima de

aproximadamente $\phi = 175$, esta discordância tornou-se mais acentuada. Os valores obtidos na bancada de testes para esta fase foram sempre ligeiramente superiores aos valores obtidos de catálogo para toda a extensão da curva.

Na Figura 7.2 (b) observa-se que os valores obtidos para os coeficientes de pressão baseado nos dados de catálogo e dos valores obtidos na bancada de testes na segunda fase estão muito próximos para valores dos coeficientes de vazão entre $\phi = 0$ e, aproximadamente, $\phi = 175$. Para valores de coeficientes de vazão acima de $\phi = 175$, estes valores apresentam uma maior discordância, mas apresentou o mesmo comportamento.

Mostra-se também nas Figuras 7.2 (a) e (b) e 7.3(a) e (b) a localização do ponto ótimo de trabalho do equipamento calculados com os valores obtidos com dados do catálogo do fabricante.

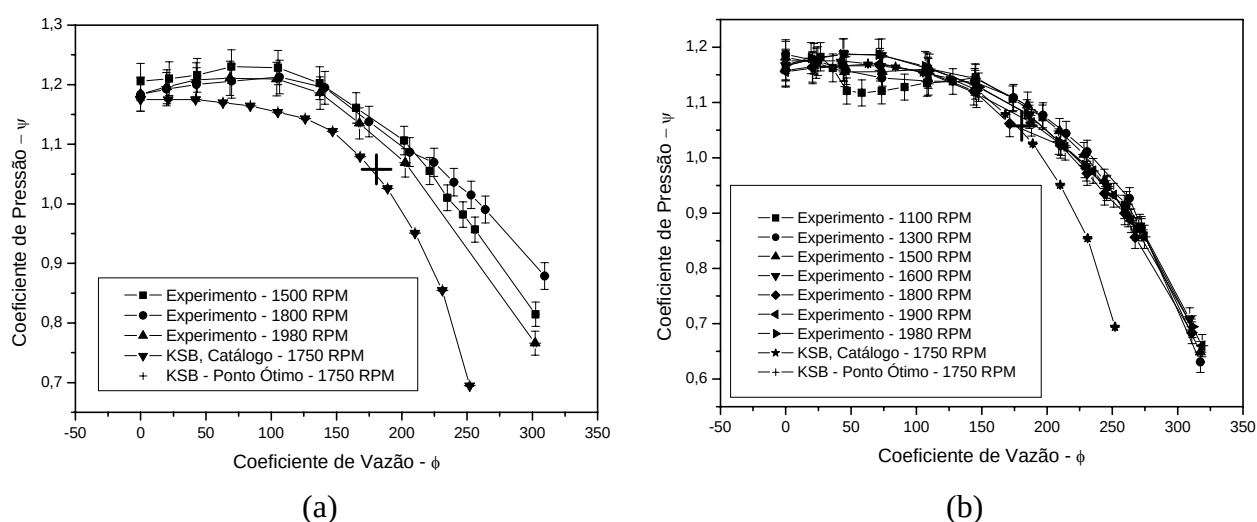


Figura 7.2 – Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as curvas de (a) 1500, 1800, 1980 RPM obtidos na bancada durante a primeira fase; (b) 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM obtidos na bancada durante a segunda fase; e 1750 RPM obtido dos dados do catálogo do fabricante.

Na Figura 7.3 (a) e (b) apresenta-se os resultados referentes aos coeficientes de pressão em função das velocidades específicas, para os valores das alturas e vazões obtidas do catálogo do fabricante. Compara-se com os valores obtidos na bancada de teste na primeira e segunda fases, respectivamente. Observa-se na Figura 7.3 (a), semelhante à análise efetuada para as curvas comparativas dos coeficientes de pressões em função dos coeficientes de vazão que os valores obtidos na bancada de testes são maiores que os obtidos pelos valores de catálogo e apresentam-se com uma ligeira discordância.

Na Figura 7.3 (b) observa-se que os valores obtidos para os coeficientes de pressão na segunda fase desta pesquisa apresentam-se praticamente com os mesmos valores para as rotações mais elevadas, acima de 1500 RPM, para valores das velocidades específicas entre $n_q = 0$ e aproximadamente $n_q = 13$. Para valores das velocidades específicas acima de $n_q = 13$, estes valores apresentam uma ligeira discordância.

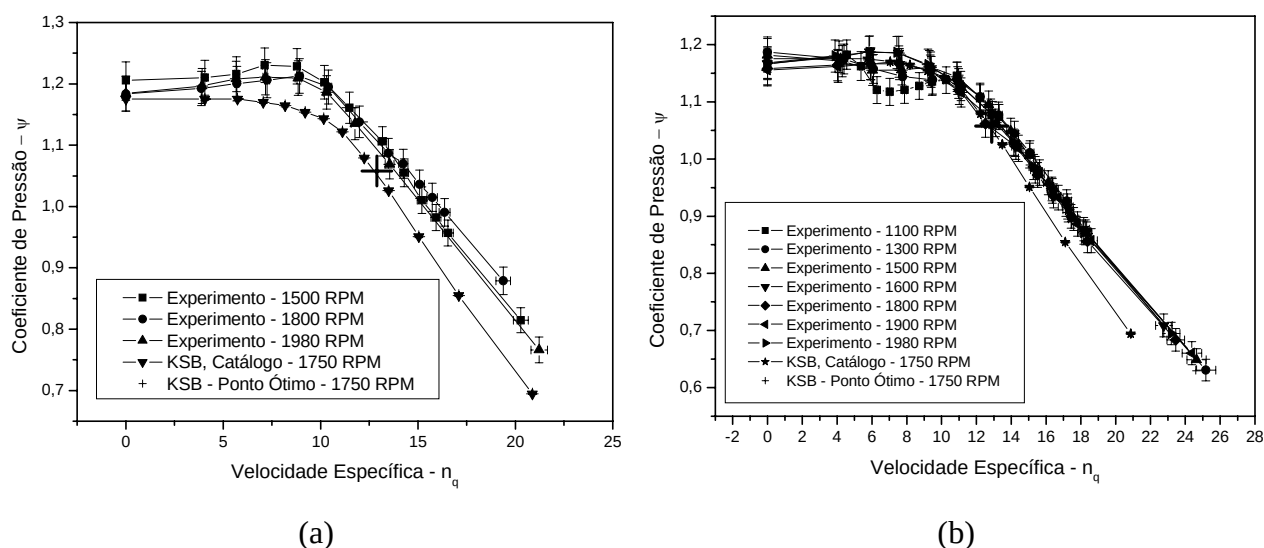


Figura 7.3 – Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as curvas de (a) 1500, 1800, 1980 RPM obtidos na bancada durante a primeira fase; (b) 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM obtidos na bancada durante a segunda fase; e 1750 RPM obtido dos dados do catálogo do fabricante.

Como citado anteriormente, o $NPSH_{DISP}$ é um parâmetro que depende da instalação e da operação do equipamento, portanto o fabricante não tem condições de fornecer dados para comparação. Utiliza-se, então, a análise dos valores obtidos na bancada de testes calculando-se o $NPSH_{DISP}^*$, Equação (5.6), sendo obtido pela divisão dos valores dos experimentos da bancada, $NPSH_{DISP}$, pelo valor calculado pela Equação (5.3), na condição de vazão nula, $NPSH_{DISP, 0}$.

Com estes novos valores para $NPSH_{DISP}^*$ observa-se que os resultados obtidos para o $NPSH_{DISP}$ na segunda fase encontram-se mais próximos do valor de $NPSH_{DISP}$ para vazão nula calculado pela Equação (5.3) citada acima, e conclui-se a necessidade da utilização de equipamentos de medição de pressão mais precisos na tubulação de sucção.

Comparando-se os valores para os coeficientes de pressão em função dos coeficientes de vazão desta pesquisa com os calculados pelos dados do fabricante e com o trabalho desenvolvido por Stepanoff (1957), mostrados na Figura 7.4, observa-se que para valores de coeficientes de vazão entre 0 e aproximadamente 230, os valores obtidos para os coeficientes de pressão

apresentam uma pequena dispersão. Para valores maiores dos coeficientes de vazão, esta dispersão torna-se mais acentuada.

Ainda na Figura 7.4, observa-se que a comparação entre esta pesquisa e o ponto ótimo da curva do catálogo quase não apresentam dispersão. Os valores obtidos na literatura de Stepanoff (1957), são para várias bombas trabalhando em condições operacionais para ponto ótimo, enquanto, nesta pesquisa, são vários dados, sob diferentes condições, para uma mesma bomba. Stepanoff (1957) também analisou o comportamento de diversas bombas com diferentes ângulos de saída do líquido dos canais formados pelas pás de um rotor, β_2 . O ângulo β_2 influencia diretamente no resultado final da obtenção da altura útil, e, segundo estudos de Stepanoff (1957), o ângulo ideal para β_2 deve estar compreendido entre $17^\circ 30'$ e 30° , sendo aconselhado como regra geral, o valor de $22^\circ 30'$.

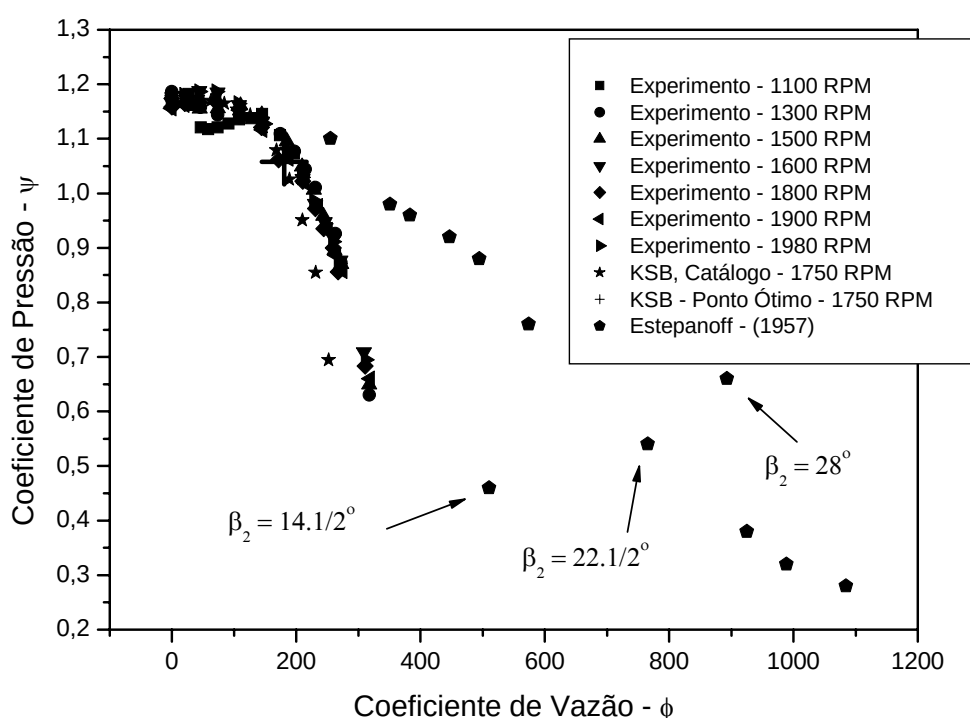


Figura 7.4 – Coeficiente de Pressão, ψ , $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as curvas de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM obtidos na bancada de testes durante a segunda fase, 1750 RPM obtido usando os dados do catálogo do fabricante e resultados fornecidos por Stepanoff (1957).

A bomba centrífuga utilizada neste trabalho possui um ângulo β_2 de 29° , conforme observa-se na Figura 7.5, e observa-se na Figura 7.4 que o ponto ótimo aqui calculado encontra-se com um valor para o coeficiente de pressão, ψ , próximo aos obtidos por Stepanoff (1957).

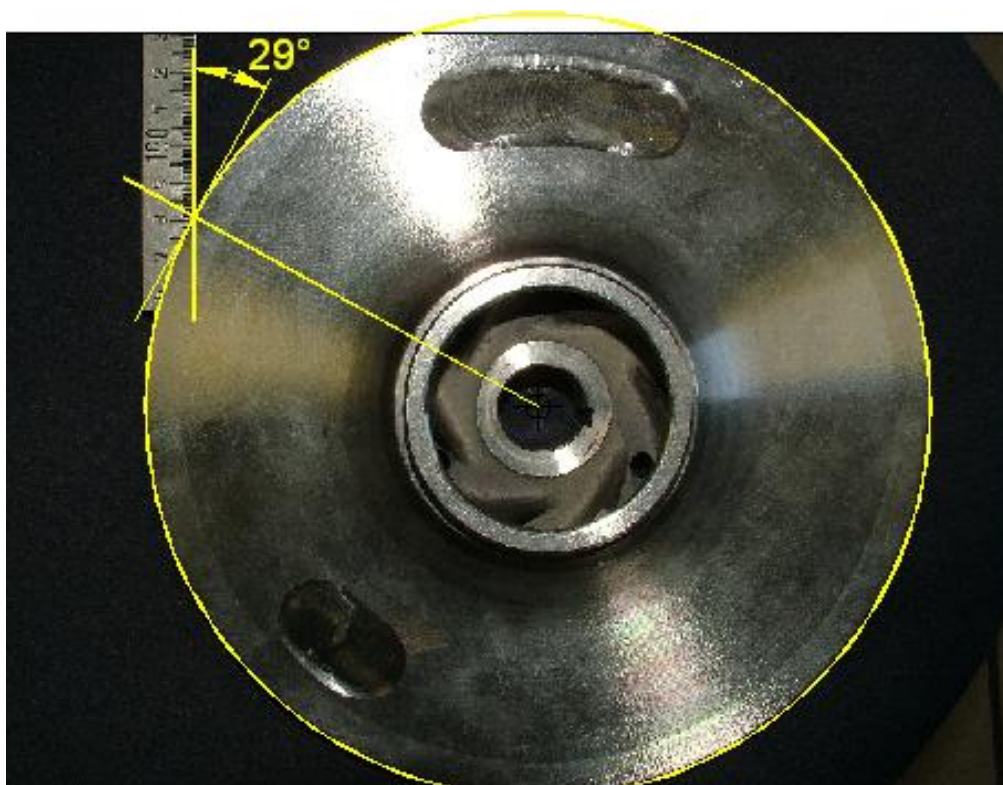


Figura 7.5 – Ângulo de saída das pás de um rotor, β_2 .

Na Figura 7.6, apresenta-se as curvas de coeficientes de pressão em função das velocidades específicas para os valores obtidos nesta pesquisa, do fabricante e do trabalho desenvolvido por Church (1972).

Observa-se aqui para os valores das velocidades específicas entre aproximadamente 10 e 20, os valores de coeficientes de pressões variam entre 0,9 e 1,1, incluindo-se o valor do ponto ótimo.

Os valores obtidos para os coeficientes de pressões por Church (1972) estão compreendidos em uma faixa entre 0,9 e 1,3. Estes valores foram obtidos após ensaios em vários modelos de bombas, com diferentes rotações e usando-se as condições de operações nominais dos equipamentos, enquanto nesta pesquisa utiliza-se uma bomba em condições operacionais distintas do ponto ótimo.

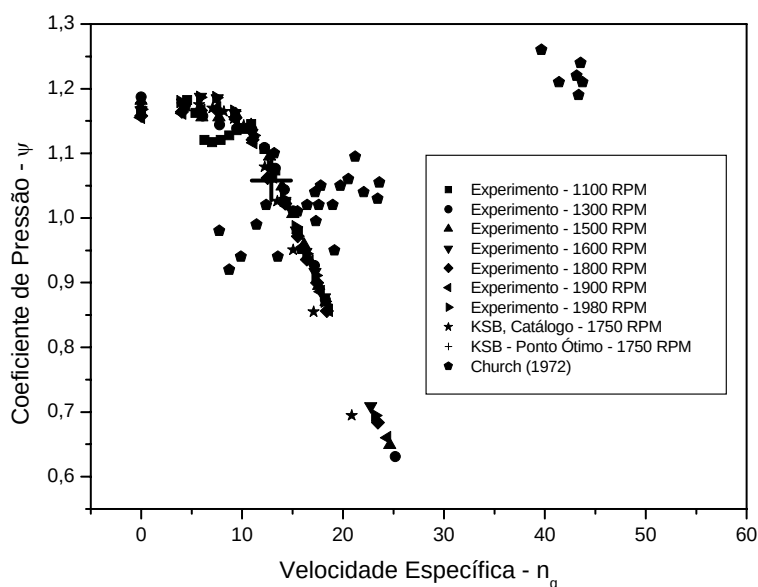


Figura 7.6 – Coeficiente de Pressão, ψ $\times$ Velocidade Específica, n_q , para as curvas de 1100, 1300, 1500, 1600, 1800, 1900 e 1980 RPM obtidos na bancada de testes durante a segunda fase, 1750 RPM obtido usando os dados do catálogo do fabricante e resultados fornecidos por Church (1972).

Na Figura 7.7, compara-se os dados obtidos nesta pesquisa com os valores calculados usando os dados do fabricante com as formulações apresentadas por Escher-Wyss, Stepanoff (1961), Wislicenus (1956), Widdern (1936), Macintyre (1982) e *Hydraulic Institute* (1969) para o número de Thoma em função da velocidade específica, as quais apresenta-se descritas abaixo.

Escher Wyss: $\sigma = 2,82 \times 10^{-4} \times n_{qA}^{\frac{4}{3}} = 0,001224 \times n_q^{\frac{4}{3}}, \quad n_{qA} = 3,0075 n_q;$

Stepanoff: $\sigma = 6,3 \times 10^{-6} n_s^{\frac{4}{3}} = 0,00121 n_q^{\frac{4}{3}}, \quad n_s = 51,674 n_q;$

Wislicenus: $\sigma = 1,84 \times 10^{-4} n_s^{\frac{4}{3}} = 0,00103 n_q^{\frac{4}{3}}, \quad n_s = 3,65 n_q;$

Widden: $\sigma = 2,14 \times 10^{-4} n_s^{\frac{4}{3}} = 0,001202 n_q^{\frac{4}{3}}, \quad n_s = 3,65 n_q;$

Macintyre: $\sigma = 0,0011 n_q^{\frac{3}{4}};$

Hydraulic Institute: $\sigma = 0,00205 n_s^{\frac{4}{3}} = 0,01152 n_q^{\frac{4}{3}}, \quad n_s = 3,65 n_q.$

Cada autor utiliza sua metodologia para definição de velocidade específica, sendo estas transformadas para a utilização nas comparações dos valores obtidos nesta pesquisa, os quais

encontram-se todos entre as curvas do *Hydraulic Institute* e as demais curvas. Os valores encontrados nesta pesquisa para o número de Thoma oscilaram entre $\sigma = 0,11$ e $\sigma = 0,25$ conforme observa-se na Figura 7.7.

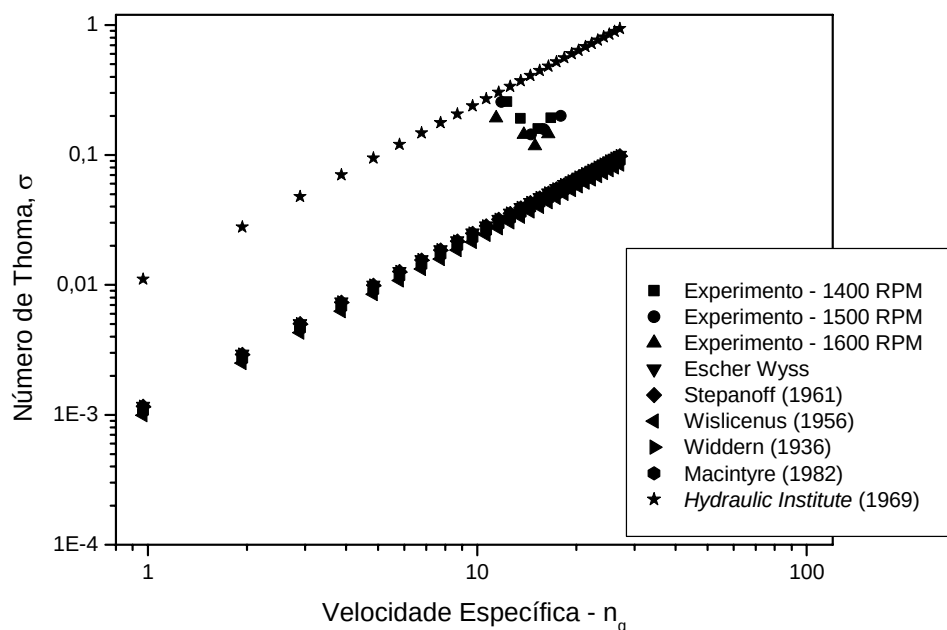


Figura 7.7 – Número de Thoma, $\sigma \times$ Velocidade Específica, n_q , para as rotações de 1400, 1500 e 1600 RPM obtidos nesta pesquisa; e resultados da literatura.

Devido à sensibilidade dos equipamentos durante a cavitação, e ao fato de os dados não terem sido processados em paralelo ao ensaio, tornou-se difícil a determinação acurada do ponto experimental aos 3% de queda da altura útil, sendo então necessário um ajuste coerente de uma função adequada para tal.

A norma ASME (1990) recomenda que seja realizada a detecção da cavitação quando a altura manométrica analisada decresce em 3%. Segundo esta norma, deve-se realizar a obtenção de no mínimo três pontos experimentais no trecho linear e quatro pontos no trecho decrescente da curva da altura útil H_u em função do $NPSH_{DISP}$. Entretanto, nem sempre foi possível o atendimento deste requisito, principalmente para altas e baixas vazões, pois nestes casos a curva de $NPSH_{DISP}$ apresenta um decréscimo mais acentuado do que para as demais curvas, o que pode ser observado em figuras anteriormente apresentadas.

A detecção dos 3% é a mais simples e utilizada. Há também outras técnicas como a análise qualitativa de bolhas a jusante da bomba no reservatório de descarga, detecção do ruído durante o ensaio, as quais são de mais difícil execução.

Durante a realização dos testes experimentais, observa-se que ao se trabalhar com vazões compreendidas na faixa operacional próxima das condições nominais para cada rotação ensaiada, consegue-se operar e controlar o equipamento mais facilmente, devido ao fato deste apresentar-se mais estável, podendo-se assim, obter um melhor controle dos registros utilizados na obtenção dos valores na construção das curvas de altura útil em função do $NPSH_{DISP}$ para os cálculos do $NPSH_{REQ}$.

Conforme descrito anteriormente, o experimento utilizado nesta pesquisa foi montado com registros de gaveta, os quais ocasionaram dificuldade de controle, pois para baixas vazões o registro permanecia praticamente fechado, dificultando a variação da perda de carga no sistema. Para as altas vazões, com pequenas variações nos registros, ocorriam mudanças bruscas das condições de operação.

Na Figura 7.8 construiu-se as curvas obtidas no trabalho de Silva (1998), que utiliza-se de uma bomba centrífuga KSB ETA 65-16 para suas análises. Observa-se que os valores obtidos por Silva (1998) para o Coeficiente de NPSH também apresentam uma ligeira dispersão entre os pontos ensaiados. Para valores de coeficientes de vazão baixos, entre 100 e 200, os valores obtidos nesta pesquisa e no trabalho de Silva (1998) para a mesma rotação estão próximos.

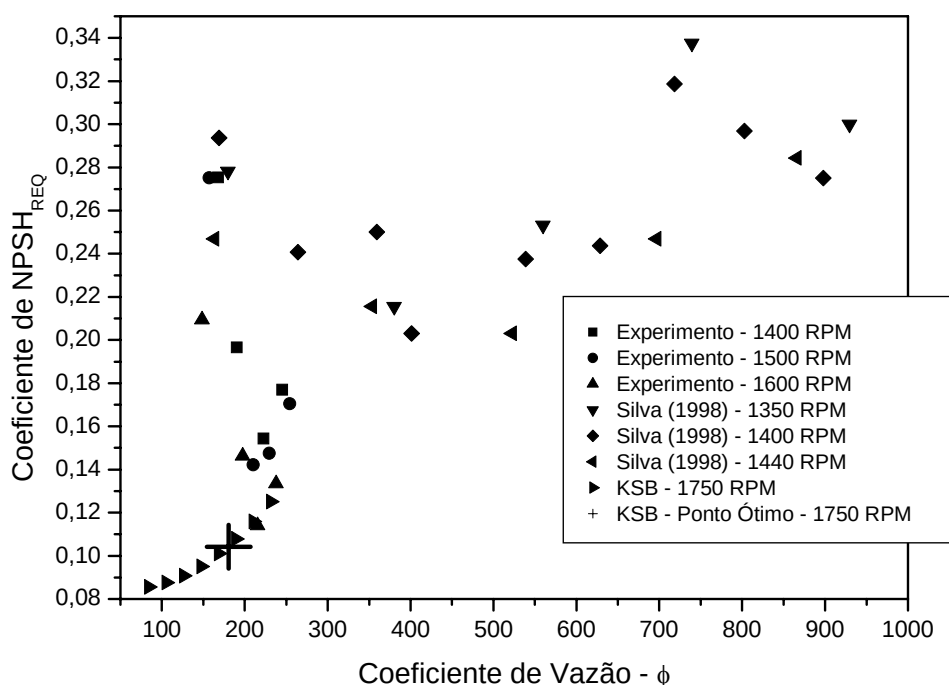


Figura 7.8 – Coeficiente de $NPSH_{REQ}$, $CNPSH_{REQ}$, $\times$ Coeficiente de Vazão, ϕ , para as curvas de 1400, 1500 e 1600 RPM obtidos na bancada de testes durante a terceira fase; 1350, 1400 e 1440 RPM obtidos no trabalho de Silva (1998); e os dados do catálogo do fabricante.

Comparando-se os valores obtidos nesta pesquisa com os valores calculados para os dados fornecidos pelo fabricante do equipamento, observa-se que os pontos próximos ao ponto ótimo foram os pontos com coeficientes de vazão entre aproximadamente 170 e 270.

Ao final desta pesquisa, concluiu-se que o fenômeno da cavitação é extremamente prejudicial quando da sua ocorrência, principalmente a níveis elevados, onerando custos indesejáveis não só pela danificação da bomba, mas também pelas avarias causadas em toda sua instalação. Com a ocorrência da cavitação é difícil controlar as condições operacionais e o melhor aproveitamento do equipamento. Daí, a necessidade de um planejamento ideal antes de sua aquisição e instalação.

Os resultados obtidos na comparação das curvas de altura útil em função da vazão através dos pontos homólogos usando-se os pontos do catálogo e os dados do experimento tiveram discordância entre a literatura e o obtido. O fabricante não informa qual a metodologia utilizada na obtenção das mesmas, o que impossibilita qualquer análise mais detalhada.

Conclui-se que a utilização da definição influi nos resultados obtidos para os valores das alturas, H_l , H_m e H_u , sendo que, dependendo do caso, esta diferença entre as alturas pode ocasionar o efeito da erosão cavitacional no equipamento. Os valores obtidos do experimento na Fase 1 apresentaram uma menor dispersão em comparação com o catálogo do fabricante do que na Fase 2 para a altura manométrica útil, mas comparando-se os valores obtidos para o $NPSH_{DISP}$ onde utilizou-se o adimensional τ_{DISP} , obteve-se valores mais confiáveis durante a execução da Fase 2 conforme observado anteriormente. Isto prova que os dados obtidos na segunda fase foram mais precisos com a mudança do manovacuômetro tipo Bourdon por um manômetro de coluna líquida tipo U.

A obtenção do $NPSH_{REQ}(3\%)$ pode ser analisada de diversas formas, fatores de correção variados, mas dependendo da escolha do fator, este pode vir a causar a cavitação no equipamento.

A utilização dos coeficientes adimensionais permite analisar e estimar qual seria o comportamento de um determinado equipamento operando em diferentes condições. Pode-se assim utilizar um protótipo de pequena dimensão no caso de projetos de equipamentos de grande porte, o que minimizariam os custos de projeto, e teste de modelo.

Referências Bibliográficas

- APARECIDO, J.B. (2000) *Cálculo e seleção de bombas e tubulações*. Ilha Solteira. 52p.
- API 610.(1989) Centrifugal Pumps for General Refinery Service. *American Petroleum Institute*. 7^a edição.
- ARNDT, R.E.A. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 13, p. 273-328, 1981.
- ASME/ANSI. Centrifugal pumps, performance test codes PTC 8.2. 1990. 78p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB 1032: *Bombas Hidráulicas de Fluxo (Classe C) – Ensaio de Desempenho e de Cavitação*. Rio de Janeiro, 1989. 26 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5580. *Tubos de aço carbono para usos comuns na condução de fluidos. Requisitos e ensaios*. Rio de Janeiro, 2002. 6p.
- BALL, J.W.; TULLIS, J.P.; STRIPLING, T. Predicting cavitation in sudden enlargements. *J. Hydraul. Div. ASCE*, 101(HY7), p. 857-870, 1975.
- BARFORD, N.C. *Experimental measurements: precision, error and truth*. Imperial College, London: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1967.
- BAZANINI, G.; BISTAFA, S.R. Aspectos termodinâmicos de cavitação desenvolvida com aplicação às bombas centrífugas. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, 1994. 18 p.
- BISTAFA, S.R. Mecanismos de erosão gerados pela cavitação. *Encontro sobre oscilatórios em equipamentos hidrodinâmicos*. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1994. 18 p.
- BUDRIS, A.R.; MAYLEBEN, P.A. Effects of entrained air, NPSH margin, and suction piping on cavitation in centrifugal pumps. *Proceedings of the 15th International Pump Users Symposium*, 1998, The Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University, College Station, TX, 1988.
- CARVALHO, D.F. Usinas hidroelétricas. *Turbinas*. FUMAR/UCMG, Belo Horizonte, 1982.

- CHIUSOLI, M.A. *Ensaio de cavitação de uma bomba centrífuga operando no segundo quadrante*. 1998. Tese (Mestrado) – EESC – USP – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1998. 88 p.
- CHURCH, A. H. *Centrifugal pumps*. New York 3, N. Y. 1972.
- CUPPARI, M.G.V. Relação entre microestrutura e resistência à cavitação de ligas fundidas baseadas no sistema quaternário Fe-Cr-Ni-C. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. Departamento de Engenharia Mecânica. 2002.
- DELMÉE, G.J. *Manual de medição de vazão*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1983.
- DEUTSCHE INDUSTRIE – NORM (DIN). *Sistema alemão de padronização e normalização*, 1952.
- EPA, 1993. *Magnum water technology CAV-OX ultraviolet oxidation process*, EPA RREL, Demonstration Bulletin, EPA/540/MR-93/520; and Applications Analysis, EPA/540/AR-93/520.
- ERICKSON, R.B.; SABINI E.P.; STAVALE, A.E. Hydraulic selection to minimize the unscheduled maintenance portion of life cycle cost. *Pump users International Forum*, Karlsruhe, Germany, 2000.
- FLORIANCIC, D. *Experimentelle untersuchungen an einer pump zur feststellung der saugfahigkeit durch oberflaenrauhigkeit und durch heisswasserforderung*. [19--] Thesis, E T H Zurich. 4406 p.
- GIKAS, I. *Tópicos de cavitação*. Tese (Mestrado) - EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1986. 178 p.
- GOLDSTEIN, R.J. *Fluid mechanics measurements*. Hemisphere Publishing Corporation, Washington. 1983.
- GREIN, H.; WYSS, E. *Cavitation – an overview*, Sulzer Research Number, Zurich, 1974.
- GRIST, E. Net positive suction head requirements for avoidance of unacceptable cavitation erosion in centrifugal pumps. IMECHE, *Conference on Cavitation*, Edinburgh, C 163/74, pp. 153-162, 1974.
- GRIST, E. *Cavitation and the centrifugal pump: a guide for pump users*. In: TAYLOR & FRANCIS, 1998, 324 p.
- GULICH, J.F.; ROSCH, A. *Cavitation – erosion in centrifugal pumps*. World Pumps, p. 164-168, July 1988.

- GULICH, J.F. *Guidelines for prevention of cavitation in centrifugal feedpumps*, EPRI CS-6398. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1989.
- *Hydraulic Institute standards*, 1969.
- *Hydraulic Institute standards for centrifugal, rotary and reciprocating pump*. Fourteenth Edition. 1982.
- *Hydraulic Institute standards for centrifugal, rotary and reciprocating pump*. Fourteenth Edition. 1983.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/DIS 2548 – *Pumps – Code for acceptance tests classe C*, 1972.
- KARASSIK, I.J. Centrifugal pump performance: the effect of suction conditions – Parts I, II and III. *Chemical Processing*, p. 54-63, February 1988, p. 88-94, March 1988, p. 110-117, April 1988, respectivamente.
- KLINE, S.J.; McCLINTOCK, F.A. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, January, 1953.
- KNAPP, R.T.; DAILY, J.W.; HAMMITT, F.G. *Cavitation*. MacGrawHill: New York. 1970.
- KSB BOMBAS HIDRÁULICAS S.A. *Manual de treinamento*, 3 ed., 2003.
- MacINTYRE, A.J. *Bombas e instalações de bombeamento*. 2 ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1997. 782p.
- MacINTYRE, A.J. *Máquinas hidráulicas*. 2 ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1983. 649 p.
- MacINTYRE, A.J. *Bombas e instalações de bombeamento*. 2 ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1982. 667 p.
- MANSUR, S.S. *Análise adimensional*. Ilha Solteira-SP, 2004. Transparências.
- MARTINEZ, C.B.; FILHO J.N. Módulo didático de ensaios de turbinas de ação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA (COBENGE), 2001.
- MATTOS, E.E.; FALCO R. *Bombas industriais*. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- McNULTY, P.J.; PEARSALL, I.S. Cavitation inception in pumps. Transactions of the ASME. *Journal of Fluids Engineering*, v. 104, p. 99-104, March 1982.
- MOFFAT, R.J. Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis. *Journal of Fluids Engineering*, v.104, p.250-260, 1982.

- MOFFAT, R.J. Using uncertainty analysis in the planning of an experiment. *Journal of Fluids Engineering*, v.107, p.173-178, 1985.
- MOFFAT, R.J. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental thermal and fluid science*, v.1, p.3-17, 1988.
- MONTEIRO, K.C. *Contribuição experimental ao estudo à resistência das argamassas à cavitação acelerada*. Tese (Mestrado) - EESC – USP, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1972. 82 p.
- Norma ASTM G 32-85, Vibratory cavitation erosion test. *Annual Book of ASTM Standard*, v. 3, p. 188-195, 1986.
- ORTIZ, J.P.; ALMEIDA, F.M.; CARVALHO, E.; BORSARI, R.D. Medições em protótipo de flutuações de pressão na bacia de dissipação da usina de porto Colômbia. *Anais da I Escola de Primavera de Transição e Turbulência – Associação Brasileira de Ciências Mecânicas – ABCM*, v.1, p. 293-320, Rio de Janeiro, 1998.
- OSPINA, C.M.G. Melhoria por meio de adição de nitrogênio da resistência à erosão por cavitação de aços inoxidáveis. In: 59º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2004.
- PELEGRINO, P.L. Análise da distribuição das tensões na micro estrutura durante o desgaste por cavitação em ferro fundido vermicular. In: 59º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2004.
- RUGGERI, R.S.; MOORE, R.D. Method of prediction of pump cavitation performance for various liquids, liquid temperatures, and rotative speeds. *Nasa Technical Note TND-5292*. Lewis Research Center, 1969.
- SANTOS, J.F. Melhoramento da resistência à cavitação de aços inoxidáveis austeníticos por meio de nitretação em alta temperatura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2004.
- SANTOS, W.L. *Desenvolvimento de uma metodologia para representação analítica de curvas características de bombas hidráulicas, visando à sua seleção, seu dimensionamento e a simulação de sua operação*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001. 69 p.
- SILVA, F.G.B. *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*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 1998. 191 p.

- SILVA, F.G.B. Curva NPSH(Q) de uma bomba centrífuga radial para rotações não padronizadas. Artigo de Periódico, *USP Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo*, p.57-62, 2002.
- SISSOM, L.E.; PITTS, D.R. *Fenômenos de transporte*. Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1988.
- SPRAKER, W.A. The effects of fluid properties on cavitation in centrifugal pumps. Transactions of the ASME. *Journal of Engineering for Power*, p. 309-318, 1965.
- STAHL, W.A.; STEPANOFF, A.J. Thermodynamic aspects of cavitation in centrifugal pumps. *Transactions of the ASME*, p. 1691-1693, 1956.
- STEPANOFF, A. J. *Centrifugal and axial flow pumps*, John Wiley & Sons, Inc., 1957.
- STEPANOFF, A. J. Cavitation in centrifugal pumps with liquids other than water. *Trans. ASME*, vol. 83, 1961.
- TAYLOR, I. The most persistent pump-application problem for petroleum and power engineers. ASME Paper n. 77 – Pet-5, September 1977.
- TERRY HENSHAW, P.E. (2001). *Consulting engineer. how much NPSH does your pump really require?* Disponível: <<http://www.pump-zone.com>>. Acesso em: 05 out. 2004.
- THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. PTC 8.2. *Centrifugal pumps, performance test codes*, New York, 1990.
- TILLMANN, G.A.; SANTOS, D.J.; GONÇALVES, C.; BRASIL, A.C.P. Detecção de cavitação por análise de sinais acústicos: experimentos em túnel de água. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA NORTE-NORDESTE, 1998. Fortaleza. *Anais do CEM*. Fortaleza, 1998, v. 1, p. 271-278.
- TIMCKE, J.H. (2001). *The standart water pump-has standartization really here?* Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/search/article>>. Acesso em: 05 mar. 2004.
- TULLIS, J.P.; MARSCHNER, B.W. Review of cavitation on valves. *Journal of the Hydraulic Division – Proceedings of the american society of civil engineers*, paper no. 5705, 1968. p. 16.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. *Operações Unitárias*. Engenharia Química –. Disponível em: <<http://www.ufrnet.ufrn.br/~lair/Pagina-OPUNIT/bombascentrifugas-2.htm>>. Acesso em: 05 jul. 2005.

- VLAMING, D.J. A method for estimating the net positive suction head required by centrifugal pumps. *ASME Winter Annual Meeting*. November 1981.
- XAVIER, E.A. *Influência da cavitação e da recirculação sobre os critérios de projeto e na fixação da faixa operacional de bombas centrífugas*. Tese (Mestrado) – Escola Federal de Itajubá. 1992. 187 p.
- WHITE, F.M., *Fluid Mechanics*, Mc.Graw-Hill, ed.2, 1986.
- WHITE, F.M. Appendix A: physical properties of fluids. In:____. *Fluid Mechanics*. Boston: McGraw-Hill, 1999. p.769-773.
- WIDDERN, H.; CARDINAL VON. *On cavitation in centrifugal pumps*. Escher-Wyss News, março, 1936.
- WISLICENUS, G.F. Critical Considerations on Cavitation Limits of Centrifugal Pumps. *Trans. ASME*, vol. 78, 1956.

Apêndice A

Análise de Incertezas

A.1 - INTRODUÇÃO

A técnica de prever o intervalo de incerteza associado a um resultado experimental, baseando-se em observações da dispersão dos dados utilizados no cálculo deste resultado, é chamada de Análise de Incerteza. A incerteza é o parâmetro associado com o resultado de um conjunto de medições, que caracteriza a dispersão do valor que poderia ser razoavelmente atribuído ao mesurando (já que o valor verdadeiro do mesurando geralmente não é conhecido, a menos que a referência seja o padrão primário da grandeza). Em outras palavras, a incerteza é o parâmetro que caracteriza o intervalo de valores que contém o mesurando, com um determinado nível de confiança.

A.2 - ANÁLISE DE INCERTEZA

Em experimentos tem-se que se contentar muitas vezes com um número limitado, algumas vezes até restrito de medidas. Neste contexto, deve-se considerar também a faixa dos valores efetivos (ou reais) possíveis e recorrer à estatística para auxiliar o processamento e entendimento do conjunto de dados medidos. Mesmo com limitações, em alguns casos, um dado experimental é, via de regra, apenas uma amostra de uma população estatística que pode ser gerada pelo processo de medida com o instrumento. Conhecendo-se as características do processo, pode-se estabelecer limites para o erro em uma única leitura, embora não se pode determinar o valor do erro (já que isto implicaria no conhecimento do valor verdadeiro).

Experimentos de amostragem simples são aqueles em que cada ponto experimental é testado uma vez, ou no máximo algumas poucas vezes. Experimentos de pesquisa em mecânica dos fluidos e transferência de calor são geralmente experimentos de amostragem simples, caracterizados por dados distribuídos ao longo de uma ampla faixa do parâmetro em estudo (Moffat, 1988).

A análise de incerteza por amostragem simples pode ser encontrada na literatura nos trabalhos de Kline & McClintock (1953) e Moffat (1982, 1985 e 1988). Além de sua utilidade

mais visível, a descrição da incerteza de um resultado numa publicação científica, a análise de incerteza produz informações adicionais sobre o experimento, geralmente muito úteis como ferramenta de diagnóstico, tanto na fase de planejamento como de execução de experimento.

A.2.1 - FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS

A análise de incertezas também pode ser obtida através do método utilizado por Barford (1967) onde tem-se algumas regras estatísticas básicas que aplicadas conjuntamente fornece o resultado da incerteza.

Com a obtenção de uma população de dados de uma determinada amostragem experimental tem-se

$$\hat{x} = \langle x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \rangle. \quad (\text{A.1})$$

A média, X , de uma distribuição indica a locação ou tendência central dessa distribuição. Para resumir dados quantitativos aproximadamente simétricos, é usual calcular a média aritmética como uma medida de locação. Se $x_1, x_2, \dots, x_n$ são os valores dos dados da população, então pode-se escrever a média como

$$X = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{m} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{m}. \quad (\text{A.2})$$

A variância σ^2 representa a dispersão de uma distribuição e é definida como o desvio quadrático médio da média e é calculada para uma população como

$$\sigma^2(\hat{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{m}. \quad (\text{A.3})$$

É utilizada também a variância modificada onde a equação acima é escrita como

$$\sigma^2(\hat{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{m - 1}. \quad (\text{A.4})$$

Para grandes populações de dados a variância e a variância modificada fornecem, praticamente, os mesmos valores.

Para populações pequenas a variância modificada é a mais indicada.

O desvio padrão é a medida de dispersão mais geralmente empregada, pois leva em consideração a totalidade dos valores da variável em estudo. É um indicador de variabilidade bastante estável. O desvio padrão baseia-se nos desvios em torno da média aritmética da amostragem e calcula-se através da raiz quadrada da variância, $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$.

Para os cálculos das formulas das incertezas de cada item de interesse em nosso projeto, utilizou-se as seguintes regras estatísticas apresentadas por Barford (1967):

- Fator de Escala

Para uma equação de multiplicação de uma variável por uma constante tem-se

$$z = a \times x \quad (A.5)$$

sendo x e z variáveis estatísticas e a é um parâmetro determinístico. Então tem-se:

$$\sigma^2(\hat{z}) = a^2 \sigma^2(\hat{x}) \quad \Leftrightarrow \quad \sigma(\hat{z}) = a \sigma(\hat{x}). \quad (A.6)$$

Se $\delta(\hat{z}) = K\sigma(\hat{z})$ e $\delta(\hat{x}) = K\sigma(\hat{x})$, tem-se

$$K\sigma(\hat{z}) = aK\sigma(\hat{x}) \Leftrightarrow \delta(\hat{z}) = a\delta(\hat{x}) \Leftrightarrow \delta^2(\hat{z}) = a^2 \delta^2(\hat{x}). \quad (A.7)$$

- Soma

Para uma equação de soma (adição), tem-se

$$z = x + y \quad (A.8)$$

sendo x , y e z todos estatísticos, então

$$\sigma^2(\hat{z}) = \sigma^2(\hat{x}) + \sigma^2(\hat{y}) \Leftrightarrow \sigma(\hat{z}) = \sqrt{\sigma^2(\hat{x}) + \sigma^2(\hat{y})}. \quad (A.9)$$

Multiplicando todos os termos por K^2 tem-se

$$K^2 \sigma^2(\hat{z}) = K^2 \sigma^2(\hat{x}) + K^2 \sigma^2(\hat{y}) \Leftrightarrow [K\sigma(\hat{z})]^2 = [K\sigma(\hat{x})]^2 + [K\sigma(\hat{y})]^2. \quad (A.10)$$

Se $\delta(\hat{z}) = K\sigma(\hat{z})$, $\delta(\hat{x}) = K\sigma(\hat{x})$ e $\delta(\hat{y}) = K\sigma(\hat{y})$, tem-se

$$\delta^2(\hat{z}) = \delta^2(\hat{x}) + \delta^2(\hat{y}). \quad (A.11)$$

- Função Logarítmica

$$z = \ln x \quad (A.12)$$

sendo x e z estatísticos, então

$$\sigma(\hat{z}) = \frac{\sigma(\hat{x})}{X} \Leftrightarrow K\sigma(\hat{z}) = K \frac{\sigma(\hat{x})}{X} \Leftrightarrow \delta(z) = \frac{\delta(x)}{X}. \quad (\text{A.13})$$

- Produto

$$z = x^a y^b \quad (\text{A.14})$$

sendo, x , y e z estatísticos e a e b determinísticos. Então

$$\ln(z) = a \ln(x) + b \ln(y). \quad (\text{A.15})$$

Definindo-se $\ln(z) = z^*$, $a \ln(x) = x^*$ e $b \ln(y) = y^*$, tem-se $z^* = x^* + y^*$, então

$$\sigma^2(\hat{z}^*) = \sigma^2(\hat{x}^*) + \sigma^2(\hat{y}^*) \quad (\text{A.16})$$

mas sabe-se, pela regra do logaritmo, que

$$z^* = \ln(z) \Leftrightarrow \sigma(\hat{z}^*) = \frac{\sigma(\hat{z})}{Z}, \quad (\text{A.17})$$

$$x^* = a \ln(x) \Leftrightarrow \sigma(\hat{x}^*) = a \frac{\sigma(\hat{x})}{X}, \quad (\text{A.18})$$

$$y^* = b \ln(y) \Leftrightarrow \sigma(\hat{y}^*) = b \frac{\sigma(\hat{y})}{Y}. \quad (\text{A.19})$$

Então

$$\left(\frac{\sigma(\hat{z})}{Z} \right)^2 = \left(\frac{a\sigma(\hat{x})}{X} \right)^2 + \left(\frac{b\sigma(\hat{y})}{Y} \right)^2. \quad (\text{A.20})$$

Multiplicando todos os termos da equação acima por K^2 tem-se

$$K^2 \left(\frac{\sigma(\hat{z})}{Z} \right)^2 = K^2 \left(\frac{a\sigma(\hat{x})}{X} \right)^2 + K^2 \left(\frac{b\sigma(\hat{y})}{Y} \right)^2 \Leftrightarrow \left(\frac{\delta(\hat{z})}{Z} \right)^2 = \left(\frac{a\delta(\hat{x})}{X} \right)^2 + \left(\frac{b\delta(\hat{y})}{Y} \right)^2 \quad (\text{A.21})$$

A.3 - ANÁLISE DE INCERTEZA DAS VARIÁVEIS DE INTERESSE

Diâmetro da Tubulação (D_{int})

As dimensões características do diâmetro da tubulação foram tiradas usando-se as normas referentes à fabricação dos materiais (NBR 5580).

Através das normas obteve-se o diâmetro interno da tubulação. Observou-se que a grande preocupação dos fabricantes de tubos encontra-se no controle do diâmetro externo.

Com o diâmetro externo e a espessura de parede fornecido pelas normas para cada bitola de tubo encontrou-se a variação máxima e mínima para o diâmetro interno correspondente.

Os tubos são fabricados de acordo com as normas em três classes diferenciadas pela pressão de trabalho (classe leve, classe média e classe pesada). As tubulações utilizadas neste projeto são todas correspondente a classe leve, e consequentemente os cálculos efetuados foram relativos a esta classe de pressão.

A fórmula utilizada para o cálculo do diâmetro interno é

$$D_{int} = D_{ext} - 2e \quad (A.22)$$

onde e é a espessura de parede do tubo.

Efetuuou-se todos os cálculos possíveis para a obtenção do diâmetro interno da tubulação onde a incerteza utilizada foi a incerteza absoluta δD de maior variação encontrada conforme mostrada na Tabela A1.

Tabela A1 – Diâmetro externo e espessura Normalizada e Diâmetro Interno Calculado.

Norma ABNT NBR-5580-L (Classe Leve)									
Diâmetro Nominal		Externo			Espessura			Interno Calculado	
		Máximo	Nominal	Mínimo	Máximo	Nominal	Mínimo	Nominal	Incerteza
(pol.)	(mm)	(+)	mm	(-)	(+)	mm	(-)	mm	
1.1/4	32	0,3	42,4	0,4	Limitada pelo Peso (kg/m)	2,65	- 12,50%	37,1	1,0
3	80	0,5	88,9	0,9	Limitada pelo Peso (kg/m)	3,35	- 12,50%	82,2	1,4

Área da Seção da Tubulação (A)

Com a obtenção do diâmetro interno da tubulação, calculou-se a área correspondente para cada tubulação através da fórmula

$$A = \frac{\pi D_{\text{int}}^2}{4} \quad (\text{A.23})$$

na qual D_{int} é o diâmetro interno da tubulação. Assim, a incerteza associada ao cálculo da área da seção pode ser estimada por

$$\delta(A) = \left[\left(\frac{\pi}{2} D_{\text{int}} \delta(D_{\text{int}}) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{\pi}{2} D_{\text{int}} \delta(D_{\text{int}}) \quad (\text{A.24})$$

Na Tabela A2 apresentam-se os valores da incerteza relativa $\left(\frac{\delta(A)}{A} \right)$ obtidos para as tubulações envolvidas no projeto.

Tabela A2 – Incerteza para a área das tubulações de 1.1/4” e 3”.

Tubo	A(m ²)	$\delta(A)$ (m ²)	$\frac{\delta(A)}{A}$ (%)
1.1/4”	0,00108103	$2,91 \times 10^{-05}$	5,4
3”	0,00530681	$9,04 \times 10^{-05}$	3,4

Vazão (Q)

A vazão do escoamento que flui através da seção transversal interna da tubulação é medida com o auxílio de um medidor de vazão eletromagnético. Segundo a especificação do fabricante, este instrumento possui uma precisão de $\pm 0,12\%$ do valor de leitura. Assim, através do certificado de calibração fornecido pelo fabricante, a incerteza da vazão indicada na determinação do volume verdadeiro convencional pode ser estimada com um nível de confiança de 95% (2σ) onde a incerteza relativa $\left(\frac{\delta(Q)}{Q} \right) = \pm 0,12\%$ do valor obtido.

Velocidade (V)

A velocidade do fluido no interior da tubulação é calculada com base na leitura do medidor de vazão eletromagnético. Assim,

$$V = \frac{Q}{A} \quad (\text{A.25})$$

na qual Q é a vazão volumétrica indicada pelo medidor de vazão e A é a área transversal da seção da tubulação na posição em que o dispositivo para obtenção da pressão interna do sistema (manômetro) encontra-se instalado. Assim, a incerteza associada ao cálculo da velocidade pode ser estimada por

$$\delta(V) = \left[\left(\frac{\delta(Q)}{A} \right)^2 + \left(\frac{Q}{A^2} \delta(A) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.26})$$

Nas Tabelas A3 e A4 apresentam-se os valores da incerteza relativa $\left(\frac{\delta(V)}{V} \right)$ da velocidade, calculados para um escoamento com temperatura ambiente em tubo de 1.1/4" e 3".

Tabela A3 - Valores da incerteza da velocidade em um tubo de 1.1/4".

Vazão (m³/h)	Vazão (m³/s)	V (m/s)	$\delta(V)$ (m/s)	$\frac{\delta(V)}{V}$ (%)
1,925	0,00053	0,494641	0,026672	5,4
4,098	0,00114	1,053008	0,05678	5,4
6,590	0,00183	1,693344	0,091308	5,4
10,106	0,00281	2,596803	0,140024	5,4
13,221	0,00367	3,397223	0,183184	5,4
16,176	0,00449	4,15653	0,224127	5,4
19,350	0,00538	4,97211	0,268105	5,4
21,438	0,00596	5,508635	0,290735	5,4
22,893	0,00636	5,882507	0,317195	5,4
24,079	0,00669	6,187258	0,333628	5,4
24,972	0,00694	6,41672	0,346001	5,4
29,269	0,00813	7,520862	0,405538	5,4

Tabela A4 - Valores da incerteza da velocidade em um tubo de 3”.

Vazão (m³/h)	Vazão (m³/s)	V (m/s)	$\delta(V)$ (m/s)	$\frac{\delta(V)}{V}$ (%)
1,925	0,00053	0,100762	0,003434	3,4
4,098	0,00114	0,214504	0,007311	3,4
6,590	0,00183	0,344945	0,011757	3,4
10,106	0,00281	0,528985	0,01803	3,4
13,221	0,00367	0,692035	0,023588	3,4
16,176	0,00449	0,846711	0,02886	3,4
19,350	0,00538	1,01285	0,034522	3,4
21,438	0,00596	1,122143	0,038248	3,4
22,893	0,00636	1,198303	0,040843	3,4
24,079	0,00669	1,260383	0,042959	3,4
24,972	0,00694	1,307125	0,044553	3,4
29,269	0,00813	1,532046	0,052219	3,4

Comprimento da Tubulação (L)

Para o cálculo da Incerteza do comprimento da tubulação utilizou-se o método aplicável para grandezas variáveis, onde o valor da medida muda com o tempo e/ou posição.

Mediu-se os comprimentos de interesse de toda a tubulação utilizando-se uma régua graduada de Inox onde a Incerteza do Sistema de Medição (ISM) era de $\pm 0,5$ mm (absoluta).

Definiu-se a variação máxima ocorrida entre as medidas conforme a equação abaixo:

$$\Delta M_{m\acute{a}x} = \left| M_j - MM \right|_{m\acute{a}x} \quad (A.27)$$

Onde: - MM – média das medidas

- M_j - medida referente a cada medição

- $\Delta M_{m\acute{a}x}$ - variação máxima obtida entre todas as medidas.

O resultado final para cada comprimento expressou-se como:

$$RM = MM \pm (ISM + \Delta M_{m\acute{a}x}) \quad (A.28)$$

Os comprimentos de interesse neste projeto encontram-se na Tabela A5 com suas respectivas incertezas absolutas $\delta(L)$.

Tabela A5 - Valores de Comprimento da Tubulação.

Comprimento da Tubulação				
	Sucção		Recalque	
	Entre os pontos A e 2		Entre os pontos 3 e B	
	L (m)	$\delta(L)$ (m)	L (m)	$\delta(L)$ (m)
1ª Fase	1,277	0,0020	0,227	0,0015
2ª Fase	0,916	0,0017	0,227	0,0015

Perda de Carga (h)

A perda de carga gerada pelo escoamento do fluido no interior da tubulação é calculada utilizando-se a vazão (Q), o diâmetro da tubulação (D) e o comprimento da tubulação (L) por onde escoar o fluido. Existem várias formulações e métodos de cálculos da perda de carga em tubulações.

As perdas de carga referem-se à energia perdida pela água no seu deslocamento por uma tubulação. Essa perda de energia é provocada pelo atrito entre a água e as paredes da tubulação, devido à rugosidade da mesma. Em outras palavras, é uma perda de energia ou de pressão entre dois pontos de uma tubulação.

Utilizou-se neste projeto a fórmula de Hazen-Williams, onde tem-se que

$$h = J \times L . \quad (\text{A.29})$$

Assim, a incerteza associada ao cálculo da perda de carga pode ser estimada por

$$\delta(h) = \left[(L\delta(J))^2 + (J\delta(L))^2 \right]^{\frac{1}{2}} . \quad (\text{A.30})$$

Sendo J a perda de carga unitária para o comprimento da tubulação e pode ser calculada através da equação

$$J = 10,643 \times \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (\text{A.31})$$

- na qual:
- C - coeficiente dependente da natureza (material e estado) das paredes do tubo.
 - Q - vazão (m³/s)
 - D - diâmetro da tubulação

A incerteza para a perda de carga unitária pode ser calculada por:

$$\delta(J) = \left[\left(\frac{19,68955 \times Q^{0,85} \times \delta(Q)}{C^{1,85} D^{4,87}} \right)^2 + \left(\frac{51,83141 \times Q^{1,85} \times \delta(D)}{C^{1,85} D^{5,87}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.32})$$

Temperatura (T)

A temperatura da água é um parâmetro que exerce grande influência sobre as suas propriedades, influenciando enormemente na viscosidade. A temperatura foi medida com o auxílio de um termômetro de coluna de mercúrio marca *TWG* modelo *Labortherm-N*, com escala de 0-100°C e incerteza absoluta $\delta T = \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Viscosidade Cinemática

A viscosidade cinemática da água é uma propriedade física que possui forte dependência com a temperatura, e pode ser escrita como

$$\nu(T) = \frac{\mu(T)}{\rho(T)} \quad (\text{A.33})$$

Existe na literatura várias correlações bem estabelecidas para a viscosidade absoluta e a densidade da água em função da temperatura.

A viscosidade dos fluidos diminui com o aumento da temperatura. Para a água entre 0 e 100°C vale aproximadamente: $\nu = \nu_0 / (1 + 0,034 t + 0,00022 t^2)$, onde $\nu_0 = 1,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e t , a temperatura em °C. Para o cálculo da viscosidade cinemática da água, foram utilizadas as correlações listadas na Tabela A6.

Tabela A6 - Correlações para o cálculo da viscosidade cinemática da água.

Propriedade	Correlação	Fonte	Incerteza
$\mu(T) \left[\frac{kg}{m \times s} \right]$ $\rho(T) \left[\frac{kg}{m \times s} \right]$	$\ln\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right) = -1,704 - 5,306Z - 7,003Z^2$ onde $Z = \frac{273}{T(K)}$ e $\mu_0 = 1,788 \times 10^{-3}$ $\rho = 1000 - 0,0178 T(^{\circ}C) - 4 ^{1,7}$	White (1986)	$\pm 0,2\%$

A incerteza associada ao cálculo da viscosidade cinemática pode ser então estimada como sendo

$$\delta(\nu) = \left[\left(\frac{\delta(\mu)}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\mu}{\rho} \delta(\rho) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A.34)$$

ou, em termos relativos,

$$\frac{\delta(\nu)}{\nu} = \left[\left(\frac{\delta(\mu)}{\mu} \right)^2 + \left(\frac{\delta(\rho)}{\rho} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (A.35)$$

Para a faixa de temperatura na qual foram realizados os ensaios, entre 30 e 40°C, a incerteza relativa da viscosidade cinemática da água é de $\left(\frac{\delta(\nu)}{\nu} \right) = \pm 0,3\%$, White (1999).

Número de Reynolds

O número de Reynolds do escoamento em tubulações cilíndricas é definido pela seguinte expressão

$$Re = \frac{VD_{int}}{\nu} \quad (A.36)$$

na qual ν é a viscosidade cinemática do fluido.

A incerteza do número de Reynolds pode ser calculada como

$$\delta(\text{Re}) = \left[\left(\frac{D_{\text{int}}}{\nu} \delta(V) \right)^2 + \left(\frac{V}{\nu} \delta(D_{\text{int}}) \right)^2 + \left(\frac{VD_{\text{int}}}{\nu^2} \delta(\nu) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.37})$$

ou, em termos relativos,

$$\frac{\delta(\text{Re})}{\text{Re}} = \left[\left(\frac{\delta(V)}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta(D_{\text{int}})}{D_{\text{int}}} \right)^2 + \left(\frac{\delta(\nu)}{\nu} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{A.38})$$

Calculando a incerteza relativa $\left(\frac{\delta(\text{Re})}{\text{Re}} \right)$ do número de Reynolds para o mesmo caso apresentado no cálculo da velocidade, obtém-se os resultados apresentados nas Tabelas A7 e A8.

Tabela A7 - Valores da incerteza do número de Reynolds em um tubo de 1.1/4”.

Vazão (m³/h)	Vazão (m³/s)	Re	δ(Re)	$\frac{\delta(\text{Re})}{\text{Re}}$ (%)
1,925	0,00053	22.938,976	1384,55352	6,04
4,098	0,00114	48.833,246	2947,47349	6,04
6,590	0,00183	78.528,828	4739,83655	6,04
10,106	0,00281	120.426,739	7268,70508	6,04
13,221	0,00367	157.546,217	9509,15891	6,04
16,176	0,00449	192.759,079	11634,5286	6,04
19,350	0,00538	230.581,601	13917,4394	6,04
21,438	0,00596	255.462,948	15158,7718	6,04
22,893	0,00636	272.801,262	16465,7235	6,04
24,079	0,00669	286.934,090	17318,7643	6,04
24,972	0,00694	297.575,390	17961,0517	6,04
29,269	0,00813	348.779,975	21051,6447	6,04

Tabela A8 - Valores da incerteza do número de Reynolds em um tubo de 3”.

Vazão (m³/h)	Vazão (m³/s)	Re	$\delta(\text{Re})$	$\frac{\delta(\text{Re})}{\text{Re}}$ (%)
1,925	0,00053	10.353,296	395,6725	3,82
4,098	0,00114	22.040,286	842,3734	3,82
6,590	0,00183	35.443,099	1354,63814	3,82
10,106	0,00281	54.353,209	2077,40579	3,82
13,221	0,00367	71.106,596	2717,78152	3,82
16,176	0,00449	86.999,555	3325,21817	3,82
19,350	0,00538	104.070,338	3977,60706	3,82
21,438	0,00596	115.300,193	4406,89469	3,82
22,893	0,00636	123.125,633	4705,90904	3,82
24,079	0,00669	129.504,353	4949,71196	3,82
24,972	0,00694	134.307,094	5133,35189	3,82
29,269	0,00813	157.417,727	6016,62946	3,82

Pressão

Para a obtenção da pressão no interior da tubulação, utilizou-se um manômetro para a linha de descarga (recalque) e um manovacuômetro para a linha de sucção das bombas.

Para a calibração dos equipamentos de medição utilizados na obtenção das leituras de pressão de sucção e pressão de recalque da bancada, manômetro e manovacuômetro, utilizou-se uma balança de peso morto marca “ABSi”, modelo BPM 101 com faixa de operação de 1 a 101 bar e classe 0,025 .

Após todos os cálculos, observou-se que o equipamento utilizado não foi capaz de fornecer dados satisfatórios para a incerteza dos equipamentos devido a sua faixa de operação e optou-se por utilizar as incertezas fornecidas pelos próprios fabricantes dos equipamentos, onde

para o manômetro adotou-se a incerteza relativa $\left(\frac{\delta(P)}{P}\right) = \pm 2,5\%$ e para o manovacuômetro,

adotou-se a incerteza relativa $\left(\frac{\delta(P)}{P}\right) = \pm 1,6\%$.

Para a segunda fase do projeto, utilizou-se o manômetro de coluna de líquido tipo U, onde o mesmo não necessita de calibração e adotou-se como sua incerteza absoluta $\delta P = 1 \text{ mmHg}$.

Além das medidas de pressões efetuadas através dos manômetros, anotou-se a pressão barométrica no local onde os ensaios foram realizados, lembrando-se que:

- Pressão Absoluta (P_{abs}) - É a pressão medida em relação ao vácuo total ou zero absoluto. Todos os valores que expressam pressão absoluta são positivos.
- Pressão Atmosférica (P_{atm}) - É a pressão exercida pelo peso da atmosfera. A pressão atmosférica normalmente é medida por um instrumento chamado barômetro, daí o nome pressão barométrica. A pressão atmosférica varia com a altitude e depende ainda das condições meteorológicas
- Pressão Manométrica (P_{man}) - É a pressão medida, adotando-se como referência a pressão atmosférica. Esta pressão é normalmente medida através de um instrumento chamado manômetro, daí sua denominação manométrica sendo também chamada de pressão efetiva ou pressão relativa.

Quando a pressão é menor que a atmosférica, temos pressão manométrica negativa, também denominada de vácuo (denominação não correta) ou depressão.

O manômetro registra valores de pressão manométrica positiva; o vacuômetro registra valores de pressão manométrica negativa e o manovacuômetro registra valores de pressão manométrica positiva e negativa. Estes instrumentos, sempre registram zero quando abertos à atmosfera, assim, tem como referência (zero da escala) a pressão atmosférica do local onde está sendo realizada a medição, seja ela qual for.

Pelas definições apresentadas, resulta a seguinte relação:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man} . \quad (\text{A.39})$$

Quanto às incertezas dos equipamentos, os cálculos efetuados em sua calibração serviram para a obtenção de erros sistemáticos apresentados pelos equipamentos e usou-se para futuros cálculos os seguintes parâmetros:

- Manômetro:

Leitura do visor + Erro Sistemático (0,02kgf/cm²) ± Incerteza Relativa de Medida (2,5%)

- Manovacuômetro:

Leitura do visor + Erro Sistemático (0,04kgf/cm²) ± Incerteza Relativa de Medida (1,6%)

Diâmetro do Rotor

Para o cálculo da Incerteza do diâmetro do rotor da bomba utilizou-se também o método para grandezas variáveis, onde efetuou-se as medições através de um paquímetro digital marca Mitutoyo com precisão de 0,01mm. Após as medições obteve-se a medida do diâmetro do rotor com sua respectiva incerteza conforme mostra-se abaixo

$$D = 209,12 \pm 0,19mm$$

Altura Manométrica

Efetuiu-se o cálculo das alturas manométricas através das respectivas equações para H_l , H_m e H_u obtidas no capítulo 4 deste projeto, para as duas fases.

Fase 1:

Para a obtenção das equações na Fase 1, utilizou-se o esquema geral da bancada mostrado através da figura 3.1.

$$H_l = \frac{p_6^m - p_5^v}{\rho g}, \quad (A.40)$$

$$H_m = \frac{p_6^m - p_5^v}{\rho g} + \frac{V_B^2 - V_3^2}{2g} + \frac{V_2^2 - V_A^2}{2g} + hpc_{3 \rightarrow B} + hpc_{A \rightarrow 2}, \quad (A.41)$$

$$H_u = \frac{p_6^m - p_5^v}{\rho g} + \frac{V_B^2 - V_A^2}{2g} + hpc_{3 \rightarrow B} + hpc_{A \rightarrow 2}. \quad (A.42)$$

As incertezas associadas ao cálculo das alturas manométricas podem então ser estimadas como

$$\delta(H_l) = \left[\left(\frac{\delta(P_6^m)}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{\delta(P_5^v)}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{P_6^m}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{P_5^v}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{A.43})$$

$$\delta(H_m) = \left[\left(\frac{\delta(P_6^m)}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{\delta(P_5^v)}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{P_6^m}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{P_5^v}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{V_B}{g} \delta(V_B) \right)^2 + \left(\frac{V_3}{g} \delta(V_3) \right)^2 + \left(\frac{V_2}{g} \delta(V_2) \right)^2 + \left(\frac{V_A}{g} \delta(V_A) \right)^2 + (\delta(hpc_{3 \rightarrow B}))^2 + (\delta(hpc_{A \rightarrow 2}))^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{A.44})$$

$$\delta(H_u) = \left[\left(\frac{\delta(P_6^m)}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{\delta(P_5^v)}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{P_6^m}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{P_5^v}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{V_B}{g} \delta(V_B) \right)^2 + \left(\frac{V_A}{g} \delta(V_A) \right)^2 + (\delta(hpc_{3 \rightarrow B}))^2 + (\delta(hpc_{A \rightarrow 2}))^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{A.45})$$

Fase 2:

Para a obtenção das equações na Fase 1, utilizou-se o esquema geral da bancada mostrado através da figura 4.11.

$$H_m = \frac{p_3^m - g\Delta h(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O})}{\rho g} + Z_{2B}, \quad (4.46)$$

$$H_u = \frac{p_3^m - g\Delta h(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O})}{\rho g} + \frac{V_B^2 - V_2^2}{2g} + Z_{2B}. \quad (4.47)$$

As incertezas associadas ao cálculo das alturas manométricas podem então ser estimadas como

$$\delta(H_m) = \left[\left(\frac{\delta(P_3^m)}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{P_3^m}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{g \rho_{Hg}}{\rho g} \delta(\Delta H) \right)^2 + \left(\frac{g \Delta H}{\rho g} \delta(\rho_{Hg}) \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{g \Delta H \rho_{Hg}}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{g \rho_{H_2O}}{\rho g} \delta(\Delta H) \right)^2 + \left(\frac{g \Delta H}{\rho g} \delta(\rho_{H_2O}) \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{g \Delta H \rho_{H_2O}}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + (\delta(Z_{2B}))^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (A.48)$$

$$\delta(H_u) = \left[\left(\frac{\delta(P_3^m)}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{P_3^m}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{g \rho_{Hg}}{\rho g} \delta(\Delta H) \right)^2 + \left(\frac{g \Delta H}{\rho g} \delta(\rho_{Hg}) \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{g \Delta H \rho_{Hg}}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{g \rho_{H_2O}}{\rho g} \delta(\Delta H) \right)^2 + \left(\frac{g \Delta H}{\rho g} \delta(\rho_{H_2O}) \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{g \Delta H \rho_{H_2O}}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{V_B}{g} \delta(V_B) \right) + \left(\frac{V_2}{g} \delta(V_2) \right) + (\delta(Z_{2B}))^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (A.49)$$

Estão relacionados abaixo, todas as formulações das grandezas faltantes que foram utilizadas neste projeto com suas respectivas formulações para o cálculo de suas incertezas.

NPSH Disponível

Fase 1:

$$NPSH_{DISP} = \frac{p_5^v + p_{5amb} - p_v}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_{25} - h_{pc_{A \rightarrow 2}}. \quad (A.50)$$

As incertezas associadas ao cálculo do $NPSH_{DISP}$ podem então ser estimadas como

$$\delta(NPSH_{DISP}) = \left[\begin{aligned} &\left(\frac{\delta(P_{5amb})}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{\delta(P_5^v)}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{\delta(P_V)}{\rho g} \right)^2 + \\ &+ \left(\frac{P_{5amb}}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{P_5^v}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{P_V}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \\ &+ \left(\frac{V_A}{g} \delta(V_A) \right)^2 + (\delta(Z_{25}))^2 + (\delta(hpc_{A \rightarrow 2}))^2 \end{aligned} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A.51)$$

Fase 2:

$$NPSH_{DISP} = \frac{p_{5amb} + g\Delta H(\rho_{Hg} - \rho_{H2O}) - p_v}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (A.52)$$

As incertezas associadas ao cálculo do $NPSH_{DISP}$ podem então ser estimadas como

$$\delta(NPSH_{DISP}) = \left[\begin{aligned} &\left(\frac{\delta(P_{5amb})}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{P_{5amb}}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{g\rho_{Hg}}{\rho g} \delta(\Delta H) \right)^2 + \left(\frac{g\Delta H}{\rho g} \delta(\rho_{Hg}) \right)^2 + \\ &+ \left(\frac{g\Delta H\rho_{Hg}}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{g\rho_{H2O}}{\rho g} \delta(\Delta H) \right)^2 + \left(\frac{g\Delta H}{\rho g} \delta(\rho_{H2O}) \right)^2 + \\ &+ \left(\frac{g\Delta H\rho_{H2O}}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{\delta(P_v)}{\rho g} \right)^2 + \left(\frac{P_v}{(\rho)^2 g} \delta(\rho) \right)^2 + \left(\frac{V_2}{g} \delta(V_2) \right)^2 \end{aligned} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A.53)$$

Coefficiente Adimensional de Pressão, ψ

Através da análise dimensional e de semelhança física pode-se calcular o coeficiente de pressão através da equação

$$\psi = C_\psi \frac{g \times H}{(\omega D)^2}, \quad (A.54)$$

e suas incertezas associadas ao cálculo do coeficiente de pressão podem então ser estimadas como

$$\delta(\psi) = \left[\left(\frac{C_\psi g}{(\omega D)^2} \delta(H) \right)^2 + \left(\frac{2C_\psi g \times H}{\omega^3 D^2} \delta(\omega) \right)^2 + \left(\frac{2C_\psi g \times H}{\omega^2 D^3} \delta(D) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{A.55})$$

Coefficiente Adimensional de Vazão, ϕ

Através da análise dimensional e de semelhança física pode-se calcular o coeficiente de vazão através da equação

$$\phi = C_\phi \frac{Q}{\omega D^3}, \quad (\text{A.56})$$

e, suas incertezas associadas ao cálculo do coeficiente de vazão podem então ser estimadas como

$$\delta(\phi) = \left[\left(\frac{C_\phi \delta(Q)}{\omega D^3} \right)^2 + \left(\frac{C_\phi Q}{\omega^2 D^3} \delta(\omega) \right)^2 + \left(\frac{3C_\phi Q}{\omega D^4} \delta(D) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{A.57})$$

Coefficiente Adimensional de $NPSH_{DISP}$, $CNPSH_{DISP}$

Através da análise dimensional e de semelhança física pode-se calcular o coeficiente de $NPSH_{DISP}$ através da equação

$$CNPSH_{DISP} = C_{CNPSH_{DISP}} \frac{NPSH_{DISP} \times g}{(nD)^2}, \quad (\text{A.58})$$

e, suas incertezas associadas ao cálculo do coeficiente de $NPSH_{DISP}$ podem então ser estimadas como

$$\delta(CNPSH_{DISP}) = \left[\left(\frac{C_{CNPSH_{DISP}} g}{(\omega D)^2} \delta(NPSH_{DISP}) \right)^2 + \left(\frac{2C_{CNPSH_{DISP}} NPSH_{DISP} \times g}{\omega^3 D^2} \delta(\omega) \right)^2 + \left(\frac{2C_{CNPSH_{DISP}} NPSH_{DISP} \times g}{\omega^2 D^3} \delta(D) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{A.59})$$

Coefficiente Adimensional da Rotação Específica, n_q

Através da análise dimensional e de semelhança física pode-se calcular o coeficiente da rotação específica através da equação

$$n_q = Cn_q \frac{\omega(Q)^{\frac{1}{2}}}{(gH)^{\frac{3}{4}}}, \quad (\text{A.60})$$

e suas incertezas associadas ao cálculo do coeficiente da rotação específica podem então ser estimadas como sendo

$$\delta(n_q) = \left[\left(\frac{C_{n_q} (Q)^{\frac{1}{2}}}{(gH)^{\frac{3}{4}}} \delta(\omega) \right)^2 + \left(\frac{C_{n_q} \omega \delta(Q)}{2(gH)^{\frac{3}{4}} (Q)^{\frac{1}{2}}} \right)^2 + \left(\frac{3C_{n_q} \omega (Q)^{\frac{1}{2}}}{4(g)^{\frac{3}{4}} (H)^{\frac{7}{4}}} \delta(H) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{A.61})$$

Rotação do motor Elétrico, n

A rotação do motor elétrico utilizado neste projeto foi obtida utilizando-se um tacômetro digital da marca Lutron modelo DT-2236 com precisão de $\pm 0,05\% + 1$ dígito e resolução de 1 RPM.

Número de Thoma, σ

O número de Thoma (coeficiente de cavitação) é dado pela equação

$$\sigma = \frac{NPSH_{REQ}}{H}, \quad (\text{A.62})$$

e suas incertezas associadas podem ser expressas como sendo

$$\delta(\sigma) = \left[\left(\frac{\delta(NPSH_{REQ})}{H} \right)^2 + \left(\frac{NPSH_{REQ}}{H^2} \delta(H) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{A.63})$$

Apêndice B

Análise Adimensional e Semelhança Física

B.1 - INTRODUÇÃO

A maioria dos fenômenos da mecânica dos fluidos depende, de uma maneira complexa, de parâmetros ligados à sua geometria e de seu escoamento.

Grande parte dos estudos destes fenômenos relativos aos escoamentos dos fluidos resulta de testes experimentais. Em geral, a solução de problemas reais envolve uma combinação de análises e informações experimentais.

Sabe-se que os trabalhos experimentais de laboratórios são simultaneamente dispendiosos e demorados, portanto, procura-se sempre um método de análise para obter-se o máximo de informações através de um número mínimo de experiências e que possam ser confiáveis.

A análise dimensional é uma importante ferramenta que em muitos casos auxilia na obtenção desse objetivo. É uma técnica que objetiva o estabelecimento de relações entre variáveis que influenciam um determinado fenômeno físico a ser estudado. Este tipo de análise também é muito empregado em casos onde a utilização de um protótipo de tamanho real é impossível ou de custo relativamente alto.

As relações obtidas na forma adimensional possibilitam uma indicação da influência de cada variável no fenômeno estudado facilitando o seu entendimento.

Através da análise dimensional, obtêm-se as relações entre as variáveis de forma a constituir diversos números ou grupos adimensionais, sendo então considerados uma forma lógica de juntar estas variáveis em pequenos grupos adimensionais, tornando o problema mais simples de se analisar.

Um dos métodos muito utilizados para esta análise é o chamado “teorema dos π de Buckingham”, que é um enunciado da relação entre uma função expressa em termos de parâmetros dimensionais e uma função correlata expressa em termos de parâmetros adimensionais.

B.2- TEOREMA DOS π DE BUCKINGHAM

Seja a análise de um fenômeno físico qualquer, onde os estudos preliminares – teóricos, numéricos ou experimentais – indiquem depender das grandezas $q_1, q_2, \dots, q_n$. Considere-se, então, que as fórmulas dimensionais destas grandezas, em relação à base do SI, por exemplo, sejam dadas pelas grandezas fundamentais referentes à massa [M], comprimento [L] e tempo [T], o sistema MLT, que normalmente é utilizado em problemas de mecânica dos fluidos. Suponha, então

$$[q_1] = M^{a_1} L^{b_1} T^{c_1}$$

$$[q_2] = M^{a_2} L^{b_2} T^{c_2}$$

$$[q_3] = M^{a_3} L^{b_3} T^{c_3}$$

.

.

$$[q_n] = M^{a_n} L^{b_n} T^{c_n}$$

A partir destas equações, pode-se construir a chamada matriz dimensional do problema:

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & . & . & . & a_n \\ b_1 & b_2 & b_3 & . & . & . & b_n \\ c_1 & c_2 & c_3 & . & . & . & c_n \end{pmatrix}$$

que deverá conter n colunas, sendo uma para cada grandeza identificada como representativa do fenômeno, e tantas linhas quantas forem as dimensões necessárias para representar as n grandezas.

Da teoria dos determinantes, sabe-se que a característica de uma matriz é, por definição, a ordem m do maior determinante não nulo que pode ser extraído da matriz. Isto quer dizer que, se uma matriz 3×5 tem característica 2, por exemplo, todos os seus determinantes de ordem superior a 2 são nulos.

O teorema de π de Buckingham demonstra que para um determinado problema físico, onde o parâmetro dependente é uma função de n-1 parâmetros independentes, podemos expressar a relação entre as variáveis em forma funcional, como:

$$q_1 = f(q_2, q_3, \dots, q_n)$$

onde q_1 é o parâmetro dependente e $q_2, q_3, \dots, q_n$ são os n-1 parâmetros independentes. Pode-se então, expressar matematicamente a relação funcional na forma equivalente $g(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) = 0$, onde g é uma função não especificada diferente de f.

Para uma relação entre n parâmetros da forma $g(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) = 0$, os n parâmetros podem ser agrupados em $n-m$ razões independentes adimensionais, ou parâmetros π , que podem ser expressos em forma funcional por $G(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0$, ou $\pi_1 = G(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m})$.

O número m é usualmente, mas nem sempre, igual ao número mínimo de dimensões independentes necessárias para especificar as dimensões de todos os parâmetros $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$.

Os $n-m$ parâmetros adimensionais π obtidos por esse procedimento são independentes e relacionados com as grandezas $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$. Um parâmetro π não é independente se ele puder ser formado por um produto ou quociente dos outros parâmetros do problema.

Para sistematizar a aplicação do teorema dos π de Buckingham, segundo Mansur(2004), os seguintes passos podem ser seguidos:

- Passo 1: Identificar e listar todas as n grandezas que influenciam no fenômeno estudado;
- Passo 2: Escrever a fórmula dimensional de cada uma destas grandezas;
- Passo 3: Construir a matriz dimensional do problema;
- Passo 4: Determinar a característica m da matriz dimensional do problema;
- Passo 5: Calcular o número $n-m$ de grupos adimensionais independentes que podem ser estabelecidos;
- Passo 6: Selecionar, dentre as n grandezas identificadas no passo 1, um número m de grandezas que contenham, juntas, todas as dimensões envolvidas no problema. É essencial, aí, que todas as m grandezas escolhidas sejam independentes umas das outras;
- Passo 7: Multiplicar as m grandezas selecionadas, elevadas a expoentes $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$. Como resultado desta operação, será formada uma base, que deverá estar presente na obtenção de todos os grupos adimensionais;
- Passo 8: Montar, um a um, todos os grupos $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}$, multiplicando, a cada vez a base construída no passo anterior por apenas uma das $n-m$ grandezas restantes;
- Passo 9: Escrever a fórmula dimensional correspondente a cada um dos $n-m$ grupos π ;
- Passo 10: Obter as $n-m$ sistemas de equações lineares, um para cada grupo π , igualando a zero a soma dos expoentes de cada dimensão;
- Passo 11: Resolver, individualmente, cada um dos $n-m$ sistemas lineares obtidos, para encontrar os valores que os expoentes $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ irão assumir em cada grupo adimensional π ;
- Passo 12: Substituir cada conjunto de valores $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ em seu correspondente grupo π montado no passo 8;
- Passo 13: Verificar se todos os grupos obtidos são realmente adimensionais.

Utilizando-se este método, destaca-se que, se nem todos os parâmetros considerados importantes do fenômeno forem identificados nos estudos iniciais, uma relação entre as grandezas poderá ser obtida, mas estará longe de fornecer uma representação satisfatória da física do problema, e, incluindo-se grandezas que, na verdade, não exercem efeito significativo sobre o fenômeno físico, ou o processo de análise adimensional mostrará que eles não entram na relação encontrada, ou grupos adimensionais estranhos ao fenômeno serão encontrados, o que poderá ser confirmado futuramente, com a realização de experiências ou simulações do escoamento em análise.

B.3- UTILIZAÇÃO DO TEOREMA DE BUCKINGHAM PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES ADIMENSIONAIS PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS.

Para a análise e estudo do fenômeno encontrado em bombas centrífugas, as grandezas envolvidas para a utilização do teorema de Buckingham neste projeto foram assim escolhidas:

ρ - massa específica, (SI - $\frac{kg}{m^3}$),

ω - rotação, (SI – rad/s),

D - diâmetro do rotor da bomba, (SI – m),

ν - viscosidade cinemática do fluido, (SI - $\frac{m^2}{s}$),

Q - vazão, (SI - $\frac{m^3}{s}$),

ΔP - diferença de pressão, (SI – Pa).

Todas estas grandezas são aqui expressas em termos das três grandezas fundamentais: massa [M], comprimento [L] e tempo [T], e, portanto, três coeficientes adimensionais podem descrever o fenômeno.

Para a obtenção dos coeficientes adimensionais aqui desejados, optou-se por utilizar os passos descritos por Mansur (2004) na aplicação do teorema de Buckingham e tem-se:

Passo 1: $g(\rho, \omega, D, \nu, Q, \Delta P)$;

Passo 2: $\rho = \frac{M}{L^3} = ML^{-3}T^0,$

$$\omega = \frac{1}{T} = M^0L^0T^{-1},$$

$$D = L = M^0LT^0,$$

$$\nu = \frac{L^2}{T} = M^0L^2T^{-1},$$

$$Q = \frac{L^3}{T} = M^0L^3T^{-1},$$

$$\Delta P = \frac{M}{LT^2} = ML^{-1}T^{-2};$$

Passo 3: $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -3 & 0 & 1 & 2 & 3 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & -2 \end{pmatrix};$

Passo 4: $\text{rank } A = 3;$

Passo 5: $n-m = 6-3 = 3;$

Portanto, tem-se 3 grupos adimensionais.

Passo 6: $(\rho, \omega, D);$

Passo 7: $(\rho)^{\alpha_1}(\omega)^{\alpha_2}(D)^{\alpha_3};$

Passo 8: $(\rho)^{\alpha_1}(\omega)^{\alpha_2}(D)^{\alpha_3}\Delta P,$

$$(\rho)^{\alpha_1}(\omega)^{\alpha_2}(D)^{\alpha_3}Q,$$

$$(\rho)^{\alpha_1}(\omega)^{\alpha_2}(D)^{\alpha_3}\nu^{-1};$$

Passo 9: $\pi_1 = (M^1L^{-3}T^0)^{\alpha_1}(M^0L^0T^{-1})^{\alpha_2}(M^0L^1T^0)^{\alpha_3}M^1L^{-1}T^{-2},$

$$\pi_1 = M^{\alpha_1}L^{-3\alpha_1}T^{-\alpha_2}L^{\alpha_3}M^1L^{-1}T^{-2},$$

$$\pi_1 = M^{\alpha_1+1}L^{-3\alpha_1+\alpha_3-1}T^{-\alpha_2-2},$$

$$\pi_2 = (M^1 L^{-3} T^0)^{\alpha_1} (M^0 L^0 T^{-1})^{\alpha_2} (M^0 L^1 T^0)^{\alpha_3} M^0 L^3 T^{-1},$$

$$\pi_2 = M^{\alpha_1} L^{-3\alpha_1} T^{-\alpha_2} L^{\alpha_3} L^3 T^{-1},$$

$$\pi_2 = M^{\alpha_1} L^{-3\alpha_1 + \alpha_3 + 3} T^{-\alpha_2 - 1},$$

$$\pi_3 = (M^1 L^{-3} T^0)^{\alpha_1} (M^0 L^0 T^{-1})^{\alpha_2} (M^0 L^1 T^0)^{\alpha_3} (M^0 L^2 T^{-1})^{-1},$$

$$\pi_3 = M^{\alpha_1} L^{-3\alpha_1} T^{-\alpha_2} L^{\alpha_3} L^{-2} T^1,$$

$$\pi_3 = M^{\alpha_1} L^{-3\alpha_1 + \alpha_3 - 2} T^{-\alpha_2 + 1};$$

Passo 10:

$$\pi_1 \begin{cases} \alpha_1 + 1 = 0 \\ -3\alpha_1 + \alpha_3 - 1 = 0, \\ -\alpha_2 - 2 = 0 \end{cases}$$

$$\pi_2 \begin{cases} \alpha_1 = 0 \\ -3\alpha_1 + \alpha_3 + 3 = 0, \\ -\alpha_2 - 1 = 0 \end{cases}$$

$$\pi_3 \begin{cases} \alpha_1 = 0 \\ -3\alpha_1 + \alpha_3 - 2 = 0; \\ -\alpha_2 + 1 = 0 \end{cases}$$

Passo 11:

$$\pi_1 \begin{cases} \alpha_1 = -1 \\ \alpha_2 = -2, \\ \alpha_3 = -2 \end{cases}$$

$$\pi_2 \begin{cases} \alpha_1 = 0 \\ \alpha_2 = -1, \\ \alpha_3 = -3 \end{cases}$$

$$\pi_3 \begin{cases} \alpha_1 = 0 \\ \alpha_2 = 1; \\ \alpha_3 = 2 \end{cases}$$

Passo 12: $\pi_1 = (\rho)^{-1}(\omega)^{-2}(D)^{-2} \Delta P ,$

$$\pi_2 = (\rho)^0(\omega)^{-1}(D)^{-3} Q ,$$

$$\pi_3 = (\rho)^0(\omega)^1(D)^2 \nu^{-1};$$

Passo 13: $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho(\omega D)^2} ,$

$$\pi_2 = \frac{Q}{\omega D^3} ,$$

$$\pi_3 = \frac{\omega D^2}{\nu} .$$

Deduziu-se assim, as equações correspondentes aos 3 grupos adimensionais relacionados ao fenômeno, onde o coeficiente π_1 é usualmente chamado de coeficiente de pressão e representado pela letra grega ψ . Já os coeficientes relacionados a π_2 e π_3 são respectivamente relacionados como sendo os coeficientes de vazão e número de Reynolds referido a velocidade angular do Rotor da bomba e sendo representados por ϕ e Re .

Além destes coeficientes, pode-se definir também o coeficiente referente ao termo NPSH, proveniente do coeficiente de pressão definido acima.

Através do coeficiente π_1 tem-se:

$$\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho(\omega D)^2} = \psi .$$

Substituindo-se o coeficiente de pressão (ψ) pelo coeficiente de NPSH (CNPSH) e por definição sabe-se que $\Delta P = \gamma NPSH$, no qual o peso específico é $\gamma = \rho g$, tem-se:

$$CNPSH = \frac{\gamma NPSH}{\rho(\omega D)^2} = \frac{\rho g NPSH}{\rho(\omega D)^2} ,$$

$$CNPSH = \frac{g NPSH}{(\omega D)^2} .$$

B.4 - SEMELHANÇA FÍSICA APLICADA A BOMBAS

A teoria de semelhança física determina que se duas bombas, com características de projeto diferentes, submetidas a diferentes condições operacionais, mas se guardarem entre si, semelhanças geométricas, cinemáticas e dinâmicas, tem-se caracterizada uma condição de semelhança física.

Conclui-se então que, quando as condições operacionais de duas bombas são tais que caracterizam a existência de semelhança física, os grupos adimensionais das duas bombas serão respectivamente iguais.

Pela teoria de semelhança física, afirma-se então que a vazão (ϕ) calculada para uma determinada bomba (bomba 1), deverá ser igual a vazão (ϕ') calculada para uma outra bomba (bomba 2) e estabelece-se que

$$\pi_2 = \phi = \pi'_2 = \phi'.$$

Conseqüentemente, pode-se afirmar que

$$\frac{Q}{\omega D^3} = \frac{Q'}{\omega' D'^3}.$$

Aplicando-se também a similaridade para os valores encontrados para π_1 e π_3 tem-se

$$\pi_1 = \pi'_1 = \frac{\Delta P}{\rho(\omega D)^2} = \frac{\Delta P'}{\rho'(\omega' D')^2},$$

$$\pi_3 = \pi'_3 = Re = Re'.$$

Conforme descrito anteriormente, sabe-se que $\Delta P = \gamma H$ e o peso específico é dado por $\gamma = \rho g$, tem-se para π_1 e π_2

$$\frac{gH}{(\omega D)^2} = \frac{gH'}{(\omega' D')^2},$$

$$\frac{Q}{\omega D^3} = \frac{Q'}{\omega' D'^3}.$$

Estas duas equações são utilizadas para expressar a operação de bombas operando em condições de semelhança física, as quais dão origem às “equações dos pontos homólogos”, muito

utilizada para a transformação de curvas características de uma mesma bomba operando em diferentes condições de trabalho.

É de grande importância, ainda relacionado à semelhança física, introduzir o parâmetro relacionado à velocidade específica (n_q), que é um grupo adimensional obtido da combinação do coeficiente de vazão e do coeficiente de pressão, obtendo-se assim um número adimensional no qual não se encontra incluído a dimensão do rotor da bomba (D).

Utilizando-se então os dois coeficientes definidos anteriormente tem-se:

$$\psi = \frac{gH}{(\omega D)^2} \Leftrightarrow \psi^3 = \frac{(gH)^3}{(\omega D)^6} = \text{constante},$$

$$\phi = \frac{Q}{\omega D^3} \Leftrightarrow \phi^2 = \frac{Q^2}{\omega^2 D^6} = \text{constante}.$$

Dividindo-se o coeficiente de vazão ao quadrado pelo coeficiente de pressão ao cubo, e rearranjando-se as equações, tem-se o coeficiente relacionado à velocidade específica,

$$n_q^4 = \frac{\frac{Q^2}{\omega^2 D^6}}{\frac{(gH)^3}{\omega^6 D^6}} = \frac{Q^2 \omega^4}{(gH)^3} = \text{constante} \Leftrightarrow n_q = \frac{\omega \sqrt{Q}}{(gH)^{\frac{3}{4}}}.$$

Portanto, o coeficiente da velocidade específica é dado por

$$n_q = \frac{\phi^{\frac{1}{2}}}{\psi^{\frac{3}{4}}} = \frac{\omega \sqrt{Q}}{(gH)^{\frac{3}{4}}}.$$

Lembra-se aqui, que a velocidade específica não é um adimensional novo e independente, mas quando os adimensionais de vazão (ϕ) e pressão (ψ) forem iguais, para duas bombas operando em condições diferentes, teremos caracterizado a semelhança física e, automaticamente, e em razão disto, o adimensional referente a n_q será constante.

Este adimensional é calculado para se utilizar em problemas onde ocorre à variação de rotação em bombas centrífugas.

Neste projeto, após análises da literatura optou-se por utilizar constantes multiplicativas para obtenção de cada coeficiente adimensional obtendo-se então as seguintes equações:

- **Coeficiente de Vazão (ϕ)**

$$\phi = C_{\phi} \frac{Q}{\omega D^3}$$

sendo - $C_{\phi} = (C_{nq})^2 8^{\frac{3}{2}}$,

$$- C_{nq} = \frac{30 \times (9,807)^{\frac{3}{4}}}{\pi},$$

$$- \omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{\pi \times n}{30s};$$

- **Coeficiente de Pressão (ψ)**

$$\psi = C_{\psi} \frac{gH}{(\omega D)^2}, \quad C_{\psi} = 8;$$

- **Coeficiente de Velocidade Específica (n_q)**

$$n_q = C_{nq} \frac{\omega \sqrt{Q}}{(gH)^{\frac{3}{4}}}, \quad C_{nq} = \frac{30 \times (9,807)^{\frac{3}{4}}}{\pi};$$

- **Coeficiente de NPSH_{DISP} (CNPSH_{DISP})**

$$CNPSH_{DISP} = C_{CNPSH_{DISP}} \frac{gCNPSH}{(\omega D)^2}, \quad C_{CNPSH_{DISP}} = 8;$$

- **Coeficiente do Número de Reynolds – Re**

$$Re = \frac{\omega D^2}{\nu}.$$

O coeficiente do número de Reynolds também pode ser expresso pela equação

$$Re^* = \frac{Q}{\nu D}.$$

Dividindo-se $\frac{Re^*}{Re}$ obtém-se $\frac{Re^*}{Re} = \phi \Rightarrow Re^* = \phi Re$.

Apêndice C

Conversão de Unidades

1- Unidades de Comprimento

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
m	dm	×	10	dm	m	÷	10
m	cm	×	100	cm	m	÷	100
m	mm	×	1000	mm	m	÷	1000
cm	mm	×	10	mm	cm	÷	10
m	in	×	39,37	in	m	÷	39,37
m	ft	×	3,281	ft	m	÷	3,281
cm	in	÷	2,54	in	cm	×	2,54
cm	ft	÷	30,48	ft	cm	×	30,48
mm	in	÷	25,4	in	mm	×	25,4
mm	ft	÷	304,8	ft	mm	×	304,8
in	ft	÷	12	ft	in	×	12

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o m (metro)

2- Unidades de Aceleração

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
m/s ²	cm/s ²	×	100	cm/s ²	m/s ²	÷	100
m/s ²	ft/s ²	×	3,281	ft/s ²	m/s ²	÷	3,281
cm/s ²	ft/s ²	÷	30,48	ft/s ²	cm/s ²	×	30,48

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o m/s² (metro por segundo ao quadrado)

3- Unidades de Área ou Superfície

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
m ²	cm ²	×	10000	cm ²	m ²	÷	10000
m ²	mm ²	×	1000000	mm ²	m ²	÷	1000000
cm ²	mm ²	×	100	mm ²	cm ²	÷	100
in ²	m ²	÷	1550,003	m ²	in ²	×	1550,003
in ²	cm ²	×	6,452	cm ²	in ²	÷	6,452
in ²	mm ²	×	645,16	mm ²	in ²	÷	645,16
in ²	ft ²	÷	144	ft ²	in ²	×	144
ft ²	m ²	÷	10,764	m ²	ft ²	×	10,764
ft ²	cm ²	×	929,03	cm ²	ft ²	÷	929,03
ft ²	mm ²	×	92903,04	mm ²	ft ²	÷	92903,04

No Sistema Internacional (S.I.) usa-se o m² (metro quadrado)

4- Unidades de Volume

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
m ³	cm ³	×	1000000	cm ³	m ³	÷	1000000
m ³	l	×	1000	l	m ³	÷	1000
m ³	ft ³	×	35,315	ft ³	m ³	÷	35,315
m ³	in ³	×	61023,744	in ³	m ³	÷	61023,744
cm ³	l	÷	1000	l	cm ³	÷	1000
l	ft ³	÷	28,316	ft ³	l	×	28,316
ft ³	in ³	×	1728	in ³	ft ³	÷	1728

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o m³ (metro cúbico)

5- Unidades de Força

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
N	kgf	÷	9,807	kgf	N	×	9,807
N	dina	×	100000	dina	N	÷	100000
N	lbf	÷	4,448	lbf	N	×	4,448
kgf	dina	×	980665,2	dina	kgf	÷	980665,2
kgf	lbf	×	2,205	lbf	kgf	÷	2,205
dina	lbf	÷	444822,247	lbf	dina	×	444822,247
lbf	tf	÷	2204,634	tf	lbf	×	2204,634

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o N (Newton)

No sistema inglês, kgf (quilograma-força) é kP (kilo-Pound) e gf (grama-força) é P (Pound). Isto pode causar alguma confusão, pois P também é o símbolo de Poise (viscosidade dinâmica).

É usual, embora errado, a utilização dos termos “quilo” e “libra” para denominar quilogramaforça e libra-força. Também estes termos são utilizados no lugar de kgf/cm² e lbf/in², respectivamente, sendo também incorreto.

A palavra peso, aqui não é sinônimo de massa.

Relação entre força, massa e aceleração (3ª lei de Newton)

$$F = ma$$

Na qual:

- F = força
- m = massa
- a = aceleração

Cálculo de peso:

$$P = mg$$

Na qual:

- P = peso
- m = massa
- g = aceleração da gravidade

6- Unidades de Massa

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
kg	g	×	1000	g	kg	÷	1000
kg	mg	×	1000000	mg	kg	÷	1000000
kg	lb	×	2,205	lb	kg	÷	2,205
g	mg	×	1000	mg	g	÷	1000
g	lb	÷	453,592	lb	g	×	453,592
mg	lb	÷	453592,4	lb	mg	×	453592,4
t	lb	×	2204,623	lb	t	÷	2204,623

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o kg (quilograma)

7- Unidades de Peso Específico

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
N/m ³	N/l	÷	1000	N/l	N/m ³	×	1000
N/m ³	N/cm ³	÷	1000000	N/cm ³	N/m ³	×	1000000
N/m ³	kgf/m ³	÷	9,807	kgf/m ³	N/m ³	×	9,807
N/m ³	kgf/l	÷	9806,65	kgf/l	N/m ³	×	9806,65
N/m ³	kgf/cm ³	÷	9806650	kgf/cm ³	N/m ³	×	9806650
N/m ³	lbf/in ³	÷	271447,1	lbf/in ³	N/m ³	×	271447,1
N/m ³	lbf/ft ³	÷	157,089	lbf/ft ³	N/m ³	×	157,089
N/cm ³	kgf/m ³	×	101971,621	kgf/m ³	N/cm ³	÷	101971,621
N/cm ³	kgf/l	×	101,972	kgf/l	N/cm ³	÷	101,972
N/cm ³	kgf/cm ³	÷	9,807	kgf/cm ³	N/cm ³	×	9,807

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o N/m³ (Newton por metro cúbico)

8- Unidades de Velocidade

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
m/s	cm/s	×	100	cm/s	m/s	÷	100
m/s	mm/s	×	1000	mm/s	m/s	÷	1000
m/s	m/h	×	60000	m/h	m/s	÷	60000
m/s	in/s	×	60	in/s	m/s	÷	60
cm/s	mm/s	×	10	mm/s	cm/s	÷	10
cm/s	m/min	×	0,6	m/min	cm/s	÷	0,6
cm/s	in/s	÷	2,54	in/s	cm/s	×	2,54
mm/s	in/min	×	2,362	in/min	mm/s	÷	2,362
m/h	in/s	÷	91,44	in/s	m/h	×	91,44
m/h	ft/s	÷	1907,226	ft/s	m/h	×	1907,226
in/s	in/min	×	60	in/min	in/s	÷	60
in/s	ft/h	×	300	ft/h	in/s	÷	300
ft/s	ft/min	×	60	ft/min	ft/s	÷	60

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o m/s (metro por segundo)

9- Unidades de Viscosidade Cinemática

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
m ² /s	St	×	10000	St	m ² /s	÷	10000
m ² /s	cSt	×	1000000	cSt	m ² /s	÷	1000000
m ² /s	ft ² /s	×	10,76	ft ² /s	m ² /s	÷	10,76
St	cSt	×	100	cST	St	÷	100
St	ft ² /s	÷	929,368	ft ² /s	St	×	929,368
cSt	ft ² /s	÷	92936,803	ft ² /s	cSt	×	92936,803

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o m²/s (metro quadrado por segundo)

10- Unidades de Pressão

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
Pa	bar	÷	100000	bar	Pa	×	100000
Pa	kgf/mm ²	÷	9806652	kgf/mm ²	Pa	×	9806652
Pa	kgf/cm ²	÷	98066,52	kgf/cm ²	Pa	×	98066,52
Pa	kgf/m ²	÷	9,807	kgf/m ²	Pa	×	9,807
Pa	atm	÷	101325	atm	Pa	×	101325
Pa	lbf/ft ²	÷	47,88	lbf/ft ²	Pa	×	47,88
Pa	mca	÷	9797,834	mca	Pa	×	9797,834
Pa	mmhg	÷	133,322	mmhg	Pa	×	133,322
bar	kgf/mm ²	÷	98,067	kgf/mm ²	bar	×	98,067
bar	kgf/cm ²	×	1,02	kgf/cm ²	bar	÷	1,02
bar	atm	÷	1,013	atm	bar	×	1,013
bar	lbf/in ²	×	14,504	lbf/in ²	bar	÷	14,504
bar	mca	×	10,206	mca	bar	÷	10,206
kgf/mm ²	kgf/cm ²	×	100	kgf/cm ²	kgf/mm ²	÷	100
kgf/mm ²	kgf/m ²	×	1000000	kgf/m ²	kgf/mm ²	÷	1000000
kgf/mm ²	atm	×	96,784	atm	kgf/mm ²	÷	96,784
kgf/mm ²	mca	×	1000,9	mca	kgf/mm ²	÷	1000,9
kgf/cm ²	atm	÷	1,033	atm	kgf/cm ²	×	1,033
kgf/cm ²	lbf/in ²	×	14,223	lbf/in ²	kgf/cm ²	÷	14,223
kgf/cm ²	mca	×	10,009	mca	kgf/cm ²	÷	10,009
kgf/cm ²	mmHg	×	735,559	mmHg	kgf/cm ²	÷	735,559
atm	lbf/in ²	×	14,696	lbf/in ²	atm	÷	14,696
atm	mca	×	10,341	mca	atm	÷	10,341
lbf/in ²	mca	÷	1,421	mca	lbf/in ²	×	1,421
lbf/ft ²	mca	÷	204,633	mca	lbf/ft ²	×	204,633

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o Pa (Pascal)

11- Unidades de Potência

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
W	kW	÷	1000	kW	W	×	1000
W	HP	÷	745,434	HP	W	×	745,434
W	CV	÷	735,51	CV	W	×	735,51
W	cal/s	÷	4,186	cal/s	W	×	4,186
kW	HP	×	1,342	HP	kW	÷	1,342
kW	CV	×	1,36	CV	kW	÷	1,36
HP	CV	×	1,014	CV	HP	÷	1,014
HP	cal/s	×	178,01	cal/s	HP	÷	178,01
CV	cal/s	×	175,588	cal/s	CV	÷	175,588

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o W (Watt)

12- Unidades de Massa Específica e Concentração

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
kg/m ³	g/cm ³	÷	1000	g/cm ³	kg/m ³	×	1000
kg/m ³	mg/l	×	1000	mg/l	kg/m ³	÷	1000
kg/m ³	kg/cm ³	÷	1000000	kg/cm ³	kg/m ³	×	1000000
kg/m ³	lb/in ³	÷	27679,9	lb/in ³	kg/m ³	×	27679,9
kg/cm ³	lb/in ³	×	36,127	lb/in ³	kg/cm ³	÷	36,127
kg/cm ³	lb/ft ³	×	62427,96	lb/ft ³	kg/cm ³	÷	62427,96
kg/cm ³	lb/USgal	×	8345,4	lb/USgal	kg/cm ³	÷	8345,4

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o kg/m³ (quilograma por metro cúbico)

13- Unidades de Vazão Volumétrica

Para Converter	em	÷ ou ×	Por	Para Converter	em	÷ ou ×	Por
m ³ /s	m ³ /h	×	3600	m ³ /h	m ³ /s	÷	3600
m ³ /s	l/min	x	60000	l/min	m ³ /s	÷	60000
m ³ /s	l/h	x	3600000	l/h	m ³ /s	÷	3600000
m ³ /s	cm ³ /s	x	1000000	cm ³ /s	m ³ /s	÷	1000000
m ³ /s	in ³ /s	x	61023,744	in ³ /s	m ³ /s	÷	61023,744
m ³ /s	ft ³ /s	x	35,315	ft ³ /s	m ³ /s	÷	35,315
m ³ /h	l/s	÷	3,6	l/s	m ³ /h	×	3,6

No Sistema Internacional (S.I.) utiliza-se o m³/s (metro cúbico por segundo).

Apêndice D

Tabelas de Valores Obtidos Experimentalmente e Calculados Numericamente

Tabela D1 - CURVA DA BOMBA 1500 RPM - Fase 1

Medidas	Registro	Vazão	Incerteza da Vazão	Altura Manométrica			Incerteza da Altura Manométrica			NPSH disponível	Incerteza NPSH disponível	NPSH* disponível	Incerteza NPSH* disponível
				Calculada	Lida	Útil	Calculada	Lida	Útil				
		m³/h	m³/h	m	m	m	m	m	m		m		
1	Fechado	0,00000	0,00000	16,06353	16,06353	16,06353	0,36612	0,36612	0,36612	7,43470	0,04261	0,90935	0,00645
2	1	1,75700	0,00211	16,13205	16,13390	16,14633	0,36428	0,36428	0,36428	7,28409	0,04412	0,89093	0,00656
3	1,5	3,46600	0,00416	16,08558	16,09369	16,14113	0,36258	0,36255	0,36258	7,25453	0,04443	0,88732	0,00658
4	2	5,55400	0,00666	16,11155	16,13390	16,25419	0,36328	0,36308	0,36326	7,23579	0,04464	0,88503	0,00660
5	2,5	8,38100	0,01006	15,75850	15,81222	16,08332	0,35536	0,35429	0,35524	7,20866	0,04496	0,88171	0,00662
6	3	10,90100	0,01308	15,13540	15,22919	15,68491	0,34121	0,33799	0,34085	7,14217	0,04572	0,87357	0,00668
7	3,5	13,06700	0,01568	14,24725	14,38480	15,03683	0,32361	0,31659	0,32282	7,13636	0,04585	0,87286	0,00669
8	4	15,96000	0,01915	13,10960	13,31926	14,28750	0,30245	0,28546	0,30057	6,95236	0,04801	0,85036	0,00687
9	4,5	17,47800	0,02097	12,16074	12,41456	13,57336	0,28678	0,26056	0,28393	6,85612	0,04920	0,83859	0,00697
10	5	18,52900	0,02223	11,40383	11,69079	12,99146	0,27677	0,24183	0,27303	6,82919	0,04958	0,83529	0,00700
11	5,5	19,46700	0,02336	10,86986	11,18818	12,62229	0,27192	0,22776	0,26728	6,76187	0,05044	0,82706	0,00708
12	6	20,17700	0,02421	10,39265	10,73583	12,27524	0,26808	0,21542	0,26263	6,71402	0,05107	0,82121	0,00713
13	Aberto	23,78600	0,02854	7,78844	8,27302	10,40474	0,26743	0,14970	0,25677	6,47647	0,05431	0,79215	0,00743

Tabela D2 - CURVA DA BOMBA 1800 RPM - Fase 1													
Medidas	Registro	Vazão	Incerteza da Vazão	Altura Manométrica			Incerteza da Altura Manométrica			NPSH disponível	Incerteza NPSH disponível	NPSH* disponível	Incerteza NPSH* disponível
				Calculada	Lida	Util	Calculada	Lida	Util				
		m³/h	m³/h	m	m	m	m	m	m	m	m		
1	Fechado	0,00000	0,00000	22,71813	22,71813	22,71813	0,53095	0,53095	0,53095	7,33418	0,04360	0,89706	0,00652
2	1	1,89000	0,00227	22,81649	22,81866	22,83301	0,53104	0,53104	0,53104	7,23386	0,04464	0,88479	0,00660
3	1,5	4,10500	0,00493	22,80697	22,81866	22,88490	0,53108	0,53104	0,53107	7,23477	0,04464	0,88490	0,00660
4	2	6,67000	0,00800	22,65996	22,69300	22,86569	0,52817	0,52788	0,52814	7,23682	0,04464	0,88515	0,00660
5	2,5	10,15500	0,01219	22,33584	22,41657	22,81272	0,52008	0,51849	0,51990	7,14090	0,04572	0,87342	0,00668
6	3	13,38500	0,01606	21,36715	21,51186	22,19563	0,49832	0,49333	0,49776	7,04658	0,04684	0,86188	0,00677
7	3,5	16,53250	0,01984	19,75309	19,97889	21,01701	0,46495	0,45241	0,46354	6,95392	0,04802	0,85055	0,00687
8	4	19,43500	0,02332	18,22922	18,54644	19,97590	0,43751	0,41169	0,43465	6,76176	0,05044	0,82705	0,00708
9	4,5	21,15250	0,02538	17,51413	17,89304	19,58316	0,43028	0,39294	0,42621	6,66724	0,05171	0,81548	0,00719
10	5	22,54250	0,02705	16,55533	16,98834	18,90522	0,41834	0,36793	0,41292	6,57198	0,05300	0,80383	0,00730
11	5,5	23,75750	0,02851	15,85158	16,33494	18,46161	0,41335	0,34926	0,40657	6,47636	0,05431	0,79214	0,00742
12	6	24,75750	0,02971	15,15459	15,68154	17,98896	0,40858	0,33063	0,40047	6,38008	0,05563	0,78036	0,00755
13	Aberto	28,92500	0,03471	11,98645	12,71612	15,85538	0,41211	0,25022	0,39701	6,09826	0,05984	0,74589	0,00796

Tabela D3 - CURVA DA BOMBA 1980 RPM - Fase 1													
Medidas	Registro	Vazão	Incerteza da Vazão	Altura Manométrica			Incerteza da Altura Manométrica			NPSH disponível	Incerteza NPSH disponível	NPSH* disponível	Incerteza NPSH* disponível
				Calculada	Lida	Util	Calculada	Lida	Util				
		m³/h	m³/h	m	m	m	m	m	m	m	m		
1	Fechado	0,00000	0,00000	27,14113	27,14113	27,14113	0,64466	0,64466	0,64466	7,43470	0,04261	0,90935	0,00645
2	1	2,10400	0,00252	27,32939	27,33213	27,34986	0,64480	0,64479	0,64480	7,24396	0,04453	0,88602	0,00659
3	1,5	4,46300	0,00536	27,32819	27,34218	27,42030	0,64485	0,64480	0,64484	7,23499	0,04464	0,88493	0,00660
4	2	7,14250	0,00857	27,00238	27,04061	27,23829	0,63753	0,63721	0,63750	7,23732	0,04464	0,88521	0,00660
5	2,5	10,79250	0,01295	26,29538	26,38721	26,83401	0,62002	0,61833	0,61983	7,14198	0,04572	0,87355	0,00668
6	3	14,12000	0,01694	24,93351	25,09550	25,85548	0,58887	0,58365	0,58828	7,05831	0,04674	0,86332	0,00676
7	3,5	17,12550	0,02055	23,12836	23,37153	24,48458	0,54981	0,53764	0,54844	6,95561	0,04804	0,85076	0,00687
8	4	20,62150	0,02475	20,89629	21,25553	22,86275	0,50734	0,47919	0,50422	6,74574	0,05072	0,82509	0,00710
13	Aberto	30,25700	0,03631	11,63802	12,43969	15,87148	0,43072	0,23912	0,41339	5,90423	0,06263	0,72216	0,00824

Tabela D4 - CURVA DA BOMBA 1100RPM - Fase 2

Tabela D4 - CURVA DA BOMBA 1100RPM - Fase 2											
Medidas	Registro	Q	δ(Q)	Altura		δ(Altura)		NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})	NPSH* _{DISP}	δ(NPSH* _{DISP})
		m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m		
				m	m	m	m				
1	Fechado	0,00000	0,00000	8,50425	8,50425	0,17169	0,17169	8,04978	0,03805	0,99829	0,00642
2	1	1,57500	0,00189	8,60973	8,61773	0,17170	0,17170	7,94465	0,03810	0,98525	0,00639
3	1.1/4	2,13500	0,00256	8,44198	8,45669	0,16749	0,16750	7,94494	0,03810	0,98529	0,00639
4	1.1/2	2,76333	0,00332	8,10650	8,13114	0,15908	0,15911	7,94537	0,03810	0,98534	0,00639
5	1.3/4	3,42833	0,00411	8,02703	8,06495	0,15698	0,15704	7,94155	0,03810	0,98487	0,00639
6	2	4,32000	0,00518	7,98711	8,04732	0,15488	0,15503	7,89857	0,03813	0,97954	0,00638
7	2.1/4	5,34000	0,00641	7,98711	8,07912	0,15488	0,15523	7,89994	0,03813	0,97971	0,00638
8	2.1/2	6,34333	0,00761	7,99150	8,12134	0,15488	0,15557	7,89719	0,03813	0,97937	0,00638
9	2.3/4	7,48500	0,00898	7,93400	8,11477	0,15279	0,15414	7,87302	0,03815	0,97637	0,00637
10	3	8,51000	0,01021	7,93400	8,16767	0,15279	0,15503	7,87531	0,03815	0,97666	0,00637
11	3,5	10,15500	0,01219	7,54102	7,87376	0,14229	0,14713	7,85323	0,03817	0,97392	0,00636
12	4	11,48500	0,01378	7,19538	7,62098	0,13232	0,14073	7,80451	0,03821	0,96788	0,00635
13	Aberto	18,61500	0,02234	3,08226	4,20034	0,02581	0,12846	7,54443	0,03851	0,93562	0,00629

Tabela D5 - CURVA DA BOMBA 1300RPM - Fase 2

Tabela D5 - CURVA DA BOMBA 1300RPM - Fase 2											
Medidas	Registro	Q	δ(Q)	Altura		δ(Altura)		NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})	NPSH [*] _{DISP}	δ(NPSH [*] _{DISP})
		m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m		
				m	m	m	m				
1	Fechado	0,00000	0,00000	12,03135	12,03135	0,26017	0,26017	8,04522	0,03805	0,99773	0,00642
2	1	1,71500	0,00206	11,88522	11,89471	0,25385	0,25385	7,94015	0,03810	0,98470	0,00639
3	1.1/4	3,21833	0,00386	11,64663	11,68005	0,24753	0,24756	7,92817	0,03811	0,98321	0,00639
4	1.1/2	5,13000	0,00616	11,43018	11,51509	0,24121	0,24140	7,89524	0,03813	0,97913	0,00638
5	1.3/4	7,57833	0,00909	11,20494	11,39024	0,23489	0,23581	7,87322	0,03815	0,97640	0,00637
6	2	10,01500	0,01202	11,00184	11,32547	0,22857	0,23145	7,83069	0,03818	0,97112	0,00636
7	2.1/4	12,05500	0,01447	10,54257	11,01147	0,21593	0,22229	7,79303	0,03822	0,96645	0,00635
8	2.1/2	13,59667	0,01632	10,06571	10,66222	0,20330	0,21410	7,77219	0,03825	0,96387	0,00634
9	2.3/4	14,80000	0,01776	9,60644	10,31320	0,19067	0,20660	7,73301	0,03829	0,95901	0,00633
10	3	15,89000	0,01907	9,14717	9,96187	0,17805	0,20027	7,69374	0,03834	0,95414	0,00632
11	3,5	18,10000	0,02172	8,06545	9,12252	0,14863	0,19038	7,61177	0,03845	0,94397	0,00630
12	4	18,69333	0,02243	7,45484	8,58235	0,13237	0,18337	7,57543	0,03849	0,93947	0,00629
13	Aberto	21,77833	0,02613	4,67824	6,20861	0,05718	0,18149	7,32918	0,03880	0,90893	0,00624

Tabela D6 - CURVA DA BOMBA 1500RPM - Fase 2											
Medidas	Registro	Q	δ(Q)	Altura		δ(Altura)		NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})	NPSH [*] _{DISP}	δ(NPSH [*] _{DISP})
		m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m		
				m	m	m	m				
1	Fechado	0,00000	0,00000	15,78827	15,78827	0,35509	0,35509	8,06246	0,03804	0,99987	0,00643
2	1	1,87833	0,00225	15,66850	15,67989	0,34876	0,34877	7,93111	0,03811	0,98358	0,00639
3	1.1/4	3,61500	0,00434	15,35060	15,39277	0,34033	0,34036	7,91486	0,03812	0,98156	0,00638
4	1.1/2	5,91167	0,00709	15,20923	15,32199	0,33611	0,33635	7,89155	0,03813	0,97867	0,00637
5	1.3/4	8,75667	0,01051	15,00157	15,24898	0,32978	0,33096	7,85343	0,03816	0,97394	0,00636
6	2	11,50833	0,01381	14,55109	14,97842	0,31713	0,32076	7,80848	0,03820	0,96837	0,00635
7	2.1/4	14,66333	0,01760	13,54867	14,24244	0,28972	0,30005	7,73212	0,03829	0,95890	0,00633
8	2.1/2	16,57500	0,01989	12,72279	13,60924	0,26653	0,28459	7,64377	0,03839	0,94794	0,00631
9	2.3/4	18,02500	0,02163	11,96320	13,01152	0,24546	0,27234	7,57167	0,03847	0,93900	0,00629
10	3	19,24500	0,02309	11,20360	12,39864	0,22440	0,26162	7,49891	0,03856	0,92998	0,00627
11	3,5	20,67167	0,02481	10,20119	11,57998	0,19703	0,25081	7,41897	0,03868	0,92006	0,00626
12	4	21,46333	0,02576	9,75071	11,23713	0,18441	0,24899	7,37089	0,03875	0,91410	0,00625
13	Aberto	24,96167	0,02995	6,36605	8,37650	0,09331	0,24476	7,12989	0,03917	0,88421	0,00621

Tabela D7 - CURVA DA BOMBA 1600RPM - Fase 2											
Medidas	Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$	NPSH [*] _{DISP}	$\delta(NPSH^{*}_{DISP})$
		m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m		
				m	m	m	m				
1	Fechado	0,00000	0,00000	17,77478	17,77478	0,40573	0,40573	8,08883	0,03803	1,00314	0,00644
2	1	1,85500	0,00223	17,93299	17,94410	0,40574	0,40574	7,93110	0,03811	0,98357	0,00639
3	1.1/4	3,80750	0,00457	17,96621	18,01298	0,40574	0,40577	7,89943	0,03812	0,97965	0,00638
4	1.1/2	6,25000	0,00750	17,73412	17,86016	0,39941	0,39966	7,88333	0,03814	0,97765	0,00637
5	1.3/4	9,20000	0,01104	17,15784	17,43094	0,38359	0,38482	7,83696	0,03817	0,97190	0,00636
6	2	12,28250	0,01474	16,33678	16,82355	0,36143	0,36556	7,78663	0,03823	0,96566	0,00634
7	2.1/4	15,74000	0,01889	15,10430	15,90368	0,32663	0,33880	7,64879	0,03836	0,94856	0,00631
8	2.1/2	17,74500	0,02129	14,09756	15,11357	0,29817	0,31935	7,53266	0,03849	0,93416	0,00628
9	2.3/4	19,33500	0,02320	13,18341	14,38965	0,27288	0,30478	7,44861	0,03860	0,92374	0,00626
10	3	20,67750	0,02481	12,52087	13,90044	0,25391	0,29763	7,36382	0,03872	0,91322	0,00624
11	3,5	21,87750	0,02625	11,85149	13,39583	0,23496	0,29226	7,28550	0,03884	0,90351	0,00623
12	4	22,73500	0,02728	11,14939	12,81717	0,21601	0,28617	7,23811	0,03893	0,89763	0,00622
13	Aberto	25,87500	0,03105	8,18221	10,34248	0,13409	0,27767	6,95568	0,03939	0,86261	0,00617

Tabela D8 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 2											
Medidas	Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$	NPSH [*] _{DISP}	$\delta(NPSH^*_{DISP})$
		m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m		
				m	m	m	m				
1	Fechado	0,00000	0,00000	22,27055	22,27055	0,51971	0,51971	8,12204	0,03801	1,00725	0,00645
2	1	1,96000	0,00235	22,33617	22,34857	0,51655	0,51655	7,93115	0,03811	0,98358	0,00639
3	1.1/4	4,22750	0,00507	22,23674	22,29440	0,51338	0,51342	7,90674	0,03812	0,98055	0,00638
4	1.1/2	6,91500	0,00830	22,01150	22,16579	0,50705	0,50735	7,88456	0,03814	0,97780	0,00637
5	1.3/4	10,36500	0,01244	21,43521	21,78186	0,49122	0,49277	7,84015	0,03818	0,97229	0,00636
6	2	13,66500	0,01640	20,28264	20,88515	0,45957	0,46454	7,74575	0,03827	0,96059	0,00633
7	2.1/4	16,21250	0,01946	18,83175	19,67985	0,41842	0,42917	7,57179	0,03842	0,93901	0,00629
8	2.1/2	19,83750	0,02381	17,59293	18,86269	0,38361	0,40937	7,44502	0,03863	0,92329	0,00626
9	2.3/4	21,72000	0,02606	16,35410	17,87629	0,34881	0,38862	7,31091	0,03881	0,90666	0,00623
10	3	22,94750	0,02754	15,45314	17,15223	0,32351	0,37581	7,21309	0,03896	0,89453	0,00621
11	3,5	24,35500	0,02923	14,53899	16,45291	0,29821	0,36788	7,13010	0,03912	0,88424	0,00620
12	4	25,09000	0,03011	13,61166	15,64284	0,27292	0,35602	7,05607	0,03924	0,87506	0,00619
13	Aberto	29,04500	0,03485	9,71764	12,43965	0,16563	0,34827	6,70262	0,03995	0,83122	0,00614

Tabela D9 - CURVA DA BOMBA 1900RPM - Fase 2											
Medidas	Registro	Q	δ(Q)	Altura		δ(Altura)		NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})	NPSH* _{DISP}	δ(NPSH* _{DISP})
		m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m		
				m	m	m	m				
1	Fechado	0,00000	0,00000	24,57215	24,57215	0,57671	0,57671	8,08494	0,03803	1,00265	0,00644
2	1	2,08833	0,00251	24,62891	24,64299	0,57460	0,57460	7,94491	0,03810	0,98529	0,00639
3	1.1/4	4,51333	0,00542	24,57141	24,63714	0,57249	0,57254	7,92078	0,03811	0,98229	0,00638
4	1.1/2	7,25167	0,00870	24,34617	24,51585	0,56616	0,56648	7,89891	0,03813	0,97958	0,00638
5	1.3/4	10,91333	0,01310	23,41884	23,80313	0,54083	0,54256	7,82909	0,03819	0,97092	0,00636
6	2	14,50333	0,01740	22,18239	22,86110	0,50706	0,51278	7,73636	0,03829	0,95942	0,00633
7	2.1/4	18,58500	0,02230	20,38926	21,50374	0,45641	0,47334	7,53548	0,03852	0,93451	0,00628
8	2.1/2	21,05667	0,02527	19,04660	20,47723	0,41844	0,44835	7,38217	0,03873	0,91550	0,00625
9	2.3/4	23,02667	0,02763	17,67757	19,38841	0,38047	0,42642	7,25366	0,03893	0,89956	0,00622
10	3	24,54833	0,02946	16,55593	18,50036	0,34883	0,41180	7,12736	0,03914	0,88390	0,00620
11	3,5	25,82500	0,03099	15,39879	17,55072	0,31720	0,39910	7,03543	0,03932	0,87250	0,00619
12	4	26,79167	0,03215	14,63920	16,95524	0,29613	0,39451	6,96343	0,03947	0,86357	0,00618
13	Aberto	30,96333	0,03716	9,87485	12,96830	0,16567	0,38558	6,56149	0,04034	0,81372	0,00614

Tabela D10 - CURVA DA BOMBA 1980RPM - Fase 2											
Medidas	Registro	Q	δ(Q)	Altura		δ(Altura)		NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})	NPSH [*] _{DISP}	δ(NPSH [*] _{DISP})
		m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m		
				m	m	m	m				
1	Fechado	0,00000	0,00000	26,82007	26,82007	0,63371	0,63371	8,10151	0,03802	1,00471	0,00644
2	1,0	2,03000	0,00244	27,01733	27,03063	0,63371	0,63372	7,90482	0,03812	0,98032	0,00638
3	1.1/4	4,60000	0,00552	26,91790	26,98617	0,63055	0,63060	7,88083	0,03814	0,97734	0,00637
4	1.1/2	7,43250	0,00892	26,56685	26,74510	0,62105	0,62137	7,85922	0,03815	0,97466	0,00636
5	1.3/4	11,06500	0,01328	25,51371	25,90876	0,59255	0,59422	7,78950	0,03821	0,96601	0,00634
6	2,0	15,18000	0,01822	23,90432	24,64783	0,54823	0,55458	7,65271	0,03835	0,94905	0,00631
7	2.1/4	18,87000	0,02264	22,22819	23,37712	0,50074	0,51717	7,45931	0,03858	0,92507	0,00626
8	2.1/2	21,26000	0,02551	20,64517	22,10356	0,45643	0,48505	7,29446	0,03880	0,90462	0,00623
9	2.3/4	23,19000	0,02783	19,28688	21,02207	0,41845	0,46178	7,15508	0,03902	0,88734	0,00620
10	3,0	24,82750	0,02979	18,04171	20,03061	0,38365	0,44418	7,02737	0,03924	0,87150	0,00618
11	3,5	26,12750	0,03135	17,01494	19,21758	0,35518	0,43314	6,93114	0,03944	0,85956	0,00617
12	4,0	26,99000	0,03239	15,98133	18,33179	0,32672	0,42039	6,83891	0,03960	0,84813	0,00615
13	Aberto	31,17500	0,03741	11,37153	14,50742	0,20037	0,40586	6,45050	0,04049	0,79996	0,00612

Tabela D11 - CURVA BOMBA 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 4 voltas

Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,72727	22,72727	0,53117	0,53117	7,31880	0,04386
1,00	1,92500	0,00231	22,57417	22,59131	0,52493	0,52493	7,21845	0,04489
1,50	3,93000	0,00472	22,56579	22,63721	0,52497	0,52496	7,21925	0,04489
2,00	6,58250	0,00790	22,54430	22,74467	0,52521	0,52518	7,22132	0,04489
2,50	10,05000	0,01206	22,09521	22,56227	0,51392	0,51375	7,12528	0,04597
3,00	13,21000	0,01585	21,12836	21,93531	0,49201	0,49147	7,03070	0,04709
3,50	15,93250	0,01912	19,75288	20,92673	0,46046	0,45924	6,83618	0,04940
4,00	19,38250	0,02326	18,18819	19,92545	0,43175	0,42889	6,54484	0,05310
4,50	21,26000	0,02551	17,08988	19,18000	0,41717	0,41287	6,45085	0,05441
5,00	22,66500	0,02720	16,30581	18,68131	0,40893	0,40326	6,30535	0,05637
5,50	23,84750	0,02862	15,30121	17,93105	0,39896	0,39182	6,25986	0,05708
6,00	24,68750	0,02963	14,71148	17,52985	0,39336	0,38503	6,06230	0,05974
Aberto	28,69750	0,03444	11,37499	15,18330	0,39272	0,37736	5,57838	0,06678

Tabela D12 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 6 voltas

Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,62671	22,62671	0,53108	0,53108	7,41937	0,04288
1,00	1,83750	0,00221	22,57439	22,59001	0,52493	0,52493	7,21843	0,04489
1,50	3,96500	0,00476	22,56559	22,63829	0,52497	0,52496	7,21927	0,04489
2,00	6,61750	0,00794	22,64450	22,84700	0,52531	0,52527	7,12079	0,04596
2,50	10,15250	0,01218	22,19406	22,67070	0,51408	0,51390	7,02488	0,04706
3,00	13,35000	0,01602	21,22575	22,04990	0,49232	0,49176	6,93044	0,04821
3,50	15,89750	0,01908	20,10582	21,27451	0,46666	0,46547	6,73553	0,05058
4,00	19,45250	0,02334	18,13552	19,88534	0,42653	0,42359	6,34395	0,05561
4,50	21,26000	0,02551	17,26587	19,35598	0,41484	0,41052	6,14916	0,05826
5,00	22,64750	0,02718	16,30651	18,67835	0,40379	0,39807	6,05388	0,05964
5,50	23,70250	0,02844	15,70965	18,30761	0,39825	0,39128	5,85701	0,06236
6,00	24,58250	0,02950	15,01782	17,81227	0,39277	0,38457	5,76016	0,06377
Aberto	28,50500	0,03421	11,41016	15,16755	0,38500	0,36974	5,17515	0,07239

Tabela D13 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 8 voltas

Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,62671	22,62671	0,53108	0,53108	7,41937	0,04288
1,00	1,90750	0,00229	22,57422	22,59104	0,52493	0,52493	7,21845	0,04489
1,50	3,96500	0,00476	22,56559	22,63829	0,52497	0,52496	7,21927	0,04489
2,00	6,72250	0,00807	22,64339	22,85237	0,52532	0,52529	7,12090	0,04596
2,50	10,19000	0,01223	22,04258	22,52275	0,50791	0,50773	6,92438	0,04819
3,00	13,33500	0,01600	21,17581	21,99811	0,48629	0,48572	6,72928	0,05055
3,50	15,88000	0,01906	20,05602	21,22214	0,46072	0,45952	6,53435	0,05301
4,00	19,43500	0,02332	18,18640	19,93308	0,42107	0,41811	6,04220	0,05952
4,50	21,20500	0,02545	17,16738	19,24669	0,40393	0,39954	5,74670	0,06362
5,00	22,42000	0,02690	16,31567	18,64009	0,39203	0,38636	5,55017	0,06643
5,50	23,68500	0,02842	15,71039	18,30451	0,38889	0,38176	5,35412	0,06928
6,00	24,49500	0,02939	15,02168	17,79627	0,38308	0,37480	5,25697	0,07074
Aberto	28,28750	0,03395	11,77337	15,47364	0,37938	0,36435	4,57067	0,08107

Tabela D14 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 10 voltas

Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,62671	22,62671	0,53108	0,53108	7,41937	0,04288
1,00	1,89000	0,00227	22,57426	22,59078	0,52493	0,52493	7,21844	0,04489
1,50	4,05250	0,00486	22,56506	22,64101	0,52497	0,52497	7,21932	0,04489
2,00	6,68750	0,00803	22,44263	22,64944	0,51905	0,51902	7,07058	0,04650
2,50	10,20750	0,01225	21,99200	22,47382	0,50186	0,50167	6,72328	0,05052
3,00	13,26250	0,01592	21,22774	22,04112	0,48033	0,47977	6,42743	0,05423
3,50	15,88000	0,01906	20,00574	21,17186	0,44914	0,44790	6,08182	0,05878
4,00	19,20750	0,02305	18,42041	20,12644	0,41231	0,40942	5,43807	0,06773
4,50	20,78250	0,02494	17,38425	19,38153	0,39137	0,38719	5,04123	0,07346
5,00	22,21000	0,02665	16,62572	18,90681	0,38158	0,37598	4,74485	0,07786
5,50	23,24250	0,02789	16,03069	18,52879	0,37636	0,36953	4,54781	0,08084
6,00	24,05750	0,02887	15,54359	18,21995	0,37129	0,36334	4,24948	0,08532
Aberto	27,55000	0,03306	12,53988	16,04972	0,36290	0,34877	3,20942	0,10136

Tabela D15 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 11 voltas

Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,62671	22,62671	0,53108	0,53108	7,41937	0,04288
1,00	1,91625	0,00230	22,57420	22,59118	0,52493	0,52493	7,21845	0,04489
1,50	4,14000	0,00497	22,63995	22,71921	0,52504	0,52504	7,14395	0,04568
2,00	6,80125	0,00816	22,54198	22,75589	0,51917	0,51914	6,97013	0,04761
2,50	10,35625	0,01243	22,16545	22,66141	0,50218	0,50198	6,54754	0,05265
3,00	13,52750	0,01623	21,27197	22,11818	0,47497	0,47435	6,12633	0,05810
3,50	16,02000	0,01922	20,14014	21,32692	0,44272	0,44142	5,62966	0,06488
4,00	19,35625	0,02323	18,39022	20,12277	0,40008	0,39701	4,83518	0,07633
4,50	20,99250	0,02519	17,52731	19,56516	0,38368	0,37924	4,38833	0,08299
5,00	22,26250	0,02672	16,87505	19,16693	0,37394	0,36817	3,99083	0,08901
5,50	23,26875	0,02792	16,24329	18,74703	0,36603	0,35898	3,64284	0,09433
6,00	24,05750	0,02887	15,61901	18,29537	0,36018	0,35197	3,41983	0,09778
Aberto	27,26125	0,03271	12,78052	16,21717	0,35394	0,34005	2,35324	0,11449

Tabela D16 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 12 voltas

Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,62671	22,62671	0,53108	0,53108	7,41937	0,04288
1,00	1,95125	0,00234	22,57410	22,59171	0,52493	0,52493	7,21846	0,04489
1,50	4,10500	0,00493	22,53960	22,61753	0,52190	0,52190	7,11879	0,04595
2,00	6,78375	0,00814	22,60502	22,81783	0,51772	0,51769	6,84441	0,04904
2,50	10,33875	0,01241	22,14061	22,63490	0,49619	0,49599	6,32125	0,05548
3,00	13,36750	0,01604	21,22536	22,05167	0,46306	0,46246	5,67344	0,06416
3,50	15,78375	0,01894	20,31006	21,46210	0,43271	0,43145	5,02565	0,07337
4,00	19,03000	0,02284	18,65265	20,32729	0,38661	0,38364	3,95418	0,08931
4,50	20,46750	0,02456	17,94886	19,88606	0,36990	0,36573	3,35568	0,09846
5,00	21,65875	0,02599	17,27579	19,44504	0,35763	0,35222	2,85720	0,10618
5,50	22,56875	0,02708	16,67424	19,02961	0,34928	0,34274	2,48358	0,11201
6,00	23,31250	0,02798	16,32946	18,84263	0,34623	0,33871	2,10943	0,11788
Aberto	25,65875	0,03079	13,34751	16,39200	0,32499	0,31314	1,03844	0,13484

Tabela D17 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 12,5 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,62671	22,62671	0,53108	0,53108	7,41937	0,04288
1,00	1,97750	0,00237	22,57404	22,59212	0,52493	0,52493	7,21846	0,04489
1,50	4,07000	0,00488	22,41411	22,49071	0,51874	0,51874	7,11877	0,04595
2,00	6,72000	0,00806	22,54285	22,75168	0,51312	0,51309	6,71864	0,05051
2,50	10,27750	0,01233	22,09137	22,57982	0,49016	0,48996	6,12002	0,05807
3,00	13,28000	0,01594	21,32790	22,14343	0,45742	0,45683	5,32128	0,06905
3,50	15,65250	0,01878	20,31363	21,44658	0,42150	0,42025	4,52249	0,08067
4,00	18,67250	0,02241	18,91591	20,52823	0,37846	0,37564	3,32451	0,09881
4,50	20,04750	0,02406	18,06448	19,92299	0,35662	0,35265	2,62513	0,10963
5,00	21,22000	0,02546	17,61935	19,70161	0,34779	0,34266	2,02592	0,11901
5,50	22,01750	0,02642	17,03557	19,27728	0,33797	0,33185	1,57637	0,12608
6,00	22,59500	0,02711	16,45948	18,82033	0,33129	0,32435	1,37748	0,12924
Aberto	23,56000	0,02827	12,32168	14,88849	0,28016	0,27040	0,82826	0,13795

Tabela D18 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 13 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,62671	22,62671	0,53108	0,53108	7,41937	0,04288
1,00	1,94250	0,00233	22,44842	22,46587	0,52177	0,52177	7,21846	0,04489
1,50	4,07000	0,00488	22,45182	22,52843	0,51726	0,51726	7,01821	0,04705
2,00	6,74875	0,00810	22,58026	22,79087	0,51167	0,51163	6,61811	0,05172
2,50	10,14625	0,01218	22,24444	22,72050	0,48447	0,48428	5,71755	0,06345
3,00	13,01750	0,01562	21,40920	22,19281	0,44597	0,44541	4,74247	0,07734
3,50	15,31125	0,01837	20,53646	21,62055	0,40938	0,40821	3,74224	0,09229
4,00	18,12125	0,02175	19,21026	20,72878	0,36105	0,35844	2,16631	0,11661
4,50	19,35625	0,02323	18,44050	20,17305	0,34187	0,33827	1,51660	0,12683
5,00	20,13500	0,02416	17,62141	19,49618	0,32400	0,31954	0,99128	0,13512
5,50	20,51125	0,02461	16,63995	18,58544	0,30616	0,30108	0,76633	0,13869
6,00	20,55500	0,02467	15,68301	17,63681	0,28926	0,28383	0,71620	0,13948
Aberto	20,68625	0,02482	11,58027	13,55909	0,23410	0,22718	0,41498	0,14424

Tabela D19 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 13,5 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,72727	22,72727	0,53117	0,53117	7,31880	0,04386
1,00	1,89000	0,00227	22,57426	22,59078	0,52493	0,52493	7,21844	0,04489
1,50	4,12250	0,00495	22,36351	22,44210	0,51263	0,51263	6,91767	0,04817
2,00	6,74000	0,00809	22,69348	22,90355	0,50733	0,50730	6,31641	0,05547
2,50	10,12000	0,01214	22,19460	22,66819	0,47280	0,47261	5,26497	0,06975
3,00	12,84250	0,01541	21,48846	22,25114	0,42957	0,42902	3,91245	0,08962
3,50	14,81250	0,01778	20,68767	21,70229	0,38978	0,38870	2,65993	0,10880
4,00	17,20250	0,02064	19,31405	20,68250	0,33865	0,33638	0,95679	0,13548
4,50	17,67500	0,02121	17,61523	19,05988	0,29983	0,29698	0,50566	0,14262
5,00	17,71000	0,02125	16,08056	17,53094	0,26969	0,26649	0,40520	0,14421
5,50	17,71000	0,02125	15,07493	16,52531	0,25199	0,24857	0,40520	0,14421
6,00	17,74500	0,02129	14,16877	15,62489	0,23692	0,23324	0,30474	0,14580
Aberto	17,88500	0,02146	10,61956	12,09874	0,19752	0,19295	0,20460	0,14739

Tabela D20 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 14 voltas

Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,62671	22,62671	0,53108	0,53108	7,41937	0,04288
1,00	1,90750	0,00229	22,57422	22,59104	0,52493	0,52493	7,21845	0,04489
1,50	4,01750	0,00482	22,48985	22,56449	0,51578	0,51578	6,91761	0,04817
2,00	6,69250	0,00803	22,66885	22,87597	0,50432	0,50428	6,21580	0,05676
2,50	9,96250	0,01196	22,29778	22,75675	0,46722	0,46704	4,91275	0,07478
3,00	12,63250	0,01516	21,49300	22,23094	0,41868	0,41815	3,40920	0,09722
3,50	14,55000	0,01746	20,79486	21,77383	0,38005	0,37902	2,05591	0,11815
4,00	16,51500	0,01982	18,52973	19,79098	0,31191	0,30982	0,50230	0,14261
4,50	16,60250	0,01992	16,59137	17,86602	0,27120	0,26875	0,30142	0,14579
5,00	16,64000	0,01997	15,20754	16,48796	0,24623	0,24350	0,30152	0,14579
5,50	16,71250	0,02006	14,19981	15,49140	0,22997	0,22699	0,30173	0,14579
6,00	16,71250	0,02006	13,06847	14,36007	0,21325	0,21003	0,30173	0,14579
Aberto	16,73000	0,02008	10,75501	12,04931	0,18922	0,18557	0,10065	0,14897

Tabela D21 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 1, Registro Fechado 14,5 voltas

Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,62671	22,62671	0,53108	0,53108	7,41937	0,04288
1,00	1,92500	0,00231	22,67474	22,69187	0,52502	0,52502	7,11789	0,04595
1,50	4,01750	0,00482	22,41443	22,48907	0,50666	0,50666	6,61592	0,05172
2,00	6,56500	0,00788	22,29307	22,49238	0,47726	0,47723	5,46145	0,06691
2,50	9,43250	0,01132	21,87887	22,29030	0,42451	0,42434	3,45376	0,09645
3,00	11,41500	0,01370	20,41149	21,01404	0,35358	0,35316	1,49611	0,12677
3,50	12,40500	0,01489	19,43628	20,14788	0,31238	0,31171	0,19071	0,14736
4,00	12,38750	0,01487	16,52031	17,22991	0,25027	0,24945	0,09011	0,14895
4,50	12,65000	0,01518	14,10123	14,84122	0,20677	0,20569	0,00991	0,15055
5,00	12,56750	0,01508	13,47447	14,20484	0,19681	0,19570	0,01008	0,15055
Aberto	12,19250	0,01463	10,33973	11,02716	0,16194	0,16075	0,01085	0,15055

Tabela D22 - CURVA BOMBA 1100RPM - Fase 2, Registro Fechado 11 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	8,45594	8,45594	0,17164	0,17164	8,07756	0,03779
1,00	1,43500	0,00172	8,55739	8,56403	0,17164	0,17164	7,97640	0,03781
1.1/4	2,06500	0,00248	8,30578	8,31954	0,16533	0,16534	7,97671	0,03781
1.1/2	2,70500	0,00325	8,07953	8,10314	0,15902	0,15904	7,95177	0,03781
1.3/4	3,33500	0,00400	7,82792	7,86381	0,15271	0,15276	7,95230	0,03781
2,00	4,10500	0,00493	7,90401	7,95838	0,15271	0,15284	7,87702	0,03783
2.1/4	5,09500	0,00611	7,95474	8,03849	0,15272	0,15301	7,82756	0,03784
2.1/2	6,14500	0,00737	8,03082	8,15266	0,15272	0,15333	7,75312	0,03785
2.3/4	7,13500	0,00856	8,10691	8,27117	0,15272	0,15384	7,67887	0,03787
3,00	8,11500	0,00974	7,94407	8,15655	0,14642	0,14836	7,59219	0,03789
3.1/4	8,92000	0,01070	7,76855	8,02528	0,14012	0,14307	7,51802	0,03791
3.1/2	9,66500	0,01160	7,60571	7,90711	0,13383	0,13806	7,43118	0,03793
3.3/4	10,29500	0,01235	7,61890	7,96087	0,13226	0,13775	7,35685	0,03796
4,00	10,85500	0,01303	7,39315	7,77335	0,12440	0,13155	7,26973	0,03798
4.1/4	11,34500	0,01361	7,14205	7,55734	0,11654	0,12557	7,20785	0,03800
4.1/2	11,76500	0,01412	6,89094	7,33755	0,10870	0,11976	7,14579	0,03802
4.3/4	12,19500	0,01463	6,62715	7,10701	0,10086	0,11441	7,09651	0,03804
5,00	12,54500	0,01505	6,69056	7,19836	0,10087	0,11593	7,03431	0,03806
5.1/4	12,89500	0,01547	6,43945	6,97598	0,09305	0,11093	6,97215	0,03808
5.1/2	13,17500	0,01581	6,17567	6,73575	0,08525	0,10602	6,92244	0,03810
5.3/4	13,45500	0,01615	6,22639	6,81053	0,08525	0,10766	6,87276	0,03812
6,00	13,73500	0,01648	5,93724	6,54594	0,07747	0,10342	6,84846	0,03813
6.1/4	13,94500	0,01673	5,98797	6,61543	0,07748	0,10484	6,79854	0,03815

Tabela D23 - CURVA DA BOMBA 1100RPM - Fase 2, Registro Fechado 12 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	8,45594	8,45594	0,17164	0,17164	8,07756	0,03779
1,00	1,43500	0,00172	8,55739	8,56403	0,17164	0,17164	7,97640	0,03781
1.1/4	2,06500	0,00248	8,58275	8,59651	0,17164	0,17165	7,95135	0,03781
1.1/2	2,70500	0,00325	8,35650	8,38011	0,16533	0,16535	7,92641	0,03782
1.3/4	3,33500	0,00400	8,13026	8,16614	0,15902	0,15907	7,90158	0,03782
2,00	4,10500	0,00493	7,95474	8,00911	0,15272	0,15284	7,82629	0,03784
2.1/4	5,09500	0,00611	8,01814	8,10190	0,15272	0,15301	7,76416	0,03785
2.1/2	6,14500	0,00737	8,11959	8,24143	0,15272	0,15334	7,66435	0,03787
2.3/4	7,13500	0,00856	7,98212	8,14638	0,14642	0,14759	7,55206	0,03790
3,00	7,97500	0,00957	7,84464	8,04985	0,14013	0,14202	7,43970	0,03793
3.1/4	8,74500	0,01049	7,97145	8,21821	0,14014	0,14286	7,31468	0,03796
3.1/2	9,52500	0,01143	7,75839	8,05113	0,13227	0,13631	7,21522	0,03799
3.3/4	10,08500	0,01210	7,54533	7,87350	0,12441	0,12978	7,11530	0,03802
4,00	10,64500	0,01277	7,33227	7,69789	0,11656	0,12361	7,01547	0,03805
4.1/4	11,13500	0,01336	7,11921	7,51927	0,10872	0,11768	6,91551	0,03808
4.1/2	11,48500	0,01378	6,88078	7,30639	0,10089	0,11168	6,84053	0,03811
4.3/4	11,91500	0,01430	6,64236	7,10043	0,09307	0,10640	6,76585	0,03814
5,00	12,26500	0,01472	6,73113	7,21651	0,09309	0,10793	6,67826	0,03817
5.1/4	12,54500	0,01505	6,48002	6,98782	0,08529	0,10267	6,61582	0,03819
5.1/2	12,82500	0,01539	6,22892	6,75963	0,07752	0,09786	6,55341	0,03822
5.3/4	13,10500	0,01573	6,30500	6,85915	0,07753	0,09951	6,47833	0,03825
6,00	13,31500	0,01598	6,05390	6,62594	0,06980	0,09496	6,41570	0,03827
6.1/4	13,52500	0,01623	5,77743	6,36766	0,06210	0,09094	6,37845	0,03829

Tabela D24 - CURVA DA BOMBA 1100RPM - Fase 2, Registro Fechado 13 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	8,45594	8,45594	0,17164	0,17164	8,06730	0,03777
1	1,43500	0,00172	8,53203	8,53867	0,17164	0,17164	7,99150	0,03778
1.1/4	2,06500	0,00248	8,57007	8,58383	0,17164	0,17165	7,95377	0,03779
1.1/2	2,77500	0,00333	8,60811	8,63296	0,17164	0,17167	7,91620	0,03779
1.3/4	3,47500	0,00417	8,67152	8,71049	0,17165	0,17170	7,85340	0,03781
2	4,31500	0,00518	8,52136	8,58144	0,16534	0,16548	7,75287	0,03783
2.1/4	5,30500	0,00637	8,64818	8,73898	0,16534	0,16566	7,62738	0,03785
2.1/2	6,21500	0,00746	8,28445	8,40908	0,15273	0,15338	7,48935	0,03788
2.3/4	7,13500	0,00856	8,19770	8,36196	0,14644	0,14760	7,32621	0,03792
3	7,90500	0,00949	8,12363	8,32526	0,14015	0,14197	7,15029	0,03797
3.1/4	8,60500	0,01033	7,70767	7,94658	0,13227	0,13497	7,25335	0,03795
3.1/2	9,23500	0,01108	7,81164	8,08682	0,12444	0,12823	6,83644	0,03807
3.3/4	9,80500	0,01177	7,33479	7,64499	0,10874	0,11421	6,68578	0,03812
4	10,22500	0,01227	7,44892	7,78627	0,10876	0,11519	6,57282	0,03816
4.1/4	10,64500	0,01277	7,27391	7,63953	0,10094	0,10901	6,43455	0,03821
4.1/2	10,99500	0,01319	7,08621	7,47627	0,09314	0,10297	6,30879	0,03826
4.3/4	11,34500	0,01361	6,87314	7,28844	0,08535	0,09732	6,20843	0,03830
5	11,64000	0,01397	6,66008	7,09726	0,07760	0,09188	6,10793	0,03834
5.1/4	11,98500	0,01438	6,76153	7,22501	0,07762	0,09352	6,00762	0,03839
5.1/2	12,16000	0,01459	6,54847	7,02558	0,06991	0,08815	5,90675	0,03843
5.3/4	12,40500	0,01489	6,31005	6,80657	0,06224	0,08364	5,83151	0,03847
6	12,61500	0,01514	6,36077	6,87425	0,06225	0,08494	5,78152	0,03849
6.1/4	12,77500	0,01533	6,12235	6,64894	0,05465	0,08062	5,70599	0,03853

Tabela D25 - CURVA DA BOMBA 1100RPM - Fase 2, Registro Fechado 14 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	8,45594	8,45594	0,17164	0,17164	8,06730	0,03777
1	1,43500	0,00172	8,55739	8,56403	0,17164	0,17164	7,96614	0,03779
1.1/4	1,99500	0,00239	8,59543	8,60828	0,17164	0,17165	7,92836	0,03779
1.1/2	2,70500	0,00325	8,41991	8,44352	0,16533	0,16536	7,85274	0,03781
1.3/4	3,33500	0,00400	7,99278	8,02867	0,15272	0,15277	7,77718	0,03782
2	4,10500	0,00493	7,90603	7,96040	0,14642	0,14655	7,61313	0,03785
2.1/4	4,95500	0,00595	8,09625	8,17547	0,14643	0,14670	7,42398	0,03790
2.1/2	5,93500	0,00712	8,09827	8,21192	0,14015	0,14073	7,17184	0,03796
2.3/4	6,70500	0,00805	8,06274	8,20780	0,13230	0,13330	6,89421	0,03804
3	7,48500	0,00898	7,68735	7,86812	0,11660	0,11836	6,64213	0,03813
3.1/4	8,04500	0,00965	7,60110	7,80993	0,10878	0,11129	6,41508	0,03821
3.1/2	8,60500	0,01033	7,54021	7,77913	0,10098	0,10450	6,16275	0,03830
3.3/4	8,95500	0,01075	7,41592	7,67467	0,09319	0,09764	5,97339	0,03838
4	9,30500	0,01117	6,96444	7,24381	0,07766	0,08379	5,79674	0,03846
4.1/4	9,66500	0,01160	7,14198	7,44338	0,07770	0,08478	5,62016	0,03854
4.1/2	9,94500	0,01193	6,66513	6,98425	0,06234	0,07194	5,46875	0,03861
4.3/4	10,22500	0,01227	6,79194	7,12929	0,06237	0,07302	5,34272	0,03867
5	10,43500	0,01252	6,59156	6,94291	0,05481	0,06759	5,22920	0,03873
5.1/4	10,64500	0,01277	6,41654	6,78217	0,04738	0,06275	5,09032	0,03880

Tabela D26 - CURVA BOMBA 1300RPM - Fase 2, Registro Fechado 11 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	11,97848	11,97848	0,26014	0,26014	8,06730	0,03777
1,00	1,57500	0,00189	11,82832	11,83633	0,25381	0,25381	7,96620	0,03779
1,50	3,12500	0,00375	11,35047	11,38198	0,24116	0,24119	7,94185	0,03779
2,00	4,81500	0,00578	11,46460	11,53940	0,24117	0,24131	7,82959	0,03781
2,50	7,24000	0,00869	11,39053	11,55966	0,23485	0,23562	7,65614	0,03785
3,00	9,56000	0,01147	11,14094	11,43583	0,22221	0,22468	7,40795	0,03791
3.1/4	10,43500	0,01252	11,01614	11,36748	0,21590	0,21949	7,28358	0,03795
3.1/2	11,41500	0,01370	10,63973	11,06017	0,20326	0,20870	7,15976	0,03799
3.3/4	12,19000	0,01463	10,51494	10,99440	0,19695	0,20421	7,03550	0,03803
4,00	12,79000	0,01535	10,35210	10,87992	0,19064	0,19968	6,94883	0,03806
4.1/4	13,31500	0,01598	10,18926	10,76130	0,18433	0,19525	6,86197	0,03809
4.1/2	13,87500	0,01665	9,80017	10,42134	0,17171	0,18540	6,74996	0,03814
4.3/4	14,30500	0,01717	9,63733	10,29760	0,16541	0,18133	6,66289	0,03817
5,00	14,72500	0,01767	9,47449	10,17410	0,15911	0,17752	6,57582	0,03821
5.1/4	15,14500	0,01817	9,29896	10,03906	0,15281	0,17404	6,50148	0,03824
5.1/2	15,53000	0,01864	9,12344	9,90164	0,14651	0,17070	6,42705	0,03827
5.3/4	16,87000	0,02024	8,25801	9,17630	0,11667	0,15586	6,10339	0,03843
6,00	17,11500	0,02054	7,99422	8,93937	0,10883	0,15218	6,05383	0,03845
6.1/4	17,29000	0,02075	7,75580	8,72038	0,10101	0,14829	5,97858	0,03849
6.1/2	17,49500	0,02099	7,80652	8,79411	0,10102	0,15020	5,92885	0,03852
6.3/4	17,67500	0,02121	7,54274	8,55075	0,09321	0,14683	5,87901	0,03854
7,00	17,85000	0,02142	7,56810	8,59617	0,09322	0,14859	5,85452	0,03856

Tabela D27 - CURVA DA BOMBA 1300RPM - Fase 2, Registro Fechado 12 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	11,97848	11,97848	0,26014	0,26014	8,06730	0,03777
1,00	1,57500	0,00189	11,82832	11,83633	0,25381	0,25381	7,96620	0,03779
1,50	3,12500	0,00375	11,87905	11,91056	0,25381	0,25384	7,91649	0,03779
2,00	4,88500	0,00586	11,54069	11,61768	0,24117	0,24132	7,75360	0,03783
2,50	7,27500	0,00873	11,27841	11,44918	0,22853	0,22934	7,51671	0,03788
3,00	9,41500	0,01130	11,09223	11,37824	0,21590	0,21829	7,20467	0,03796
3.1/4	10,36500	0,01244	10,99279	11,33944	0,20959	0,21319	7,05512	0,03801
3.1/2	11,27500	0,01353	10,67979	11,08998	0,19696	0,20230	6,86764	0,03807
3.3/4	11,98500	0,01438	10,58036	11,04383	0,19065	0,19766	6,71777	0,03813
4,00	12,54500	0,01505	10,20395	10,71175	0,17803	0,18698	6,59288	0,03817
4.1/4	13,10500	0,01573	10,05380	10,60794	0,17173	0,18270	6,49343	0,03821
4.1/2	13,59500	0,01631	9,95436	10,55072	0,16543	0,17853	6,34309	0,03827
4.3/4	14,01500	0,01682	9,82957	10,46334	0,15914	0,17439	6,21789	0,03833
5,00	14,38000	0,01726	9,67941	10,34662	0,15284	0,17029	6,11789	0,03837
5.1/4	14,76000	0,01771	9,27764	9,98058	0,14026	0,16103	6,01798	0,03842
5.1/2	15,14500	0,01817	9,12748	9,86757	0,13397	0,15776	5,91814	0,03847
5.3/4	15,39000	0,01847	8,82615	9,59038	0,12455	0,15137	5,84310	0,03850
6,00	16,55000	0,01986	8,26306	9,14683	0,10110	0,14183	5,46783	0,03870
6.1/4	16,80000	0,02016	8,04999	8,96067	0,09331	0,13861	5,36754	0,03875
6.1/2	17,01000	0,02041	7,77353	8,70711	0,08553	0,13549	5,33049	0,03878
6.3/4	17,18500	0,02062	7,82425	8,77715	0,08555	0,13719	5,28060	0,03881
7,00	17,23500	0,02068	7,56046	8,51891	0,07780	0,13300	5,23012	0,03883

Tabela D28 - CURVA DA BOMBA 1300RPM - Fase 2, Registro Fechado 13 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	11,97848	11,97848	0,26014	0,26014	8,06730	0,03777
1,00	1,57500	0,00189	11,84100	11,84901	0,25381	0,25381	7,95352	0,03779
1,50	3,12500	0,00375	11,66548	11,69699	0,24749	0,24751	7,87845	0,03780
2,00	4,88500	0,00586	11,61677	11,69377	0,24117	0,24133	7,67751	0,03784
2,50	7,18500	0,00862	11,19166	11,35823	0,22221	0,22300	7,35167	0,03792
3,00	9,23500	0,01108	11,14497	11,42015	0,20959	0,21187	6,89984	0,03805
3.1/4	10,15500	0,01219	10,88270	11,21544	0,19697	0,20050	6,66139	0,03813
3.1/2	10,99000	0,01319	10,87203	11,26174	0,19067	0,19565	6,42291	0,03822
3.3/4	11,69500	0,01403	10,55903	11,00035	0,17806	0,18486	6,23492	0,03829
4,00	12,19500	0,01463	10,48496	10,96482	0,17177	0,18006	6,05905	0,03837
4.1/4	12,68500	0,01522	10,41089	10,93009	0,16547	0,17549	5,88321	0,03845
4.1/2	13,10500	0,01573	10,05985	10,61399	0,15288	0,16512	5,73255	0,03852
4.3/4	13,52500	0,01623	9,96042	10,55065	0,14660	0,16095	5,58194	0,03859
5,00	13,94500	0,01673	9,83562	10,46308	0,14032	0,15709	5,45673	0,03866
5.1/4	14,23500	0,01708	9,64792	10,30175	0,13248	0,15154	5,33106	0,03872
5.1/2	14,51500	0,01742	9,44754	10,12734	0,12464	0,14625	5,21805	0,03878
5.3/4	14,79500	0,01775	9,23448	9,94076	0,11681	0,14130	5,11775	0,03884
6,00	15,91500	0,01910	8,47100	9,28826	0,08570	0,12572	4,62798	0,03913
6.1/4	16,02000	0,01922	8,21990	9,04798	0,07798	0,12152	4,56504	0,03917
6.1/2	16,19500	0,01943	8,29599	9,14226	0,07800	0,12311	4,48974	0,03921
6.3/4	16,40500	0,01969	8,03220	8,90056	0,07032	0,12041	4,43997	0,03925
7,00	16,44000	0,01973	8,10829	8,98036	0,07035	0,12076	4,36404	0,03929

Tabela D29 - CURVA DA BOMBA 1300RPM - Fase 2, Registro Fechado 14 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	11,97848	11,97848	0,26014	0,26014	8,06730	0,03777
1,00	1,57500	0,00189	11,86637	11,87437	0,25381	0,25381	7,92815	0,03779
1,50	3,12500	0,00375	11,74157	11,77308	0,24749	0,24752	7,80236	0,03782
2,00	4,81500	0,00578	11,31646	11,39126	0,22853	0,22869	7,47451	0,03789
2,50	6,88500	0,00826	11,19570	11,34865	0,20960	0,21030	6,84383	0,03806
3,00	8,74500	0,01049	10,92478	11,17153	0,18438	0,18646	6,11237	0,03832
3.1/4	9,52500	0,01143	10,73859	11,03133	0,17179	0,17492	5,79732	0,03846
3.1/2	10,22500	0,01227	10,59045	10,92780	0,15922	0,16368	5,44417	0,03862
3.3/4	10,71500	0,01286	10,37890	10,74935	0,14666	0,15247	5,15393	0,03877
4,00	11,20500	0,01345	10,38092	10,78603	0,14040	0,14762	4,90181	0,03891
4.1/4	11,55500	0,01387	10,29467	10,72548	0,13258	0,14117	4,67465	0,03904
4.1/2	11,92000	0,01430	10,18306	10,64152	0,12477	0,13502	4,47295	0,03916
4.3/4	12,30000	0,01476	9,75694	10,24509	0,10915	0,12220	4,27133	0,03928
5,00	12,54500	0,01505	9,61997	10,12776	0,10139	0,11639	4,09464	0,03939
5.1/4	12,75500	0,01531	9,47031	9,99525	0,09365	0,11073	3,93053	0,03950
5.1/2	12,96500	0,01556	9,28261	9,82498	0,08593	0,10541	3,80447	0,03959
5.3/4	13,17500	0,01581	9,12028	9,68035	0,07827	0,10050	3,65306	0,03969
6,00	13,38500	0,01606	8,90722	9,48529	0,07064	0,09604	3,55238	0,03976
6.1/4	13,52500	0,01623	9,00867	9,59890	0,07068	0,09700	3,45146	0,03984
6.1/2	13,59000	0,01631	9,17605	9,77196	0,06331	0,09223	2,96981	0,04019
6.3/4	14,23500	0,01708	8,37200	9,02583	0,04148	0,08448	2,83282	0,04030
7,00	14,30500	0,01717	7,70493	8,36521	0,02856	0,07961	2,87115	0,04027

Tabela D30 - CURVA BOMBA 1500RPM - Fase 2, Registro Fechado 11 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	15,72727	15,72727	0,35506	0,35506	8,12345	0,03784
1,00	1,71500	0,00206	15,62784	15,63733	0,34874	0,34874	7,97169	0,03786
1,50	3,54500	0,00425	15,52740	15,56795	0,34557	0,34560	7,94767	0,03787
2,00	5,65500	0,00679	15,40260	15,50579	0,33924	0,33944	7,82357	0,03789
2,50	8,46500	0,01016	15,03989	15,27109	0,32343	0,32447	7,56280	0,03795
3,00	11,03000	0,01324	14,58941	14,98196	0,30445	0,30764	7,26543	0,03804
3.1/4	14,28000	0,01714	13,04804	13,70601	0,26649	0,27658	7,30862	0,03806
3.1/2	16,02000	0,01922	12,72208	13,55016	0,23491	0,25272	6,38391	0,03838
3.3/4	17,27250	0,02073	12,03267	12,99530	0,20965	0,23599	6,07269	0,03853
4,00	18,28750	0,02195	11,51879	12,59787	0,19072	0,22611	5,83679	0,03866
4.1/4	19,18750	0,02303	10,99222	12,18013	0,17182	0,21771	5,61324	0,03879
4.1/2	19,75000	0,02370	10,64118	11,89976	0,15922	0,21311	5,46412	0,03889
4.3/4	22,47250	0,02697	8,19453	9,82402	0,07797	0,19929	4,65588	0,03944

Tabela D31 - CURVA DA BOMBA 1500RPM - Fase 2, Registro Fechado 12 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	15,72727	15,72727	0,35506	0,35506	8,11319	0,03781
1,00	1,71500	0,00206	15,47667	15,48616	0,34557	0,34557	7,98679	0,03783
1,50	3,61500	0,00434	15,30749	15,34966	0,33924	0,33927	7,90577	0,03785
2,00	5,65500	0,00679	15,08859	15,19178	0,32975	0,32995	7,74990	0,03788
2,50	8,39500	0,01007	14,91509	15,14249	0,31710	0,31813	7,42556	0,03796
3,00	11,04750	0,01326	14,33982	14,73362	0,29180	0,29515	7,00159	0,03808
3.1/4	13,18500	0,01582	13,77088	14,33181	0,26652	0,27389	6,57132	0,03824
3.1/2	14,69750	0,01764	13,39015	14,08716	0,24757	0,25970	6,20311	0,03840
3.3/4	15,88000	0,01906	12,73879	13,55246	0,22230	0,24043	5,85308	0,03857
4,00	16,90500	0,02029	12,28832	13,21041	0,20338	0,22833	5,55342	0,03872
4.1/4	18,74250	0,02249	11,42541	12,55886	0,16559	0,20903	4,91582	0,03910
4.1/2	19,33000	0,02320	10,88616	12,09178	0,14673	0,19986	4,70336	0,03924
4.3/4	21,91250	0,02630	8,47857	10,02785	0,06299	0,18540	3,72909	0,03996

Tabela D32 - CURVA DA BOMBA 1500RPM - Fase 2, Registro Fechado 13 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	15,72727	15,72727	0,35506	0,35506	8,11319	0,03781
1,00	1,71500	0,00206	15,36355	15,37304	0,34240	0,34241	7,97411	0,03784
1,50	3,58000	0,00430	15,21339	15,25474	0,33608	0,33611	7,87403	0,03785
2,00	5,55000	0,00666	14,69951	14,79889	0,31709	0,31729	7,63560	0,03790
2,50	8,25500	0,00991	14,69086	14,91074	0,30445	0,30546	7,14624	0,03803
3,00	10,83750	0,01301	14,55742	14,93639	0,28550	0,28866	6,53174	0,03823
3.1/4	12,87750	0,01545	13,93978	14,47485	0,25391	0,26095	5,89809	0,03850
3.1/2	14,21500	0,01706	13,43425	14,08624	0,22866	0,24015	5,40223	0,03874
3.3/4	15,30250	0,01836	13,11693	13,87250	0,20975	0,22633	4,96921	0,03898
4,00	15,96250	0,01916	12,50361	13,32576	0,18455	0,20644	4,57897	0,03921
4.1/4	17,90250	0,02148	11,80556	12,83969	0,14688	0,18741	3,77653	0,03977
4.1/2	18,37750	0,02205	11,18489	12,27463	0,12497	0,17510	3,51897	0,03996
4.3/4	20,39750	0,02448	9,23816	10,58062	0,04895	0,15883	2,33152	0,04093

Tabela D33 - CURVA DA BOMBA 1500RPM - Fase 2, Registro Fechado 14 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	15,72727	15,72727	0,35506	0,35506	8,11319	0,03781
1,00	1,71500	0,00206	15,36355	15,37304	0,34240	0,34241	7,97411	0,03784
1,50	3,47500	0,00417	14,69216	14,73112	0,32026	0,32029	7,76614	0,03787
2,00	5,41000	0,00649	14,36215	14,45659	0,30128	0,30147	7,34371	0,03797
2,50	7,99250	0,00959	14,59546	14,80158	0,28550	0,28644	6,48621	0,03824
3,00	10,24250	0,01229	14,37729	14,71579	0,25394	0,25678	5,45207	0,03868
3.1/4	12,73500	0,01528	13,99930	14,52259	0,20670	0,21493	3,95098	0,03955
3.1/2	13,78750	0,01655	13,11203	13,72540	0,16585	0,17964	3,20668	0,04008
3.3/4	14,58500	0,01750	12,82742	13,51380	0,14397	0,16339	2,61381	0,04054
4,00	15,22000	0,01826	12,01423	12,76167	0,10976	0,13829	2,04579	0,04102

Tabela D34 - CURVA BOMBA 1800RPM - Fase 2, Registro Fechado 11 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,30332	22,30332	0,51990	0,51990	8,07406	0,03825
1,00	1,99500	0,00239	22,08188	22,09472	0,51146	0,51146	7,96044	0,03827
1,50	4,19833	0,00504	22,15377	22,21065	0,51146	0,51150	7,89046	0,03828
2,00	6,86833	0,00824	22,00846	22,16067	0,50301	0,50331	7,70429	0,03832
2,50	10,35333	0,01242	21,45342	21,79929	0,47979	0,48137	7,34476	0,03842
3,00	13,50167	0,01620	20,32865	20,91684	0,43968	0,44464	6,88585	0,03857
3,50	17,26667	0,02072	19,02185	19,98382	0,38693	0,40179	6,11124	0,03891
4,00	19,36500	0,02324	17,82230	19,03229	0,34263	0,36870	5,55954	0,03922
4,50	20,92833	0,02511	17,32647	18,73971	0,31945	0,35686	5,14123	0,03948
5,00	22,15167	0,02658	16,11289	17,69618	0,27940	0,33139	4,76799	0,03974
5,50	23,12000	0,02774	15,40206	17,12680	0,25412	0,31978	4,47810	0,03996
6,00	23,87667	0,02865	14,92603	16,76551	0,23519	0,31333	4,20396	0,04017
Aberto	27,12167	0,03255	11,94367	14,31712	0,13295	0,29839	3,11912	0,04116

Tabela D35 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 2, Registro Fechado 12 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m ³ /h	m ³ /h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,30332	22,30332	0,51990	0,51990	8,06807	0,03824
1,00	1,99500	0,00239	22,16579	22,17863	0,51357	0,51357	7,95445	0,03826
1,50	4,19250	0,00503	22,15411	22,21082	0,51040	0,51044	7,84217	0,03828
2,00	6,84500	0,00821	22,01759	22,16877	0,50090	0,50119	7,60522	0,03833
2,50	10,15500	0,01219	21,26015	21,59289	0,46924	0,47073	7,11196	0,03846
3,00	13,31500	0,01598	20,41592	20,98796	0,43125	0,43603	6,45628	0,03869
3,50	16,88750	0,02027	19,07764	19,99783	0,37113	0,38531	5,41837	0,03919
4,00	18,88750	0,02267	18,12658	19,27764	0,33002	0,35454	4,74329	0,03960
4,50	20,34500	0,02441	17,15549	18,49105	0,29209	0,32850	4,21210	0,03996
5,00	21,52750	0,02583	16,35999	17,85531	0,26051	0,31015	3,75596	0,04031
5,50	22,35000	0,02682	15,72105	17,33282	0,23528	0,29709	3,39309	0,04060
6,00	22,96250	0,02756	15,27040	16,97171	0,21637	0,28893	3,09250	0,04085
Aberto	24,72250	0,02967	11,36299	13,33510	0,09810	0,24268	2,26057	0,04160

Tabela D36 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 2, Registro Fechado 13 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,30332	22,30332	0,51990	0,51990	8,06551	0,03823
1,00	1,92500	0,00231	22,07799	22,08995	0,51040	0,51040	7,91379	0,03826
1,50	4,21000	0,00505	21,97852	22,03571	0,50407	0,50411	7,76351	0,03829
2,00	6,74000	0,00809	21,86838	22,01495	0,49140	0,49168	7,37410	0,03837
2,50	9,98000	0,01198	21,54127	21,86264	0,46292	0,46433	6,57607	0,03862
3,00	13,00000	0,01560	20,54250	21,08779	0,41228	0,41682	5,57084	0,03904
3,50	16,30000	0,01956	19,23262	20,08990	0,34272	0,35604	4,12540	0,03988
4,00	18,06000	0,02167	18,41578	19,46819	0,29851	0,32115	3,18870	0,04056
4,50	19,22500	0,02307	17,65402	18,84657	0,26066	0,29319	2,44626	0,04116
5,00	19,82250	0,02379	16,44923	17,71707	0,21968	0,26196	2,01818	0,04153
5,50	19,99500	0,02399	15,13459	16,42459	0,18503	0,23520	1,94936	0,04160
6,00	20,06500	0,02408	13,92044	15,21949	0,15361	0,21207	1,90535	0,04164

Tabela D37 - CURVA DA BOMBA 1800RPM - Fase 2, Registro Fechado 14 voltas								
Registro	Q	$\delta(Q)$	Altura		$\delta(Altura)$		NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
	m³/h	m³/h	H _m	H _u	H _m	H _u	m	m
			m	m	m	m		
Fechado	0,00000	0,00000	22,30332	22,30332	0,51990	0,51990	8,06551	0,03823
1,00	1,99500	0,00239	21,95213	21,96498	0,50723	0,50724	7,91383	0,03826
1,50	4,14000	0,00497	22,11173	22,16703	0,50407	0,50411	7,63022	0,03831
2,00	6,67000	0,00800	21,82801	21,97156	0,47874	0,47902	6,91091	0,03850
2,50	9,73500	0,01168	20,74980	21,05559	0,41861	0,42003	5,60488	0,03900
3,00	12,37000	0,01484	20,40972	20,90345	0,37121	0,37534	4,06526	0,03986
3.1/4	13,21750	0,01586	19,69135	20,25505	0,33645	0,34238	3,40224	0,04031
3,50	14,79500	0,01775	18,56240	19,26868	0,27649	0,28770	2,14611	0,04129
3.3/4	15,21500	0,01826	17,54589	18,29284	0,24180	0,25600	1,77996	0,04161
4,00	15,30250	0,01836	15,66541	16,42097	0,19138	0,20942	1,64712	0,04172
4.1/4	15,35250	0,01842	14,75371	15,51422	0,16624	0,18698	1,55219	0,04181

Tabela D38 - VALORES DE NPSH REQUERIDO - 1400RPM, Fase 3						
Medidas	Vazão	Incerteza da Vazão	Altura Manométrica Útil	Incerteza da Altura Manométrica Útil	NPSH Requerido	Incerteza do NPSH Requerido
	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	12,47500	0,01497	12,20947	0,06832	3,14257	0,09474
2	14,16000	0,01699	11,73019	0,08035	2,24250	0,45455
3	16,55000	0,01986	11,04866	0,10268	1,76147	0,49200
4	18,23500	0,02188	10,45660	0,12156	2,01894	0,18315

Tabela D39 - VALORES DE NPSH REQUERIDO - 1500RPM, Fase 3						
Medidas	Vazão	Incerteza da Vazão	Altura Manométrica Útil	Incerteza da Altura Manométrica Útil	NPSH Requerido	Incerteza do NPSH Requerido
	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	12,47500	0,01497	14,04473	0,07212	3,58344	0,07158
2	16,69500	0,02003	12,94102	0,10680	1,85182	0,16578
3	18,23500	0,02188	12,20347	0,12336	1,92244	0,27452
4	20,20500	0,02425	11,14101	0,14773	2,21955	0,07455

Tabela D40 - VALORES DE NPSH REQUERIDO - 1600RPM, Fase 3						
Medidas	Vazão	Incerteza da Vazão	Altura Manométrica Útil	Incerteza da Altura Manométrica Útil	NPSH Requerido	Incerteza do NPSH Requerido
	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	12,54500	0,01505	16,11289	0,07727	3,09786	0,21273
2	16,69500	0,02003	15,06522	0,10919	2,16439	0,05739
3	18,23500	0,02188	14,41434	0,12534	1,68711	0,13120
4	20,13500	0,02416	13,57919	0,14849	1,97432	0,21131

Tabela D41 - CURVA DE NPSH(3%) 1400RPM - Fase 3, 12,475 m³/h

Medidas	Registro	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	Q	δ(Q)	H _u	δ(H _u)	NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Aberto	59,00	60,00	418,00	348,00	12,47500	0,01497	12,60857	0,07106	7,86927	0,03763
2	1,0	59,00	60,00	418,00	348,00	12,47500	0,01497	12,60857	0,07106	7,86927	0,03763
3	2,0	59,50	60,50	417,00	347,00	12,47500	0,01497	12,59539	0,07101	7,85609	0,03763
4	3,0	60,00	61,50	415,00	346,00	12,47500	0,01497	12,57537	0,07094	7,83607	0,03764
5	4,0	61,50	62,50	414,00	345,00	12,47500	0,01497	12,58171	0,07090	7,80337	0,03764
6	5,0	62,50	64,00	412,00	343,00	12,47500	0,01497	12,56219	0,07080	7,77017	0,03765
7	6,0	64,00	66,00	411,00	342,00	12,47500	0,01497	12,58221	0,07076	7,72380	0,03766
8	7,0	66,50	68,00	409,00	340,00	12,47500	0,01497	12,58855	0,07068	7,66474	0,03767
9	8,0	70,00	71,00	405,00	337,00	12,47500	0,01497	12,58121	0,07053	7,57933	0,03769
10	9,0	73,00	75,00	401,00	333,00	12,47500	0,01497	12,56853	0,07036	7,48657	0,03771
11	10,0	79,00	81,00	394,00	328,00	12,47500	0,01497	12,56752	0,07012	7,32842	0,03775
12	11,0	86,00	88,00	387,00	322,00	12,47500	0,01497	12,58020	0,06988	7,14391	0,03779
13	12,0	99,00	102,00	371,00	309,00	12,47500	0,01497	12,55284	0,06935	6,78756	0,03790
14	13,0	125,00	127,00	343,00	286,00	12,47500	0,01497	12,54982	0,06857	6,11592	0,03813
15	13,5	147,00	151,00	317,00	266,00	12,47500	0,01497	12,54780	0,06802	5,50866	0,03838
16	14,0	191,00	195,00	268,00	224,00	12,47500	0,01497	12,50475	0,06734	4,34888	0,03898
17	14.1/36	194,00	198,00	267,00	223,00	12,47500	0,01497	12,55746	0,06739	4,26980	0,03902
18	14.1/18	197,00	201,00	263,00	220,00	12,47500	0,01497	12,54378	0,06735	4,19073	0,03907
19	14.1/12	201,00	205,00	256,00	214,00	12,47500	0,01497	12,47738	0,06724	4,08529	0,03913
20	14.1/9	203,00	208,00	255,00	213,00	12,47500	0,01497	12,51742	0,06729	4,01889	0,03917
21	14.5/36	208,00	213,00	248,00	207,00	12,47500	0,01497	12,47738	0,06722	3,88710	0,03925
22	14.1/6	210,00	216,00	245,00	205,00	12,47500	0,01497	12,47738	0,06721	3,82070	0,03929
23	14.7/36	216,00	220,00	240,00	201,00	12,47500	0,01497	12,48905	0,06722	3,68991	0,03938
24	14.2/9	219,00	224,00	235,00	196,00	12,47500	0,01497	12,45002	0,06718	3,59715	0,03944

25	14.1/4	224,00	230,00	227,00	190,00	12,47500	0,01497	12,40998	0,06714	3,45168	0,03953
26	14.5/18	227,00	232,00	224,00	186,00	12,47500	0,01497	12,38362	0,06712	3,38629	0,03958
27	14.11/36	232,00	237,00	217,00	181,00	12,47500	0,01497	12,35625	0,06711	3,25449	0,03967
28	14.1/3	237,00	242,00	204,00	171,00	12,47500	0,01497	12,18341	0,06696	3,12270	0,03976
29	14.13/36	242,00	248,00	197,00	165,00	12,47500	0,01497	12,15705	0,06698	2,97722	0,03986
30	14.7/18	247,00	252,00	190,00	159,00	12,47500	0,01497	12,10333	0,06697	2,85911	0,03995
31	14.15/36	252,00	257,00	182,00	153,00	12,47500	0,01497	12,04961	0,06698	2,72732	0,04004
32	14.4/9	258,00	263,00	176,00	147,00	12,47500	0,01497	12,04961	0,06706	2,56917	0,04016
33	14.17/36	263,00	268,00	168,00	141,00	12,47500	0,01497	11,99588	0,06709	2,43737	0,04026
34	14.1/2	269,00	275,00	159,00	134,00	12,47500	0,01497	11,95584	0,06717	2,26554	0,04039
35	14.19/36	276,00	282,00	134,00	112,00	12,47500	0,01497	11,51941	0,06699	2,08103	0,04054
36	14.5/9	283,00	289,00	107,00	92,00	12,47500	0,01497	11,08098	0,06690	1,89652	0,04069
37	14.21/36	288,00	295,00	108,00	91,00	12,47500	0,01497	11,22746	0,06713	1,75104	0,04081

$H_{\text{médio}}$	$\delta(H_{\text{médio}})$	$H_u(97\%)$	$\delta(H_u(97\%))$
12,58709	0,07043	12,20947	0,06832

 pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D42 - CURVA DE NPSH(3%) 1400RPM - Fase 3, 14,16 m³/h

Medidas	Registro	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	Q	δ(Q)	H _u	δ(H _u)	NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Aberto	62,00	63,00	388,00	323,00	14,16000	0,01699	12,10063	0,08343	7,85990	0,03739
2	1,0	63,00	64,00	387,00	322,00	14,16000	0,01699	12,10063	0,08339	7,83356	0,03739
3	2,0	64,00	65,00	387,00	322,00	14,16000	0,01699	12,12698	0,08340	7,80721	0,03740
4	3,0	64,00	65,00	386,00	321,00	14,16000	0,01699	12,10063	0,08336	7,80721	0,03740
5	4,0	66,00	67,00	384,00	320,00	14,16000	0,01699	12,11330	0,08331	7,75451	0,03741
6	5,0	68,00	70,00	379,00	316,00	14,16000	0,01699	12,06061	0,08315	7,68814	0,03742
7	6,0	70,00	72,00	377,00	314,00	14,16000	0,01699	12,06061	0,08308	7,63544	0,03743
8	7,0	72,50	74,50	375,00	313,00	14,16000	0,01699	12,08645	0,08304	7,56957	0,03745
9	8,0	76,00	78,00	372,00	309,00	14,16000	0,01699	12,08696	0,08293	7,47735	0,03747
10	9,0	82,00	84,00	364,00	304,00	14,16000	0,01699	12,07227	0,08273	7,31927	0,03751
11	10,0	88,00	90,00	357,00	298,00	14,16000	0,01699	12,05860	0,08254	7,16118	0,03755
12	11,0	99,00	102,00	346,00	288,00	14,16000	0,01699	12,08495	0,08226	6,85767	0,03764
13	12,0	117,00	120,00	327,00	272,00	14,16000	0,01699	12,09661	0,08186	6,38341	0,03780
14	13,0	151,00	155,00	288,00	241,00	14,16000	0,01699	12,07992	0,08123	5,47389	0,03817
15	13,5	179,00	184,00	256,00	214,00	14,16000	0,01699	12,05156	0,08092	4,72247	0,03855
16	13.19/36	183,00	186,00	253,00	211,00	14,16000	0,01699	12,05055	0,08090	4,64443	0,03860
17	13.5/9	185,00	189,00	250,00	210,00	14,16000	0,01699	12,06322	0,08090	4,57806	0,03864
18	13.21/36	188,00	192,00	247,00	207,00	14,16000	0,01699	12,06322	0,08089	4,49902	0,03868
19	13.11/18	191,00	195,00	243,00	203,00	14,16000	0,01699	12,03687	0,08085	4,41997	0,03873
20	13.23/18	194,00	198,00	241,00	202,00	14,16000	0,01699	12,07589	0,08088	4,34093	0,03877
21	13.6/9	196,00	201,00	238,00	198,00	14,16000	0,01699	12,05055	0,08084	4,27456	0,03881
22	13.25/36	198,00	203,00	236,00	197,00	14,16000	0,01699	12,06322	0,08085	4,22186	0,03884
23	13.13/18	201,00	206,00	231,00	193,00	14,16000	0,01699	12,02320	0,08081	4,14281	0,03889
24	13.27/18	203,00	208,00	229,00	192,00	14,16000	0,01699	12,03587	0,08082	4,09012	0,03892

25	13.29/36	212,00	216,00	221,00	185,00	14,16000	0,01699	12,06121	0,08085	3,86666	0,03906
26	13.31/36	218,00	224,00	212,00	178,00	14,16000	0,01699	12,03486	0,08084	3,68122	0,03918
27	13.33/36	226,00	232,00	203,00	170,00	14,16000	0,01699	12,02119	0,08086	3,47044	0,03932
28	14,0	242,00	248,00	183,00	154,00	14,16000	0,01699	11,96648	0,08093	3,04887	0,03961
29	14.1/36	244,00	250,00	182,00	152,00	14,16000	0,01699	11,98016	0,08096	2,99617	0,03965
30	14.1/18	245,00	251,00	180,00	151,00	14,16000	0,01699	11,96648	0,08096	2,96982	0,03967
31	14.1/12	251,00	257,00	172,00	145,00	14,16000	0,01699	11,93913	0,08101	2,81173	0,03979
32	14.1/9	255,00	261,00	167,00	140,00	14,16000	0,01699	11,91278	0,08104	2,70634	0,03987
33	14.5/36	260,00	266,00	161,00	135,00	14,16000	0,01699	11,89910	0,08109	2,57460	0,03997
34	14.1/6	265,00	271,00	153,00	129,00	14,16000	0,01699	11,84540	0,08113	2,44286	0,04007
35	14.7/36	272,00	279,00	142,00	120,00	14,16000	0,01699	11,77903	0,08121	2,24475	0,04022
36	14.2/9	274,00	280,00	105,00	90,00	14,16000	0,01699	10,93187	0,08080	2,20573	0,04025
37	14.1/4	281,00	287,00	95,00	81,00	14,16000	0,01699	10,86549	0,08093	2,02129	0,04040
38	14.5/18	283,00	290,00	93,00	79,00	14,16000	0,01699	10,87917	0,08100	1,95492	0,04046
39	14.11/36	287,00	296,00	92,00	68,00	14,16000	0,01699	10,85885	0,08111	1,82217	0,04057
40	14.1/3	292,00	298,00	66,00	55,00	14,16000	0,01699	10,42924	0,08107	1,73146	0,04064

$H_{\text{médio}}$	$\delta(H_{\text{médio}})$	$H_u(97\%)$	$\delta(H_u(97\%))$
12,09298	0,08284	11,73019	0,08035

 pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D43 - CURVA DE NPSH(3%) 1400RPM - Fase 3, 16,55 m³/h

Medidas	Registro	l_1	l_2	l_3	l_4	Q	$\delta(Q)$	H_u	$\delta(H_u)$	NPSH _{DISP}	$\delta(NPSH_{DISP})$
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Aberto	66,00	67,00	345,00	287,00	16,55000	0,01986	11,40265	0,10630	7,69102	0,03770
2	1,0	67,00	68,00	344,00	286,00	16,55000	0,01986	11,40265	0,10627	7,66467	0,03771
3	2,0	68,00	69,00	342,00	285,00	16,55000	0,01986	11,38897	0,10624	7,63831	0,03771
4	3,0	69,00	70,00	341,00	283,00	16,55000	0,01986	11,37629	0,10620	7,61195	0,03772
5	4,0	71,50	72,50	339,00	282,00	16,55000	0,01986	11,40215	0,10617	7,54605	0,03773
6	5,0	73,00	75,00	336,00	279,00	16,55000	0,01986	11,37629	0,10610	7,49283	0,03774
7	6,0	76,00	77,00	334,00	278,00	16,55000	0,01986	11,40164	0,10608	7,42744	0,03776
8	7,0	80,00	82,00	328,00	274,00	16,55000	0,01986	11,38796	0,10597	7,30832	0,03779
9	8,0	85,50	87,50	322,00	268,00	16,55000	0,01986	11,37478	0,10585	7,16335	0,03783
10	9,0	93,00	95,00	313,00	261,00	16,55000	0,01986	11,36059	0,10569	6,96566	0,03788
11	10,0	101,00	103,00	303,00	254,00	16,55000	0,01986	11,34591	0,10554	6,75479	0,03794
12	11,0	115,00	118,00	288,00	241,00	16,55000	0,01986	11,35858	0,10534	6,37208	0,03807
13	11,5	124,00	127,00	279,00	233,00	16,55000	0,01986	11,37126	0,10523	6,13486	0,03816
14	12,0	138,00	142,00	263,00	219,00	16,55000	0,01986	11,35758	0,10506	5,75215	0,03831
15	12,5	157,00	160,00	242,00	203,00	16,55000	0,01986	11,35456	0,10492	5,26502	0,03853
16	13,0	183,00	187,00	214,00	179,00	16,55000	0,01986	11,36623	0,10484	4,56601	0,03889
17	13,5	226,00	232,00	165,00	138,00	16,55000	0,01986	11,33685	0,10496	3,40523	0,03960
18	13.19/36	228,00	233,00	163,00	136,00	16,55000	0,01986	11,32317	0,10496	3,36619	0,03963
19	13.5/9	231,00	237,00	159,00	133,00	16,55000	0,01986	11,32317	0,10499	3,27343	0,03969
20	13.21/36	234,00	240,00	156,00	131,00	16,55000	0,01986	11,33585	0,10502	3,19436	0,03975
21	13.11/18	238,00	244,00	151,00	127,00	16,55000	0,01986	11,32216	0,10505	3,08892	0,03982
22	13.23/18	241,00	248,00	146,00	124,00	16,55000	0,01986	11,30848	0,10508	2,99616	0,03989
23	13.6/9	245,00	251,00	142,00	119,00	16,55000	0,01986	11,28212	0,10510	2,90441	0,03995
24	13.25/36	248,00	256,00	137,00	115,00	16,55000	0,01986	11,26945	0,10514	2,79797	0,04003

25	13.13/18	253,00	261,00	132,00	109,00	16,55000	0,01986	11,25677	0,10520	2,66618	0,04013
26	13,3/4	257,00	264,00	128,00	108,00	16,55000	0,01986	11,28112	0,10525	2,57442	0,04020
27	13.7/9	262,00	269,00	120,00	103,00	16,55000	0,01986	11,24007	0,10531	2,44263	0,04030
28	13.29/36	266,00	273,00	115,00	97,00	16,55000	0,01986	11,20103	0,10535	2,33720	0,04038
29	13.15/18	273,00	279,00	108,00	91,00	16,55000	0,01986	11,20003	0,10545	2,16637	0,04051
30	13.31/36	276,00	284,00	102,00	87,00	16,55000	0,01986	11,17367	0,10551	2,05993	0,04059
31	13.8/9	285,00	292,00	88,00	76,00	16,55000	0,01986	11,06622	0,10563	1,83638	0,04078
32	13.11/12	292,00	298,00	80,00	68,00	16,55000	0,01986	11,02618	0,10575	1,66555	0,04092
33	13.17/18	298,00	305,00	58,00	48,00	16,55000	0,01986	10,64348	0,10581	1,49372	0,04106

$H_{\text{médio}}$	$\delta(H_{\text{médio}})$	$H_u(97\%)$	$\delta(H_u(97\%))$
11,39037	0,10586	11,04866	0,10268

 pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D44 - CURVA DE NPSH(3%) 1400RPM - Fase 3, 18,235 m³/h

Medidas	Registro	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	Q	δ(Q)	H _u	δ(H _u)	NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Aberto	71,00	72,00	305,00	255,00	18,23500	0,02188	10,77063	0,12563	7,56229	0,03776
2	1,0	71,00	72,00	305,00	255,00	18,23500	0,02188	10,77063	0,12563	7,56229	0,03776
3	2,0	72,00	73,00	304,00	254,00	18,23500	0,02188	10,77063	0,12561	7,53593	0,03777
4	3,0	74,00	75,00	303,00	252,50	18,23500	0,02188	10,79065	0,12560	7,48321	0,03778
5	4,0	77,00	78,00	300,00	250,00	18,23500	0,02188	10,79698	0,12556	7,40414	0,03780
6	5,0	79,00	81,00	297,00	248,00	18,23500	0,02188	10,79698	0,12552	7,33774	0,03781
7	6,0	82,00	84,00	294,00	245,00	18,23500	0,02188	10,79698	0,12547	7,25866	0,03783
8	7,0	87,00	89,00	287,00	240,00	18,23500	0,02188	10,76962	0,12538	7,12687	0,03787
9	8,0	95,00	97,00	279,00	231,00	18,23500	0,02188	10,75694	0,12527	6,91600	0,03793
10	9,0	103,00	106,00	269,00	223,00	18,23500	0,02188	10,74326	0,12516	6,69145	0,03800
11	10,0	113,00	117,00	260,00	212,00	18,23500	0,02188	10,75795	0,12506	6,41418	0,03809
12	11,0	131,00	135,00	242,00	197,00	18,23500	0,02188	10,79598	0,12494	5,93972	0,03827
13	12,0	148,00	152,00	225,00	181,00	18,23500	0,02188	10,80865	0,12486	5,49162	0,03846
14	12,5	176,00	180,00	188,00	159,00	18,23500	0,02188	10,76157	0,12478	4,75358	0,03882
15	12,3/4	194,00	198,00	168,00	143,00	18,23500	0,02188	10,75956	0,12481	4,27913	0,03909
16	13,0	217,00	222,00	140,00	117,00	18,23500	0,02188	10,66680	0,12489	3,65919	0,03947
17	13.1/36	218,00	224,00	136,00	116,00	18,23500	0,02188	10,63944	0,12489	3,61915	0,03949
18	13.1/18	221,00	227,00	134,00	113,00	18,23500	0,02188	10,65312	0,12492	3,54008	0,03955
19	13.1/36	222,00	228,00	132,00	111,00	18,23500	0,02188	10,62676	0,12492	3,51372	0,03956
20	13.1/18	226,00	233,00	126,00	108,00	18,23500	0,02188	10,62575	0,12496	3,39460	0,03964
21	13.1/12	228,00	234,00	125,00	106,00	18,23500	0,02188	10,62575	0,12497	3,35557	0,03967
22	13.1/9	231,00	237,00	123,00	104,00	18,23500	0,02188	10,65211	0,12501	3,27649	0,03972
23	13.5/36	233,00	240,00	119,00	101,00	18,23500	0,02188	10,62575	0,12502	3,21009	0,03977
24	13.1/6	236,00	242,00	114,00	97,00	18,23500	0,02188	10,57203	0,12503	3,14470	0,03981

25	13.7/36	239,00	245,00	113,00	96,00	18,23500	0,02188	10,62475	0,12508	3,06562	0,03987
26	13.2/9	242,00	249,00	109,00	93,00	18,23500	0,02188	10,62475	0,12512	2,97286	0,03993
27	13.1/4	244,00	251,00	106,00	89,00	18,23500	0,02188	10,58571	0,12513	2,92014	0,03997
28	13.5/18	249,00	255,00	100,00	85,00	18,23500	0,02188	10,57102	0,12518	2,80203	0,04006
29	13.11/36	255,00	261,00	95,00	80,00	18,23500	0,02188	10,59738	0,12527	2,64388	0,04017
30	13.1/3	257,00	263,00	92,00	77,00	18,23500	0,02188	10,57102	0,12529	2,59116	0,04021
31	13.13/36	260,00	268,00	89,00	74,00	18,23500	0,02188	10,59839	0,12535	2,48472	0,04029
32	13.7/18	265,00	271,00	82,00	70,00	18,23500	0,02188	10,55634	0,12540	2,38030	0,04037
33	13.15/36	267,00	274,00	79,00	67,00	18,23500	0,02188	10,54366	0,12543	2,31390	0,04043
34	13.4/9	271,00	279,00	72,00	61,00	18,23500	0,02188	10,49094	0,12549	2,19478	0,04052
35	13.5/9	274,00	281,00	69,00	59,00	18,23500	0,02188	10,48994	0,12554	2,12938	0,04057
36	13.21/36	278,00	284,00	63,00	57,00	18,23500	0,02188	10,47424	0,12559	2,03763	0,04064
37	13.11/18	279,00	287,00	60,00	52,00	18,23500	0,02188	10,42354	0,12562	1,98391	0,04069
38	13.23/18	280,00	288,00	58,00	51,00	18,23500	0,02188	10,40985	0,12563	1,95755	0,04071

$H_{\text{médio}}$ $\delta(H_{\text{médio}})$ $H_u(97\%)$ $\delta(H_u(97\%))$
10,78000 0,12532 10,45660 0,12156

 pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D45 - CURVA DE NPSH(3%) 1500RPM - Fase 3, 12,475 m³/h											
Medidas	Registro	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	Q	δ(Q)	H _u	δ(H _u)	NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Fechado	59,00	59,00	495,00	412,00	12,47500	0,01497	14,46517	0,07503	7,82976	0,03795
2	0,5	60,00	60,00	495,00	411,00	12,47500	0,01497	14,47886	0,07500	7,80339	0,03795
3	1	60,50	60,50	494,00	411,00	12,47500	0,01497	14,47835	0,07498	7,79021	0,03796
4	1,5	61,00	61,00	494,00	410,00	12,47500	0,01497	14,47886	0,07495	7,77703	0,03796
5	2	62,00	62,00	493,00	409,00	12,47500	0,01497	14,47886	0,07490	7,75066	0,03796
6	2,5	63,00	63,00	492,00	408,00	12,47500	0,01497	14,47886	0,07485	7,72429	0,03797
7	3	64,50	65,00	490,00	407,00	12,47500	0,01497	14,48520	0,07478	7,67789	0,03798
8	3,5	67,00	67,00	488,00	405,00	12,47500	0,01497	14,49154	0,07468	7,61881	0,03799
9	4	70,00	71,00	483,00	402,00	12,47500	0,01497	14,47785	0,07448	7,52601	0,03801
10	4,5	74,00	75,00	480,00	399,00	12,47500	0,01497	14,50422	0,07434	7,42054	0,03803
11	5	79,00	80,00	473,00	393,00	12,47500	0,01497	14,46416	0,07402	7,28869	0,03806
12	5,5	87,00	88,00	465,00	387,00	12,47500	0,01497	14,48953	0,07371	7,07774	0,03812
13	6	100,00	102,00	450,00	374,00	12,47500	0,01497	14,47584	0,07309	6,72125	0,03822
14	6,5	126,00	128,00	421,00	350,00	12,47500	0,01497	14,46014	0,07206	6,03565	0,03846
15	7	149,00	151,00	395,00	328,00	12,47500	0,01497	14,43175	0,07127	5,42915	0,03871
16	7,5	193,00	196,00	344,00	286,00	12,47500	0,01497	14,37499	0,07015	4,25522	0,03931
17	8	198,00	202,00	337,00	280,00	12,47500	0,01497	14,34862	0,07002	4,10968	0,03940
18	8,5	204,00	208,00	325,00	271,00	12,47500	0,01497	14,22845	0,06975	3,95147	0,03949
19	9	206,00	210,00	321,00	267,00	12,47500	0,01497	14,17571	0,06964	3,89873	0,03952
20	9,5	209,00	213,00	319,00	265,00	12,47500	0,01497	14,20208	0,06964	3,81962	0,03957
21	10	214,00	218,00	311,00	259,00	12,47500	0,01497	14,14834	0,06951	3,68777	0,03965
22	10,5	217,00	221,00	306,00	255,00	12,47500	0,01497	14,10828	0,06942	3,60867	0,03971
23	11	222,00	226,00	286,00	240,00	12,47500	0,01497	13,77615	0,06890	3,47682	0,03979
24	11,5	226,00	231,00	282,00	236,00	12,47500	0,01497	13,78983	0,06890	3,35765	0,03987
25	12	229,00	234,00	277,00	232,00	12,47500	0,01497	13,74978	0,06883	3,27855	0,03992

26	12,5	235,00	240,00	267,00	223,00	12,47500	0,01497	13,65698	0,06870	3,12033	0,04003
27	13	238,00	243,00	266,00	221,00	12,47500	0,01497	13,69704	0,06875	3,04122	0,04008
28	13,5	243,00	248,00	258,00	216,00	12,47500	0,01497	13,65597	0,06870	2,90938	0,04018
29	14	249,00	254,00	248,00	208,00	12,47500	0,01497	13,57586	0,06861	2,75116	0,04029
30	14,5	258,00	264,00	236,00	196,00	12,47500	0,01497	13,51044	0,06858	2,50015	0,04048
31	15	268,00	273,00	220,00	185,00	12,47500	0,01497	13,40194	0,06853	2,25014	0,04067
32	15,5	278,00	284,00	208,00	174,00	12,47500	0,01497	13,37557	0,06862	1,97276	0,04088
33	16	285,00	291,00	176,00	147,00	12,47500	0,01497	12,77975	0,06816	1,78818	0,04103
34	16,5	296,00	302,00	163,00	138,00	12,47500	0,01497	12,77774	0,06838	1,49812	0,04127
35	17	304,00	311,00	157,00	131,00	12,47500	0,01497	12,83148	0,06861	1,27347	0,04146

$H_{\text{médio}}$	$\delta(H_{\text{médio}})$	$H_u(97\%)$	$\delta(H_u(97\%))$
14,47910	0,07435	14,04473	0,07212

 pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D46 - CURVA DE NPSH(3%) 1500RPM - Fase 3, 16,695 m³/h

Medidas	Registro	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	Q	δ(Q)	H _u	δ(H _u)	NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Aberto	66,00	66,00	425,00	353,00	16,69500	0,02003	13,34059	0,11025	7,65724	0,03804
2	1,0	67,00	67,00	424,00	352,00	16,69500	0,02003	13,34059	0,11022	7,63087	0,03804
3	2,0	67,50	68,00	423,00	352,00	16,69500	0,02003	13,34693	0,11021	7,61085	0,03805
4	3,0	68,00	69,00	422,00	351,00	16,69500	0,02003	13,34059	0,11018	7,59082	0,03805
5	4,0	70,00	71,00	420,00	349,00	16,69500	0,02003	13,34059	0,11013	7,53808	0,03806
6	5,0	73,00	74,00	417,00	346,00	16,69500	0,02003	13,34059	0,11004	7,45897	0,03808
7	6,0	76,00	77,00	414,00	343,00	16,69500	0,02003	13,34059	0,10996	7,37986	0,03810
8	7,0	80,00	82,00	408,00	340,00	16,69500	0,02003	13,33958	0,10984	7,26070	0,03813
9	8,0	85,50	87,50	402,00	334,00	16,69500	0,02003	13,32640	0,10968	7,11567	0,03816
10	9,0	93,00	95,00	393,00	327,00	16,69500	0,02003	13,31221	0,10948	6,91790	0,03822
11	10,0	102,00	104,00	381,00	318,00	16,69500	0,02003	13,27114	0,10923	6,68057	0,03829
12	11,0	116,00	119,00	367,00	306,00	16,69500	0,02003	13,31019	0,10897	6,29772	0,03842
13	11,5	125,00	128,00	359,00	298,00	16,69500	0,02003	13,33656	0,10883	6,06039	0,03850
14	12,0	139,00	143,00	342,00	286,00	16,69500	0,02003	13,33455	0,10859	5,67753	0,03866
15	12,5	158,00	162,00	322,00	268,00	16,69500	0,02003	13,33354	0,10832	5,17652	0,03888
16	13,0	188,00	192,00	289,00	241,00	16,69500	0,02003	13,33052	0,10803	4,38544	0,03929
17	13,5	228,00	233,00	242,00	202,00	16,69500	0,02003	13,26108	0,10786	3,31698	0,03995
18	13.19/36	230,00	236,00	239,00	199,00	16,69500	0,02003	13,24840	0,10785	3,25055	0,04000
19	13.5/9	233,00	239,00	237,00	198,00	16,69500	0,02003	13,28745	0,10788	3,17145	0,04005
20	13.21/36	235,00	240,00	233,00	194,00	16,69500	0,02003	13,22102	0,10784	3,13239	0,04008
21	13.11/18	239,00	246,00	228,00	191,00	16,69500	0,02003	13,24739	0,10787	2,99954	0,04017
22	13.23/18	243,00	248,00	225,00	188,00	16,69500	0,02003	13,24638	0,10788	2,92144	0,04023
23	13.6/9	246,00	251,00	223,00	181,00	16,69500	0,02003	13,20935	0,10786	2,84233	0,04028
24	13.25/36	253,00	259,00	213,00	178,00	16,69500	0,02003	13,23270	0,10792	2,64406	0,04043
25	13.13/18	258,00	263,00	207,00	173,00	16,69500	0,02003	13,20532	0,10793	2,52590	0,04051

26	13.3/4	265,00	271,00	195,00	163,00	16,69500	0,02003	13,11252	0,10792	2,32763	0,04066
27	13.7/9	270,00	276,00	189,00	158,00	16,69500	0,02003	13,09884	0,10796	2,19578	0,04077
28	13.29/36	277,00	283,00	178,00	148,00	16,69500	0,02003	13,00604	0,10797	2,01120	0,04091
29	13.15/18	282,00	288,00	170,00	143,00	16,69500	0,02003	12,96498	0,10801	1,87935	0,04102
30	13.31/36	286,00	292,00	163,00	135,00	16,69500	0,02003	12,87319	0,10801	1,77387	0,04110
31	13.8/9	294,00	300,00	149,00	126,00	16,69500	0,02003	12,77838	0,10807	1,56292	0,04128
32	13.11/12	303,00	310,00	54,00	46,00	16,69500	0,02003	10,71453	0,10758	1,31191	0,04149

$H_{\text{médio}}$	$\delta(H_{\text{médio}})$	$H_u(97\%)$	$\delta(H_u(97\%))$
13,34125	0,11010	12,94102	0,10680

 pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D47 - CURVA DE NPSH(3%) 1500RPM - Fase 3, 18,235 m³/h											
Medidas	Registro	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	Q	δ(Q)	H _u	δ(H _u)	NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Aberto	71,00	72,00	380,00	317,00	18,23500	0,02188	12,58273	0,12730	7,55716	0,03775
2	1,0	71,00	72,00	380,00	317,00	18,23500	0,02188	12,58273	0,12730	7,55716	0,03775
3	2,0	72,00	73,00	379,00	316,00	18,23500	0,02188	12,58273	0,12728	7,53080	0,03775
4	3,0	74,00	75,00	377,00	314,00	18,23500	0,02188	12,58273	0,12724	7,47808	0,03777
5	4,0	77,00	78,00	374,00	311,00	18,23500	0,02188	12,58273	0,12717	7,39901	0,03778
6	5,0	79,00	81,00	371,00	308,00	18,23500	0,02188	12,57006	0,12711	7,33261	0,03780
7	6,0	83,00	84,00	367,00	306,00	18,23500	0,02188	12,58173	0,12705	7,24086	0,03782
8	7,0	88,00	89,00	362,00	301,00	18,23500	0,02188	12,58173	0,12696	7,10906	0,03786
9	8,0	95,00	96,00	354,00	293,00	18,23500	0,02188	12,55537	0,12681	6,92455	0,03791
10	9,0	102,00	104,00	344,00	287,00	18,23500	0,02188	12,54068	0,12667	6,72636	0,03797
11	10,0	114,00	117,00	330,00	275,00	18,23500	0,02188	12,52700	0,12646	6,39637	0,03808
12	11,0	132,00	135,00	310,00	259,00	18,23500	0,02188	12,52499	0,12622	5,92192	0,03826
13	12,0	161,00	165,00	278,00	232,00	18,23500	0,02188	12,52297	0,12595	5,14383	0,03861
14	12,5	184,00	188,00	253,00	212,00	18,23500	0,02188	12,53364	0,12583	4,53758	0,03893
15	12,3/4	199,00	204,00	235,00	197,00	18,23500	0,02188	12,50627	0,12578	4,12852	0,03916
16	13,0	218,00	223,00	214,00	179,00	18,23500	0,02188	12,49159	0,12578	3,62771	0,03947
17	13.1/36	223,00	228,00	208,00	176,00	18,23500	0,02188	12,50326	0,12579	3,49591	0,03956
18	13.1/18	225,00	231,00	206,00	171,00	18,23500	0,02188	12,47891	0,12579	3,42951	0,03960
19	13.1/36	229,00	234,00	203,00	170,00	18,23500	0,02188	12,51694	0,12582	3,33776	0,03967
20	13.1/18	232,00	237,00	200,00	166,00	18,23500	0,02188	12,50426	0,12582	3,25868	0,03972
21	13.1/12	233,00	239,00	195,00	164,00	18,23500	0,02188	12,45054	0,12580	3,21864	0,03975
22	13.1/9	238,00	243,00	190,00	160,00	18,23500	0,02188	12,44953	0,12582	3,10053	0,03983
23	13.5/36	242,00	248,00	187,00	157,00	18,23500	0,02188	12,48957	0,12587	2,98142	0,03991
24	13.1/6	245,00	251,00	182,00	153,00	18,23500	0,02188	12,44953	0,12587	2,90234	0,03997
25	13.7/36	249,00	255,00	176,00	149,00	18,23500	0,02188	12,42217	0,12588	2,79690	0,04005

26	13.2/9	254,00	260,00	171,00	143,00	18,23500	0,02188	12,40949	0,12591	2,66511	0,04014
27	13.1/4	260,00	266,00	166,00	139,00	18,23500	0,02188	12,44853	0,12598	2,50696	0,04026
28	13.5/18	265,00	271,00	159,00	133,00	18,23500	0,02188	12,40849	0,12601	2,37517	0,04036
29	13.11/36	271,00	278,00	151,00	126,00	18,23500	0,02188	12,38213	0,12606	2,20333	0,04050
30	13.1/3	274,00	281,00	146,00	121,00	18,23500	0,02188	12,32941	0,12607	2,12426	0,04056
31	13.13/36	280,00	286,00	135,00	114,00	18,23500	0,02188	12,23464	0,12610	1,97979	0,04068
32	13.7/18	285,00	292,00	126,00	106,00	18,23500	0,02188	12,15556	0,12614	1,83431	0,04079
33	13.15/36	294,00	302,00	89,00	77,00	18,23500	0,02188	11,53261	0,12610	1,58340	0,04100

$H_{\text{médio}}$	$\delta(H_{\text{médio}})$	$H_u(97\%)$	$\delta(H_u(97\%))$
12,58090	0,12718	12,20347	0,12336

 pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D48 - CURVA DE NPSH(3%) 1500RPM Fase 3, 20,205 m³/h											
Medidas	Registro	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	Q	δ(Q)	H _u	δ(H _u)	NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Aberto	76,00	77,00	320,00	266,00	20,20500	0,02425	11,48358	0,15251	7,53233	0,03724
2	1,0	78,00	79,00	318,00	265,00	20,20500	0,02425	11,49625	0,15249	7,47966	0,03725
3	2,0	79,00	80,00	316,00	264,00	20,20500	0,02425	11,48258	0,15247	7,45332	0,03726
4	3,0	82,00	83,00	314,00	262,00	20,20500	0,02425	11,50891	0,15245	7,37431	0,03728
5	4,0	85,00	87,00	311,00	258,00	20,20500	0,02425	11,50992	0,15240	7,28163	0,03730
6	5,0	88,00	90,00	308,00	254,00	20,20500	0,02425	11,49725	0,15236	7,20261	0,03732
7	6,0	92,00	95,00	302,00	251,00	20,20500	0,02425	11,49625	0,15230	7,08359	0,03736
8	7,0	99,00	101,00	292,00	245,00	20,20500	0,02425	11,45423	0,15220	6,91290	0,03741
9	8,0	108,00	110,00	282,00	236,00	20,20500	0,02425	11,44056	0,15210	6,67586	0,03748
10	9,0	119,00	121,00	272,00	226,00	20,20500	0,02425	11,46689	0,15202	6,38615	0,03759
11	10,0	133,00	136,00	257,00	215,00	20,20500	0,02425	11,50489	0,15193	6,00376	0,03774
12	11,0	154,00	158,00	232,00	194,00	20,20500	0,02425	11,46388	0,15180	5,43700	0,03799
13	11,5	168,00	172,00	216,00	182,00	20,20500	0,02425	11,46187	0,15176	5,06827	0,03817
14	11,3/4	178,00	184,00	207,00	173,00	20,20500	0,02425	11,51555	0,15178	4,77755	0,03833
15	12,0	191,00	195,00	190,00	161,00	20,20500	0,02425	11,44619	0,15175	4,46251	0,03850
16	12.1/18	195,00	200,00	187,00	156,00	20,20500	0,02425	11,46086	0,15176	4,34349	0,03857
17	12.1/9	197,00	203,00	185,00	154,00	20,20500	0,02425	11,47453	0,15177	4,27714	0,03861
18	12.1/6	200,00	205,00	182,00	153,00	20,20500	0,02425	11,48619	0,15178	4,21180	0,03865
19	12.2/9	205,00	210,00	178,00	149,00	20,20500	0,02425	11,51253	0,15181	4,08011	0,03873
20	12.5/18	208,00	213,00	176,00	146,00	20,20500	0,02425	11,52620	0,15182	4,00110	0,03878
21	12.3/9	212,00	217,00	172,00	143,00	20,20500	0,02425	11,53887	0,15184	3,89575	0,03885
22	12.7/18	216,00	221,00	164,00	139,00	20,20500	0,02425	11,48418	0,15183	3,79040	0,03892
23	12.4/9	218,00	224,00	161,00	135,00	20,20500	0,02425	11,45885	0,15184	3,72406	0,03896
24	12.1/2	224,00	230,00	155,00	131,00	20,20500	0,02425	11,48418	0,15188	3,56603	0,03907
25	12.5/9	228,00	233,00	151,00	126,00	20,20500	0,02425	11,45785	0,15189	3,47435	0,03913

26	12.11/18	233,00	240,00	146,00	122,00	20,20500	0,02425	11,49786	0,15194	3,31532	0,03924
27	12.6/9	240,00	246,00	136,00	116,00	20,20500	0,02425	11,45584	0,15197	3,14463	0,03936
28	12.13/18	244,00	251,00	131,00	112,00	20,20500	0,02425	11,45584	0,15201	3,02561	0,03945
29	12.7/9	250,00	256,00	127,00	104,00	20,20500	0,02425	11,44417	0,15205	2,88126	0,03955
30	12.15/18	257,00	263,00	119,00	99,00	20,20500	0,02425	11,45584	0,15212	2,69689	0,03969
31	13,0	266,00	272,00	105,00	91,00	20,20500	0,02425	11,40015	0,15220	2,45986	0,03987
32	13.1/8	273,00	280,00	101,00	74,00	20,20500	0,02425	11,32817	0,15227	2,26182	0,04003
33	13.1/9	279,00	286,00	92,00	16,00	20,20500	0,02425	10,62852	0,15222	2,10380	0,04016

$H_{\text{médio}}$ $\delta(H_{\text{médio}})$ $H_u(97\%)$ $\delta(H_u(97\%))$
 11,48557 0,15229 11,14101 0,14773

 pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D49 - CURVA DE NPSH(3%) 1600RPM - Fase 3, 12,545 m³/h

Medidas	Registro	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	Q	δ(Q)	H _u	δ(H _u)	NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Aberto	59,50	60,00	583,00	485,00	12,54500	0,01505	16,61480	0,08049	7,85292	0,03761
2	1,0	60,00	60,50	583,00	485,00	12,54500	0,01505	16,62798	0,08050	7,83974	0,03761
3	2,0	60,50	61,00	582,00	484,00	12,54500	0,01505	16,61480	0,08044	7,82656	0,03761
4	3,0	61,00	61,50	582,00	483,00	12,54500	0,01505	16,61531	0,08041	7,81338	0,03761
5	4,0	62,00	63,00	581,00	481,00	12,54500	0,01505	16,60947	0,08032	7,78018	0,03762
6	5,0	63,00	64,50	578,00	481,00	12,54500	0,01505	16,60162	0,08023	7,74698	0,03763
7	6,0	64,50	66,00	576,00	480,00	12,54500	0,01505	16,60112	0,08015	7,70744	0,03763
8	7,0	67,00	68,50	574,00	477,00	12,54500	0,01505	16,60162	0,08001	7,64155	0,03765
9	8,0	70,00	71,50	571,00	475,00	12,54500	0,01505	16,61430	0,07987	7,56247	0,03767
10	9,0	74,50	76,00	565,00	470,00	12,54500	0,01505	16,58744	0,07956	7,44386	0,03769
11	10,0	79,00	80,50	559,00	466,00	12,54500	0,01505	16,57325	0,07928	7,32524	0,03772
12	11,0	86,00	87,50	551,00	459,00	12,54500	0,01505	16,55957	0,07888	7,14073	0,03777
13	11,5	102,50	103,00	536,00	446,00	12,54500	0,01505	16,61078	0,07820	6,71950	0,03789
14	12,0	128,00	129,00	506,00	422,00	12,54500	0,01505	16,57506	0,07695	6,04051	0,03813
15	12,5	195,00	198,00	436,00	359,00	12,54500	0,01505	16,61209	0,07467	4,24711	0,03901
16	13,0	199,00	203,00	427,00	356,00	12,54500	0,01505	16,57003	0,07448	4,12800	0,03908
17	13,5	203,00	206,00	426,00	354,00	12,54500	0,01505	16,62275	0,07450	4,03624	0,03913
18	14,0	207,00	211,00	417,00	348,00	12,54500	0,01505	16,54267	0,07424	3,91713	0,03921
19	14.1/36	210,00	215,00	413,00	344,00	12,54500	0,01505	16,52999	0,07413	3,82437	0,03926
20	14.1/18	213,00	218,00	407,00	341,00	12,54500	0,01505	16,48895	0,07400	3,74529	0,03931
21	14.1/12	216,00	221,00	403,00	336,00	12,54500	0,01505	16,44991	0,07386	3,66622	0,03936
22	14.1/9	220,00	226,00	387,00	323,00	12,54500	0,01505	16,18532	0,07329	3,54710	0,03944
23	14.5/36	228,00	234,00	378,00	316,00	12,54500	0,01505	16,18431	0,07316	3,33623	0,03958
24	14.1/6	234,00	240,00	372,00	307,00	12,54500	0,01505	16,14628	0,07300	3,17808	0,03969
25	14.7/36	242,00	247,00	359,00	299,00	12,54500	0,01505	16,06419	0,07277	2,98089	0,03983

26	14.2/9	244,00	249,00	356,00	297,00	12,54500	0,01505	16,05051	0,07273	2,92817	0,03987
27	14.1/4	249,00	256,00	348,00	291,00	12,54500	0,01505	16,02415	0,07263	2,76902	0,03998
28	14.5/18	256,00	261,00	329,00	274,00	12,54500	0,01505	15,70583	0,07208	2,61187	0,04010
29	14.11/36	264,00	270,00	318,00	264,00	12,54500	0,01505	15,65311	0,07196	2,38732	0,04027
30	14.1/3	271,00	276,00	309,00	257,00	12,54500	0,01505	15,61207	0,07188	2,21649	0,04040
31	14.13/36	281,00	287,00	285,00	228,00	12,54500	0,01505	15,19335	0,07131	1,93922	0,04062
32	14.7/18	290,00	296,00	269,00	226,00	12,54500	0,01505	15,18630	0,07135	1,70199	0,04082
33	14.15/36	298,00	306,00	258,00	217,00	12,54500	0,01505	15,15995	0,07138	1,46376	0,04102
34	14.4/9	305,00	313,00	249,00	208,00	12,54500	0,01505	15,10723	0,07139	1,27925	0,04118

$H_{\text{médio}}$	$\delta(H_{\text{médio}})$	$H_u(97\%)$	$\delta(H_u(97\%))$
16,61123	0,0796639	16,11289	0,077273981

 pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D50 - CURVA DE NPSH(3%) 1600RPM Fase 3, 16,695 m³/h

Medidas	Registro	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	Q	δ(Q)	H _u	δ(H _u)	NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Aberto	67,00	68,00	515,00	428,00	16,69500	0,02003	15,55792	0,11337	7,65508	0,03769
2	1,0	68,00	68,00	513,00	427,00	16,69500	0,02003	15,53056	0,11331	7,64240	0,03769
3	2,0	69,00	70,00	511,00	426,00	16,69500	0,02003	15,53056	0,11326	7,60236	0,03770
4	3,0	70,00	71,00	510,00	425,00	16,69500	0,02003	15,53056	0,11322	7,57600	0,03770
5	4,0	72,00	73,00	508,00	423,00	16,69500	0,02003	15,53056	0,11315	7,52329	0,03771
6	5,0	74,00	75,00	506,00	421,00	16,69500	0,02003	15,53056	0,11309	7,47057	0,03773
7	6,0	77,00	78,00	503,00	418,00	16,69500	0,02003	15,53056	0,11299	7,39149	0,03775
8	7,0	81,00	82,50	497,00	415,00	16,69500	0,02003	15,52271	0,11284	7,27922	0,03777
9	8,0	86,50	88,50	491,00	409,00	16,69500	0,02003	15,51637	0,11264	7,12740	0,03781
10	9,0	93,00	95,00	484,00	404,00	16,69500	0,02003	15,52854	0,11246	6,95607	0,03786
11	10,0	103,00	105,00	472,00	394,00	16,69500	0,02003	15,50118	0,11213	6,69249	0,03794
12	11,0	117,00	120,00	457,00	380,00	16,69500	0,02003	15,50118	0,11173	6,30978	0,03807
13	11,5	140,00	144,00	430,00	358,00	16,69500	0,02003	15,47281	0,11112	5,68985	0,03831
14	12,0	159,00	163,00	408,00	341,00	16,69500	0,02003	15,45711	0,11071	5,18904	0,03854
15	12,5	188,00	192,00	376,00	314,00	16,69500	0,02003	15,44142	0,11022	4,42463	0,03895
16	13,0	228,00	234,00	334,00	278,00	16,69500	0,02003	15,49213	0,10986	3,34292	0,03962
17	13,5	231,00	236,00	329,00	275,00	16,69500	0,02003	15,45108	0,10980	3,27753	0,03966
18	14,0	234,00	239,00	326,00	271,00	16,69500	0,02003	15,43840	0,10977	3,19845	0,03972
19	14.1/36	238,00	244,00	321,00	267,00	16,69500	0,02003	15,43840	0,10975	3,07934	0,03980
20	14.1/18	242,00	247,00	317,00	264,00	16,69500	0,02003	15,43740	0,10973	2,98758	0,03987
21	14.1/12	245,00	250,00	313,00	261,00	16,69500	0,02003	15,42371	0,10971	2,90851	0,03992
22	14.1/9	249,00	255,00	307,00	256,00	16,69500	0,02003	15,39736	0,10967	2,78939	0,04001
23	14.5/36	252,00	257,00	304,00	253,00	16,69500	0,02003	15,38367	0,10965	2,72400	0,04006
24	14.1/6	258,00	263,00	297,00	248,00	16,69500	0,02003	15,38267	0,10964	2,56584	0,04018
25	14.7/36	262,00	268,00	290,00	243,00	16,69500	0,02003	15,34263	0,10960	2,44673	0,04027

26	14.2/9	266,00	272,00	284,00	238,00	16,69500	0,02003	15,30258	0,10957	2,34129	0,04035
27	14.1/4	271,00	278,00	276,00	232,00	16,69500	0,02003	15,26254	0,10954	2,19582	0,04046
28	14.5/18	279,00	284,00	221,00	186,00	16,69500	0,02003	14,11041	0,10868	2,01231	0,04061
29	14.11/36	283,00	290,00	172,00	140,00	16,69500	0,02003	12,98966	0,10803	1,87951	0,04071
30	14.1/3	298,00	305,00	115,00	130,00	16,69500	0,02003	12,47838	0,10801	1,48413	0,04104

$H_{\text{médio}}$ $\delta(H_{\text{médio}})$ $H_u(97\%)$ $\delta(H_u(97\%))$
 15,53115 0,1125715 15,06522 0,109194

[] pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D51 - CURVA DE NPSH(3%) 1600RPM Fase 3, 18,235 m³/h

Medidas	Registro	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	Q	δ(Q)	H _u	δ(H _u)	NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Aberto	70,00	71,00	476,00	395,00	18,23500	0,02188	14,86402	0,12990	7,59177	0,03821
2	1,0	71,50	72,50	474,00	393,00	18,23500	0,02188	14,85084	0,12984	7,55222	0,03822
3	2,0	73,00	74,00	472,00	393,00	18,23500	0,02188	14,86301	0,12982	7,51267	0,03823
4	3,0	74,00	75,00	471,00	391,00	18,23500	0,02188	14,85033	0,12978	7,48630	0,03823
5	4,0	77,00	78,00	468,00	390,00	18,23500	0,02188	14,87570	0,12973	7,40719	0,03825
6	5,0	79,00	81,00	464,00	386,00	18,23500	0,02188	14,83664	0,12961	7,34076	0,03827
7	6,0	82,00	84,00	462,00	384,00	18,23500	0,02188	14,86301	0,12957	7,26165	0,03829
8	7,0	87,00	89,00	456,00	379,00	18,23500	0,02188	14,84933	0,12942	7,12981	0,03832
9	8,0	94,00	96,00	450,00	374,00	18,23500	0,02188	14,88838	0,12930	6,94522	0,03837
10	9,0	103,00	106,00	438,00	365,00	18,23500	0,02188	14,86100	0,12905	6,69421	0,03845
11	10,0	114,00	117,00	424,00	355,00	18,23500	0,02188	14,83262	0,12878	6,40415	0,03854
12	11,0	131,00	134,00	408,00	340,00	18,23500	0,02188	14,87167	0,12849	5,95587	0,03871
13	12,0	159,00	163,00	378,00	314,00	18,23500	0,02188	14,88334	0,12804	5,20384	0,03904
14	12,5	182,00	185,00	353,00	294,00	18,23500	0,02188	14,88032	0,12776	4,61104	0,03934
15	12,3/4	198,00	203,00	334,00	278,00	18,23500	0,02188	14,86664	0,12758	4,16175	0,03960
16	13,0	216,00	221,00	314,00	262,00	18,23500	0,02188	14,86462	0,12746	3,68711	0,03989
17	13.1/36	218,00	223,00	312,00	261,00	18,23500	0,02188	14,87731	0,12746	3,63437	0,03992
18	13.1/18	222,00	226,00	306,00	256,00	18,23500	0,02188	14,82356	0,12740	3,54258	0,03998
19	13.1/12	224,00	229,00	304,00	254,00	18,23500	0,02188	14,83725	0,12740	3,47615	0,04002
20	13.1/9	226,00	232,00	302,00	252,00	18,23500	0,02188	14,85094	0,12740	3,40973	0,04007
21	13.5/36	230,00	236,00	297,00	248,00	18,23500	0,02188	14,83725	0,12738	3,30425	0,04014
22	13.1/6	234,00	240,00	291,00	243,00	18,23500	0,02188	14,79719	0,12734	3,19877	0,04021
23	13.7/36	236,00	242,00	289,00	242,00	18,23500	0,02188	14,80987	0,12734	3,14603	0,04025
24	13.2/9	238,00	243,00	288,00	240,00	18,23500	0,02188	14,80987	0,12734	3,10698	0,04027
25	13.1/4	241,00	246,00	285,00	238,00	18,23500	0,02188	14,82255	0,12735	3,02788	0,04033

26	13.5/18	244,00	250,00	281,00	235,00	18,23500	0,02188	14,82255	0,12734	2,93508	0,04039
27	13.11/36	248,00	253,00	277,00	232,00	18,23500	0,02188	14,82155	0,12734	2,84329	0,04046
28	13.3/9	250,00	256,00	274,00	228,00	18,23500	0,02188	14,79618	0,12732	2,77686	0,04051
29	13.13/36	254,00	260,00	269,00	224,00	18,23500	0,02188	14,78250	0,12731	2,67139	0,04058
30	13.7/18	258,00	263,00	263,00	220,00	18,23500	0,02188	14,74143	0,12729	2,57960	0,04065
31	13.15/36	261,00	266,00	260,00	218,00	18,23500	0,02188	14,75411	0,12730	2,50049	0,04071
32	13.4/9	265,00	272,00	256,00	213,00	18,23500	0,02188	14,76881	0,12732	2,36764	0,04081
33	13.17/36	272,00	278,00	247,00	207,00	18,23500	0,02188	14,74043	0,12733	2,19674	0,04094
34	13.1/2	274,00	280,00	242,00	203,00	18,23500	0,02188	14,67400	0,12729	2,14400	0,04099
35	13.19/36	281,00	287,00	234,00	196,00	18,23500	0,02188	14,66031	0,12732	1,95942	0,04113
36	13.5/9	286,00	292,00	227,00	190,00	18,23500	0,02188	14,62026	0,12732	1,82757	0,04124
37	13.7/12	292,00	299,00	209,00	176,00	18,23500	0,02188	14,36824	0,12722	1,65567	0,04138
38	13.11/18	297,00	304,00	188,00	155,00	18,23500	0,02188	13,94633	0,12704	1,52382	0,04149
39	13.23/36	302,00	400,00	114,00	95,00	18,23500	0,02188	13,54998	0,12760	0,14638	0,04269

$H_{\text{médio}}$	$\delta(H_{\text{médio}})$	$H_u(97\%)$	$\delta(H_u(97\%))$
14,86014	0,1292201	14,41434	0,12534347

 pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D52 - CURVA DE NPSH(3%) 1600RPM Fase 3, 20,135 m³/h

Medidas	Registro	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	Q	δ(Q)	H _u	δ(H _u)	NPSH _{DISP}	δ(NPSH _{DISP})
		mm	mm	mm	mm	m³/h	m³/h	m	m	m	m
1	Aberto	75,00	76,00	425,00	354,00	20,135	0,024162	14,01308	0,153636	7,4701115	0,038302852
2	1,0	76,00	77,00	423,00	353,00	20,135	0,024162	13,99939	0,153604	7,4437422	0,03830893
3	2,0	77,00	79,00	421,00	352,00	20,135	0,024162	13,99939	0,153574	7,4036851	0,03831821
4	3,0	79,00	81,00	419,00	350,00	20,135	0,024162	13,99939	0,153535	7,3509465	0,038330841
5	4,0	83,00	85,00	415,00	346,00	20,135	0,024162	13,99939	0,153458	7,2454694	0,038357048
6	5,0	86,00	88,00	412,00	343,00	20,135	0,024162	13,99939	0,153402	7,1663615	0,038377531
7	6,0	90,00	92,00	408,00	338,00	20,135	0,024162	13,98671	0,153317	7,0608844	0,03840594
8	7,0	95,00	98,00	401,00	335,00	20,135	0,024162	13,99838	0,153231	6,9153501	0,038447068
9	8,0	104,00	107,00	391,00	327,00	20,135	0,024162	13,99738	0,15308	6,6780266	0,038519437
10	9,0	115,00	118,00	380,00	317,00	20,135	0,024162	14,01006	0,15292	6,3879645	0,038616431
11	10,0	127,00	130,00	363,00	303,00	20,135	0,024162	13,91626	0,152675	6,0715331	0,038732882
12	11,0	148,00	151,00	339,00	284,00	20,135	0,024162	13,90055	0,152417	5,5177782	0,038963088
13	12,0	183,00	187,00	303,00	253,00	20,135	0,024162	13,95128	0,152163	4,5811654	0,039427218
14	12.1/18	185,00	191,00	301,00	251,00	20,135	0,024162	13,97866	0,152164	4,5010511	0,039470735
15	12.1/9	188,00	192,00	298,00	249,00	20,135	0,024162	13,96396	0,152144	4,449319	0,039500001
16	12.1/6	191,00	196,00	292,00	245,00	20,135	0,024162	13,9239	0,1521	4,3565233	0,039552053
17	12.2/9	193,00	199,00	289,00	244,00	20,135	0,024162	13,93659	0,152097	4,2900969	0,039589783
18	12.5/18	196,00	201,00	286,00	240,00	20,135	0,024162	13,91022	0,152069	4,2246769	0,039627893
19	12.3/9	200,00	205,00	284,00	237,00	20,135	0,024162	13,95027	0,152078	4,1191998	0,03968985
20	12.7/18	204,00	210,00	280,00	234,00	20,135	0,024162	13,97664	0,152079	4,0000348	0,039760944
21	12.4/9	208,00	213,00	274,00	229,00	20,135	0,024162	13,9229	0,152036	3,9082455	0,039817167
22	12.1/2	211,00	216,00	271,00	227,00	20,135	0,024162	13,93558	0,152037	3,8291377	0,039866075
23	12.5/9	215,00	221,00	267,00	223,00	20,135	0,024162	13,94927	0,152036	3,7099727	0,039940654
24	12.11/18	219,00	224,00	265,00	221,00	20,135	0,024162	13,98832	0,152054	3,6181834	0,039999572
25	12.6/9	223,00	230,00	259,00	216,00	20,135	0,024162	13,97564	0,152041	3,4853306	0,040085341

26	12.13/18	229,00	234,00	253,00	211,00	20,135	0,024162	13,96094	0,152031	3,3544906	0,040172683
27	12.7/9	234,00	240,00	246,00	206,00	20,135	0,024162	13,94725	0,152026	3,2089563	0,040270859
28	12.15/18	238,00	244,00	239,00	201,00	20,135	0,024162	13,89351	0,152001	3,1034792	0,040343525
29	12.8/9	243,00	250,00	236,00	196,00	20,135	0,024162	13,93457	0,152031	2,9579449	0,040445247
30	12.17/18	247,00	253,00	229,00	192,00	20,135	0,024162	13,87982	0,152012	2,8661557	0,040510971
31	13,0	254,00	260,00	223,00	186,00	20,135	0,024162	13,90619	0,152046	2,6815707	0,040644951
32	13.1/8	259,00	265,00	214,00	180,00	20,135	0,024162	13,83876	0,152032	2,5497243	0,040742637
33	13.1/9	266,00	272,00	207,00	173,00	20,135	0,024162	13,83876	0,152065	2,3651393	0,040882152
34	13.1/6	272,00	279,00	192,00	164,00	20,135	0,024162	13,69121	0,152036	2,1932357	0,0410146
35	13.2/9	280,00	287,00	181,00	151,00	20,135	0,024162	13,58674	0,152048	1,9822815	0,041181289
36	13.5/18	288,00	295,00	163,00	138,00	20,135	0,024162	13,38645	0,152038	1,7713272	0,041352047
37	13.3/9	295,00	302,00	108,00	93,00	20,135	0,024162	12,24754	0,151766	1,5867423	0,04150476

$H_{\text{médio}}$ $\delta(H_{\text{médio}})$ $H_u(97\%)$ $\delta(H_u(97\%))$
13,999166 0,153084 13,57919 0,148491458

 pontos utilizados para o cálculo de $H_{\text{médio}}$

Tabela D53 - Rotações médias ensaiadas por posição do registro de descarga, RG2.

Rotação - 1100 RPM					
Medidas	Posição do Registro	Média Por Posição do Registro	Média Geral	Incerteza Por posição do Registro	Incerteza geral
	(Voltas)	(RPM)	(RPM)	(RPM)	(RPM)
1	Fechado	1089	1080	4	13
2	1	1089		4	
3	1,5	1088		5	
4	2	1086		4	
5	2,5	1083		4	
6	3	1080		4	
7	3,5	1079		4	
8	4	1078		5	
9	4,5	1076		4	
10	5	1076		4	
11	5,5	1075		5	
12	6	1074		4	
13	Aberto	1072		5	

Rotação - 1300 RPM					
Medidas	Posição do Registro	Média Por Posição do Registro	Média Geral	Incerteza Por posição do Registro	Incerteza geral
	(Voltas)	(RPM)	(RPM)	(RPM)	(RPM)
1	Fechado	1285	1272	3	17
2	1	1284		3	
3	1,5	1282		3	
4	2	1280		3	
5	2,5	1276		4	
6	3	1273		3	
7	3,5	1271		4	
8	4	1269		3	
9	4,5	1267		3	
10	5	1266		3	
11	5,5	1265		3	
12	6	1263		4	
13	Aberto	1261		3	

Rotação - 1400 RPM					
Medidas	Posição do Registro	Média Por Posição do Registro	Média Geral	Incerteza Por posição do Registro	Incerteza geral
	(Voltas)	(RPM)	(RPM)	(RPM)	(RPM)
1	Fechado	1384	1366	3	20
2	1	1382		3	
3	1,5	1379		3	
4	2	1375		3	
5	2,5	1373		4	
6	3	1369		3	
7	3,5	1367		4	
8	4	1362		3	
9	4,5	1358		4	
10	5	1356		4	
11	5,5	1354		3	
12	6	1353		5	
13	Aberto	1352		3	

Rotação - 1500 RPM					
Medidas	Posição do Registro	Média Por Posição do Registro	Média Geral	Incerteza Por posição do Registro	Incerteza geral
	(Voltas)	(RPM)	(RPM)	(RPM)	(RPM)
1	Fechado	1476	1460	7	23
2	1	1477		5	
3	1,5	1474		4	
4	2	1470		4	
5	2,5	1463		6	
6	3	1461		5	
7	3,5	1456		3	
8	4	1454		4	
9	4,5	1451		3	
10	5	1450		4	
11	5,5	1450		3	
12	6	1449		4	
13	Aberto	1446		3	

Continuação da Tabela D53 - Rotações médias ensaiadas por posição do registro de descarga, RG2.											
Rotação - 1600 RPM						Rotação - 1800 RPM					
Medidas	Posição do Registro	Média Por Posição do Registro	Média Geral	Incerteza Por posição do Registro	Incerteza geral	Medidas	Posição do Registro	Média Por Posição do Registro	Média Geral	Incerteza Por posição do Registro	Incerteza geral
	(Voltas)	(RPM)	(RPM)	(RPM)	(RPM)		(Voltas)	(RPM)	(RPM)	(RPM)	(RPM)
1	Fechado	1577	1556	5	25	1	Fechado	1772	1743	5	35
2	1	1576		4		2	1	1770		3	
3	1,5	1573		4		3	1,5	1766		3	
4	2	1568		9		4	2	1761		4	
5	2,5	1564		6		5	2,5	1754		4	
6	3	1557		6		6	3	1743		5	
7	3,5	1551		4		7	3,5	1738		4	
8	4	1548		4		8	4	1734		4	
9	4,5	1545		8		9	4,5	1731		3	
10	5	1545		3		10	5	1728		3	
11	5,5	1541		7		11	5,5	1725		4	
12	6	1541		5		12	6	1724		3	
13	Aberto	1538		5		13	Aberto	1718		4	
Rotação - 1900 RPM						Rotação - 1980 RPM					
Medidas	Posição do Registro	Média Por Posição do Registro	Média Geral	Incerteza Por posição do Registro	Incerteza geral	Medidas	Posição do Registro	Média Por Posição do Registro	Média Geral	Incerteza Por posição do Registro	Incerteza geral
	(Voltas)	(RPM)	(RPM)	(RPM)	(RPM)		(Voltas)	(RPM)	(RPM)	(RPM)	(RPM)
1	Fechado	1863	1822	4	46	1	Fechado	1936	1887	4	54
2	1	1861		4		2	1	1934		3	
3	1,5	1857		5		3	1,5	1927		3	
4	2	1849		3		4	2	1918		4	
5	2,5	1836		5		5	2,5	1905		3	
6	3	1828		3		6	3	1889		3	
7	3,5	1816		4		7	3,5	1879		5	
8	4	1810		4		8	4	1871		3	
9	4,5	1799		5		9	4,5	1864		3	
10	5	1797		5		10	5	1859		4	
11	5,5	1795		6		11	5,5	1853		4	
12	6	1794		6		12	6	1850		4	
13	Aberto	1785		4		13	Aberto	1841		3	

Apêndice E

Tabelas de Vazões Nominais para as Rotações Ensaçadas

Tabela E1 - Vazão Nominal da Bomba para as Rotações Ensaaiadas Tomando como Referência a Curva de 1750 RPM obtida em Catálogo.

Rotações							
1100 RPM		1300 RPM		1400 RPM		1500 RPM	
Vazão (m³/h)	Altura Útil (m)	Vazão (m³/h)	Altura Útil (m)	Vazão (m³/h)	Altura Útil (m)	Vazão (m³/h)	Altura Útil (m)
8,10857	6,51918	9,58286	9,10531	10,32000	10,56000	11,05714	12,12245
10,81143	7,82302	12,77714	10,92637	13,76000	12,67200	14,74286	14,54694
13,51429	8,45518	15,97143	11,80931	17,20000	13,69600	18,42857	15,72245
Rotações							
1600 RPM		1800 RPM		1900 RPM		1980 RPM	
Vazão (m³/h)	Altura Útil (m)	Vazão (m³/h)	Altura Útil (m)	Vazão (m³/h)	Altura Útil (m)	Vazão (m³/h)	Altura Útil (m)
11,79429	13,79265	13,26857	17,45633	14,00571	19,44980	14,59543	21,12216
15,72571	16,55118	17,69143	20,94759	18,67429	23,33976	19,46057	25,34659
19,65714	17,88865	22,11429	22,64033	23,34286	25,22580	24,32571	27,39480

Tabela E2 - Vazão Nominal da Bomba para a Rotação de 1750 RPM obtida em Catálogo.

1750 RPM	
Vazão (m³/h)	Altura Manométrica (H)
12,90000	16,50000
17,20000	19,80000
21,25000	21,40000