



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

FRANCISCO CARLOS SCHRÖDER

**MULTI CORRELAÇÕES NO FUNCIONAMENTO DE
BOMBAS CENTRÍFUGAS OPERANDO EM
CONDIÇÕES REGULARES E COM CAVITAÇÃO
MODERADA**

Campinas
2016

FRANCISCO CARLOS SCHRÖDER

MULTI CORRELAÇÕES NO FUNCIONAMENTO DE
BOMBAS CENTRÍFUGAS OPERANDO EM CONDIÇÕES
REGULARES E COM CAVITAÇÃO MODERADA

Tese de Doutorado apresentada à
Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP
como requisito para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Civil, na área de
Concentração de Recursos Hídricos,
Energéticos e Ambientais.

Orientador: Prof.: Dr. José Gilberto Dalfré Filho

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO FRANCISCO CARLOS SCHRÖDER E
ORIENTADO PELO PROF.DR. JOSÉ GILBERTO DALFRÉ FILHO



ORIENTADOR

Campinas
2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas Biblioteca
da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

SCHRÖDER, FRANCISCO CARLOS, 1960-
Sch75m Multi correlações no funcionamento de bombas centrífugas operando em condições regulares e com cavitação moderada / FRANCISCO CARLOS SCHRÖDER. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: José Gilberto Dalfré Filho.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Bomba centrífuga. 2. Cavitação. 3. Ruído. I. Dalfré Filho, José Gilberto, 1976-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Multi correlations in the functioning of centrifugal pumps operating in regular and with moderate cavitation

Palavras-chave em inglês:

Centrifugal pumps

Cavitation

Noise

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora:

José Gilberto Dalfré Filho [Orientador]

Paulo Vatavuk

Podalyro Amaral de Souza

Rodrigo de Melo Porto

Tiago Zenker Girelli

Data de defesa: 24-02-2016

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**MULTI CORRELAÇÕES NO FUNCIONAMENTO DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS OPERANDO EM CONDIÇÕES REGULARES
E COM CAVITAÇÃO MODERADA**

Francisco Carlos Schröder

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora Constituída por:

Prof. Dr. José Gilberto Dalfré Filho
Presidente e Orientador / FEC UNICAMP

Prof. Dr. Paulo Vatavuk
FEC UNICAMP

Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza
Escola Politécnica USP

Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto
EESC USP

Prof. Dr. Tiago Zenker Girelli
FEC UNICAMP

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno

Campinas, 24 de Fevereiro de 2016

DEDICATÓRIA

Dedico à todas as pessoas que compartilharam comigo das dificuldades inerentes à realização deste trabalho e souberam contribuir de algum modo para sua finalização.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador José Gilberto Dalfré Filho

Aos professores do PPGRH, Edevar Luvizotto Junior, Paulo Vatabuk, Tiago Zenker Gireli e a pesquisadora Yvone de Faria Lemos de Lucca.

Ao professor da FEM, Kamal Abdel Radi Ismail pelo uso do laboratório de engenharia térmica e fluidos.

Aos profissionais da Unicamp, Carlos Alcaide, Eduardo Estevam da Silva, Jefferson Cutrim, Marcelo Balbino e Rosana Kelly.

Aos profissionais das Empresas, Alberto J. Santos, Bruno André, Edson Santana, Genivaldo Aquino, Geraldo Mangela, Henrique Taniguchi, Irineu Drozsdeck, Izolda Oliveira, Mauro Tessarolo e Sergio Oshima

Às empresas, DLT Bombas, Hidrauser, Imbil, Predictiva, Sabesp, Scanpump, Weg Motores e WKL.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de doutoramento e auxílio pró equipamentos 2013.

À FAPESP – Fundação de apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelos equipamentos do auxílio à pesquisa nº 2009/54278-4 e nº 2010/51522-9.

Aos amigos de longo tempo pelos seus exemplos de dedicação e perseverança, Antonio de Deus Rosa, Bernardina da Silva (†), Celso Walmor da Silva, Claudinei Araujo, Marcelo Batista Hott, Mario Sato, Oscar Bay Filho, Pedro Israel Ceccon, Roberto da Silva Pinto (†).

RESUMO

SCHRÖDER, Francisco Carlos. **Multi correlações no funcionamento de bombas centrífugas operando em condições regulares e com cavitação moderada.**

Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Unicamp, 2016. 245 páginas, Tese.

Bombas centrífugas são equipamentos rotativos de intensivo uso nos segmentos industriais e de utilidades. O bombeamento de água para fins industriais e de consumo é a maior aplicação para bombas entre todos os outros líquidos. A cavitação é um fenômeno complexo que ocorre no escoamento de água recalçada por bomba e que ainda requer investigações tanto teóricas como experimentais. Dentro desta perspectiva este trabalho correlacionou seis parâmetros de medições físicas, sendo cinco simultaneamente, com a intensidade e previsão dos efeitos danosos na bomba quando operando em regime de cavitação moderada.

A erosão do rotor variou conforme a velocidade de escoamento na tubulação de sucção e apresentou valores de perda de massa suficientes para causar danos mecânicos na bomba centrífuga quando operando com cavitação moderada mesmo por curto período. A potência consumida pela bomba com cavitação moderada aumentou em relação à condição regular de funcionamento levando a uma queda no rendimento hidráulico com conseqüente aumento operacional dos custos de energia. Os níveis de ruídos em todos os ensaios com cavitação moderada mantiveram-se na ordem de 15% superiores à operação regular num nível não permissível à saúde funcional dos operadores da bomba centrífuga. O aumento da temperatura detectada no mancal com a bomba funcionando em regime de cavitação moderada pode reduzir a longo prazo a estimativa de vida útil dos rolamentos devido a combinação de fadiga e degradação do lubrificante. A vibração da bomba com cavitação moderada mostrou-se superior em todos os pontos coletados quando comparados à operação regular, gerando riscos de quebras de componentes. Todas as variações detectadas nos parâmetros com a bomba operando com cavitação moderada podem ser aplicadas no diagnóstico da intensidade do fenômeno e servir de base para as ações corretivas requeridas.

Palavras chave: Bomba centrífuga, cavitação, erosão do rotor, potência consumida, rendimento, ruído, temperatura no mancal, vibração.

ABSTRACT

SCHRÖDER, Francisco Carlos. **Multi correlations in the functioning of centrifugal pumps operating in regular conditions and with moderate cavitation.** Campinas-Brazil: College of Civil Engineering, Architecture and Urbanism at the University of Campinas – Unicamp, 2016. 245 page. Doctoral thesis.

Centrifugal pumps are rotating equipment intensive industries and the utilities. The pumping of water for industrial and consumer purposes is the largest application for pumps among all other liquids. Cavitation is a complex phenomenon that occurs in the flow of repressed water pump and still requires both theoretical and experimental investigations. Within this perspective, this work falls to correlated six parameters of physical measurements, with five simultaneously, to the intensity and prediction of harmful effects on the pump when operating in the moderate cavitation regime.

The rotor erosion varied according to the flow velocity in the suction pipe and presented mass loss values enough to cause mechanical damage to the centrifugal pump when operating with moderate cavitation even for a short period. The power consumed by the pump cavitation moderately increased over the normal operating condition leading to a drop in hydraulic performance with consequent increase in operating energy costs. The noise levels in all trials with moderate cavitation remained in the order of 15% greater than in regular operation na unpermissible functional health level of the centrifugal pump operators. The increase in bearing temperature can reduce the long term estimated life of the bearings due to the combination of fatigue and deterioration of the lubricant. The vibration of the pump with moderate cavitation was superior in all points collected when compared to regular operation, generating risks of componente failures. All variations detected in the parameters with the pump operating at moderate cavitation can be applied to the diagnosis of the phenomenon intensity and form the basis for the required corrective actions.

Word Keys: Centrifugal Pumps, cavitation, rotor erosion, consumed power, performance, noise, temperature in the bearing, vibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de cavitação.....	32
Figura 2.2 – Implosão da bolha vaporosa.....	35
Figura 2.3 – Modelo de formação de núcleo.....	38
Figura 2.4 – Curva característica $NPSH_d$ x Q.....	40
Figura 2.5 – Curva característica $NPSH_r$ x Q.....	41
Figura 2.6 – Curva $NPSH_d$ x $NPSH_r$	41
Figura 2.7 – Dimensões do rotor.....	42
Figura 2.8 – Curva $NPSH_r$ x D_2	44
Figura 2.9 – $NPSH_r$ x Q para 3500 rpm.....	45
Figura 2.10 – $NPSH_r$ x Q para diferentes rotações.....	45
Figura 2.11 – N_s x Tipos de bomba e formas de rotor.....	46
Figura 2.12 – Regime de cavitação x σ	49
Figura 2.13 – N_s x σ_t	50
Figura 3.1 – Erosão do rotor por cavitação.....	53
Figura 3.2 – Curva de perda de massa x Tempo.....	55
Figura 3.3 – Montagem do vibrador de cavitação.....	56
Figura 3.4 – Taxa de perda de massa x Temperatura.....	58
Figura 3.5 – Gerador de cavitação.....	58
Figura 3.6 – Histograma dos pittings.....	59
Figura 3.7 – Perda de massa x Tempo.....	59
Figura 3.8 – MDPR x Temperatura (pH 5,5)	64
Figura 3.9 – MDPR x pH (temperatura 50 °C)	64
Figura 3.10 – Colapso da bolha vaporosa.....	65
Figura 3.11 – MDPR x Granulometria e pH.....	67
Figura 3.12 – Implosão das bolhas e danos na área.....	68
Figura 3.13 – Influência da dureza x Tempo.....	69
Figura 3.14 – Resistência à cavitação x Dureza.....	69
Figura 3.15 – Taxa de erosão por cavitação de ligas comerciais.....	70
Figura 3.16 – Curva Q x P_c	72

Figura 3.17 – Arranjo da instalação.....	73
Figura 3.18 – $P_c \times NPSH_d$	74
Figura 3.19 – Tolerância I.S.O. 9906 grau 2 B.....	75
Figura 3.20 - Esquema da instalação.....	77
Figura 3.21 – $H_i \times Q$ do sistema.....	77
Figura 3.22 – Montagem da bomba com motor.....	78
Figura 3.23 – $\sigma \times Q$	79
Figura 3.24 – Razão $H \times$ Volume de vapor.....	79
Figura 3.25 – Circuito de teste.....	80
Figura 3.26 – Esquema do teste.....	82
Figura 3.27 – $H \times Q$ para 1150 rpm.....	82
Figura 3.28 – Instalação dos ensaios.....	84
Figura 3.29 – Variação sonora $\times \sigma$	85
Figura 3.30 – Emissão acústica para $Q = 425 \text{ m}^3/\text{h} \times NPSH_d$	87
Figura 3.31 – Instalação das bombas.....	88
Figura 3.32 – Ponto de operação sem cavitação e com cavitação.....	89
Figura 3.33 – Montagem do experimento.....	92
Figura 3.34 – Ruídos em diferentes frequências.....	95
Figura 3.35 – Teste da bomba.....	96
Figura 3.36 – Ruído da bomba A em 1600 Hz.....	97
Figura 3.37 – Ruído da bomba B em 1600 Hz.....	97
Figura 3.38 – Esquema do ensaio da bomba.....	98
Figura 3.39 – Fator de pico e Kurtosis $\times Q$	100
Figura 3.40 – Entropia espectral acústica $\times Q$	100
Figura 3.41 – $E_r \times Q$	104
Figura 3.42 – Distribuição do E_a	105
Figura 3.43 – $E_r \times$ Índice de cavitação.....	106
Figura 3.44 – Bomba bi partida.....	107
Figura 3.45 – Tendência de temperatura \times Empuxo.....	108
Figura 3.46 – Arranjo do experimento.....	109

Figura 3.47 – Curva típica do E_r	110
Figura 3.48 – Orientação do E_r	111
Figura 3.49 – Vista da bomba.....	112
Figura 3.50 – Tendência de vibração.....	113
Figura 3.51 – Espectro de vibração da bomba em 2700 rpm.....	117
Figura 3.52 – Instalação da bomba na elevatória.....	119
Figura 3.53 – Curva característica do estudo de caso.....	119
Figura 3.54 – Pontos de medição da vibração.....	120
Figura 3.55 – Limites de vibração conforme IRD.....	122
Figura 3.56 – Classificação I.S.O 2372.....	123
Figura 3.57 – Limite da zona de avaliação.....	123
Figura 3.58 – Espectro de vibração da cavitação.....	125
Figura 3.59 – Perda de material x Viscosidade.....	127
Figura 3.60 – Perda de material x Massa específica do líquido.....	128
Figura 3.61 – Diagrama da montagem.....	129
Figura 3.62 – H x $NPSH_d$ na vazão nominal.....	130
Figura 3.63 – Áreas de líquido e vapor por redução do $NPSH_d$	130
Figura 3.64 – Montagem do ensaio.....	131
Figura 3.65 – Cavitação x Assinatura de vibração.....	132
Figura 3.66 – H_i x $NPSH_d$	135
Figura 3.67 – Potência e torque x $NPSH_d$	135
Figura 3.68 – Cavidades no rotor x $NPSH_d$	136
Figura 3.69 – H_t x $NPSH_d$ para as três bombas.....	137
Figura 3.70 – Volume das bolhas no rotor x $NPSH_d$	138
Figura 3.71 – Dano de erosão por cavitação no rotor.....	139
Figura 3.72 – Ataque na aleta por cavitação tipo vortex.....	140
Figura 3.73 – Ataque na aleta por cavitação no lado da sucção.....	140
Figura 3.74 – Danos combinados de cavitação no rotor e na lingueta da voluta.....	141
Figura 3.75 – Diagrama de ensaio da bomba.....	142
Figura 3.76 – Fluxo nas vizinhanças da lingueta da voluta.....	142

Figura 3.77 – Pontos investigados na curva.....	143
Figura 3.78 – Cavitação na lingueta da voluta.....	143
Figura 3.79 – Luminescência da cavitação	145
Figura 4.1 – Esquema do experimento.....	149
Figura 4.2 – Esquema dos instrumentos portáteis.....	150
Figura 4.3 – Medidor de vazão a montante.....	151
Figura 4.4 – Tanque superior.....	153
Figura 4.5 – Tranquilizador, quebra vórtice e régua de nível.....	153
Figura 4.6 – Tomada de água.....	153
Figura 4.7– Tubulação descendente e válvula.....	153
Figura 4.8 – Tubulação a montante da bomba e transdutores.....	154
Figura 4.9 – Tubulação de recalque a jusante da bomba.....	156
Figura 4.10 – Medidor de vazão a jusante e by-pass.....	156
Figura 4.11 – Sifão invertido e retorno.....	156
Figura 4.12 – Painel de comando.....	158
Figura 4.13 – Inversor de frequência.....	158
Figura 4.14 – Motor elétrico.....	159
Figura 4.15 – Bomba com base, luva e motor.....	160
Figura 4.16 – Principais componentes da bomba.....	160
Figura 4.17 – Bomba instalada.....	161
Figura 4.18 – Balança eletrônica	162
Figura 4.19 – Analisador de energia e conexões.....	163
Figura 4.20 – Decibelímetro com suporte.....	164
Figura 4.21 – Termômetro digital no tanque superior.....	165
Figura 4.22 – Medição com termômetro infravermelho.....	166
Figura 4.23 – Termômetro de mercúrio.....	167
Figura 4.24 – Analisador de vibração e acelerômetro no mancal.....	168
Figura 4.25 – Barômetro.....	169
Figura 4.26 – Oxímetro.....	170
Figura 6.1 – $NPSH_r$ para todas as Q.....	187

Figura 6.2 – Medição do pH da água.....	188
Figura 6.3 – Temperatura LA sem cavitação.....	192
Figura 6.4 – Temperatura LOA sem cavitação.....	192
Figura 6.5 – Espectro de vibração 3HV para $Q = 0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$	193
Figura 6.6 – $P_c \times \Delta\text{NPSH}$	198
Figura 6.7 – $P_c \times \text{Thoma}$	198
Figura 6.8 – Rendimento $\times \Delta\text{NPSH}$	199
Figura 6.9 – Rendimento $\times \text{Thoma}$	200
Figura 6.10 – Ruídos $\times \Delta\text{NPSH}$	201
Figura 6.11 – Ruídos $\times \text{Thoma}$	202
Figura 6.12 – P_c sem cavitação e com cavitação moderada.....	205
Figura 6.13 – Desempenho sem cavitação e com cavitação moderada.....	206
Figura 6.14 – Rendimento sem cavitação e com cavitação moderada.....	207
Figura 6.15 – Ruídos sem cavitação e com cavitação moderada.....	207
Figura 6.16 – Temperatura LA sem cavitação e com cavitação moderada.....	208
Figura 6.17 – Temperatura LOA sem cavitação e com cavitação moderada.....	209
Figura 6.18 – Espectro de vibração 3VV para $Q = 0,0719 \text{ m}^3/\text{s}$	210
Figura 6.19 – Vibração axial sem cavitação e com cavitação moderada.....	211
Figura 6.20 – Vibração 3HV sem cavitação e com cavitação moderada.....	211
Figura 6.21 – Vibração 3VV sem cavitação e com cavitação moderada.....	212
Figura 6.22 – Vibração 4HV sem cavitação e com cavitação moderada.....	213
Figura 6.23 – Vibração 4VV sem cavitação e com cavitação moderada.....	213
Figura 6.24 – Temperatura de estabilização sem cavitação.....	215
Figura 6.25 – Temperatura de estabilização com cavitação moderada.....	216
Figura 6.26 – Rotor de ferro fundido nodular antes do ensaio	221
Figura 6.27– Rotor de ferro fundido nodular após 300 h de ensaio	221
Figura 6.28 – Erosão no canal e aleta do rotor.....	222
Figura 6.29 – Erosão no canal do rotor.....	222
Figura 6.30 – Erosão com foto ampliada.....	223
Figura 6.31 – Profundidade das crateras.....	223

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Pressão de vapor da água.....	40
Tabela 3.1 - Resistência de metais à erosão por cavitação.....	54
Tabela 3.2 - Composição química e dureza dos metais.....	57
Tabela 3.3 - Composição química dos aços inoxidáveis.....	63
Tabela 3.4 - Composição química dos aços.....	65
Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas dos aços.....	66
Tabela 3.6 - Rendimento em campo.....	78
Tabela 3.7 - Parâmetros operacionais e geometria do rotor.....	79
Tabela 3.8 - Condições do teste.....	81
Tabela 3.9 - Condições do teste e comprimento das cavidades.....	81
Tabela 3.10 - Características das bombas.....	87
Tabela 3.11 - Condições operacionais e ruídos.....	90
Tabela 3.12 - Histórico de manutenção da bomba A.....	102
Tabela 3.13 - Histórico de manutenção da bomba B.....	103
Tabela 3.14 - $N_q \times K_{r0}$	110
Tabela 3.15 - Medições de temperatura.....	114
Tabela 3.16 - Níveis de vibração.....	121
Tabela 3.17 - Dureza do material e perda de massa.....	126
Tabela 3.18 - Características mecânicas e perda de material.....	126
Tabela 3.19 - Características do rotor e do experimento.....	129
Tabela 3.20 - Estágios da cavitação.....	132
Tabela 3.21 - Características do ensaio.....	137
Tabela 3.22 - Margem do NPSH.....	147
Tabela 4.1 - Características técnicas do medidor de vazão a montante.....	152
Tabela 4.2 - Características técnicas da válvula de gaveta.....	154
Tabela 4.3 - Características técnicas do mano vacuômetro.....	154
Tabela 4.4 - Características técnicas do transdutor de pressão de sucção.....	155
Tabela 4.5 - Características técnicas do transdutor de pressão de recalque.....	157

Tabela 4.6 - Características técnicas do manômetro.....	157
Tabela 4.7 - Características técnicas do medidor de vazão a jusante.....	157
Tabela 4.8 - Características técnicas do Inversor.....	159
Tabela 4.9 - Características técnicas do motor elétrico.....	159
Tabela 4.10 - Características técnicas da bomba centrífuga.....	161
Tabela 4.11 - Características técnicas da balança eletrônica.....	162
Tabela 4.12 - Características técnicas do analisador de energia.....	163
Tabela 4.13 - Características técnicas do decibelímetro.....	164
Tabela 4.14 - Características técnicas do termômetro digital.....	165
Tabela 4.15 - Características técnicas do termômetro infravermelho.....	166
Tabela 4.16 - Características técnicas do termômetro de mercúrio.....	167
Tabela 4.17 - Características técnicas do analisador de vibração.....	168
Tabela 4.18 - Características técnicas do barômetro.....	169
Tabela 4.19 - Características técnicas do oxímetro.....	170
Tabela 6.1 - NPSH _r para Q = 0,0586 m ³ /s.....	183
Tabela 6.2 - NPSH _r para Q = 0,0619 m ³ /s.....	184
Tabela 6.3 - NPSH _r para Q = 0,0653 m ³ /s.....	184
Tabela 6.4 - NPSH _r para Q = 0,0686 m ³ /s.....	185
Tabela 6.5 - NPSH _r para Q = 0,0719 m ³ /s.....	185
Tabela 6.6 - NPSH _r para Q = 0,0753 m ³ /s.....	186
Tabela 6.7 - Sem cavitação para Q = 0,0586 m ³ /s.....	189
Tabela 6.8 - Sem cavitação para Q = 0,0619 m ³ /s.....	189
Tabela 6.9 - Sem cavitação para Q = 0,0653 m ³ /s.....	189
Tabela 6.10 - Sem cavitação para Q = 0,0686 m ³ /s.....	190
Tabela 6.11 - Sem cavitação para Q = 0,0719 m ³ /s.....	190
Tabela 6.12 - Sem cavitação para Q = 0,0753 m ³ /s.....	190
Tabela 6.13 - Caracterização dos níveis de cavitação para Q = 0,0586 m ³ /s.....	195
Tabela 6.14 - Caracterização dos níveis de cavitação para Q = 0,0619 m ³ /s.....	195
Tabela 6.15 - Caracterização dos níveis de cavitação para Q = 0,0653 m ³ /s.....	195
Tabela 6.16 - Caracterização dos níveis de cavitação para Q = 0,0686 m ³ /s.....	195

Tabela 6.17 - Caracterização dos níveis de cavitação para $Q = 0,0719 \text{ m}^3/\text{s}$	196
Tabela 6.18 - Caracterização dos níveis de cavitação para $Q = 0,0753 \text{ m}^3/\text{s}$	196
Tabela 6.19 - Com cavitação moderada para $Q = 0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$	203
Tabela 6.20 - Com cavitação moderada para $Q = 0,0619 \text{ m}^3/\text{s}$	203
Tabela 6.21 - Com cavitação moderada para $Q = 0,0653 \text{ m}^3/\text{s}$	203
Tabela 6.22 - Com cavitação moderada para $Q = 0,0686 \text{ m}^3/\text{s}$	204
Tabela 6.23 - Com cavitação moderada para $Q = 0,0719 \text{ m}^3/\text{s}$	204
Tabela 6.24 - Com cavitação moderada para $Q = 0,0753 \text{ m}^3/\text{s}$	204
Tabela 6.25 - Erosão do rotor com tubulação de sucção de 0,15 m de diâmetro.....	218
Tabela 6.26 - Erosão do rotor com tubulação de sucção de 0,10 m de diâmetro.....	220
Tabela 6.27 - Taxa de perda de massa com $v = 3,3 \text{ m/s}$	224
Tabela 6.28 - Taxa de perda de massa com $v = 7,5 \text{ m/s}$	224
Tabela 6.29 - Resultados médios dos parâmetros com valores absolutos.....	225
Tabela 6.30 - Resultados médios dos parâmetros com valores relativos.....	225

LISTA DE ABREVIATURAS

API	American Petroleum Institute
BEP	Best Efficiency Point
CFD	Computacional Fluid Dynamics
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
FFT	Fast Fourier Transform
HI	Hydraulic Institute
IRD	Institute de Recherche et Développement
ISO	International Organization for Standardization
LA	Lado acoplado
LABVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LOA	Lado oposto ao acoplado
MATLAB	Matrix Laboratory
RMS	Root Mean Square
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
SDCD	Sistema digital de controle distribuído
SEM	Scanning Electron Microscopy

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	$M^0 L^2 T^0$
AE	Emissão acústica	$M L^{-1} T^{-2}$
b_2	Altura da aleta do rotor	$M^0 L T^0$
Br	Dureza Brinell	$M L^{-1} T^{-2}$
cv	Cavalo Vapor	$M^1 L^1 T^{-2}$
D_2	Diâmetro do rotor	$M^0 L T^0$
D_r	Diâmetro de recalque	$M^0 L T^0$
D_s	Diâmetro de sucção	$M^0 L T^0$
dB	Decibel	$M L^{-1} T^{-2}$
E	Módulo de Elasticidade	$M L^{-1} T^{-2}$
E_a	Empuxo axial	$M L^{-1} T^{-2}$
E_r	Empuxo radial	$M L^{-1} T^{-2}$
f	Fator de atrito	$M^0 L^0 T^0$
F_{it}	Força de impulsão da mudança de trajetória do líquido	$M L^{-1} T^{-2}$
F_{pa}	Força da pressão atmosférica na extremidade do eixo	$M L^{-1} T^{-2}$
F_{pd}	Força da pressão variável na parede dianteira do rotor	$M L^{-1} T^{-2}$
F_{ps}	Força da pressão de sucção na seção dianteira do rotor	$M L^{-1} T^{-2}$
F_{pt}	Força da pressão variável na parede traseira do rotor	$M L^{-1} T^{-2}$
ft	Pés	$M^0 L T^0$
GPM	Galões por minuto	$M^0 L^3 T^{-1}$
g	Aceleração da gravidade	$M^0 L T^{-2}$
H	Altura de elevação	$M^0 L T^0$
H_r	Altura de elevação de recalque	$M^0 L T^0$
H_s	Altura de elevação de sucção	$M^0 L T^0$
H_t	Altura de elevação total	$M^0 L T^0$
Hv	Dureza Vickers	$M^0 L^0 T^0$
HV	Velocidade na posição horizontal	$M^0 L^{-1} T^{-2}$
hfl	Perdas de carga localizadas	$M^0 L T^0$
hfr	Perdas de carga no recalque	$M^0 L T^0$

hfs	Perdas de carga na sucção	$M^0 L T^0$
hg	Altura geométrica	$M^0 L T^0$
hz	Altura estática	$M^0 L T^0$
IR	Indicador de resistência	$M^0 L T^0$
lpc	Incerteza padrão combinada	$M^0 L T^0$
K	Coefficiente de sucção	$M^0 L^0 T^0$
Kc	Fator relativo de tensão de sobre carga de cavitação	$M^0 L^{-1} T^{-2}$
k	Coefficiente de rugosidade	$M^0 L T^0$
kc	Coefficiente de perda localizada	$M^0 L^0 T^0$
k _r	Coefficiente de empuxo radial	$M^0 L^0 T^0$
k _{r0}	Coefficiente de empuxo radial de shutt-off	$M^0 L^0 T^0$
kW	Kilowatt	$M^1 L^1 T^{-2}$
L	Comprimento da tubulação	$M^0 L T^0$
Lbf	Libra força	$M L^{-1} T^{-2}$
MDPR	Middle Depth Penetration Rate	$M^0 L^1 T^0$
mcl	Metro coluna de líquido	$M^0 L T^0$
n	Expoente genérico	$M^0 L^0 T^0$
NPSH	Net Positive Suction Head	$M^0 L^1 T^0$
NPSH _d	NPSH disponível	$M^0 L^1 T^0$
NPSH _r	NPSH requerido	$M^0 L^1 T^0$
N	Rotação do acionador	$M^0 L^0 T^{-1}$
N _q	Velocidade específica	$M^0 L^0 T^0$
N _s	Rotação específica	$M^0 L^0 T^0$
OD	Oxigênio dissolvido	$M^0 L^0 T^0$
P _a	Pressão atmosférica	$M L^{-1} T^{-2}$
P _{abs}	Pressão absoluta	$M L^{-1} T^{-2}$
P _c	Potência consumida	$M L^2 T^{-3}$
P _{fr}	Pressão no flange de recalque	$M L^{-1} T^{-2}$
P _{fs}	Pressão no flange de sucção	$M L^{-1} T^{-2}$
P _o	Pressão de referência no escoamento	$M L^{-1} T^{-2}$

P_{ot}	Potência elétrica	$M^1 L^1 T^{-2}$
P_v	Pressão de vapor	$M L^{-1} T^{-2}$
Q	Vazão	$M^0 L^3 T^{-1}$
Q_n	Vazão nominal	$M^0 L^3 T^{-1}$
R	Raio da bolha vaporosa	$M^0 L T^0$
R_a	Rugosidade média	$M^0 L T^0$
Re	Reynolds	$M^0 L^0 T^0$
T	Torque	$M L^2 T^{-2}$
T_N	Tensão média aplicada para caracterização de fadiga	$M L^{-1} T^{-2}$
UR	Resiliência última	$M^0 L T^0$
VV	Velocidade na posição vertical	$M^0 L T^{-2}$
v	Velocidade do escoamento	$M^0 L T^{-2}$
v_r	Velocidade no recalque	$M^0 L T^{-2}$
v_s	Velocidade na sucção	$M^0 L T^{-2}$
α_c	Resistência à cavitação	$M^0 L^0 T^0$
γ	Peso específico	$M L^{-2} T^{-2}$
δ_e	Resistência ao escoamento	$M L^{-1} T^{-2}$
δ_f	Resistência à fadiga	$M L^{-1} T^{-2}$
δ_t	Resistência à tração	$M^{-1} L^{-1} T^{-2}$
ϵ	Taxa de erosão	$M^0 L^0 T^0$
η	Rendimento	$M^0 L^0 T^0$
ϕ	Constante adimensional	$M^0 L^0 T^0$
λ	Coefficiente de redução	$M^0 L^0 T^2$
ν	Viscosidade cinemática	$M^0 L^2 T^{-1}$
ρ	Massa específica	$M L^{-3} T^0$
σ	Índice de cavitação	$M L^{-2} T^0$
σ_c	Fator de Thoma crítico	$M L^{-2} T^0$
σ_t	Fator de Thoma	$M L^{-2} T^0$

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	24
INTRODUÇÃO.....	24
1.1 OBJETIVO.....	25
1.2 MOTIVAÇÃO.....	26
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	28
CAPÍTULO 2.....	29
CONCEITOS DO FENÔMENO.....	29
2.1 DEFINIÇÕES DA CAVITAÇÃO.....	29
2.2 CLASSIFICAÇÕES DA CAVITAÇÃO.....	31
2.3 NUCLEAÇÃO.....	34
2.4 PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO.....	39
2.4.1 NPSH.....	39
2.4.2 Velocidade e Rotação Específica.....	46
2.4.3 Índice de Cavitação e fator de Thoma.....	47
2.4.4 Influência do Ar dissolvido na Água.....	50
CAPÍTULO 3.....	53
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	53
3.1 EROSÃO DO ROTOR.....	53
3.1.1 Comentários.....	70
3.2 POTÊNCIA CONSUMIDA.....	72
3.2.1 Comentários.....	75
3.3 RENDIMENTO.....	76
3.3.1 Comentários.....	83
3.4 RUÍDOS.....	83
3.4.1 Comentários.....	101

3.5 TEMPERATURA NO MANCAL.....	102
3.5.1 Empuxo Radial.....	103
3.5.2 Empuxo Axial.....	105
3.5.3 Comentários.....	114
3.6 VIBRAÇÃO.....	116
3.6.1 Comentários.....	121
3.7 OUTROS EXPERIMENTOS.....	125
3.7.1 Comentários.....	147
CAPÍTULO 4.....	149
EXPERIMENTO.....	149
4.1 CIRCUITO DE ÁGUA.....	151
4.2 ACIONAMENTO E BOMBEAMENTO.....	158
4.3 INSTRUMENTOS PORTÁTEIS	162
CAPÍTULO 5.....	171
MÉTODO.....	171
5.1 ROTEIRO GERAL E SIGNIFICADO DOS TERMOS.....	171
5.2 DESCRIÇÃO DAS MEDIÇÕES.....	176
5.3 ETAPA DO $NSPH_R$	177
5.4 ETAPA DA ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA NO MANCAL COM A BOMBA OPERANDO SEM CAVITAÇÃO.....	178
5.5 ETAPA DA OPERAÇÃO REGULAR DA BOMBA.....	179
5.6 ETAPA DA CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS DE CAVITAÇÃO INCIPIENTE, CRÍTICA, MODERADA E DESENVOLVIDA.....	180
5.7 ETAPA DA ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA NO MANCAL COM A BOMBA OPERANDO COM CAVITAÇÃO MODERADA.....	181
5.8 ETAPA DA OPERAÇÃO DA BOMBA COM CAVITAÇÃO MODERADA.....	181
5.9 ETAPA DA EROSIÃO DO ROTOR.....	181
CAPÍTULO 6.....	183
RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS.....	183
6.1 $NPSH_r$	183

6.2 OPERAÇÃO REGULAR DA BOMBA.....	188
6.3 CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS DE CAVITAÇÃO INCIPIENTE, CRÍTICA, MODERADA E DESENVOLVIDA.....	194
6.4 OPERAÇÃO DA BOMBA COM CAVITAÇÃO MODERADA.....	202
6.5 ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA NO MANCAL COM A BOMBA OPERANDO SEM CAVITAÇÃO E COM CAVITAÇÃO MODERADA.....	214
6.6 EROÇÃO DO ROTOR.....	217
6.7 RESUMO DOS PARÂMETROS AVALIADOS.....	225
6.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	227
CAPÍTULO 7.....	230
CONCLUSÕES.....	230
CAPÍTULO 8.....	233
RECOMENDAÇÕES.....	233
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	235

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Bombas para transferência de água são máquinas aplicadas intensivamente em indústrias petroquímicas, de alimentos, bebidas, metalúrgica e de papel e celulose bem como em companhias de água e esgoto, plantas de geração de energia, construção civil, drenagem, mineração e outros segmentos expressivos da economia moderna. Embora a água seja bombeada em diferentes temperaturas conforme o uso, o recalque à temperatura ambiente representa a maioria das aplicações, sejam para utilidades, drenagem, irrigação, refrigeração ou consumo humano e animal.

No mercado mundial, anualmente são estimadas receitas da ordem de cinquenta bilhões de dólares pelos fabricantes de bombas, e, dentre os principais tipos produzidos por esta indústria destacam-se as alternativas como as de pistão, rotativas de engrenagens e centrífugas, estas últimas correspondendo a aproximadamente setenta por cento de todo o volume e faturamento do segmento.

Estas bombas centrífugas podem também ser sub classificadas como de eixos horizontais, verticais ou submersíveis conforme posicionamento em relação à instalação, além de serem axiais ou radiais, estas, as mais numerosas em aplicações gerais.

As bombas centrífugas radiais podem ter um único ou múltiplos rotores, particularidades construtivas como monobloco quando o conjunto acionador tem um eixo comum ao da bomba, base e luva quando a transmissão é realizada com acoplamento de dois distintos eixos, e outras diferenças que entretanto, não descaracterizam a denominação de bomba centrífuga radial. Neste trabalho será

considerada a bomba centrífuga radial mono estágio horizontal, sem modificações com o propósito de reduzir os efeitos da cavitação como, por exemplo, o uso de indutores ou revestimentos do rotor com elastômeros, bombeando água não potável, mas limpa, à temperatura ambiente.

Nos setores industriais ou de utilidades, a conservação e manutenção de bombas centrífugas representam expressivos recursos de mão de obra e materiais. As não conformidades de campo geradas por fenômenos como golpe de aríete, recirculação, turbulências e cavitação são problemas complexos, e de altos custos de solução com impactos de perdas de produção relevantes.

A cavitação em bombas é um fenômeno de grande interesse científico e técnico que pode ocorrer na transferência de água. Apesar deste interesse, tanto a conceituação teórica como a modelação numérica ou técnicas experimentais, ainda são insuficientes para um completo entendimento do tema, o que leva a inúmeros artigos, modelagem e ensaios com propósito de explicar o problema investigado.

Engenheiros, técnicos e outros profissionais envolvidos na instalação e manutenção, assim como os colaboradores dos fabricantes de bombas utilizam-se dos fundamentos teóricos e dos experimentos já realizados na área com a finalidade de compreender as causas, mensurar os efeitos e prevenir os danos causados por cavitação em bombas centrífugas.

Dada a complexidade da cavitação é comum investigar relações de causa e efeitos isoladamente. Contudo uma abordagem de correlações multicritérios dos parâmetros como a erosão do rotor, potência consumida, rendimento, ruído, temperatura no mancal e vibração pode contribuir para identificar e solucionar problemas com cavitação em nível moderada antes de causar maiores prejuízos.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estabelecer correlações dos parâmetros de potência consumida, rendimento, ruído, temperatura no mancal e vibração de uma bomba centrífuga funcionando com cavitação moderada, medidos de forma conjunta, e, a erosão do rotor como marcador adicional deste fenômeno, gerando

valores práticos destes parâmetros, substituindo termos genéricos como queda discreta de rendimento, altos ruídos ou severa vibração, para uso como ferramenta de diagnose em campo, da intensidade da cavitação e tomada de ações corretivas.

O método empregado no experimento utiliza equipamentos de medições acessíveis à maioria das instalações com grau de confiabilidade para estabelecer a correlação.

1.2 MOTIVAÇÃO

A motivação para este trabalho é baseada no conjunto de seis fatores experimentais que ainda não foram investigados completamente e que se esclarecidos, podem colaborar para a diagnose e ação corretiva em bombas centrífugas operando em regime de cavitação moderada.

1 - Esta investigação é executada com uma bomba centrífuga de uso comum em instalações industriais e de utilidades e prevê a eliminação dos complexos efeitos de escala envolvidos na cavitação, quando de ensaios em laboratórios com equipamentos de pequeno porte.

Além disso, em muitos dos experimentos de cavitação são utilizados técnicas para geração do fenômeno com discos rotativos, dispositivos vibratórios ou ultrassônicos ou venturis que nem sempre reproduzem as condições reais das operações com bomba nas instalações industriais ou de utilidades.

2 - Esta investigação utiliza instrumentos de medições que podem ser transferidos para a maioria das instalações de campo ao contrário de vários ensaios de laboratório onde predominam equipamentos como interfaces transparentes para detecção de bolhas vaporosas na cavitação incipiente ou hidrofones como técnica acústica que apesar de suas excelentes resoluções são praticamente inviáveis para instalação em campo.

3 - Esta investigação emprega a correlação multicritérios na análise da cavitação. Os experimentos normalmente empregam formas isoladas de avaliação, como perda de massa do rotor, ruídos ou vibrações de uma bomba centrífuga. Os resultados de diferentes parâmetros obtidos nos ensaios individuais não podem ser

comparados devido às variações de configurações e método empregados. Neste trabalho com os parâmetros sendo medidos simultaneamente, espera-se obter um quadro de orientação de todas as tendências das grandezas selecionadas.

4 - Esta investigação pretende esclarecer dois aspectos eletromecânicos do conjunto moto bomba, que ainda permanecem com indefinições, sejam por contradições ou por não existir ensaios suficientes. O primeiro refere-se aos esforços mecânicos adicionais gerados pela cavitação moderada e que age sobre o mancal de rolamentos da bomba. Esta variação se existente e significativa, poderá ser percebida através da variação da temperatura no mancal.

O segundo aspecto refere ao comportamento da potência consumida pela bomba durante o evento da cavitação, se a tendência é de aumento ou não, visto que ainda existem dúvidas nas pesquisas realizadas, umas obtendo um aumento e outras uma redução, devido às variações de eficiência nesta condição.

5 - Esta investigação analisa a cavitação moderada que causa falhas significativas aos sistemas de bombeamento, ao contrário de muitos experimentos que normalmente simulam a cavitação incipiente que pode ser tolerada em muitas das instalações por não causar relevantes falhas à bomba, mesmo em operações contínuas.

6 - Por último esta investigação pretende estabelecer valores práticos dos parâmetros analisados para diagnose em campo dos equipamentos acerca da erosão do rotor, potência do motor, rendimento, ruído, temperatura no mancal e vibração da bomba quando da operação com cavitação moderada, valores estes que serão comparados com normas existentes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para o desenvolvimento dessa tese, o tema foi dividido em oito capítulos, e os conteúdos são resumidos a seguir:

No primeiro capítulo é contextualizado o objetivo do trabalho e o fenômeno a ser analisado, além da motivação que justifica a execução do experimento, que pode preencher lacunas existentes entre as investigações atuais, e a possibilidade de reproduzir os resultados obtidos em campo. No segundo capítulo são apresentados os conceitos e classificações da cavitação, a nucleação da bolha vaporosa e os principais parâmetros de caracterização do fenômeno. A seguir, no terceiro capítulo na revisão bibliográfica, são apresentados os principais artigos dos últimos anos sobre a cavitação, com ênfase na experimentação e de parâmetros usualmente empregados em diagnose de bombas centrífugas. O quarto capítulo descreve a configuração hidrodinâmica, os equipamentos e a instrumentação portátil utilizada no experimento. O quinto capítulo descreve o método dos ensaios, as condições e os procedimentos das medições. O sexto capítulo, apresenta os resultados dos ensaios, as correlações obtidas e os desvios e precisões das grandezas avaliadas. A seguir no sétimo capítulo são elaboradas as conclusões do trabalho e as comparações dos valores com as normas referenciadas. No oitavo capítulo são feitas as recomendações sobre trabalhos futuros que possam complementar as correlações, e as previsões sobre os danos em bombas centrífugas. E finalmente são relacionadas as referências bibliográficas consultadas.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS DO FENÔMENO

2.1 DEFINIÇÕES DA CAVITAÇÃO

Num escoamento de um líquido a uma dada temperatura, a redução da pressão até o valor da pressão de vapor forma uma mistura líquida e gasosa, com a geração de bolhas ou cavidades, origem do termo cavitação. A pressão de vapor cresce com o aumento da temperatura até o limite da evaporação total do líquido. O líquido pode vaporizar a baixas pressões na sucção das bombas à temperatura ambiente, limitando a aspiração da mesma e causando efeitos indesejáveis em seu funcionamento. É conveniente separar o fenômeno da cavitação causado predominantemente pela redução de pressão do líquido numa dada temperatura constante, do fenômeno da ebulição, onde a formação de bolhas de vapor é causada pela elevação de temperatura do líquido, ou seja, apesar de análogos, as causas dos dois fenômenos são distintas. Para definição do fenômeno cavitação citamos:

Conforme PETERKA (1953), cavitação é a formação de cavidades de vapor criadas no escoamento de um líquido pela existência de pressões inferiores a pressão de vapor.

Conforme STRASBERG (1956), a cavitação corresponde ao crescimento de cavidades microscópicas ou núcleos de cavitação até sua dimensão visível, núcleos estes constituídos por vapor não dissolvido no líquido cujo crescimento ocorre quando a pressão neste líquido atinge certo valor crítico.

Conforme ARNDT e IPPEN (1968), a cavitação é definida como o processo de formação de uma fase de vapor num líquido, quando sujeito a baixas pressões.

Conforme CANAVELLIS (1968), cavitação é a formação de cavidades num líquido, a partir de núcleos gasosos microscópicos.

Conforme ABECASIS (1970), cavitação é um fenômeno dinâmico que consiste na formação e colapso subsequente de cavidades ou bolhas, cheias de vapor, num líquido em escoamento.

Conforme TULLIS (1982), a cavitação normalmente ocorre quando o líquido a uma temperatura constante é submetido quer por meios estáticos quer por meios dinâmicos à pressão de vapor. Existem dois tipos de cavitação, a gasosa e a vaporosa. A cavitação gasosa ocorre quando existe uma considerável quantidade de ar em suspensão no líquido ou quando o processo de cavitação é suficientemente lento para permitir o aumento da quantidade de ar no interior das cavidades de vapor. A taxa de crescimento e colapso da bolha é muito mais lenta para a cavitação gasosa devido à presença de ar livre, conseqüentemente o processo não é tão violento e normalmente não cria uma situação de interesse técnico científico.

Conforme TOMÁS (1986), cavitação é um fenômeno suscetível de ser desencadeado em qualquer meio líquido, em pontos onde efeitos de caráter dinâmico possam originar uma diminuição local da pressão até um determinado valor crítico assimilável, em termos práticos, à pressão de vapor saturante correspondente à temperatura local.

Conforme DALFRÉ FILHO (2002), os líquidos e em particular a água utilizada em sistemas hidráulicos não é pura. Conforme BISTAFA (1994) medidas indiretas de tensões de tração em água previamente pressurizada a fim de eliminar bolhas de ar indicam valores de 2,5 atm. Para água sem qualquer tratamento prévio de pressurização, não se conseguiu tracioná-la. Isto leva a crer que existem pontos fracos nos líquidos que eliminam sua capacidade de resistir à tração. Estes pontos são denominados núcleos de cavitação devido ao fato de que é a partir deles que o líquido se rompe formando cavidades. Dentre as várias formas de núcleos de

cavitação propostas, aquelas que parecem ser mais atuantes são bolhas de ar, bolsas alojadas em impurezas ou em irregularidades superficiais.

2.2 CLASSIFICAÇÕES DA CAVITAÇÃO

A cavitação pode ocorrer tanto no líquido em escoamento como em repouso, como por exemplo, em consequência de excitação sonora ou vibratória. Neste trabalho o objetivo é a análise e a compreensão dos efeitos hidrodinâmicos, ou seja, da cavitação com líquidos em escoamentos, apesar deste estudo citar muitos dos resultados originados em ensaios com o líquido em repouso.

A cavitação também é encontrada em outros equipamentos rotativos como hélices de agitadores, pás de navios, turbinas hidráulicas e dispositivos estáticos como válvulas, venturis e outros, sujeitos ao escoamento de líquidos.

KNAPP (1970) classifica a cavitação em quatro tipos conforme segue:

-Cavitação móvel ou do termo inglês original “travelling cavitation” onde as bolhas de vapor se formam na zona de baixa pressão do líquido, crescem e deslocam-se até o seu colapso numa área de maior pressão. Neste colapso produz danos principalmente na região mais próxima à superfície sólida, sendo que é possível replicar os danos com menores intensidades nas áreas adjacentes.

-Cavitação fixa, onde as bolhas de vapor crescem até um limite máximo e permanece praticamente constante em número e volume durante o escoamento até seu colapso normalmente por recirculação do fluxo a montante da zona de alta pressão.

-Cavitação vortex, onde as bolhas são formadas no núcleo de vórtices, normalmente na ponta das aletas dos rotores, por isso também denominada de cavitação de ponta.

-Cavitação vibratória, gerada por movimentos oscilatórios do líquido e que requer que a superfície submersa vibre numa frequência e amplitude suficiente para fazer com que a pressão caia abaixo da pressão de vapor.

TOMÁS (1986), traduz o grau de desenvolvimento da cavitação através de cinco designações:

-Cavitação incipiente determinado pelo valor do índice crítico de cavitação;

-Cavitação reduzida que exprime as primeiras manifestações do fenômeno;

-Cavitação moderada correspondente ao limiar das condições estáveis do escoamento;

-Cavitação desenvolvida onde se observam os níveis máximos de ruídos e vibrações obtidos em altas frequências;

-Cavitação fortemente desenvolvida representando uma fase posterior à máxima intensidade, contudo, com uma contraditória redução dos níveis de ruídos e vibrações.

BOUZIAD (2006), classifica diferentes tipos de cavitação em função das configurações de fluxo e que podem ser agrupadas em quatro modelos ilustrados pela figura 2.1.:

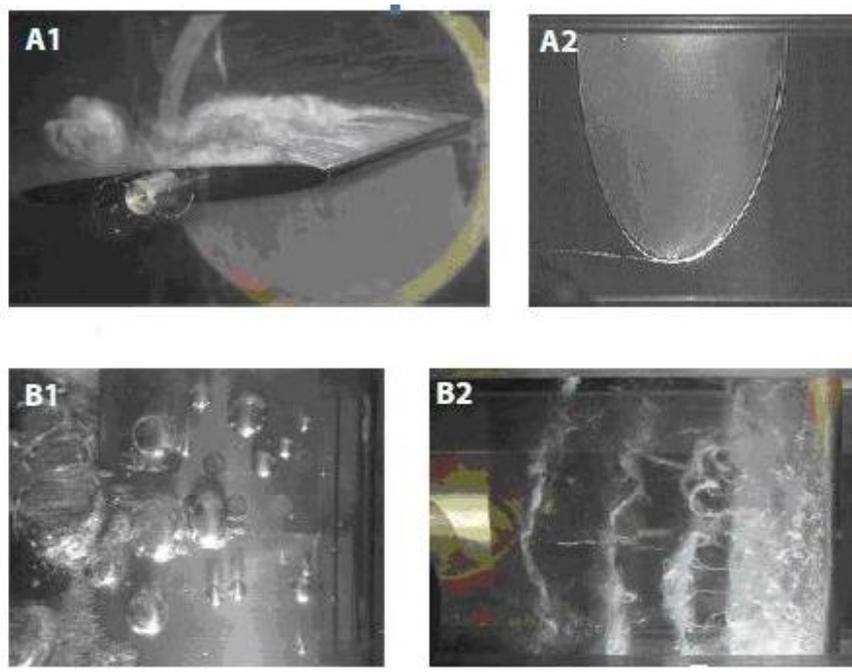


Figura: 2.1: Tipos de Cavitação
Fonte: Bouziad, 2006

A1 - A cavitação de ponta também conhecida como cavitação de folha tem como característica cavidades dispostas de modo uniforme, formando uma fina camada na interface líquida-vapor e superfície sólida.

A2 - A cavitação de vórtice ocorre em núcleos turbulentos, normalmente nas extremidades de aletas rotativas, com elevado cisalhamento.

B1 - A cavitação de bolha surge em gradientes de baixa pressão com bolhas deslocando-se no líquido até seu colapso em zonas de maiores pressões.

B2 - A cavitação de vórtice por convecção é expressa pela esteira de Von Kármán.

Outra proposta genérica de uso em vários trabalhos, para a classificação da intensidade de cavitação estabelece os seguintes níveis:

- Cavitação incipiente, representando os primeiros sinais acústicos aleatórios perceptíveis, sem vibração mensurável e também com pouca possibilidade de danos significativos.

- Cavitação crítica, com produção de ruídos contínuos e vibrações iniciais, sendo esperada erosão somente após longos períodos de operação com esta ocorrência.

- Cavitação com danos incipientes, com ruídos altos, vibrações moderadas e com início de erosão de superfícies.

- Cavitação desenvolvida ou com bloqueio, com ruídos e vibrações excessivas e intenso desgaste por erosão do rotor e voluta. O escoamento torna-se extremamente instável.

Estes níveis em geral somente podem ser determinados através de experimentos com bombas e sistemas operando em regime específico, por exemplo, bombeando água a temperatura controlada, numa faixa de vazão. Tal dificuldade de generalização causa obstáculos nas análises de instalações industriais e de utilidades e constituem um problema para detecção e tomada de ação preventiva das não conformidades geradas pela cavitação.

A escolha dos níveis intermediários de cavitação para este trabalho, ou cavitação moderada que corresponde em alguns critérios à cavitação com danos incipientes, é explicada primeiramente pelo fato de que a cavitação incipiente não representa danos que justifiquem ações corretivas imediatas, até porque em muitas instalações existem bombas operando neste regime sem qualquer impacto de custos. E segundo, que a cavitação desenvolvida ou com bloqueio representa um número menos significativo de casos reais em campo devido à ação urgente de correção visto que em tal situação os riscos de perdas de produção e altos custos de manutenção, sem mencionar riscos de segurança, são altos, justificando a substituição da bomba ou de parte das instalações de sucção.

Abaixo, uma estimativa dos casos de bombas centrífugas funcionando com cavitação nas instalações industriais e de utilidades, baseadas em cerca de oitenta estudos de caso realizadas por SCHRÖDER (2009) e classificadas de acordo com as informações e técnicas disponíveis na época dos eventos.

- 57,5% com cavitação incipiente ou crítica/ reduzida;
- 36,3% com cavitação moderada ou com danos incipientes;
- 6,2% com cavitação desenvolvida ou com bloqueio.

Apesar das referências sobre cavitação induzirem a efeitos nocivos, é necessário salientar que em determinadas situações pode se utilizar do fenômeno de modo controlado para obtenção de efeitos úteis, como para acelerar processos químicos na agitação e mistura de produtos industriais, para destruição de microorganismos prejudiciais a saúde humana, para servir de mecanismo de controle em certos equipamentos como venturis, para ser aproveitado como dispositivo de limpeza de superfícies e até para perfuração de minerais.

2.3 NUCLEAÇÃO

A cavitação inicia-se com a redução de pressão no escoamento gerando um desequilíbrio nas frações de gases existentes no líquido, e originando a formação de cavidades ou bolhas de vapor. Estas bolhas crescem de forma exponencial devido à vaporização e são arrastadas pela corrente do escoamento até

atingirem regiões de pressões mais elevadas, quando são implodidas ou colapsadas. As bolhas são então absorvidas pelo líquido promovendo sua extinção.

No caso de bombas, a formação de bolhas cheias de vapor ou de gases dissolvidos varia no espaço e tempo, e são arrastadas até a zona de alta pressão gerada pelo movimento do rotor no interior da voluta, onde são implodidas.

A sequencia do possível modo de colapso da bolha na zona de alta pressão é ilustrada na figura 2.2, onde as duas primeiras imagens caracterizam a deformação da bolha devido a gradientes de pressão, e as duas finais, os estágios de colapso ou implosão com a formação de micro jatos de líquido direcionados à superfície sólida.

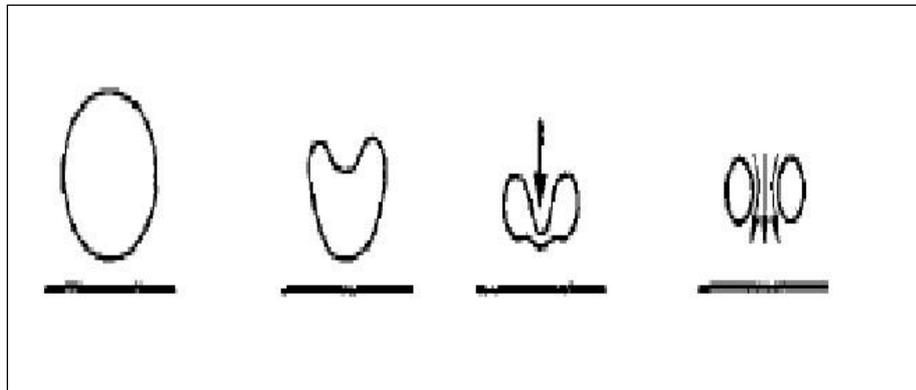


Figura 2.2 - Implosão da bolha vaporosa
Fonte: Grein e Wyss, 1974

Esta conceituação corresponde a uma simplificação do fenômeno visto que tanto a geração de bolhas ou cavidades como sua implosão são motivo de complexas hipóteses e experimentos que ainda hoje recebem contribuições.

Em função de não estar completamente estabelecida a caracterização da nucleação devido às inúmeras variáveis geométricas, hidrodinâmicas e termodinâmicas envolvidas, de uma método único comparativo e também pelas dificuldades de observação do fenômeno nas instalações, a análise e predição deste fenômeno constituem um dos principais desafios científicos.

É importante ressaltar que mudanças de fases líquido-vapor-líquido ocorrem em frações de segundos tornando sua observação difícil.

Conforme STINEBRING (1979), as predições teóricas acerca das características da bolha de vapor muitas vezes não correspondem aos resultados experimentais devido os efeitos de escala que surgem a partir de variações de velocidade, do tamanho das superfícies, das propriedades dos líquidos, da distribuição espacial das bolhas no escoamento, das flutuações de pressões e outros efeitos relacionados à transferência de calor e ao próprio tempo do evento.

Conforme TULLIS (1982) existem três requisitos fundamentais para que ocorra a cavitação.

- A existência de núcleos, ou bolhas no sistema que servem de base para a vaporização do líquido;

- A pressão em algum ponto do líquido deve cair instantaneamente para a pressão de vapor;

- A pressão em volta da cavidade deve ser superior à pressão de vapor de forma a provocar a sua implosão

É importante ressaltar que para que ocorra a cavitação, deverá existir previamente no líquido, núcleos ou bolhas, ou seja, se no sistema reservatório e tubulações de sucção, o ar for completamente eliminado, não haverá cavitação quando a pressão cair até a pressão de vapor.

Estes núcleos são de difíceis eliminações práticas, visto que estão presentes como bolhas de ar livre, ou presas em fissuras do material de contorno, ou suspensas como contaminantes.

Conforme FACEIRA (1982) o processo de cavitação ocorre no caso geral com as seguintes fases:

- Formação de cavidades ou bolhas constituídas fundamentalmente por vapor de líquido,

- Crescimento destas cavidades como consequência de um fenômeno de vaporização rápida provocada por uma diminuição de pressão,

- Transporte pelo escoamento destas cavidades ou bolhas até seu colapso brusco como resultado da condensação do respectivo vapor, provocado pelo aumento da pressão em relação a valores críticos.

O colapso das cavidades ou bolhas de vapor é consequência do efeito conjugado de vários fatores como gradiente de pressão, viscosidade do líquido, presença de fronteira sólida e outros parâmetros de modo que seu colapso real processa-se sem a simetria esférica das hipóteses teóricas, e que resulta na formação de um jato microscópico do líquido com alta velocidade.

Conforme TOMÁS (1982), os núcleos de cavitação são formados por micro domínios permanentes como:

- Gases não dissolvidos;
- Vapor dos líquidos;
- Mistura de gases não dissolvidos e vapor.

Em função de vários experimentos com água, tem-se observado que:

- A cavitação é mais difícil de produzir com água que tenha sido previamente desareada;
- A cavitação com água é facilitada após o colapso de uma bolha de vapor ou após a introdução de um objeto que tenha sido exposto ao ar.

Estes fatos são explicados pela presença de núcleos gasosos não dissolvidos, uma vez que o desareamento provoca a destruição dos núcleos, o que se traduz por um aumento da resistência à tração da água ensaiada. No oposto, o prévio colapso de uma bolha de vapor ou o contato com um objeto pode aumentar as dimensões dos núcleos existentes ou introduzir novos elementos. A forma e processo que estes núcleos persistem no interior do líquido é motivo de investigação visto que pelas teorias convencionais estes deveriam tender ao desaparecimento por movimento ascensional à superfície ou serem dissolvidos ou condensados. A forma aceitável dos núcleos, se tratando de água comum são bolhas gasosas livres e aderentes a partículas sólidas.

Quanto às dimensões relevantes para que um núcleo permaneça num escoamento com água sem ascender à superfície é na prática inferior a 10^{-6} m.

Numa solução sub saturada com gases dissolvidos, os núcleos tendem a um processo de dissolução progressiva, enquanto para uma solução saturada os núcleos tendem a estabilidade e por fim numa solução sobressaturada determinam um aumento progressivo das dimensões dos núcleos ou bolhas vaporosas. Dentre os modelos que explicam a permanência de núcleos gasosos no interior dos líquidos, o mais aceito é o proposto por HARVEY (1947), conceito que sustenta que os núcleos gasosos não dissolvidos podem estar presentes num líquido como bolsas em forma de cunha apesadas na base microscópica de fendas ou fissuras de superfícies sólidas em contato com o líquido, conforme figura 2.3.

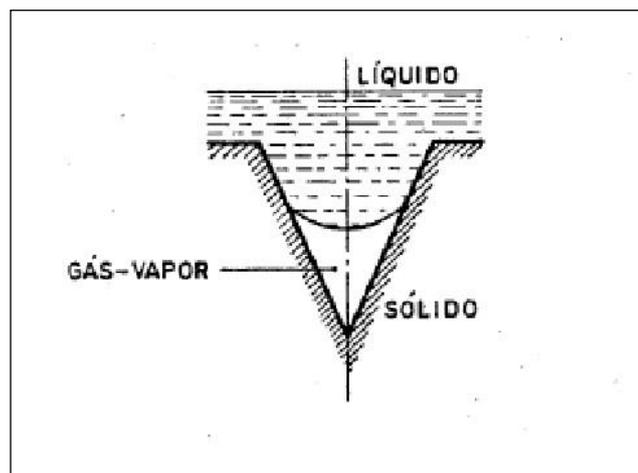


Figura 2.3: Modelo de formação de núcleo
Fonte: Harvey, 1947

Estas superfícies sólidas tanto podem ser as fronteiras do escoamento como partículas contaminantes dispersas. Admite-se que as superfícies sólidas possuem estes interstícios como produto inerente à sua fabricação ou por não estarem suficientemente limpos, podendo facilmente atuar como alojamentos de micro domínios gasosos não dissolvidos. Sob condição de pressões reduzidas a bolsa acaba por emergir da fenda e aumentar de dimensões no escoamento, estabelecendo condições para sua vaporização e desencadeamento da cavitação.

A pressão crítica necessária para provocar a instabilidade dos núcleos é sempre inferior à pressão de vapor e o valor desta redução está relacionada à dimensão inicial dos núcleos. A partir de um raio crítico o núcleo cresce de forma

exponencial por vaporização do líquido gerando uma bolha com considerável volume.

2.4 PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO

Para caracterização da cavitação são utilizadas grandezas específicas como a altura positiva líquida de sucção (NPSH), o Índice de cavitação e o fator de Thoma.

2.4.1 NPSH – Net Positive Suction Head

A sigla proveniente do inglês NPSH, a mais utilizada pelos projetistas envolvidos em análise da cavitação é apresentado de duas formas, a primeira em relação à instalação, denominado disponível, e o outro em relação a bomba, denominado requerido.

O NPSH disponível (NPSH_d) refere-se a pressão total do sistema tomado no flange de sucção da bomba para uma vazão e temperatura da água. É também definido como a energia de pressão acima da pressão de vapor com que o líquido penetra no flange de sucção da bomba ou ainda, corresponde à energia disponível para conduzir o líquido através da tubulação de sucção até o flange da voluta da bomba. O NPSH_d é uma característica da instalação da bomba com termos dependentes da localização, da temperatura e características do líquido e da configuração hidráulica do sistema e independe da bomba ou de seu acionador.

O cálculo é aplicado tanto para bomba aspirando com nível de sucção do líquido abaixo ou acima da linha de centro do eixo da bomba.

Aplicando-se a equação de energia entre a superfície do reservatório de sucção e o flange de entrada da bomba e considerando a parcela relativa à energia cinética na sucção, tem-se a equação (1) conforme GULICH(2008):

$$NPSH_{d=} \frac{P_a - P_v}{\gamma} \pm h_z - h_{fs} + \frac{v_s^2}{2g} \quad (1)$$

A pressão atmosférica (P_a) varia com a altitude e para locais até 2.000 m acima do nível do mar, a equação (2) conforme PORTO (2006) fornece a coluna de água correspondente, em metros.

$$\frac{P_a}{\gamma} = \frac{13,6(760 - 0,081 \cdot h_z)}{1000} \quad (2)$$

A altura estática (h_z) da equação (2) é referenciada ao nível do mar. A pressão de vapor (P_v) depende da temperatura do líquido bombeado, conforme tabela 2.1, expressa em metros de coluna de água.

Tabela. 2.1 Pressão de vapor da água

T (°C)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
P_v (mcl)	0,09	0,13	0,17	0,24	0,32	0,43	0,57	0,75	0,98	1,25

Fonte: Porto, 2006

A altura estática (h_z) da equação (1) é referenciada à linha de centro da bomba e as perdas de carga na sucção (h_{fs}) contemplam tanto as contínuas, em todo o comprimento da tubulação, bem como as localizadas em acidentes como curvas, reduções, válvulas, etc. Uma curva característica do $NPSH_d$ em função da vazão é mostrada na fig. 2.4:

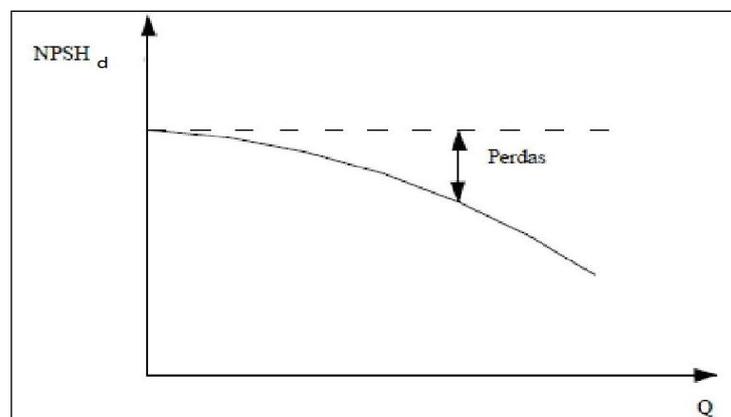


Figura 2.4 – Curva Característica $NPSH_d$ x Q .
Fonte: Monteiro, 1989

O NPSH requerido ($NPSH_r$) representa a energia do líquido no flange de sucção da bomba acima da pressão de vapor, necessária para alcançar o rotor e ser recalcado sem a ocorrência de vaporização ou cavitação. O $NPSH_r$ depende dos elementos do projeto da bomba, diâmetro do rotor, velocidade do motor e rotação específica. As curvas de $NPSH_r$ são fornecidas pelo fabricante da bomba conforme figura 2.5 em função da vazão.

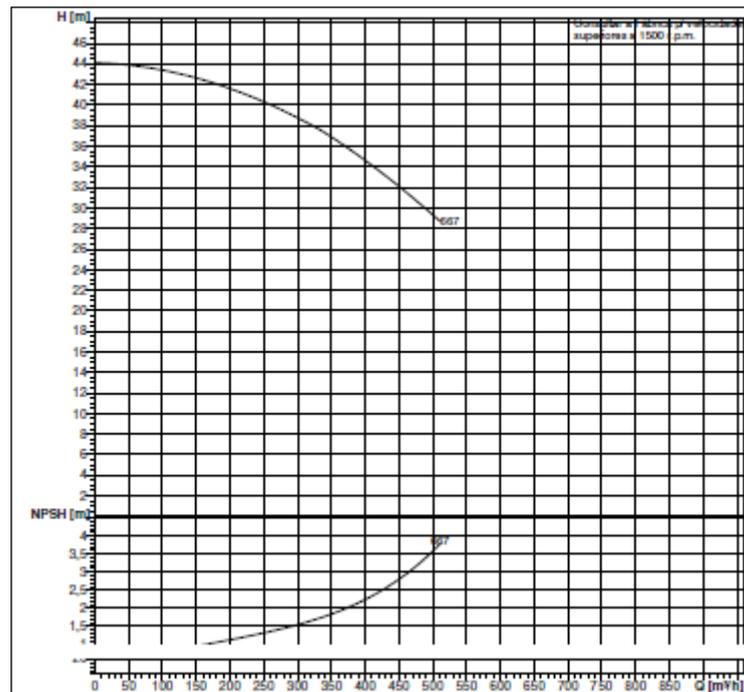


Figura 2.5: Curva característica $NPSH_r$ X Q
 Fonte: Scanpump, 2009

A intersecção das curvas de NPSH disponível e requerido ilustra os limites de operação da bomba sem cavitação e com cavitação, conforme figura 2.6.

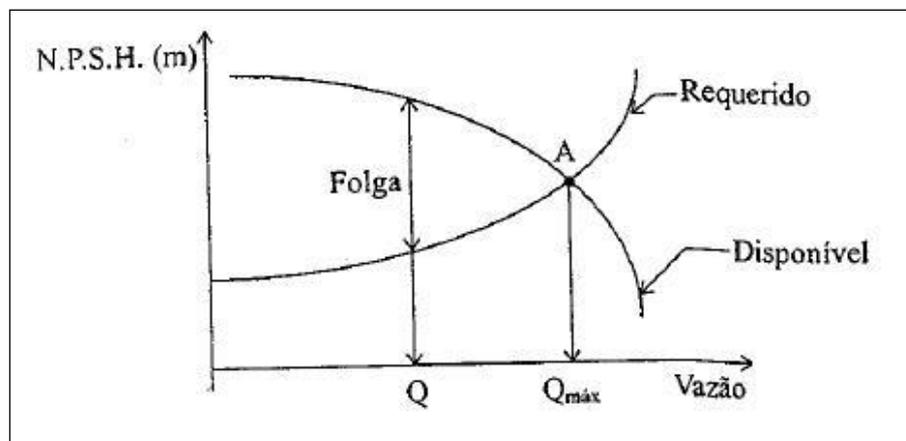


Figura 2.6: Curva $NPSH_d$ X $NPSH_r$
 Fonte: Mattos e Falco, 1998

As vazões à direita do ponto "A" são próprias da operação com cavitação.

A determinação do $NPSH_r$ é obtido a partir de ensaio onde a bomba centrífuga é instalada em um circuito com redução das condições de aspiração ou do $NPSH_d$, mantendo a vazão constante.

Neste ensaio a redução gradual do $NPSH_d$ é realizado por perdas de carga através de restrição em válvulas de controle instaladas a montante da bomba até o surgimento de efeitos da cavitação. A queda de 3% na altura de elevação total (H_t) desenvolvida pela bomba e a geração de ruídos característicos do fenômeno servem de referência para a determinação do $NPSH_r$, conforme ensaio padronizado do HYDRAULIC INSTITUTE (1975).

Durante este ensaio a vazão e rotação da bomba são mantidas constantes simultaneamente à variação do $NPSH_d$.

A pequena queda na altura de elevação desenvolvida pela bomba é utilizada como marcador do início da cavitação apesar de que a mensuração dos efeitos nesta condição não são totalmente conhecidos.

Métodos para estimativa do $NPSH_r$ para bombas foram desenvolvidos por vários pesquisadores contudo a confiabilidade destes depende de faixas de aplicação que normalmente não são divulgadas, restando os valores obtidos em ensaios específicos.

Outra dificuldade de ordem prática refere-se ao $NPSH_r$ de uma bomba em diferentes rotações visto que o fabricante nem sempre disponibiliza tal informação. Um critério de estimativa pode ser obtido a partir da equação (3) conforme MATTOS (1998) ressaltando que a confiabilidade é limitada a pequenas variações da rotação original.

$$NPSH_2 = NPSH_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (3)$$

PFLEIDERER (1979), propõe dois modos para estimativa do $NPSH_r$ de uma bomba, o primeiro baseado nas condições de vazão, velocidade do acionador e geometria do rotor e o segundo baseado no valor de uma constante definida em função do tipo da bomba e da vazão, cujos procedimentos são resumidos a seguir:

- Modo das características operacionais da bomba e da geometria do rotor

Este modo requer conhecimentos acerca do desenho do rotor como ilustrado na figura 2.7, muitas vezes de difícil obtenção, contudo caso aja esta

possibilidade ou de medição, pode ser usado como estimativa do cálculo do $NPSH_r$ conforme equações (4) e (5):

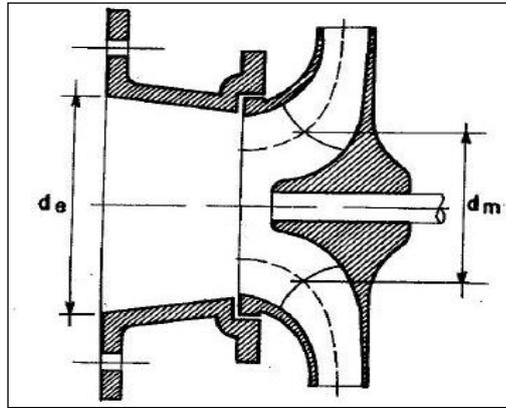


Figura 2.7: Dimensões do rotor
Fonte: Macintyre, 1980

Sendo d_m igual ao diâmetro mediano de entrada do rotor e d_e igual diâmetro do flange de entrada da bomba.

$$NPSH_r = \left[\left(\frac{N}{100} \right)^2 * \left(\frac{Q}{\lambda * K} \right) \right]^{2/3} \quad (4)$$

$$\lambda = 1 - \left(\frac{d_m}{d_e} \right)^2 \quad (5)$$

K coeficiente de sucção, adimensional igual:

2,4 para bombas axiais

2,6 para bombas radiais

2,9 para bombas helicoidais

$NPSH_r$ em metros, N em rpm e Q em m^3/s

- Modo das características operacionais da bomba e constante Φ :

$$NPSH_r = \Phi * \sqrt[3]{N^4} * \sqrt[3]{Q^2} \quad (6)$$

$\Phi = 0,0011$ para bombas radiais

$\Phi = 0,0013$ para bombas helicoidais

$\Phi = 0,0014$ para bombas axiais

Os dois modos apresentam diferenças nos resultados, mas podem servir de estimativas para ser usado quando não existe informação do fabricante da bomba.

Para fins de operação segura, fora da zona de cavitação, o $NPSH_d$ deve ser superior ao requerido, margem esta que varia conforme investigadores e

também de acordo com a segurança que o projeto exige, seja por variações dos parâmetros, temperatura do líquido, ou mesmo folga necessária nos cálculos que eventualmente não traduzem exatamente as condições reais da instalação ou da bomba.

Conforme YEDIDAH (1996) o $NPSH_r$ é pouco afetado pela variação do diâmetro do rotor da bomba, ou seja, não existe redução na capacidade de sucção da bomba. Várias experiências com rotores no diâmetro original e reduzidos não apresentaram mudanças no $NPSH_r$ conforme figura 2.8 com os valores de H e $NPSH$ em pés e os diâmetros dos rotores em polegadas.

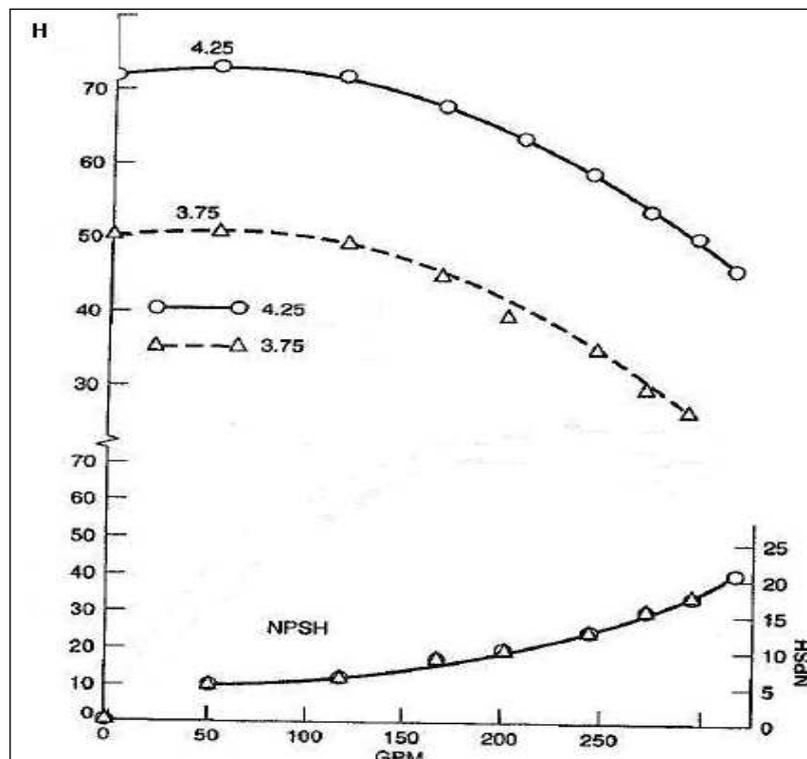


Figura 2.8: Curva $NPSH_r$ x D_2
Fonte: Yedidah, 1996

O $NPSH_r$ é proporcional à vazão e vários estudos e experiências indicam a equação (7) como modo geral de obtenção.

$$NPSH_r = K * Q^n \quad (7)$$

Através de ensaios, YEDIDAH (1996), sugere para K o valor de 0,67 e para o expoente da vazão 0,424. A figura 2.9 mostra o $NPSH_r$ obtido em ensaios com cerca de seiscentas diferentes bombas dos doze maiores fabricantes do mundo.

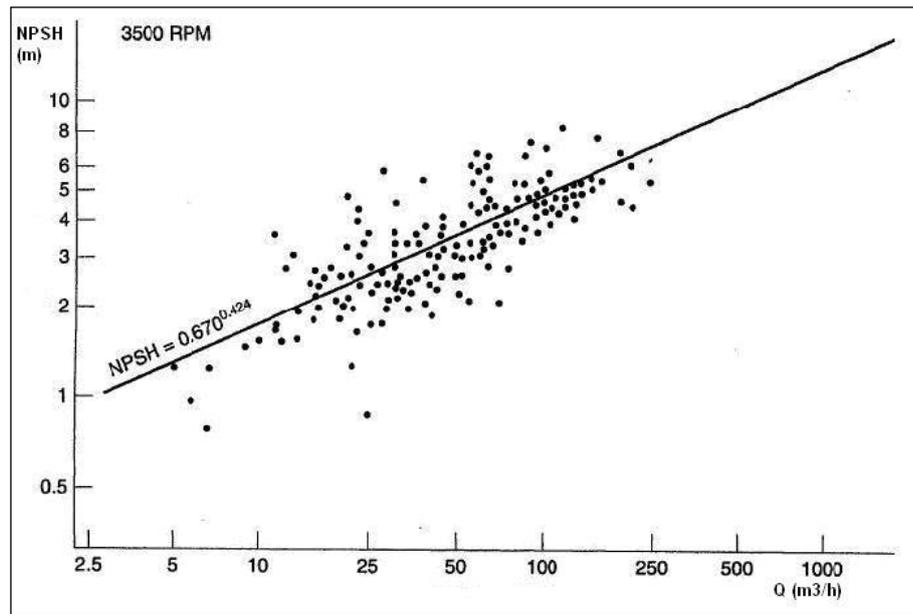


Figura 2.9: NPSH_r X Q para 3500 rpm
 Fonte: Yedidah, 1996

Outro gráfico demonstra que para um determinado NPSH_r é possível selecionar uma bomba com melhor capacidade de sucção através da escolha de rotação do seu acionador de tal modo que esta ofereça uma determinada vazão satisfatoriamente sem apresentar cavitação, conforme figura 2.10:

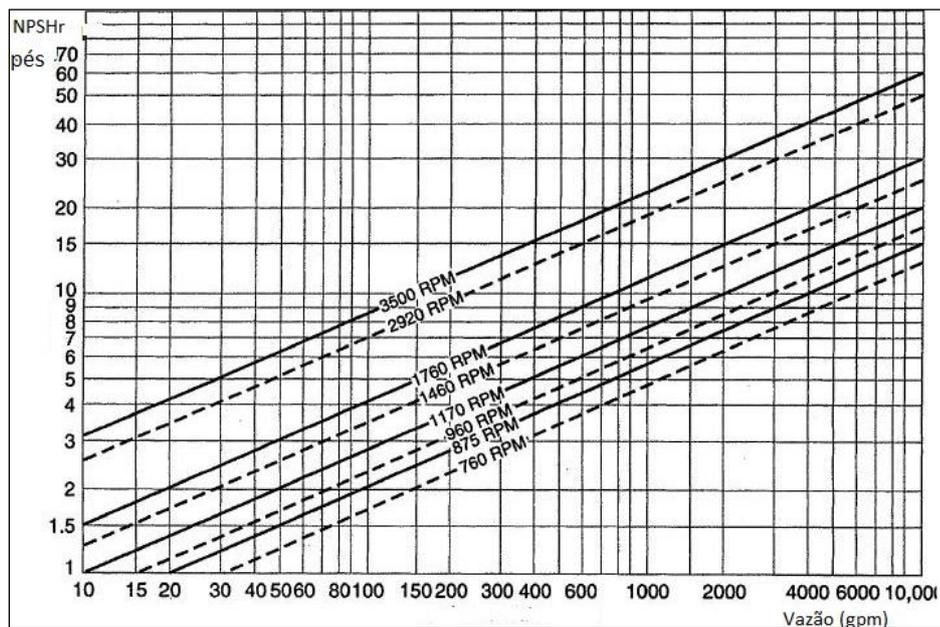


Figura 2.10: NPSH_r X Q para diferentes rotações
 Fonte: Yedidah, 1996

2.4.2 Velocidade e Rotação Específica

Conforme MACINTYRE (1980) independente da máquina ser uma bomba ou turbina é conveniente a definição de um parâmetro único para classificação das dimensões destas máquinas. É comum expressar a relação entre vazão, rotação e pressão na forma de velocidade específica (N_q) que representa a rotação que a bomba teria para fornecer uma vazão unitária sob uma altura de elevação também unitária como expresso na equação (8):

$$N_q = N * \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[3]{H^3}} \quad (8)$$

Por outro arranjo relacionando a potência e velocidade de acionamento da bomba a rotação específica (N_s) é expressa pela equação (9):

$$N_s = 3,65 N_q \quad (9)$$

N em rpm, Q em m³/s e H em m.

Deste modo define também a forma e velocidade do rotor da bomba nas condições de máximo rendimento. A figura 2.11 mostra a relação entre a N_s e o tipo de bomba e forma do rotor. Um conjunto de bombas que operam com semelhança hidrodinâmica é geometricamente semelhante e tem o mesmo valor de N_s .

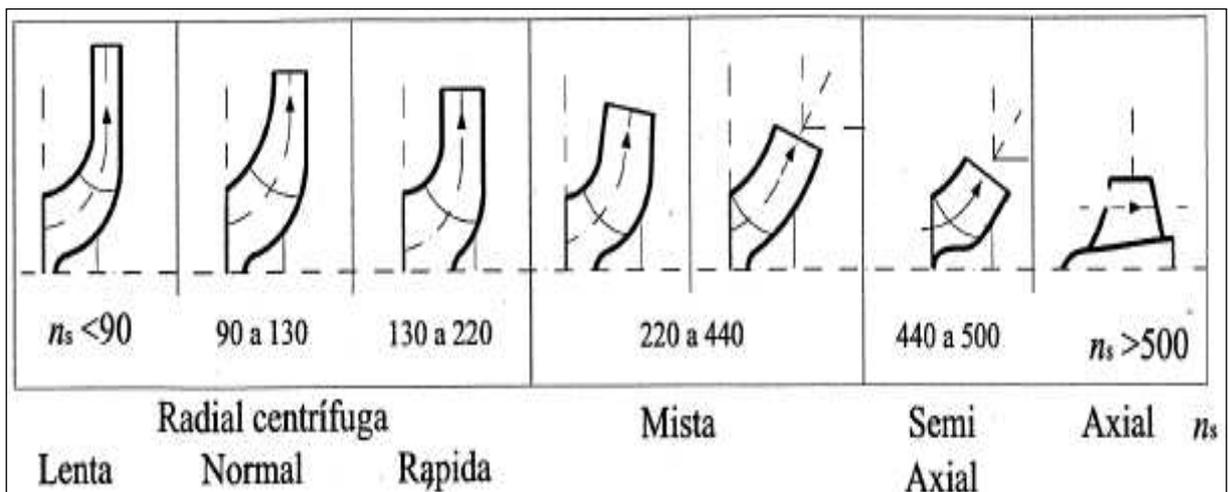


Figura 2.11: N_s X Tipos de bomba e formas de rotor
Fonte: Karassik, 1976

Por este critério podemos classificar as bombas em:

- Lentas : $N_s < 90$ – Bombas centrífugas radiais para pequenas e médias vazões
- Normais : $90 < N_s < 130$ – Bombas centrífugas radiais para médias vazões
- Rápidas : $130 < N_s < 220$ – Bombas centrífugas com aletas de dupla curvatura para médias vazões
- Mista ou hélico-centrífugas : $220 < N_s < 440$ – Bombas hélico-centrífugas com aletas de dupla curvatura para médias e grandes vazões
- Semi axial ou helicoidais : $440 < N_s < 500$ – Bombas helicoidais para grandes vazões
- Axiais : $N_s > 500$ – Bombas axiais para grandes vazões e pequenas alturas de recalque.

Neste trabalho será utilizado preferencialmente a comparação de bombas centrífugas com a sua rotação específica de modo que equipamentos operando em diferentes condições operacionais de altura de elevação e vazão e com velocidade do acionador variando conforme o requerimento do sistema, possam ser comparados com os resultados obtidos no experimento.

2.4.3 Índice de Cavitação e fator de Thoma

O coeficiente ou Índice de cavitação (σ) é um adimensional que estabelece a relação existente entre a intensidade das forças que se opõe a cavitação e as que a favorecem ou de outro modo, mede a possibilidade ou grau de ocorrência do fenômeno. Sua definição é obtida a partir da equação (10) conforme PORTO (2006):

$$\sigma = \frac{(P_{abs} - P_v)}{\frac{\rho v^2}{2}} \quad (10)$$

Este índice também pode ser traduzido como uma grandeza do potencial de cavitação num escoamento e utilizado para analisar semelhança do fenômeno ou caracterizar a ausência deste.

Valores elevados de σ refletem em geral ausência da presença da cavitação enquanto valores reduzidos estão normalmente associados a condições de cavitação.

Apesar da facilidade do cálculo do valor do σ , o mesmo não ocorre para sua determinação experimental visto que um ensaio a partir de um escoamento sem cavitação e redução da pressão por dispositivos até alcançar a condição, requer necessariamente parâmetros de detecção para caracterizar a presença do fenômeno. Vários ensaios já realizados ilustram a dificuldade de convergir estes parâmetros, por exemplo, para início da cavitação adota-se em muitos casos a observação visual das bolhas de vapor. Neste critério são analisados os aspectos dimensionais como o raio da bolha e também a frequência de aparecimento destas. Contudo, fatores da natureza do líquido, geometrias das superfícies, condições hidrodinâmicas do escoamento, concentração de ar entre outros podem gerar inconsistências no valor do índice de cavitação para um mesmo sistema, sem mencionar que a visualização das bolhas de vapor requer um aparato transparente na sucção da bomba, montagem esta de dificuldade significativa.

Por índice crítico de cavitação entende-se o valor que expressa à transição entre o escoamento sem cavitação e o escoamento com a manifestação do fenômeno, seja por análise de técnicas de visualização das bolhas de vapor ou por medição de ruídos ou vibrações características da detecção da cavitação. Fica evidenciado que este índice pode sofrer influência do investigador para observações visuais ou da intensidade dos sinais acústicos e vibratórios o que lhe confere um valor relativo e não absoluto para diversos experimentos.

Intervalos dos valores do índice de cavitação (σ) combinados com técnicas acústicas, vibratórias ou visuais, permitem estimar a classificação dos níveis de cavitação.

Para exemplificar a aplicação deste índice, a figura 2.12 mostra os resultados de um experimento de TOMÁS (1986) para classificação da cavitação de acordo com o fechamento da comporta a montante do fenômeno.

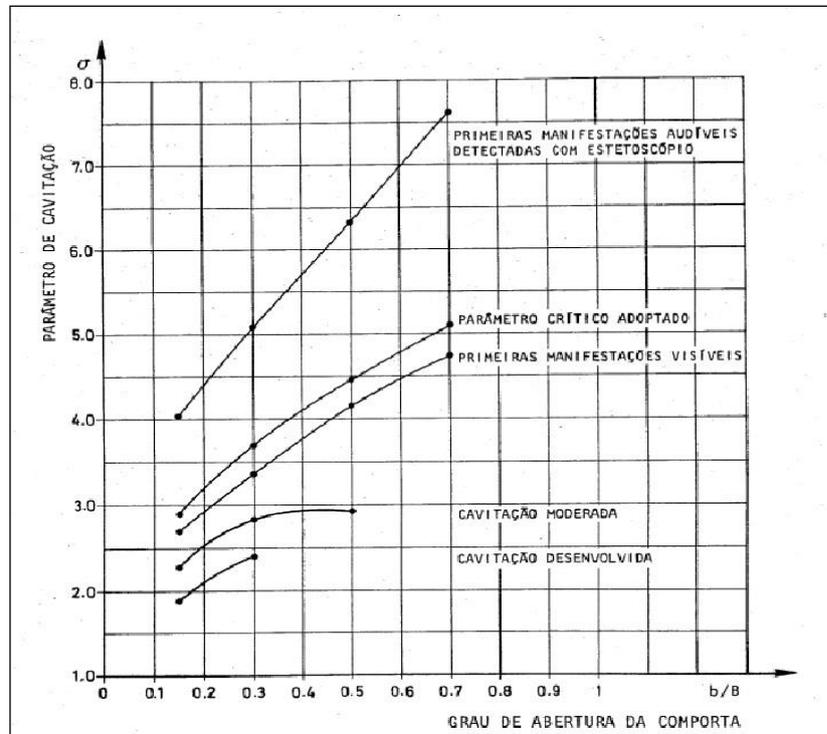


Figura 2.12: Regime de Cavitação X σ
Fonte: Tomás, 1986

Dois sistemas de bombeamento geometricamente semelhantes são prováveis de produzir cavitação se possuírem o mesmo grau ou o mesmo valor do índice de cavitação.

Outra forma do índice de cavitação é definido em função da energia disponível no ponto, representado pelo $NPSH_d$ e pela altura de elevação total, denominado fator de Thoma (σ_t). Apesar de corresponder ao mesmo adimensional que relaciona as forças que se opõe e favorecem a cavitação, é mais utilizado na prática em projetos e análises de instalações. A equação (11) conforme PORTO (2006) determina o fator de Thoma:

$$\sigma_t = \frac{NPSH_d}{H} \quad (11)$$

Outro modo de apresentação do σ_t , dependente da rotação específica e dos valores de uma constante, de acordo com o tipo da bomba e para um grande número de ensaios, conforme PLFEIDERER (1979) é expresso pela equação (12):

$$\sigma_t = \phi \sqrt[3]{N_s^2} \quad (12)$$

O fator de Thoma também pode ser obtido graficamente em função da rotação específica da bomba, conforme STEPANOFF (1963) e representado na figura 2.13:

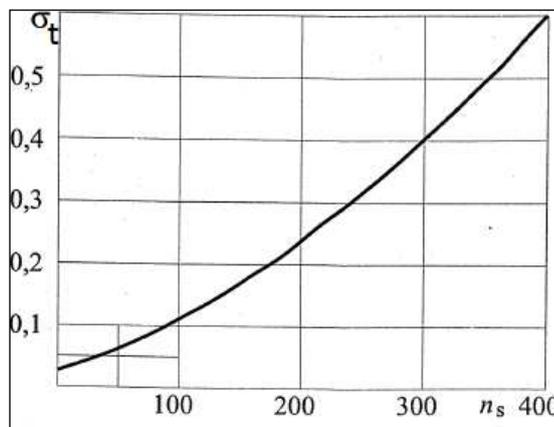


Figura 2.13: $N_s \times \sigma_t$
Fonte: Stepanoff, 1963

Observa-se que o fator aumenta proporcionalmente com a rotação específica, ou seja, bombas radiais requerem menores alturas de sucção quando comparadas com bombas axiais que normalmente exigem a montagem com a linha de sucção afogada para evitar a cavitação.

Neste trabalho com o objetivo de simplificar os cálculos e aplicar em campo os resultados experimentais, optou-se pela utilização do $NPSH_d$ e do fator de Thoma determinado pela equação (11) como parâmetros de caracterização da cavitação.

2.4.4 Influência do Ar dissolvido na Água

Conforme KNAPP (1970), os gases dissolvidos na água naturalmente são os atmosféricos como o dióxido de carbono, oxigênio e nitrogênio. Em condições

normais de temperatura e pressão (CNTP) a solubilidade do dióxido de carbono na água é 88%, do oxigênio 3% e do nitrogênio 1,5% em volume. Numa mistura que se encontra em contato com a água, a quantidade que cada um vai dissolver depende de sua pressão parcial, e embora a solubilidade do dióxido de carbono seja elevada, sua quantidade no ar é muito baixa, cerca de 0,03%, sobrando somente ao oxigênio e ao nitrogênio dissolução de gases em quantidades ainda pouco representativas. Estes valores são pequenos para fazer diferença na pressão de vapor da água. Considerando que o tempo necessário para a formação e colapso da bolha de vapor é demasiado curto, aproximadamente apenas alguns milésimos de segundos, não permite uma difusão apreciável de ar para a interface líquida.

Segundo experimentos, a oferta de gases durante a cavitação é fornecida principalmente pelo colapso da bolha e reabsorção dos gases contidos em seu interior e não devido aos efeitos difusivos do ar atmosférico.

Conforme MACINTYRE (1980), a água em contato com o ar na temperatura de 15 °C e pressão atmosférica de um bar, contém gases dissolvidos que representam aproximadamente 1,8% do seu volume. Se a pressão no escoamento é reduzida, parte dos gases dissolvidos é então liberado e podem provocar pequenas turbulências com formação de bolhas, afetando de modo desprezível as condições hidrodinâmicas da bomba.

Contraditoriamente, outras experiências mostraram que em regime de cavitação simultaneamente a liberação de gases, os efeitos do fenômeno são reduzidos, funcionando o ar como um amortecedor do choque das bolhas.

Com taxas maiores de dissolução de ar na água a pressão com que a cavitação inicia-se pode tornar-se superior a pressão de vapor porque as bolhas de conteúdo gasoso são de dimensões relativamente maiores às bolhas vaporosas, produzindo o efeito amortecedor no colapso destas. Basicamente um pequeno conteúdo gasoso na água é desencadeador da cavitação enquanto um elevado teor de ar reduz os efeitos do colapso da bolha vaporosa.

Conforme TOMÁS (1986), devido a inúmeros fatores envolvidos na influência do teor de ar dissolvido na água em regime de cavitação, é insuficiente os conhecimentos atuais para obter resultados aplicáveis com confiança na elaboração

de projetos. Esta situação deve-se a falta de métodos experimentais para medição da concentração de ar na água e particularmente da porção não dissolvida.

Quanto à porção dissolvida, espera-se uma influência desprezível visto que o ciclo da bolha de vapor é da ordem de apenas alguns milésimos de segundos, duração esta reduzida para permitir difusão apreciável do ar, exceto se os núcleos permanecerem numa região de baixa pressão por tempo suficiente e se houver condições favoráveis para tal.

De qualquer forma é possível que bolhas gasosas criadas a montante da zona de cavitação possam permanecer no escoamento até sua reabsorção em regiões de alta pressão e possam incrementar a atividade do fenômeno.

Neste trabalho o experimento irá considerar somente a medição de oxigênio dissolvido (OD) e a comparação deste valor com informações já conhecidas em outros ensaios para estimativa da concentração de ar.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é dedicado a revisar os principais artigos relacionados à pesquisa teórica e experimental dos efeitos de cavitação em bombas centrífugas, embora existam muitos trabalhos com sistemas de simuladores que também serão comentados. Com objetivo de agrupar pesquisas assemelhadas, esta revisão está dividida nos seis parâmetros: erosão do rotor, potência consumida, rendimento, ruídos, temperatura no mancal e vibrações.

3.1 EROÇÃO DO ROTOR

O colapso da bolha de vapor cria um jato de líquido com velocidade suficiente para arrancar material num fenômeno descrito como pitting, ilustrado na figura 3.1. Esta erosão de superfície gera danos a componentes próximos da zona de alta pressão como rotor, disco de desgaste e voluta da bomba.



Figura 3.1 – Erosão do rotor por cavitação
Fonte: Schröder, 2015

A erosão do rotor e em determinadas condições de outros componentes da bomba, são parâmetros consolidados em inúmeros experimentos e observados em instalações reais no campo. Resumidamente os fatores que provocam a erosão por cavitação podem ser explicados por:

- impacto de ondas de choque devido ao colapso das bolhas de vapor e consequente micro jatos de altas pressões em direção das superfícies sólidas;
- possíveis interações térmicas que podem conduzir à micro fusão de partículas da estrutura material.

Apesar de inúmeros experimentos e estudos teóricos, não existe ainda um parâmetro único que possa correlacionar a resistência à erosão por cavitação de metais conhecidos, embora várias contribuições mostrem uma dependência com a dureza e a resistência à tração, entre outros. Um problema comum para determinação da correspondência entre a erosão por cavitação e a resistência de materiais refere-se às características dos ensaios que normalmente não são normalizados quanto à intensidade do fenômeno, geometria do sistema, propriedades do líquido e do material.

KITTREDGE (1961) apresentou uma tabela de resistência de materiais à cavitação gerada por vibração mostrando os danos de vários metais em termos de perda de massa conforme tabela 3.1, para um tempo de exposição de duas horas.

Tabela 3.1 – Resistência de metais à erosão por cavitação

Metal	Perda de Massa (mg)
Liga Al-Br soldada	3,2
Liga Al-Br fundida	5,8
Inox 18Cr-8Ni fundido	13,0
Aço carbono soldado	97,0
Aço fundido	105,0
Alumínio	124,0
Latão	156,0
Ferro fundido	224,0

Fonte: Kittredge, 1961

O autor menciona que a erosão por cavitação é avaliada também pela taxa de profundidade média de penetração (MDPR) e que a vida de um rotor é

geralmente estimada como sendo o tempo necessário para a erosão por cavitação atingir uma profundidade de 75% da espessura da aleta. Infelizmente os valores obtidos em ensaios não são os mesmos que os obtidos de rotores de bombas em condições reais de operação.

EISENBERG (1966) elaborou uma curva típica de perda de massa em função do tempo para um rotor de bomba operando em regime de cavitação, conforme fig. 3.2:

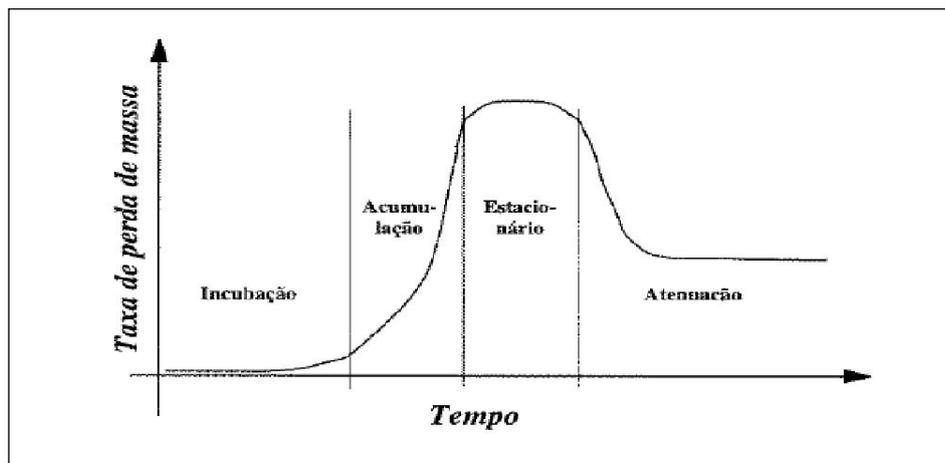


Figura 3.2 – Curva de perda de massa x Tempo
Fonte: Eisenberg, 1966

No período de incubação ocorre a deformação superficial com pouca perda de massa, na acumulação a taxa de erosão aumenta até um nível máximo devido ao encruamento da superfície e ao desenvolvimento da fissuração. No período estacionário a taxa de erosão permanece a máxima, levando a picos na curva. No período de atenuação a taxa de erosão decresce suavemente até uma relativa estabilidade devido ao efeito de amortecimento pelo líquido retido nas reentrâncias da superfície erodida.

Conforme MACINTYRE (1980) alguns materiais na ordem crescente de resistência à erosão por cavitação são: ferro fundido, alumínio, aço fundido, aço laminado, bronze fosforoso, bronze manganês, aço níquel, aço cromo (12 %Cr), aço inoxidável (18%Cr-%8Ni). A resistência de metais à erosão por cavitação é determinada por teste de laboratório quando as amostras são pesadas e colocadas em aparelho para simulação da cavitação com água durante determinado tempo.

Após este período mede-se a perda de material por diferença de pesagem. Esta perda define a resistência ao desgaste por cavitação.

Conforme TULLIS (1982), existem dois mecanismos de geração de danos nas superfícies de rotores e outros contornos próximos. O primeiro é representado pelas ondas de choque de pressões muito elevadas geradas pela implosão das bolhas. Estas pressões foram estimadas como sendo acima de 10.000 kgf/cm^2 , suficiente para danificar a maioria dos materiais de fabricação de rotores de ligas metálicas. A outra fonte de danos potencial é devido ao micro jato formada no centro da bolha em direção à superfície, formando um pitting local quando de seu impacto contra esta superfície.

IWAI e OKADA (1983) testaram a resistência à erosão por cavitação em um equipamento vibratório conforme figura 3.3 com amostras de ferro fundido cinzento, aço ferramenta e aço inoxidável 316, cujas composições químicas e propriedades mecânicas estão relacionadas na tabela 3.2.

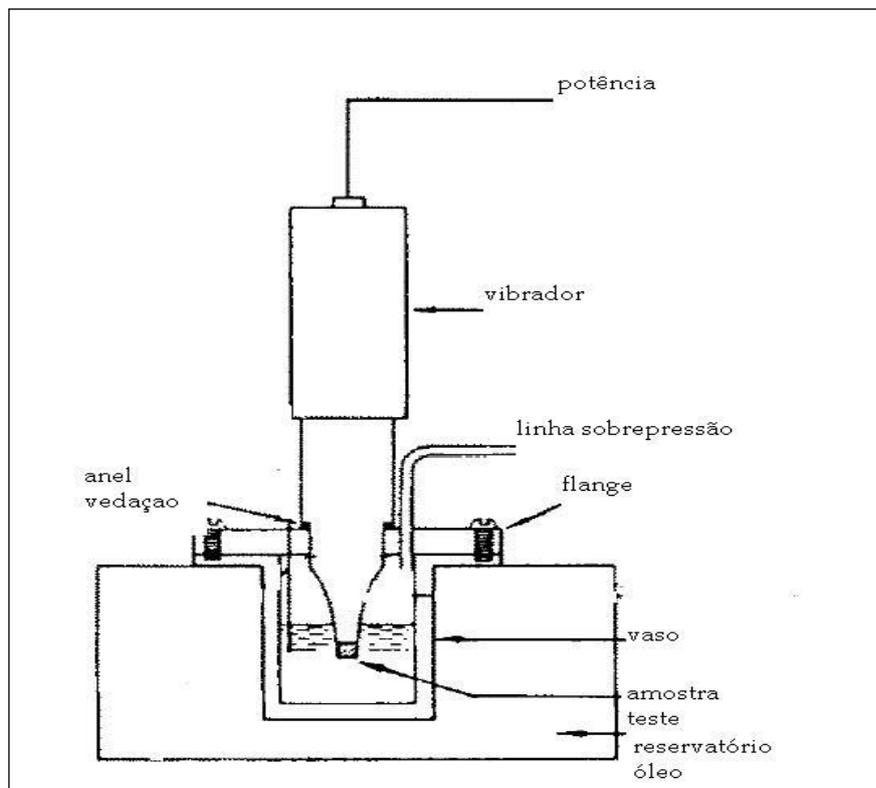


Figura 3.3 – Montagem do vibrador de cavitação
Fonte: Iwai e Okada, 1983.

Tabela 3.2 – Composição química (%) e dureza dos metais

Metal	C	Si	Mn	Cr	Ni	Br
Ferro fundido	3,20	1,57	0,50	0,00	0,00	184
Aço ferramenta	1,11	0,34	0,48	0,00	0,00	331
Aço inox 316	0,06	0,50	1,50	18,00	13,00	134

Fonte: Iwai e Okada, 1983

Para cada um dos materiais testados a taxa de perda em massa aumentou com temperaturas mais elevadas até um pico e em seguida diminuiu.

Essas diferenças das taxas máximas de erosão relativas às temperaturas dos líquidos ainda não foram totalmente esclarecidas, e a sensibilidade à corrosão do material bem como as propriedades do líquido parecem afetar a erosão devido as variações de temperaturas.

No ensaio utilizou-se um gerador com frequência de 20 kHz, recipiente com água a temperaturas variáveis e foi mantida a pressão de um bar.

As superfícies das amostras de metais foram polidas inicialmente com lixa de grau 600 e a perda de massa aferida em uma balança de precisão com sensibilidade de 0,1 mg.

Como resultado, observaram-se após os ensaios as várias etapas da taxa de perda de massa, com período inicial, de incubação, de transição e finalmente um período de estabilização.

Apesar de estas etapas serem comuns a todos os materiais, no caso do ferro fundido cinzento as taxas de perdas foram maiores com o aumento da temperatura, diferentemente dos outros materiais.

A figura 3.4 resume as taxas de perdas de massa para os diferentes materiais em função da exposição. Para o ferro fundido cinzento foram utilizadas três diferentes amplitudes de vibração no gerador, em unidade de polegadas.

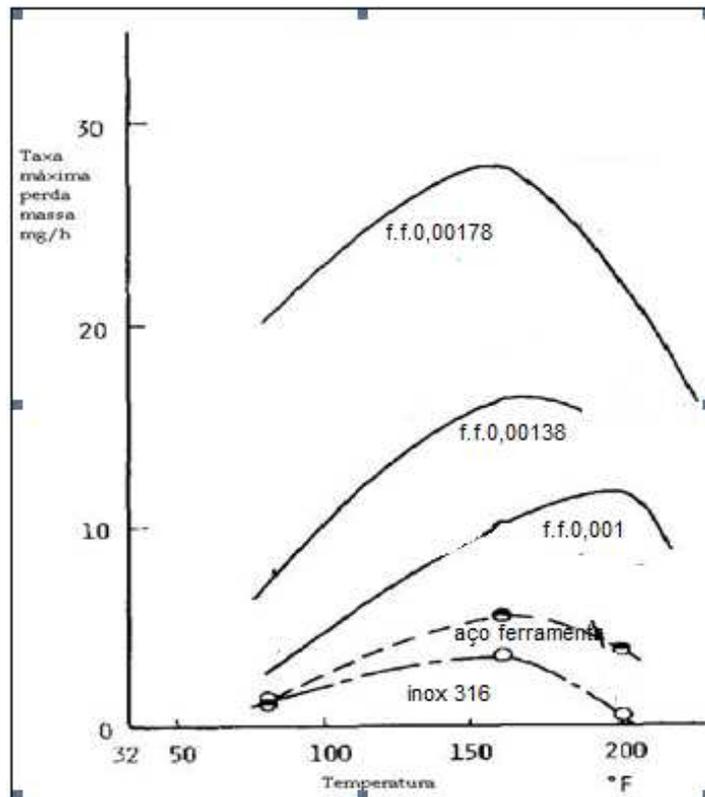
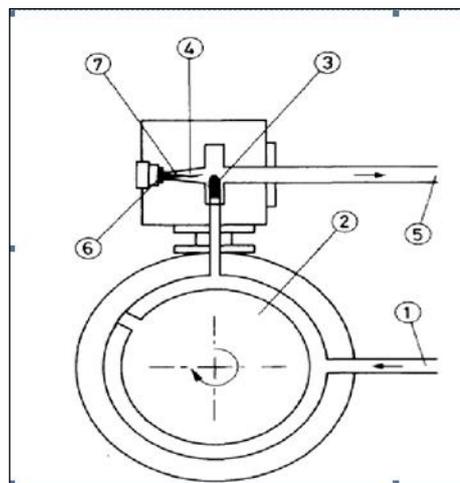


Figura 3.4 – Taxa de perda de massa x Temperatura
Fonte: Iwai e Okada, 1983

KARIMI (1986), realizou testes com liga de aço inox duplex (25,6% Cr, 5,3% Ni) em um equipamento denominado gerador de vortex de cavitação conforme figura 3.5, com velocidade de rotação de 410 rpm e vazão da água da ordem de 2,4 a 3 m³/h, com as superfícies das amostras observadas por microscópio eletrônico de varredura (SEM).



Legenda:

- 1) Entrada de Água
- 2) Válvula rotacional
- 3) Entrada tangencial
- 4) Seção de teste de cavitação
- 5) Saída de água
- 6) Amostra
- 7) Cavitação por vortex

Figura 3.5 – Gerador de cavitação
Fonte: Karimi, 1986

O histograma da fig. 3.6 sumariza o número e diâmetro dos "pitting" obtidos no experimento.

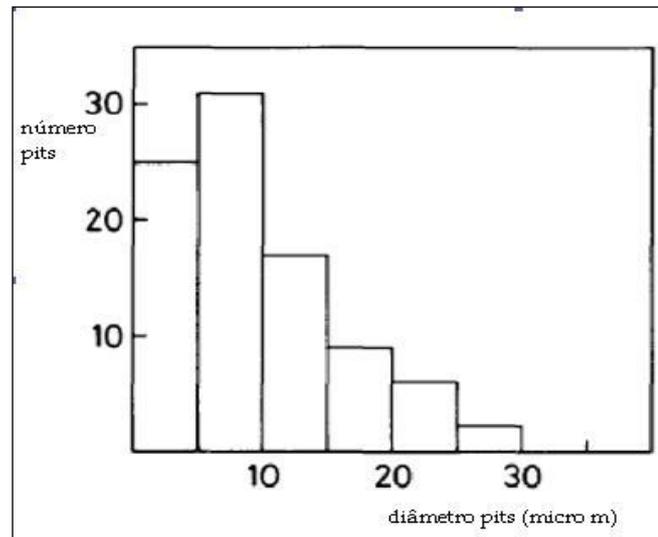


Figura 3.6 – Histograma dos Pittings
Fonte: Karimi, 1986

Quanto à análise microscópica, observou-se o desenvolvimento dos danos de perda de material notadamente maior na fase ferrite da liga se comparado a austenítica. A perda de massa permaneceu praticamente constante após o período de uma hora de exposição conforme gráfico da figura 3.7, comportamento este não explicado pelas propriedades do material ensaiado, contudo o autor relata que tal comportamento pode ser devido ao amortecimento hidrodinâmico ou acomodação entre o líquido e a superfície danificada.

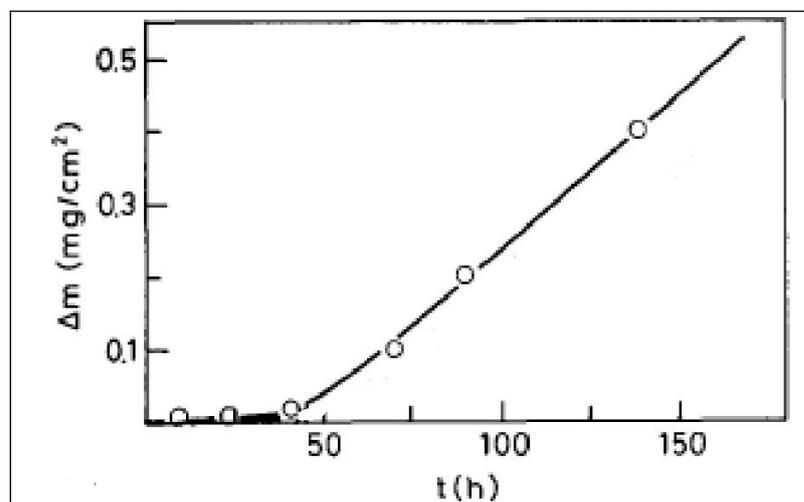


Figura 3.7 – Perda de Massa x Tempo
Fonte: Karimi, 1986

Esta tendência à estabilização é contrária a outras investigações que mostraram uma variação randômica para a taxa de erosão em função do tempo. Talvez o aparato de Karimi utilizado tenha características específicas que possam justificar o desvio.

Conforme TOMÁS (1986) um parâmetro de correlação da resistência do material na erosão por cavitação pode ser obtido a partir do trabalho de HOBBS (1970) e é denominado resiliência última, expresso pela equação (13):

$$UR = \frac{\delta t}{2E} \quad (13)$$

Outra boa correlação está associada à dureza do material e que pode constituir também indicador de resistência conforme equação (14) :

$$IR = UR * Dureza (Br) \quad (14)$$

Em relação à erosão por cavitação tem-se verificado experimentalmente que existe uma velocidade mínima do escoamento abaixo da qual não se verifica erosão mensurável ou o tempo de erosão detectável é praticamente infinito, mesmo com a evidência da cavitação.

Acima deste valor mínimo o resultado de ensaios tem conduzido a uma lei exponencial que traduz a dependência observada entre a perda de material e a velocidade do escoamento, como expresso pela taxa de erosão da equação (15):

$$\epsilon = k * v^n \quad (15)$$

O expoente n varia, segundo diversos investigadores, apresentando um valor médio de seis. Apesar da dependência direta e exponencial da velocidade de escoamento apresentado pela equação, ainda não existe consenso a respeito dos limites de aplicação das faixas inferiores e superiores, para as velocidades do escoamento.

A aplicação deste expoente é somente factível para estimativa geral da erosão visto que outros fatores envolvidos no complexo fenômeno da cavitação precisam ser considerados.

Outra relação já obtida por ensaios, refere-se à temperatura do líquido onde a erosão por cavitação é máxima, no caso da água, em torno de 50 °C (Celsius), obtidos em experimentos com aparelhos vibratórios de simulação do fenômeno, mas não reproduzido por ensaios de campo ou em laboratórios com sistemas envolvendo bomba e temperaturas do reservatório variável, compreensível pela dificuldade inerente ao controle exigido.

Sobre o método de obtenção, no dispositivo vibratório a autora TOMÁS (1986) cita as seguintes diferenças em relação à cavitação hidrodinâmica:

- A redução de pressão é pontual;
- A frequência de repetição é imposta;
- O líquido é estacionário, não apresentando gradientes de pressão longitudinais;
- A bolha de vapor produzida é em geral de diâmetros muito inferiores.

Tais divergências podem fazer com que a erosão no escoamento seja de forma não semelhantes às encontradas nos ensaios de vibração e conseqüentemente não é possível estender os resultados quantitativos destas condições, exceto em comparações preliminares.

RICHMAN e Mc NAUGHTON (1989) resumiram várias pesquisas que correlacionam as taxas de erosão por cavitação e as propriedades mecânicas dos materiais das superfícies. As correlações apontam fortes indícios que os danos da cavitação são resultantes de um processo de fadiga, informação esta que pode colaborar na especificação de materiais resistentes, apesar, que os autores reconhecem que somente a combinação de algumas propriedades como dureza, resistência ao escoamento, resistência à tração, ductilidade e outras podem minimizar os mecanismos de danos.

As investigações anteriores demonstraram que os danos à superfície são gerados por milhares de impactos resultantes da implosão da bolha vaporosa junto à superfície metálica, o que caracteriza a erosão por cavitação como uma deformação cíclica, sujeita a fadiga. Os autores procuraram nas pesquisas das últimas décadas e a partir das propriedades das ligas comerciais de aços inoxidáveis e outros metais,

o estabelecimento de parâmetros de resistência à erosão por cavitação, concluindo que o processo é predominantemente descrito como uma deformação cíclica e que esta remoção de material da superfície é determinada pela resistência à fadiga.

CHAN (1990) apresentou resultados de um experimento de cavitação em bomba centrífuga com velocidade de acionamento de 1.150 e 1.450 rpm, recalçando água e estabeleceu diferenças do tipo de cavidades formadas por estas rotações. Apesar do conhecimento que a cavitação torna-se expressiva a partir da redução do $NPSH_d$ com conseqüente queda da carga estimada em 3%, o autor destaca que o importante para os projetos de sistemas de bombeamento é a determinação quantitativa da erosão causada pela cavitação.

No experimento em circuito fechado com água, os testes foram obtidos a partir de pintura das aletas do rotor para simular a aceleração da erosão por cavitação. A duração do ensaio para 1.150 rotações por minuto (rpm) é de quatro horas enquanto com velocidade de 1.450 rpm é reduzido para duas horas e meia. A remoção de somente 3 mm² na velocidade de 1.150 rpm demonstra que para as condições de $NPSH_d$ de 5,3 m, queda na carga de 3%, os efeitos de erosão não são severos neste caso e que as dificuldades como normalmente ocorre na cavitação, referem-se à localização da área de ataque causado por implosões de bolhas de forma aleatória. Como limitação técnica o próprio autor reconhece que a aplicação inadequada da tinta na superfície do rotor pode levar a sua remoção independente do efeito erosivo.

Conforme PORTO (2006), enquanto uns afirmam que a cavitação induz vibrações a zonas extensas do metal e conseqüentes esforços destrutivos de um fenômeno oscilatório, outros creditam o aparecimento de uma corrosão química devido à liberação de oxigênio do líquido aos efeitos erosivos da cavitação.

Segundo o autor, quando do colapso de uma bolha com a superfície sólida, uma diminuta área desta superfície é momentaneamente exposta a uma tensão extremamente elevada, sendo repetido continuamente por inúmeras bolhas, é como se a superfície metálica fosse bombardeada por pequeníssimas bolas provocando um efeito erosivo de martelagem.

MARQUES (1996), cita que os danos de erosão por cavitação podem ser avaliados pelo número de crateras produzido por unidade de área e tempo, pelas variações de rugosidade da superfície ou por medidas de perda de massa em função do tempo de exposição à cavitação.

KWOK, MAN e LEUNG (1998) testaram em uma unidade ultrassônica de 550 W de potência e frequência vibratória de 20 kHz em uma solução de água a 23 °C com 3,5% de cloreto de sódio, os aços inoxidáveis S30400, S31603, S31803 e duplex S32760, para investigar qual material apresenta maior resistência contra erosão por cavitação de um rotor de bomba centrífuga recalçando água de consumo urbano. O material S31603 do rotor foi danificado por erosão após três meses de operação e foi substituído em uma manutenção, o que gerou a investigação de materiais mais resistentes que possibilitariam um maior tempo de serviço sem danos significativos. Apesar de vários estudos e testes de erosão por cavitação em aços inoxidáveis, o mesmo não se aplica ao duplex, o que também foi decisivo na escolha de materiais alternativos para o referido caso. A composição química dos aços está resumida na tabela 3.3.

O ensaio composto de oito períodos de trinta minutos na unidade de ultrassom incluiu a medição da perda de material em termos de profundidade média de penetração (MDPR) em micro metro em função da temperatura de ensaio da água.

Tabela 3.3 – Composição química (%)
dos aços inoxidáveis

Material	Cr	Ni	Mo	Mn	Cu
S31603	17,6	11,2	2,5	1,4	1,4
S30400	18,4	8,7	0,0	1,6	2,1
S31803	22,3	5,6	2,9	1,5	1,6
S32760	25,6	7,2	4,0	0,6	0,7

Fonte: Kwok, Man e Leung, 1998

Os resultados ilustrados nas figuras 3.8 e 3.9 mostram a superioridade do duplex S32760 quanto à resistência a erosão, bem como, que a adição de elementos de liga tais como Cr, Ni e Mo nos aços inoxidáveis reduzem o pitting causado por cavitação. Além disso, outros fatores como dureza, estrutura

austenítica e transformabilidade martensítica são também influentes na resistência a erosão, ao contrário, a estrutura ferrítica apresenta menor resistência nestes aços inoxidáveis.

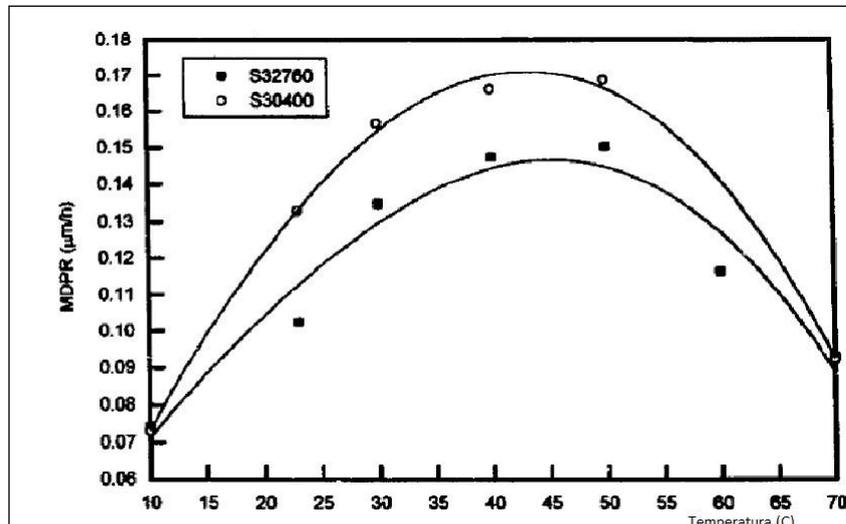


Figura 3.8 – MDPR X Temperatura (pH 5,5)
Fonte: Kwok, Man e Leung, 1998

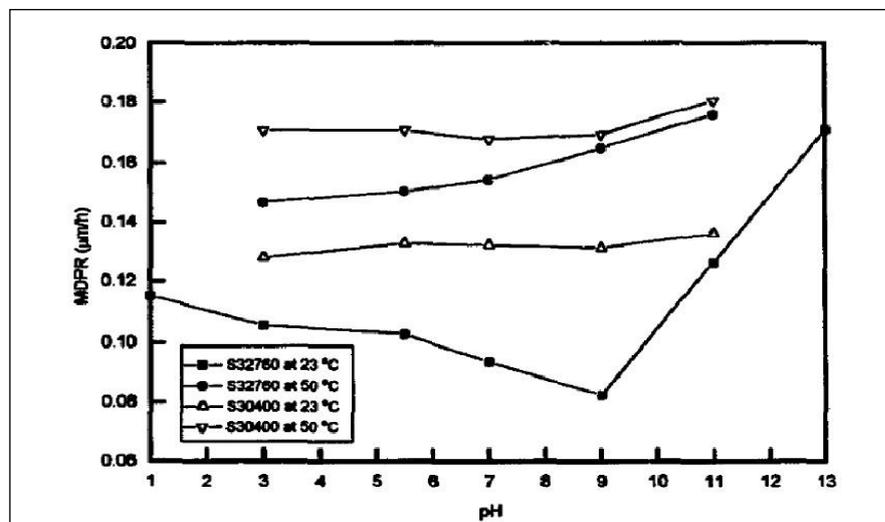


Figura 3.9 – MDPR X pH (temperatura 50 °C)
Fonte: Kwok, Man e Leung, 1998

FRANC e MICHEL (2004), apresentaram uma simulação computacional baseada em resultados de análise numérica de PLESSET e CHAPMAN (1971) para as mudanças na curvatura de uma bolha de vapor em função do tempo de colapso de RAYLEIGH (1917), dependente do raio da bolha e das pressões adjacentes, posicionada a um mm de uma parede sólida com o jato crescente dirigido no eixo de simetria até a implosão da bolha.

Devido às altas velocidades com que o jato atinge a parede sólida é muitas vezes considerado como sendo o possível mecanismo hidrodinâmico de erosão por cavitação, conforme figura 3.10:

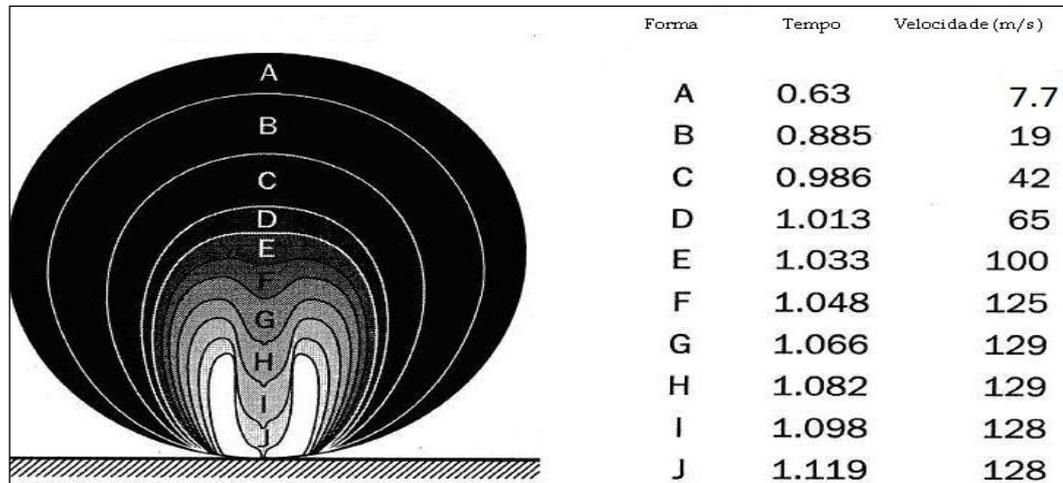


Figura 3.10: Colapso da bolha vaporosa
Fonte: Franc e Michel, 2004

BREGLIOZZI, et al (2004), usaram um aparelho de ultrassom de 20 kHz com amplitude de 40 μm para estudar o comportamento da erosão por cavitação no aço inoxidável AISI 304 e o aço HN (com alto potencial de Nitrogênio). Estes aços foram produzidos com três diferentes tamanhos de grãos: 2,5 μm , 20 μm e 40 μm . A refinação dos grãos resultaram em diferentes propriedades mecânicas tais como resistência ao escoamento, à tração e à fadiga bem como à erosão por cavitação.

Além disso, o experimento também variou o pH (potencial de Hidrogênio) entre 5 e 9 da solução de água com temperatura de 20 $^{\circ}\text{C}$ controlada. O estudo correlaciona a taxa de erosão com o tamanho do grão e a influência do pH.

A composição química e propriedades mecânicas dos aços são mostradas nas tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 – Composição Química(%) dos Aços

Aço	Cr	Ni	Mo	N	Mn
Inox AISI 304	17,97	8,55	0,22	0,05	1,04
HN	18,50	1,07	0,08	0,37	11,4

Fonte: Bregliozzi et all, 2004

Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas dos Aços

Aço	Tamanho do grão μm	Dureza HV	δ_e N/mm ²
Inox AISI 304	2,5	242,5	790,0
	20,0	176,0	672,0
	40,0	163,5	650,0
HN	2,5	308,0	985,5
	20,0	218,5	759,5
	40,0	201,4	716,5

Fonte: Bregliozzi et al, 2004

A forma de refinar os grãos da liga foi pelo processo de recristalização após laminação a frio. A rugosidade das superfícies por serem de considerável importância na criação de cavidades foi polida através de papéis abrasivos a fim de manter uma rugosidade média (Ra) de 4 ηm .

As amostras de aços com diferentes granulometrias foram expostas ao aparelho de ultrassom, removidos, limpos por imersão em banho, e medidos as perdas de massa com balança analítica de alta precisão (quinta casa decimal). As amostras também foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura a fim de investigar o mecanismo de remoção de material pela erosão por cavitação.

Os testes foram reproduzidos três vezes para assegurar a confiabilidade. O experimento com ultrassom é executado com exposição da amostra a uma distância de 0,5 mm da ponta do aparelho, produzindo bolhas de cavitação.

Para efeito de comparação com os diferentes aços inoxidáveis os testes tiveram duração de 15 horas para o AISI 304 e 30 horas para o HN.

A figura 3.11 apresenta os valores de MDPR para o aço HN após os períodos de exposição em função dos tamanhos de grãos para diferentes valores de pH.

É evidente o aumento dos danos por cavitação com a diminuição do pH do meio aquoso para os aços; o que justifica que a erosão mecânica é incrementada quando de uma superfície com corrosão eletroquímica, conforme os resultados.

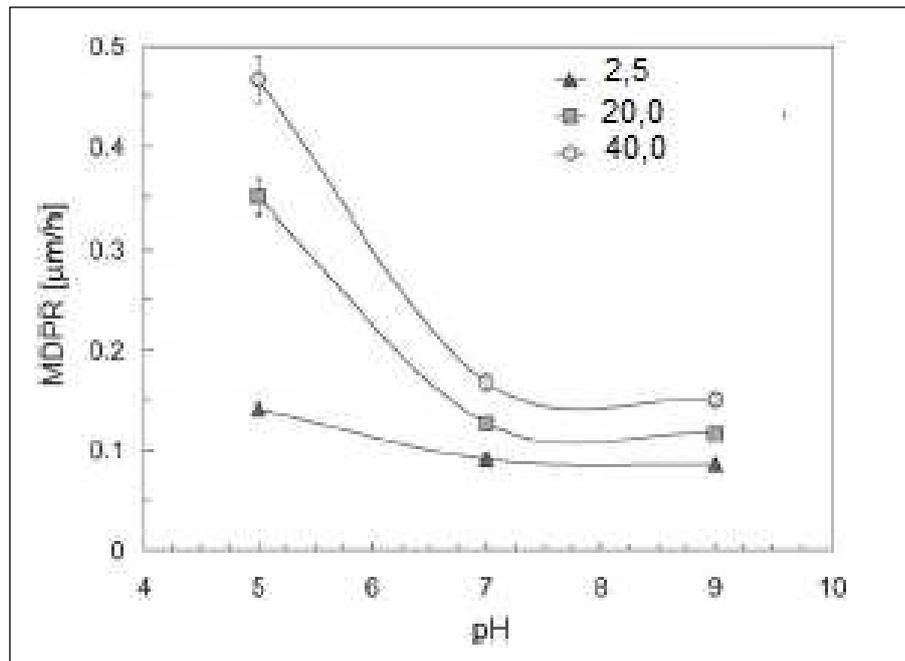


Figura 3.11 – MDPR x Granulometria e pH
Fonte: Bregliozzi et all, 2004

Para a faixa de pH entre 7 e 9 onde o efeito de corrosão é insignificante para os aços, a influência do tamanho dos grãos é observada. A resistência a erosão aumenta com diminuição dos grãos de acordo com resultados obtidos por POHL (1996).

As propriedades mecânicas do HN com maior resistência de escoamento, tração e dureza também produziu aumento na resistência à erosão por cavitação conforme estudo.

A morfologia das superfícies erodidas, observadas por microscopia são semelhantes para os dois aços com a formação de ondulação nas bandas de deslizamento (sítios de concentração de tensões) e a remoção de material por colapso das bolhas a partir destas regiões.

A remoção do material pode ser explicada pelo mecanismo de fratura dúctil. Conclui-se que a resistência à erosão por cavitação é fortemente dependente do tamanho do grão da estrutura do material, que quanto menor, maior é a densidade de superfície de contorno do grão que proporciona uma ação de apoio contra a cavitação. Quanto à corrosão eletroquímica, um menor pH da solução aquosa contribui para aumento da erosão mecânica da cavitação.

EVANS (2005), cita que a cavitação grave pode causar danos significativos em apenas alguns dias, enquanto uma cavitação menor poderá não ser notada por vários anos. Suas pesquisas mostraram que a vida de uma bolha de cavitação é da ordem de três milissegundos, contudo milhares de bolhas formadas em qualquer ponto no tempo e implodidas em uma superfície sólida causam erosão como ilustrado na figura 3.12, onde são representadas as mesmas áreas do rotor de uma bomba centrífuga. A figura da direita mostra os danos causados após contínuas implosões de bolhas concentradas.

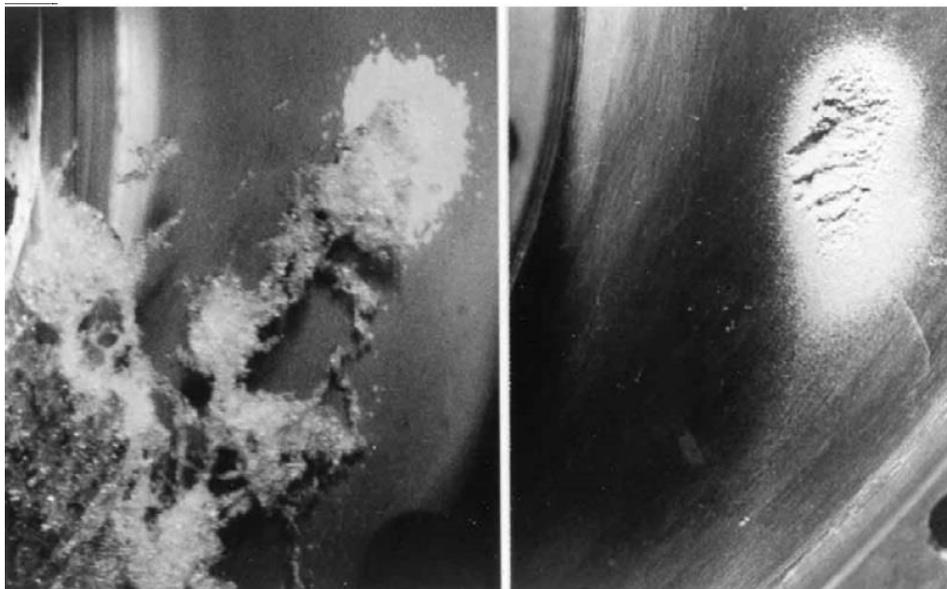


Figura 3.12 - Implosão das bolhas e danos na área
Fonte: Evans, 2005

SZKODO (2005) propõe um modelo matemático que descreve a erosão por cavitação baseado na função de distribuição de Weibull e na influência das propriedades mecânicas dos materiais. O fator de resistência à cavitação é função do tempo de incubação dos danos e da taxa volumétrica de perda de material.

Como período de incubação entende-se a primeira fase na qual a perda em volume da superfície do material é não mensurável apesar da cavitação estar ocorrendo. Durante esta fase inicial a erosão acumula energia de deformação plástica.

Numa segunda fase a intensificação dos danos causada pela erosão é observada, com um aumento significativo de perda em volume de material.

Na terceira fase a perda de volume é atenuada provavelmente devido à redução dos efeitos da cavitação pelo preenchimento das cavidades pelo líquido condensado em poças.

Finalmente na quarta fase a taxa de perda torna-se praticamente constante.

Basicamente o modelo mostra a perda de volume por erosão em função do tempo para materiais de diferentes resistências à deformação plástica e ao impacto de forma generalizada. Os gráficos das figuras 3.13 e 3.14 exemplificam a influência das propriedades mecânicas na resistência à cavitação e na fase de incubação dos danos.

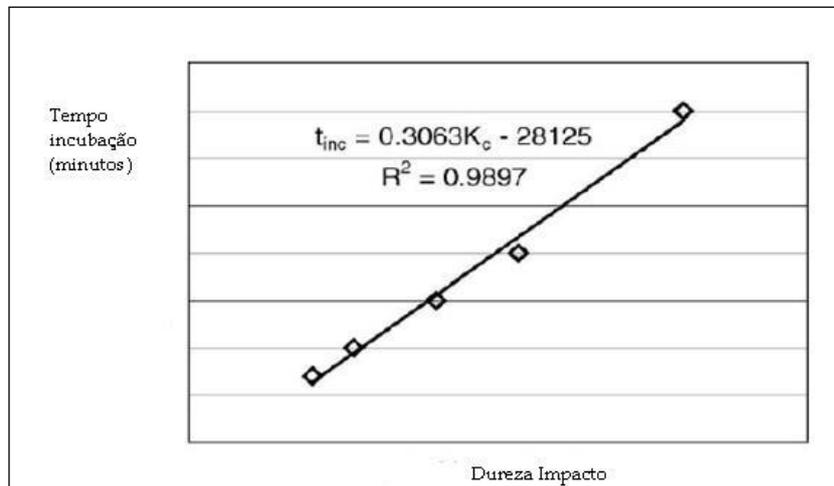


Figura 3.13 – Influência da dureza X Tempo
Fonte: Szkodo, 2005

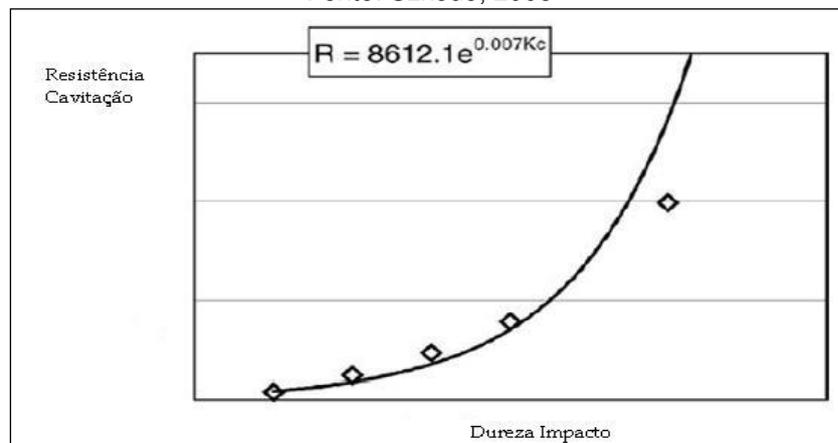


Figura 3.14 – Resistência à cavitação x Dureza
Fonte: Szkodo, 2005

R = Resistência à erosão por cavitação
Kc = fator relativo de tensão sobre carga de cavitação

COELHO (2006) cita que a intensidade da erosão no rotor depende do gradiente de pressão local de implosão das bolhas, ou seja, uma bomba operando com elevada altura de elevação gera uma maior taxa de erosão do que uma bomba com pequena altura de elevação desenvolvida. Também a dureza e acabamento do material do rotor influencia a taxa de erosão apesar de que somente essas duas características não são suficientes para determinar a resistência do material à cavitação.

RIBEIRO (2007) menciona que metais duros ou macios, dúcteis ou frágeis, ou não metálicos são susceptíveis a dano por cavitação em maior ou menor intensidade, conforme pode ser observado na figura 3.15, que apresenta taxas de erosão por cavitação de algumas ligas de aços.

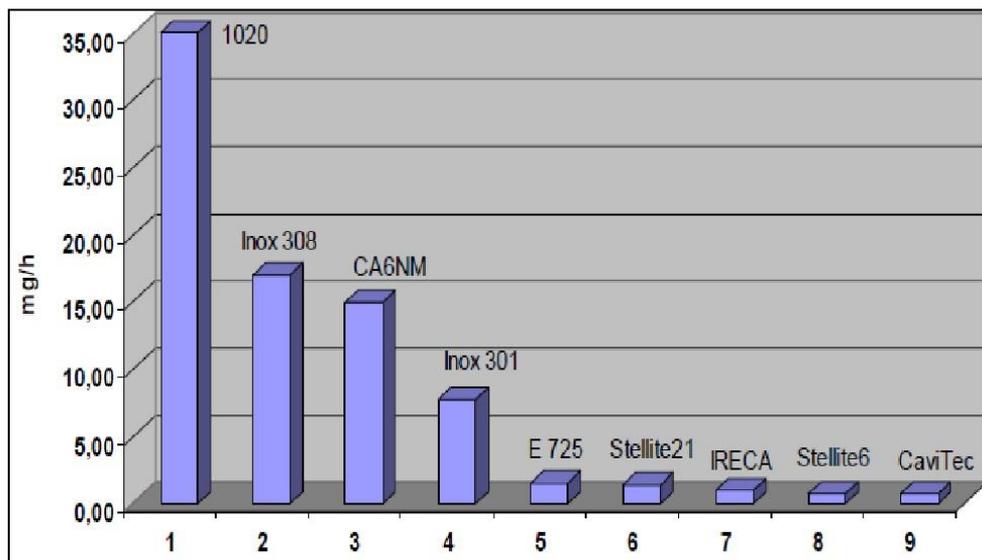


Figura 3.15 – Taxa de erosão por cavitação de ligas comerciais
Fonte: Ribeiro, 2007

3.1.1 Comentários

Embora a erosão por cavitação em bomba centrífuga seja um efeito de fácil observação com a desmontagem da voluta da bomba e consequente acesso ao rotor, observa-se um número insuficiente de experimentos para simulação, medição e análise com a própria bomba centrífuga. Em muitos dos experimentos utilizam-se de aparelhos de ultrassom ou vibratórios, que por suas características específicas produzem efeitos pontuais, com repetições periódicas e num líquido estacionário,

diferente da situação de bombeamento com resultados distribuídos em toda superfície do rotor em constante giro, numa frequência aleatória de ondas de choque bem como em um líquido em movimento. Quanto ao método de avaliação, apesar de muito usado, a taxa de profundidade média de penetração é sujeita a maiores dificuldades de padronização, seja pelas geometrias não uniformes da erosão, pelo número de pits por unidade de área e pelo próprio requerimento de medições precisas visto tratarem-se normalmente de grandezas da ordem de décimos ou centésimos de milímetros, dependendo do material, tempo de ataque e intensidade da cavitação. A análise da perda de massa absoluta é um indicador com menores interferências de medições além de mostrar-se disponível com balança de precisão digital encontrada no mercado, o que reforça sua aplicação neste trabalho.

Artigos e experimentos sobre erosão do rotor de bomba centrífuga por cavitação, em geral não apresentam uma método padronizado, o que impede a comparação de perda de massa mesmo quando em rotores de mesmo material, cuja geometria apesar de apresentar diferenças, quanto ao tipo aberto ou fechado, na forma das aletas, quanto a espessura, ou inclinação, possuem uma determinada rotação específica que os permitiriam serem comparada a outros em iguais condições hidrodinâmicas. Tais comparações poderiam ser úteis para estimativas da perda de massa, mesmo com uma faixa de precisão estendida. Como orientação, dois trabalhos citados na revisão bibliográfica, estimam a perda de massa por erosão por cavitação no ferro fundido cinzento, material com a mais próxima composição química do rotor em ferro fundido nodular usado neste trabalho.

Segundo IWAI e OKADA (1983) a perda de massa equivale a aproximadamente 25 mg/h, num ensaio realizado com aparelho vibratório, numa temperatura de 45 °C. Não é especificado claramente o nível de cavitação.

Segundo KITTREDGE (1961) a perda de massa num ensaio realizado com aparelho vibratório, equivale a 112,0 mg/h sem determinação do nível de cavitação, para obtenção deste resultado. Na ausência de normas, estes dois limites reconhecidamente amplos (de 25 a 112 mg/h) serão usados como referência para determinação da perda de massa com a operação da bomba com cavitação moderada.

3.2 POTÊNCIA CONSUMIDA

A potência consumida pelo eixo da bomba é produto da vazão deslocada pela altura de elevação desenvolvida, e expressa de acordo com a unidade conforme MACINTYRE (1980) nas equações (16) e (17).

$$P_c = \gamma * \frac{Q * H}{270 * \eta} \quad (16)$$

Potência em HP

$$P_c = \gamma * \frac{Q * H}{3,67 * \eta} \quad (17)$$

Potência em kW

γ em kgf/dm^3 , Q em m^3/h e H em mcl

Em bombas centrífugas radiais, objeto deste estudo, a potência aumenta continuamente com a vazão, de acordo com a curva exemplificada na figura 3.16.

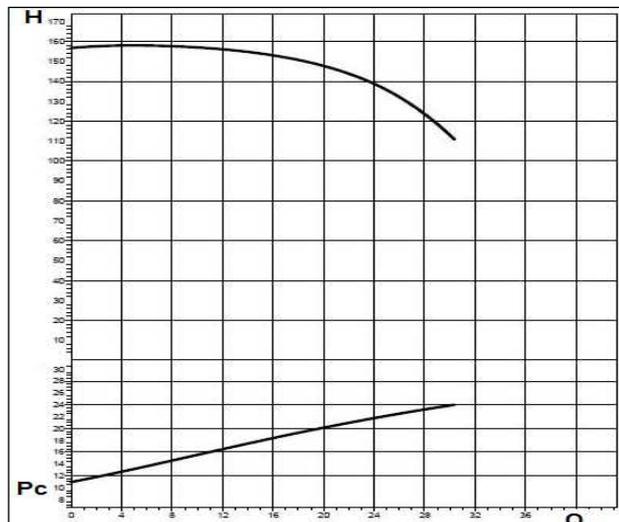


Figura 3.16: Curva Q x P_c
Fonte: Scanpump, 2009

Nas equações acima a potência consumida pelo rotor através do eixo de transmissão depende da combinação do rendimento elétrico do motor e hidráulico da bomba.

A potência disponibilizada pela rede de energia, calculada para cargas como motores elétricos trifásicos, pode ser calculada pela equação (18) conforme MACINTYRE (1980):

$$Pot = U * I * \cos \phi * \sqrt{3} \quad (18)$$

Onde U e I são respectivamente a tensão e corrente da linha e cosseno ϕ é o ângulo entre a tensão e a corrente de fase, também designado por fator de potência por expressar a relação entre potência real ativa, que é a parcela que realiza trabalho, e a potência aparente que corresponde a uma carga formada por resistências, ou, potência que existiria se não houvesse defasagem da corrente motivada pelas cargas indutivas.

FUKUSAKO e ARIE (1967) testaram uma bomba centrífuga cujo aparato completo é mostrado na figura 3.17, com oito diferentes rotações.

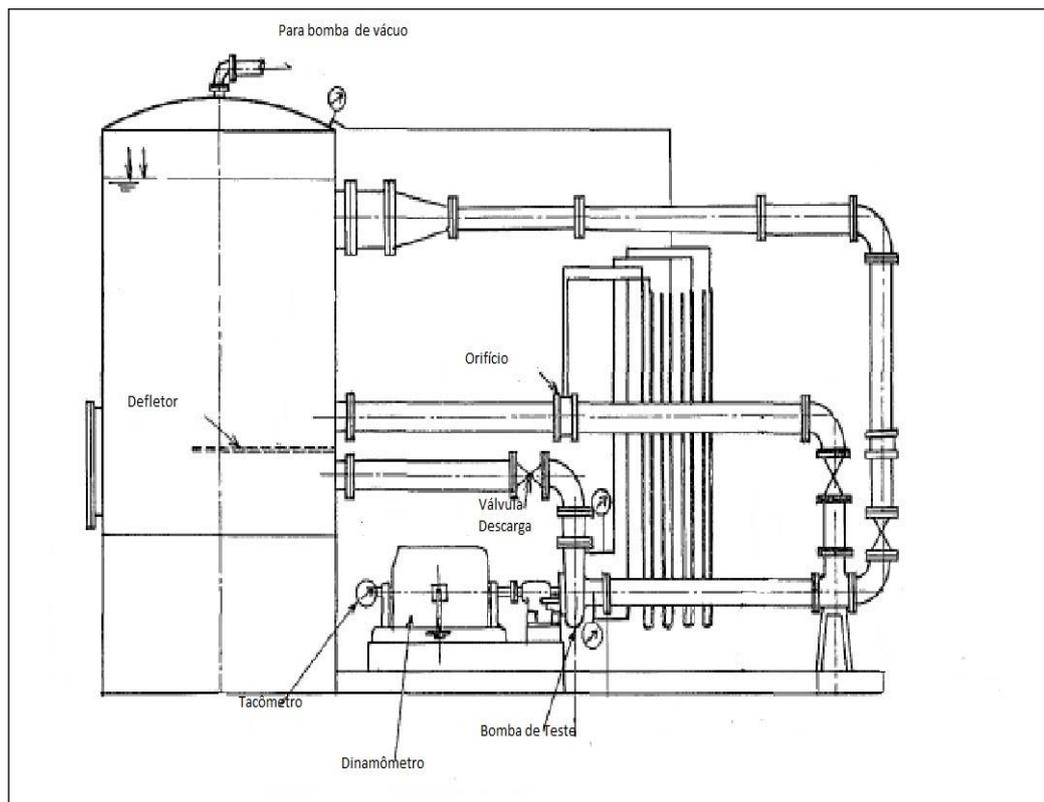


Figura 3.17 – Arranjo da instalação
Fonte: Fukusako e Arie, 1967.

Variando o $NPSH_d$ com redução da pressão de sucção para simular a cavitação, combinada com as velocidades do acionador, os autores revelaram correlações, como aumento de potência absorvida pelo eixo da bomba neste regime,

contrário a algumas investigações que relaciona a redução de potência. A figura 3.18 mostra a potência no eixo em função da variação do $NPSH_d$ com a vazão em m^3/h para as diferentes rotações.

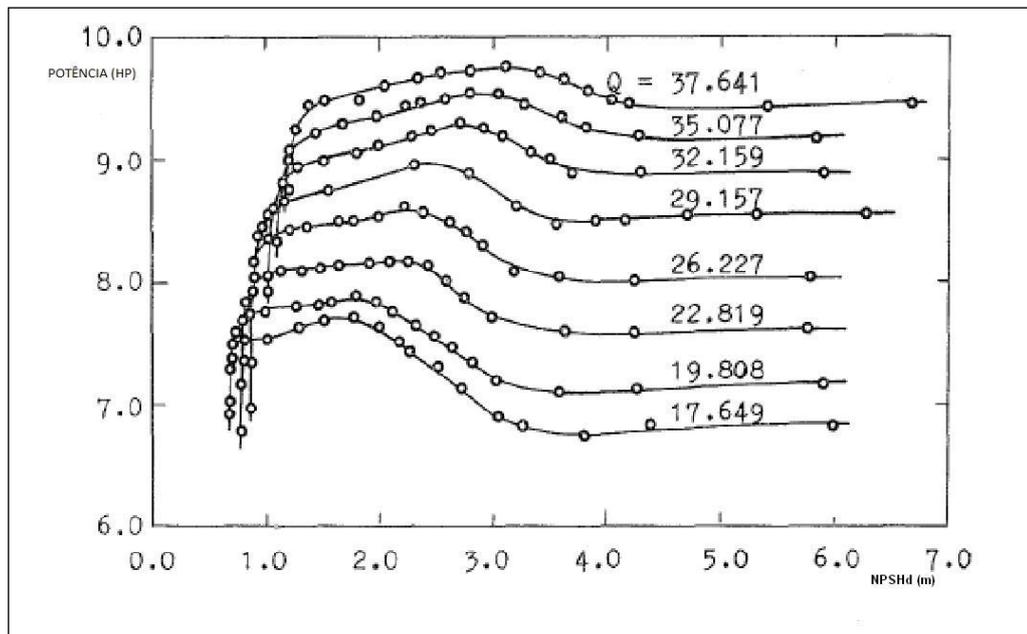


Figura 3.18 – $P_c \times NPSH_d$
Fonte: Fukusako e Arie, 1967

A potência absorvida aumentou para todas as vazões com a redução do $NPSH_d$ em regime de cavitação, conforme observa-se na fig. 3.18 para valores do $NPSH_d$ inferiores a 3,5 m. Contudo com valores muito baixos de $NPSH_d$ houve uma redução discreta da potência quando de condições mais severas de cavitação, comportamento este não explicado.

Neste experimento também observaram que a introdução intencional de ar na linha de sucção não melhorou os sinais da cavitação, e teve efeito negativo no desempenho hidráulico da bomba.

Outro detalhe refere-se à conclusão que uma pré-rotação do líquido gerada por um modo de indução a montante da sucção da bomba, tem tendência de melhorar o desempenho desta quando operando estritamente em cavitação.

3.2.1 Comentários

Este estudo pretende esclarecer o comportamento da potência quando da bomba operando com cavitação moderada, a partir de medições diretas através de equipamentos que monitoram a potência ativa. Em função do número reduzido de ensaios e/ou artigos que tratam da variação da potência consumida quando da bomba funcionando sob cavitação, em comparação com outros parâmetros mais explorados, este trabalho irá contribuir para dirimir as dúvidas existentes sobre a relação potência e cavitação com uma medição acessível à maioria das instalações.

Para a comparação das condições regulares e alteradas pela cavitação, será utilizada a norma ISO 9906 grau 2B, que para aceitação de equipamentos prevê tolerâncias para a altura, vazão e rendimento. Outras normas são a ISO 2548 classe C e ISO 3555. A escolha da ISO 9906 grau 2B ilustrada na figura 3.19 é justificada por apresentar diretamente um fator para o rendimento, próximo parâmetro a ser analisado, e que para as outras normas requer extrapolação.

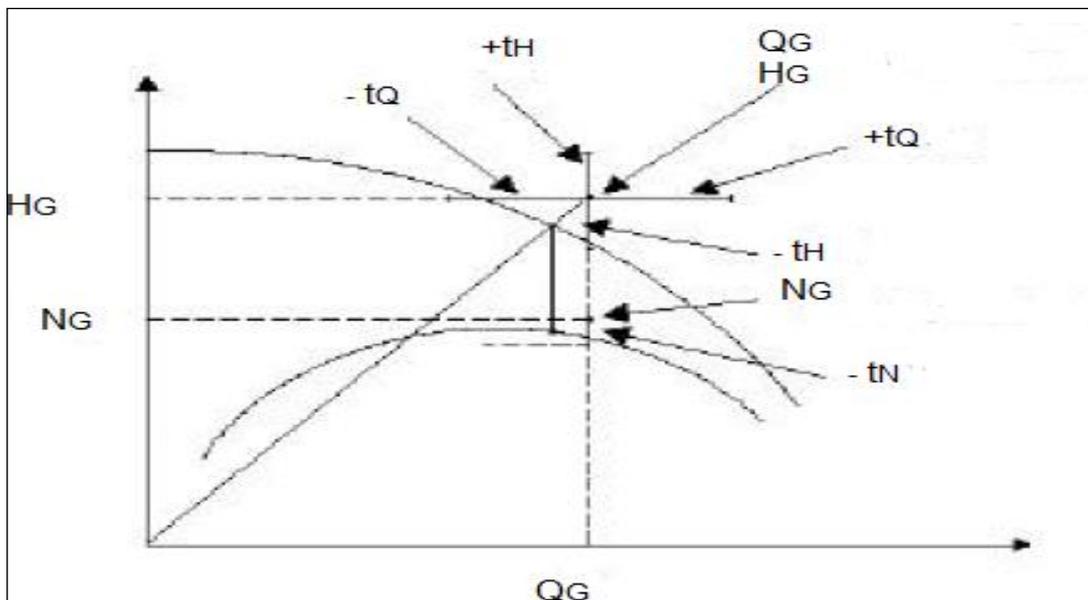


Figura 3.19: Tolerância ISO 9906 grau 2B

Sendo QG e HG a vazão e altura garantida e as tolerâncias inferiores e superiores denominados pelo sinal positivo e negativo e letra t seguida pelo subscrito do parâmetro (Q, H, N= η)

Resumidamente os fatores de tolerância são:

$$\Delta Q = + - 8\%$$

$$\Delta H = + - 5\%$$

$$\Delta \text{Rendimento} = - 5\%$$

Para a referência da potência consumida a tolerância será de + 8%, resultado quando utilizados os limites inferiores e superiores da norma para a vazão, altura e rendimento, numa simulação hipotética.

3.3 RENDIMENTO

A queda de rendimento em bombas operando com cavitação é normalmente associada ao ensaio de NPSH para caracterização do fenômeno, onde constata-se a redução da altura de elevação desenvolvida, para uma vazão constante, gerada pela perda de carga na sucção. Este ensaio para determinação da cavitação incipiente não fornece informações sobre a tendência do rendimento em níveis mais severos de cavitação.

NOHMI et al (2003), utilizaram um código CFD (Computacional Fluid Dynamics) para previsão da queda de rendimento de uma bomba centrífuga radial de pequeno porte quando do surgimento da cavitação. Os resultados foram obtidos em um experimento com uma bomba monitorada por transdutores de pressão e visualização do fenômeno através de uma janela acrílica na voluta. As previsões da queda gradual da pressão da bomba não apresentaram boa correspondência devido a instabilidades do fluxo, requerendo novos desenvolvimentos para melhorar a acurácia do modelo.

SCHRÖDER (2009), em estudo de caso de uma bomba centrífuga recalçando água limpa, na temperatura média de 20 °C, instalada numa elevatória conforme figura 3.20, obteve através de medições de campo condições de funcionamento em um regime sem cavitação e com cavitação. O nível desta cavitação foi caracterizado como crítica devido os efeitos de erosão detectados no rotor da bomba após inspeção e os altos níveis de ruídos. Tal classificação foi adotada em consenso com inspetores do usuário do equipamento.

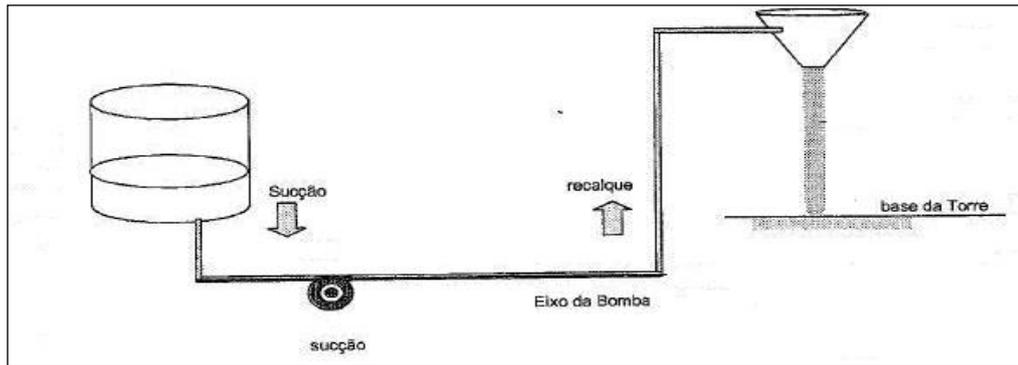


Figura 3.20 – Esquema da instalação
Fonte: Schröder, 2015

Os valores de campo foram disponibilizados através de transdutores de pressão e medidor de vazão ultra sônico da equipe de medições.

A curva característica da figura 3.21 elaborada com valores do ensaio no local mostra o comportamento original da bomba para o ponto de projeto de $Q = 600 \text{ m}^3/\text{h}$ e $H = 67 \text{ mca}$, e a curva modificada devido efeitos da cavitação detectada por ruídos (sem instrumentação) e visualização da erosão do rotor.

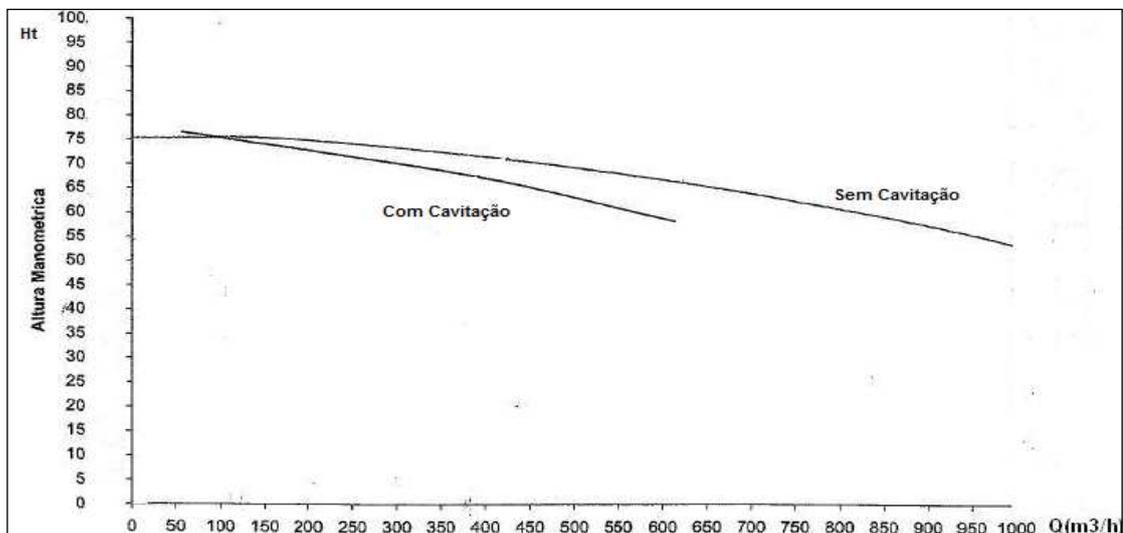


Figura 3.21 – $H_t \times Q$ do sistema
Fonte: Schröder, 2015

As características da bomba, rotor e acionador para análise estão discriminadas abaixo:

- Bomba: Centrífuga, Horizontal, base-luva, flanges de sucção e recalque de diâmetro 0,25 m e N_s igual a 134;

- Rotor: semiaberto, em ferro fundido, 6 aletas, diâmetro de 0,37 m, e b_2 igual a 0,04 m;
- Acionamento: motor elétrico trifásico 184 kW, IV polos, 60 Hz.

A tabela 3.6 resume as condições do teste de campo, com uma variação significativa de rendimento para a mesma vazão, com queda na altura de elevação, e aumento da potência consumida medida em um Wattímetro, quando operando com cavitação crítica, conforme classificação obtida com os recursos disponíveis.

Tabela 3.6: Rendimento em campo

Condição	Q m ³ /h	Ht mcl	P _c kW	Rendimento %
Sem cavitação	600	67,0	136,4	80,3
Com cavitação	600	60,5	137,8	71,8

Fonte: Schröder, 2015

STUPARU et al (2010), apresentaram um método de CFD para análise do comportamento de uma bomba de grande porte que permite detectar o início da cavitação para cada ponto operacional. Os dados de saída mostraram uma boa previsão quando comparados com resultados experimentais. O código Fluent multifásico utilizado capturou corretamente a distribuição da cavitação vaporosa sobre a lâmina do rotor da bomba. As características da bomba do ensaio para comparação experimental estão mostradas na figura 3.22 e na tabela 3.7.



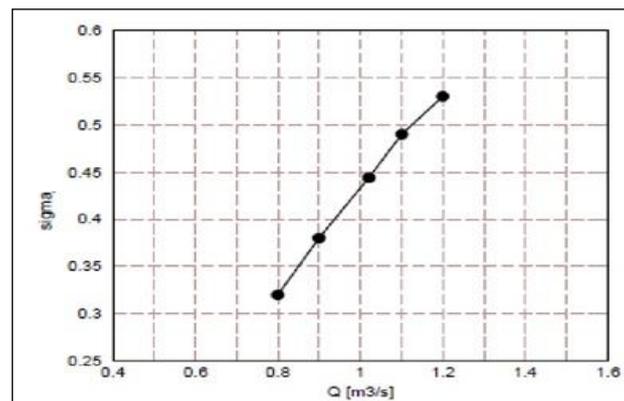
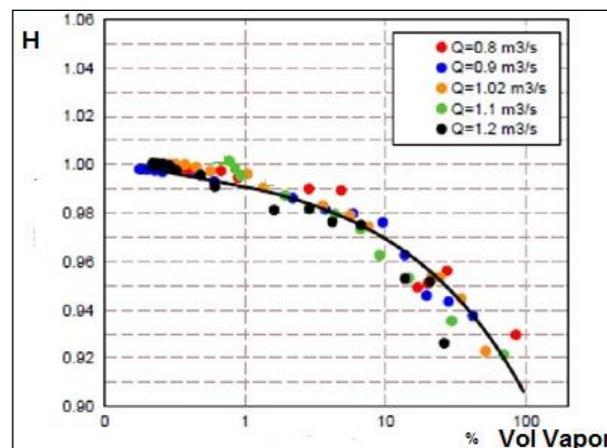
Figura 3.22: Montagem da bomba com motor
Fonte: Stuparu et al, 2010

Tabela 3.7 – Parâmetros operacionais e geometria do rotor

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Rotação	N	1500	rpm
Vazão	Q_{BEP}	1	m^3/s
Pressão	H	159,5	mcl
Número de aletas	Z	5	
Diâmetro do rotor	D_2	0,84	m
Altura das aletas	b_2	0,080	m

Fonte: Stuparu et al, 2010

A partir da simulação numérica do escoamento multifásico para cinco pontos de funcionamento da bomba, os resultados mostraram a variação do valor do coeficiente de cavitação (σ) em função do fluxo conforme figura 3.23 e a queda da curva de desempenho em função do aumento do volume de vapor dentro da área do rotor da bomba, conforme figura 3.24.

Figura 3.23 – Sigma x Q
Fonte: Stuparu et al, 2010Figura 3.24 – Razão H X Volume de vapor
Fonte: Stuparu et al, 2010

A análise concluiu que a altura de elevação da bomba em geral é reduzida conforme o desenvolvimento da cavitação ou aumento do volume de vapor, causando equivalente queda no rendimento do conjunto moto bomba.

KONÉ et al (2011) montaram experimento conforme figura 3.25 para estudar visualmente com uma câmara de alta velocidade o início da cavitação em uma bomba centrífuga e obter o valor real do NPSH_r que corresponde a queda de eficiência na ocorrência do fenômeno. As condições de operação para simulação variaram de acordo com a velocidade do acionador, controle da válvula de sucção e temperatura da água.

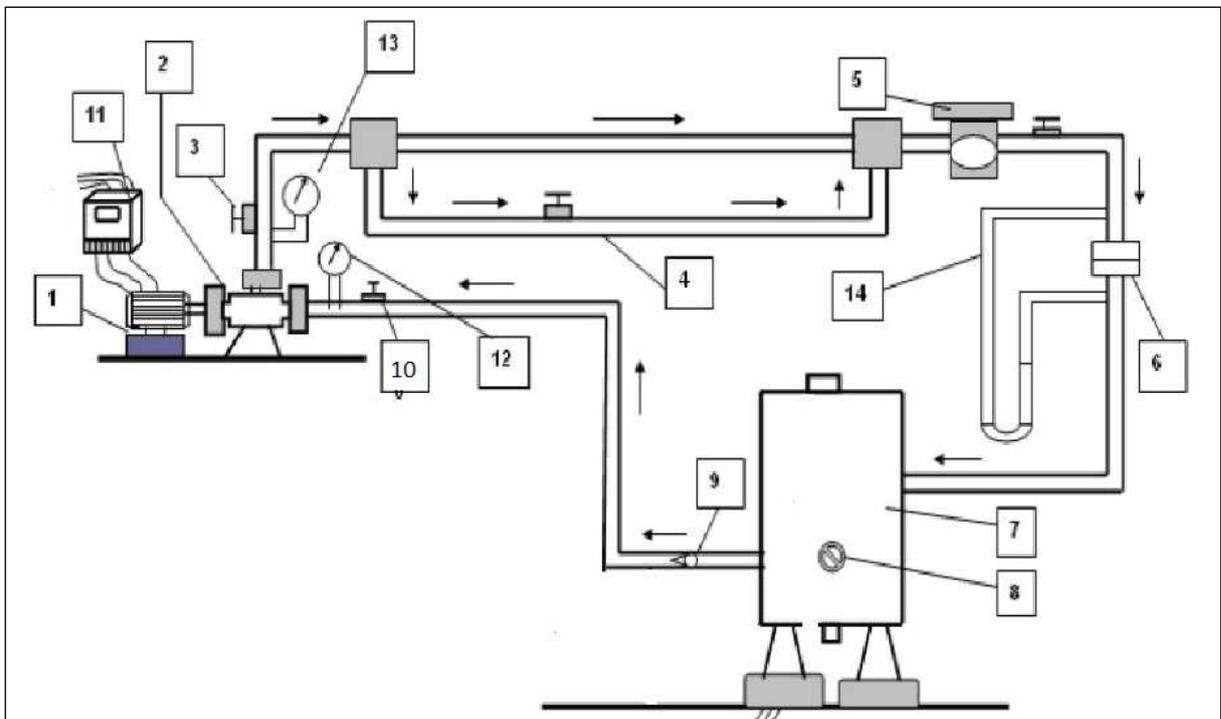


Figura 3.25 – Circuito de teste
Fonte: Koné et al,2011

Legenda: 1 –motor da bomba , 2 – bomba, 3 – válvula de descarga, 4 – linha de desvio, 5 – medidor de vazão, 6 – orifício, 7 – tanque principal, 8 – aquecedor elétrico, 9 – válvula principal de sucção, 10 – válvula de controle, 11 – inversor de frequência, 12 – manômetro de sucção, 13 – manômetro de descarga, 14 – manômetro tipo U

A voluta da bomba em material transparente permitiu uma boa visualização a partir de uma luz estroboscópica e processo fotográfico de alta resolução. A faixa de ensaio está apresentada na tabela 3.8 abaixo, e após

variações nas condições de sucção mostraram que a cavitação já está desenvolvida antes da queda de 3% na altura de elevação total da bomba.

Tabela 3.8 – Condições do Teste

Parâmetro	Unidade	Faixa
Vazão	l/s	0,3 - 1,1
Rotação	rpm	1500 - 3000
Temperatura	°C	20 - 90

Fonte: Koné et al, 2011

Os resultados da tabela 3.9 mostram o comprimento das cavidades (CC) formadas sobre a superfície do rotor em função de variações dos parâmetros escolhidos.

Tabela 3.9 – Condições do teste e comprimento das cavidades

Ps bar	Pr bar	Ht mcl	N rpm	CC %
0,60	3,2	38,3	3000	40
0,52	3,0	36,0	3000	70
0,40	3,1	35,6	3000	>75

Fonte: Koné et al, 2011

A redução de pressão com conseqüente aumento no CC, mantido a vazão constante, gerou uma redução no rendimento da bomba conforme observado na queda da altura de elevação total (Ht).

DING et al (2011), desenvolveram um modelo de simulação com ferramenta CFD para previsão do rendimento de uma bomba axial recalçando água, em condição de cavitação. Apesar do algoritmo recente, os autores ressaltam que ainda é um processo difícil a simulação da cavitação devida os efeitos tridimensionais turbulentos e viscosos envolvidos no fenômeno, lembrando que a convergência desses códigos podem levar semanas de computação. Outra dificuldade refere-se a traduzir a geometria complexa da bomba num modelo CFD.

O modelo considera as propriedades reais da água, a aeração e compressibilidade desta a 20 °C. O arranjo conforme figura 3.26 consta de uma bomba, medidor eletromagnético de vazão, estabilizador no tanque de aspiração, transdutores de pressão e janela transparente na voluta da bomba.

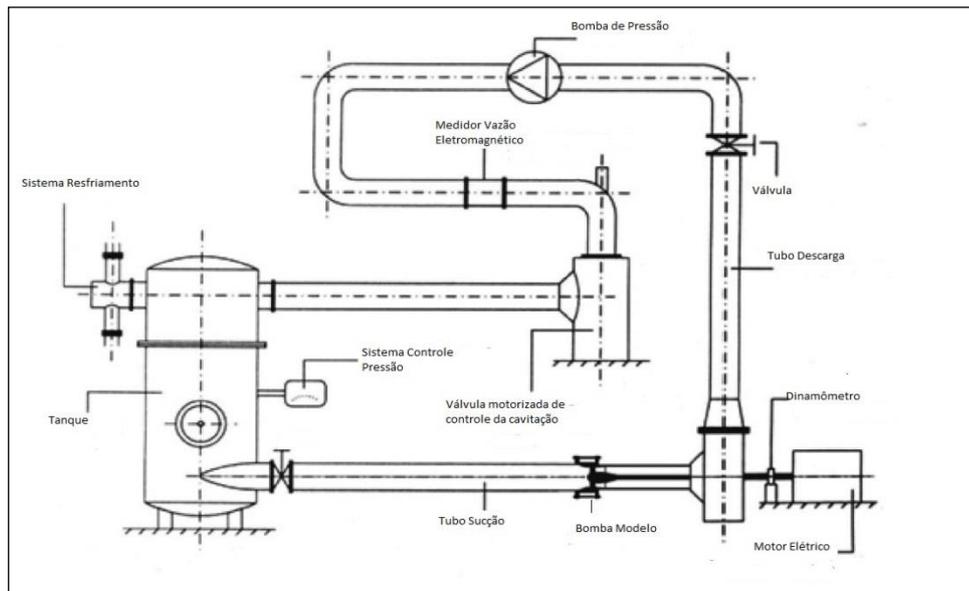


Figura 3.26 – Esquema do teste
Fonte: Ding et al, 2011

Durante os testes variou-se a pressão de sucção e $NPSH_d$ e os resultados reais e preditos pelo modelo são apresentados na figura 3.27 com a bomba com rotação de 1.150 rpm.

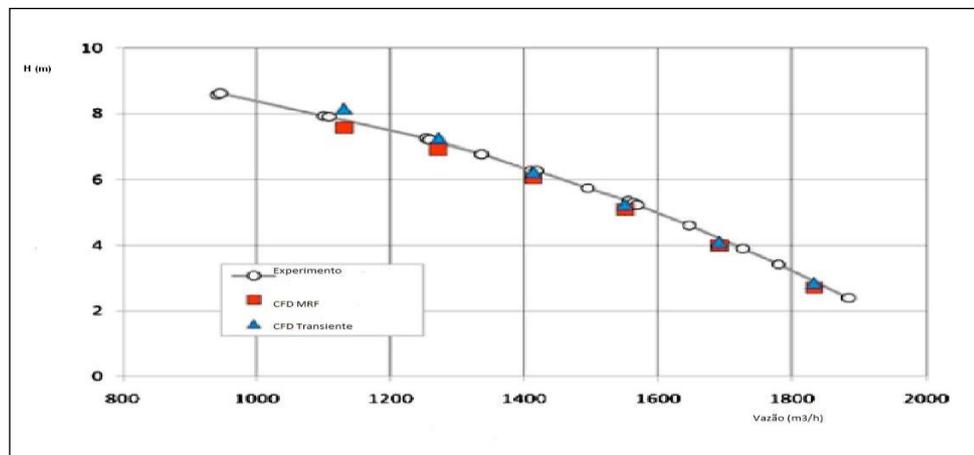


Figura 3.27 – H X Q para 1150 rpm
Fonte: Ding et al, 2011

Para validar a cavitação incipiente foi observada visualmente a formação de bolhas no rotor da bomba com análise de vídeo imagens. A condição de cavitação foi investigada com a queda de 3% na altura de elevação da bomba em função da variação do $NPSH_d$.

3.3.1 Comentários

A queda de rendimento da bomba pode impactar de modo muito significativo em instalações, seja pela perda de produção envolvida, seja pelo risco de não corresponder ao suprimento contratado como em sistemas de abastecimento de água coletivos. Os experimentos normalmente reproduzem a queda na eficiência da bomba para a cavitação incipiente, sendo raros os trabalhos que prospectem o comportamento quando da cavitação em níveis mais severos. Neste trabalho o objetivo é realizar comparações do rendimento da bomba com condições regulares e com cavitação moderada, e gerar valores para uso prático em instalações de médio e grande porte com instrumentação acessível.

Conforme 3.2.1 a variação aceitável para o rendimento é de - 5%, sendo que valores inferiores, na operação da bomba com cavitação moderada, serão interpretados como não conformes.

3.4 RUÍDOS

O efeito mais conhecido da cavitação em bombas é a emissão de ruídos, que pode ser detectada até mesmo sem a utilização de instrumentos. Os sinais acústicos são dependentes da intensidade do fenômeno e também das condições de instalação dos equipamentos e acessórios de bombeamento que podem ampliar ou amortecer os sons conforme os meios de propagação em locais abertos ou fechados. Quanto à caracterização destes ruídos é comum a utilização de analogias que variam conforme investigadores, como assovios agudos, estouros intermitentes, gravetos de madeira sendo queimados, ou pedras girando em betoneiras. Quaisquer que sejam as comparações, tais ruídos são normalmente diferentes dos verificados em uma bomba funcionando com cavitação. Embora existam dificuldades para padronizar os níveis aceitáveis de ruídos emitidos em funcionamento por uma bomba quando operando em condições regulares, é comum adotar valores que não sejam prejudiciais aos sentidos humanos durante a exposição para inspeção, monitoramento ou mesmo durante a passagem por áreas onde existam tais bombas.

TOMÁS (1986), em um experimento conforme ilustrado na figura 3.28, utilizou técnicas acústicas para detecção e classificação da cavitação. A bomba centrífuga monobloco utilizada é acionada por um motor de 2,2 kW de potência e velocidade de 2.850 rpm e a tubulação de sucção e recalque de quatro e três polegadas respectivamente.

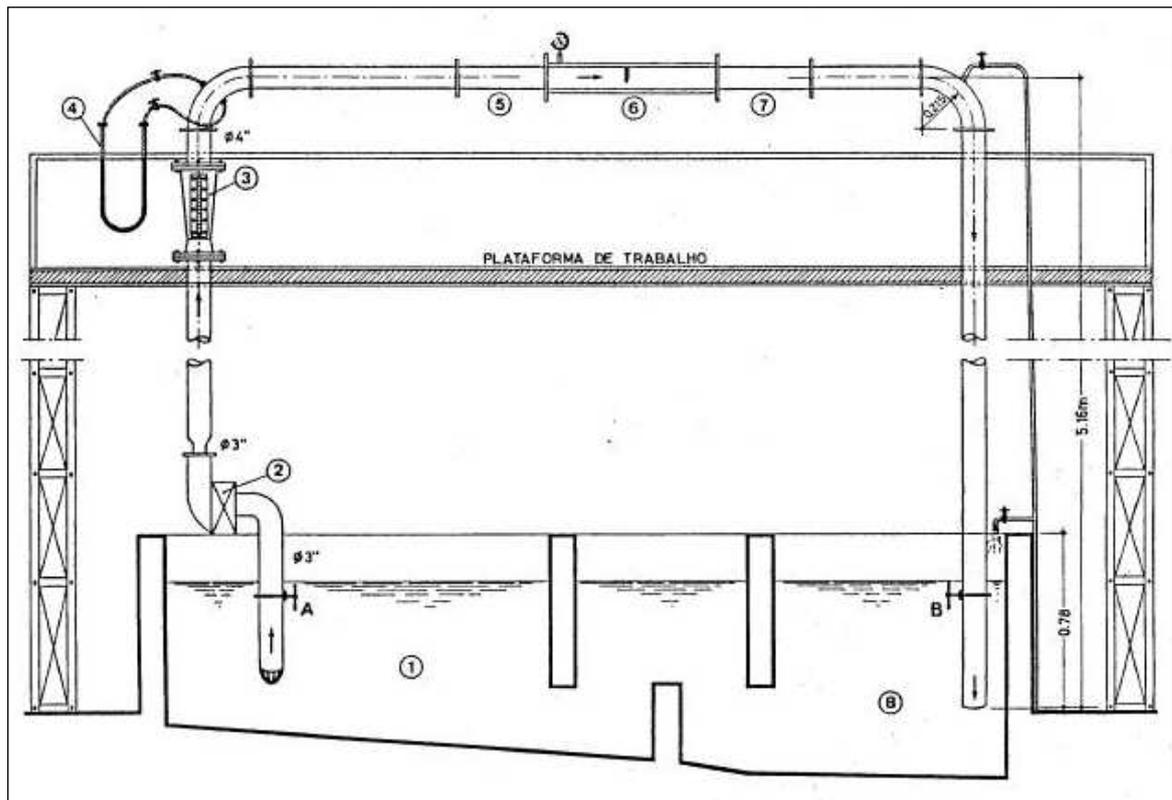


Figura 3.28: Instalação dos ensaios
Fonte: Tomás, 1986

1-reservatório de alimentação; 2 -grupo moto bomba; 3-rotâmetro; 4 -medição de vazão
5-transição de seção; 6-seção de ensaio; 7-transição de seção; 8-reservatório de restituição

A-válvula a montante;
B-válvula a jusante

Sobre os sinais sonoros do ensaio a autora ressalta que é importante separar os ruídos da cavitação dos demais exteriores á instalação como os originados por estruturas, ressonâncias da coluna de água, e outros. Normalmente é possível isolar as faixas específicas da ocorrência da cavitação. De um modo geral pode-se dividir o nível de intensidade sonora conforme três zonas diagnosticadas nos ensaios como:

- Zona A - sem cavitação, onde o ruído emitido por fontes sonoras exteriores ao fenômeno é suficientemente intenso para camuflar os ruídos hidrodinâmicos.

- Zona B - onde a progressiva redução do índice de cavitação por fechamento da comporta e redução de pressão apresenta uma diferença da zona A de cerca de 20 dB.

- Zona C - com a cavitação desenvolvida a intensidade sonora é relativamente superior a mais de 25 dB quando comparadas a zona A.

Uma variação significativa da pressão sonora em dB para diferentes frequências em função do índice de cavitação pode ser visualizado na figura 3.29 para um determinado grau de fechamento da comporta a montante da área de medição.

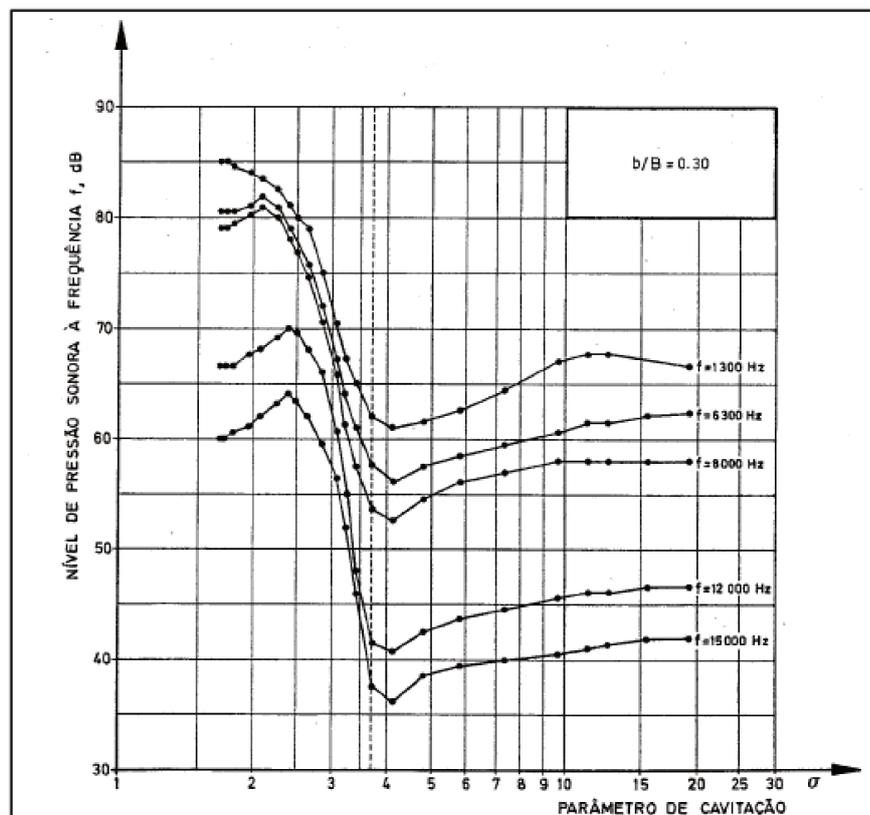


Figura 3.29: Variação sonora x σ
Fonte: Tomás, 1986

Conforme a figura 3.29, observa-se que:

- Para valores elevados do índice de cavitação (ou ausência do fenômeno) os níveis sonoros variam discretamente com a frequência considerada.

- A medida que se diminuiu o valor do índice de cavitação e aproximando das condições do surgimento do fenômeno os níveis de ruídos reduzem progressivamente até um valor mínimo, não havendo uma explicação satisfatória para este desvio.

- A partir de certo valor do índice de cavitação que caracteriza o fenômeno desenvolvido, os níveis sonoros aumentam bruscamente até um valor máximo.

- Para valores suficientemente reduzidos do índice de cavitação os ruídos são atenuados discretamente.

A discreta redução para os menores índices de cavitação podem ser atribuídos provavelmente ao efeito de amortecimento do colapso das bolhas de vapor na água e formação de um número crescente de pequenas bolhas gasosas livres, embora esta explicação não é suficientemente comprovada em outros experimentos.

ALFAYEZ e MBA (2005), montaram experimentos com três bombas centrífugas para detectar a cavitação incipiente com técnica de emissão acústica. Observaram inicialmente que a cavitação ocorre numa pressão crítica que varia com as propriedades do líquido e com os parâmetros físicos da bomba entre os quais a rugosidade da superfície dos materiais.

Os autores citam que as diversas investigações já realizadas mostram claramente uma relação dos ruídos com a intensidade da cavitação, e que outras interações como turbulência no rotor e voluta podem interferir nas avaliações. Citam que Mc NULTY e DEEPROSE (1972) demonstraram que os níveis mínimos de ruídos ocorrem quando a bomba opera no BEP (Best Efficiency Point). Os ensaios foram centrados em três bombas com características distintas tanto no tipo como na capacidade conforme tabela 3.10 com sensores colocados a 0,5 m do flange de sucção e a 0,5 m da descarga da bomba.

Tabela 3.10 – Características das bombas

Bomba	Potência kW	$Q_{m\acute{a}x}$ m^3/h	Eficiência %
1	60	204	70,6
2	127	1100	83,0
3	2200	2210	85,5

Fonte: Alfayez e MBA, 2005

Durante a execução do ensaio foram registradas as emissões acústicas para diferentes vazões das bombas, tendo após três testes para cada conjunto observado que os resultados experimentais concordam com a previsão teórica dos menores níveis de ruídos quando as bombas operam no BEP ou muito próximos deste.

Com as reduções do $NPSH_d$ picos de ruídos foram notados quando da queda de 3% na altura de elevação das bombas, como mostra a figura 3.30 do teste da bomba 2.

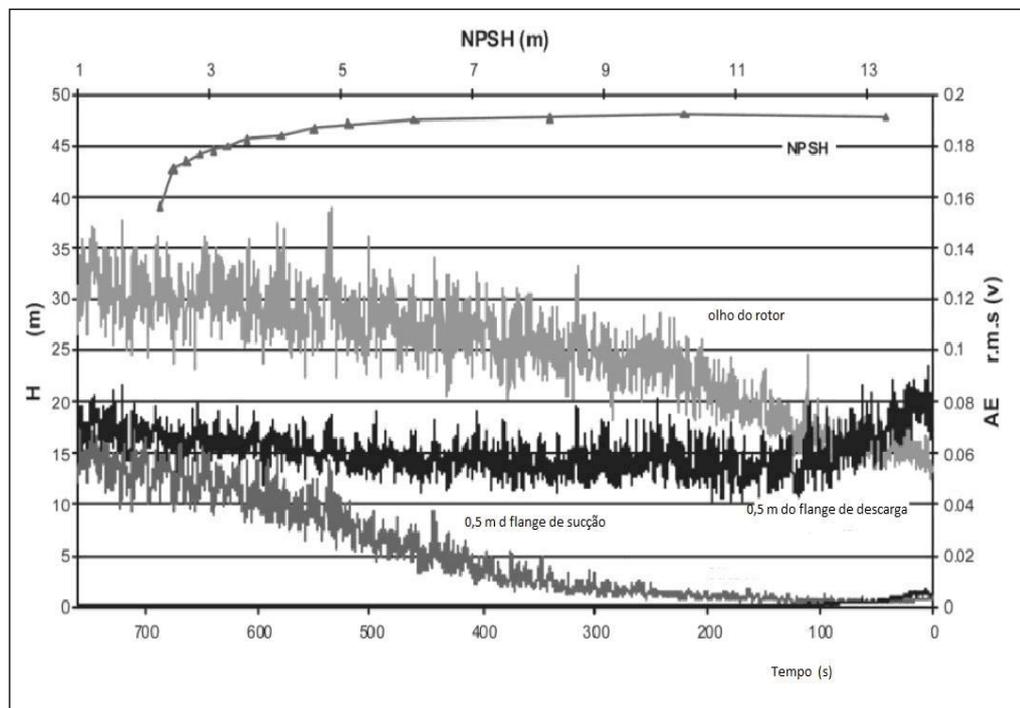


Figura 3.30 – Emissão acústica para $Q= 425 m^3 /h \times NPSH_d$

Fonte: Alfayez e MBA, 2005

Apesar da relação do aumento dos ruídos com a intensidade da cavitação, os autores mencionam que um pico na bomba 3 ocorreu um pouco antes da queda de 3% da altura de elevação, fenômeno já demonstrado anteriormente em

outras investigações, e que, a maior emissão acústica surgiu com a vazão de shut-off, devido a elevada turbulência gerada pelo fechamento total da válvula de controle na descarga.

SCHRÖDER (2009), em um estudo de caso de uma bomba centrífuga recalçando água, instalada numa estação de tratamento realizou medições de ruídos com um decibelímetro no local da instalação com a bomba funcionando com cavitação caracterizada como moderada devido o aumento do sinal sonoro e queda de desempenho da curva característica da bomba levantada com transdutores de pressão e medidor de vazão ultra sônico e comparou com o regime regular de funcionamento obtido na bancada de teste do fabricante.

A figura 3.31 representa os três conjuntos instalados, embora o ensaio registrado seja unicamente na bomba três, à direita do croqui.

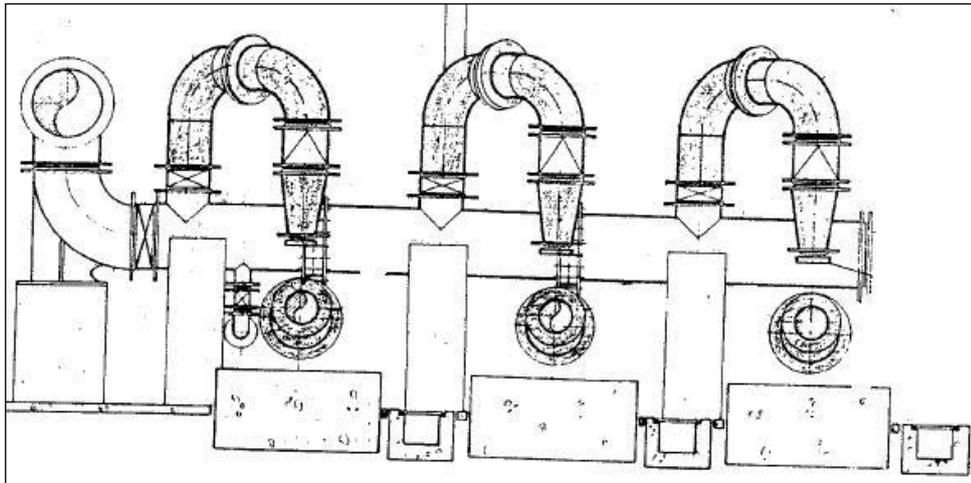


Figura 3.31– Instalação das bombas
Fonte: Schröder, 2015

A curva característica elaborada com dados do fabricante e os pontos assinalados na condição de projeto e com cavitação moderada na instalação, são mostradas na fig. 3.32.

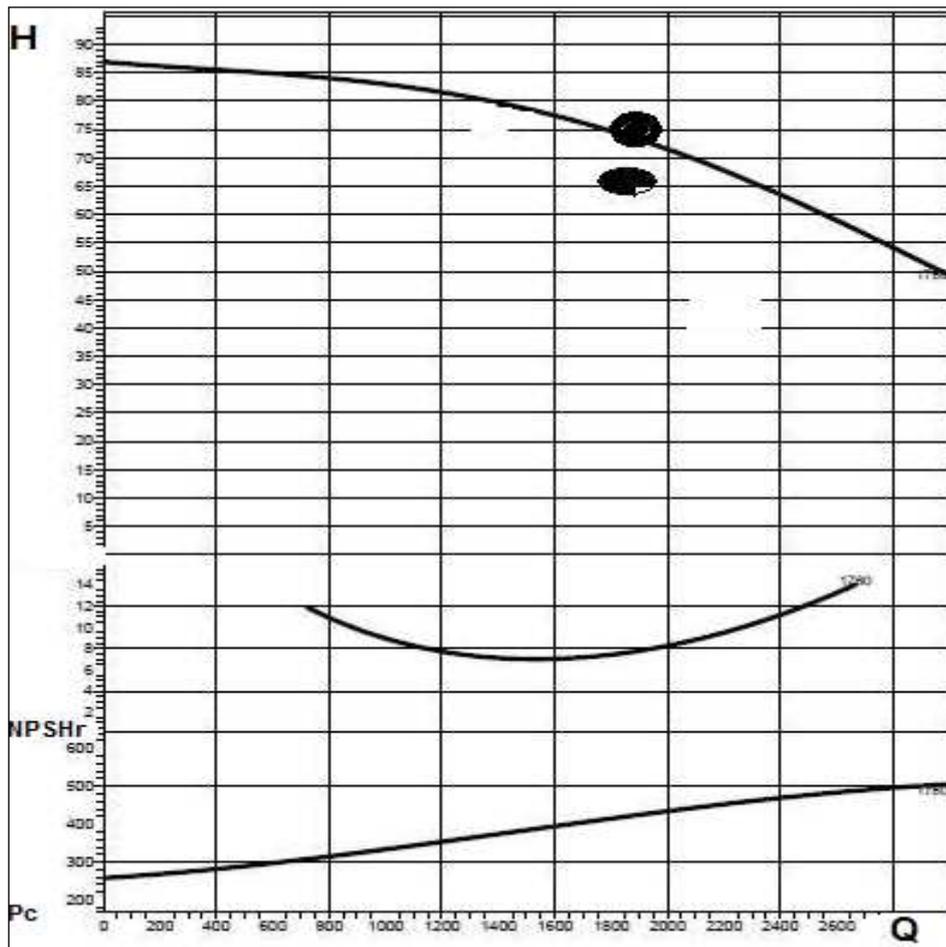


Figura 3.32 – Ponto de operação sem cavitação e com cavitação
Fonte: Scanpump, 2009

O decibelímetro foi instalado em um pedestal a 0,25 m da voluta, paralelo ao eixo de rotação da bomba, semelhantemente ao executado pelo fabricante quando do teste de desempenho, sendo que os ruídos de fundo na instalação de campo eram praticamente desprezíveis visto que a estação é localizada em área afastada de fontes sonoras como trânsito de veículos ou indústrias.

As características da bomba, rotor e acionador, relevantes para análise estão discriminadas abaixo:

- Bomba: centrífuga, Horizontal, base-luva, flanges de sucção e de recalque de 0,35 e 0,30 m e N_s igual a 205;
- Rotor: semiaberto, em ferro fundido, 5 aletas, diâmetro de 0,40 m, b_2 de 0,106 m;
- Acionamento: motor elétrico trifásico, 370 kW, IV polos, 60 Hz.

A vazão de 1.880 m³/h ou de projeto, serviu de comparação para os níveis sonoros obtidos no teste. Em campo com cavitação moderada segundo os parâmetros adotados, os sinais acústicos apresentaram valores acima do permitido para instalações semelhantes.

Na tabela 3.11 observa-se as variações acústicas para a condição de projeto e com cavitação moderada.

Tabela 3.11 – Condições operacionais e ruídos

Q m ³ /h	H m	Ruído dB
1880	74,0	82
1880	66,5	98

Fonte: Schröder, 2015

GULICH (2008), escreve sobre os mecanismos de excitação responsáveis pelos ruídos da cavitação e que a implosão das bolhas de vapor geram sinais de altas frequências na ordem de 10 a 1.000 KHz enquanto as pulsações de pressão originadas na sucção dos rotores pela redução do NPSH_d, geram sinais de frequências normalmente entre 1 e 2 KHz.

As ondas de pressão decorrentes da implosão simultânea de inúmeras bolhas de vapor com comprimentos na ordem do tamanho do passo da aleta do rotor na zona de alta pressão são responsáveis pelos ruídos de maior intensidade.

Observa que mesmo antes dos valores de NPSH_d proporcionarem uma queda de 3% na altura de elevação da bomba, os sinais acústicos da cavitação já se manifestam, sendo que com o aumento do número e volume das bolhas de vapor, tornam-se mais intenso até um valor máximo e depois apresentam uma redução da pressão acústica, provavelmente causado pelo amortecimento do impacto na fronteira sólida dos canais do rotor.

Dentro desta perspectiva o autor não considera a medida da pressão sonora como um método totalmente seguro para medir a intensidade da cavitação principalmente se aliada a instrumentação e faixa de frequências inapropriadas.

O ruído de fundo causado por excitações mecânicas como rolamentos, selos de vedação bem como as turbulências do fluxo em válvulas na sucção ou pelas instabilidades no canal do rotor também podem contribuir para dificultar a análise isolada do ruído da cavitação.

Outra consideração refere-se que o ruído tende a diminuir com o aumento da temperatura do líquido, efeito este ainda não explicado.

NEPPIRAS (2009), revisa artigos sobre os campos acústicos gerados por cavitação, cobrindo dados teóricos e experimentais necessários à compreensão adequada dos efeitos da cavitação e suas aplicações.

O problema básico da acústica da cavitação é determinar os campos de pressão em conjunto com o movimento das bolhas de vapor e às vezes com a variação da temperatura.

Para tal é necessário fazer suposições que muitas vezes torna-se excessivamente simplificadas para aplicações práticas como:

- O comprimento de onda acústica é grande quando comparado com as dimensões da bolha;
- Não há forças de corpo presentes, ou seja, são ignorados os efeitos gravitacionais e todas as forças resultantes do campo de som;
- A densidade do líquido é muito superior e sua compressibilidade muito inferior aos dos gases dissolvidos;
- A velocidade do líquido é muito pequena quando comparada com a velocidade do som.

O problema dinâmico torna-se complicado quando a transferência de massa de evaporação (bolha) e condensação (colapso) ocorre juntamente com fluxo de calor, onde a pressão de vapor assume clara importância no tratamento do fenômeno.

As assimetrias da bolha durante o colapso podem ser explicadas a partir da proximidade com as paredes de contorno, as oscilações de outras bolhas e talvez o gradiente de pressão.

As distorções causam o colapso da bolha vaporosa e erosão a partir de elevadas pressões em superfícies, com conseqüente geração de ondas acústicas. Métodos numéricos aliados a experimentos fotográficos, estimam a pressão na faixa de 800 a 4.500 bar.

As interações destas forças envolvidas com o campo acústico é um problema de grande complexidade, contudo recentemente com o auxílio de técnicas de medições como fotografias com molduras da ordem de milhares de quadros por segundo, holografia, hidrofones de pouca interferência e outras técnicas, estão sendo obtidas informações adequadas do campo acústico.

CUDINA e PREZELJ (2009), realizaram experimento para detectar o início de cavitação em uma bomba centrífuga utilizando a técnica acústica. Tal procedimento poderia ser utilizado em uma instalação de campo, para alarme ou desligamento da bomba através de um sistema de controle de proteção contra os danos indesejáveis da cavitação tais como queda do desempenho hidráulico e erosão por pitting das superfícies do rotor e vizinhanças. A montagem do experimento está representada na figura 3.33.

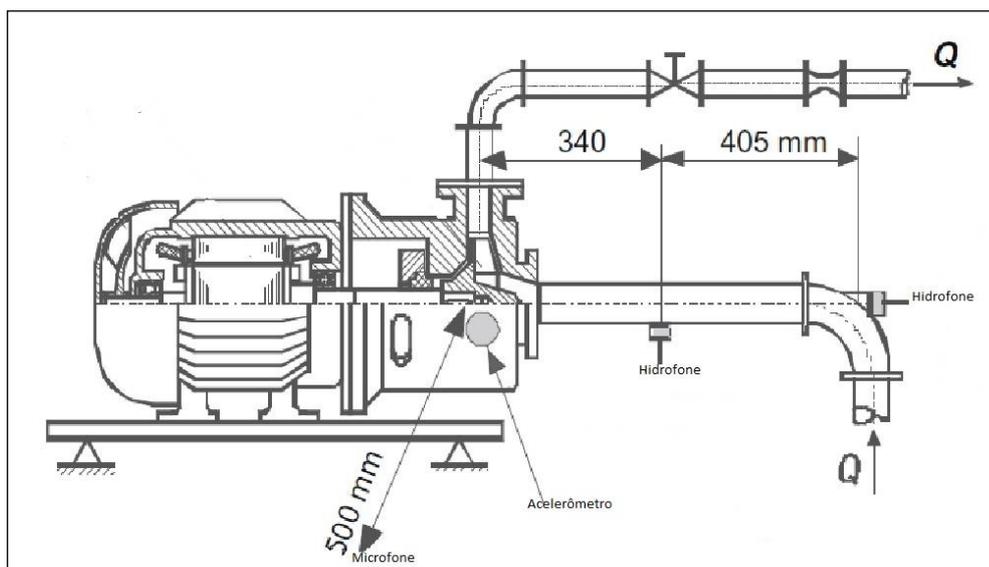


Figura 3.33 – Montagem do experimento
Fonte: Cudina e Prezelj, 2009

Os autores relembram que existem duas maneiras para detectar o aparecimento da cavitação em bombas, sendo o primeiro a modelagem numérica que embora tenha tido grande desenvolvimento recente ainda não obteve nenhum algoritmo exato para calcular o início do fenômeno nas condições de operação de uma bomba centrífuga, e a segunda maneira refere-se a métodos de engenharia tais como:

- Determinação do $NPSH_r$ a uma velocidade constante. De acordo com ISO 3555 o valor crítico corresponde a uma queda de 3% na altura de recalque da bomba e representa que a cavitação está iniciada neste ponto. Tal modo requer arranjos e medições incompatíveis para a monitoração local nas condições de operação.

- Visualização do fluxo através de uma janela transparente no tubo de sucção ou voluta da bomba centrífuga acoplado a luz estroboscópica ou por câmera digital. Tal procedimento é melhor aplicado para analisar bolhas vaporosas, contudo menos adequado para condições de campo.

- Testes de erosão por pintura das aletas do rotor da bomba e observação da remoção. A dificuldade refere-se à escolha da tinta e sua adesividade.

- Medições das pressões estáticas e de vapor do líquido. Novamente o método torna-se impraticável no local da instalação em função das mudanças do ponto de operação e instabilidades do fluxo.

- Medição de vibração do conjunto moto bomba. De acordo com literatura a cavitação apresenta vibrações na faixa de alta frequência, contudo o sinal também pode ser contaminado por ruídos de origens mecânicas ou elétricas.

- Medição da pressão do som gerado por microfone, hidrofone ou outro sensor apropriado.

A utilização de microfones como sensores que são acoplados a um computador com cartão de som, pode ser particularmente disponível em quaisquer instalações. Muitos investigadores detectaram ruídos na faixa de 20 a 500 kHz em seus experimentos com cavitação, existindo poucos dados sobre ruídos em frequências menores. A montagem do sensor normalmente é o mais próximo

possível do tubo de sucção ou voluta da bomba. Uma dificuldade do método num ambiente industrial são os ruídos que podem distorcer os sinais medidos.

O trabalho dos autores tinha como objetivo encontrar a correlação entre os ruídos de cavitação e os valores de $NPSH_d$ nas condições de funcionamento, salientando que somente os sons audíveis foram discutidos no artigo. Investigação anterior dos próprios autores em uma bomba centrífuga, classificaram os ruídos envolvidos no experimento conforme abaixo:

- Ruído tonal ou de rotação criado pelo fluxo gerado pelo rotor e interação com a passagem pela lingueta da voluta da bomba. Também é replicado pelo ventilador de refrigeração quando da passagem de ar pelas aletas da carcaça do motor. Estes ruídos criam tons na frequência de passagem de pás ou de rotação do ventilador e são independentes da carga da bomba.

- Ruído turbulento provocado por recirculação, turbulência e vórtices do fluxo de água da bomba e do ar do ventilador de refrigeração do motor. Diferenças de pressão entre os lados de sucção e recalque representam fontes deste ruído. Estes são fortemente dependentes do ponto de operação e um ruído adicional é criado quando a bomba opera muito à esquerda do BEP.

- Ruído eletromagnético gerado pelo motor elétrico e também dependente da carga da bomba porque a intensidade da corrente aumenta devido as perdas no entreferro da carcaça estator e rotor.

- Ruído característico de cavitação com turbulência no fluxo e erosão do rotor da bomba.

Sobre este último ruído desenvolve-se o trabalho de caracterização da cavitação. Um assobio é produzido pela pulsação das ondas das bolhas e pelo seu colapso na região de alta pressão. Na cavitação incipiente as bolhas são pequenas causando somente choques entre elas, contudo na cavitação desenvolvida o colapso junto às fronteiras sólidas geram ruídos de impacto e erosão do material. A fim de encontrar a correlação entre o início de cavitação e os correspondentes níveis de ruídos, os valores de $NPSH$ calculados e os sinais acústicos obtidos nos sensores foram medidos simultaneamente. No experimento o rotor da bomba tem

seis aletas, o ventilador sete pás e o acionamento foi mantido constante a 2.900 rpm.

Os resultados experimentais dos gráficos da figura 3.34 mostram que os menores valores de $NPSH_d$ correspondem aos maiores ruídos em todas as frequências, pela cavitação na bomba.

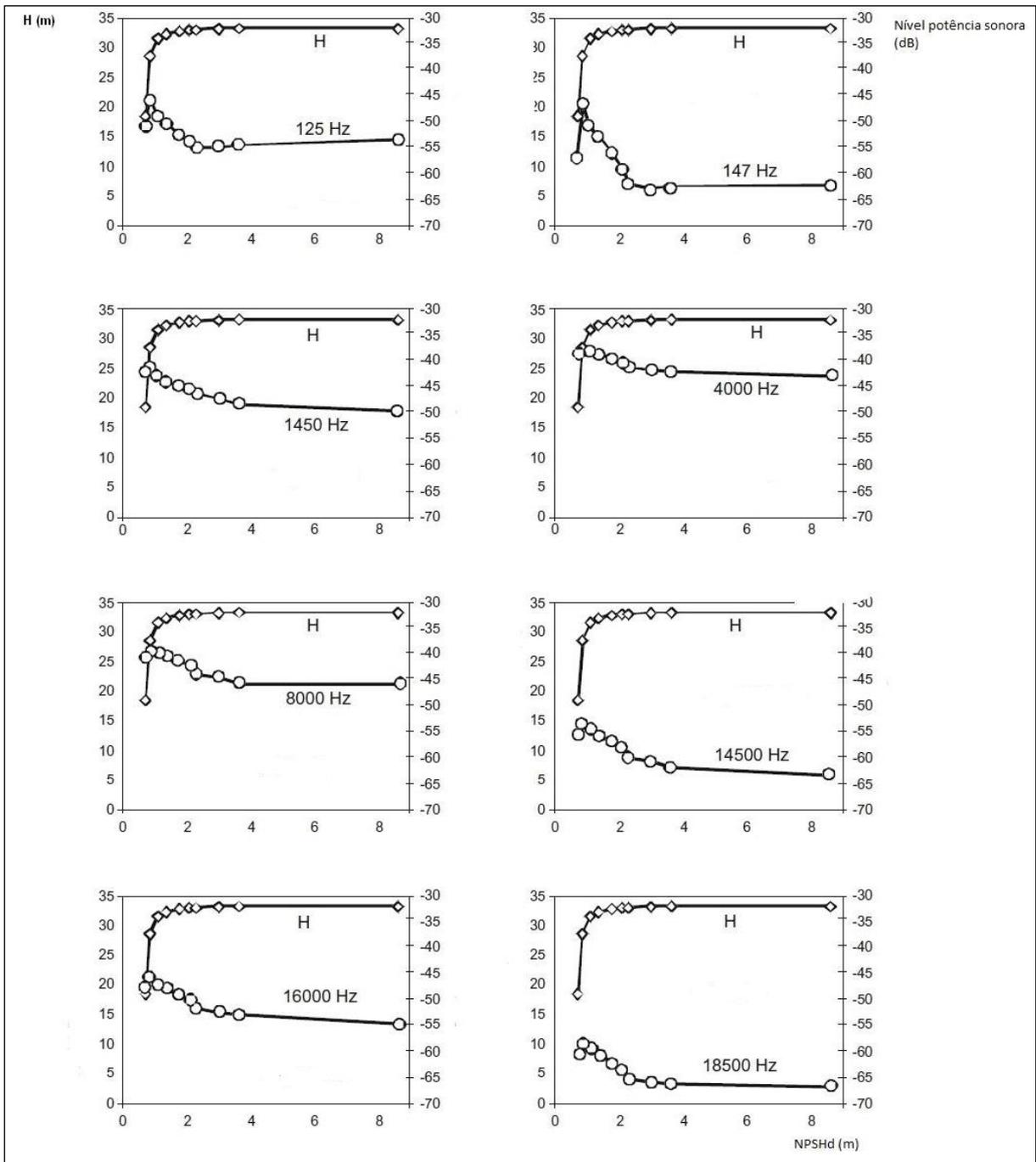


Figura 3.34 – Ruídos em diferentes frequências
Fonte: Cudina e Prezelj, 2009

As diferenças entre os níveis de ruído antes do início da cavitação e depois de desenvolvida, situa entre 12 e 20 dB para diferentes fluxos (1.5 e 11.0 l/s), diferença esta suficiente para detectar o fenômeno e eventualmente servir de alarme ou de desligamento da bomba por um sistema automatizado. Outra conclusão do ensaio é que a cavitação começa a apresentar sinais acústicos antes mesmo da queda de 3% na altura de elevação da bomba em função da redução do $NPSH_d$.

CERNETIC (2009), investigou o uso de ruídos na detecção de cavitação em bombas centrífugas numa faixa de frequência de 20 a 20 kHz, faixas estas menos exploradas nos experimentos semelhantes. Em tais frequências é comum a contaminação de ruídos gerados pela rotação e seus harmônicos.

Outra diferença no método refere-se ao uso de microfones invés de sinais enviados por hidrofones. Como vantagens, cita-se a simplicidade na montagem e medição e melhor interpretação na faixa audível de ruídos.

Como desvantagem os ruídos adjacentes ao conjunto moto bomba podem influenciar na medição caso não seja apropriado a posição dos medidores. O esquema dos ensaios está representado na figura 3.35, para duas bombas com características diferentes em relação ao tipo do rotor:

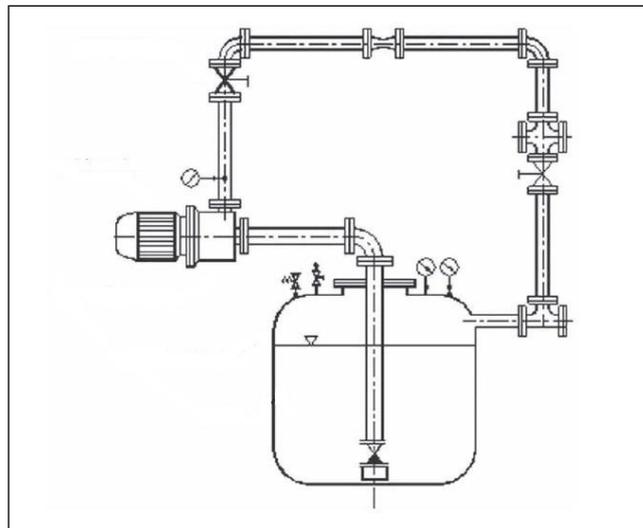


Figura 3.35 – Teste da bomba
Fonte: Cernetic, 2009

- Bomba A com rotor fechado, com seis aletas;
- Bomba B com rotor semi aberto, com seis aletas;

O microfone foi instalado a 0,15 m da voluta da bomba e a correspondência entre a redução do $NPSH_d$ e o incremento do nível de ruído são bem caracterizados nos ensaios conforme mostram as figuras 3.36 e 3.37 para as bombas A e B na frequência de 1600 Hz.

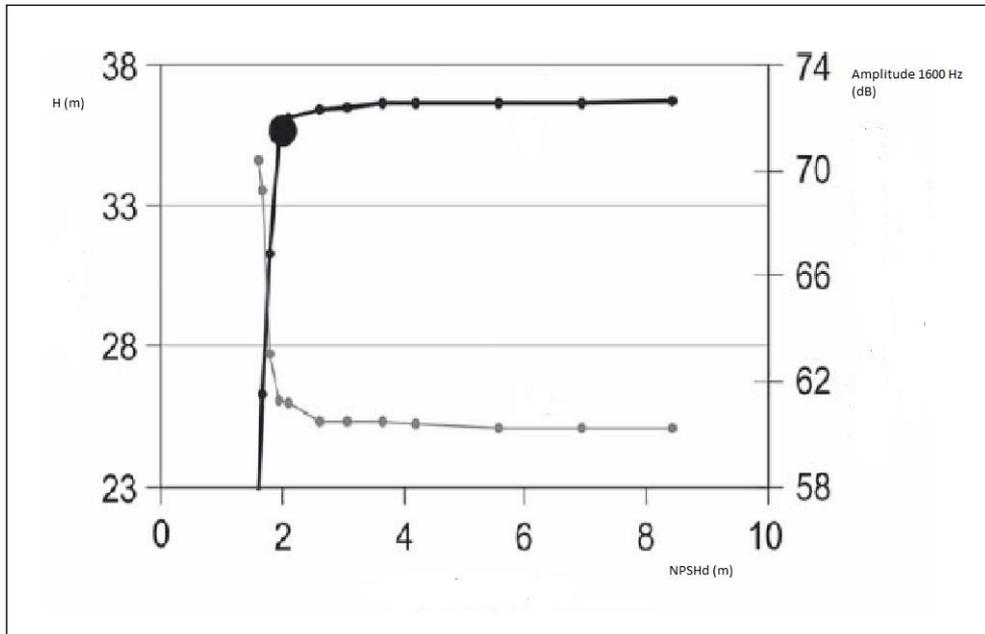


Figura 3.36 – Ruído da bomba A em 1600 Hz
Fonte: Cernetic, 2009

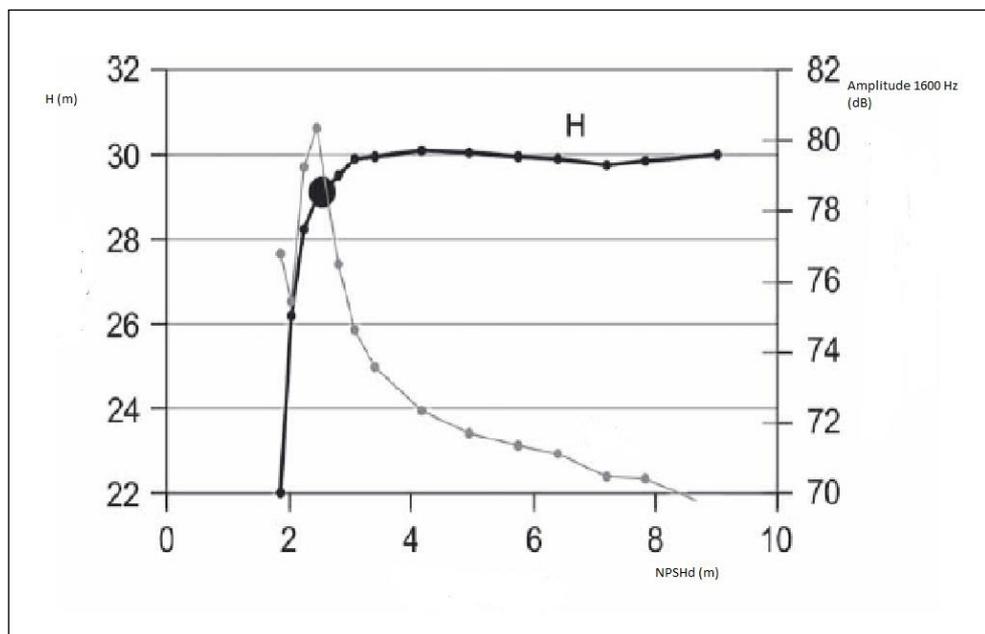


Figura 3.37 – Ruído da bomba B em 1600 Hz
Fonte: Cernetic, 2009

O autor concluiu que para frequências abaixo de 1 kHz, os valores detectados pelos sinais dos microfones são muito contaminados pelos ruídos gerados pela frequência de rotação, de passagem de pás e seus respectivos harmônicos. Contudo para frequências superiores, as respostas dos sinais estão bem correlacionados com o desenvolvimento da cavitação, sendo a escolha para detecção por sons dependente do sistema hidráulico bem como dos eventuais ruídos nas vizinhanças da instalação.

THOBIANI et al (2010), monitoraram os níveis de ruídos e vibração em uma bomba centrífuga recalçando água numa vazão de até 500 l/min , pressão de shutt-off de 55 mcl, acionada com motor de 4 kW com velocidade de 2.900 rpm, conforme experimento da figura 3.38 quando operando sob cavitação, para caracterizar os sinais e diagnosticar o grau deste fenômeno.

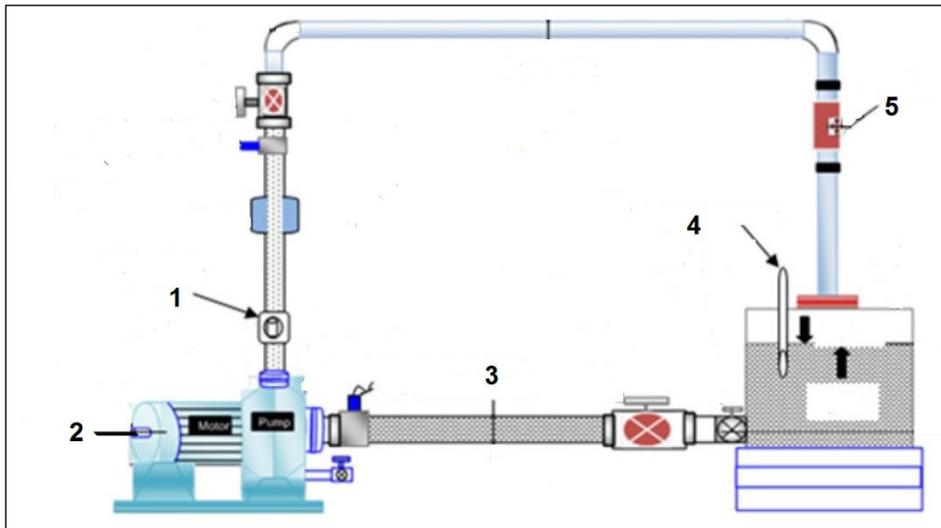


Figura 3.38 – Esquema do ensaio da bomba
Fonte: Thobiani et al, 2010

Legenda:

- 1- hidrofone
- 2-tacômetro
- 3-transdutor de pressão
- 4-sensor de temperatura
- 5-medidor de vazão

Apesar de aceitar que a cavitação ocorre a partir de uma queda de 3% na altura de elevação da bomba quando é reduzido o $NPSH_d$, os autores lembram que

propriedades do líquido, rugosidade das superfícies dos componentes da bomba bem como a configuração da tubulação na sucção da bomba, podem fazer variar a detecção do início e desenvolvimento da cavitação.

As investigações também concluíram que os danos do fenômeno não são exclusivos nos componentes da bomba, mas reduzem o desempenho e consomem energia adicional do acionador.

Análises acústicas já realizadas mostraram que os ruídos de uma bomba com cavitação excedem em aproximadamente 20 dB o nível desta mesma bomba operando no BEP, e que o sinal de vibração experimentado na cavitação de uma bomba centrífuga é pronunciada nas altas frequências, devido as flutuações da turbulência e vórtices formados entre o rotor e voluta.

O método dos autores identificaram a cavitação incipiente a partir de técnicas acústicas baseadas nas fontes hidrodinâmicas e mecânicas da bomba.

No experimento, mantido a temperatura com variação máxima de um grau Célsius, a simulação das condições do $NPSH_d$ foram obtidas a partir do estrangulamento da válvula instalada a montante da bomba. Nas linhas de sucção e recalque foram montados também uma parte de tubo transparente que permitiu visualizar as bolhas de cavitação.

Nas condições em que o $NPSH_r$ ainda é maior que o disponível na vazão de 343 l/min, houve uma mudança nas amplitudes de ruídos e vibrações do conjunto.

Os acelerômetros com uma banda de frequência entre 10 e 20 kHz, instalados nos flanges de sucção e recalque, apresentaram diferentes sensibilidades de resposta, sendo escolhido o de recalque para análise.

Os ruídos foram detectados por microfone aéreo e hidrofone no líquido, na faixa de frequência de 20 kHz.

Os registros processados com fator de pico e Kurtose mostraram que as oscilações dos sinais em função da vazão não produziram resultados consistentes para detecção da cavitação, conforme figura 3.39.

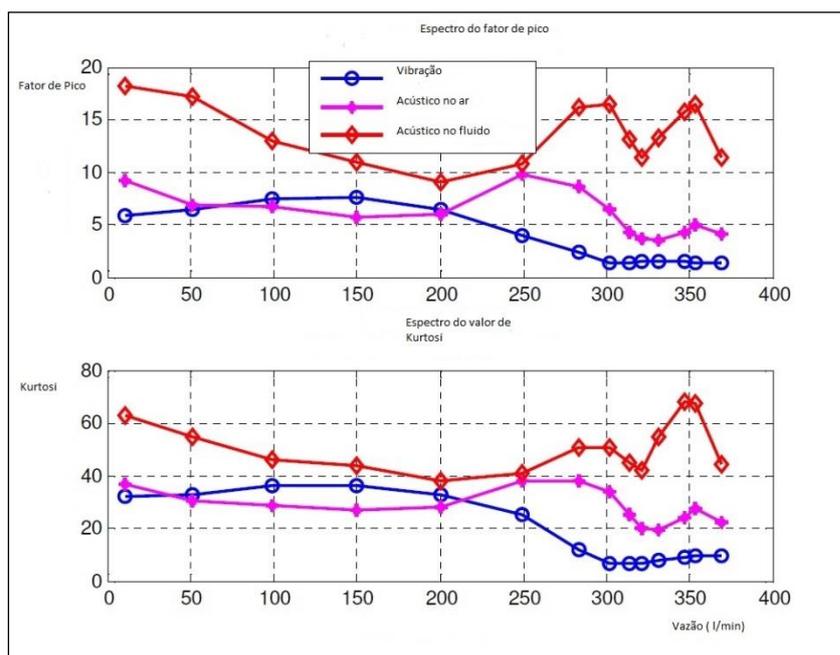


Figura 3.39 – Fator de pico e Kurtosis X Q
Fonte: Thobiani, 2010

Melhores resultados foram obtidos na análise no domínio da frequência obtidos por entropia espectral, onde a cavitação mostra um aumento constante na amplitude dos sinais, tanto na acústica como na vibração, ou seja, com o aumento da intensidade da cavitação maiores são os níveis de ruídos e vibração em alta frequência, conforme figura 3.40:

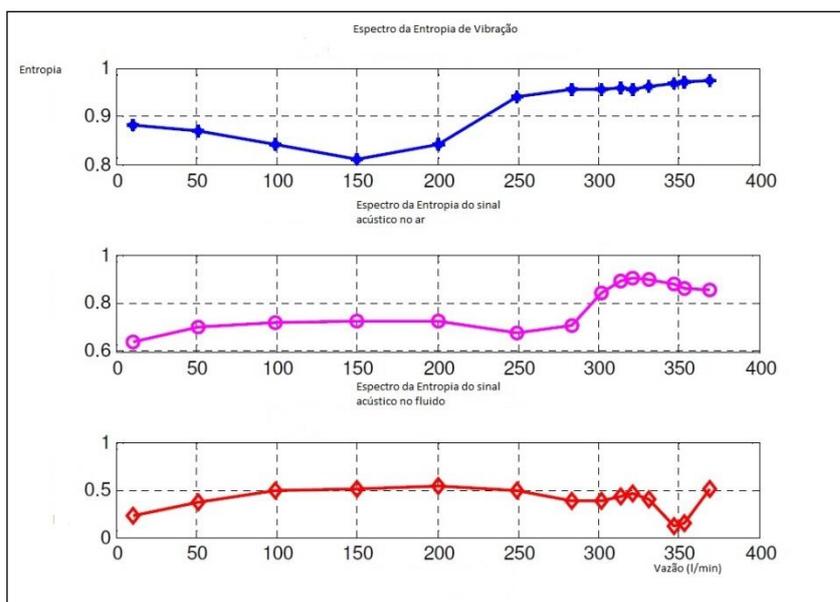


Figura 3.40 - Entropia espectral acústica X Q
Fonte: Thobiani, 2010

3.4.1 Comentários

Os ruídos são um dos efeitos mais estudados da cavitação e os experimentos de modo geral são mais conclusivos, entretanto não apresentam as mesmas respostas quantitativas quando simulados em diferentes condições.

Neste trabalho o propósito é consolidar os valores de amplitude sonora para a cavitação moderada com ensaios utilizando aparelhos de simples montagem como decibelímetros ao invés de hidrofones, que embora estejam mais próximos do fenômeno, são de difícil instalação em campo.

Para limites aceitáveis de ruído, existem várias normas que convergem para a proteção da segurança do trabalhador ocupado em atividades notadamente industrial, conforme descrição que segue:

- API 615 (American Petroleum Institute): Limite aceitável de ruído de acordo com o ato ocupacional de segurança e saúde

Duração da exposição : 8 horas / dia Nível máximo de ruído em dB: 90

- I.S.O. 1999: Limite aceitável em função do nível sonoro para trabalhadores

Duração da exposição: 8 horas/dia Nível máximo de ruído em dB: 85

- NBR 10151: Limite aceitável para ambiente externo predominantemente industrial

Duração da exposição: diurno Nível máximo de ruído em dB: 70

As normas referenciam os limites com relação à segurança humana, não trazendo informações evidentemente a respeito de possíveis danos aos equipamentos rotativos dado a natureza do funcionamento dos mesmos e respectivos ruídos que os processos envolvidos possam contribuir.

Neste trabalho será adotado a norma I.S.O. 1999 com limite aceitável para condição regular da bomba centrífuga o valor de 85 dB, sendo considerado inaceitáveis níveis superiores ao padronizado quando da bomba funcionando com cavitação moderada.

3.5 TEMPERATURA NO MANCAL

O aumento da temperatura dos rolamentos no mancal é causado principalmente pelo atrito de cargas contínuas ou ocasionais, desalinhamento, desvios dimensionais ou lubrificação inadequada. Os esforços extra hidrodinâmicos gerados pela cavitação podem induzir o aumento da temperatura no mancal da bomba após um período de funcionamento, variável em função da intensidade do fenômeno. Embora existam um número menor de artigos teóricos e experimentos relacionados a cavitação e a sobrecarga de mancais, é fato que os custos de manutenção e as perdas de produção por substituições de rolamentos de bombas funcionando nesta condição, são muito expressivos, como exemplificado em dois estudos de caso realizados em indústrias de papel e celulose com bombas que apresentaram históricos de manutenção com semelhanças, apesar de estarem instaladas em posições e aplicações diferentes, mas comprovadamente ambas funcionando com cavitação crítica ou moderada, durante um intervalo de tempo suficiente, até a ação corretiva respectiva, para associar o modo de falha com o fenômeno, conforme registrado nas tabelas 3.12 e 3.13.

Tabela 3.12 – Histórico de Manutenção da bomba A

Texto Breve	Data
Trocar rolamentos	24/04/2005
Trocar labirinto	21/06/2005
Trocar selo mecânico	12/09/2005
Trocar rolamentos	12/09/2005
Alinhar conjunto	11/11/2005
Reapertar suporte	05/12/2005
Trocar rolamentos	05/12/2005

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 3.13 – Histórico de Manutenção da bomba B

Texto Breve	Data
Trocar rolamentos	03/01/2006
Trocar selo mecânico	27/03/2006
Trocar rolamentos	17/05/2006
Alinhar conjunto	01/06/2006
Alinhar conjunto	01/07/2006
Trocar selo mecânico	04/08/2006
Trocar rolamentos	14/09/2006

Fonte: Schröder, 2015

É necessário salientar que a fadiga ou desgaste dos rolamentos podem estar relacionados também ao aumento da vibração que ocorre paralelamente aos maiores esforços mecânico durante a operação da bomba com cavitação.

Nesta pesquisa a avaliação do esforço mecânico no mancal corresponde a combinação do empuxo radial e axial, resultante da operação da bomba sem cavitação e com cavitação moderada, e será efetuada de modo indireto através do monitoramento da temperatura dos rolamentos de contato angular e de rolos, do lado acoplado e oposto ao acionamento.

Resumidamente, a cavitação gera distúrbios hidrodinâmicos que levam a um aumento dos esforços radiais e axiais nos mancais que são ampliados pelos efeitos mecânicos, notadamente a vibração, contribuindo para redução da vida útil dos rolamentos, que pode ser relacionada com a observação do comportamento da temperatura no mancal.

3.5.1 Empuxo Radial

O empuxo radial é gerado por diferenças de pressão distribuídas em torno do rotor. Estas diferenças são criadas a partir de fluxos não uniformes nas saídas das aletas do rotor, excentricidades de giro causadas por deflexão do eixo e outras forças de reações. Devido esta combinação de efeitos para o cálculo do empuxo

radial, existem dificuldades para o modelamento teórico, sendo sempre que possível a complementariedade destes com resultados experimentais.

As medições podem ser realizadas com sensores como os de anemometria de fio quente, distribuídos na voluta em torno da circunferência do rotor e posterior integração dos resultados ou através de medições de deformação por transmissores de forças montados no mancal dos rolamentos que suportam a carga da bomba. Outro método que pode ser utilizado, refere-se a sensores que avaliam a deflexão do eixo acionado que atua sobre o rotor. Tais métodos requerem aparatos complexos e difícil reprodução em instalações de campo, o que excluem tais procedimentos neste trabalho.

Os valores do empuxo radial são menores no ponto de melhor eficiência devido a menores variações de pressões do fluxo na direção de saída pela lingueta da voluta, em oposição, à condição de vazão nula e de vazão máxima, onde existem desequilíbrios em relação a pressão.

A figura 3.41 mostra a variação do empuxo radial em função da vazão para uma bomba com voluta de flange com 0,15 m de diâmetro na sucção e 0,10 m de diâmetro no recalque. A magnitude deste empuxo depende da geometria da voluta, das formas e dimensões da lingueta, das dimensões D_2 (diâmetro) e b_2 (altura da aleta) do rotor, da velocidade específica e da pressão desenvolvida pela bomba.

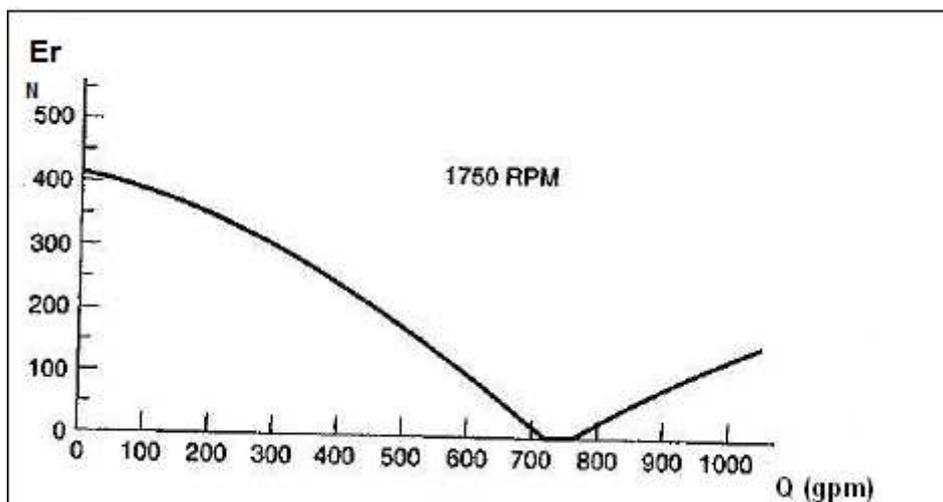


Figura 3.41 – $E_r \times Q$
Fonte: Bordeasu et all, 2011

O empuxo radial adicional esperado neste trabalho com a bomba operando sob regime de cavitação é provavelmente discreto, visto que não estão projetados operações muito á esquerda ou muito a direita do ponto de melhor eficiência, e sim condições com baixas pressões na sucção.

3.5.2 Empuxo axial

O empuxo axial é gerado pelas diferenças de pressões que agem sobre a superfície do rotor do lado da sucção e a traseira da parede, bem como dos efeitos dinâmicos decorrentes da mudança de direção da corrente líquida quando da passagem pelo rotor.

O empuxo axial é basicamente a soma das forças de pressões não balanceadas conforme equação (19), que atuam na direção axial do rotor e pode ser visualizado na figura 3.42 conforme EPAMINONDAS (2003):

$$E_a = F_{pa} + F_{pt} - F_{ps} - F_{pd} - F_{it} \quad (19)$$

Onde:

F_{pa} – Força da pressão atmosférica na extremidade do eixo

F_{pt} – Força da pressão variável na parede traseira do rotor

F_{ps} – Força da pressão de sucção na seção dianteira do rotor

F_{pd} – Força da pressão variável na parede dianteira do rotor

F_{it} – Força da impulsão causada pela mudança de direção da trajetória do líquido no rotor

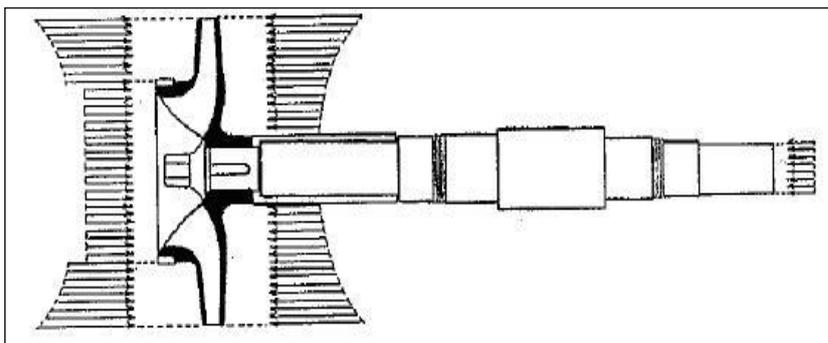


Figura 3.42 – Distribuição do E_a
Fonte: Epaminondas, 2003

FRANZ et al (1985), citam experimentos que realizaram com medições de forças radiais geradas por bombas em condições de cavitação. As medições foram realizadas com quatro sensores montados na voluta. A velocidade de acionamento da bomba variou entre 2.000 e 3.000 rpm. As forças gravitacionais e flutuações geradas pelas interações entre as aletas e voluta foram desconsideradas neste ensaio. Esses estudos mostraram que a perda de pressão durante o fenômeno causa pequenas mudanças na magnitude e direção da força radial, conforme figura 3.43.

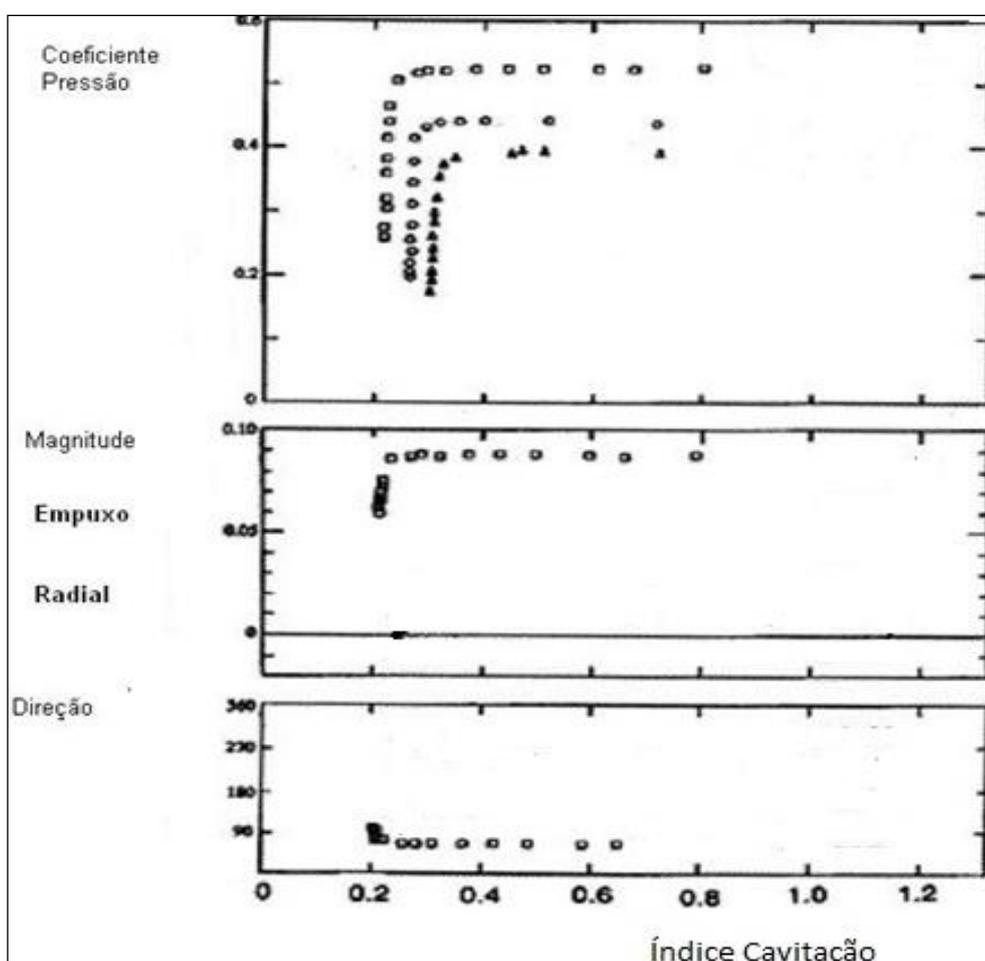


Figura 3.43 - E_r x índice de cavitação
Fonte: Franz, 1985

Estas pequenas variações não foram explicadas requerendo outros testes para esclarecimentos, nesta região de instabilidades e com geração de forças flutuantes, devido o funcionamento irregular com cavitação.

WILKINSON et al (1996), realizaram um estudo com uma bomba centrífuga bi partida radialmente de dois estágios conforme desenho seccionado da

figura 3.44, em operação numa refinaria recalcando hidrocarboneto conforme dados abaixo, que apresentaram falhas dos rolamentos durante a partida da planta.

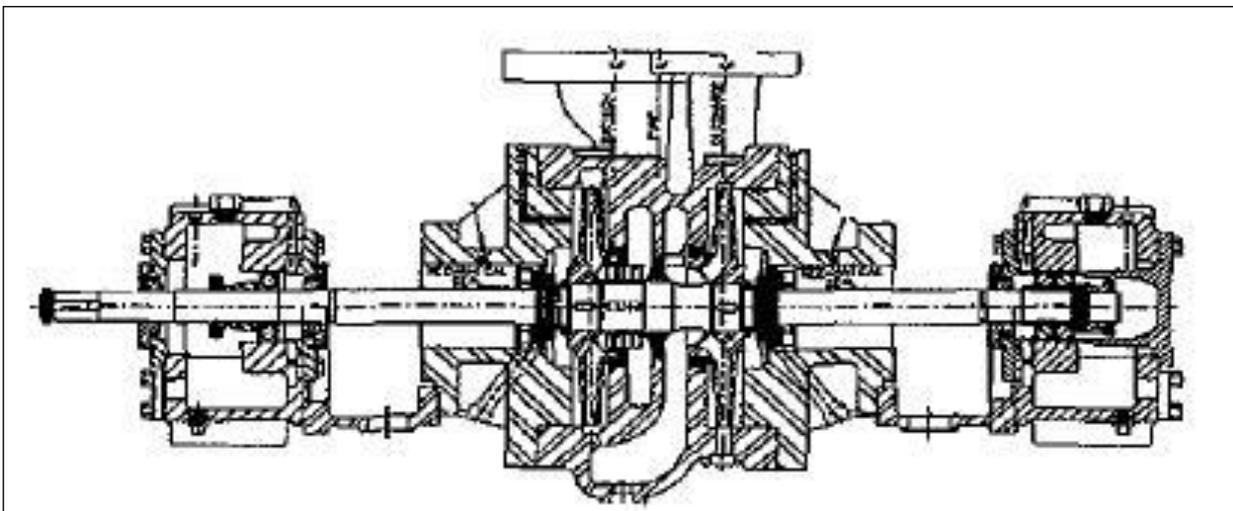


Figura 3.44 – Bomba bi Partida
Fonte: Wilkinson et all, 1996

As características técnicas do ponto operacional, fluido e conjunto moto-bomba estão relacionadas abaixo:

- Q máx = 220 m³/h
- Ht = 570 mcl
- Viscosidade = 12 Cst
- Motor = 410 kW
- Velocidade = 3570 rpm

Na análise do caso os autores concluíram que as falhas prematuras dos rolamentos estavam relacionadas cargas axiais em magnitudes superiores a projetadas mecanicamente para o mancal da bomba, causadas por reduções de pressão na sucção.

De acordo com os cálculos da engenharia de projeto da bomba, os mancais eram adequados a suportar as cargas dinâmicas de operação nominal, contudo as reais condições de funcionamento estavam sobrecarregando os

rolamentos por elevados empuxos que causavam elevação da temperatura no mancal e redução da viscosidade do óleo lubrificante com consequentes falhas.

Análises do sistema detectaram a cavitação da bomba através de medições de pressões no campo simultaneamente ao monitoramento da temperatura por dispositivo de resistência instalado no corpo do mancal. Com o perfil de pressões, foram calculados os empuxos reais com ocorrência de cavitação na bomba para vazões superiores a $114 \text{ m}^3/\text{h}$ com temperaturas do líquido acima de 130°F . Os resultados foram conclusivos que a cavitação teve um grande impacto sobre os valores do empuxo axial confirmados por mudanças nas temperaturas dos rolamentos. A figura 3.45 mostra a relação entre o empuxo e a temperatura média dos rolamentos durante o ensaio de 30 minutos na planta com as condições de cavitação, cargas estas bem superiores ao estimado teoricamente pelo projeto para o funcionamento sem cavitação.

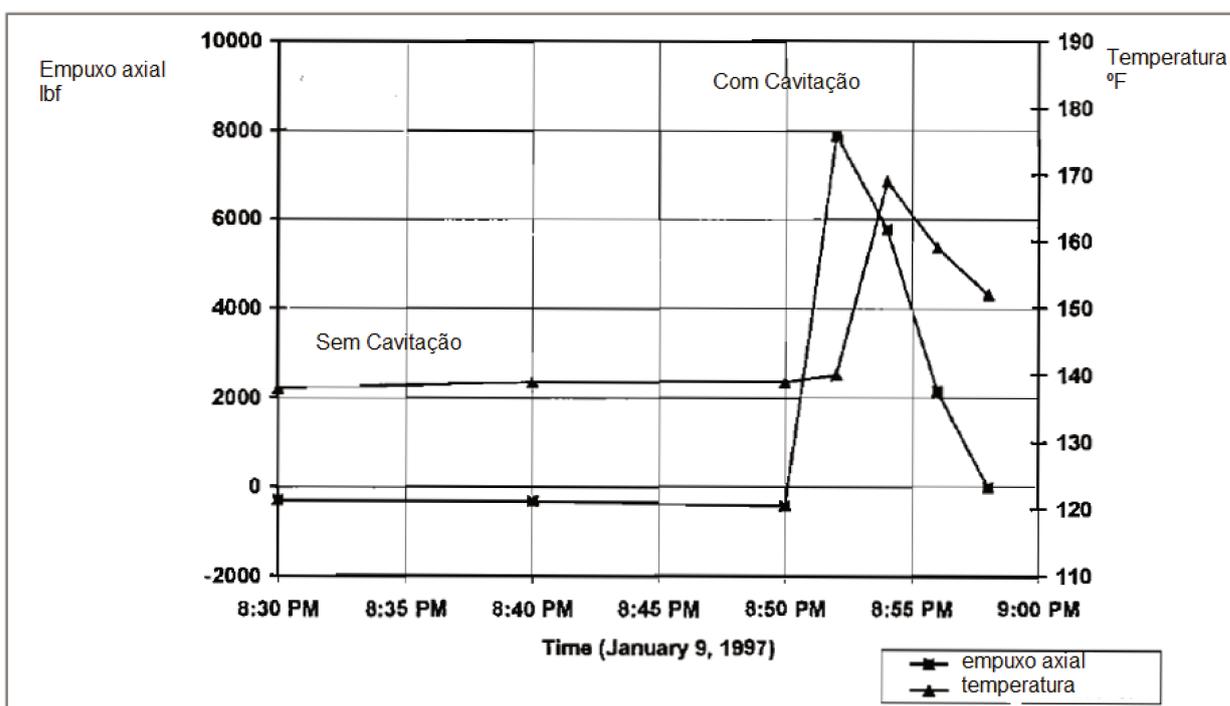


Figura 3.45 – Tendência de temperatura x Empuxo
Fonte: Wilkinson et al, 1996

COMBES et al (2008), testaram uma bomba centrífuga para determinar os empuxos axiais e radiais em diferentes condições operacionais, inclusive em regime

de cavitação, variando entre 0,4 e 1,2 da vazão nominal, no experimento conforme arranjo da figura 3.46.

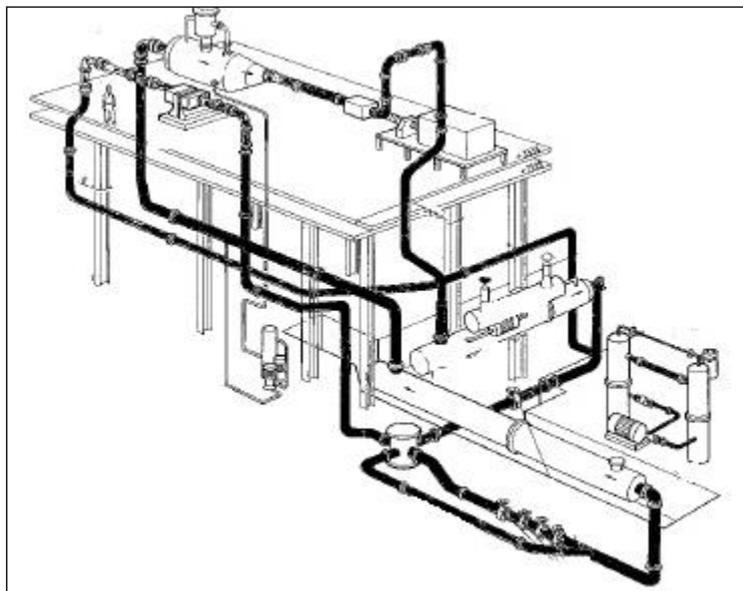


Figura 3.46 – Arranjo do experimento
Fonte: Combes et al., 2008

Características principais do experimento são descritas abaixo:

- Bomba com motor elétrico de 330 kW, velocidades variáveis de 360 a 3.600 rpm, rotor de seis aletas, diâmetro de 0,445 m, faixa de vazões medidas entre 150 e 850 m³/h, pressão de sucção de 0,2 a 4,0 bar, N_s igual a 29.

Oito sensores piezoelétricos e seis transdutores de pressão localizados na caixa de rolamentos determinaram as relações entre forças, momentos e campos de pressão experimentalmente.

Para vazões superiores à nominal, com baixas pressões na sucção, características de funcionamento com cavitação, as forças axiais e radiais apresentaram magnitudes superiores se comparadas às condições operacionais regulares.

GULICH (2008), cita que as forças radiais atuantes em uma bomba centrífuga são devidas a uma distribuição desigual de pressão em torno do rotor, tendo um valor mínimo no ponto de melhor eficiência e sua magnitude determinada experimentalmente com medidores de tensões montados sobre o eixo ou por

integração do campo de pressão em torno do rotor. Estes ensaios determinaram as equações (20) e (21):

$$E_r = k_r * \rho * H * D_2 * b_2 \quad (20)$$

$$k_r = k_{r0} * \left(1 - \frac{Q}{Q_{BEP}}\right)^2 \quad (21)$$

Sendo: k_r o coeficiente de empuxo radial e k_{r0} o coeficiente de empuxo radial em shutt-off

O coeficiente de empuxo radial em shutt-off varia de acordo com a velocidade específica da bomba conforme tabela 3.14, ajustada dos valores médios dos experimentos :

N_q	K_{r0}
20	0,17
30	0,21
40	0,26
50	0,32
60	0,38

Fonte: Gulich, 2008

Em ensaio realizado com uma bomba centrífuga, o empuxo radial em função da vazão, apresentou a forma clássica de “V”, conforme figura 3.47 com o menor valor em 550 m³/h.

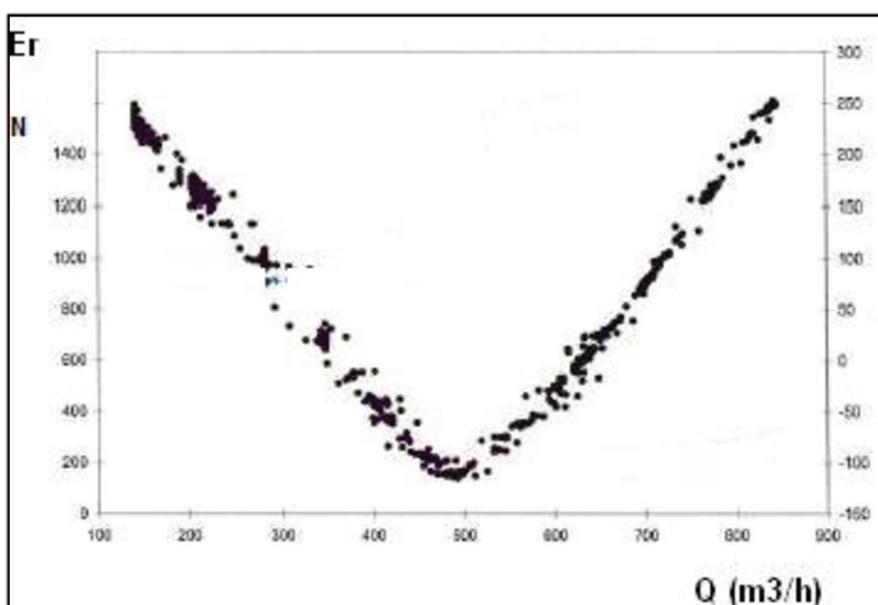


Figura 3.47 – Curva típica do E_r ,
Fonte: Gulich, 2008

Com o desenvolvimento de códigos em CFD foi possível calcular simultaneamente o fluxo e a distribuição de pressão em todo o rotor inclusive para o caso de fluxos instáveis que ocorrem durante a operação da bomba com cavitação notadamente em vazões superiores a Q_n .

A orientação do empuxo radial mostra significativas diferenças entre a operação com fluxo reduzido de 300 e 450 m^3/h , nominal de 550 m^3/h e superior de 700 e 850 m^3/h conforme figura 3.48 para a bomba do ensaio.

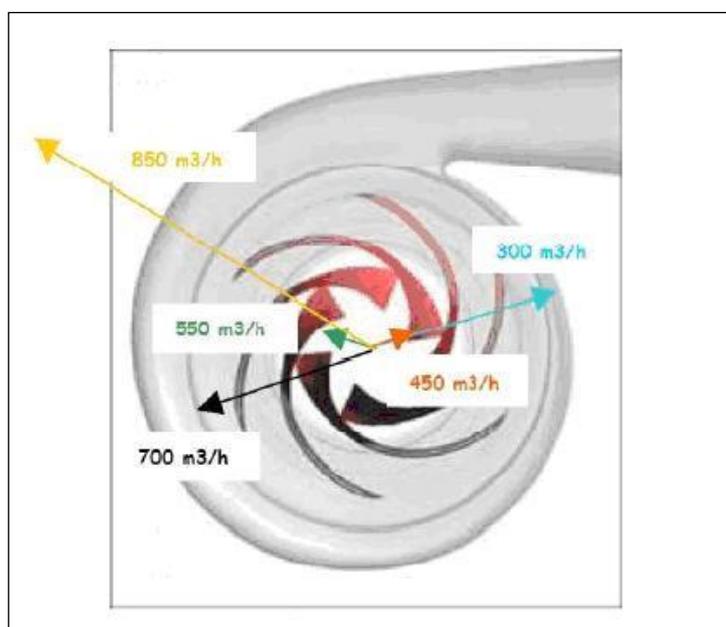


Figura 3.48 – Orientação do E_r
Fonte: Gulich, 2008

Em suas recomendações para seleção de uma bomba centrífuga, o autor menciona entre outros critérios hidráulicos que:

- A operação da bomba no ponto em que é mais utilizada deve satisfazer a condição de fluxo entre 0,8 e 1,1 Q_n entre outros motivos para evitar os danos de cavitação. Tal faixa corresponde aos menores valores do empuxo radial em função da vazão.

- Quanto ao domínio da operação contínua deve ser limitada entre 0,6 e 1,2 Q_n novamente devido aos efeitos do empuxo na zona de recirculação ou cavitação da bomba.

No mesmo texto, o autor menciona os possíveis efeitos danosos resultantes de um empuxo radial excessivo gerado por operação tanto a esquerda como a direita do BEP, este último correspondente a zona de cavitação:

- Deflexão do eixo;
- Redução da vida útil do eixo por fadiga;
- Sobrecarga e danos nos rolamentos;
- Danos nos selos mecânicos por deflexão e vibração do eixo.

SCHRÖDER (2009), em estudo de caso de uma bomba centrífuga recalçando água morna a 50 C° instalada numa planta industrial de papel e celulose conforme figura 3.49, obteve através de medições de campo informações que relacionam a temperatura no mancal da bomba operando com cavitação crítica, classificação esta obtida pela combinação dos níveis de ruídos e vibração.



Figura 3.49 – Vista da bomba
Fonte: Schröder, 2015

Os valores de campo foram disponibilizados pelo setor de manutenção da planta através da análise de vibração obtida por acelerômetros e dos ruídos observados localmente por decibelímetro, e a vazão obtida pelo SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído). A temperatura nos mancais de rolamentos foram adquirida por meio de um aparelho digital, com precisão na ordem de um 1 °C, tomados pela média de duas medidas, na linha de centro dos rolamentos no lado acoplado (LA) e oposto ao acoplamento (LOA).

As características do conjunto moto bomba instalada são descritos a seguir:

- bomba centrífuga , tipo base luva, com flange de 0,30 m de diâmetro na sucção e 0,25 m de diâmetro no recalque, N_s de 209;
- rotor com 6 aletas, de 0,37 m de diâmetro e b_2 de 0,084 m;
- Acionamento: motor elétrico de 280 kW, IV polos, 60 HZ.

O gráfico de tendência de vibração da figura 3.50 mostra à sua esquerda os valores com a bomba funcionando com vazão de $1322 \text{ m}^3/\text{h}$ e à direita a bomba em regime de cavitação devido a redução do $NPSH_d$, durante o qual foram efetuados medições de temperatura no mancal de rolamentos.

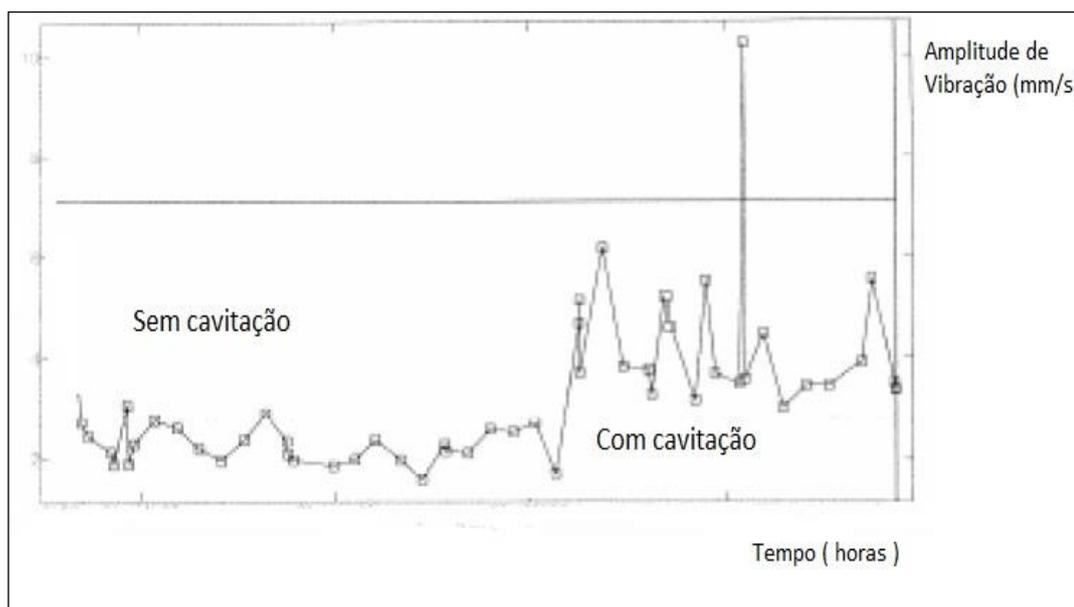


Figura 3.50 – Tendência de vibração

Fonte: Schröder, 2015

Na situação de funcionamento da bomba com cavitação, esta apresentou um histórico de manutenção com inúmeras ocorrências de troca de óleo por aquecimento excessivo do mancal e perda das propriedades lubrificantes bem como a própria substituição dos rolamentos num período inferior a doze meses, em desacordo com a estimativa de 36 meses para mancais semelhantes em operação contínua .

Os cálculos do empuxo radial e axial foram executados por um programa do fabricante da bomba e embora não possa ser divulgado, os resultados foram disponibilizados :

- Para a vazão de 1322 m³/h: E_r de 559 N e E_a de 23406 N.

A tabela 3.15 mostra os resultados das medições com o termômetro digital para ambas as condições de funcionamento.

Tabela 3.15 – Medições de temperatura

Condição	TLA °C	TLOA °C
Sem cavitação	71	67
Com cavitação	81	76

Fonte: Schröder, 2015

A diferença de temperatura é muito expressiva neste caso, e é suposto que grande parte esteja relacionada aos esforços hidrodinâmicos da cavitação.

3.5.3 Comentários

Os efeitos de redução da vida útil dos rolamentos podem ser explicados pela combinação de forças perpendiculares ao eixo de rotação no caso do empuxo radial e pelas forças longitudinais representadas pelo empuxo axial, embora as contribuições específicas sejam de difícil determinação. Como os ensaios com sensores requerem instrumentos nem sempre disponibilizados em instalações de bombeamento, a possibilidade de avaliação indireta pelo aumento da temperatura no mancal apresenta-se neste trabalho como uma alternativa de fácil reprodução em campo.

A medida principal de desempenho do mancal de rolamento é a sua vida útil, ou o número de revoluções que ele pode efetuar antes do sinal de degradação física da superfície metálica do rolamento, seja ele esférico, cilíndrico ou de rolo.

Basicamente a deterioração é consequência de uma lubrificação inadequada, gerada principalmente pela redução da viscosidade causada pelo aumento da temperatura de serviço. Causas abaixo são geradoras de atrito e relacionadas a este incremento.

- Aumento da carga;
- Contaminação do lubrificante;
- Desalinhamento do eixo ou desbalanceamento do rotor;
- Interferência na montagem ou folga excessiva;
- Quantidade ou qualidade do lubrificante inapropriada;
- Desvios dimensionais do alojamento;
- Geração externa ou interna de calor transmitida pelo eixo ao mancal;
- Empuxos radiais ou axiais excessivos.

Visto que o experimento reflete duas condições de medição de temperatura, uma com a bomba funcionando no estado regular e outra com a cavitação moderada, sem alteração significativa dos demais parâmetros acima descritos, exceto os esforços adicionais aplicados pelo fenômeno, adotou-se o critério que a degradação da lubrificação é consequência do aumento da temperatura conforme regra:

Redução da vida útil do rolamento pela metade para cada 15°C de aumento na temperatura de funcionamento do mancal acima de 50°C para o óleo especificado. Aumentos menores que este também podem causar uma redução da vida útil proporcionalmente, desde que a temperatura de funcionamento seja superior aos 50°C na superfície do mancal.

Altas temperaturas aceleram a oxidação e decomposição catalítica do lubrificante (o índice de oxidação dobra a cada 11°C de elevação na temperatura).

Cabe ressaltar que tal procedimento é mencionado na literatura de manutenção de mancais, como por exemplo, no catálogo do fabricante de rolamentos TIMKEN (2014), sem haver consenso quanto a sua eficácia, tratando-se

de uma referência prática utilizada na ausência de outras técnicas como a termografia e análise de óleo que podem apresentar melhor precisão.

Neste trabalho a referência será o aumento da temperatura no mancal que provoca uma redução da vida útil dos rolamentos, proporcional, à regra descrita.

Uma redução superior a 10% na vida útil dos rolamentos, equivalente a um aumento de aproximadamente 4°C no mancal, será considerado insatisfatório para a bomba operando com cavitação moderada.

3.6 VIBRAÇÃO

O segundo efeito mais perceptível pelos sentidos quando da operação de uma bomba com cavitação, são as vibrações mecânicas que podem causar danos em vários componentes do equipamento por afrouxar a fixação, possibilitar o atrito, levar à falha peças frágeis como selos mecânicos e mesmo acessórios mais robustos como acoplamentos, flanges ou quaisquer suportes de sustentação.

A vibração requer monitoramento para que seus níveis não ultrapassem os tolerados pelos componentes do conjunto.

KHOROSHEV (1960), investigou a vibração de uma bomba centrífuga quando operando com cavitação, simulada por estrangulamento de uma válvula.

O autor também montou um dispositivo de pulverização de ar na tubulação de sucção da bomba para alterar as proporções dissolvidas. A vibração foi monitorada por sensores com faixa de limite de frequência de 20 KHz, instalados na voluta.

Os dados experimentais da figura 3.51 mostram que durante a cavitação, o nível de vibração aumenta nas altas frequências.

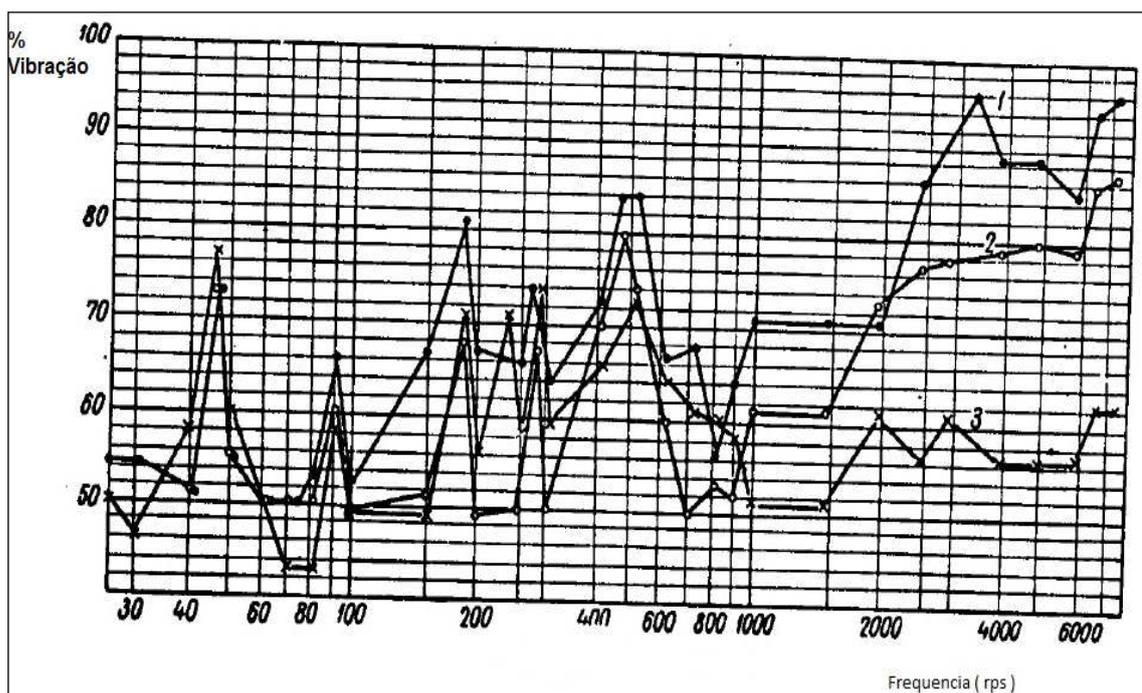


Figura 3.51 – Espectro de vibração da bomba em 2700 rpm
Fonte: Khoroshev, 1960

Observações sobre o experimento indicaram as fases distintas da cavitação conforme abaixo:

- Fase incipiente consistente com a formação de pequenas bolhas de ar e vapor, com baixos níveis de vibração.

- Fase desenvolvida da cavitação com níveis de ruídos audíveis pelo colapso das bolhas, com aumento de vibração proporcional a frequência e pela medida do grau de ar dissolvido na água.

Bolhas de ar, além de favorecer as vibrações na alta frequência, proporcionaram também uma redução na capacidade de sucção da bomba.

TOMÁS (1986), em um experimento utilizou técnicas de vibração para detecção e classificação da cavitação. Sobre os sinais obtidos pelos acelerômetros ressalta a necessidade de filtrar as frequências que determinam a intensidade da cavitação de outras causadas por perturbações como:

- Excitações relacionadas a frequência de rotação do acionador;

- Excitações relacionadas à frequência de passagem de pás (número de aletas x rotação);
- Excitações relacionadas a baixas frequências de vibração da estrutura física do sistema;
- Excitações por ressonâncias induzidas pelo funcionamento de válvulas;
- Excitações provocadas pela contribuição de altas velocidades e turbulências no escoamento.

FARKAS e PANDULA (2006), realizaram experimento com uma bomba centrífuga com janela transparente, recalcando água, com velocidade do acionador de 2.380 rpm e vazão aproximada de 58 m³/h, para correlacionar a formação de bolhas de cavitação com os espectros de vibração. O movimento do rotor foi ajustado para aparecer estacionário quando observado pela frequência de um estroboscópio. O sensor de vibração montado em um furo na voluta da bomba embora contenha um pouco de distorção, apresentou melhor resultado que o fixo por imã ou cola. Esta posição foi escolhida por estar mais próximo do desenvolvimento da cavitação e do colapso das bolhas.

Quando a altura de elevação da bomba caiu para 97% da nominal com a variação do NPSH_d, percebeu-se a formação de grandes bolhas e o aumento do nível de vibração, apesar de que antes deste ponto já era possível ver pequenas bolhas bem como uma perceptível mudança nos níveis de vibração.

Os autores também mostraram uma correlação discreta da cavitação com altas frequências, notadamente na faixa de 6 kHz, e mencionam que a cavitação não tem uma medição de sinal em uma única frequência distinta, sendo necessário ensaios regulares para sua determinação.

SCHRÖDER (2009) em um estudo de caso numa estação elevatória de água conforme croqui da figura 3.52, comparou os níveis de vibração de uma bomba recalcando água em condição regular de funcionamento e com cavitação moderada, classificação esta adotada com os recursos disponibilizados na época do evento.

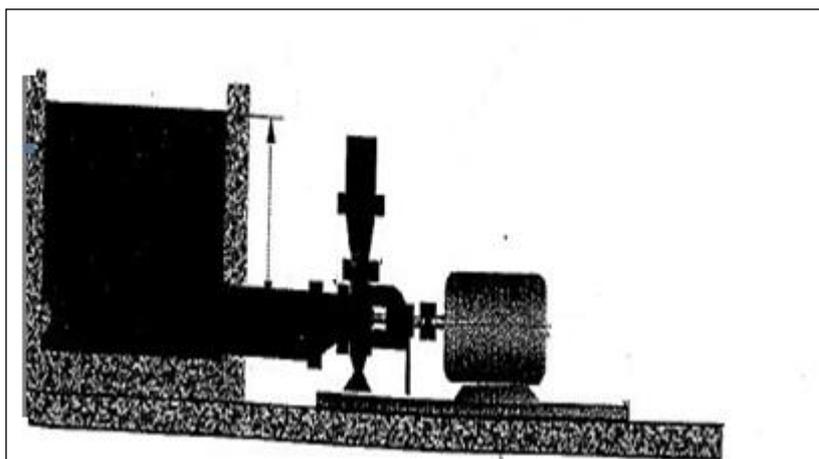


Figura 3.52 – Instalação da bomba na elevatória
Fonte: Schröder, 2015

Através de acelerômetros e analisador de vibração obteve valores de velocidade no domínio da frequência na faixa de 0 a 4 kHz, para duas condições de operação da bomba assinalados na curva característica da figura 3.53, uma em funcionamento regular e outra em regime de cavitação moderada de acordo com análise acústica de um decibelímetro (> 90 dB), e dos sinais de vibração tomados na posição do croqui da figura 3.54.

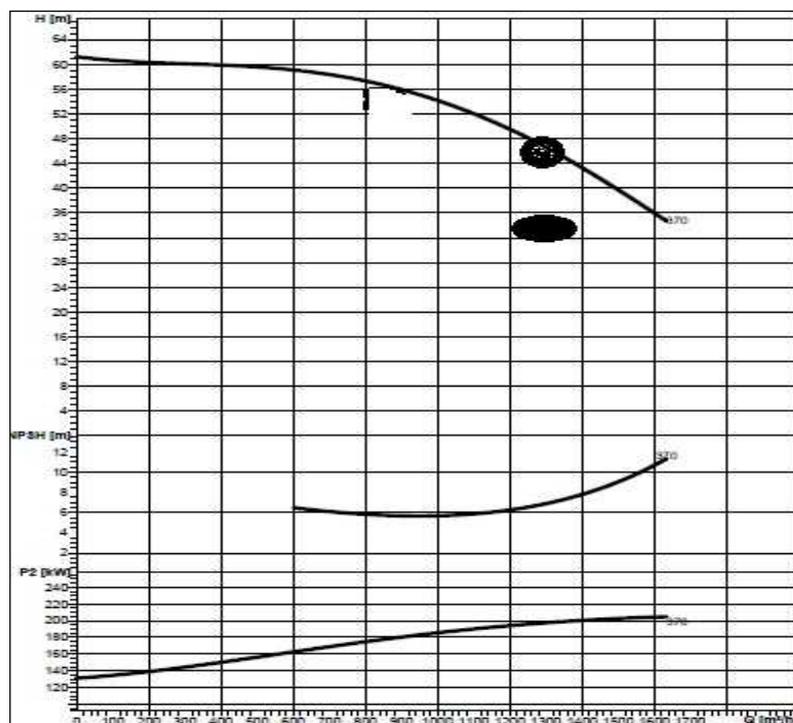


Figura 3.53 – Curva característica do estudo de caso
Fonte: Schröder, 2015

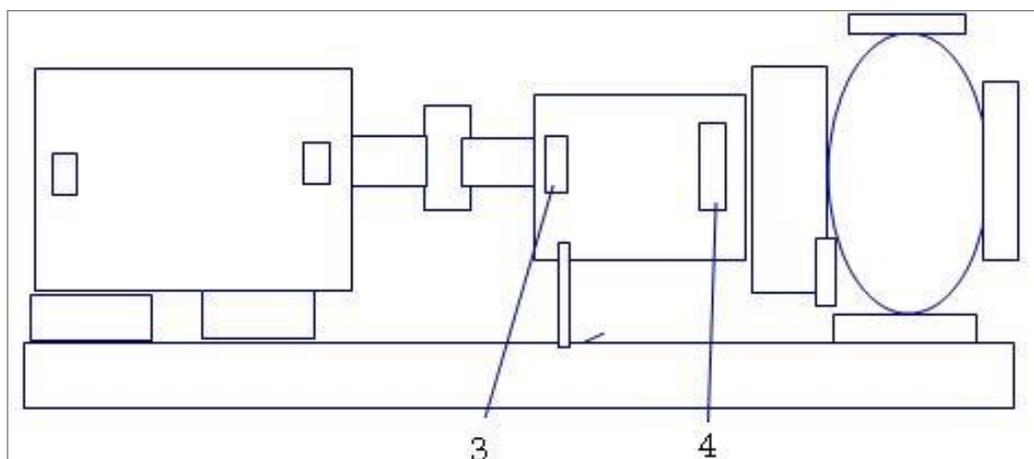


Figura 3.54 – Pontos de medição da vibração
Fonte: Schröder, 2015

Uma combinação de causas como a diminuição do nível de água do reservatório, perdas de carga reais na sucção superiores a calculadas e alta velocidade no flange de sucção da bomba, causaram uma redução no $NPSH_d$ e consequente cavitação severa quando do funcionamento em campo.

Os valores de campo foram disponibilizados através de transdutores de pressão e medidor de vazão ultrassônico da equipe de medições.

As características da bomba, rotor e acionador relevantes para análise estão discriminadas abaixo:

- Bomba: centrífuga, Horizontal, base-luva, flange de sucção e recalque de diâmetro de 0,30 m e N_s igual a 177;
- Rotor: semiaberto, em ferro fundido, com 5 aletas, diâmetro de 0,39 m e b_2 igual a 0,076 m;
- Acionamento: motor elétrico trifásico, 220 kW, IV polos, 60 Hz.

Os resultados obtidos na tabela 3.16, mostram o aumento da intensidade do sinal vibratório em todos os pontos coletados embora existam variações mais significativas do lado oposto ao do motor acoplado.

Tabela 3.16 – Níveis de vibração

Condição	Q m ³ /h	3 HV mm/s	3 VV mm/s	4 HV mm/s	4 VV mm/s
Sem cavitação	1280	4,1	4,4	2,9	3,7
Com cavitação	1280	5,9	5,3	4,8	5,2

Fonte: Schröder, 2015

- 1) 3HV Lado acoplado, posição Horizontal do acelerômetro, pico de Velocidade do sinal na faixa de frequência determinada.
- 2) 3VV Lado acoplado, posição Vertical do acelerômetro, pico de Velocidade do sinal na faixa de frequência determinada.
- 3) 4HV Lado oposto do acoplado, posição Horizontal do acelerômetro, pico de Velocidade do sinal na faixa de frequência determinada.
- 4) 4VV Lado oposto do acoplado, posição Vertical do acelerômetro, pico de Velocidade do sinal na faixa de frequência determinada.

Em função dos níveis de vibração acima do permissível pelo usuário da instalação, as ações corretivas exigiram a troca da bomba com um menor $NPSH_r$ e adaptações da instalação de sucção para adequação do $NPSH_d$.

3.6.1 Comentários

A análise de vibração para bombas operando com cavitação tem recebido grandes contribuições e mostra-se muito promissora como técnica de avaliação da intensidade e dos possíveis riscos ou danos associados ao fenômeno. Algumas pequenas divergências a serem esclarecidas relacionam-se a manifestação dos picos de vibração sejam em unidades de velocidades ou aceleração, no domínio específico da frequência. Para técnicos analistas de campo, as maiores magnitudes ocorrem na faixa de espectro da frequência de rotação até cerca de 1 kHz, enquanto para outros pesquisadores de laboratórios, são obtidos rebatimentos em frequências mais elevadas, superiores a 2 kHz até 6 kHz. Esta pesquisa tem como objetivo mensurar e classificar estes valores de pico na faixa de ocorrência para a cavitação moderada, dentro de referências já estabelecidas em normas, que são pouco mencionadas nos ensaios de laboratório ou artigos acadêmicos.

Os critérios de severidade da vibração para equipamentos rotativos estão mais bem consolidados o que permite uma descrição individual para escolha da

referência. Desconsiderando os critérios pioneiros baseados em amplitude de vibração sobre o mancal, os descritos abaixo, tem como particularidade, a utilização da velocidade como nível de avaliação.

API 610 (2010): A vibração não filtrada para bombas de mancais de rolamento, medida na caixa do mancal, na rotação e vazão nominal não deve exceder a 7,6 mm/s e a vibração filtrada na frequência de rotação e passagem de pás não deve exceder a 5,1 mm/s.

IRD (Institut de Recherche et Développement) (1964): A vibração medida na carcaça do mancal em equipamentos com base rígida e com relação de peso voluta/rotor de até cinco tem os limites especificados conforme a figura 3.55.

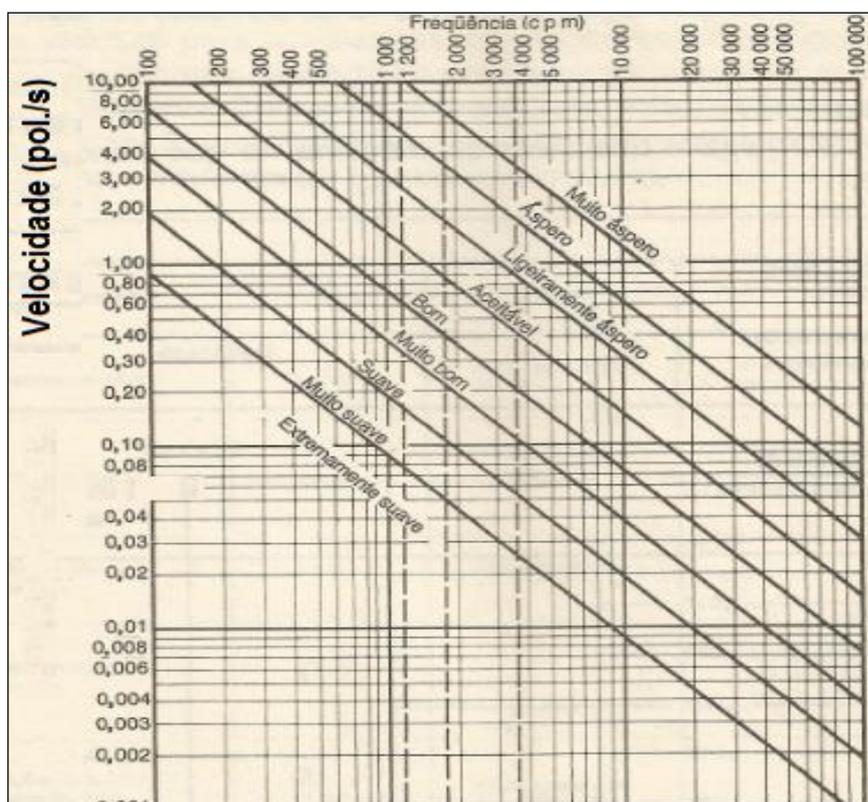


Figura 3.55 - Limites de vibração conforme IRD
Fonte: Mattos e Falco, 1998

I.S.O. 2372 (1972): Os níveis de vibração classificam a qualidade operacional do equipamento conforme figura 3.56.

NORMA ISO 2372				
VALOR RMS DA DA VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO (mm/s)	CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS			
	CLASSE I ATÉ 15 kW (20 CV)	CLASSE II 15 A 75 kW (20 - 100 CV)	CLASSE III ACIMA DE 75 kW BASE RÍGIDA	CLASSE IV ACIMA DE 75 kW BASE FLEXÍVEL
0,28				
0,45			BOM	
0,71				
1,12				
1,80				
2,80		SATISFATÓRIO		
4,50			INSATISFATÓRIO	
7,10				
11,20				
18,00				
28,00		INACEITÁVEL		
45,00				

Figura 3.56 - Classificação I.S.O. 2372

Fonte: Mattos e Falco,1998

I.S.O. 10816 (1995): Esta norma avalia a severidade das vibrações em máquinas rotativas através de medições junto aos mancais, carcaças e pedestais, conforme zonas de avaliação da figura 3.57.

Níveis Globais (rms)	Limites das Zonas de Avaliação			
	Grupos 2 e 4 Mancais Rígidos	Grupos 2 e 4 Mancais Flexíveis	Grupos 1 e 3 Mancais Rígidos	Grupos 1 e 3 Mancais Flexíveis
1,4	A	A	A	
2,3	B			
2,8		B	B	
3,5	C			A
4,5		C	C	B
7,1	D	D	D	C
11,0				D

Figura 3.57 - Limite da zona de avaliação

Fonte: ISO 10816, 2001

Grupos 2 e 4 correspondem a bombas de fluxo axiais, centrífugas ou mistas com potência nominal acima de 15 Kw.

Grupo 1 e 3 correspondem a outras máquinas eletromecânicas com potência nominal acima de 15 kW.

Zonas de avaliação:

A : níveis de vibração esperado para máquinas novas

B : níveis de vibração liberados para máquinas de uso contínuo

C : níveis de vibração considerados insatisfatórios para uso contínuo

D : níveis de vibração capazes de causar danos às máquinas

Para praticamente todas as normas, os seguintes procedimentos são válidos:

- As medições podem ser realizadas tanto nos mancais (mais comum), como nas carcaças ou pedestais de apoio em seus locais de instalação;

- Normalmente os tipos de equipamentos sujeitos a esta avaliação são: bombas, compressores, geradores, motores elétricos, turbinas e ventiladores;

- As medidas de vibrações referem-se a níveis globais (RMS), de máquinas operando dentro de seu regime de velocidade;

- A avaliação é predominantemente do conjunto moto-acionado na faixa de frequência de 10 a 1 kHz, não tratando especificamente de componentes isolados como acoplamentos, engrenagens, rolamentos, etc.; os quais podem ultrapassar o limite de frequência para o diagnóstico;

- As medições devem ser realizadas em partes acessíveis e adequada a resposta das forças dinâmicas da máquina;

- Para máquinas montadas horizontalmente mede-se na direção horizontal e vertical e em casos específicos na direção axial.

Neste trabalho será adotado a norma I.S.O. 2372, a mais utilizada na manutenção preditiva, salientando que estes valores limites baseados no nível global servem como guia de aceitação, contudo podem estar sujeitos a alterações de acordo com as características específicas da máquina, da instalação e operação.

Valores superiores a 2,8 mm/s na classe II, serão considerados insatisfatórios quando da bomba operando com cavitação moderada.

Especificamente para a cavitação em bombas existem hipóteses que a implosão das bolhas vaporosas próximas as aletas do rotor causem sinais de vibrações na faixa sobreposta de passagem de pás e em maiores frequências devido aleatoriedade destas implosões. A figura 3.58 ilustra este provável espectro, contudo ainda é necessário maiores pesquisas para determinação dos picos na faixa mais coincidente com a ocorrência do fenômeno.

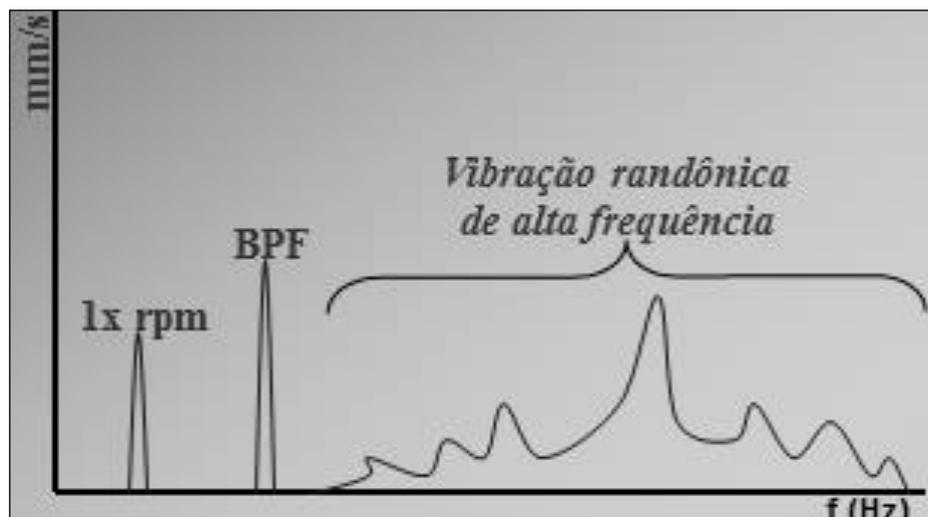


Figura 3.58 - Espectro de vibração da cavitação
Fonte: Mattos e Falco, 1998

3.7 OUTROS EXPERIMENTOS

Neste item são abordados experimentos que apresentam diferentes técnicas de avaliação da cavitação, desenvolvimentos numéricos e análises generalizadas, que complementam as pesquisas e mostram outras opções na complexa tarefa de entendimento do fenômeno.

EISENBERG (1963), em uma pesquisa, reúne diversos resultados de estudos e experimentos sobre os vários mecanismos de danos causados por cavitação. Entre o escopo, apresenta as principais correlações entre as propriedades do material e do líquido nos danos por cavitação.

Quanto às propriedades dos materiais expostos destaca:

- Dureza como fator importante para resistência aos danos por cavitação como determinado por RHEINGANS(1950) para aços inoxidáveis Cr-Ni testados em um oscilador e mostrado na tabela 3.17 .

Tabela 3.17 – Dureza do material e perda de massa

Dureza Br	Perda Material mg/h
302	10,0
291	25,5
235	24,5
229	28,5
225	27,0
207	35,0
167	70,5

Fonte: Rheingans, 1950

Exceto por pequena discrepância, a resistência à cavitação foi proporcional à dureza do material.

- Resistência à tração e tensão de escoamento, quando combinados para endurecimento do material, apresentaram melhor resistência conforme experimento de MOUSSON (1937) e visualizado na tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Características mecânicas e perda de material

Cr - Ni	δt psi	δe psi	Perda Material mm ³
18% - 8%	$75 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	8,8
24% - 12%	$196 \cdot 10^3$	$96 \cdot 10^3$	8,6

Fonte: Mousson, 1937

- Estrutura do grão, tamanho e formas microscópicas da estrutura cristalina do material estão associadas à resistência à fadiga causada por cavitação. Em geral materiais que possuem menores grãos são mais resistentes devido provavelmente a maior dificuldade de atacar contornos mais estratificados.

- Inclusões metalográficas ou impurezas reduzem a resistência a cavitação conforme estudos de MOUSSON (1937), que reportou os efeitos adversos da contaminação de enxofre no aço inoxidável bem como a susceptibilidade do ferro fundido aos danos causados pelo fenômeno devido a presença de grafite livre. Ao contrário, a adição de Cr-Ni nos aços inoxidáveis mostraram-se mais resistentes aos efeitos da cavitação, aparentemente pela associação dos elementos de liga e a redução do tamanho dos grãos obtidos no processo de adição.

Quanto às propriedades do líquido o autor apresenta duas correlações obtidas de experimentos que podem ser mais bem compreendidas nas figuras 3.59 e 3.60, com respectivos comentários:

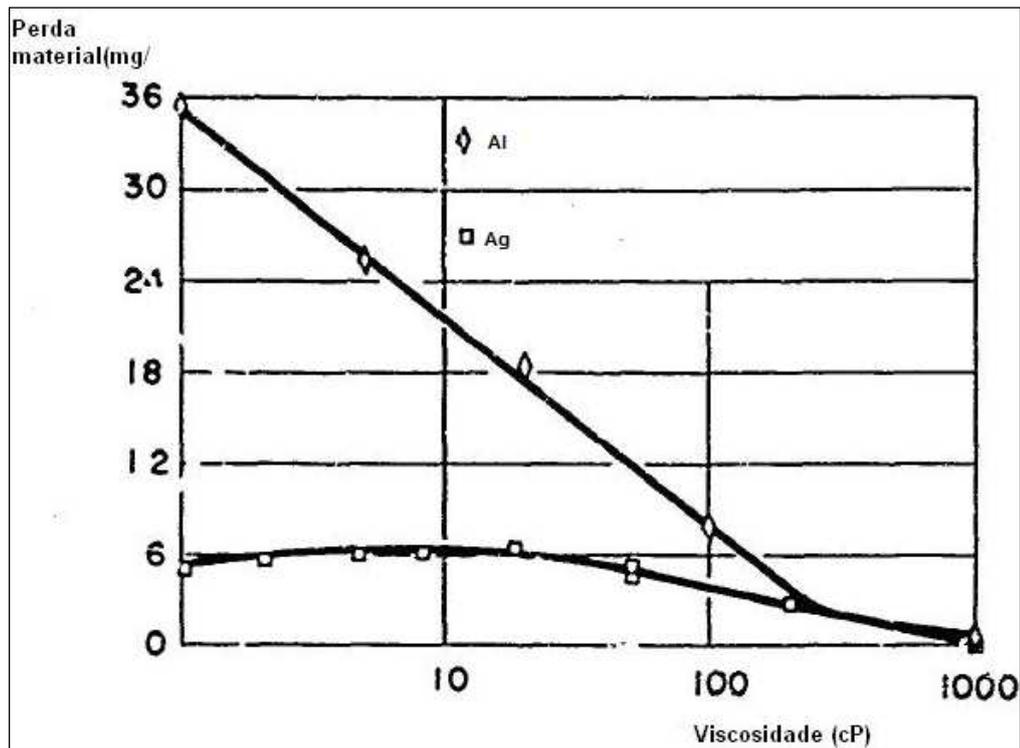


Figura 3.59 – Perda de material x Viscosidade
Fonte: Wilson e Graham, 1957

- Viscosidade: apesar do ensaio de WILSON e GRAHAM (1957) reportar somente superfícies metálicas expostas em um líquido com características lubrificantes, invés de uma solução aquosa, observa-se a tendência de redução da perda de material do alumínio e da prata conforme o aumento da viscosidade do lubrificante

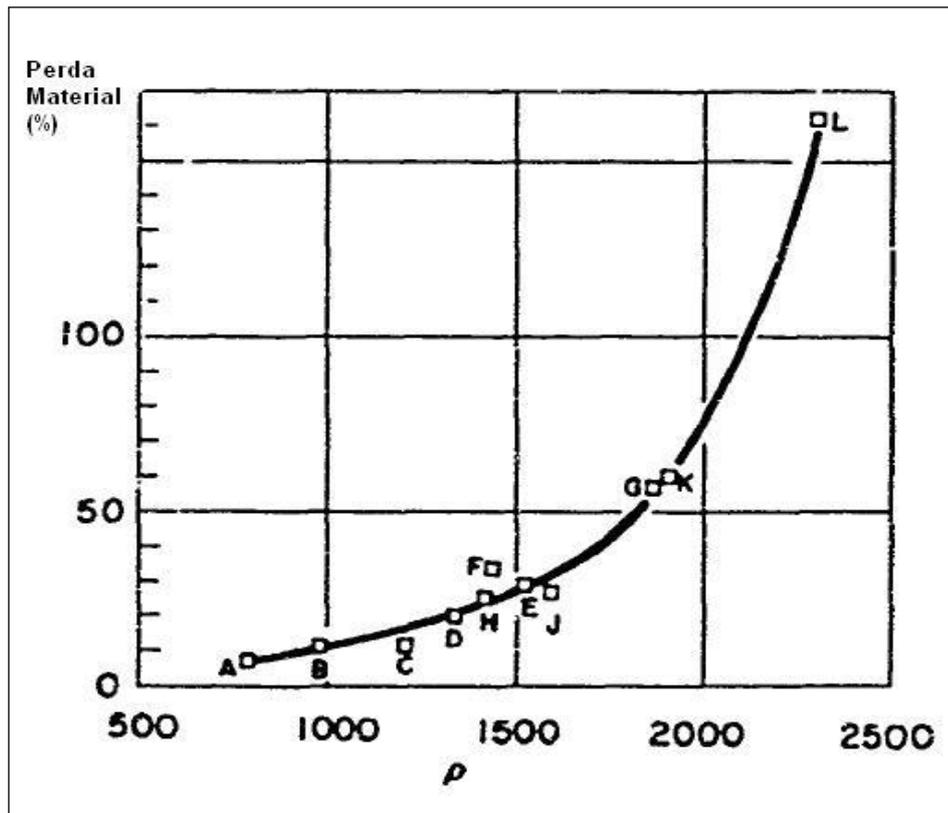


Figura 3.60 – Perda de material x Massa específica do líquido
 Fonte: Wilson e Graham, 1957

A – Heptano B - Álcool C - Benzeno, D - Anisola , E – Anilina F - Água
 G – Etileno H – Tricloretoano J - Tetracloro de Carbono K - Etileno Dibromida L - Bromoformio

- Massa específica: para vários líquidos testados por WILSON e GRAHAM (1957), a correlação de perda de material e massa específica no regime de cavitação mostraram-se numa proporcionalidade característica.

Em outro teste os investigadores injetaram ar no líquido em um aparelho de disco rotativo para simulação de cavitação e determinaram a influência deste ar dissolvido no líquido na perda de material de uma amostra de alumínio.

Os resultados surpreenderam os investigadores visto que uma maior quantidade de ar fornecido reduziu quantitativamente os danos, efeitos estes provavelmente explicados pelo efeito de amortecimento durante o colapso das bolhas de vapor.

DELGOSHA et al (2003), realizaram ensaio em uma bomba centrífuga para simulação de cavitação e programaram um modelo numérico para comparar as condições de fluxo reais e as obtidas no código CFD . O experimento visualizado na

figura 3.61 conta com recursos óticos que permitem a vista perpendicular do rotor no lado da sucção durante eventos da cavitação.

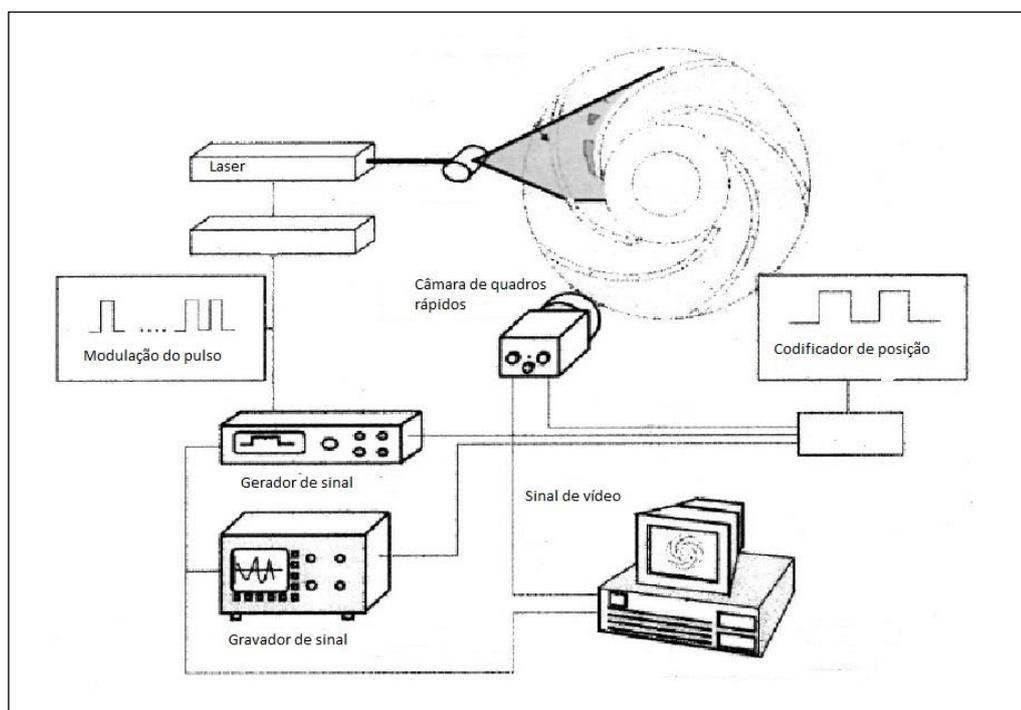


Figura 3.61 – Diagrama da montagem
Fonte: Delgoshia et al, 2003

As características da bomba e da geometria do rotor estão descritos na tabela 3.19 .

Tabela 3.19 – Características da bomba e do rotor

Q m ³ /h	D ₂ m	Z	N _q
210	0,278	5	20

Fonte: Delgoshia et al, 2003

O experimento inicia com as condições normais de operação da bomba sem cavitação e em seguida o NPSH_d é reduzido lentamente até o aparecimento de estruturas de vapor no escoamento na zona de baixa pressão. A figura 3.62 ilustra a redução do NPSH_d bem como os pontos correspondentes ao desenvolvimento da cavitação. As áreas de líquido (escuras) e vapor (claras) nas aletas do rotor de acordo com os pontos assinalados na curva, são visualizados na figura 3.63.

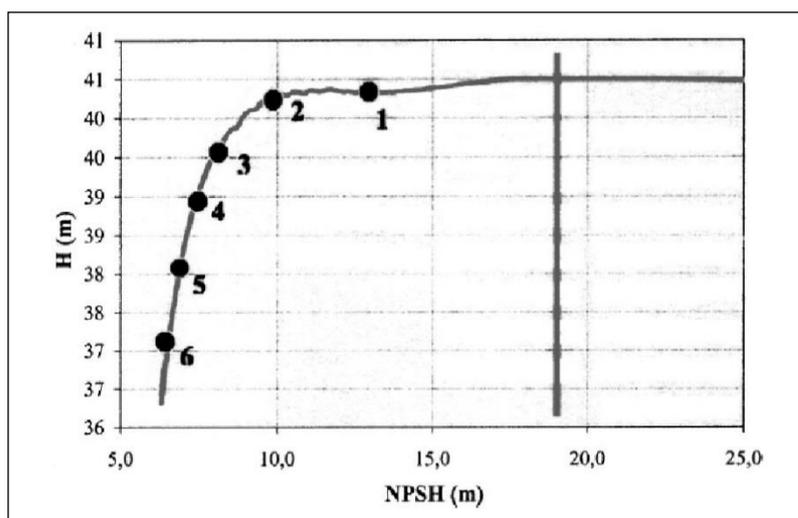


Figura 3.62 – H X NPSH_d na vazão nominal
Fonte: Delgosha et al, 2003

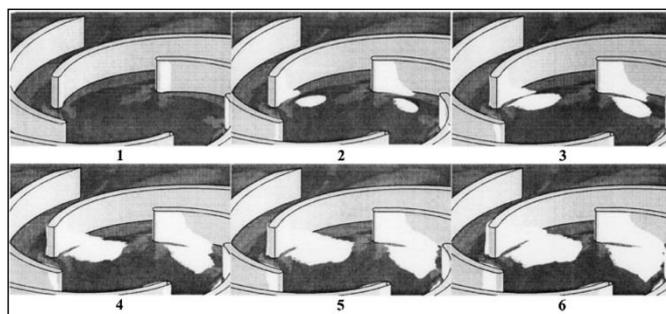


Figura 3.63 – Áreas de líquido e vapor por redução do NPSH_d
Fonte: Delgosha et al, 2003

O modelo numérico apresentou melhor concordância com a observação experimental quando a bomba operou com vazão na ordem de 315 m³/h (50% superior a nominal), e menor acurácia quando a bomba opera com vazões parciais (menores que a nominal).

Os resultados experimentais e numéricos convergiram significando uma promissora utilização do método para predição da cavitação, embora o aumento das instabilidades no fluxo requeira melhorias do modelo.

HARIHARA e PARLOS (2006), realizaram experimento para detectar cavitação desenvolvida em uma bomba centrífuga com sinais elétricos e análise de assinatura de corrente do motor elétrico. Estes sinais tem sido utilizados comumente para estimar as condições operacionais de motores de indução, contudo os autores extrapolaram essa aplicação para a carga acionada. Citam que grande esforço tem

vido investido no diagnóstico de falhas em bombas centrífugas através de análises da pressão, temperatura, vazão e vibração, cujos sensores levam a um aumento de custo do sistema além de dificuldades inerentes de instalação e muitas vezes a confiabilidade desses sensores são reduzidas por interferências externas.

Um exemplo de instalação que apresenta complexidade refere-se a bombas centrífugas submersíveis de acesso difícil. Para evitar tais obstáculos a análise das medições dos motores apresenta-se como técnica não intrusiva e aplicável a todos os acionadores de indução. Para detecção das falhas causadas pela cavitação é utilizado somente as tensões de linha e as correntes de fase, basicamente quanto mais forte o sinal maior o nível do fenômeno e consequente riscos de falhas. Este sistema exibe uma probabilidade de detecção que permite gerar alarme preventivo em todos os tipos de bombas centrífugas acionados por motor elétrico de indução trifásico.

O módulo de aquisição envolve os sinais de tensões e correntes das fases e estes valores são comparados com as condições denominadas saudáveis ou normais de operação da bomba. Caso os sinais adquiridos ultrapassem em 5% a condição padrão, é emitido um alarme de falha. O arranjo experimental é mostrado na fig. 3.64 e o sistema de aquisição é baseado no LABVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench).

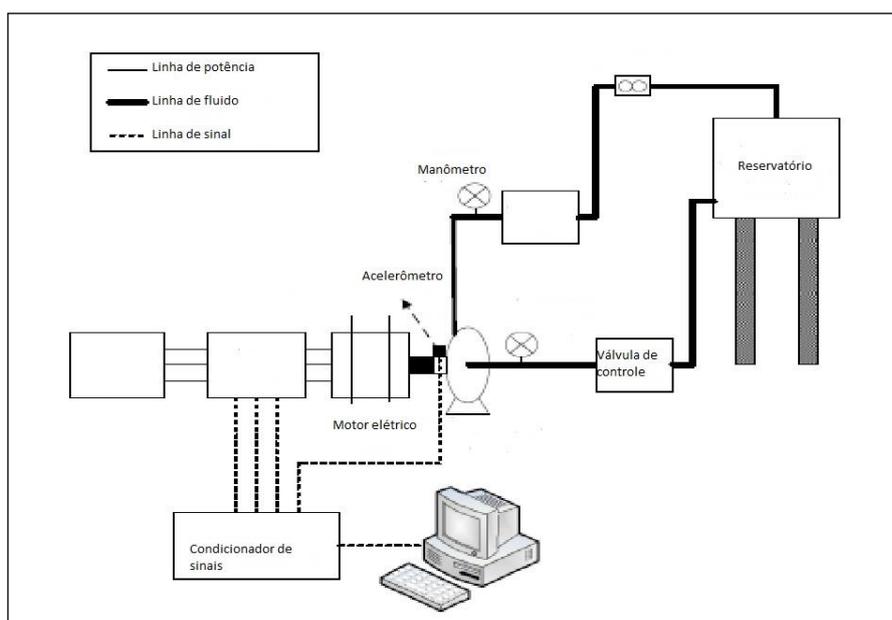


Figura 3.64 – Montagem do ensaio
Fonte: Harihara e Parlos, 2006

Para formar o banco de dados da bomba em condições saudáveis esta foi ensaiada por 60 horas durante um período de 12 dias, e os estudos de caso foram executados por 120 horas durante um mês e repetidos para obtenção de resultados estatísticos significativos. A simulação da cavitação foi realizada com o fechamento parcial da válvula de sucção e os níveis caracterizados de acordo com a tabela 3.20.

Estudo Caso	Pressão Sucção psi
Saudável	3
Cavitação nível 1	-1
Cavitação nível 2	-2
Cavitação nível 3	-3

Fonte: Harihara e Parlos, 2006

Para validação do estudo um acelerômetro axial monitorou a operação durante as experiências, cujos resultados são ilustrados na figura 3.65 e demonstraram boa correlação com a técnica aplicada.

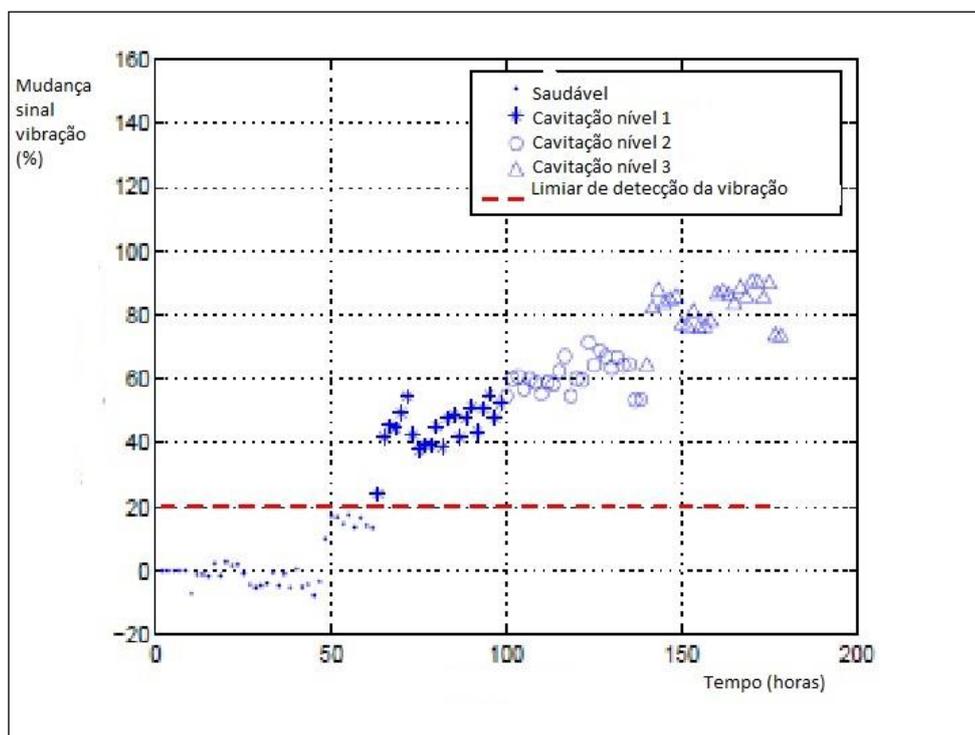


Figura 3.65 – Cavitação X Assinatura de vibração
Fonte: Harihara e Parlos, 2006

SLOTEMAN (2006), descreve métodos recentes dirigidos a detectar e a avaliar os danos de cavitação em uma bomba centrífuga aplicada em alimentação de água de caldeira, baseado num experimento no laboratório de hidráulica com a utilização de uma interface transparente na sucção. Os métodos descritos neste artigo incluem:

- Potencial de erosão por cavitação baseado no comprimento da cavidade;
- Previsão da formação da cavitação utilizando a dinâmica dos fluidos computacional (CFD);
- Detecção e avaliação do potencial de cavitação através do nível de ruído.

Neste documento não é relatado especificamente os valores de vazão e da altura de elevação nem a redução da pressão de sucção dos ensaios.

O experimento de detecção e avaliação dos danos gerados por cavitação foram obtidos com uma bomba centrífuga com velocidade de acionamento de 1.500 rpm, bombeando água à temperatura ambiente.

A taxa de erosão determinada a partir do comprimento da cavidade foi analisada pelos trabalhos de GULICH (1989) e COOPER (1971) que estudaram os principais fatores da formação das cavidades.

O comprimento da cavidade varia com a localização circunferencial das aletas do rotor, e a severidade dos danos depende também do ângulo de entrada de sucção. Estes parâmetros afetam a cavitação em função de fenômenos de recirculação interna.

A utilização de ferramentas disponíveis comercialmente como o CFD com código RANS procuram capturar soluções do comportamento de sucção da bomba centrífuga e por extensão da cavitação inerente a sistemas instáveis.

A natureza deste fenômeno complica esta busca com custos e tempos muitas vezes impraticáveis, contudo pode ser utilizado para comparações empíricas, consolidando informações significativas dos eventos, neste caso, a confirmação da

região de formação de cavitação no rotor pela ferramenta CFD e a visualização do fenômeno pela interface transparente através da imagem digital.

Quanto a ligação existente entre o ruído gerado pela cavitação e o potencial de dano, tem sido objeto de investigação ao longo dos tempos principalmente por tratar de um método não invasivo.

No trabalho de GULICH (1989) tentou-se desenvolver um procedimento para relacionar o nível de ruído e a erosão por cavitação contudo surgiram problemas com a colocação do sensor de ruído em relação ao rotor da bomba e a dificuldade de separar o fenômeno em baixa vazão onde a recirculação também causa colapso não relacionados diretamente a redução do $NPSH_d$.

Os testes no laboratório foram replicados com a instalação de um sensor de ruídos no interior da tubulação de sucção o que tornou possível uma melhor correlação visto que quanto mais próximo for o sensor, maior é o nível de ruído.

POUFFARY et al (2008), desenvolveram um código CFD para modelar a cavitação e simular a queda da altura de elevação em uma bomba centrífuga recalçando água. Os resultados do modelo foram então comparados com experimentos disponíveis.

A bomba centrífuga é configurada com fluxo de $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$, com rotor de sete aletas, e velocidade do acionador de 3.000 rpm. Inicialmente é analisado as condições operacionais sem cavitação, e depois variando o $NPSH_d$ para simular o comportamento com cavitação.

Para as diferentes vazões e queda de 3% na altura desenvolvida pela bomba foram obtidos as curvas ilustradas na figura 3.66.

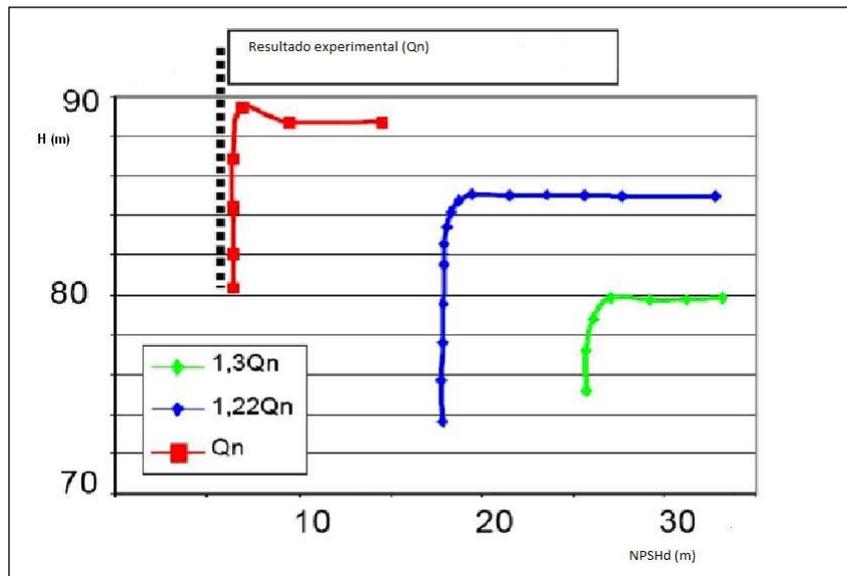


Figura 3.66 – Ht X NPSH_d
 Fonte: Pouffary et al,2008

Outro resultado refere-se à potência e torque do conjunto moto-bomba conforme figura 3.67.

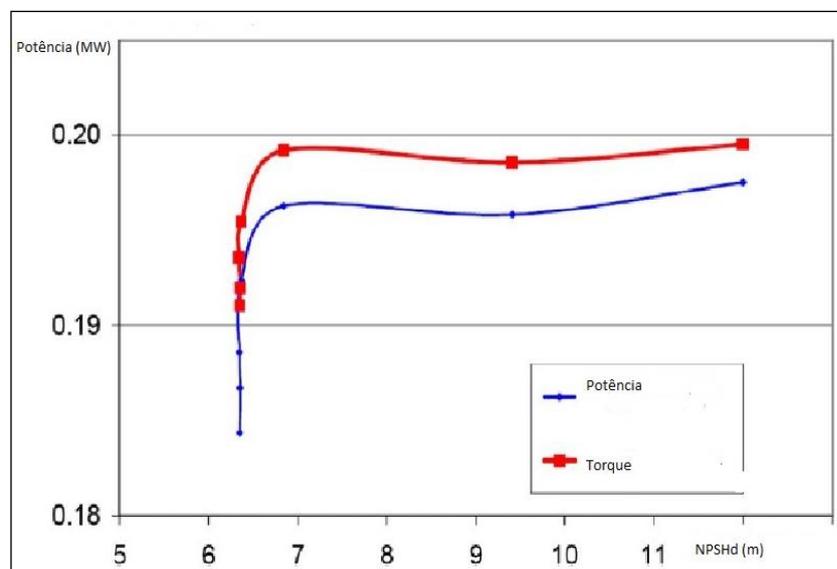


Figura 3.67 – Potência e torque x NPSH_d
 Fonte: Pouffary et al,2008

O torque é a medida do esforço necessário para girar o eixo do conjunto e é expresso conforme equação (22), em função da potência elétrica e rotação do motor.

$$\tau = 9555 * \frac{Pc}{N} \quad (22)$$

Torque em Nm, potência em kW e rotação em rpm.

Verifica-se uma variação discreta da potência e do torque com a redução do $NPSH_d$ até o bloqueio do fluxo com a cavitação extrema ou desenvolvida.

Na simulação computacional o rotor da bomba apresentou manchas claras correspondentes à extensão das cavidades de vapor de acordo com a redução do $NPSH_d$ que pode ser visto na figura 3.68.

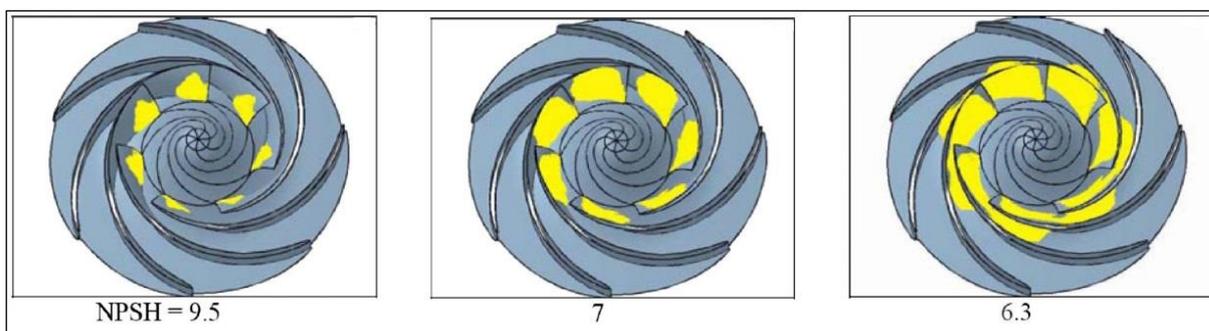


Figura 3.68 – Cavidades no rotor x $NPSH_d$
Fonte: Pouffary et al,2008

No lado da sucção do rotor nota-se uma forma retangular que aumenta proporcionalmente com a redução do $NPSH_d$ bem como cresce do cubo em direção à periferia com uma boa convergência com os resultados experimentais.

YONG et al (2009) utilizaram redes neurais artificiais para previsão do desempenho de bombas centrífugas quando em regime de cavitação. As redes neurais têm recebido recentemente atenção devido sua capacidade de aprender fenômenos complexos não lineares. Neste trabalho o número de neurônios na camada de entrada corresponde às variáveis de vazão e características geométricas do rotor e na camada de saída é tomado o $NPSH_d$. As previsões do método são de duas arquiteturas: Back Propagation (determinada pelo procedimento de tentativa e erro) e Radial Base Function (determinada por processo iterativo de adição) .

O fluxo da cavitação é simulado com um código comercial de CFD denominado FLUENT, um modelo de turbulência K-EPSILON, um algoritmo SIMPLEX e rede neural do MATLAB (Matrix Laboratory). São utilizadas três rotações específicas diferentes das bombas, para análise de desempenho conforme tabela 3.21.

Tabela 3.21 – Características do ensaio

Bomba	Q m ³ /h	D ₂ m	Z	N _s
1	24,7	0,050	5	45,9
2	46,1	0,116	5	86,4
3	43,2	0,160	6	129,8

Fonte: Yong et al,2009

A simulação é obtida com queda da altura de elevação da bomba de 3%, normalizada pelo HI, conforme pode ser visualizado na figura 3.69, com curvas das três bombas.

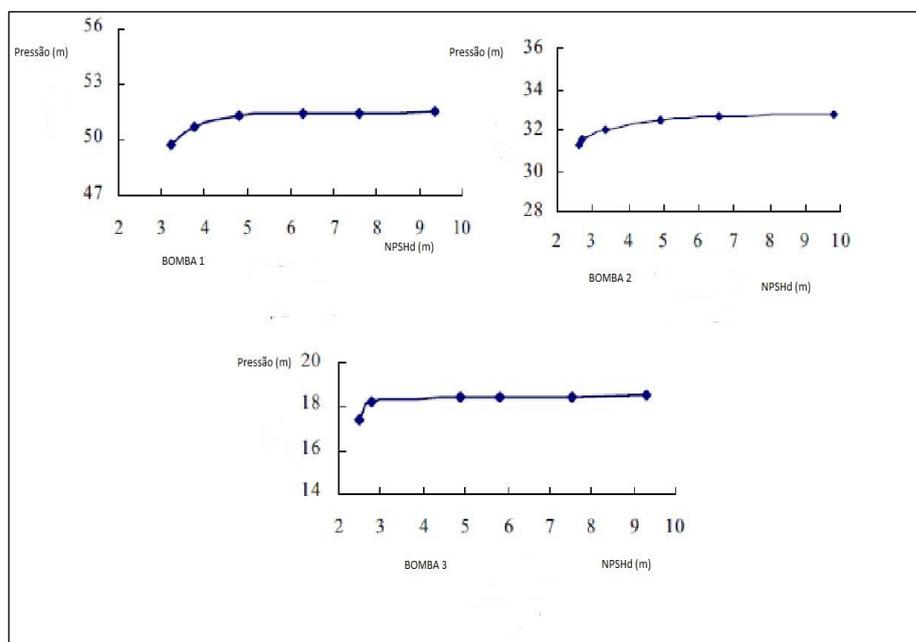


Figura 3.69 – Ht X NPSH_d para as três bombas

Fonte: Yong et al,2009

Um resultado importante refere-se à simulação da distribuição espacial das bolhas de vapor na parte central do rotor e suas frações de volume conforme manchas claras da figura 3.70 em função do NPSH_d.

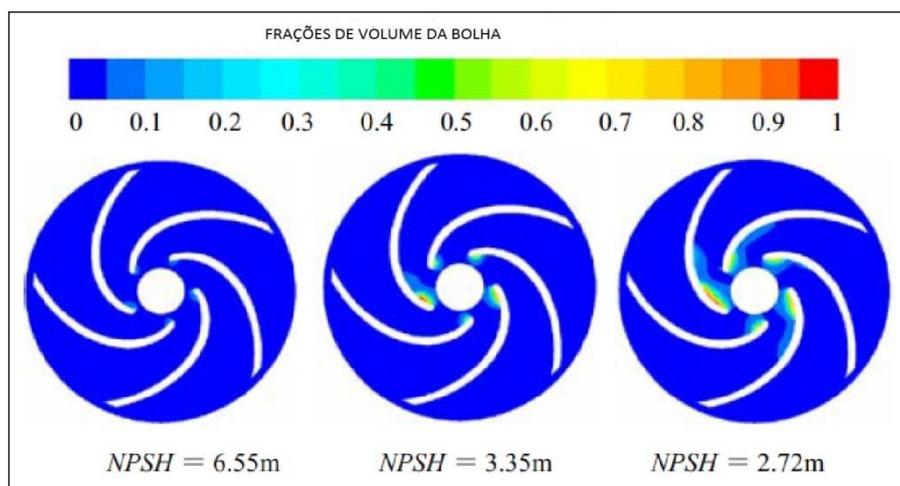


Figura 3.70 – Volume das bolhas no rotor x $NPSH_d$
 Fonte: Yong et al,2009

Nota-se na figura 3.70 que o volume das bolhas aumentam a partir da parte central do lado de sucção do rotor em direção à periferia, também de acordo com experimentos que mostram o colapso nestas áreas.

O método de rede neural apesar de demonstrar boa convergência com dados experimentais ainda precisa ser aprimorado visto que requer uma grande quantidade de dados que por vezes não são disponíveis ou caracterizados, contudo as relações matemáticas entre as variáveis de entrada e saída mostram que podem ser configuradas para obtenção de bons resultados.

SCHIAVELLO e VISSER (2009), em extenso artigo discute as leis de escala, as relações de NPSH para investigar e prever a cavitação incipiente bem como alguns aspectos de avaliação da vida útil do rotor exposto ao fenômeno, e observações visuais de diferentes tipos de cavitação.

Quanto à utilização do critério de NPSH para prever os danos no rotor por cavitação apesar de bem demonstrado teoricamente pode não ser prático em função de outros parâmetros que também influenciam os danos como geometria da bolha de vapor, material do rotor da bomba, conteúdo de ar dissolvido, geometria da aleta do rotor e do flange de sucção, a densidade e temperatura do líquido entre outros.

A figura 3.71 ilustra tipicamente os danos em um rotor por erosão por cavitação.

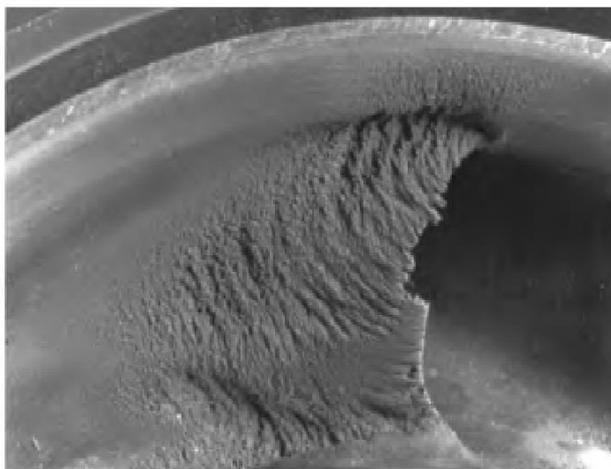


Figura 3.71 – Dano de erosão por cavitação no rotor
Fonte: Schiavello e Visser, 2009

Alguns experimentos conduzidos por GULICH (1989) e VLAMING (1989), procuraram estimar o $NPSH_d$ para garantir uma expectativa de vida do rotor da bomba centrífuga em 40.000 horas correlacionando as velocidades periféricas do rotor e constantes empíricas.

Tais estimativas devem também ser analisadas com cautela visto a influência do desenho, material e acabamento do rotor.

Uma nota refere-se a algumas equações de predição de durabilidade dos rotores com cavitação que envolvem o BEP da bomba, sendo que para os autores o desempenho determinado pela combinação da voluta e difusor não está relacionado às condições de sucção da bomba, logo estas equações tendem a não apresentar resultados práticos.

As observações visuais com utilização de luz estroboscópica realizadas por OKAMURA e MIYASHIRO (1978) permitem diferenciar três tipos especiais de cavitação, a primeira causada por vórtices que recirculam na sucção da bomba, conforme figura 3.72.



Figura 3.72 – Ataque na aleta por cavitação tipo vortex
Fonte: Okamura e Miyashiro.1978

O dano típico corresponde a uma grande cratera rodeada por uma zona de pitting.

A segunda refere-se à cavitação do lado da sucção combinada com danos no canto das aletas próximo ao cubo do rotor, mostrado na foto 3.73, devido interação da velocidade do fluxo e perfil da superfície das aletas.



Figura 3.73 – Ataque na aleta por cavitação no lado da sucção
Fonte: Okamura e Miyashiro,1978

A terceira trata da cavitação que ocorre perto da lingueta da voluta da bomba, gerado por vazões superiores a 30% ao do BEP, causando uma perda de pressão superior a observada em uma cavitação padrão, conforme figura 3.74.



Figura 3.74 – Danos combinados de cavitação no rotor e na lingueta da voluta
Fonte: Okamura e Miyashiro.1978

Resumindo os fatores chaves que impactam em danos causados por cavitação, os autores elencam 11 itens conforme segue:

- 1) Velocidade periférica no olho do rotor;
- 2) Projeto do rotor e da câmara de sucção da bomba;
- 3) Relação da capacidade de operação referenciada ao BEP;
- 4) Relação $NPSH_d$ e $NPSH_r$;
- 5) Densidade do líquido bombeado;
- 6) Resistência à erosão por cavitação do material do rotor;
- 7) Propriedades corrosivas do líquido bombeado;
- 8) Temperatura do líquido;
- 9) Conteúdo de ar dissolvido no líquido;
- 10) Densidade do vapor;
- 11) Propriedades termodinâmicas do líquido como calor específico e latente.

BACHERT et al (2010), investigaram a cavitação na lingueta da voluta de uma bomba centrífuga através de um experimento com janelas acrílicas e imagens combinadas com partículas fluorescentes. Segundo os autores o desenvolvimento da cavitação nesta zona da voluta gera perda da altura de elevação da bomba e erosão grave nas superfícies quando operando em vazões acima da nominal,

determinando a queda de rendimento a partir da lingueta da voluta e não da influência do rotor propriamente. A montagem do teste é mostrada na figura 3.75.

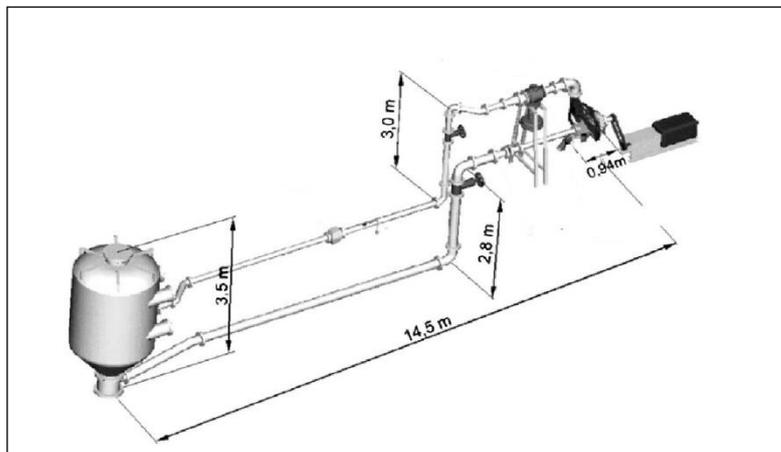


Figura 3.75 – Diagrama de ensaio da bomba
Fonte: Bachert et al, 2010

As razões para determinação da redução de eficiência devido a cavitação na lingueta são provavelmente devidos a:

- 1 - aumento da velocidade e desvio do ângulo de incidência pelo incremento de fluxo e conseqüente redução da pressão na mesma área;
- 2 - criação de um campo de pressão instável na vizinhança da lingueta devido a passagem cíclica das aletas do rotor com propensão ao aparecimento da cavitação.

A figura 3.76 representa o campo de fluxo nas proximidades da lingueta, onde são relatados muitos casos de erosão na área assinalada em cinza, por cavitação em bombas centrífugas.

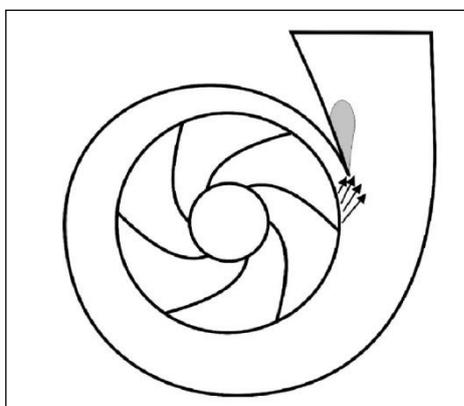


Figura 3.76 – Fluxo nas vizinhanças da lingueta da voluta
Fonte: Bachert et al, 2010

O estudo utilizou de técnica recente de velocimetria por imagem de partículas que permite visualizar o fluxo interior e também a estrutura da bolha de vapor através de fluorescência. Durante o ensaio, a bomba, com um rotor de seis aletas, diâmetro de 0,26 m, N_q de 26, velocidade do motor de 2.000 rpm foi submetida a vazões acima da nominal. O experimento contou com medidor eletromagnético de vazão, transdutores de pressão, monitoramento da temperatura e da saturação da água, estroboscópio e câmara especial para registro. A figura 3.77 mostra as características dos pontos investigados no ensaio.

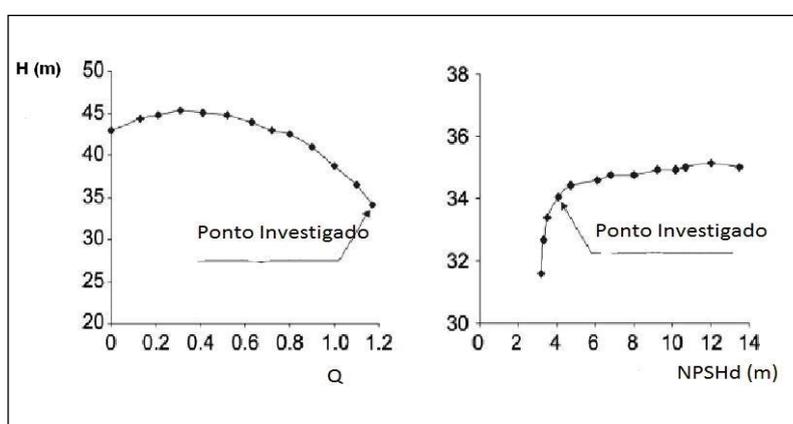


Figura 3.77 – Pontos investigados na curva
Fonte: Bachert et al, 2010

Na imagem da figura 3.78 observam-se bolhas (áreas claras) de cavitação com maior distribuição no espaço da lingueta que na vizinhança da aleta do rotor.

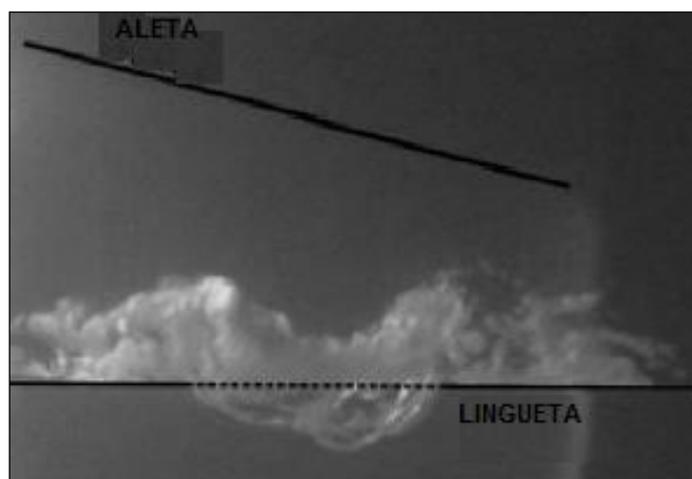


Figura 3.78 – Cavitação na lingueta da voluta
Fonte: Bachert et al, 2010

Outro dado referente ao campo de velocidades na área da lingueta mostra que a nuvem de bolhas tem maior concentração onde a variação da direção da velocidade é mais intensa, o que corresponde a respectiva separação do fluxo.

FARHAT et al (2010), investigaram a cavitação hidrodinâmica e utilizaram uma técnica de luminescência para análise da bolha de vapor num evento dentro de um túnel de cavitação.

A luminescência ou sonoluminescência são técnicas baseadas nos efeitos da luz provocada pela cavitação e que está associada ao colapso da bolha de vapor. Além do regime de cavitação depende de outros fatores associados do líquido para sua ocorrência como a temperatura e concentração de gases dissolvidos.

As condições extremas de pressões, temperaturas e velocidades da implosão da bolha de vapor são acompanhadas por reações químicas e emissão de luz que pode ser registrada por uma câmara de vídeo de alta velocidade. Esta emissão, produto da adição de gases nobres na água foi referida pela primeira vez no caso de nuvens de cavitação gerada por ultrassom, e denominada de sonoluminescência. Como ilustração da técnica assume-se que duas emissões luminescentes separadas por cerca de um milissegundo correspondem a dois colapsos de bolhas de vapor.

Os autores resumem que a imagem obtida por luminescência das bolhas colapsadas é mais uma das técnicas de diagnóstico para estudo da cavitação, assim como os hidrofones, transdutores de pressão, acelerômetros, análise da superfície dos pitting e outras.

Estudos anteriores como o de MEULEN (1986) e LEIGHTON(2003) indicaram que a intensidade da luminescência está correlacionada às taxas de erosão e ruídos gerados pela cavitação.

A figura 3.79 apresenta a cavitação hidrodinâmica a partir das fotografias a cinquenta quadros por segundo com a velocidade da água em 20, 26 e 30 m/s. Observa-se que com o aumento da velocidade no túnel de água o tamanho das cavidades são aumentadas. Em termos de intensidade, a luminescência capta

também através do brilho e contrastes com manchas significativas, diferenças espaciais das bolhas no escoamento.

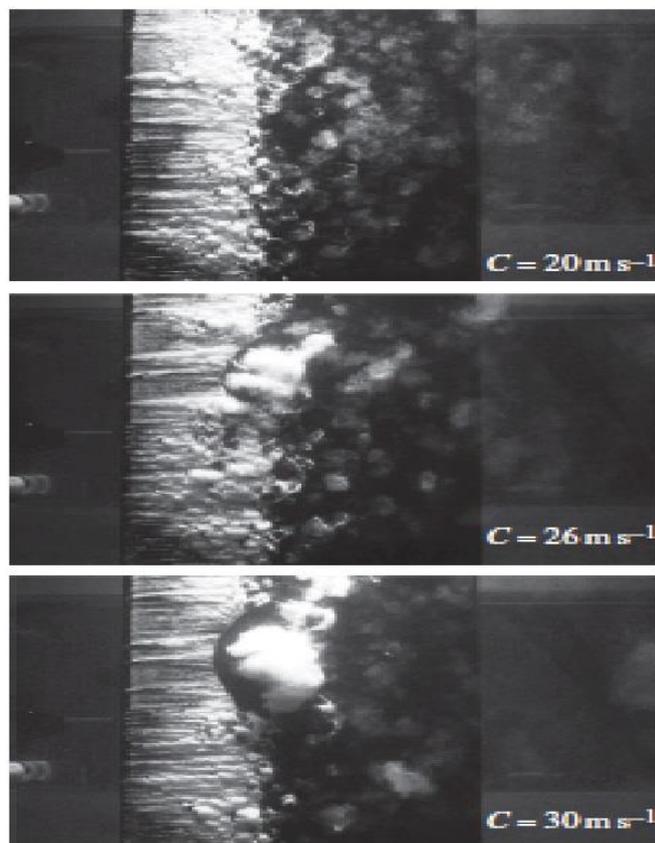


Figura 3.79 – Luminescência da cavitação (exposição de 1s)
Fonte: Farhat et al, 2010

A técnica mostra que a periodicidade do sinal da luminescência corresponde à frequência de colapso das bolhas de vapor da cavitação.

WHITESIDES (2012), desmistifica a complexidade do fenômeno da cavitação mencionando trabalhos de pesquisadores que através dos tempos utilizaram de modelos físicos e experimentais para esclarecer inúmeros pontos acerca do tema. Sobre os danos causados pela erosão por implosão de bolhas acrescenta que os estudos mostraram que a cavitação remove também os óxidos das camadas de passivação aumentando assim os efeitos de corrosão por exposição da superfície metálica. Como exemplo, a cavitação em água provoca a formação de radicais livres que intensificam a reatividade de oxidação.

A predição quantitativa dos danos da cavitação é um problema complexo por tratar de um fenômeno tridimensional com um sistema de quatro componentes; o líquido, os gases dissolvidos, a superfície metálica e o óxido de metal desprendido. Tal arranjo torna a análise teórica e experimental de difícil solução.

Conforme estudos os danos da cavitação são inversamente dependentes da viscosidade do líquido, ou seja, um aumento da viscosidade, mantido as demais propriedades constantes, reduz o número e tamanho das bolhas a serem implodidas, além que a velocidade do micro jato formado também é amortecido.

Entretanto a gravidade dos danos está relacionada diretamente com a densidade do líquido, sendo a pressão de implosão proporcional á raiz quadrada desta, conforme a equação de RAYLEIGH (1917).

Os danos causados pela cavitação não se limitam a erosão das aletas de rotor ou pás de turbinas que são os exemplos mais destacados e fotografados dos efeitos do fenômeno, além disso, a cavitação em equipamentos rotativos geram falhas em outros componentes como em mancais de rolamentos e vedações estáticas como retentores e dinâmicas como selos mecânicos.

Quanto a gases dissolvidos no líquido é problemático prever em quais quantidades estes podem gerar algum benefício de amortecimento das forças de implosão das bolhas, aceitando-se como razoável de 1 a 2% em volume.

Em uma bomba centrífuga a implosão das bolhas ocorrem provavelmente no centro do rotor ou próximo das extremidades das aletas, e no caso de bombas alternativas é mais provável a ocorrência na voluta entre a sucção e descarga.

É convencionado que valores de $NPSH_r$ podem ser usados para demarcar a faixa de operação com ausência de cavitação, contudo é importante salientar que tal afirmação precisa ser mais bem compreendida haja visto que os fabricantes de bombas estabelecem o $NPSH_r$ através da redução de pressão na sucção até a queda de 3% da altura de elevação da bomba. Este procedimento descreve somente as condições onde a cavitação atingiu uma intensidade incipiente que pode ser interpretada como aceitável ou não. A tabela 3.22 exemplifica a

correspondência entre a energia disponível e requerida para casos práticos de instalação de bombas.

Tabela 3.22 – Margem do NPSH

Relação	Cavitação	Qualidade Operacional
$NPSH_d < NPSH_r$	Sim	Ruim
$NPSH_d = NPSH_r$	Mínimo	Aceitável
$NPSH_d > NPSH_r$	Não	Bom
$NPSH_d \gg NPSH_r$	Não	Bom (mas com alto custo)

Fonte: Whitesides, 2012

Uma avaliação que precisa ser considerada é quanto a pressão de vapor do líquido, visto que os testes nos fabricantes de bombas são realizados com água, e se o líquido a ser recalado apresentar propriedades diferentes ou mesmo temperaturas em desacordo com os ensaios com água, os valores do $NPSH_r$ não serão confiáveis na instalação de campo. Outro aspecto refere-se que a pressão de vapor aplica-se a líquidos puros, sendo possível que durante a operação o equipamento rotativo esteja bombeando uma solução de diferentes líquidos. Para estes casos é conservador que utilize os cálculos do $NPSH_d$ baseado no componente de maior pressão de vapor. O autor salienta que margens maiores de segurança entre o $NPSH_d$ e requerido devem ser utilizados quando as propriedades dos líquidos não são totalmente conhecidas.

Entre os estudos ainda não totalmente compreendidos, o autor cita que em alguns experimentos a taxa de danos por erosão de cavitação ocorreu mesmo com o $NPSH_d$ apresentando margem superiores a 40% do requerido e em outro trabalho menciona que é possível que em uma bomba centrífuga possa ocorrer a cavitação sem ruído perceptível.

Outro aspecto destacado pelo autor que pode gerar controvérsia refere-se à queda da potência consumida da bomba radial quando operando em cavitação e o aumento desta potência em bomba axial.

3.7.1 Comentários

Nestes outros experimentos observa-se a tendência de agregar informações de uma particularidade da cavitação com objetivo de aumentar a

compreensão total do fenômeno. Ferramentas de visualização e métodos numéricos estão entre as técnicas mais promissoras, embora os trabalhos de análises baseadas em experiências de campo não possam ser desprezadas. São esperados que sistemas como inteligência artificial, técnicas de luminescência, instrumentação direcionada como hidrofonia e termografia, além de velocimetria por imagem de partículas e outras tecnologias venham a contribuir num futuro próximo, para melhor elucidação do complexo fenômeno da cavitação. Tais técnicas não serão aplicadas neste trabalho devido a complexidade operacional e dos altos custos para implementação no campo.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTO

O experimento montado no laboratório de hidráulica e mecânica de fluidos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, designado por LHMF, com instalação elétrica, hidráulica e mecânica e equipamentos de funções específicas são detalhados no esquema da figura 4.1.

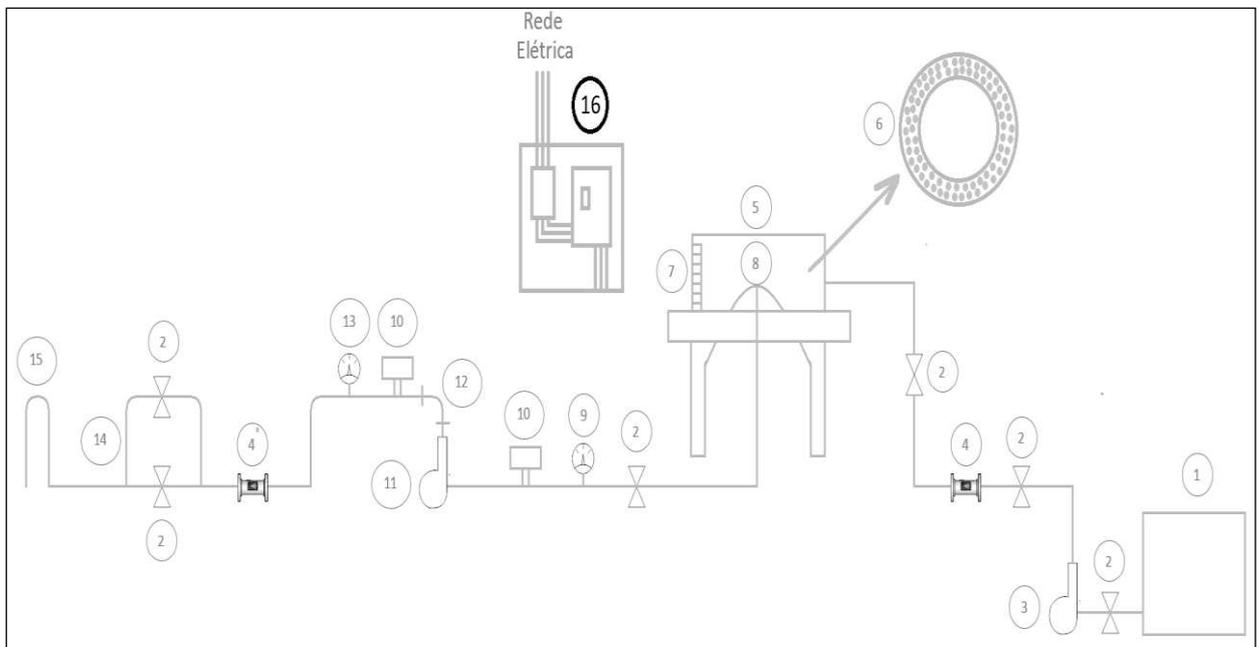


Figura 4.1 – Esquema do experimento

Fonte: Schröder, 2015

- | | | | |
|---|--------------------------|----|--|
| 1 | Reservatório inferior | 9 | Manovacuômetro |
| 2 | Válvula de controle | 10 | Transdutor de pressão |
| 3 | Motobomba de alimentação | 11 | Motobomba centrífuga principal |
| 4 | Medidor de vazão | 12 | Curva 90 °C |
| 5 | Tanque superior | 13 | Manômetro |
| 6 | Tranquilizador | 14 | By pass |
| 7 | Régua de nível | 15 | Sifão |
| 8 | Tomada de água | 16 | Painel de comando, proteção e inversor de frequência |

Resumo dos sub sistemas do experimento:

- CIRCUITO DE ÁGUA

Alimentação: reservatório inferior com conjunto moto bomba de recalque, válvulas de controle e medidor de vazão.

Sucção: tanque superior, tranquilizador, régua de nível, tomada de água, tubulação de sucção, válvula de controle, mano vacuômetro e transdutor de pressão de sucção.

Recalque: curva 90º, tubulação de recalque, manômetro, transdutor de pressão, medidor de vazão, by-pass e sifão invertido de retorno.

- ACIONAMENTO E BOMBEAMENTO: rede elétrica, painel de comando e proteção, inversor de frequência, motor elétrico trifásico e bomba centrífuga horizontal.

- INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO PORTÁTEIS: são mostrados no esq. da figura 4.2, à exceção da balança eletrônica localizada em outro laboratório.

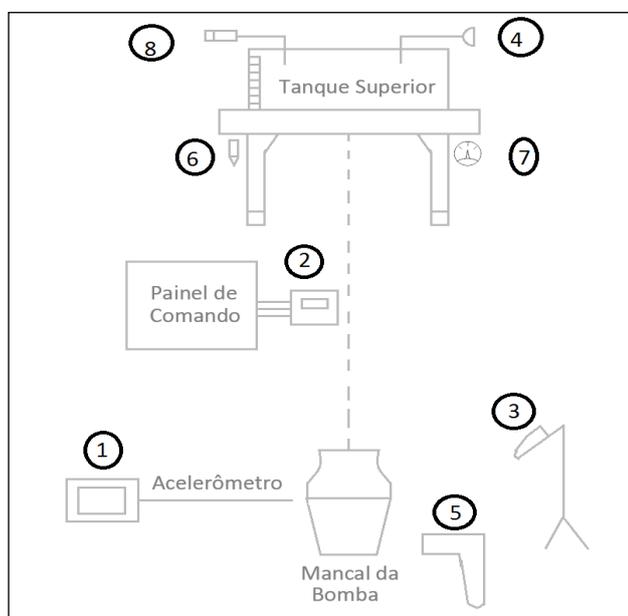


Figura 4.2 – Esquema dos instrumentos portáteis
Fonte: Schröder, 2015

1 – Analisador de vibração 2 - Analisador de energia 3 – Decibelímetro
4 - Termômetro digital 5 - Termômetro infravermelho 6 – Termômetro de mercúrio
7 - Barômetro 8 - Oxímetro.

4.1 CIRCUITO DE ÁGUA

ALIMENTAÇÃO

A água utilizada no experimento é obtida de um reservatório localizado ao lado do laboratório, com aproximadamente 30 m³ de volume, numa cota inferior ao piso da instalação principal, e recalçada ao tanque superior através de uma bomba centrífuga mono estágio acionada por um motor de 22,0 kW, por tubulação de aço galvanizado de diâmetro 0,150 m, com controle de vazão por duas válvulas tipo gaveta de 0,150 m de diâmetro, uma justaposta a entrada do laboratório e outra embaixo do tanque superior, e por um medidor de vazão eletromagnético de 0,150 m de diâmetro conforme figura 4.3, com características da tabela 4.1, instalado a montante da segunda válvula.

A manutenção do reservatório inferior é realizada anualmente com o esvaziamento completo da água, limpeza do piso e das paredes e enchimento com água limpa vinda da rede da concessionária municipal. Quando é necessário interromper o fluxo para o tanque superior, executa-se uma manobra com a válvula, para um by-pass de descarga e retorno ao reservatório inferior.



Figura 4.3: Medidor de vazão a montante
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.1: Características técnicas do medidor de vazão a montante

MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO	
Marca	Conaut
Princípio de funcionamento	Lei de Faraday
Diâmetro	0,15 m
Precisão	0,25%
Faixa de operação	0 - 30 m/s
Temperatura de operação	0 a + 65 °C

Fonte: Conaut, 2014

SUCÇÃO

O tanque superior (figura 4.4) para a sucção da bomba principal é constituído de uma caixa de concreto com forma quadrada de 3,6 m de lado e 0,95 m de altura total, volume útil estimado de 8,4 m³, com entrada da tubulação, a 0,10 m do fundo, com um redutor de turbulência constituído de uma colmeia retangular com 0,5x0,7x0,7 m formada por tijolos vazados. No centro do tanque existe um tranquilizador (figura 4.5) em forma de coroa circular com 2,6 m de diâmetro externo e 2,3 m de diâmetro interno com 0,85 m de altura, construído com grade metálica perfurada, com o interior da coroa preenchido com aproximadamente cem mil esferas de vidro de 0,02 m de diâmetro. Este tranquilizador estabiliza o fluxo para a sucção da bomba que é turbulento na periferia do lado externo da coroa. No centro do tanque de concreto a tomada de água (figura 4.6) para a bomba é em forma de um tronco de cone com altura em relação ao piso de 0,10 m, base maior com 0,95 e menor de 0,65 m. Nesta tomada de 0,15 m de diâmetro está instalado uma tela de contenção de sólidos que eventualmente possam desprender da estrutura. Mantém-se um nível mínimo de água de 0,6 m no tanque superior ou maior que três vezes o diâmetro de saída neste tanque durante todo o experimento. Suspenso, também no centro do tanque um quebra vórtice (figura 4.5) constituído de uma chapa de madeira que impede a formação de redemoinhos sobre a tomada de água para a bomba. O nível de água é controlado por comparação de vazão de entrada e saída através dos medidores eletromagnéticos a montante e a jusante, contudo, no próprio tanque, uma régua (figura 4.5) permite a visualização rápida deste nível.

Da tomada do tanque superior, a água é enviada por uma tubulação descendente com 1,95 m de altura, e em seguida às duas curvas de 90° graus que redirecionam à válvula de controle e medidores de pressão localizados na linha de centro da bomba conforme figura 4.7. A válvula de controle, tipo gaveta de 0,15 m de diâmetro (tabela 4.2) está a 1,2 m a montante dos medidores de pressão, atendendo a recomendação conservadora do HI de sete diâmetros, para redução de turbulência. Um mano vacuômetro (tabela 4.3) está instalado somente para verificação visual rápida em alterações e ajustes do ponto de operação, visto que as medições são realizadas com o transdutor de pressão (tabela 4.4).



Figura 4.4: Tanque superior
Fonte: Schröder, 2015



Figura 4.5: Tranquilizador, quebra vórtice e régua de nível
Fonte: Schröder, 2015

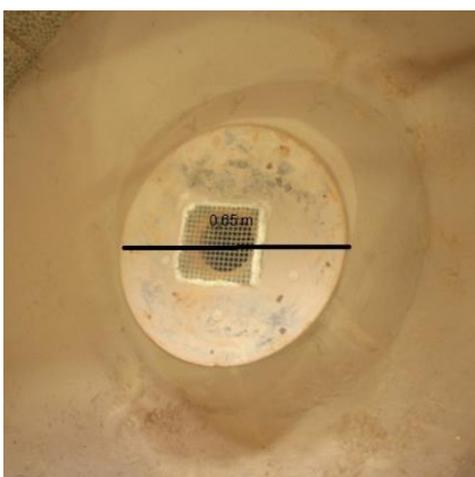


Figura 4.6 - Tomada de água
Fonte: Schröder, 2015



Figura 4.7 - Tubulação descendente e válvula
Fonte: Schröder, 2015

A montante do flange da bomba um trecho retilíneo da tubulação com 1,2 m de comprimento a partir do transdutor de pressão encerra o sub sistema de sucção, conforme figura 4.8

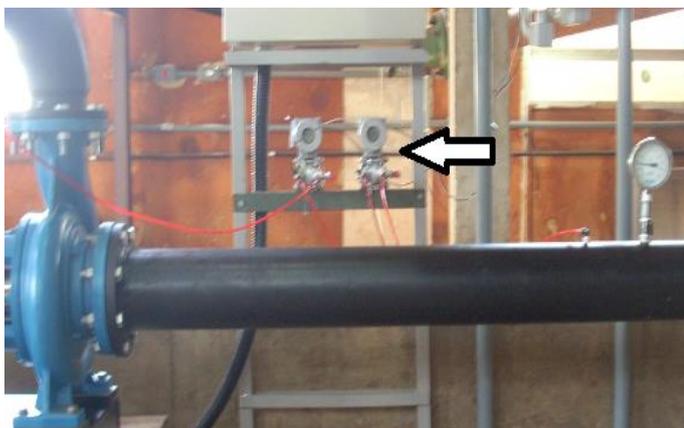


Figura 4.8 - Tubulação a montante da bomba e transdutores
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.2: Características técnicas da válvula de gaveta

Válvula de sucção	
Marca	Brusantin (MB)
Diâmetro nominal	0,15 m
Tipo	gaveta
Material do corpo, castelo	ferro nodular GGG40
Material da cunha	ferro nodular GGG40 revestida em EPDM
Material da haste	aço inoxidável AISI 410

Fonte: Brusantin, 2014

Tabela 4.3: Características técnicas do Mano Vacuômetro

Mano vacuômetro	
Marca	Absi
Tipo	Bourdon
Diâmetro do invólucro	0,1 m
Faixa de operação	-10 a + 40 mcl
Precisão	+ - 2% F.E.
Temperatura de operação	0 a + 60 °C

Fonte: Absi, 2014

Tabela 4.4: Características técnicas do Transdutor de pressão de sucção

Transdutor de pressão	
Marca	Smar
Modelo	LD 300
Tipo	Diferencial
Faixa de operação	-250 a + 250 kPa
Precisão	+ - 0,2 % F.E.
Temperatura de operação	- 40 °C a + 85 °C

Fonte: Smar,2014

RECALQUE

A tubulação de recalque é composta de uma ampliação flangeada de 0,125 x 0,150 m, curva de subida de 90° graus em aço carbono conforme figura 4.9, um segmento de tubulação, um transdutor de pressão (tabela 4.5) a 0,7 m acima da linha de centro da bomba, manômetro (tabela 4.6) somente para verificação visual rápida em alterações e ajustes do ponto de operação, visto que as medições são realizadas com o transdutor, curva de descida de 90° graus e segmento de tubulação descendente seguido de outra curva direcionadora de 90° graus, e a jusante o medidor de vazão eletromagnético (tabela 4.7) de 0,1 m de diâmetro, á distância de 0,8 m da mudança de direção do fluxo (conforme orientação do fabricante é desejável ser superior a quatro vezes o diâmetro do aparelho).

Segue uma válvula de gaveta em ferro dúctil de 0,15 m de diâmetro, a 0,7 m do medidor de vazão e paralelo a esta válvula, um by-pass com válvula no diâmetro de 0,025 m para ajuste de pequenos incrementos de vazão conforme figura 4.10. Em seguida um trecho de tubulação até um sifão invertido composto de três curvas de 90° graus, trecho ascendente e descendente de 1,5 m de altura com a finalidade de criar perda de carga a jusante do medidor eletromagnético conforme recomendação do fabricante. O fluxo após o sifão é retornado ao reservatório inferior, realimentando o sistema, em um circuito fechado conforme figura 4.11.



Figura 4.9 - Tubulação de recalque a jusante da bomba
Fonte: Schröder, 2015

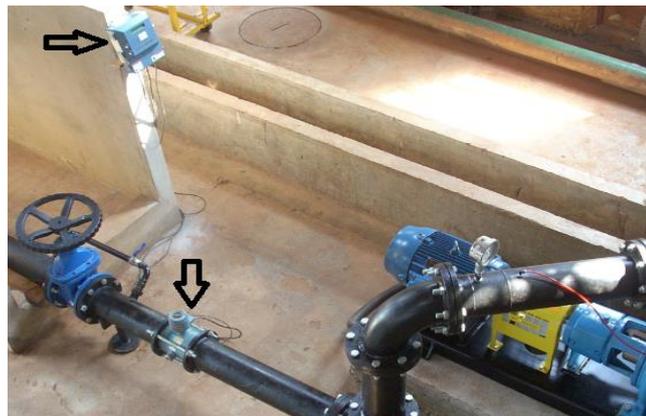


Figura 4.10 : Medidor de vazão a jusante e by pass
Fonte: Schröder, 2015



Figura 4.11: Sifão e retorno
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.5: Características técnicas do Transdutor de pressão de recalque

Transdutor de pressão	
Marca	Jumo
Modelo	dTrans02
Tipo	Diferencial
Faixa de operação	0 a + 2500 kPa
Precisão	+ - 0,1 % F.E.
Temperatura de operação	- 40 °C a + 85 °C

Fonte: Jumo, 2014

Tabela 4.6: Características técnicas do Manômetro

Manômetro	
Marca	Absi
Tipo	Bourdon
Diâmetro do invólucro	0,1 m
Faixa de operação	0 a + 40 mcl
Precisão	+ - 2% F.E.
Temperatura de operação	0 a + 60 °C

Fonte: Absi, 2014

Tabela 4.7: Características técnicas do medidor de vazão a jusante

Medidor de vazão eletromagnético	
Marca	Rosemount
Princípio de funcionamento	Lei de Faraday
Diâmetro	0,1 m
Precisão	+ - 0,25%
Faixa de operação	0 a 18 m/s
Temperatura de operação	0 a + 65 °C

Fonte: Emerson, 2014

4.2 ACIONAMENTO E BOMBEAMENTO

O sistema elétrico é composto de uma rede monofásica 110 V, bifásica 220 V e trifásica 380 V distribuída a partir de um painel de força principal com sistema de proteção com fusíveis, disjuntores e contadoras que alimentam o quadro de comando do experimento conforme figura 4.12.

Este quadro metálico montado sobre um pedestal é constituído de barramento trifásico 380 V para os cabos de força, banco de fusíveis, alojados em chave seccionadora, que quando acoplada, energiza um inversor de frequência de 22 Kw , figura 4.13.

O inversor com características da tabela 4.8 é responsável em fornecer energia ao motor elétrico trifásico (figura 4.14), de mesma potência, instalado próximo ao quadro, com rampa de aceleração controlada manualmente para evitar sobrecarga de corrente. Características do motor elétrico estão na tabela 4.9.

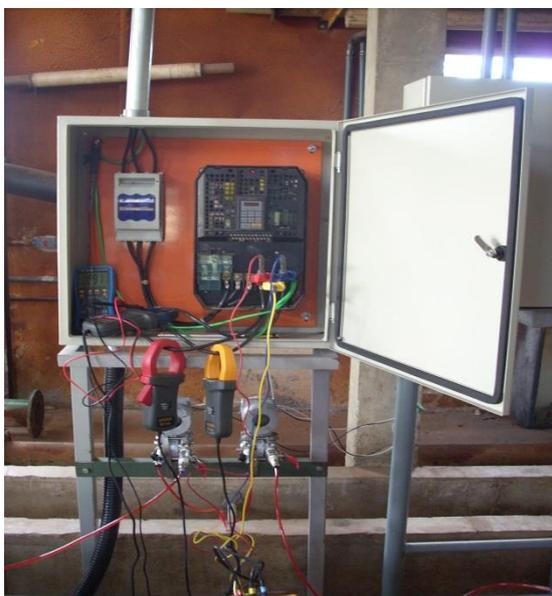


Figura 4.12: Painel de comando
Fonte: Schröder, 2015



Figura 4.13: Inversor de frequência
Fonte: Schröder, 2015



Figura 4.14: Motor elétrico
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.8: Características técnicas do Inversor

Inversor de frequência	
Marca	Toshiba
Modelo	Série VF-SX
Tipo de controle	Vetorial
Limite de operação	22 kW
Corrente máxima	73 A
Temperatura de operação	até 40 °C

Fonte: Toshiba, 2014

Tabela 4.9: Características técnicas do Motor elétrico

Motor elétrico	
Marca	Weg
Grau de proteção	IP 55
Classe de isolamento	F
Fator de Serviço	1,15
Potência	22 kW , IV polos
Rendimento	89% (50% potência nominal)

Fonte: Weg, 2014

BOMBEAMENTO

O equipamento do experimento é uma bomba centrífuga horizontal (figuras 4.15 a 4.17), com rotação específica N_s igual a 147, mono estágio, bi partida radialmente, apoiada pelos pés, com flange de sucção com diâmetro de 0,15 m e recalque de 0,125 m, com base de aço carbono estrutural, fixada ao concreto por chumbadores, conjunto bomba/ motor alinhados com aparelho a laser, e ajuste axial da folga entre o rotor e o anel de desgaste executado através da inserção (ou retirada) de calços calibrados na parte traseira do mancal. As principais características da bomba são apresentadas na tabela 4.10.



Figura 4.15: Bomba com base, luva e motor
Fonte: Scanpump, 2009

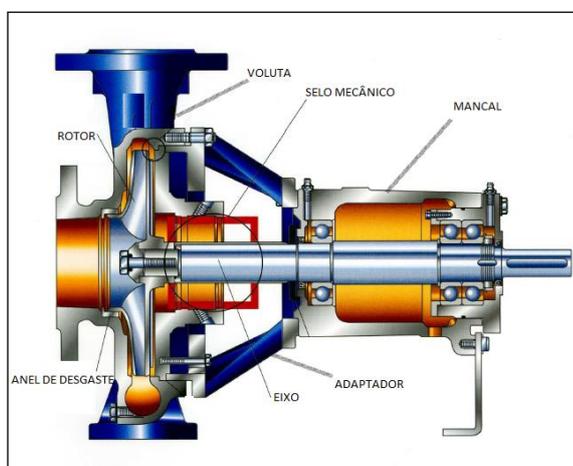


Figura 4.16: Principais componentes da bomba
Fonte: Scanpump, 2009



Figura 4.17: Bomba instalada
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.10: Características técnicas da Bomba Centrífuga

Tipo: Centrífuga horizontal, mono estágio, bi partida radialmente, apoiada pelos pés.	
Voluta, anel de desgaste, adaptador, tampa	ferro fundido ASTM A 48 CL30
Rotor 1	semi aberto em aço inoxidável SIS 2324, fixado ao eixo através de chave e parafuso, diâmetro 0,264 m, 5 aletas
Rotor 2	semi aberto em ferro fundido nodular ASTM A 48 CL 30, diâmetro 0,264 m, 5 aletas
Eixo	aço inox martensítico AISI 420
Flange de sucção/recalque	0,150 m e 0,125 m norma de furação ANSI 16.1
Mancal lubrificado a óleo	rolamentos de contato angular (axial) e rolos (radial)
Vedação do eixo	selo mecânico simples, com líquido de selagem da própria água bombeada, plano API 02

Fonte: Scanpump, 2009

4.3 INSTRUMENTOS PORTÁTEIS

BALANÇA ELETRÔNICA

A balança eletrônica é utilizada neste experimento para obter a massa do rotor da bomba, antes e depois do teste específico de erosão, com o propósito de determinar a taxa de redução de material durante operação com cavitação moderada, no intervalo de tempo estimado em duas etapas de 150 horas cada. A balança, figura 4.18 é do laboratório de engenharia mecânica da UNICAMP com características técnicas da tabela 4.11 e único instrumento localizado fora do local de instalação do experimento. Sua utilização ocorre somente em três condições:

- no início do teste de erosão, após demais etapas já realizadas, com o rotor de ferro fundido nodular, novo;
- após 150 h de operação com a tub. de sucção de 0,15 m de diâmetro;
- após mais 150 h de funcionamento com tubulação de sucção de 0,10 m de diâmetro, com objetivo de aumentar a velocidade e taxa de perda de massa.



Figura 4.18: Balança eletrônica
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.11: Características técnicas da Balança eletrônica

Balança eletrônica	
Marca	Adam
Modelo	KA15
Capacidade máxima	15.000 g
Precisão	+ - 0,5 g
Sensibilidade	0,1 g
Tempo de resposta	0,5 s

Fonte: Adam, 2014

ANALISADOR DE ENERGIA

O analisador de energia é conectado à saída do inversor de frequência, posicionado dentro do painel de controle do experimento, conforme figura 4.19, e executa as medições de potência em tempo real nas três fases de alimentação do motor e a média destas. Abaixo as características técnicas na tabela 4.12 do equipamento instalado.

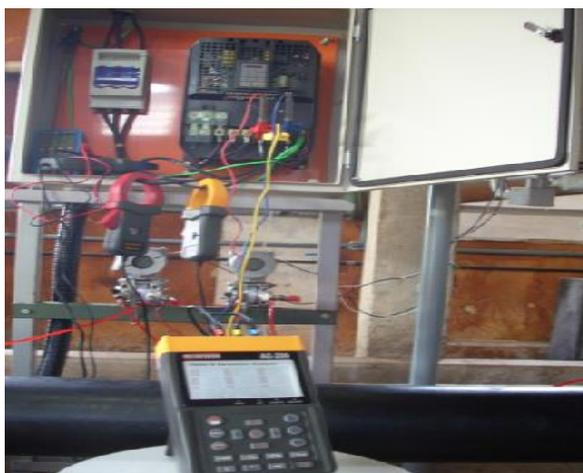


Figura 4.19: Analisador de energia e conexões
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.12: Características técnicas do Analisador de energia

Analisador de energia	
Marca	Instrutherm
Modelo	AE 200
Faixa de operação	5 w a 9.999 kW
Precisão	+ - 1,0%
Resolução	0,1 Kw
Tempo de amostra	0,1 s

Fonte: Instrutherm, 2014

DECIBELÍMETRO

O decibelímetro com microfone é fixado em um pedestal com altura regulável, figura 4.20, que permite a tomada de ruídos em várias posições da bomba. Este equipamento é utilizado também para mapear os sinais acústicos externos ao experimento e que eventualmente possam causar perturbação das medidas. As características técnicas do instrumento estão descritas na tabela 4.13, sendo a frequência de 500 Hz a selecionada dentro da escala para as medições. O suporte móvel foi instalado a 0,70 m de altura do piso e 0,10 m de distância da voluta, paralelo ao eixo da bomba.



Figura 4.20: Decibelímetro com suporte
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.13: Características técnicas do Decibelímetro

Decibelímetro	
Marca	Minipa
Modelo	MSL 1354
Faixa de operação	30 a 130 dB
Precisão	+ - 1 dB
Resposta da Frequência	20 Hz a 8 kHz
Temperatura de operação	-10 a + 50 °C

Fonte: Minipa, 2014

TERMÔMETRO DIGITAL

O termômetro digital da figura 4.21, é utilizado para monitoramento da temperatura da água do tanque superior, que pode apresentar mudanças discretas em função da recirculação de água no circuito fechado bem como influência das possíveis variações climáticas durante os eventos do experimento. As características do instrumento estão na tabela 4.14.



Figura 4.21: Termômetro digital no tanque superior
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.14: Características técnicas do Termômetro digital

Termômetro digital	
Marca	Soma
Faixa de operação	-25 a + 60 °C
Precisão	+ - 0,1 °C
Resolução	0,1 °C
Tempo de resposta	0,5 s
Sensor	cabo de imersão

Fonte: Soma, 2014

TERMÔMETRO INFRA VERMELHO

O termômetro infra vermelho é utilizado para medição da temperatura da superfície, no lado acoplado e oposto ao acionamento, em local determinado pela posição dos rolamentos no alojamento interior do mancal conforme fig. 4.22. As características técnicas do instrumento estão na tabela 4.15.



Figura 4.22: Medição com termômetro infravermelho
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.15: Características técnicas do Termômetro infravermelho

Termômetro infravermelho	
Marca	Icel
Modelo	TD 950
Faixa de operação	-20 a + 275 °C
Precisão	+ - 1 °C
Tempo de resposta	0,5 s
Temperatura de operação	0 a + 50 °C

Fonte: Icel, 2014

TERMÔMETRO DE MERCÚRIO

O termômetro de mercúrio instalado junto à coluna de sustentação do tanque superior, figura 4.23, realiza as medições da temperatura ambiente dos ensaios para acompanhamento de possíveis interferências na temperatura do mancal nas etapas de operação sem cavitação e com cavitação moderada. Características técnicas são descritas na tabela 4.16.



Figura 4.23: Termômetro de mercúrio
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.16: Características técnicas do Termômetro de mercúrio

Termômetro de mercúrio	
Marca	Western
Faixa de operação	0 – 40 °C
Corpo	vidro
Precisão	+ - 0,5 °C
Resolução	0,5 °C
Tempo de resposta	30 s

Fonte: Western, 2014

ANALISADOR DE VIBRAÇÃO

O analisador de vibração, figura 4.24, efetua medições nas etapas de operação sem cavitação e com cavitação moderada, nos pontos determinados no mancal, nas posições acoplado e oposto ao acionamento, na horizontal e vertical e na posição axial na voluta, com avaliação somente da velocidade em função da frequência. Características técnicas estão na tabela 4.17.

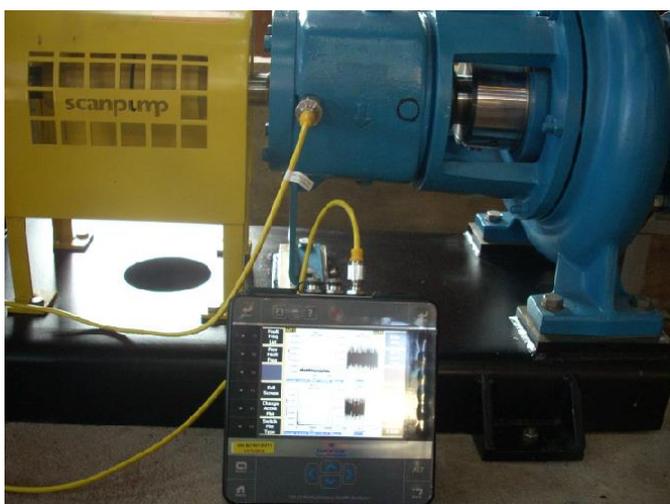


Figura 4.24: Analisador de vibração e acelerômetro no mancal
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.17: Características técnicas do Analisador de vibração

Analisador de vibração	
Marca	Emerson
Modelo	CSI 2130
Acelerômetro	triaxial
Faixa de frequência	1,2 a 10 kHz
Temperatura de operação	-10 a + 50 °C
Funções	Valores globais e análise de parâmetros

Fonte: Emerson, 2014

BARÔMETRO

O barômetro analógico, figura 4.25, instalado na coluna de sustentação do tanque superior, efetua as medições da pressão atmosférica para cálculo do NPSH, em intervalos determinados pela etapa do experimento. Suas características técnicas são mostradas na tabela 4.18.



Figura 4.25: Barômetro
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.18: Características técnicas do Barômetro

Barômetro	
Marca	Fischer
Modelo	102
Faixa	670 a 790 mmHg
Precisão	+ - 0,5 mmHg
Temperatura de operação	-5 a + 55 °C
Diâmetro do visor	0,13 m

Fonte: Fischer, 2014

OXÍMETRO

O Oxímetro é utilizado para medição da quantidade de oxigênio dissolvido (OD) na água do tanque superior, em dois eventos, no teste sem cavitação e com cavitação moderada. O aparelho é instalado na borda do tanque com cabo do sensor conforme figura 4.26. Esta medição serve de base somente para estimativa da quantidade de ar dissolvida na água durante o experimento. Características do instrumento estão na tabela 4.19.



Figura 4.26: Oxímetro
Fonte: Schröder, 2015

Tabela 4.19: Características técnicas do Oxímetro

Oxímetro	
Marca	Alfakit
Modelo	AT 160
Faixa OD	0 a 19,9 mg/l
Precisão	+ - 2%
Temperatura de operação	0 a 50 °C
Tempo de estabilização	60 s

Fonte: Alfakit, 2014

CAPÍTULO 5

MÉTODO

5.1 ROTEIRO GERAL E SIGNIFICADOS DOS TERMOS

Os ensaios com a bomba centrífuga são realizados conforme a etapa respectiva:

1-NPSHr;

2-Estabilização da temperatura no mancal com a bomba operando sem cavitação;

3-Operação regular da bomba;

4-Characterização dos níveis de cavitação, incipiente, crítica, moderada e desenvolvida;

5-Estabilização da temperatura no mancal com a bomba operando com cavitação moderada;

6-Operação da bomba com cavitação moderada;

7-Ensaio da erosão do rotor.

Para todos os parâmetros serão apresentados resultados em valores absolutos e relativos à condição regular de operação da bomba e com o funcionamento com cavitação moderada. Ambas as referências poderão ser aplicadas em bombas centrífugas radiais de pequenas e médias vazões (até aproximadamente $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $360 \text{ m}^3/\text{h}$) com características geométrica e hidrodinâmicas semelhantes, ou com a mesma magnitude da N_s . Em cada etapa, as medições são repetidas três vezes, à exceção da vibração, obtendo-se uma média

aritmética dos valores medidos. Estes valores médios são base para os cálculos. Para erosão é previsto um teste específico de 150 horas com tubulação de sucção de 0,15m de diâmetro e outro com tubulação de 0,10 m de diâmetro, com valores de perda de massa do rotor para comparação com outros experimentos de mesmo material, operando em condições de cavitação.

Em todas as etapas as vazões selecionadas serão de 0,0586, 0,0619, 0,0653, 0,0686, 0,0719 e 0,0753 m³/s, correspondentes a uma faixa de 90 a 120% do ponto de melhor eficiência da bomba e considerados típicos para ocorrência de cavitação, desde que as condições de sucção as favoreçam. Todas as condições serão geradas pelo fechamento da válvula de controle de sucção (na operação com cavitação moderada) ou de recalque (na operação regular). Para os cálculos das grandezas físicas registradas no experimento, são utilizados as equações (23) a (29):

A equação 23 representa o número de REYNOLDS (1883);

$$Re = v * \frac{D}{\nu} \quad (23)$$

A equação 24 representa o fator de atrito de modo explícito, de acordo com SWAMEE - JAIN(1976);

$$f = 0,0055 * (1 + (20.000 * (\frac{k}{D}) + \frac{10^6}{Re})^{0,33}) \quad (24)$$

A equação 25 representa a perda de carga contínua conforme DARCY-WEISBACH (1857);

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (25)$$

A equação 26 representa a perda de carga localizada conforme LENCASTRE (1972)

$$hfl = k * \frac{v^2}{2g} \quad (26)$$

A equação 27 representa a altura de elevação de sucção conforme GULICH (2008)

$$Hs = \frac{Pfs}{\gamma} - hfs + \frac{v^2}{2g} \quad (27)$$

Obs.: A perda de carga no trecho de sucção está a jusante do transdutor de pressão e portanto é necessária sua inclusão na expressão.

A equação 28 representa a altura de elevação de recalque conforme GULICH (2008)

$$Hr = \frac{Pfr}{\gamma} + hfr + \frac{v^2}{2g} \quad (28)$$

Obs.: A perda de carga na curva de recalque está a montante do transdutor de pressão e portanto é necessária sua inclusão na expressão.

A equação 29 representa a altura de elevação total conforme GULICH (2008)

$$Ht = Hr - Hs \quad (29)$$

As medições de grandezas elétricas como potência, hidráulicas como pressões e vazões, mecânicas como sinal sonoro, termodinâmicas como temperaturas além de cálculos para composição de outros termos como altura de elevação total, áreas, energia cinética, fator de Thoma, $NPSH_d$, perdas de carga e registro das medidas fixas como comprimento e diâmetro da tubulação, de constantes física como rugosidade e coeficiente de perda de carga localizada são registradas no modelo ilustrado abaixo, seccionado longitudinalmente:

Média.	D_s m	L m	A m^2	Q m^3/h	Q m^3/s	v_s m/s	$v_s^2/2g$ kPa	Re	k mm	k/D
f	hfs kPa	Pfs kPa	Hs kPa	Pa kPa	Pv kPa	$NPSH_d$ kPa	$NPSH_r$ kPa	$\Delta NPSH$ %	D_r m	Pfr kPa
v_r m/s	$v_r^2/2g$ kPa	kc	hfr C90° kPa	hg kPa	Hr kPa	Ht kPa	ΔHt %	Thoma	Ruído dB	Pc kW
Rend. %	TLA °C	TLOA °C	Vib. Axial mm/s	Vib. 3HV mm/s	Vib. 3VV mm/s	Vib. 4HV mm/s	Vib. 4VV mm/s	T H ₂ O °C	T amb. °C	Carac.

As explicações sobre o significado dos termos utilizados e outras informações estão detalhados a seguir:

1) Média - Média aritmética de valores das grandezas para alguns ensaios das etapas

2) D_s - Diâmetro de sucção da tubulação, 0,15 m para todos os ensaios, e 0,10 m para o segundo teste de erosão do rotor.

3) L - comprimento do tubo de sucção para cálculo de perda de carga contínua, 1,20 m para todos os ensaios, e 1,70 m para o segundo teste de erosão do rotor com tubulação de 0,10 m de diâmetro.

4) A - Área da seção do tubo de sucção

5) Q - Vazão em m^3/h medida no instrumento eletromagnético

6) Q - Vazão em m^3/s

7) v_s - Velocidade na tubulação de sucção

8) $v_s^2/2g$ - Energia cinética no flange de sucção

9) Re - Número de Reynolds calculado com viscosidade cinemática da água de $\nu=0,92 \cdot 10^{-6}$

10) k - Rugosidade da tubulação de aço carbono estimada em 0,10 mm

11) k/D - Rugosidade relativa da tubulação de aço carbono

12) f - Fator de atrito calculado pela equação explícita de MOODY(1944)

13) h_{fs} - Perda de carga contínua calculada pela equação de DARCY - WEISBACH (1857) na sucção

14) P_{fs} - Pressão de sucção medida no transdutor

15) H_s - Altura de elevação de sucção

16) P_a - Pressão atmosférica medida no barômetro

17) P_v - Pressão de vapor da água

18) $NPSH_d$ - NPSH Disponível

19) $NPSH_r$ - NPSH Requerido

20) $\Delta NPSH$ - Diferença entre o disponível e requerido em valor absoluto e relativo (%)

21) D_r - Diâmetro da tubulação de recalque, 0,125 m para todos os ensaios

22) P_{fr} - Pressão de recalque medida no transdutor

23) v_r - Velocidade na tubulação de recalque

24) $v_r^2/2g$ - Energia cinética no flange de recalque

25) K_c - Coeficiente de perda de carga para curva de recalque, estimado em 0,4.

- 26) hfr C90° - Perda de carga localizada na curva de 90° graus de recalque, instalada a montante do transdutor, calculada pela equação de LENCASTRE (1972)
- 27) hg - Altura geométrica de instalação do transdutor em relação ao centro da bomba, de 0,7 m
- 28) Hr - Altura de elevação de recalque
- 29) Ht - Altura de elevação total
- 30) ΔH_t - Diferença entre a altura de elevação referenciada e medida
- 31) Thoma - Valor do coeficiente de Thoma
- 32) Ruído - Nível de ruído em dB medido no decibelímetro
- 33) Pc - Potência consumida medida no analisador de energia
- 34) Rend. - Rendimento calculado
- 35) TLA - Temperatura no mancal no lado acoplado
- 36) TLOA - Temperatura no mancal no lado oposto ao acoplamento
- 37) Vib. Axial - Nível de vibração axial na posição da voluta paralela ao eixo, valor em velocidade
- 38) Vib. 3HV - Nível de vibração no lado acoplado, posição horizontal do acelerômetro, valor em velocidade
- 39) Vib. 3VV - Nível de vibração no lado acoplado, posição vertical do acelerômetro, valor em velocidade
- 40) Vib. 4HV - Nível de vibração no lado oposto ao acoplado, posição horizontal do acelerômetro, valor em velocidade
- 41) Vib. 4VV - Nível de vibração no lado oposto ao acoplado, posição vertical do acelerômetro, valor em velocidade
- 42) T H₂O - Temperatura da água medida no tanque superior
- 43) T_{amb.} - Temperatura do laboratório medida durante o ensaio
- 44) Carac. - Caracterização do nível de funcionamento da bomba.

5.2 DESCRIÇÃO DA EXECUÇÃO DAS MEDIÇÕES

As medições dos parâmetros são executadas conforme sequencia, a saber:

- Potência consumida: Medição da potência que equivale a média de valores das três fases de alimentação R,S,T pelo analisador de energia conectado à saída do inversor de frequência. O próprio aparelho fornece no visor a média calculada. A tensão da rede trifásica do laboratório também é monitorada a cada experimento de modo a garantir que não ajam variações significativas nos valores de entrada de energia que possa influenciar nas medições das etapas. São realizadas três medições a cada 30 minutos para a respectiva vazão na determinada etapa.

- Ruído: Medição sonora através do decibelímetro instalado no suporte a 0,70 m de altura do piso e a 0,10 m da voluta na linha de centro da bomba. Outros posicionamentos do suporte com o decibelímetro foram testados durante o experimento, contudo apresentaram diferenças inexpressivas, da ordem de somente um dB, o que levou a manter como padrão a localização ilustrada na figura 4.20. Durante os ensaios também foram mapeados os níveis acústicos de outras fontes como ventilador de refrigeração do motor e descarga da água no sifão de retorno. A redução destas fontes por obstáculos mecânicos temporariamente não impactou de forma significativa nos valores de ruídos gerados pela operação da bomba durante os experimentos. O laboratório por localizar-se numa ilha da faculdade recebe pequenas interferências de sons originados por outras fontes como veicular, além de que durante os ensaios foram fechados janelas e portas quando aplicável. São realizadas três medições a cada 30 minutos para a respectiva vazão na determinada etapa

- Temperatura no mancal: A medição com o termômetro infravermelho foi executada no inícios dos testes e depois a cada 30 minutos de operação nos pontos assinalados com um círculo no mancal da bomba no lado acoplado e oposto ao do acionamento. Estes pontos correspondem a melhor aproximação do alojamento dos rolamentos dentro da caixa do mancal. É realizado paralelamente medições da temperatura ambiente para comparações de possíveis interferências

nas temperaturas das superfícies do mancal. Para cada uma das vazões de teste são previstos tempos de resfriamento natural ou forçada do mancal. O tempo de resfriamento variou conforme a disponibilidade da realização, recursos auxiliares como o uso de água externa no corpo do mancal e da temperatura ambiente, sendo que o valor máximo para reinício dos testes foi determinada como 25 °C. São realizadas três medições a cada 30 minutos para a respectiva vazão na determinada etapa

- Vibração: O acelerômetro é fixado nas posições horizontais e verticais do mancal, do lado acoplado e oposto ao acionamento, além da medição axial na voluta da bomba do lado oposto ao flange de sucção. A medição é realizada somente duas vezes após 30 segundos de coleta do sinal para cada vazão selecionada, além de uma verificação adicional na vazão do medidor eletromagnético de modo a garantir semelhanças operacionais nos pontos tomados.

5.3 ETAPA DO NPSH_r

Neste ensaio é realizado medições com objetivo de obter o NPSH_r das seis vazões selecionadas e mantidas constante durante os eventos, conforme recomendações do HI, que estipula como sendo o valor do NPSH_r àquele que corresponde a uma queda de 3% na altura de elevação desenvolvida pela bomba quando da redução gradativa do NPSH_d. Apesar de o fabricante disponibilizar o valor do NPSH_r na curva característica, neste trabalho será utilizado somente os valores encontrados no teste com rotação do motor de 1740 rpm, rotação esta nominal do motor de corrente alternada conforme placa de identificação e fixada pelo inversor de frequência durante os ensaios das etapas. O valor do NPSH_r disponibilizado pelo fabricante será usado somente como referência para ajustes iniciais do ensaio. Os seguintes parâmetros serão avaliados conjuntamente: Potência consumida, Rendimento e Ruído. O roteiro para obtenção do NPSH_r é descrito a seguir:

1-Conferência do nível de água do tanque superior por régua, cujo valor do nível deve ser superior a 0,6 m e inferior a 0,9 m;

- 2-Abertura total da válvula de controle da sucção;
- 3-Procedimento de escorva da bomba;
- 4- Fechamento da válvula de recalque;
- 5- Acionamento da bomba através do inversor de frequência com rampa lenta (aproximadamente 30 s) até a velocidade de 1740 rpm;
- 6- Abertura da válvula de recalque em cada uma das seis vazões estabelecidas e conferida no medidor de vazão eletromagnético. O valor no visor do medidor deve estar no intervalo de $\pm 0,000278 \text{ m}^3/\text{s}$ da vazão selecionada;
- 7- Medições dos parâmetros e grandezas físicas desta etapa. Estas medições são realizadas após aproximadamente 30 s de estabilização do fluxo no ponto considerado;
- 8- Redução da pressão de sucção em aproximadamente 5 kPa pelo fechamento da válvula de sucção e confirmação pelo transdutor de pressão;
- 9- Repetição dos procedimentos 6 a 8.

O limite de redução de pressão corresponde à queda da altura de elevação da bomba em aproximadamente 3% e a avaliação do respectivo nível de ruído nesta condição. Nesta etapa é realizado uma única medição do valor de pH da água de teste, no tanque superior, não sendo esperado quaisquer alterações posteriores por tratar-se de um circuito fechado sem contaminação externa.

5.4 ETAPA DA ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA NO MANCAL COM A BOMBA OPERANDO SEM CAVITAÇÃO

Este ensaio é realizado para determinar o tempo necessário para que a temperatura no mancal estabilize ou seja, não sofra elevação significativa apesar de continuar operando. Este período será considerado nas medições da etapa seguinte. Devido o tempo deste experimento, estimado em mais 8 horas para cada ponto de operação, será efetuado somente o teste para a vazão de $0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo este resultado extrapolado para as demais vazões do projeto na condição de operação

sem cavitação. Nesta etapa não será registrado outras grandezas ou parâmetros, exceto a temperatura no mancal no lado acoplado e oposto ao do acionamento e respectivo tempo

5.5 ETAPA DA OPERAÇÃO REGULAR DA BOMBA

Neste ensaio são realizados medições com objetivo de obter os cinco parâmetros de correlação simultaneamente com a bomba em condições regulares de funcionamento, com $NPSH_d$ suficiente para operar sem cavitação. É realizado também um teste específico para o desempenho. Apesar de o fabricante disponibilizar a curva característica, neste trabalho será traçada a curva com os valores de teste de desempenho do laboratório, com seis pontos, BEP, mais dois à esquerda e três à direita deste .

A curva original do fabricante será comparada com aquela extraída dos testes. Serão executado seis medições de shutt-off, com a válvula de controle de recalque fechada, para determinação da altura máxima desenvolvida pela bomba. Os seguintes parâmetros serão avaliados conjuntamente: Potência consumida, Rendimento , Ruído, Temperatura no mancal e Vibração. O roteiro para obtenção das condições sem cavitação é descrito a seguir:

1-Conferência do nível de água do tanque superior por régua , cujo valor do nível deve ser superior a 0,6 m e inferior a 0,9 m;

2-Abertura total da válvula de controle da sucção;

3-Procedimento de escorva da bomba;

4- Fechamento da válvula de recalque;

5-Acionamento da bomba através do inversor de frequência com rampa lenta(aproximadamente 30 s) até a velocidade de 1740 rpm;

6- Abertura da válvula de recalque em cada uma das seis vazões selecionadas, e conferida no medidor de vazão eletromagnético. O valor no visor do medidor deve estar no intervalo de $\pm 0,000278 \text{ m}^3/\text{s}$ da vazão selecionada;

7- Medições dos parâmetros e grandezas físicas desta etapa. Estas medições são realizadas após aproximadamente 30 s de estabilização do fluxo no ponto considerado, à exceção do shutt-off que é executado imediatamente após o fechamento da válvula de recalque;

8- Repetição dos procedimentos 6 e 7.

Nesta etapa é efetuada uma medição do oxigênio dissolvido (OD) na água do tanque superior, quando do teste da vazão de $0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.6 ETAPA DA CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS DE CAVITAÇÃO INCIPIENTE, CRÍTICA, MODERADA E DESENVOLVIDA

Neste ensaio são realizados medições com objetivo de obter uma classificação da cavitação em níveis mais severos. Para a cavitação incipiente a base é a queda de 3% na altura de elevação total da bomba e a observação do aumento do nível de ruído nesta condição. De modo similar será procedido para classificar os níveis mais intensos da cavitação, contudo com maiores reduções de pressões na sucção através do fechamento da válvula de controle. Estes dois marcadores, a queda na altura de elevação e nível de ruídos, serão determinados nesta etapa somente para classificar os diferentes níveis da cavitação, não correspondendo ao objetivo final da pesquisa que é a correlação da cavitação moderada através de parâmetros de medições reproduzíveis em campo.

Os seguintes parâmetros serão avaliados conjuntamente: Potência consumida, Rendimento, Ruído, Temperatura no mancal e Vibração.

O roteiro para obtenção da caracterização é semelhante ao da etapa de $NPSH_r$, contudo com um fechamento maior da válvula de controle de sucção para alcançar menores pressões que determinam os níveis mais severos da cavitação.

5.7 ETAPA DA ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA NO MANCAL COM A BOMBA OPERANDO COM CAVITAÇÃO MODERADA

Este ensaio é realizado para determinar o tempo necessário para que a temperatura no mancal estabilize ou seja, não sofra mais elevação significativa apesar de continuar operando com cavitação moderada já determinada na etapa anterior. Este período será considerado nas medições da etapa seguinte. Devido o tempo deste experimento, estimado em mais de 8 horas para cada ponto de operação, será efetuado somente o teste para a vazão de $0,0719 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo este resultado adotado para as demais vazões do projeto. Nesta etapa não será registrado outras grandezas ou parâmetros, exceto a temperatura no mancal no lado acoplado e oposto ao do acionamento e respectivo tempo.

5.8 ETAPA DA OPERAÇÃO DA BOMBA COM CAVITAÇÃO MODERADA

Neste ensaio são realizadas medições com objetivo de obter os cinco parâmetros de correlação simultaneamente, com a bomba em condições de cavitação moderada, determinada pelos marcadores da etapa de caracterização. Os seguintes parâmetros serão avaliados conjuntamente: Potência consumida, Rendimento, Ruído, Temperatura no mancal e Vibração. O roteiro para obtenção dos parâmetros com cavitação moderada é semelhante à etapa de operação normal, contudo com pressão negativa de sucção determinada na etapa de caracterização, durante todo o ensaio. Nesta etapa também é efetuada uma medição do oxigênio dissolvido (OD) na água do tanque superior, quando do teste da vazão de $0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.9 ETAPA DA EROSÃO DO ROTOR

Esta etapa é executada isoladamente em relação às demais, com a substituição do material do rotor da bomba, originalmente em aço inoxidável. No teste de erosão o material usado é de ferro fundido nodular (ASTM A48 CL30) mais suscetível de desgaste pela ocorrência do fenômeno. Durante este ensaio a bomba

funciona somente com cavitação moderada, determinada na etapa de caracterização, durante 150 horas, na primeira fase com uma tubulação de sucção de 0,15 m de diâmetro e depois com uma tubulação de 0,10 m de diâmetro, o que corresponde a uma velocidade maior da água na aspiração, necessária para comparar a perda de massa em duas condições distintas. Os seguintes parâmetros serão avaliados conjuntamente: Potência consumida, Rendimento e Ruído. A erosão será determinada somente após o final de cada fase de teste, com desmontagem e pesagem do rotor.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS

6.1 NPSH_R

Foram determinados NPSH_r para as seis vazões do projeto.

Os indicadores para o NPSH_r foram a redução da altura de elevação de 3% em relação à primeira medição em condição regular, bem como o aumento do nível de ruídos conforme a vazão. As tabelas 6.1 a 6.6 das respectivas vazões, mostram os valores das medições, os cálculos das grandezas obtidas indiretamente e após a última tabela, os comentários sobre estes resultados.

Tabela 6.1: NPSH_r para Q = 0,0586 m³/s

Q m ³ /s	Pfs kPa	NPSH _d kPa	NPSH _r kPa	ΔNPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0588	-1,9	95,1	33,8	61,3	232,0	252,2	0,0	0,134	75,1	18,5	80,1	Normal
0,0586	-5,6	91,4	33,8	57,6	228,1	251,9	-0,1	0,134	75,1	18,5	79,8	Normal
0,0588	-10,1	86,9	33,8	53,1	223,0	251,4	-0,3	0,135	75,2	18,5	79,9	Normal
0,0586	-14,9	82,1	33,8	48,3	218,1	251,2	-0,4	0,135	75,4	18,5	79,6	Normal
0,0586	-20,9	76,1	33,8	42,3	211,6	250,7	-0,6	0,135	75,5	18,5	79,4	Normal
0,0586	-25,2	71,8	33,8	38,0	206,6	250,0	-0,9	0,135	75,7	18,5	79,2	Normal
0,0587	-31,3	65,5	33,8	31,7	199,5	249,0	-1,2	0,136	75,9	18,6	78,6	Normal
0,0587	-35,5	61,3	33,8	27,5	194,7	248,4	-1,5	0,136	76,1	18,5	78,8	Normal
0,0588	-40,8	56,0	33,8	22,2	188,7	247,7	-1,7	0,137	76,4	18,7	77,8	Normal
0,0586	-45,4	51,4	33,8	17,6	184,1	247,7	-1,8	0,137	76,9	18,7	77,6	Normal
0,0588	-50,1	46,7	33,8	12,9	179,0	247,4	-1,9	0,137	77,7	18,7	77,8	Normal
0,0587	-55,2	41,6	33,8	7,8	173,3	246,7	-2,1	0,137	79,0	19,0	76,2	Ruído
0,0588	-60,3	36,5	33,8	2,7	166,5	245,1	-2,5	0,138	80,2	19,2	75,1	Ruído
0,0588	-63,0	33,8	33,8	0,0	162,9	244,2	-3,2	0,139	81,6	19,3	74,5	Cav Incp.

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.2: NPSH_r para Q = 0,0619 m³/s

Q m ³ /s	Pfs kPa	NPSH _d kPa	NPSH _r kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0620	-8,7	90,0	34,4	55,5	218,0	246,2	0,0	0,140	76,6	19,3	79,1	Normal
0,0619	-10,4	88,3	34,4	53,8	215,9	245,8	-0,2	0,140	76,6	19,3	78,9	Normal
0,0620	-15,2	83,5	34,4	49,0	211,1	245,8	-0,2	0,140	76,8	19,3	78,9	Normal
0,0619	-20,8	77,9	34,4	43,4	204,9	245,2	-0,4	0,140	77,0	19,3	78,7	Normal
0,0620	-25,2	73,5	34,4	39,0	200,4	245,1	-0,4	0,140	77,1	19,3	78,7	Normal
0,0621	-30,3	68,4	34,4	33,9	194,8	244,7	-0,6	0,141	77,4	19,4	78,3	Normal
0,0620	-35,6	62,1	34,4	27,6	188,8	243,9	-0,9	0,141	77,8	19,4	77,9	Normal
0,0621	-40,0	57,7	34,4	23,3	183,6	243,2	-1,2	0,142	78,5	19,4	77,8	Normal
0,0620	-46,8	50,9	34,4	16,4	176,2	242,5	-1,5	0,142	79,8	19,4	77,5	Normal
0,0619	-51,9	45,8	34,4	11,3	170,1	241,5	-1,9	0,143	80,7	19,5	76,7	Normal
0,0620	-54,0	43,7	34,4	9,2	166,8	240,3	-2,2	0,143	81,3	19,5	76,4	Ruído
0,0620	-59,5	38,2	34,4	3,7	161,3	240,3	-2,4	0,143	82,3	19,5	76,4	Ruído
0,0619	-63,2	34,4	34,4	0,0	156,1	238,8	-3,0	0,144	83,9	19,7	75,1	Cav incip.

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.3: NPSH_r para Q = 0,0653 m³/s

Q m ³ /s	Pfs kPa	NPSH _d kPa	NPSH _r kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0654	-8,6	89,1	35,2	53,9	205,3	234,8	0,0	0,150	75,8	19,6	78,2	Normal
0,0655	-10,4	87,3	35,2	52,1	203,1	234,4	-0,2	0,150	75,9	19,6	78,1	Normal
0,0653	-15,2	82,5	35,2	47,3	198,0	234,1	-0,3	0,150	76,1	19,7	77,6	Normal
0,0654	-20,8	76,9	35,2	41,7	191,8	233,5	-0,6	0,151	76,2	19,7	77,4	Normal
0,0653	-25,2	72,5	35,2	37,3	187,2	233,3	-0,6	0,151	76,6	19,8	76,9	Normal
0,0655	-30,3	67,4	35,2	32,2	181,7	232,9	-0,8	0,151	76,6	19,9	76,4	Normal
0,0653	-35,6	62,3	35,2	27,1	175,9	232,4	-1,0	0,152	77,0	20,0	75,8	Normal
0,0655	-40,0	57,9	35,2	22,7	171,3	232,2	-1,1	0,152	77,5	20,1	75,4	Normal
0,0653	-46,8	51,1	35,2	15,9	163,6	231,3	-1,5	0,152	78,4	20,1	75,1	Normal
0,0654	-51,5	46,4	35,2	11,2	157,9	230,3	-1,9	0,153	79,6	20,3	74,1	Normal
0,0654	-56,3	41,6	35,2	6,4	151,8	229,0	-2,3	0,154	80,8	20,3	73,6	Ruído
0,0653	-59,8	38,1	35,2	2,9	148,0	228,7	-2,6	0,154	81,8	20,4	73,2	Ruído
0,0653	-62,7	35,2	35,2	0,0	144,2	227,8	-3,0	0,155	83,1	20,6	72,2	Cav. incip.

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.4: NPSH_r para Q = 0,0686 m³/s

Q m ³ /s	Pfs kPa	NPSH _d kPa	NPSH _r kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0687	-11,9	88,0	35,4	52,6	185,1	219,4	0,0	0,161	77,5	20,1	75,0	Normal
0,0686	-15,5	84,3	35,4	49,0	181,4	219,3	-0,1	0,161	77,9	20,1	74,9	Normal
0,0688	-20,3	79,6	35,4	44,2	176,0	218,8	-0,3	0,162	78,4	20,2	74,5	Normal
0,0686	-26,4	73,4	35,4	38,1	169,0	217,8	-0,7	0,162	78,8	20,2	74,0	Normal
0,0688	-31,2	68,7	35,4	33,3	164,0	217,6	-0,8	0,163	79,0	20,2	74,1	Normal
0,0687	-35,2	64,7	35,4	29,3	159,0	216,6	-1,3	0,163	79,4	20,3	73,3	Normal
0,0688	-39,5	60,6	35,4	25,2	153,8	215,7	-1,7	0,164	79,9	20,4	72,7	Normal
0,0687	-45,6	54,4	35,4	19,1	147,4	215,4	-1,8	0,164	80,6	20,4	72,5	Normal
0,0687	-51,3	48,8	35,4	13,4	141,6	215,3	-1,9	0,164	81,6	20,5	72,1	Normal
0,0686	-56,6	43,4	35,4	8,1	135,4	214,4	-2,0	0,165	81,9	20,6	71,4	Normal
0,0687	-59,5	40,6	35,4	5,2	132,4	214,3	-2,0	0,165	83,4	20,8	70,8	Ruído
0,0688	-64,0	36,1	35,4	0,7	127,0	213,4	-2,7	0,166	83,4	20,8	70,5	Ruído
0,0686	-64,7	35,4	35,4	0,0	125,7	212,8	-3,0	0,166	84,8	20,9	69,9	Cav. Incip.

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.5: NPSH_r para Q = 0,0719 m³/s

Q m ³ /s	Pfs kPa	NPSH _d kPa	NPSH _r kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0720	-16,1	84,6	38,5	46,1	167,1	207,1	0,0	0,186	78,8	20,2	73,8	Normal
0,0721	-20,4	80,3	38,5	41,8	162,5	206,9	-0,1	0,186	79,3	20,4	73,2	Normal
0,0719	-25,4	75,3	38,5	36,8	157,4	206,7	-0,2	0,186	79,6	20,4	72,9	Normal
0,0719	-30,4	70,3	38,5	31,8	152,0	206,3	-0,4	0,186	80,2	20,4	72,8	Normal
0,0721	-35,6	65,1	38,5	26,6	146,7	206,3	-0,4	0,187	80,7	20,5	72,5	Normal
0,0719	-41,6	59,1	38,5	20,6	140,4	205,9	-0,6	0,187	81,5	20,7	71,6	Normal
0,0720	-46,5	54,1	38,5	15,6	135,0	205,5	-0,8	0,187	82,3	20,8	71,1	Normal
0,0719	-50,9	49,7	38,5	11,2	129,5	204,3	-1,4	0,188	83,3	20,9	70,3	Normal
0,0721	-55,7	44,9	38,5	6,4	123,0	202,7	-1,8	0,190	83,8	21,0	69,6	Normal
0,0719	-59,8	40,8	38,5	2,3	118,1	201,8	-2,2	0,191	85,4	21,1	68,8	Ruído
0,0719	-61,7	38,9	38,5	0,4	116,1	201,7	-2,2	0,191	84,8	21,2	68,4	Ruído
0,0721	-62,1	38,5	38,5	0,0	114,8	200,9	-3,0	0,191	86,1	21,4	67,7	Cav. incip.

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.6: NPSH_r para Q = 0,0753 m³/s

Q m ³ /s	Pfs kPa	NPSH _d kPa	NPSH _r kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0753	-20,6	80,7	38,9	41,8	145,1	191,2	0,0	0,204	80,3	20,8	69,2	Normal
0,0754	-24,3	77,1	38,9	38,1	141,0	190,9	-0,2	0,204	80,7	20,8	69,2	Normal
0,0754	-29,7	71,7	38,9	32,7	135,5	190,8	-0,2	0,204	81,2	20,9	68,8	Normal
0,0753	-34,5	66,9	38,9	27,9	130,1	190,2	-0,6	0,205	81,8	20,9	68,5	Normal
0,0753	-39,1	62,3	38,9	23,3	125,0	189,7	-0,8	0,205	82,3	21,0	68,0	Normal
0,0753	-44,6	56,8	38,9	17,8	119,1	189,3	-1,0	0,206	83,2	21,1	67,6	Normal
0,0754	-51,9	49,5	38,9	10,5	111,6	189,1	-1,1	0,206	84,6	21,6	66,0	Normal
0,0754	-55,6	45,8	38,9	6,8	106,0	187,2	-1,6	0,208	85,4	21,7	65,0	Normal
0,0753	-59,4	42,0	38,9	3,0	101,4	186,4	-2,0	0,209	86,7	21,8	64,4	Ruido
0,0753	-61,2	40,1	38,9	1,2	99,0	185,7	-2,3	0,210	86,0	21,9	63,9	Ruido
0,0755	-62,5	38,9	38,9	0,0	97,3	185,5	-3,0	0,210	87,2	22,4	62,5	Cav. incip.

Fonte: Schröder, 2015

Conforme mencionado em 5.3 os valores de NPSH_r foram determinados nestes ensaios, apesar do fabricante disponibilizar informação na folha de dados para a vazão específica de 0,0650 m³/s o valor de 30,4 kPa. Esta referência é utilizada para início dos testes, contudo o preenchimento da coluna do NPSH_r é efetuado após a última linha do teste, quando determinado a queda na altura de elevação total de 3%. Este último valor corresponde ao adotado nas análises seguintes. A diferença de superior de 4,5 kPa entre o valor do ensaio e a informação do fabricante manteve-se para todas as vazões.

As vazões medidas mantiveram-se dentro da faixa de tolerância de + - 0,000278 m³/s durante toda realização do teste.

As pressões foram reduzidas através do fechamento da válvula de controle de sucção em intervalos que variaram de 3 a 7 kPa, à exceção do primeiro e último ajuste. A pressão de recalque final do teste correspondeu a uma queda de 3,0 a 3,2% na altura de elevação desenvolvida pela bomba quando comparada com a primeira medição. O nível de ruído com a cavitação incipiente ficou de 6 a 7 dB acima da condição regular da bomba ou inicial do teste.

A pressão de sucção variou entre -62,1 a -64,7 kPa, devido a pequenas diferenças na pressão atmosférica, temperatura ambiente e da água bombeada durante os ensaios. Conforme as tabelas 6.1 a 6.6, a potência consumida e os ruídos cresceram proporcionalmente à insuficiência de energia na sucção, ou seja com a redução do $NPSH_d$ e aumento do fator de Thoma, bem como houve o decréscimo no rendimento hidráulico para todas as vazões conforme o desenvolvimento do teste.

O resumo do ensaio de $NPSH_r$ é ilustrado na figura 6.1.

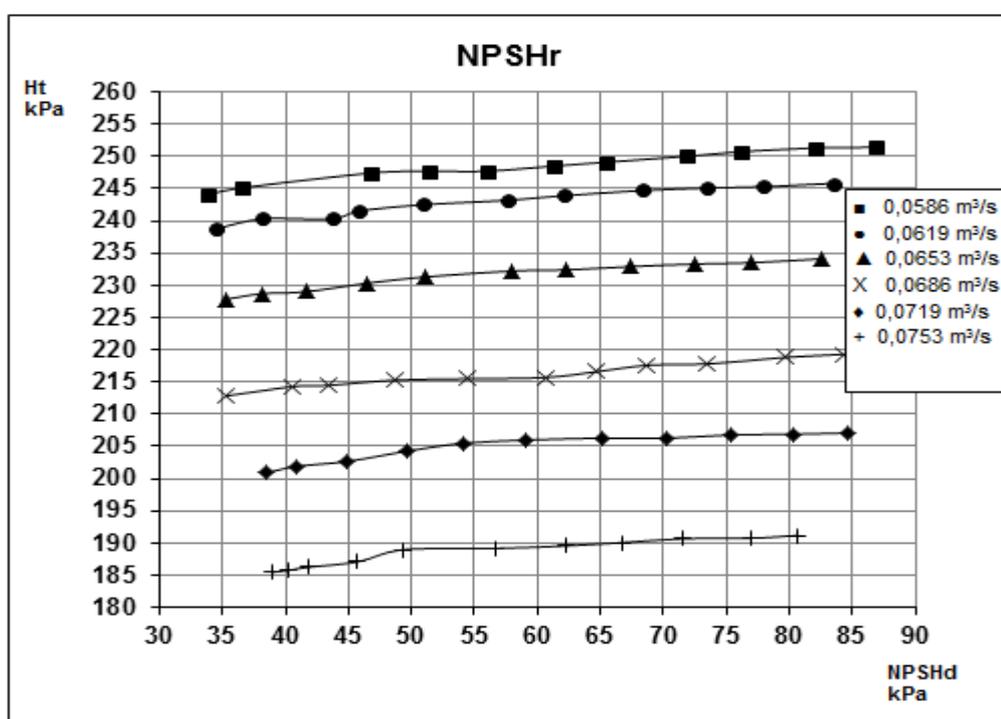


Figura 6.1 – $NPSH_r$ para todas as vazões

Fonte: Schröder, 2015

Os valores reais obtidos no experimento são compatíveis com o cálculo teórico da equação (6) de PFLEIDERER (1979), não apresentando entretanto coerência com a equação (5) da estimativa de YEDIDAH (1996).

Os valores mostram curvas com poucos pontos assimétricos como por exemplo as últimas medições do teste de $NPSH_r$ da vazão de $0,0753 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo em geral a redução da carga de forma suave mesmo tratando-se de uma condição com tendência à instabilidade hidrodinâmica. A redução gradual das curvas antes da ocorrência da cavitação incipiente pode ser devida ao aumento da turbulência na

sucção da bomba causada pelo posicionamento da válvula de sucção. Valores obtidos neste ensaio serão utilizados nos gráficos de tendências dos parâmetros de potência consumida, rendimento e ruídos em conjunto com os outros resultados calculados do fator de Thoma e $\Delta NPSH$.

Conforme descrito no método, no final deste ensaio de NPSH_r foi realizado uma única medição do pH da água do tanque superior, usado no experimento, conforme medidor da figura 8.2 e cujo resultado no visor de 7,74 está de acordo com os padrões de potabilidade da portaria 1469 do Ministério da Saúde de 29 de Dezembro de 2000: pH de 6,5 a 8,5 na temperatura de 25°C. A água utilizada é limpa, não potável, contudo obedece ao padrão mencionado.



Figura 6.2: Medição do pH da água

Fonte: Schröder, 2015

6.2 OPERAÇÃO REGULAR DA BOMBA

Este ensaio foi realizado em condições regulares de operação, nas seis vazões do projeto. Os resultados apresentaram pequenas diferenças quando comparado ao desempenho da curva característica original do fabricante, causada provavelmente pela variação na configuração hidráulica da instalação do experimento e do laboratório de teste do fabricante.

Para os quatro parâmetros de correlação, potência consumida, rendimento, ruído e temperatura no mancal foram obtidas as médias aritméticas de três medições a cada 30 minutos do ensaio. A vibração foi coletada somente em dois eventos do primeiro tempo ou primeira linha das tabelas. As tabelas 6.7 a 6.12

das vazões de 0,0586 a 0,0753 m³/s mostram os valores das medições, os cálculos das grandezas obtidas indiretamente e, em seguida a análise.

Tabela 6.7 – Sem cavitação para Q = 0,0586 m³/s

Q m ³ /s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA °C	TLOA °C	Vib Axial mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0587	-1,7	61,6	231,8	251,7	0,134	75,3	18,5	79,9	21	21	0,25	1,25	1,55	0,65	0,90
0,0587	-2,0	61,3	231,7	251,9	0,134	75,4	18,6	79,5	33	28					
0,0586	-1,9	60,6	231,9	252,0	0,134	75,4	18,5	79,8	40	32					
0,0587	-2,0	60,5	231,3	251,5	0,135	75,6	18,7	79,0	42	35					
0,0587	-1,8	60,7	231,9	251,9	0,134	75,6	18,6	79,5	44	36					
0,0586	-2,1	60,5	232,0	252,3	0,134	75,5	18,6	79,5	44	38					
0,0588	-2,0	60,6	231,9	252,2	0,134	75,3	18,5	80,1	45	39					
0,0587	-2,1	60,5	231,7	252,0	0,134	75,5	18,6	79,5	46	40					
0,0586	-1,7	60,9	231,6	251,5	0,135	75,6	18,5	79,7	46	40					

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.8 – Sem cavitação para Q = 0,0619 m³/s

Q m ³ /s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA °C	TLOA °C	Vib Axial mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0619	-6,6	56,0	220,5	246,6	0,140	76,6	19,1	80,0	22	22	0,35	0,95	1,60	0,75	0,90
0,0621	-6,5	56,2	220,5	246,6	0,140	76,4	19,1	80,2	34	28					
0,0619	-6,7	55,9	220,4	246,6	0,140	76,8	19,2	79,6	41	34					
0,0620	-6,5	56,1	220,1	246,1	0,140	76,6	19,3	79,1	43	36					
0,0621	-6,8	55,9	220,0	246,4	0,140	76,8	19,2	79,7	44	37					
0,0619	-6,7	55,9	220,4	246,6	0,140	76,5	19,2	79,6	45	39					
0,0621	-6,6	55,0	220,6	246,8	0,140	76,4	19,2	79,7	46	40					
0,0619	-6,8	54,7	220,1	246,4	0,140	76,7	19,1	79,9	47	41					
0,0621	-6,7	54,9	220,5	246,8	0,140	76,5	19,1	80,2	47	42					

Fonte: Schröder, 20115

Tabela 6.9 – Sem cavitação para Q = 0,0653 m³/s

Q m ³ /s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA °C	TLOA °C	Vib Axial mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0655	-8,6	54,0	205,2	234,8	0,150	75,9	19,5	78,9	24	24	0,55	0,95	1,90	0,90	0,80
0,0653	-9,1	53,4	205,2	235,2	0,150	76,2	19,6	78,4	35	29					
0,0655	-9,2	52,3	205,6	235,8	0,149	76,2	19,5	79,2	41	33					
0,0654	-8,7	52,8	205,4	235,1	0,150	75,8	19,6	78,5	44	36					
0,0654	-8,8	52,6	205,3	235,0	0,150	76,3	19,4	79,2	45	39					
0,0653	-8,5	52,9	205,1	234,5	0,150	76,2	19,6	78,1	46	40					
0,0655	-8,8	52,7	205,3	235,1	0,150	76,1	19,5	79,0	47	41					
0,0653	-8,7	52,7	205,1	234,7	0,150	76,4	19,5	78,6	48	42					
0,0654	-8,6	52,8	205,3	234,8	0,150	75,9	19,6	78,3	48	43					

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.10 – Sem cavitação para $Q = 0,0686 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA $^{\circ}\text{C}$	TLOA $^{\circ}\text{C}$	Vib Axial mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0688	-12,7	50,1	184,8	219,9	0,161	78,2	20,1	75,3	20	20	0,65	1,40	1,30	0,90	1,20
0,0686	-12,8	49,9	185,4	220,6	0,161	78,0	20,2	74,9	32	28					
0,0687	-12,6	49,1	184,9	219,9	0,161	78,1	20,1	75,2	40	34					
0,0688	-12,9	48,8	184,3	219,7	0,161	78,3	20,1	75,2	45	38					
0,0686	-12,8	48,8	184,0	219,2	0,162	78,2	19,9	75,6	46	40					
0,0688	-12,8	48,9	184,4	219,7	0,161	78,4	20,1	75,2	47	41					
0,0686	-12,7	49,0	184,0	219,1	0,162	78,2	19,9	75,5	48	42					
0,0686	-12,8	48,9	184,4	219,6	0,161	78,4	20,1	75,0	49	43					
0,0688	-12,9	48,9	184,6	219,9	0,161	78,3	20,2	74,8	50	44					

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.11 - Sem cavitação para $Q = 0,0719 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA $^{\circ}\text{C}$	TLOA $^{\circ}\text{C}$	Vib AXI mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0720	-15,4	45,8	168,0	207,3	0,185	79,2	20,3	73,5	22	22	0,30	1,80	3,05	0,90	1,65
0,0719	-15,5	45,7	167,7	207,1	0,186	79,4	20,1	74,1	34	28					
0,0720	-15,7	44,5	168,0	207,7	0,185	79,3	20,2	74,0	41	35					
0,0720	-15,5	44,6	167,9	207,3	0,185	79,4	20,3	73,5	45	39					
0,0720	-15,4	44,5	168,1	207,4	0,185	79,1	20,3	73,5	47	41					
0,0721	-15,6	44,4	167,9	207,5	0,185	79,3	20,2	74,1	48	42					
0,0719	-15,3	44,6	168,1	207,3	0,185	79,5	20,3	73,5	49	43					
0,0721	-15,6	44,4	167,9	207,5	0,185	79,2	20,2	74,0	50	44					
0,0720	-15,9	42,7	167,4	207,3	0,186	79,4	20,3	73,5	51	45					

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.12 – Sem cavitação para $Q = 0,0753 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA $^{\circ}\text{C}$	TLOA $^{\circ}\text{C}$	Vib Axial mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0753	-21,2	39,2	144,8	191,5	0,203	80,8	21,1	68,4	19	19	0,70	2,10	3,25	1,20	2,25
0,0754	-21,0	39,5	144,7	191,3	0,204	80,6	21,0	68,7	32	28					
0,0753	-20,8	39,6	144,5	190,8	0,204	80,6	20,8	69,1	40	36					
0,0754	-20,9	39,5	144,5	191,0	0,204	80,7	21,1	68,2	46	40					
0,0753	-21,3	39,0	144,9	191,8	0,203	80,5	21,1	68,5	48	42					
0,0753	-21,0	39,3	144,9	191,4	0,203	80,6	20,9	68,9	50	43					
0,0753	-20,9	38,0	144,9	191,3	0,204	80,8	20,8	69,2	51	44					
0,0754	-21,0	38,0	144,3	190,9	0,204	80,5	20,7	69,6	52	45					
0,0753	-20,9	38,0	144,7	191,1	0,204	80,6	20,9	68,8	53	46					

Fonte: Schröder, 2015

Nesta condição de operação da bomba sem cavitação, foram realizadas duas medições de vibrações no início do ensaio e calculado sua média sendo que para os demais parâmetros, potência consumida, rendimento, ruídos e temperatura no mancal, foram obtidas as médias aritméticas de três medições a cada 30 minutos do ensaio.

O diferencial positivo de NPSH da ordem de 38 a 62 kPa proporcionou um funcionamento regular sem variações significativas de pressões detectadas pelos transdutores ou ruídos característicos de cavitação. Os instrumentos de controle como as válvulas não precisaram de reajustes em função do tempo do teste, sendo que somente as grandezas físicas como temperatura ambiente e da água tiveram suas anotações refeitas, já inclusas nos cálculos da tabela.

Nestas condições os valores dos parâmetros para a respectiva vazão tiveram pouca variação, na ordem de 0,2 kW para a potência consumida e 0,5 dB para os ruídos. Com variações também desprezíveis na vazão e na altura de elevação desenvolvida pela bomba, o rendimento manteve-se alto, acima de 68% de acordo com o esperado nestas circunstâncias.

A temperatura no mancal no lado acoplado do motor subiu mais rapidamente em função do tempo quando comparada com o lado oposto ao acoplamento, provavelmente causado pelo maior empuxo axial em vazões próximas ou superiores ao ponto de melhor eficiência. Este ensaio gerou o gráfico de tendências da temperatura no mancal em função do tempo, para todas as vazões do projeto, com a bomba operando sem cavitação conforme figuras 6.3 e 6.4.

A determinação do tempo de estabilização da temperatura no mancal de quatro horas foi obtida em teste específico na vazão de $0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$, e reportado no item 6.5.

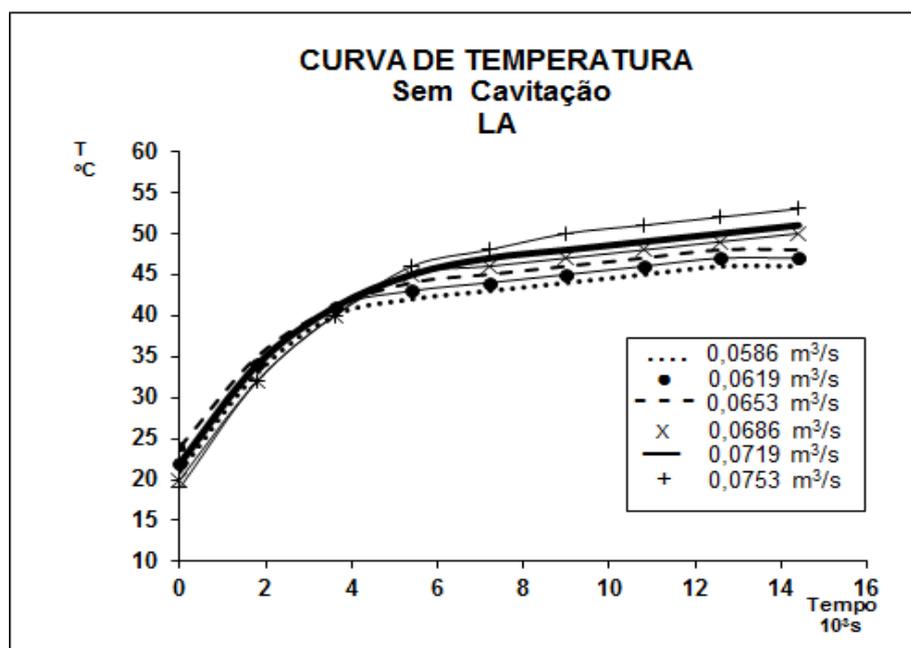


Figura 6.3: Temperatura LA sem cavitação

Fonte: Schröder, 2015

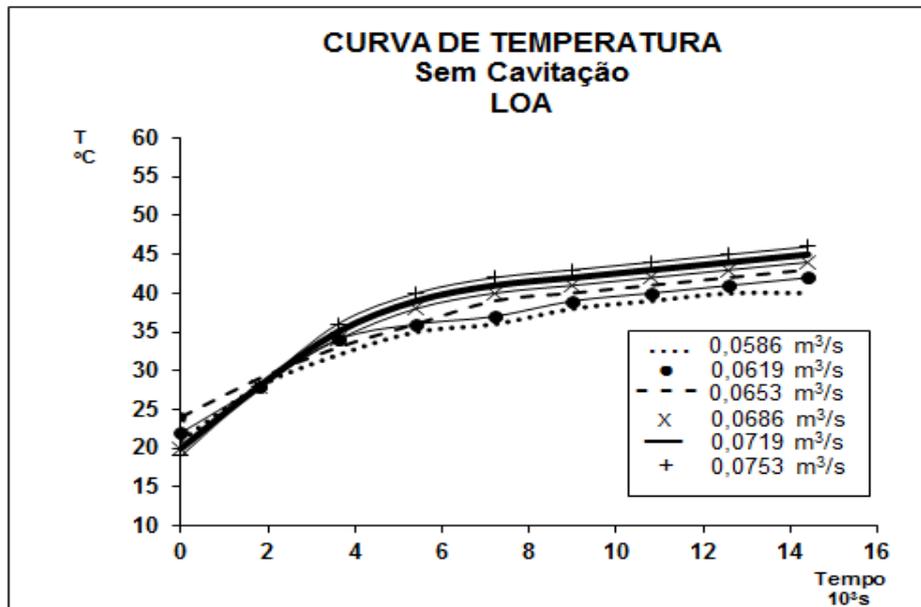


Figura 6.4: Temperatura LOA sem cavitação

Fonte: Schröder, 2015

A elevação das temperaturas no mancal da bomba operando sem cavitação tanto em LA como em LOA, seguem a mesma tendência, com uma subida

rápida nas duas primeiras horas e uma curva ascendente bem mais suave até o final do experimento. As curvas apresentaram para todas as vazões, a mesma tendência.

Quanto à vibração com a bomba sem cavitação, todos os picos de vibração concentraram-se na faixa da frequência natural ou de rotação de 29 HZ, e na de passagem de pás de 145 HZ. Os valores (RMS) acima destas frequências são praticamente desprezíveis.

Exemplo de um dos dois espectros para a vazão de $0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$ com o acelerômetro no lado acoplado, posição horizontal, pode ser visualizado na fig. 6.5 com a bomba operando sem cavitação.

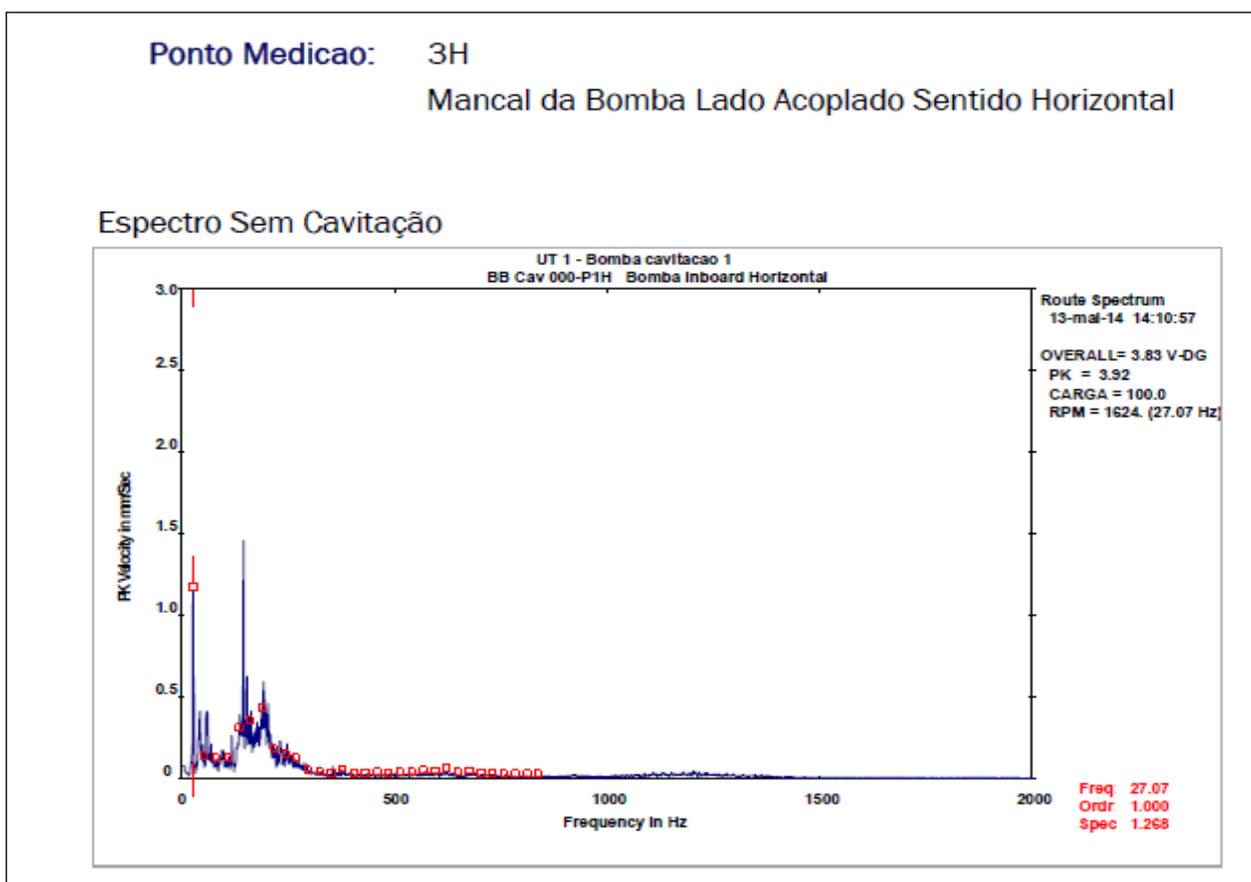


Figura 6.5: Espectro de vibração 3HV para $Q = 0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$

Fonte: Schröder, 2015

Conforme descrito no método, durante o ensaio da bomba sem cavitação na vazão de $0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$, foi realizado um teste de oxigênio dissolvido na água do

tanque superior. O valor encontrado de 7,8 mg/l na temperatura de 24,9 °C está conforme as características esperadas da água limpa ou potável, conforme recomendações da Cetesb, SP (2014). Na ausência de referências específicas sobre a quantidade de ar dissolvido correspondente ao OD da medição, é utilizado a informação do pesquisador MACINTYRE (1980) de que existem aproximadamente 1,8% de gases dissolvidos nesta temperatura, quantidade esta muito pequena e que influencia de maneira desprezível as condições de operação na sucção da bomba.

6.3 CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS DE CAVITAÇÃO INCIPIENTE, CRÍTICA, MODERADA E DESENVOLVIDA

Após determinação do $NPSH_r$ que caracteriza a cavitação incipiente e o ensaio da bomba em condições regulares de operação, foi realizado um ensaio específico para determinar outros níveis mais severos de cavitação, baseado na observação das variações da queda da altura de elevação total da bomba e do nível de ruídos com uma restrição maior da válvula de controle instalada na sucção. Isto possibilitou a classificação da intensidade da cavitação para todas as vazões do projeto.

A aplicação destes dois marcadores para classificação de níveis mais severos de cavitação consiste de uma experiência nova e sujeita a confirmação em outros ensaios. Esta ferramenta para classificação da cavitação em outras condições além da incipiente, é válida para a configuração hidrodinâmica do laboratório LHMF, instrumentação disponível, bomba centrífuga radial de médio porte e método adotado e reportado em cada etapa. A caracterização dos níveis de cavitação são mostrados nas tabelas 6.13 a 6.18 e com comentários a seguir.

Tabela 6.13 – Caracterização dos níveis de cavitação para $Q = 0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0587	-62,6	0,0	163,5	244,4	-3,0	0,138	82,1	19,2	74,7	Cav. incipiente
0,0586	-65,3	-2,5	154,3	237,8	-5,6	0,142	83,0	19,2	72,6	Cav. critica
0,0587	-67,1	-4,3	144,7	230,0	-8,7	0,147	83,1	19,3	69,9	Cav. critica
0,0586	-70,5	-7,7	135,6	224,3	-11,0	0,151	85,2	19,3	68,1	Cav. moderada
0,0586	-75,2	-12,4	121,3	214,7	-14,8	0,158	85,4	19,3	65,2	Cav. moderada
0,0587	-79,6	-16,8	109,8	207,6	-17,6	0,163	87,7	19,3	63,1	Cav. moderada
0,0587	-84,7	-21,9	96,1	194,4	-22,8	0,174	89,5	19,3	59,1	Cav. desenv.

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.14 – Caracterização dos níveis de cavitação para $Q = 0,0619 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0620	-63,1	0,0	156,0	238,6	-3,0	0,144	83,8	19,8	74,7	Cav. incipiente
0,0619	-64,9	-1,8	149,2	233,6	-5,0	0,147	84,7	20,2	71,6	Cav. critica
0,0621	-67,5	-4,3	141,0	228,1	-7,3	0,151	85,8	20,2	70,2	Cav. critica
0,0619	-70,7	-7,6	130,5	220,7	-10,3	0,156	87,2	20,2	67,7	Cav. moderada
0,0621	-76,7	-13,6	118,6	214,9	-12,7	0,160	88,5	20,2	66,0	Cav. moderada
0,0620	-79,0	-15,9	107,4	205,9	-16,3	0,167	89,8	20,4	62,6	Cav. moderada
0,0619	-86,6	-23,5	92,5	193,5	-21,3	0,178	91,7	20,7	57,9	Cav. desenv.

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.15 – Caracterização dos níveis de cavitação para $Q = 0,0653 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0655	-62,3	0,0	144,6	227,9	-3,0	0,155	82,8	20,6	72,5	Cav. incipiente
0,0653	-65,1	-2,9	130,5	216,5	-7,9	0,163	84,3	20,7	68,3	Cav. critica
0,0654	-66,5	-4,2	127,0	214,5	-8,7	0,164	84,4	20,7	67,7	Cav. critica
0,0653	-71,6	-9,4	110,6	203,1	-13,6	0,173	86,6	20,8	63,7	Cav. moderada
0,0655	-75,4	-13,1	99,5	195,9	-16,6	0,180	87,6	20,8	61,7	Cav. moderada
0,0653	-79,8	-17,6	92,7	193,4	-17,7	0,182	89,3	21,0	60,2	Cav. moderada
0,0654	-84,9	-22,6	72,4	178,3	-24,1	0,198	90,7	21,4	54,5	cav. desenv.

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.16 – Caracterização dos níveis de cavitação para $Q = 0,0686 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0688	-63,9	0,0	126,0	212,3	-3,0	0,167	85,0	20,9	69,8	Cav. incipiente
0,0686	-67,1	-3,3	118,4	207,9	-5,1	0,170	86,5	21,3	67,0	Cav. critica
0,0687	-68,2	-4,4	110,3	200,9	-8,3	0,176	86,2	21,6	63,9	Cav. critica
0,0686	-71,7	-7,9	98,2	192,3	-12,2	0,184	88,0	21,9	60,3	Cav. moderada
0,0686	-75,4	-11,6	89,9	187,7	-14,3	0,189	89,3	21,7	59,5	Cav. moderada
0,0688	-79,9	-16,0	81,4	183,7	-16,1	0,193	90,6	22,0	57,4	Cav. moderada
0,0687	-86,3	-22,5	68,6	171,0	-21,9	0,207	92,3	22,2	52,9	Cav. desenv.

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.17 – Caracterização dos níveis de cavitação para $Q = 0,0719 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0720	-62,1	0,0	114,7	200,7	-3,0	0,192	85,9	21,4	67,5	Cav. incipiente
0,0719	-64,8	-2,7	105,0	193,7	-6,8	0,199	87,2	21,6	64,5	Cav. critica
0,0719	-67,0	-4,9	98,7	189,6	-8,8	0,203	87,6	21,7	62,9	Cav. critica
0,0720	-70,4	-8,3	89,4	183,7	-11,6	0,209	89,2	21,8	60,7	Cav. moderada
0,0720	-74,6	-12,5	80,7	179,2	-13,8	0,215	90,4	21,9	58,9	Cav. moderada
0,0719	-79,7	-17,6	72,9	176,5	-15,1	0,218	91,7	22,2	57,2	Cav. moderada
0,0720	-83,8	-21,7	57,8	165,5	-20,4	0,232	93,3	22,5	52,9	Cav. desenv.

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.18 – Caracterização dos níveis de cavitação para $Q = 0,0753 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Ht kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	Carac.
0,0755	-62,4	0,0	97,2	185,2	-3,0	0,210	87,3	22,4	62,4	Cav. incipiente
0,0753	-64,9	-2,5	89,9	180,3	-5,6	0,216	88,5	22,4	60,6	Cav. critica
0,0754	-66,3	-3,9	83,2	175,1	-8,3	0,222	89,1	22,4	58,9	Cav. critica
0,0753	-71,3	-8,9	71,1	167,9	-12,1	0,232	90,4	22,5	56,2	Cav. moderada
0,0754	-74,9	-12,5	63,3	163,8	-14,2	0,238	91,5	22,5	54,9	Cav. moderada
0,0753	-78,2	-15,8	58,3	162,0	-15,2	0,240	92,7	22,5	54,2	Cav. moderada
0,0754	-84,9	-22,5	41,1	151,6	-20,6	0,257	94,9	22,6	50,5	Cav..desenv.

Fonte: Schröder, 2015

Os níveis médios de ruídos com a bomba operando em condições regulares para comparação, estão resumidos abaixo:

Q de $0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$: 75,5 dB

Q de $0,0619 \text{ m}^3/\text{s}$: 76,6 dB

Q de $0,0653 \text{ m}^3/\text{s}$: 76,1 dB

Q de $0,0686 \text{ m}^3/\text{s}$: 78,2 dB

Q de $0,0719 \text{ m}^3/\text{s}$: 79,3 dB

Q de $0,0753 \text{ m}^3/\text{s}$: 80,6 dB

Para todas as medições dos níveis de ruídos da bomba, observaram-se variações discretas dentro da respectiva faixa de classificação para todas as vazões, o que sinalizou a validade do uso dos mesmos marcadores da cavitação incipiente

para caracterizar os demais níveis, crítica, moderada e desenvolvida, condição esta gerada pela restrição da válvula de sucção.

Em resumo, os indicadores dos ruídos e queda da altura de elevação total para classificação dos níveis de cavitação comportaram-se como abaixo, em relação à condição regular da bomba:

-Cavitação incipiente : nível de ruído entre 8,3% e 9,4% superior e queda da altura de elevação total de 3,0% (conforme norma HI);

-Cavitação crítica : nível de ruído entre 10,1% e 11,4% superior e queda da altura de elevação total entre 5,0% e 8,8%;

-Cavitação moderada : nível de ruído entre 13,5% e 15,5% superior e queda da altura de elevação total entre 10,3% e 17,7%;

-Cavitação desenvolvida : nível de ruído entre 17,7% e 19,7% superior e queda da altura de elevação total entre 20,4% e 24,1%.

Com a bomba operando em regime de cavitação desenvolvida aconteceram várias paradas do ensaio devido à perda total do fluxo, sendo necessário a abertura da válvula de controle de sucção, um tempo de espera para escorva e reinício dos testes com ajustes conforme descrito no método.

Os resultados deste ensaio de caracterização associados ao do $NPSH_r$, gerou as correlações dos parâmetros de potência consumida, rendimento e ruídos, em função da diferença de $NPSH$ disponível e requerido, e do fator de Thoma calculado para todas as vazões do experimento. Os valores foram obtidos em pontos intervalados em ambas as tabelas, procurando sempre, reproduzir o maior espectro operacional, ou seja, com os maiores valores de $NPSH_d$, que expressam as boas condições, e os valores inferiores, representando as instáveis situações de fluxo com a bomba cavitando em diferentes níveis de severidade, incipiente, crítica, moderada e desenvolvida. Para o fator de Thoma o mesmo procedimento foi adotado, com os menores valores nas melhores condições operacionais e com os maiores valores nas condições de cavitação mais extremas. A tendência da potência consumida pode ser visualizada nos gráficos das figuras 6.6 e 6.7 e comentários a seguir.

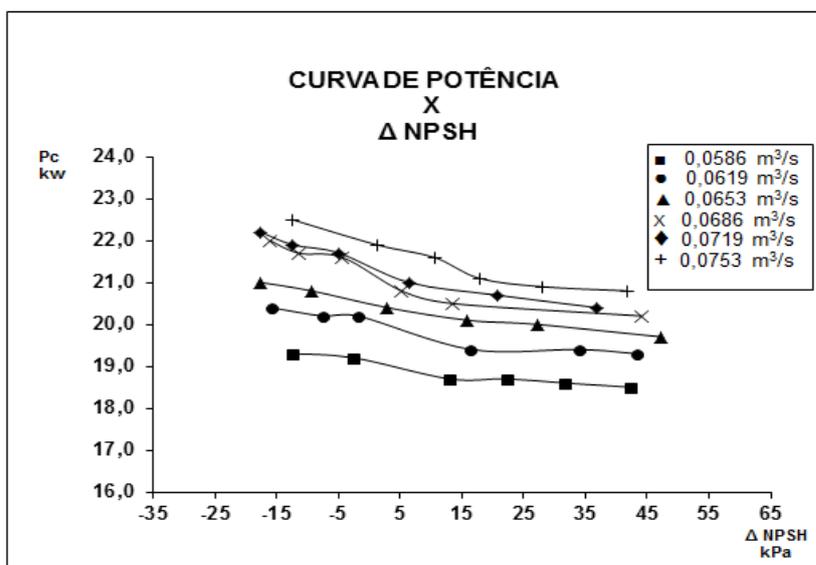


Figura 6.6: P_c X $\Delta NPSH$

Fonte: Schröder, 2015

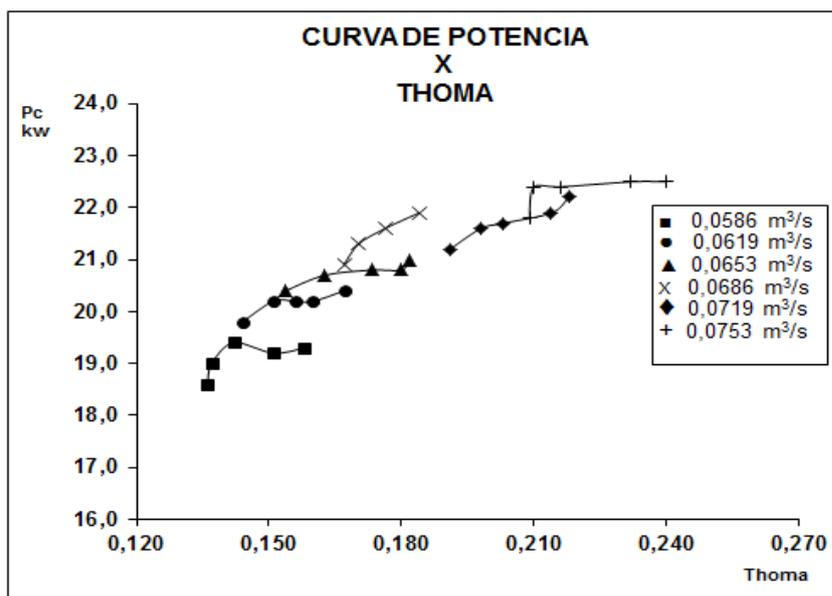


Figura 6.7: P_c X Thoma

Fonte: Schröder, 2015

A redução gradativa do $NPSH_d$ gerou um aumento na potência consumida para todas as vazões, com uma maior variação no ponto de igualdade entre o disponível e o requerido. Em valores absolutos, a potência consumida com a bomba funcionando com cavitação, é maior quando comparada com a operação regular da

bomba conforme os pontos à esquerda das curvas para a comparação com o Δ NPSH e à direita para o fator de Thoma.

As mesmas correlações para o rendimento foram obtidas com os resultados do teste de NPSH_r e caracterização da cavitação com resultados com menores distorções que a correlação de potência.

As figuras 6.8 e 6.9, mostram a tendência para todas as vazões do projeto.

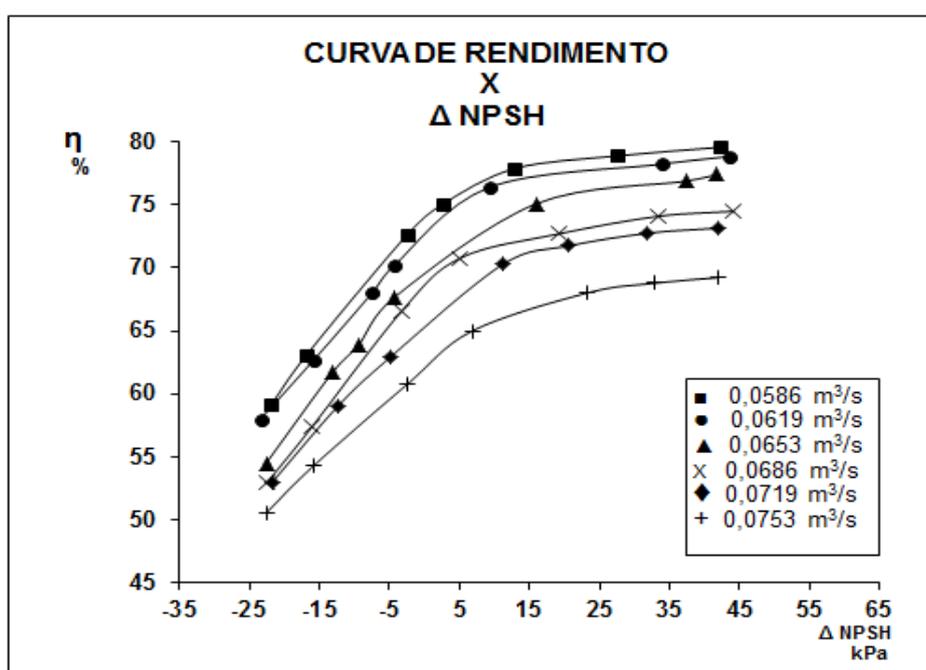


Figura 6.8 : Rendimento X Δ NPSH

Fonte: Schröder, 2015

A redução de pressão na sucção da bomba através do fechamento da válvula de controle e conseqüente redução do NPSH_d gerou uma significativa queda no rendimento da bomba para todas as vazões nos ensaios de NPSH_r e caracterização dos níveis de cavitação.

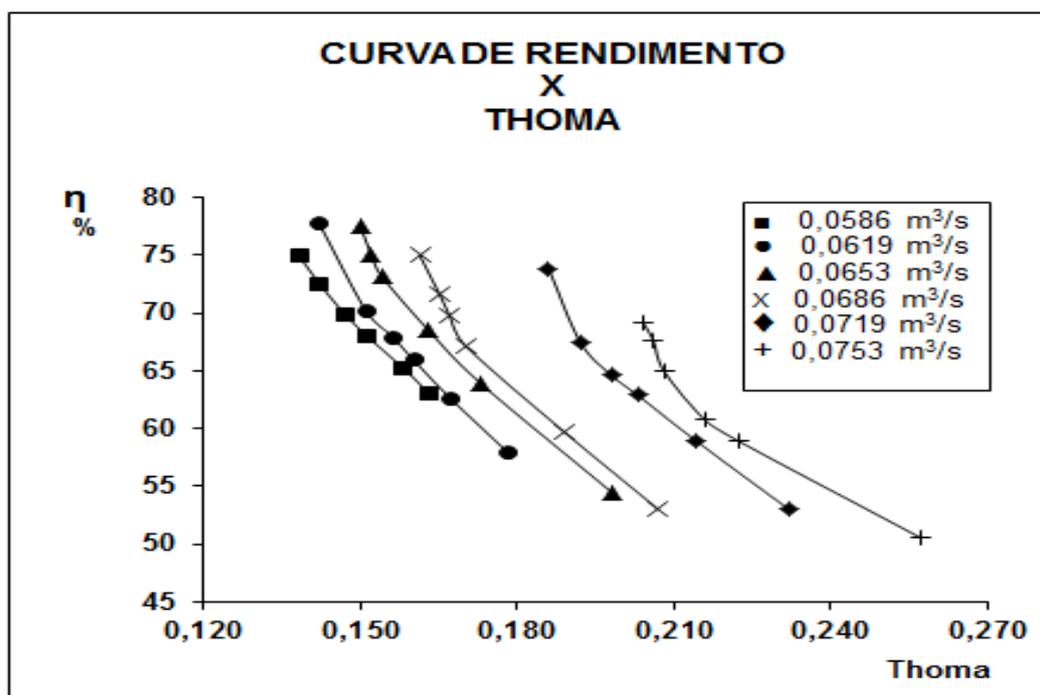


Figura 6.9 : Rendimento X Thoma

Fonte: Schröder, 2015

A redução de pressão na sucção da bomba através do fechamento da válvula de controle, queda da altura de elevação mantido o $NPSH_d$ constante, gerou um aumento do fator de Thoma e significativa queda no rendimento da bomba para todas as vazões conforme os ensaios de $NPSH_r$ e de caracterização dos níveis de cavitação.

As correlações do ruído originados pelo funcionamento da bomba no ensaio de $NPSH_r$ e caracterização da cavitação mostraram-se coerentes com os parâmetros anteriores, sempre com um aumento sonoro quando das maiores restrições na sucção da bomba conforme figuras 6.10 e 6.11.

Antes da inicialização dos testes de ruídos, foram medidos com o decibelímetro, pontos localizados de 1 até 5 metros de distância da localização da bomba desligada, com o propósito de verificar as interferências sobre os resultados .

As medições do ambiente que circundam a bomba apontaram 67 dB por conta de outras fontes do próprio laboratório.

Com a entrada da bomba em condições normais, sem quaisquer modificações de pressão na sucção, este valor sobe para 78 dB a uma distância de 0,10 m da bomba, conforme o ensaio sem cavitação e continua aumentando conforme a restrição na válvula de controle que provoca uma redução do $NPSH_d$.

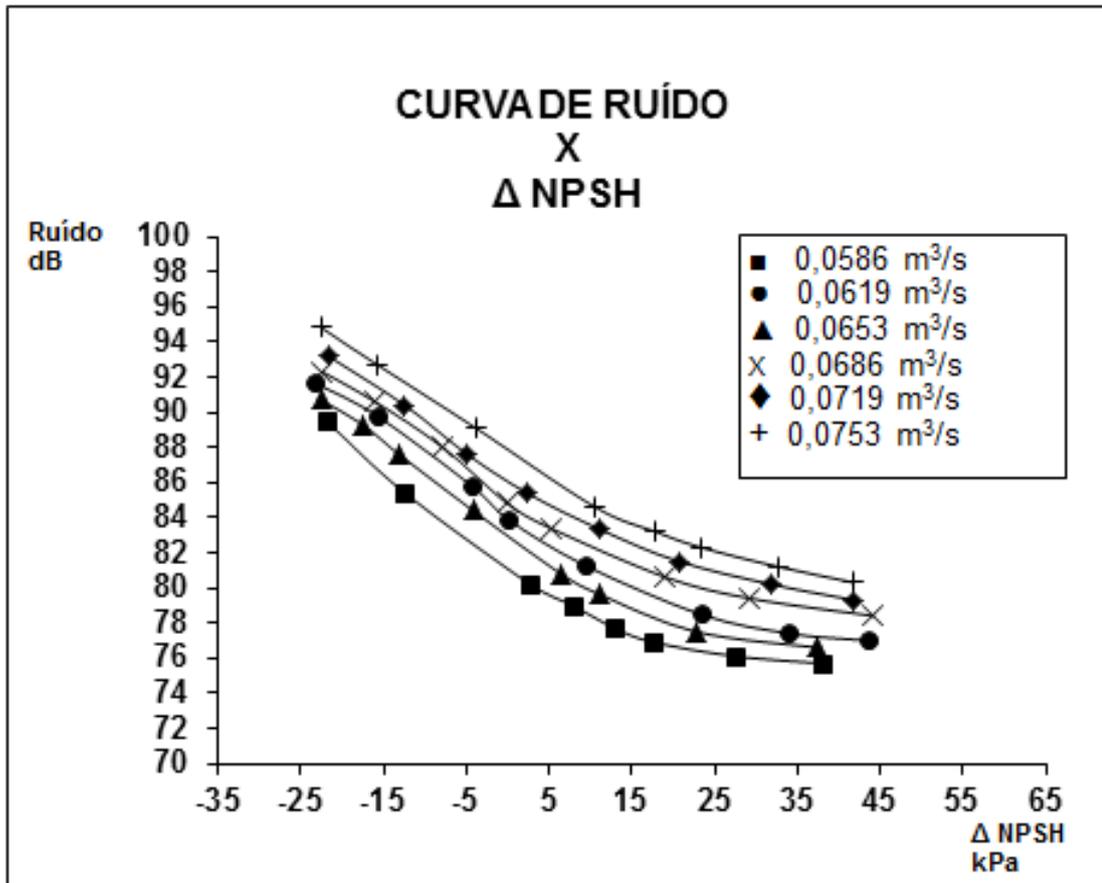


Figura 6.10 : Ruídos X $\Delta NPSH$

Fonte: Schröder, 2015

Conforme a figura 6.10 com a redução gradativa de energia na sucção da bomba, a intensidade dos ruídos sobem para todas as vazões do projeto.

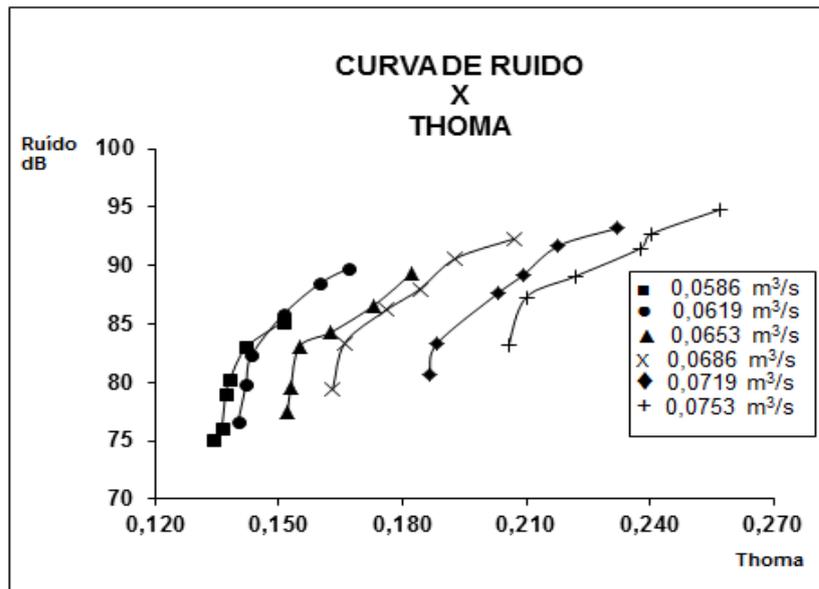


Figura 6.11 : Ruídos X Thoma

Fonte: Schröder, 2015

Os maiores valores do fator de Thoma correspondem às menores alturas manométricas mantido o $NPSH_d$ constante e refletem uma operação com cavitação em diversos níveis de intensidade com os mais altos níveis de ruídos detectados.

6.4 OPERAÇÃO DA BOMBA COM CAVITAÇÃO MODERADA

Este ensaio foi realizado com reduzidas pressões de sucção e acompanhamento de outros dois marcadores (ΔH_t e ruído) que determinaram a operação com cavitação moderada na etapa de caracterização. Apesar das instabilidades do fluxo manifestada em altos níveis de ruídos e vibrações bem como uma queda expressiva da altura de elevação desenvolvida pela bomba quando comparada a condição sem cavitação, o ensaio transcorreu normalmente, sendo interrompido o fluxo em raras vezes, o que requisitou abertura da válvula de controle da sucção e novo ajuste sem no entanto necessitar o desligamento da bomba.

As tabelas 6.19 a 6.24 mostram as grandezas físicas e os parâmetros obtidos nesta condição, com comentários após a última tabela. Os parâmetros de correlação potência consumida, rendimento, ruídos, temperatura no mancal e

vibração medidos neste ensaio são comparados graficamente aos mesmos parâmetros do teste sem cavitação.

Tabela 6.19 – Com cavitação moderada para $Q = 0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA $^{\circ}\text{C}$	TLOA $^{\circ}\text{C}$	Vib Axial mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0588	-77,5	-15,1	116,5	-15,8	0,159	86,4	20,0	62,4	22	22	0,55	1,75	3,90	0,80	1,90
0,0586	-77,1	-14,7	116,8	-15,8	0,160	86,2	19,9	62,5	34	29					
0,0588	-77,2	-14,8	116,6	-15,8	0,160	86,6	20,0	62,4	40	34					
0,0586	-77,2	-14,8	116,3	-16,0	0,160	86,5	19,8	62,7	43	37					
0,0586	-77,3	-15,0	115,9	-16,1	0,160	86,2	19,9	62,3	45	38					
0,0588	-77,7	-15,4	116,4	-15,7	0,159	86,3	20,0	62,4	46	40					
0,0587	-76,8	-15,6	116,8	-15,9	0,160	86,4	19,8	62,8	47	41					
0,0588	-76,8	-15,6	115,9	-16,3	0,160	86,8	19,8	62,7	48	42					
0,0587	-76,5	-15,3	116,0	-16,4	0,161	86,8	19,9	62,1	49	43					

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.20 – Com cavitação moderada para $Q = 0,0619 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA $^{\circ}\text{C}$	TLOA $^{\circ}\text{C}$	Vib Axial mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0621	-77,1	-14,6	113,2	-14,7	0,164	88,1	20,5	63,5	23	22	0,85	2,35	2,90	0,90	2,10
0,0619	-77,2	-14,7	113,7	-14,5	0,164	88,2	20,5	63,6	34	30					
0,0621	-77,0	-14,5	113,9	-14,4	0,164	88,7	20,6	63,4	42	36					
0,0620	-77,0	-14,5	113,8	-14,5	0,164	88,5	20,4	63,9	44	39					
0,0621	-76,3	-15,0	113,3	-15,0	0,165	88,4	20,6	63,1	46	41					
0,0619	-77,2	-16,0	113,0	-14,8	0,164	88,3	20,7	62,8	47	42					
0,0621	-75,8	-14,5	113,2	-15,2	0,165	88,4	20,6	63,0	48	43					
0,0619	-75,9	-14,7	113,4	-15,1	0,165	88,6	20,5	63,1	49	44					
0,0621	-76,1	-14,8	113,9	-14,8	0,164	88,7	20,6	63,2	50	45					

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.21 – Com cavitação moderada para $Q = 0,0653 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA $^{\circ}\text{C}$	TLOA $^{\circ}\text{C}$	Vib Axial mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0655	-76,9	-14,4	95,8	-17,6	0,182	89,1	21,2	59,8	24	24	0,75	2,70	3,55	1,10	2,10
0,0653	-77,1	-14,7	95,8	-17,5	0,182	89,2	21,0	60,3	36	30					
0,0653	-76,8	-15,5	96,1	-17,5	0,182	89,1	21,0	60,3	42	34					
0,0655	-76,5	-15,1	96,3	-17,5	0,182	89,1	21,1	60,1	44	37					
0,0655	-76,9	-14,4	95,8	-17,6	0,183	89,3	21,1	59,8	46	40					
0,0653	-76,9	-15,7	95,5	-17,7	0,182	89,0	21,1	59,8	48	42					
0,0654	-76,8	-15,5	95,3	-17,2	0,182	88,9	21,2	59,6	49	44					
0,0653	-76,7	-15,5	96,4	-17,4	0,182	89,1	21,1	60,0	50	45					
0,0654	-76,8	-15,5	96,8	-17,2	0,181	88,9	20,9	60,9	51	46					

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.22 – Com cavitação moderada para $Q = 0,0686 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA $^{\circ}\text{C}$	TLOA $^{\circ}\text{C}$	Vib Axial mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0687	-76,8	-14,1	86,3	-15,3	0,191	89,8	21,6	59,0	22	22	1,05	2,50	3,25	1,30	2,10
0,0686	-76,3	-13,6	86,2	-15,6	0,192	90,4	21,4	59,3	34	30					
0,0687	-77,0	-14,3	87,1	-14,8	0,190	90,2	21,5	59,6	41	36					
0,0688	-77,1	-14,3	87,2	-14,7	0,190	89,9	21,6	59,5	47	41					
0,0686	-74,9	-13,5	86,9	-15,9	0,192	89,8	21,4	59,0	49	43					
0,0688	-74,9	-13,4	86,7	-16,0	0,192	90,1	21,4	59,2	51	44					
0,0687	-75,8	-14,3	86,3	-15,8	0,192	90,3	21,5	58,9	52	45					
0,0687	-75,2	-13,7	87,1	-15,7	0,192	90,4	21,6	58,7	53	46					
0,0688	-75,3	-13,8	86,5	-15,9	0,192	90,2	21,6	58,7	53	47					

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.23 – Com cavitação moderada para $Q = 0,0719 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA $^{\circ}\text{C}$	TLOA $^{\circ}\text{C}$	Vib Axial mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0721	-75,4	-13,2	78,0	-14,3	0,217	91,6	22,4	57,2	20	20	0,65	2,85	4,40	1,30	2,10
0,0720	-75,9	-13,8	77,6	-14,3	0,217	92,1	22,6	56,5	34	29					
0,0719	-76,1	-14,0	77,3	-14,3	0,217	92,2	22,4	56,9	42	36					
0,0721	-76,0	-13,9	77,1	-14,5	0,217	91,8	22,4	57,0	46	42					
0,0720	-75,5	-13,5	77,8	-14,4	0,217	91,9	22,6	56,4	48	43					
0,0719	-75,3	-13,3	77,5	-14,6	0,218	92,0	22,5	56,5	50	45					
0,0721	-75,4	-13,3	77,8	-14,4	0,217	92,0	22,5	56,8	52	46					
0,0720	-75,3	-13,3	78,2	-14,3	0,217	91,8	22,6	56,6	54	47					
0,0720	-76,1	-14,1	77,9	-14,0	0,216	92,1	22,6	56,7	55	48					

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.24 – Com cavitação moderada para $Q = 0,0753 \text{ m}^3/\text{s}$

Q m^3/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Δ Ht %	Thoma	Ruído dB	Pc kW	Rend. %	TLA $^{\circ}\text{C}$	TLOA $^{\circ}\text{C}$	Vib Axial mm/s	Vib 3HV mm/s	Vib 3VV mm/s	Vib 4HV mm/s	Vib 4VV mm/s
0,0754	-74,4	-12,2	61,5	-15,5	0,241	92,4	22,7	53,6	21	21	1,25	3,60	4,35	1,95	2,55
0,0753	-74,6	-12,4	61,0	-15,6	0,242	92,5	22,6	53,7	38	32					
0,0754	-74,9	-13,5	61,2	-15,3	0,241	92,6	22,5	54,2	46	39					
0,0753	-73,9	-12,5	61,3	-15,8	0,242	92,7	22,6	53,5	50	43					
0,0754	-74,9	-13,5	61,7	-15,1	0,240	92,7	22,8	53,6	52	45					
0,0753	-74,8	-13,4	61,3	-15,4	0,241	92,3	22,6	53,9	54	47					
0,0753	-74,8	-13,4	61,0	-15,5	0,241	92,6	22,7	53,5	55	48					
0,0754	-73,8	-12,4	60,9	-16,1	0,243	92,3	22,6	53,5	56	49					
0,0754	-74,9	-13,5	61,6	-15,1	0,240	92,0	22,5	54,3	57	50					

Fonte: Schröder, 2015

Com a bomba operando com cavitação moderada, causada pela redução de pressão de sucção, altos níveis de ruído e queda na altura de elevação total, foram realizadas duas medições de vibrações e calculado sua média aritmética sendo que para os demais parâmetros de correlação a saber, potência consumida, rendimento, ruídos e temperatura no mancal, foram obtidas as médias aritméticas de três medições a cada 30 minutos de ensaio para a respectiva vazão. Referenciando ao funcionamento da bomba sem cavitação, os valores dos parâmetros apresentaram variações significativas:

- Potência consumida: superior, em valores absolutos de 0,6 a 2,3 kW quando comparadas com a operação regular;
- Rendimento inferior, em média 22% quando comparado com a operação regular;
- Ruídos: superiores, em média em valor absoluto de 12 dB quando comparados com a operação regular;
- Temperatura final no mancal LA e LOA: superior, em valor absoluto de 4 graus quando comparados com a operação regular; Este ensaio com cavitação moderada permitiu a comparação com as condições operacionais da segunda etapa, sem cavitação para os parâmetros de potência consumida, rendimento, ruídos, temperatura no mancal e vibrações. No gráfico da figura 6.12, a curva para todas as vazões ensaiadas mostra o aumento da potência consumida quando operando com cavitação moderada.

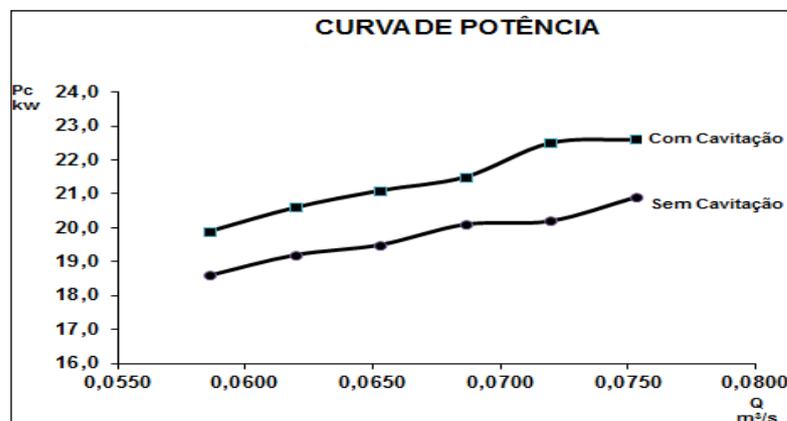


Figura 6.12: P_c sem cavitação e com cavitação moderada
Fonte: Schröder, 2015

O gráfico da figura 6.12 confirma que durante a operação com cavitação moderada, o rendimento hidráulico é reduzido pela instabilidade do fluxo, recirculações e perdas causadas por turbulências, requerendo maior potência do acionador para a mesma vazão sem estes fenômenos.

O desempenho da bomba, com boas condições de sucção ou com $NPSH_d$ suficiente para evitar a ocorrência de cavitação, foi determinado na segunda etapa, e agora comparado com a condição de cavitação moderada a que foi submetida.

Na figura 6.13, verifica na curva característica que a bomba funcionando sem cavitação além de apresentar maiores valores de pressão para as mesmas vazões, também tem sua forma típica melhor definida quando comparada com a curva da bomba com cavitação moderada.

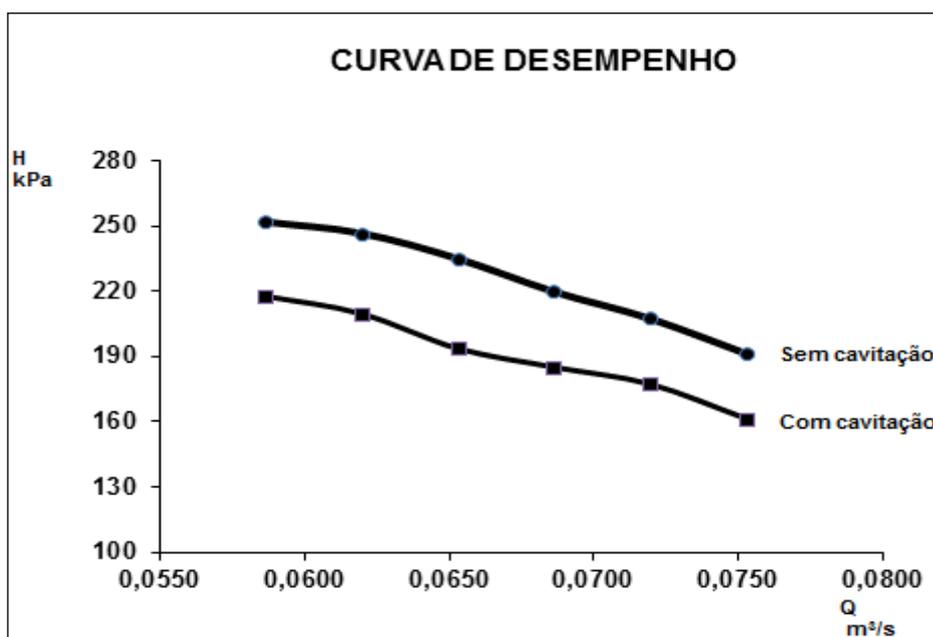


Figura 6.13: Desempenho sem cavitação e com cavitação moderada
Fonte: Schröder, 2015

A queda de desempenho para a bomba operando com cavitação moderada em todas as vazões do projeto, pode ser explicada pela instabilidade do fluxo causada pela redução de pressão na sucção e pelas turbulências geradas durante a implosão das bolhas vaporosas na tubulação, flange e interior da voluta da bomba. Simultaneamente à queda de desempenho, o rendimento que expressa a

conversão de potência do acionador em altura de elevação e vazão fornecida ao sistema também apresentaram curvas características conforme a figura 6.14.

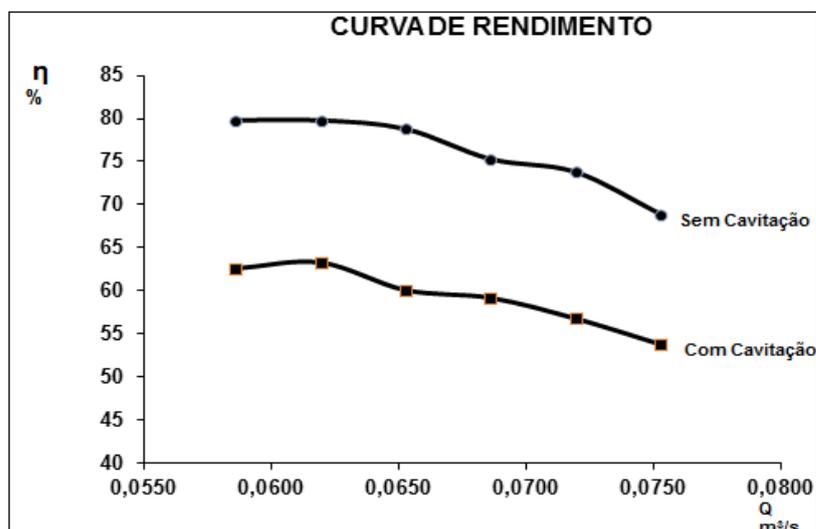


Figura 6.14: Rendimento sem cavitação e com cavitação moderada
Fonte: Schröder, 2015

O rendimento da bomba operando com cavitação moderada mostrou-se inferior a 22% em média, quando comparado com o funcionamento regular.

Os ruídos gerados pelo funcionamento da bomba são mostrados na figura 6.15 onde o crescimento do nível sonoro é proporcional à vazão do projeto independente das condições de sucção e mais destacado quando da bomba operando com cavitação moderada.

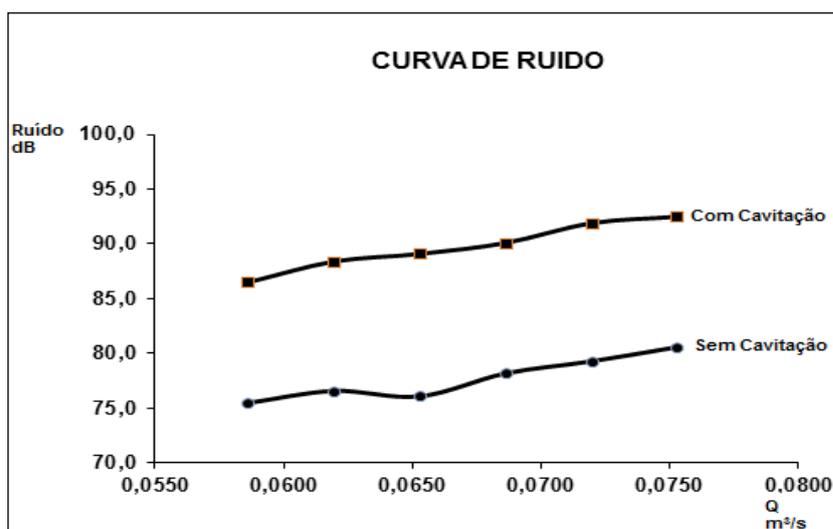


Figura 6.15: Ruídos sem cavitação e com cavitação moderada
Fonte: Schröder, 2015

A diferença absoluta correspondeu em média a 12 dB quando comparado com a bomba operando sem cavitação, dependendo das vazões. Resultado muito expressivo visto tratar-se de uma grandeza logarítmica, onde pequenos incrementos significam grandes diferenças na intensidade.

As temperaturas finais no mancal medidas em ambas as situações operacionais, apesar de mostrarem a mesma tendência para todas as vazões do projeto, o fazem com um pequeno diferencial absoluto, conforme as figuras 6.16 e 6.17, para as superfícies do mancal acoplado e oposto ao acionamento.

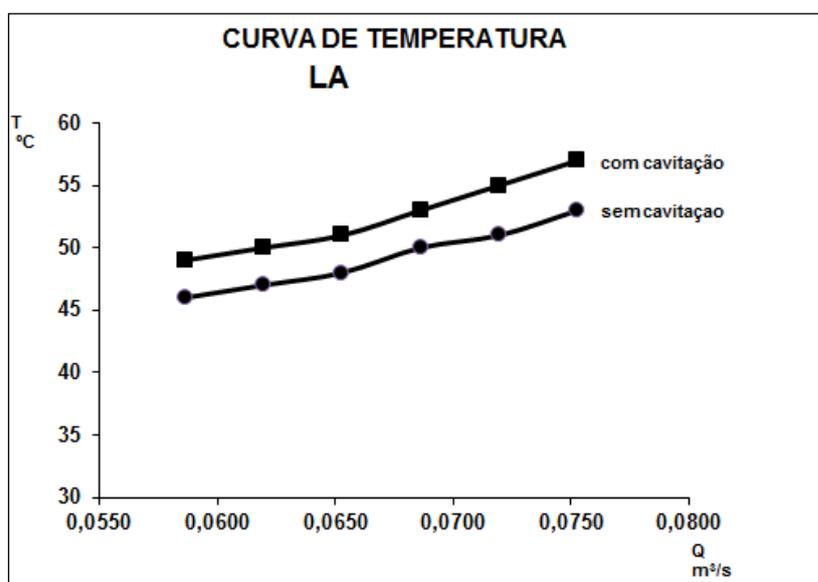


Figura 6.16: Temperatura LA sem cavitação e com cavitação moderada
Fonte: Schröder, 2015

Além de apresentarem uma elevação mais rápida desde o início da operação até a finalização do experimento após quatro horas, a temperatura no lado acoplado alcançou maiores valores absolutos, correspondendo provavelmente ao maior empuxo axial e radial combinados nos rolamentos alojados, devido à operação normal e com cavitação moderada. Independentemente da temperatura ambiente que estava submetido à etapa, todas as medições confirmaram a existência de uma diferença no aquecimento no mancal devido exclusivamente a mudança das condições operacionais da sucção da bomba, mantendo inalterado os

demais fatores como refrigeração natural, nível e qualidade da lubrificação e o próprio estado de conservação do mancal, para ambas as condições.

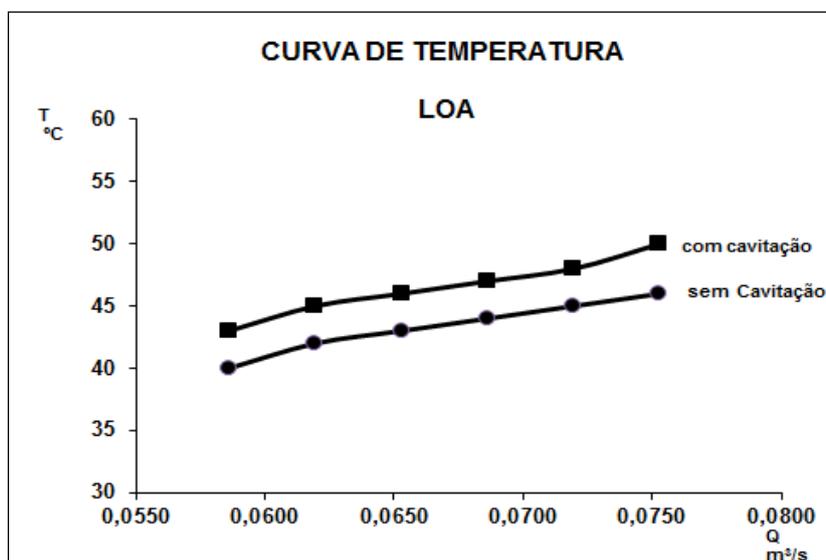


Figura 6.17: Temperatura LOA sem cavitação e com cavitação moderada
Fonte: Schröder, 2015

Do lado oposto ao acoplamento, a temperatura do mancal elevou-se de modo constante e atingiu um patamar final inferior ao lado acoplado para todas as vazões do projeto. Os empuxos radiais gerados pelo funcionamento regular e com cavitação moderada refletiram em menor intensidade que o lado acoplado, provavelmente devido ao dimensionamento dos rolamentos alojados.

Em bombas centrífugas são mais comuns os desvios operacionais à esquerda do ponto de melhor eficiência, o que leva, às vezes, o fabricante projetar rolamentos mais robustos para cargas radiais, que são mais atuantes no lado da bomba, ou oposto ao acionamento.

Na bomba operando com cavitação moderada todos os picos de vibração também se concentraram na faixa da frequência natural ou de rotação de 29 HZ, e na de passagem de pás de 145 HZ. Os valores (RMS) acima destas frequências são praticamente desprezíveis.

A vibração apresentou o maior valor em RMS para a posição 3 VV, lado acoplado, na vertical, explicado provavelmente pela vibração adicional gerada na curva localizada imediatamente a jusante do flange de recalque que influencia esta medição.

Exemplo de um dos dois espectros para a vazão de $0,0719 \text{ m}^3/\text{s}$ pode ser visualizada na figura 6.18, com a bomba operando com cavitação moderada.

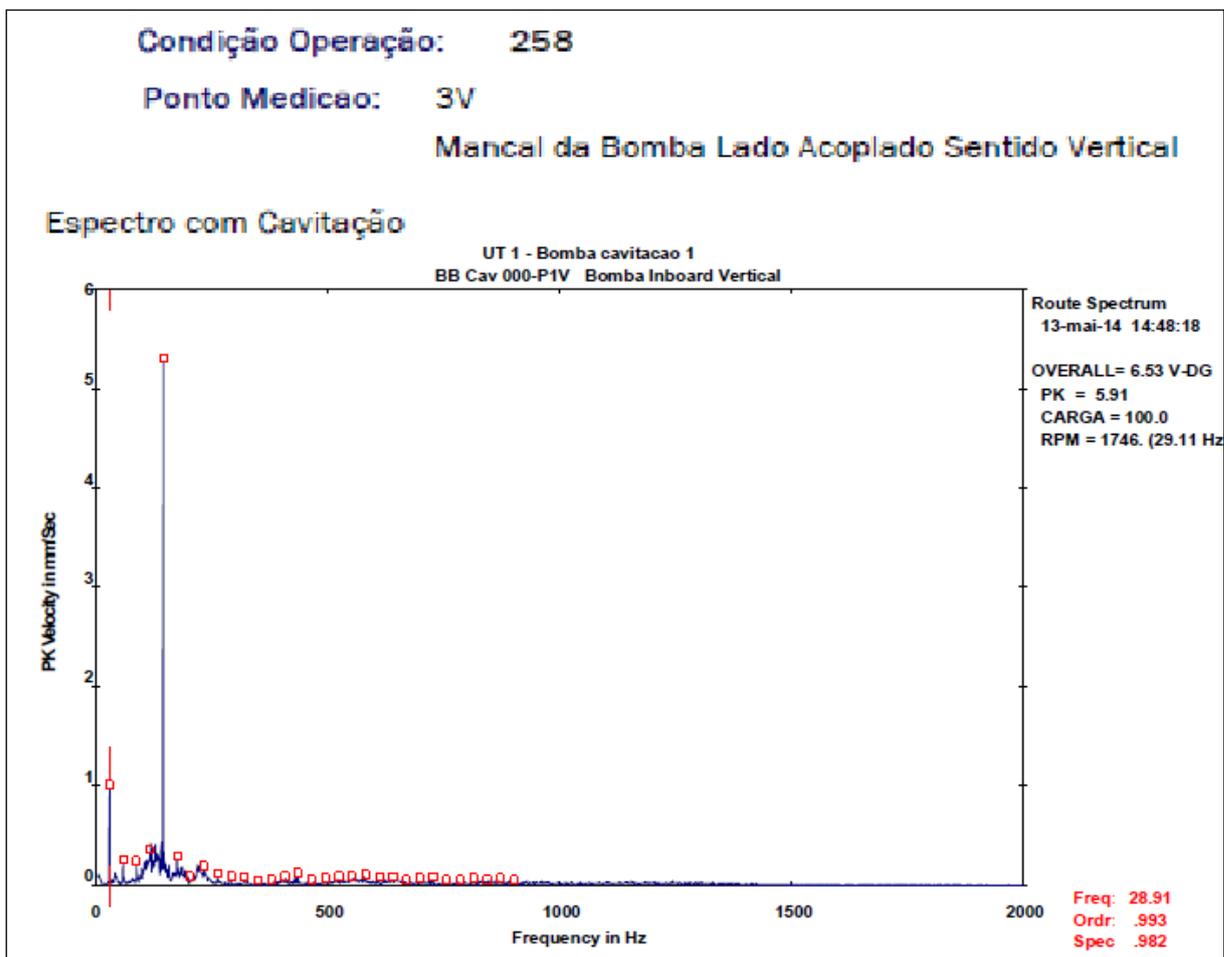


Figura 6.18: Espectro de vibração 3VV para $Q = 0,0719 \text{ m}^3/\text{s}$

Fonte: Schröder, 2015

As vibrações coletadas pelo acelerômetro nos pontos determinados no mancal nem sempre apresentaram a mesma simetria dos demais parâmetros, contudo observa-se uma tendência de crescimento do nível de vibração em todas as vazões do projeto quando operando com cavitação moderada.

As figuras 6.19 a 6.23 oferecem o panorama completo da média das duas medições para cada condição de funcionamento, sem cavitação e com cavitação moderada.

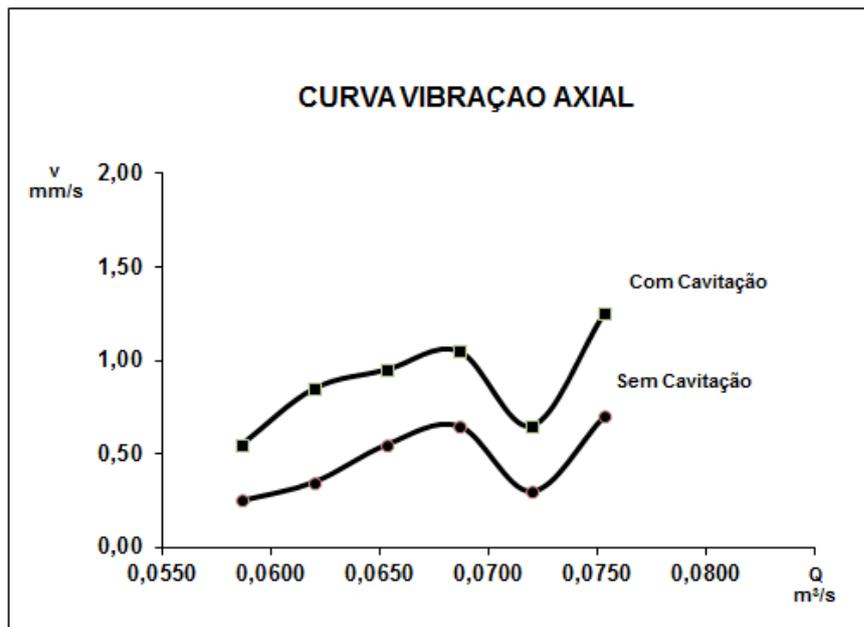


Figura 6.19 - Vibração Axial sem cavitação e com cavitação moderada
Fonte: Schröder, 2015

Com o acelerômetro posicionado na parte de trás da voluta, as vibrações axiais apresentaram baixos valores RMS, talvez devido este local não refletir genuinamente os esforços mecânicos da operação da bomba, contudo as tendências são claras com relação ao aumento do sinal quando da bomba funcionando com cavitação moderada, para todas as vazões do projeto.

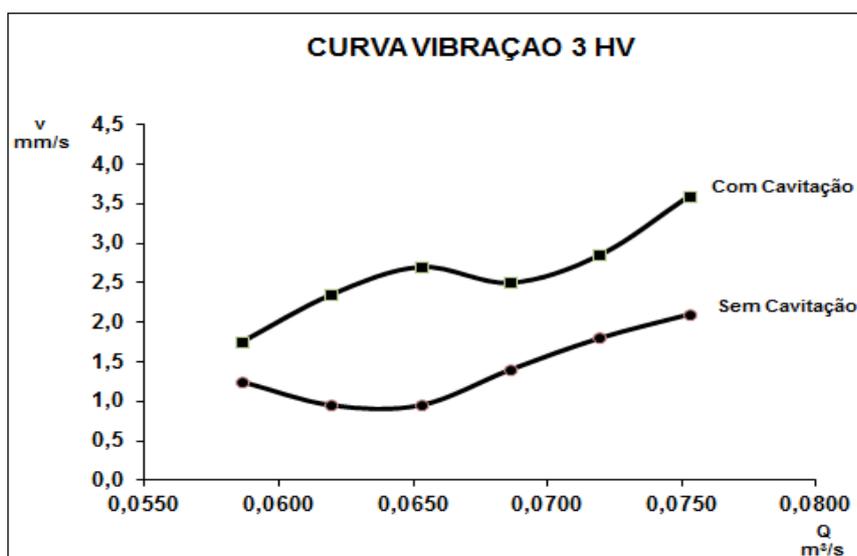


Figura 6.20: Vibração 3HV sem cavitação e com cavitação moderada
Fonte: Schröder, 2015

Na posição 3 HV (lado acoplado, velocidade na posição horizontal) nas vazões de 0,0619 e 0,0653 m³/s com a bomba operando sem cavitação e 0,0686 m³/s com cavitação, os valores obtidos apresentaram uma queda, não havendo uma explicação satisfatória para este comportamento. Nos demais pontos os sinais de vibração são relativamente proporcionais à vazão e mais significativos quando da bomba operando com cavitação moderada.

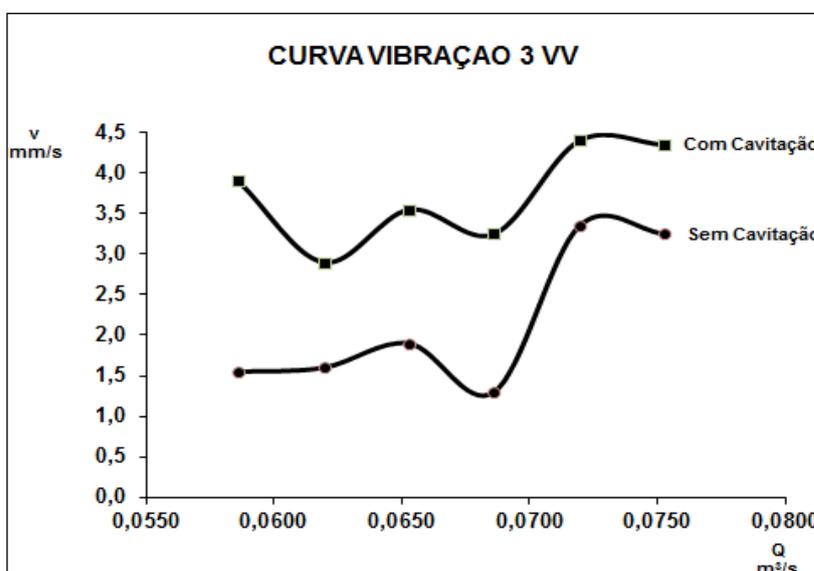


Figura 6.21: Vibração 3VV sem cavitação e com cavitação moderada
Fonte: Schröder, 2015

Os maiores valores do sinal de vibração ocorreram na posição 3 VV (lado acoplado, velocidade na posição vertical) principalmente para as últimas vazões, à direita do ponto de melhor eficiência. O significado destes valores pode ser devido à vibração coletada, ter parte do sinal originado na brusca mudança de direção do fluxo no recalque. Tal condição normalmente reflete-se na medição vertical efetuada no mancal. Apesar da forma incomum da curva de tendência, ambas as condições apresentam semelhanças geométricas e com os maiores picos com cavitação moderada.

Na posição 3 VV (lado acoplado, velocidade na posição vertical) nas vazões de 0,0686 m³/s com a bomba operando sem cavitação e 0,0619 e 0,0686 m³/s com cavitação, os valores obtidos apresentaram uma queda, não havendo uma explicação satisfatória para este comportamento

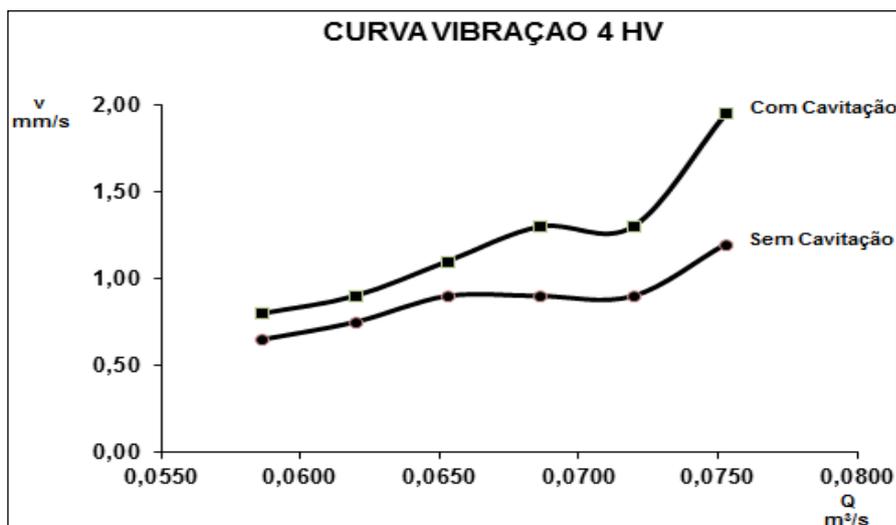


Figura 6.22: Vibração 4HV sem cavitação e com cavitação moderada
Fonte: Schröder, 2015

Na posição 4HV (lado oposto ao acoplamento, velocidade na posição horizontal) os valores dos sinais de vibrações são próximos nas primeiras vazões dos ensaios sem cavitação e com cavitação moderada e distanciam-se para as últimas vazões do projeto, não havendo uma explicação satisfatória para este comportamento.

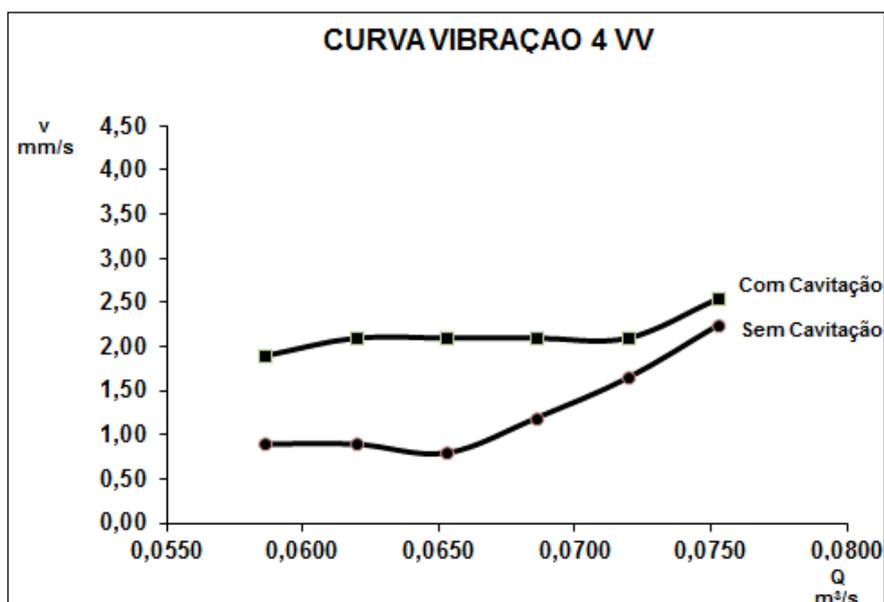


Figura 6.23: Vibração 4VV sem cavitação e com cavitação moderada
Fonte: Schröder, 2015

O acelerômetro posicionado no lado oposto do acoplamento efetuou medições que apresentaram grandes variações nas primeiras vazões do projeto nas condições sem cavitação e com cavitação moderada. Contudo para as demais vazões os valores absolutos são muito próximos, novamente, sem uma explicação satisfatória deste comportamento.

Conforme descrito no método durante o ensaio com cavitação moderada na vazão de $0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$ foi realizado um teste de oxigênio dissolvido na água do tanque superior,

O valor de $8,16 \text{ mg/l}$ na temperatura de $24,6 \text{ }^\circ\text{C}$ está conforme as características esperada da água limpa ou potável, conforme recomendações da Cetesb, SP (2014). Este valor é um pouco superior ao valor encontrado na medição com a bomba operando sem cavitação. A explicação deve-se provavelmente a maior turbulência e consequente oxigenação do tanque no funcionamento com cavitação moderada. Contudo este valor ainda corresponde a aproximadamente $1,8\%$ de gases dissolvidos nesta temperatura, quantidade esta muito pequena e de influencia desprezível nas condições de operação na sucção da bomba, mesmo com pressões reduzidas. Valores significativos poderiam ser obtidos somente com injeção de ar, que certamente influenciariam as condições de sucção, mas tal procedimento não foi utilizado neste trabalho.

6.5 ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA NO MANCAL COM A BOMBA OPERANDO SEM CAVITAÇÃO E COM CAVITAÇÃO MODERADA

Estes ensaios foram realizados para verificar a evolução da temperatura do mancal em função do tempo, com a bomba inicialmente operando sem cavitação, e depois com cavitação moderada. Experiências anteriores em laboratórios de fabricantes de bombas, determinaram que após algumas horas de operação, sem grandes variações de pressões e vazões ou da temperatura ambiente, o mancal tende a estabilizar em um patamar de temperatura, ou no máximo apresentar pequenas variações dentro deste limite independente da continuação do funcionamento.

Foram ensaiados duas condições de vazões, e os valores extrapolados para as demais. Arbitrariamente foram escolhidas as vazões de $0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$ para a bomba funcionando sem cavitação e a vazão de $0,0719 \text{ m}^3/\text{s}$ para a bomba funcionando com cavitação moderada. Nestes dois ensaios foram medidas as temperaturas em função do tempo.

Nas figuras 6.24 e 6.25, são ilustrados o comportamento do aquecimento do mancal nos dois posicionamentos de medições.

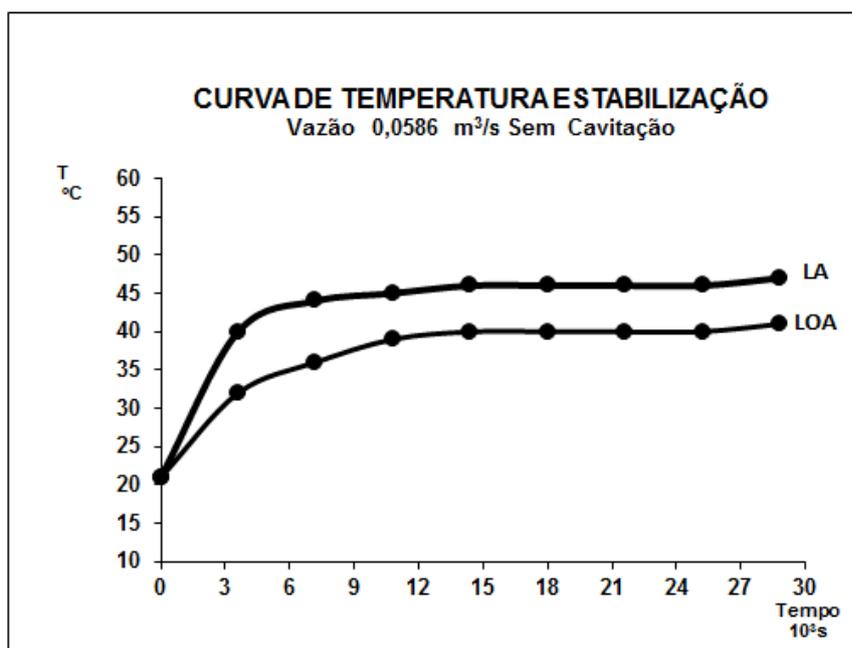


Figura 6.24 – Temperatura de estabilização sem cavitação

Fonte: Schröder, 2015

A temperatura no mancal nos lados acoplado e oposto ao acionamento para a bomba funcionando em condições regulares, mostraram uma elevação rápida nas duas primeiras horas de operação, correspondendo a praticamente 90% da temperatura final após 8 horas. A partir da terceira hora até a quarta, o incremento foi discreto, cerca de 1 grau para ambos os lados do mancal. Da quinta até a oitava hora, a tendência de equilíbrio da temperatura é manifestada por um aumento de somente 1 grau em ambas as posições, levando-se a generalizar que a partir deste período não haveria mais aumento da temperatura, ou se houvesse, que seria insignificante num tempo infinito de operação, desde que mantidas as condições hidráulicas e ambientais do sistema. Como tempo suficiente para

estabilização da temperatura do mancal, adotou-se a quarta hora de operação ou seja, na execução dos demais ensaios a bomba centrífuga irá operar neste período sendo realizadas medições dos parâmetros respectivos a cada 30 minutos conforme descrito no método.

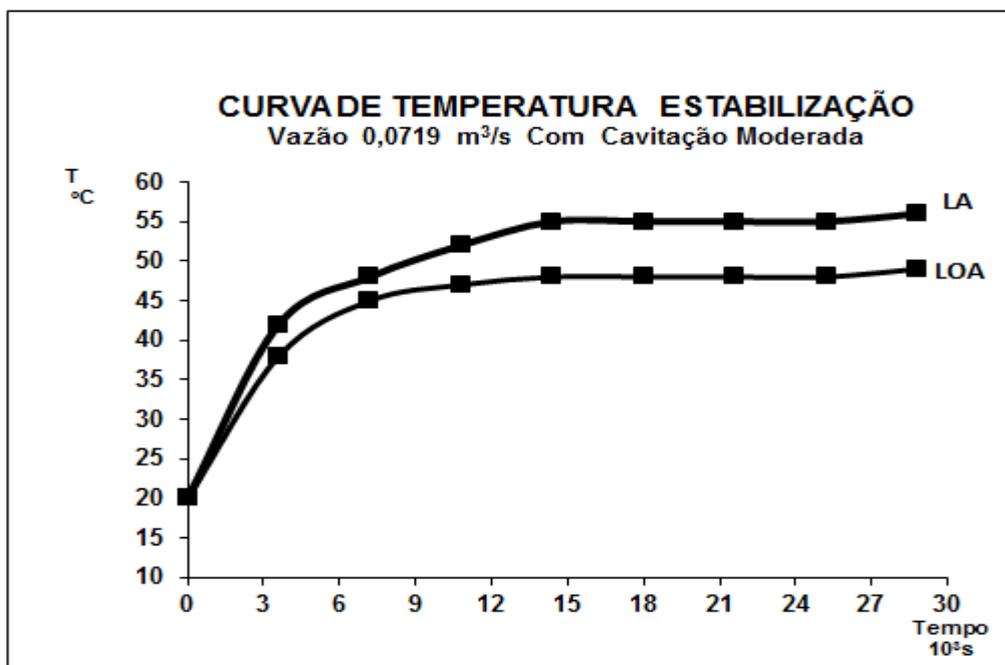


Figura 6.25 – Temperatura de estabilização com cavitação moderada

Fonte: Schröder, 2015

A temperatura no mancal nos lados acoplado e oposto ao acionamento para a bomba funcionando com cavitação moderada, mostraram uma elevação rápida nas duas primeiras horas de operação, correspondendo a praticamente 90% da temperatura final após 8 horas.

A partir da terceira hora até a quarta, o incremento foi maior que do teste anterior, cerca de 3 graus em LA e um grau em LOA. Da quinta até a oitava hora, a tendência de equilíbrio da temperatura é manifestada por um aumento de somente 1 grau em ambas as posições, levando-se a generalizar que a partir deste período não haveria mais aumento da temperatura, ou se houvesse, seria desprezível desde que mantidas as condições hidráulicas e ambientais do sistema.

Como parada optou-se pela finalização dos demais ensaios, na quarta hora de operação, sendo executadas medições a cada 30 minutos nestas etapas.

6.6 EROSÃO DO ROTOR

Foram realizados dois ensaios específicos para erosão do rotor em ferro fundido nodular, em substituição ao de aço inoxidável que serviu para realização de todos os outros testes. Por se tratar de material mais resistente, o rotor de aço inoxidável não sofreu erosão que pudesse comprometer o nível de vibração por exemplo, na análise dos parâmetros da bomba sem cavitação e com cavitação moderada. Por outro lado, para o teste de erosão seria necessário um tempo de exposição muito grande com o uso do rotor em inox, para detectar perdas de massa significativa. Optou-se então pela montagem de um rotor em ferro fundido nodular, e foi estabelecido um tempo de 150 horas para cada ensaio.

O primeiro ensaio de erosão foi executado com uma tubulação de sucção de 0,15 m de diâmetro, a mesma das demais etapas, que proporcionou uma velocidade da água de 3,3 m/s no flange de sucção da bomba, com duração de 150 horas. Com esta velocidade, a perda de material não foi muito significativa com a bomba operando em níveis de cavitação moderada. Conforme TOMÁS (1986) é necessário uma combinação de intensidade do fenômeno com uma velocidade mínima, de difícil determinação, para que ocorra um desgaste expressivo do rotor e outros componentes. Baseado nesta previsão, foi substituída a tubulação de sucção por uma de 0,10 m de diâmetro na sucção, que gerou uma velocidade da água, de 7,5 m/s, talvez até superior a mínima, visto que não foram testados outros diâmetros com velocidades diferentes. Foi executado novamente um ensaio com 150 horas de duração. Os valores das grandezas monitoradas e dos parâmetros potência consumida, rendimento e ruídos estão nas tabelas 6.25 e 6.26 com ilustração de 28 medições das 150 executadas, com os respectivos diâmetros das tubulações, para a vazão selecionada de $0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$.

Em função do próprio tempo para o teste de erosão, bem como da utilização de somente um rotor em ferro fundido nodular, o ensaio é limitado a somente esta vazão.

Tabela 6.25 – Erosão do rotor com tubulação de sucção de 0,15 m de diâmetro

D _s m	L m	Q m ³ /s	V _s m/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Δ Ht %	Ruído dB	Pc kW	Rend. %
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,3	-10,8	113,9	-11,0	86,8	19,7	61,4
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,0	-10,5	113,9	-11,2	86,7	19,7	61,3
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,1	-10,6	113,5	-11,3	86,7	19,6	61,5
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,4	-10,9	113,4	-11,2	86,8	19,7	61,3
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,0	-10,5	113,0	-11,6	86,9	19,7	61,0
0,15	1,20	0,0586	3,3	-73,9	-10,4	113,7	-11,3	86,6	19,6	61,5
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,0	-10,5	113,7	-11,3	86,5	19,6	61,6
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,4	-10,9	113,1	-11,3	86,9	19,7	61,2
0,15	1,20	0,0586	3,3	-73,8	-10,3	113,0	-11,6	87,0	19,8	60,7
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,1	-10,6	113,2	-11,4	86,9	19,7	61,1
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,4	-10,9	112,9	-11,4	86,6	19,8	60,8
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,3	-10,8	113,4	-11,3	86,4	19,7	61,3
0,15	1,20	0,0586	3,3	-73,7	-10,2	113,9	-11,3	86,4	19,7	61,2
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,1	-10,6	113,5	-11,3	86,7	19,8	60,9
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,4	-10,9	112,8	-11,5	86,5	19,6	61,4
0,15	1,20	0,0586	3,3	-73,8	-10,3	112,9	-11,7	86,3	19,7	61,0
0,15	1,20	0,0586	3,3	-73,9	-10,4	113,6	-11,3	87,0	19,7	61,2
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,3	-10,8	113,8	-11,1	86,1	19,6	61,7
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,4	-10,9	113,0	-11,4	86,9	19,9	60,5
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,2	-10,7	112,7	-11,6	86,6	19,8	60,7
0,15	1,20	0,0586	3,3	-73,9	-10,4	112,7	-11,7	86,3	19,9	60,3
0,15	1,20	0,0586	3,3	-73,9	-10,4	113,4	-11,4	86,3	19,7	61,1
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,0	-10,5	113,7	-11,3	86,2	19,6	61,6
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,4	-10,9	113,0	-11,4	86,2	19,6	61,5
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,1	-10,6	112,7	-11,6	86,8	19,7	61,0
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,2	-10,7	112,9	-11,5	86,1	19,7	61,1
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,0	-10,5	113,4	-11,4	86,4	19,7	61,2
0,15	1,20	0,0586	3,3	-74,1	-10,6	113,8	-11,2	86,1	19,8	61,0

Fonte: Schröder, 2015

Ajustando-se a vazão de 0,0586 m³/s pela válvula de controle na sucção e recalque, não houve variações inferiores ou superiores a 0,000278 m³/s durante o ensaio de 150 horas com a tubulação de sucção de 0,15 m de diâmetro, sendo verificada a vazão no medidor de vazão eletromagnético e registrada a cada hora.

As grandezas e parâmetros do teste de erosão mantiveram-se muito próximos da média do ensaio de cavitação moderada para esta vazão conforme listados abaixo:

a) Pressão de sucção média de 74 kPa no teste de erosão e ensaio com cavitação moderada de 77 kPa;

b) Diferença entre NPSH disponível e requerido de 11 kPa no teste de erosão e ensaio com cavitação moderada de 15 kPa;

c) Queda na altura de elevação desenvolvida pela bomba no teste de erosão de 12 % e ensaio com cavitação moderada de 15 %;

d) Nível de ruído de 86 dB no teste de erosão semelhante ao ensaio de cavitação moderada;

e) Potência consumida de 19,7 kW no teste de erosão e ensaio de cavitação moderada com 19,9 kW.

Todas as grandezas e parâmetros mostraram-se convergentes com o experimento de cavitação moderada com a mesma tubulação de sucção empregada. O rotor de ferro fundido nodular com massa inicial de 5.446 g sofreu uma perda de 12 g após 150 horas de operação com cavitação moderada com velocidade média da água de 3,3 m/s na sucção. Tal redução equivale a uma taxa de 80 mg/h, valor este que pode ser comparado com um ensaio de KITTREDGE(1961) de 112 mg/h para o material de ferro fundido cinzento, com uma menor resistência mecânica, em um nível de cavitação gerada por aparelho vibratório que embora não seja especificado provavelmente seria classificado como incipiente. Esta pequena perda de massa de 80 mg/h do experimento para o nível de cavitação moderada pode ser explicada pela velocidade da água estar abaixo do valor mínimo.

Em função deste resultado, procurou-se uma alternativa para elevar a velocidade da água na sucção através da redução do diâmetro da tubulação e comprovar a hipótese da velocidade mínima.

Tabela 6.26 – Erosão do rotor com tubulação de sucção de 0,10 m de diâmetro

D_s m	L m	Q m^3/s	v_s m/s	Pfs kPa	Δ NPSH kPa	Pfr kPa	Δ Ht %	Ruído dB	Pc kW	Rend. %
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,0	-9,0	116,5	-12,4	87,2	19,7	60,5
0,1	1,70	0,0586	7,5	-78,9	-8,9	116,1	-12,6	87,4	19,7	60,3
0,1	1,70	0,0586	7,5	-78,8	-8,8	115,6	-12,8	87,1	19,6	60,5
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,2	-9,2	115,0	-12,9	87,5	19,8	59,8
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,1	-9,1	114,9	-13,0	87,2	19,7	60,0
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,3	-9,3	115,3	-12,7	87,3	19,8	59,9
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,4	-9,4	114,9	-12,9	87,5	19,8	59,8
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,0	-9,0	115,6	-12,7	87,0	19,8	59,9
0,1	1,70	0,0586	7,5	-78,8	-8,8	115,3	-13,0	87,7	19,7	60,1
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,4	-9,4	115,8	-12,5	87,2	19,8	60,1
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,1	-9,1	115,9	-12,6	87,3	19,8	60,0
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,4	-9,4	114,7	-13,0	86,9	19,7	60,1
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,3	-9,3	115,2	-12,8	87,1	19,8	59,9
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,0	-9,0	115,8	-12,7	87,2	19,9	59,7
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,2	-9,2	115,3	-12,8	86,9	19,8	59,9
0,1	1,70	0,0586	7,5	-78,9	-8,9	114,7	-13,2	86,8	19,8	59,6
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,3	-9,3	114,6	-13,0	87,3	19,9	59,4
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,2	-9,2	115,1	-12,9	86,9	19,5	60,8
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,4	-9,4	115,0	-12,8	87,5	19,6	60,5
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,0	-9,0	114,8	-13,1	87,4	19,5	60,6
0,1	1,70	0,0586	7,5	-78,9	-8,9	114,5	-13,3	87,1	19,3	61,1
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,0	-9,0	115,3	-12,9	86,9	19,5	60,8
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,0	-9,0	115,6	-12,7	86,8	19,6	60,5
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,3	-9,3	115,0	-12,9	86,8	19,5	60,8
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,0	-9,0	114,9	-13,0	87,2	19,6	60,3
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,2	-9,2	115,3	-12,8	86,9	19,5	60,8
0,1	1,70	0,0586	7,5	-79,1	-9,1	114,3	-13,3	86,9	19,6	60,2
0,1	1,70	0,0586	7,5	-78,9	-8,9	115,1	-13,0	87,3	19,7	60,0

Fonte: Schröder, 2015

Ajustado a vazão de $0,0586 \text{ m}^3/\text{s}$ pela válvula de controle na sucção e recalque, não houve variações inferiores ou superiores a $0,000278 \text{ m}^3/\text{s}$ durante o ensaio de 150 horas com a tubulação de sucção de 0,10 m de diâmetro, com a verificação de vazão pelo medidor de vazão eletromagnético a cada hora. As grandezas e parâmetros do teste de erosão mantiveram-se ainda próximos da

média do ensaio de cavitação moderada para esta vazão, exceto a velocidade do líquido.

O rotor de ferro fundido nodular após o primeiro ensaio com massa inicial de 5.434 g sofreu uma perda de 47 g após 150 horas de operação com cavitação moderada com velocidade média da água de 7,5 m/s na sucção. Tal redução equivale a uma taxa de 313 mg/h, valor este bem superior aos testes com materiais semelhantes em nível de cavitação incipiente. Para os testes com tubulações e velocidades diferentes na sucção, a perda de massa do rotor por erosão por cavitação moderada será registrada e analisada separadamente para ambas as condições e calculada uma média dos dois ensaios, para uma estimativa geral no resumo. As figuras 6.26 a 6.31 mostram o rotor novo de ferro fundido nodular antes do ensaio e no final do segundo ensaio com os locais preferenciais, formas e quantidades de pitting, do ataque da erosão por cavitação moderada e comentários específicos abaixo.



Figura 6.26 – Rotor de ferro fundido nodular antes do ensaio
Fonte: Schröder, 2015



Figura 6.27 – Rotor de ferro fundido nodular após 300 h de ensaio
Fonte: Schröder, 2015

O rotor de ferro fundido nodular antes de ser montado no eixo da bomba apresentava-se em geral com uma cor prateada sem micro furos visíveis na face do canal ou das aletas.

O rotor fotografado após 300 horas de operação com cavitação moderada, com duas fases de testes, a primeira com a tubulação de sucção com 0,15 m de diâmetro e velocidade da água de 3,3 m/s e com a tubulação de 0,10 m

de diâmetro e velocidade da água de 7,5 m/s apresentou um desgaste visível particularmente no centro e nas adjacências das aletas.

O rotor foi desmontado após os dois testes, contudo foi realizado somente medições de perda de massa no primeiro, sem registro fotográfico devido existirem somente alguns discretos pittings, não diferenciados pela resolução da máquina fotográfica utilizada.

Após o segundo ensaio, observam-se na parte central do disco do rotor e na face visível das aletas, as áreas preferenciais de ataque da erosão por cavitação.



Figura 6.28 – Erosão no canal e aleta do rotor

Fonte: Schröder, 2015



Figura 6.29 – Erosão no canal do rotor

Fonte: Schröder, 2015

Nesta figura 6.28 nota-se o aglomerado dos pitting gerados pela operação da bomba com cavitação moderada tanto na face da aleta como no canal do rotor. A cor amarelada dos micro furos é devido a forte oxidação que o ferro fundido nodular sofreu durante as implosões de bolhas vaporosas geradas pela severa cavitação imposta.

Os pittings no canal do rotor da figura 6.29 assumem formas irregulares dependendo do posicionamento, com menor ou maior profundidade das crateras. Usando a mesma fotografia da figura 6.29 com ampliação, pode-se verificar melhor a distribuição e geometria dos pitting na figura 6.30:

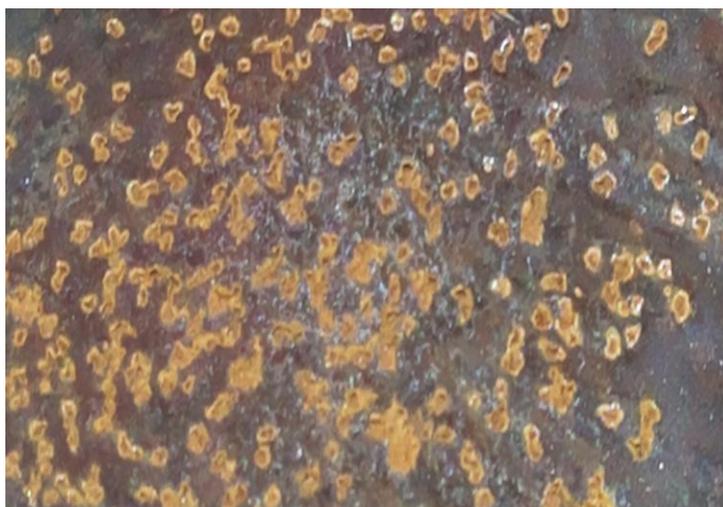


Figura 6.30 – Erosão com foto ampliada
Fonte: Schröder, 2015

Observa-se na distribuição dos pittings um pequeno espaçamento que permite distinguir a face não atacada, apesar de que com a continuação do ensaio provavelmente formaria uma grande cratera que finalmente acabaria perfurando o canal do rotor.



Figura 6.31 – Profundidade das crateras
Fonte: Schröder, 2015

Na foto 6.31 observa-se o detalhamento da profundidade de remoção de material bem como a cor azulada provocada possivelmente pelo efeito das altas temperaturas geradas pela implosão da bolha vaporosa.

A perda de massa apurada nas duas fases do ensaio de erosão estão discriminadas nas tabelas 6.27 e 6.28.

Tabela 6.27 – Taxa de perda de massa com $v = 3,3$ m/s

D_s m	L m	Q m^3/s	v_s m/s	Massa inicial g	Massa final g	Perda massa g	Tempo ensaio h	Taxa perda g/h	Carac.
0,15	1,20	0,0586	3,3	5446	5434	12	150	0,080	Cav. Moderada

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.28 – Taxa de perda de massa com $v = 7,5$ m/s

D_s m	L m	Q m^3/s	v_s m/s	Massa inicial g	Massa final g	Perda massa g	Tempo ensaio h	Taxa perda g/h	Carac.
0,10	1,70	0,0586	7,5	5434	5387	47	150	0,313	Cav. Moderada

Fonte: Schröder, 2015

A perda de massa durante a primeira fase com a tubulação de sucção com diâmetro de 0,15 m, com a bomba operando com cavitação moderada, foi da mesma ordem que para o aço carbono, com resistência mecânica um pouco superior ao ferro nodular conforme pesquisa de RIBEIRO (2007), com cavitação incipiente, o que motivou a pesquisar quais outros aspectos poderiam estar influenciando esta baixa perda de material com um nível bem mais severo de cavitação.

Conforme TOMÁS (1986), existe uma velocidade mínima de escoamento, abaixo da qual não se verifica erosão mensurável, o que aliado a análise visual do rotor após esta primeira fase, recomendou-se a substituição da tubulação de sucção por menor diâmetro, para atingir velocidades maiores no escoamento. Na segunda medição após mais 150 h de testes, verificou-se uma perda significativa, da ordem de 313 mg/h, comprovando a hipótese da velocidade mínima, sem no entanto determinar qual o valor desta.

Apesar do requerimento desta velocidade mínima, o modo de obtenção ainda não foi determinado de forma exata através de um equacionamento para nenhum dos materiais já ensaiados em várias pesquisas.

Restrição adicional para erosão do rotor deve-se ao método dos dois testes consecutivos onde o resultado do primeiro impacta no segundo, visto que

após o período de 150 horas é provável que exista uma diminuição da resistência mecânica do material do rotor que favoreça uma maior degradação no teste seguinte. Outro aspecto refere-se aos locais preferenciais de ataque por erosão por cavitação, onde neste trabalho observa-se uma região com pittings, correspondente a parte frontal da aleta, contrário a outros experimentos e estudos de casos de campo, onde a região preferencial de ataque é a parte traseira da aleta, ou não visível para quem da sucção observa.

Esta diferença talvez possa ser explicada pela alta velocidade na sucção devido à redução do diâmetro da tubulação. Esta redução proposital pode ter gerado uma velocidade muito maior que a mínima necessária para causar os danos por erosão e ocasionou um ataque em uma região diferente da observada em outras pesquisas.

6.7 RESUMO DOS PARÂMETROS AVALIADOS

Os resultados de todos os parâmetros avaliados com a bomba centrífuga operando com cavitação moderada para as diferentes vazões dos ensaios são mostrados nas tabelas 6.29 e 6.30 com as faixas de valores absolutos e relativos à condição da bomba com operação regular com análise em seguida.

Tabela 6.29 – Resultados médios dos parâmetros com valores absolutos

Erosão g	Pc kW	Rendim. %	Ruído dB	Temp. LA °C	Temp. LOA °C	Vibração Axial mm/s	Vibração 3HV mm/s	Vibração 3VV mm/s	Vibração 4HV mm/s	Vibração 4VV mm/s
59	21,4	59,3	90	53	47	0,85	2,63	3,73	1,23	2,14

Fonte: Schröder, 2015

Tabela 6.30 – Resultados médios dos parâmetros com valores relativos

Δ Erosão g/h	Δ Pc % maior	Δ Rendim. % menor	Δ Ruído % maior	Δ Temp LA % maior	Δ Temp. LOA % maior	Δ Vib. Axial % maior	Δ Vib 3HV % maior	Δ Vib. 3VV % maior	Δ Vib. 4HV % maior	Δ Vib. 4VV % maior
0,197	8	22	15	7	7	82	86	77	39	67

Fonte: Schröder, 2015

- A erosão do rotor foi avaliada em dois testes específicos denominados como erosão 1 ao executado com a tubulação de 0,15 m de diâmetro e erosão 2 com a tubulação de 0,10 m de diâmetro na sucção com variação significativa na velocidade de escoamento e medições posteriores a desmontagem. As taxas equivalentes de perdas de massa absoluta de 12 e 47 g correspondem a 80 e 313 mg/h. Na tabela 8.30 o valor expressa a média da perda de material em relação à massa original do rotor, de 59 g após 300 horas de ensaio, ou 0,197 g/h, das duas etapas do teste de erosão;

- A potência consumida em valores absolutos é diretamente proporcional às vazões selecionadas e o aumento percentual em relação à condição regular manteve-se com pequenas variações independente das vazões, na ordem de 8 % em média. Este valor corresponde a diferença entre as médias de 54 medições sem cavitação e com cavitação moderada, sendo nove medições para cada uma das seis vazões selecionadas. Mesmo procedimento é aplicado para o rendimento e ruído.

- O rendimento absoluto teve variação inversamente proporcional à vazão do ensaio, ou seja, quanto mais à direita da curva da bomba, ou maiores vazões, menor foi o rendimento com a operação com cavitação moderada. Os valores relativos à bomba operando com cavitação moderada foram inferiores em média 22% quando comparados com a bomba funcionando regularmente;

- Os níveis de ruídos com cavitação moderada foram proporcionais às vazões ensaiadas e apresentaram um aumento percentual quando comparados com a bomba operando sem cavitação, superior em 15% em média;

- As temperaturas finais no mancal após quatro horas de testes foram proporcionais às vazões sendo mais elevadas no lado acoplado do acionamento, característica de empuxo axial. Relativamente às temperaturas obtidas nos ensaios com a bomba sem cavitação, em ambos os lados ficaram praticamente 7% acima quando do funcionamento com cavitação moderada. Este valor corresponde a diferença entre as médias das medições finais da temperatura das seis vazões, com a bomba operando sem cavitação e com cavitação moderada.

- Os níveis de vibração com a bomba operando com cavitação moderada apresentaram-se superiores em todos os pontos coletados quando comparados com

o funcionamento sem cavitação. Os valores relativos correspondem a diferença das médias das duas medições realizadas com a operação sem cavitação e com cavitação moderada nas seis vazões selecionadas.

Apesar de que em todas as posições os sinais de vibração com cavitação moderada fossem superiores aos da bomba operando sem cavitação, estas diferenças não foram diretamente proporcionais às vazões ensaiadas. Parte destes desvios são devidos a própria aleatoriedade e sensibilidade do sinal de vibração e parte pode ser atribuído a média aritmética ter contemplado somente duas medições, ao contrário dos demais parâmetros baseados na média de três medições. Os picos de vibração ocorreram para todas as vazões ensaiadas, na frequência natural ou de rotação (29 Hz) e de passagem de pás (145 Hz) quando da bomba operando em cavitação moderada, sendo desprezíveis os valores em altas frequências. Tais resultados contradizem alguns estudos que sugerem a aparição de picos em frequências superiores a 1 kHz. É importante destacar que as medições foram obtidas com sinais de saída em amplitudes de velocidade e talvez os picos mencionados nas outras pesquisas sejam disponibilizados com amplitudes de aceleração da vibração, recurso não utilizado neste trabalho.

6.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Apesar da calibração de todos os instrumentos utilizados no experimento para assegurar que estes operassem dentro das características técnicas estabelecidas pelo fabricante, os erros de medições são inerentes ao processo e serão tratados resumidamente neste item.

É importante lembrar que as medições tiveram repetitividade com a adoção do mesmo procedimento, observador, instrumentos, local e sequência. As incertezas foram originadas principalmente por três motivos:

- 1 - Imprecisão dos instrumentos portáteis que efetuaram as medições principais de caracterização dos parâmetros. Estas imprecisões apresentam como dificuldade adicional o fato dos aparelhos medirem grandezas diferentes como pressão, vazão, potência, ruído, temperatura e vibração.

Para estimativa da incerteza padrão combinada (I_{pc}) destas medições será usada a expressão generalizada da equação (30), conforme GONÇALVES (2001):

$$I_{pc} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_p^2} \quad (30)$$

Sendo I_p a incerteza padrão das medidas obtidas pelos respectivos instrumentos.

As precisões dos transdutores de pressão de sucção/ recalque (0,2 e 0,1%), de vazão (0,25%) e do analisador de energia (1,0%) são disponibilizadas pelo fabricante conforme capítulo do experimento, contudo para quatros outros instrumentos serão adotados critérios para transformação da precisão nesta proporção:

A balança eletrônica de + - 0,5 g para precisão de 1%, valor compatível com a faixa de medição;

O decibelímetro, de + - 1 dB para precisão de 1,0% valor compatível com a faixa de medição;

O termômetro infravermelho, de + - 1°C para precisão de 2,0% , valor compatível com a faixa de temperaturas do experimento;

O analisador de vibração, apesar de representar uma tecnologia avançada, não oferece um parâmetro básico de precisão em suas características, sendo adotado então um valor estimado de 1,0% para os sinais filtrados na frequência de medição, conforme orientações do fabricante.

A solução da equação traduz em uma precisão parcial de 2,8% corresponde aos instrumentos portáteis utilizados no experimento simultaneamente conforme explicado no capítulo do método.

2 - Erros de interpolação do observador das medições nos instrumentos como analisador de energia, transdutores de pressão e vazão, decibelímetro, termômetro infravermelho e analisador de vibração. Além disto, a simultaneidade de leitura não é absoluta, requerendo cerca de três minutos para fechamento do

procedimento. Estas observações demonstram a dificuldade de quantificar este valor, entretanto devido a necessidade de uma estimativa, será adotado um valor de 3% para cada medição ou uma precisão parcial de 7,9% conforme a mesma equação (30).

A adoção de 3% foi baseado numa amostra de dez medições de potência consumida em um dos pontos de operação cuja média foi 20,9 kW com variação entre 20,6 (- 1,5%) e 21,2 (+1,5%), realizado especificamente para a estimativa estatística.

3 - Erros de arredondamento no cálculo das grandezas indiretas como velocidade, perdas de carga, NPSH, altura de elevação, e rendimento exigidas na formulação dos resultados além da adoção de constantes de rugosidade e fatores de perda de carga localizada. Para tais medições indiretas calculadas por expressões matemáticas será considerado uma precisão parcial de 5,0%. A adoção de 5% é uma estimativa da expressão de CAVALCANTI (2014):

$$Erro < 0,5 * 10^{-t+1} \quad (31)$$

Sendo t o número de dígitos dos cálculos das grandezas estabelecidas (dois algarismos significativos).

Utilizando a equação (30), a combinação destes três principais grupos de incertezas levam a um valor de 9,8% de imprecisão das grandezas cujas medições foram tratadas neste capítulo de resultados. É uma imprecisão relativamente alta mas compatível com a complexidade instrumental e matemática do experimento do trabalho.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

As medições obtidas nas sete etapas do experimento e o tratamento das grandezas e parâmetros envolvidos permitiram traçar correlações com a bomba operando sem cavitação e em regime de cavitação moderada com o propósito de oferecer uma ferramenta de diagnóstico confiável para classificação dos riscos associados.

Os valores práticos podem servir para aumentar o conhecimento do fenômeno que apesar das instabilidades decorrentes nesta condição, foram sistematicamente ordenados em faixas que corresponderam a uma tendência nos ensaios. Tais referências evidentemente são melhores identificados em bombas centrífugas com semelhantes valores da rotação específica e que servem para a tomada de ações corretivas que abrangem desde mudanças parciais na instalação de sucção, alterações do acionador da bomba ou mesmo substituição de todo o conjunto devido impossibilidade de suprimir a cavitação no sistema.

Estes resultados são particularmente importantes como marcadores do nível de cavitação moderada entretanto só podem ser utilizados para comparação com configurações hidrodinâmicas semelhantes ao do experimento e outras características do líquido bombeado, material do rotor e velocidade do acionador.

1 - Este trabalho concluiu que a taxa de perda de massa do rotor da bomba operando com cavitação moderada equivale em média a 0,197 g após 300 horas totais de testes para o material de ferro fundido nodular.

Este valor corresponde a uma redução de aproximadamente 16% em relação à massa original de um rotor de bomba centrífuga operando 12 horas por dia durante um ano, regime de trabalho comum em indústrias e aplicações de utilidades. O resultado deste parâmetro pode ser utilizado para a caracterização de operação com cavitação moderada.

2 - A potência consumida com a bomba operando com cavitação moderada foi para todas as vazões dos ensaios, superiores a potência da bomba sem cavitação. Esta elevação ocorreu com pequenas variações na faixa dos testes reforçando o princípio de que a carga acionada tem um aumento proporcionado pelo funcionamento com cavitação, contrário a algumas pesquisas que afirmam que ocorre uma redução na potência consumida durante a operação com cavitação. Os valores relativos de potência consumida com cavitação moderada em média 8% superiores a condição regular, ficaram no limite da tolerância adotada na norma ISO 9906 grau 2B de 8%. Considerando também a precisão adotada deste parâmetro no capítulo de tratamento de erros, a variação da potência consumida pode ser utilizada para diagnose em campo.

3 - A queda no rendimento da bomba operando com cavitação moderada comparada com o funcionamento sem cavitação é resultado da combinação da redução da altura de elevação e instabilidades do fluxo como recirculações e turbulências geradas pela implosão de bolhas vaporosas. A redução do rendimento é muito significativa, em média 22%, para todas as vazões ensaiadas e muito superior a tolerância da norma ISO 9906 grau 2B de - 5%. Esta variação no rendimento pode ser usada como indicativo da condição insatisfatória de operação da bomba com cavitação moderada.

4 - Os níveis de ruídos para todas as vazões ensaiadas da bomba com cavitação moderada apresentaram um aumento médio de 15% em relação à bomba sem cavitação. Em valores absolutos estes níveis sempre estiveram acima de 87 dB ou superior a recomendação da norma ISO 1999. Esta variação confirma a utilização deste parâmetro como ferramenta de diagnose em campo.

5 - O aumento da temperatura em ambos os lado do mancal refletiram os esforços mecânicos adicionais embora com pequena magnitude. A explicação pode

ser devida ao dimensionamento do mancal que garante funcionamento para faixas maiores de vazões e pressões onde os empuxos axiais e radiais desta condição ocasionam faixas de temperaturas superiores às do experimento. Apesar da elevação absoluta da temperatura não corresponder a referência adotada para redução da vida útil dos rolamentos, ainda assim esta variação superior de 7% em relação a temperatura do mesmo mancal sem cavitação da bomba, pode servir de base como ferramenta de diagnose e previsão de uma redução proporcional no tempo de vida útil dos rolamentos de aproximadamente 12%.

6 - Os maiores níveis absolutos de vibração com o funcionamento com cavitação moderada foram medidos na posição 3VV, ou, do lado acoplado ao acionamento na vertical, com valor médio de 3,73 mm . Valor este insatisfatório conforme a norma ISO 2372. Esta referência pode ser utilizada para classificação da cavitação moderada e diagnóstico.

Os sinais nas outras posições axial, 3 e 4 (acoplado e oposto ao acoplamento) mantiveram-se abaixo dos valores desta recomendação, apesar de muito superiores aos níveis da bomba operando sem cavitação, e portanto não podem ser utilizados como referências para caracterização da bomba operando com cavitação moderada.

Os prováveis danos gerados pela combinação de desvios dos parâmetros analisados quando da bomba operando com cavitação moderada permite afirmar que as ações corretivas para minimizar ou extinguir as causas desta condição, devem ocorrer no curto prazo ou corre-se o risco de prejuízos materiais e até mesmo acidentes se mantiver esta operação.

Apesar da dificuldade de estimar quais serão os maiores danos, é possível prever efeitos como desbalanceamento do rotor por perda de massa , aumento do custo de energia por perda de rendimento, aumento do risco de segurança ocupacional pelos ruídos gerados, falha mecânica pelo aumento da temperatura do mancal e quebras de componentes e desalinhamento do conjunto motor e bomba pela excessiva vibração.

CAPÍTULO 8

RECOMENDAÇÕES

O fenômeno da cavitação ainda requer muita pesquisa e experimentos para elucidação. Contudo alguns direcionamentos podem melhorar a análise se elaborados de forma conjunta, como foi executado neste trabalho.

- A erosão do rotor requer necessariamente a realização de ensaios com diferentes materiais de fabricação utilizados normalmente em bombas centrífugas para fins industriais e de utilidades como aço inoxidável, alumínio, bronze, e outras ligas. Outro aspecto a ser investigado da erosão do rotor refere-se a velocidade mínima do líquido na sucção o que exige vários ensaios com configurações hidráulicas que permitam a obtenção desta relação.

- A vibração como ferramenta de diagnóstico de campo é amplamente utilizada, sendo praticamente sinônimo de manutenção preditiva. Neste trabalho foram realizados somente duas medições para cada condição de operação, sem cavitação e com cavitação moderada. Outras medições utilizando diferentes faixas de frequências e com amplitudes medidas em aceleração podem refletir algumas particularidades do espectro de vibração que não foram verificadas neste trabalho.

Existem ainda variáveis não exploradas neste trabalho que merecem atenção nas próximas pesquisas com a finalidade de dirimir dúvidas já levantadas em artigos sem a devida comprovação experimental, a saber:

- A influência da altura de elevação desenvolvida pela bomba centrífuga nos efeitos da cavitação com ensaios que possibilitem uma maior faixa de operação com média e alta pressão obtida por variação de rotação do acionador;

- A influência da temperatura da água bombeada através de experimentos que possibilitem o aquecimento desta e façam simular as aplicações industriais com a bomba operando com cavitação.

Todos os parâmetros analisados mostraram-se relacionados à cavitação moderada de modo que podem ser utilizados como ferramenta de diagnose da intensidade do fenômeno e instrumento da tomada de decisões sobre as ações corretivas necessárias, sejam elas para eliminar ou minimizar as causas geradas na instalação, operação ou na própria bomba centrífuga. A utilização total ou parcial dos parâmetros como marcadores da cavitação moderada possibilita melhorar a confiabilidade do diagnóstico além de ser flexível conforme a disponibilidade de recursos da manutenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABECASIS,F.M.; Proteção contra erosão de cavitação em obras hidráulicas.Lisboa:Editora Inec, 74 p.,1970.

ABSi;Catálogo de produtos.Disponível em www.absi.com.br/produtos.asp acessado em jul 2014.

ADAM; Catálogo de produtos.Disponível em www.adamequipment.com acessado em jul 2014.

ALFAKIT; Catálogo de produtos.Disponível em www.alfakit.com.br acessado em jul 2014.

ALFAYEZ, L., e MBA, D.; Detection of incipiente cavitation and determination of the best efficiency point for centrifugal pumps using acoustic emission. Institution of Mechanical Engineers, vol.219, 20p., nov 2005.

API 610 11^o th; American Petroleum Institute, Typical pumps vibration levels, 2010.

API 615; American Petroleum Institute, Sound control of mechanical equipment for refinery services,1973.

ARNDT,R.E.A.IPPEN,A.T.; Rough surface effects on cavitation inception.USA: Journal Basic Engineering ,1968.

BACHERT,R. et al; Unsteady cavitation at the tongue of the volute of a centrifugal pump.Mulheim: Journal of Fluids Enginnering, 6p.,jun 2010.

BISTAFA,S.R.; Mecanismos de erosão gerados pela cavitação.Encontro sobre oscilatórios em equipamentos hidromecânicos,EFEI: Itajubá,p1-18,1994.

BORDEASU, I. et all; Research on Cavitation Erosion Behavior of Stainless with constant Chromium and Variable Nickel Content. International Conference on Production Engineering,8p.,2011

BOUZIAD, Y. A.; Physical Modelling of Leading Edge Cavitation: Computational Methodologies and Application to Hydraulic Machinery. Lausanne: Ecole Polytechnique Federale, 186p., (These, Docteur es Sciences) 2006.

BREGLIOZZI, G. et al; Cavitation wear behavior of austenitic stainless steels with different grain sizes. Disponível em www.sciencedirect.com acessado em mar 2013 .

BRUSANTIN. Catálogo de produtos. Disponível em www.brusantin.com.br acessado em jul 2014.

CANAVELLIS, R.L.; Etude d'un critère de fiabilité vis à de l'érosion par cavitation dans les pompes. Montreal: 1968.

CAVALCANTI, J; Cálculo numérico. Campo Grande: UFCG, 67p., Apostila. 2014.

CERNETIC, I.; The Use of Noise and Vibration Signals for Detecting Cavitation in Kinetic Pumps. Ljubljana: University of Ljubljana, p1645-1655, 2009

CETESB; Características de águas superficiais. Disponível em www.cetesb.sp.gov.br acesso em jul 2014.

CHAN, W.K.; Correlation between cavitation type and cavitation pumps. Singapore: Technical note. School of Mech. And Prod. Eng. 3p., 1990.

COELHO, W. R.; Análise do Fenômeno de Cavitação em Bomba Centrífuga. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", 234p., (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica) 2006.

COMBES, J.F. et al; Experimental and Numerical Investigations of the Radial Thrust in a Centrifugal Pump. Honolulu: International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, 2008.

CONAUT; Catálogo de produtos. Disponível em www.conaut.com.br acessado em jul 2014.

COOPER,P. et al; Elimination of cavitation related instabilities and damage in high energy pumps impeller.Texas,USA: 8º International pump users symposium, 1991.

CUDINA, M. e PREZELJ,J.; Applied Acoustic.Detection of cavitation in operation of kinetic pumps.Use of discrete frequency tone in audible spectra.Disponível em www.elsevier.com/locate/apacoust, acessado em fev 2013.

DARCY-WEISBACH; Recherches experimentales relative au movement de L'Eau dans les Tuyaux. Paris. Mallet Bachelier,268 p.,1857.

DALFRÉ FILHO, J.G.; Desenvolvimento de Equipamento para Avaliação de Erosão por Cavitação. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, 97 p., (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil) 2002.

DELGOSHA, O.C. et al; Experimental and numerical studies in a centrifugal pump with two dimensional curved blades in cavitating condition. Darmstadt: vol.125, p970-978,nov 2003.

DING,H. et al;Demonstration and validation of a 3D CFD simulation tool predicting pump performance and cavitation for industrial applications. Journal of Fluids Engineering, vol. 133, jan 2011.

EISENBERG, P.; Research in Hydrodynamics. Washington: Hydronautics, 101p.,1963.

EMERSON; Catálogo de produtos.Disponível em www2.emersonprocess.com/pt-br acessado em jul 2014.

EPAMINONDAS, L.P.; Mecânica das Bombas. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 610 p.,2003.

EVANS,J.; A largery misunderstood phenomenon. Disponível em <http://www.pumped101.com> acessado em mar 2013.

FACEIRA, L.; Problemática da Cavitação. Lisboa: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 61p., (Doutoramento em Eng. Civil) 1982.

FARKAS, I. e PANDULA, Z.; Problems with Conventional Vibration Measurements by Detection of Cavitation Operating of Centrifugal Pumps. Disponível em: <http://spiedl.org/terms> acessado em dez 2012.

FARHAT, M., CHAKRAVARTY, A., FIELD, J.E.; Luminescence from Hydrodynamic Cavitation. Disponível em: <http://rspa.royalsocietypublishing.org> acessado em out 2012.

FISHER; Catálogo de produtos. Disponível em www.fischer.co.uk acessado em jul 2014.

FLUKE; Catálogo de produtos. Disponível em www.fluke.com/fluke_brasil acessado em jul 2014.

FRANC, J. P. e MICHEL, J. M.; Fundamentals of Cavitation. Saint Martin: Kluwer Academic Publishers, 2004.

FRANZ, R.J. et al; On the effect of cavitation on the radial forces centrifugal pump; Pasadena: California Institute of Technology, 1985.

FUKUSAKO, S e ARIE, M.; Performance Tests of a Centrifugal Pump. The Iowa Institute of Hydraulics Research, 1967.

GONÇALVES, A.A.; Apostila de Metrologia. Florianópolis: Departamento de engenharia Mecânica da UFSC, 2001.

GREIN, H.; WYSS, E.; Cavitation an overview. Zurich: Sulzer research, 1974.

GULICH, J.F.; Centrifugal Pumps-Sulzer Pumps. Heidelberg: Springer Verlag, 923p., 2008.

HARIHRA, P.P., e PARLOS, A.G.; Sensorless detection of cvitation in centrifugal pumps. Chicago: International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2006.

HARVEY, E.N.; On cavity formation in water. USA: Journal Applied Physics. p.72, 1947.

HYDRAULIC INSTITUTE; Standards for Centrifugal, Rotary and Reciprocating Pumps, 13^a ed, USA, 1975.

ICEL; Catálogo de produtos. Disponível em www.icel-manaus.com.br acessado em jul 2014.

INSTRUTHERM; Catálogo de produtos. Disponível em www.instrutherm.com.br acessado em jul 2014.

IRD; Institut de Recherche et Développement, 1964.

ISO 2372; International Organization for Standardization, Mechanical vibration of machines with operating speed from 10 to 200 rev/s, 1974.

ISO 2548 Class C; International Organization for Standardization, Centrifugal, mixed flow and axial pump – Code for acceptance tests, 1973.

ISO 3555 Clas B; International Organization for Standardization, Centrifugal, mixed flow and axial pump – Code for acceptance tests, 1977.

ISO 1999; International Organization for Standardization, Acoustics – Determination of occupational noise exposure and estimation of noise induced hearing loss, 1990.

ISO 9906 Grade 2B; International Organization for Standardization, Rotodynamic pumps – Hydraulic performance acceptance tests, 2012.

ISO 10816-1; International Organization for Standardization, Mechanical vibration evaluation machine vibration measurements on non-rotating parts, 1995.

IWAI, Y e OKADA, T.; Effect of Temperature on the Cavitation Erosion of Cast Iron. Elsevier Sequoia, 1983.

JUMO; Catálogo de produtos. Disponível em www.digitrol.co.br/transdutores acessado em jul 2014.

KARASSIK, I.J.; Centrifugal Pumps., USA: McGraw-Hill Book Cia, 1976.

KARIMI, A. Cavitation erosion of a duplex stainless steel, Materials Science and Engineering. Lausanne: vol 86, p191-203, 1986.

KHOROSHEV, G.A.; Pump Vibration Caused by Cavitation. Arlington: Armed Services Technical Information, 1960.

KITTREDGE, P.C. e COOPER. P.; Centrifugal Pump Performance. San Francisco: Editora McGraw-Hill, p2327-2392,1961.

KNAPP, R. T.; Cavitation. San Francisco: McGraw-Hill, 620p.,1970.

KONE,W.M. et al;Detection of cavitation in centrifugal pumps.Australien Journal of Basic and Applied Sciences,p.1260-1267.,2011.

KWOK, C.T; MAN, H.C; LEUNG, L.K.; Effect of temperature, pH and sulphide on the cavitation erosion behavior of super duplex stainless steel. Hong Kong: Elsevier, 10p.,1998.

LENCASTRE, A.; Manual de Hidráulica Geral. São Paulo. Egard Blucher, Editora da Universidade de São Paulo, 1972.

LEIGHTON,T.G.; The acoustic bubble.Southampton University, 2003

MACINTYRE, A.J.; Bombas e Instalações de Bombeamento. Rio de Janeiro: Editora Guanabara 2, 667p.,1980.

MARQUES. P. V.; Dano Cavitacional em Revestimentos Depositados por Aspersão Térmica a Chama. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica da Univ. Estadual de Campinas,161p.,(Tese, Doutorado em Eng.Mecânica) 1996.

MATTOS, E.E., e FALCO,R.; Bombas Industriais. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 474p.,1998.

McNULTY,P.J;DEEPROSE,W.M.; Cavitation noise in process pump. Editora Morgan, 1972.

MEULEN, Van Der; Boundary layer and cavitation studies of NACA.. Tokyo: 13º Symposium Naval Hydrodynamics 1986.

MINIPA; Catálogo de produtos.Disponível em www.minipa.com.br acessado em jul 2014.

MONTEIRO, F.B.M.; A cavitação em bombas centrífugas. São Paulo: Revista Tecnologia, 5 p.,1989.

MOODY,L.F; Friction factors for pipe flow.Asme.Princeton. 66 p.,1944.

MOUSSON, J.M.; Pitting resistance of metals under cavitation conditions. American Soc. Mech. Engineering, p.399-408.,1937.

NBR 10151; Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas, Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade, 2000.

NEPPIRAS. E. A.; Acoustic Cavitation. Bournemouth: Editora North-Holland Publishing Company, 251p.,2009.

NOHMI,M. et al;Cavitation CFD in a centrifugal pump.Osaka: 15º International symposium cavitation, 7 p.,2003.

OKAMURA,T.,MYASHIRO,H.; Cavitation in centrifugal pumps operating at low capacities.S.Francisco: ASME winter annual meeting.p243-251.,1978.

PCE; Catálogo de produtos. Disponível em www.pceiberica.es acessado em jul 2014.

PETERKA A.J.; The effect of entrained air on cavitation pitting. Mineapolis:Joint meeting paper IAHR,1953.

PFLEIDERER, H.P.; Máquinas de Fluxo. Rio de Janeiro: Editora LTC, 444p.1979.

PLESSET,M.S.CHAPMAN,R.B.; Collapse of na initialy spherical vapor cavity in the neighborhood of a solid boundary.USA:Journal Fluid Mech, p283-290,1971.

POHL M.; Cavitation erosion.Practical metallography, vol.33, p168-187, 1996

PORTO, R.M.; Hidráulica Básica. São Carlos: Editora EESC-USP, 519p.,2006.

POUFFARY, B et all; Numerical Simulation of 3D Cavitating Flows: Analysis of Cavitation Head Drop in Turbomachinery, disponível em www.asme.org/terms/ acessado em nov 2012.

PROMELSA; Catálogo de produtos. Disponível em www.promelsa.com.pe acessado em jul 2014.

RAYLEIGH LORD; On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. England: P. 94-98.,1917.

RBEM; Métodos de calibração de hidrofones. São Paulo: Apostila p.277-292,2007.

REYNOLDS, O; An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels. London: Royal Society, 174 pg.,1883.

RHEINGANS, C.K.; Cavitation in hydraulic turbines. Symposium on erosion and cavitation. Pittsburg: 1950.

RICHMAN, R.H. e McNAUGHTON, W.P.; Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals. Elsevier, vol.140, p63-81, feb 1990.

RIBEIRO, H.O.; Desenvolvimento de Ligas para Revestimentos por PTA Resistentes a Cavitação. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 139p., (Tese, Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) 2007.

SCANPUMP; ABSEL BRA Programa de bombas versão 1.7, 2009

SCHIAVELLO, B. e VISSER, F.C.; Pump cavitation – various NPSHr criteria, NPSHa, margins, and impeller life expectancy. Philipsburg: FlowservePump, p113-144, 2009.

SCHRÖDER, F.C.; Análise de rendimento e ruído de bomba centrífuga operando com cavitação incipiente, reduzida, moderada e desenvolvida. Revista de Engenharia e Tecnologia, V.7, nº 3, p73-89, Agosto 2015.

SCHRÖDER, F.C.; Relatório Técnico de Estudo de Casos de Bombas em Companhias de Águas e Esgotos e Indústrias de Papel e Celulose. Disponibilidade Restrita. Campinas: 2009.

SCHRÖDER, F.C.; LUCCA, Y.F.L.; DALFRÉ, FILHO, J.G.; Bearing Temperature effect analysis of centrifuge pumps operating with moderate cavitation. II Latin American Hydropower and Systems Meeting. La Plata. 14 p., 2015.

SLOTEMAN, A.; D. Cavitation in high energy pumps – detection and assessment of damage potencial. Proceeding of the 21st Internat. Pump Users ,2006.

SMAR; Catálogo de produtos,.Disponível em www.smar.com/brasil acessado em jul 2014.

SOMA; Catálogo de produtos. Disponível em www.lista.com.br/soma-termometro-digital acessado em jul 2014.

STEPANOFF, A.J.; Cavitation in centrifugal pumps with liquids other than water. USA, Journal Eng. Power. pg.79-90., 1963.

STINEBRING, D. R. et al; Developed Cavitation–Cavity Dynamics. Applied Research Laboratory, 1979.

STRABESBERG, M.; Gas bubbles as sources of sound in liquids. Paper of US Navy Bureau of Ships. 1956.

STUPARU, A. et al; A new approach in numeral assessment of the cavitation behavior of centrifugal pumps. Romania: International Journal of fluid machinery and systems, 10p., 2010.

SZKODO, M.; Mathematical Description and Evaluation of Cavitation Erosion Resistance of Material. Journal of Materials Processing Technology, 2005.

SWAMEE, P.K.; JAIN, A.K.; Explicit equations for pipe flow problems. Journal of the hydraulics division, p657-664, 1976

THOBIANI, A. et al; The Monitoring of Cavitation in Centrifugal Pumps based on the Analyses of Vibro-Acoustic Measurements. Stratford: University of Huddersfield, 10p., 2010.

TIMKEN; Catálogo de Rolamentos. Disponível em <http://www.timken.com/PT-BR/home.aspx>. acessado em jul 2014.

TOLEDO; Catálogo de produtos. Disponível em www.toledobrasil.com.br acessado em jul 2014.

TOMAS, M.T.C.D.L.G.; Estudo do Fenômeno da Cavitação, Implementação de Técnicas Experimentais. Porto: Centro de Engenharia Civil da Universidade do Porto, 426p., (Dissertação de Doutorado em Eng. Civil) 1986.

TOSHIBA; Catálogo de produtos. Disponível em www.motorsystem.com.br acessado em jul 2014.

TULLIS, J. P.; Cavitação em Sistemas Hidráulicos. São Paulo: CTH USP, Apostila, 1982.

TULLIS, J.P.; Hydraulics of Pipelines, Pumps, Valves, Cavitation, Transients. New York:John Wiley&Sons, 263p.,1982.

UFPR; Testes de Motores. Departamento de engenharia mecânica.Curitiba: Apostila.p.9-22, 2014.

UFSC; Apostila de Extensiometria.Grupo de análise e projeto mecânico.Florianópolis: 2004.

WEG; Catálogo de produtos. Disponível em www.weg.net/br/produtos acessado em jul 2014.

WESTERN; Catálogo e produtos. Disponível em www.western.etilux.com.br/catalogo acessado em jul 2014.

WHITESIDES,P.E.; Interesting facts and myths about cavitation.Disponível em www.PDHonline.org, acessado em jan 2013.

WILKINSON, E.V. et all; Cavitation effects on Pump Thrust Leading to Bearing Failures.Houston:ASME,1996.

WILSON,R.W., GRAHAM,R.; Conference on lubrication and wear.London: Institute of mechanic engineering, 1957.

WTKD; Catálogo de produtos. Disponível em www.wtkd.com.br acessado em jul 2014.

YEDIDAH, S.; Centrifugal Pump User's Guidebook. New York: Editora Chapman & Hall, 387p.1996.

YONG, W. et al; Prediction Research on Cavitation Performance for Centrifugal Pumps. Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering JiangSu University, 2009.