Dataset Reports 3:1 (2024)
ISSN 2965-1182

REVIEW ARTICLE

DATASET REPORTS

Problemas de cavitação e estratégias de prevenção

Cavitation issues and prevention strategies

Fabio José Buchedid Vazquez [a*], Julio Cesar Pavanelli Jacinto [b]

[a] Universidade Anhembi Morumbi, 03164-000, São Paulo, São Paulo, Brasil.
[b] Usina Lins, 16419-899, Lins, São Paulo, Brasil.

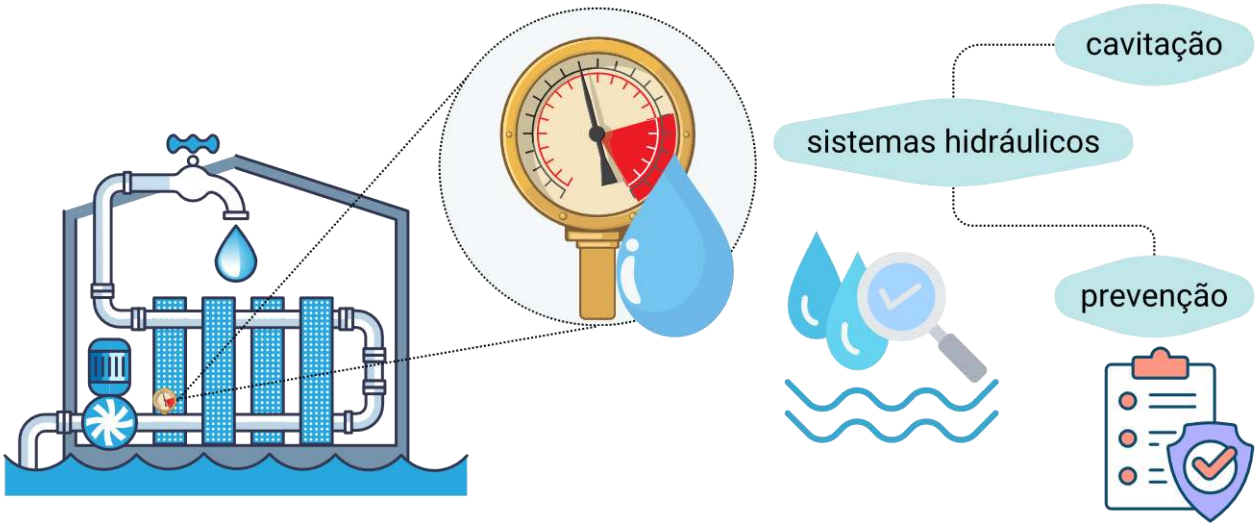
Resumo
A cavitação é um fenômeno físico que ocorre quando a pressão de um fluido cai abaixo da pressão de vapor, formando bolhas de vapor que implodem, causando danos a superfícies e componentes. Este artigo explora os problemas causados pela cavitação em sistemas hidráulicos e mecânicos, abordando suas causas, efeitos adversos e os desafios associados. A cavitação pode levar a danos significativos em componentes como bombas, hélices e válvulas, resultando em falhas operacionais e aumento de custos de manutenção. São discutidas também as estratégias de prevenção e controle, incluindo o uso de materiais resistentes, o design adequado de sistemas e a implementação de técnicas para minimizar os impactos da cavitação. O artigo visa fornecer uma visão abrangente sobre o fenômeno e oferecer soluções práticas para a sua mitigação.

Palavras-chave: Fenômeno de transporte. Cavitação. Prevenção. Sistemas hidráulicos. Danos.

Abstract
Cavitation is a physical phenomenon that occurs when the pressure of a fluid drops below its vapor pressure, causing the formation of vapor bubbles that implode, resulting in damage to surfaces and components. This paper explores the issues caused by cavitation in hydraulic and mechanical systems, addressing its causes, adverse effects, and associated challenges. Cavitation can lead to significant damage to components such as pumps, propellers, and valves, resulting in operational failures and increased maintenance costs. Prevention and control strategies are also discussed, including the use of resistant materials, proper system design, and techniques to minimize the impacts of cavitation. The paper aims to provide a comprehensive overview of the phenomenon and offer practical solutions for its mitigation.

Keywords: Transport phenomena. Cavitation. Prevention. Hydraulic systems. Damage.

Graphical Abstract



*Corresponding author: Fabio J. B. Vazquez. E-mail address: fabio.vazquez@gmail.com
Submitted: 21 November 2024; Accepted: 04 December 2024; Published: 05 December 2024.
© The Author(s) 2024. Open Access (CC BY 4.0).

ROYALDATASET

1. Introdução

A cavitação é um fenômeno complexo que ocorre em sistemas hidráulicos, caracterizado pela formação e colapso de bolhas de vapor em líquidos submetidos a pressões inferiores à pressão de vapor do fluido na temperatura de operação. Esse processo gera impactos significativos em sistemas de bombeamento, turbinas e outras instalações hidráulicas, com efeitos como erosão de materiais, redução de eficiência e ruídos característicos. Estudos como o de Abdala Neto et al. (2014) destacam o uso da cavitação hidrodinâmica em aplicações específicas, como no tratamento de água, onde o fenômeno pode ser controlado para fins benéficos, enquanto Ribeiro et al. (2010) analisam os danos causados pela cavitação em materiais, enfatizando a importância de ligas resistentes, como os aços inoxidáveis austeníticos.

No âmbito industrial, a cavitação é um desafio técnico que demanda atenção especial ao dimensionamento dos sistemas, escolha de materiais e métodos de manutenção preditiva. Segundo Almeida (2005), a confiabilidade de equipamentos hidráulicos está diretamente relacionada à identificação precoce de problemas por meio de ferramentas como a análise de vibração, que, conforme Almeida e Góz (1994), permite diferenciar sinais característicos da cavitação de outras falhas. Essas técnicas são cruciais para evitar danos irreversíveis e garantir o desempenho ideal dos sistemas.

Além disso, parâmetros como o NPSH (Net Positive Suction Head) desempenham um papel fundamental na prevenção da cavitação. Colt et al. (2006) destacam que a manutenção de uma pressão adequada no lado de sucção das bombas é essencial para evitar o colapso de bolhas e danos consequentes. A abordagem teórica apresentada por Fox et al. (2010) complementa essa perspectiva ao discutir os fundamentos da mecânica dos fluidos aplicados a sistemas hidráulicos, evidenciando a importância do controle das condições de operação.

Por fim, a implementação de programas de certificação, como os descritos pela SKF Reliability Systems (2005), reforça a necessidade de qualificação técnica para o monitoramento e manutenção de sistemas hidráulicos.

Este artigo tem como objetivo discutir os mecanismos da cavitação, os impactos associados e as estratégias para sua mitigação, contribuindo para a eficiência e durabilidade dos sistemas hidráulicos.

2. Metodologia

Este estudo foi conduzido por meio de uma revisão bibliográfica baseada em normas técnicas, artigos especializados e manuais de fabricantes, com o objetivo de identificar os principais fatores que influenciam a cavitação e as estratégias para sua mitigação. Foram analisados aspectos teóricos do fenômeno, como as condições de pressão que promovem a formação e colapso de bolhas, os danos causados aos materiais e a importância do NPSH (Net Positive Suction Head). Além disso, investigaram-se métodos preditivos, como análise de vibração, e medidas práticas de controle, incluindo a escolha de materiais resistentes e o dimensionamento adequado de sistemas hidráulicos. A síntese dessas informações fundamentou as recomendações apresentadas no artigo.

3. Resultados e Discussão

3.1 O que é cavitação e como ela pode ser controlada?

Nos processos de deslocamento de fluidos em "venturis", saliências, pás, condutos, rotores, carcaças ou qualquer componente hidráulico de turbo bomba ocorrem rarefações dele, isto é devido as pressões reduzidas, que podem baixar até a pressões de vapor do líquido na temperatura dada, ocorrendo inicialmente a vaporização do fluido apresentando-se na forma de pequenas cavidades ou bolsas ou bolhas daí o nome "cavitação". Em seguida estas cavidades se deslocam para regiões de maiores pressões, as dimensões das bolhas se reduzem rapidamente ocorrendo um "colapso", surgindo o ruído característico da cavitação identificado em turbo bombas e canalizações.

A erosão por cavitação e um fenômeno que ocorre nos materiais componentes das turbo bombas ou canalizações, ela e muito grave podendo inutilizar totalmente um ou todos os componentes. Para a turbo bomba as regiões mais atingidas são as de menor pressão (dorso das pás e entrada dos rotores), para as canalizações os pontos mais atingidos as são válvulas, reduções, expansões e qualquer ponto que possua um formato propício para a formação de baixas pressões (vácuo) como ângulos acentuados ou reentrâncias (ver **Fig. 1**).

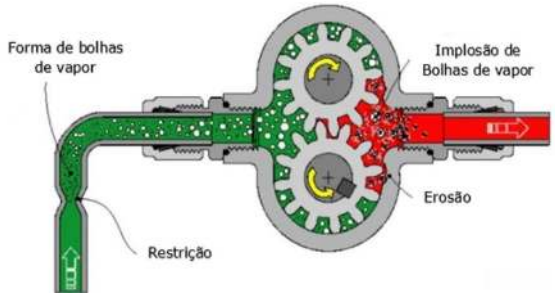


Fig. 1 Sistema hidráulico. Fonte: Luis Cyrino / Manutenção em Foco (2019).

Outros fatores que são prejudicados pela cavitação, podem ser descritos abaixo:

- ✓ Queda de rendimento hidráulico.
- ✓ Marcha irregular, trepidação, pulsação, vibração, desbalanceamento etc.
- ✓ Ruído.
- ✓ Corrosão por cavitação (por exemplo para a água a corrosão por cavitação varia com a temperatura, atingindo sua maior intensidade a 45 graus Celsius.)
- ✓ Erosão das partes onde ocorre a cavitação pela implosão das bolhas, caracterizado pelo descolamento ou desprendimento de partículas do material base.

3.2 Materiais a serem empregados para resistir a cavitação

É fundamental a escolha adequada do material a ser empregado na fabricação de uma turbo bomba, para que estas resistam os efeitos da cavitação por menor que seja. Podemos listar materiais em ordem crescente de capacidade de resistir a corrosão e erosão causados pela cavitação sendo estes basicamente listados na **Tabela 1**.

Tabela 1 Materiais usados para resistir a cavitação

		Material
R		Ferro Fundido
e	**C**	Alumínio
s	**r**	Bronze
i	**e**	Aço fundido
c	**s**	Aço doce laminado
t	**c**	Bronze fosforoso
ê	**e**	Bronze ao Manganês
n	**n**	Aços Siemen - Martin
c	**t**	Aços ao Níquel
i	**e**	Aços ao Cromo (12 % Cr.)
a		Ligas de Aço Inox (18 % Cr - 8 % Ni)

A rigor não existe material que não seja afetado pela cavitação. A resistência dos materiais e medida em laboratório,

realizando ensaios com período de tempo determinado e em condições críticas de cavitação que são simuladas e aceleradas, e após este período e quantificado a perda de peso por erosão das peças.

Alguns dados são mostrados na **Tabela 2** para um ensaio que durou 150 horas.

Tabela 2 Materiais usados em ensaio de cavitação e suas características

Material (% de componentes)						Dureza Brinell (kgf/mm^2)	Perda (gramas)
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo		
0.25	0.35	0.40	-	-	-	140	0.5155
0.28	0.45	1.50	-	-	-	185	0.2456
0.15	0.35	0.30	0.75	- 13.5	-	220	0.1751
0.08	0.45	0.65	9.00	17.0	2.5	180	0.0953

Recentemente tem-se empregado revestimentos de elastômeros (neoprene, borracha natural, borracha nitrílica, poliuretano, estireno - butadieno e outros) que apresentam ótima resistência à cavitação pois por serem materiais macios, possuem a característica única definida como "rebombeamento" que também da ótima resistência a abrasão.

Rebombeamento é uma propriedade que somente os materiais macios possuem., sendo definida como capacidade de absorver choques ou impactos, sofrendo somente deformação elástica e não plástica, devolvendo ou arremessando de volta as partículas sólidas (neste caso abrasão), ou absorvendo o impacto das bolhas que se colapsam (neste caso cavitação), fazendo assim um amortecimento.

3.3 Libertação do ar dissolvido na água

A água em contato com o ar a temperatura de 15 Graus Celsius e pressão atmosférica de 760 mm Hg contém gases em dissolução ocupando até cerca de 1,8% do seu volume.

Imagine esta água sendo aspirada ou succionada por uma turbo bomba, ocorrerá uma queda na pressão, quando esta estiver na seção do conduto de sucção até a entrada do rotor, neste percurso ocorrerá a liberação de parte dos gases dissolvidos que provoca uma agitação e formação de bolhas (fenômeno igual a água fervendo em um recipiente). Este fato concorrerá para que a seção de escoamento e descarga diminuam pela ocupação dos gases que se liberam, os quais irão alterar as condições hidrodinâmicas, afetando diretamente o rendimento hidráulico. Ou mais grave ainda poderá causar a parada de funcionamento do equipamento.

Por outro lado, experiências têm mostrado que a liberação de ar dissolvido e até mesmo a adição controlada de ar na sucção das turbo bombas, vêm a minimizar o efeito da cavitação, pois este ar faz um papel de "amortecedor" do choque da partícula (bolha). Também devemos analisar que uma bolha de ar diminui de volume com o aumento da pressão não extinguindo-se, e que uma bolha de vapor, implode rapidamente com o aumento de pressão extinguindo-se, esta última com efeitos destrutivos para as partes componentes de uma turbo bomba. (Portanto somente se atenua o efeito da cavitação quando temos ar dissolvido, ou gases incondensáveis, para gases condensáveis (vapores) estes multiplicam e amplificam o efeito cavitação).

3.3 Net Positive Suction Head - NPSH

O NPSH (Net Positive Suction Head), conhecido em português como APLS (Altura Positiva Líquida de Sucção), é um parâmetro fundamental no projeto e operação de sistemas de bombeamento. Ele representa a energia disponível no fluido para evitar cavitação ao entrar na bomba (Colt et al., 2006).

A fim de caracterizar as condições para que ocorra "boa aspiração" do líquido em instalações de bombeamento devemos verificar as condições de NPSH requerido e NPSH disponível ou "available".

3.3.1 NPSH requerido

Este parâmetro apresenta-se em função da característica da turbo bomba, e se refere a energia necessária requerida do líquido para chegar a partir do flange de sucção e vencer as perdas dentro da bomba até o ponto onde vai ganhar energia e ser recalcado. Este valor é fornecido pelo fabricante do equipamento geralmente através de uma curva em função da vazão, a qual é somente influenciada pelo diâmetro do rotor e rotação de trabalho, variando de forma crescente com o aumento da vazão.

3.3.2 NPSH disponível

Este é em função da característica do sistema referenciado ou em estudo, é influenciado somente pelo layout da instalação de sucção e se refere à energia que o líquido tem num ponto imediatamente anterior ao flange de sucção da turbo bomba. Este valor deve ser calculado para cada sistema e é influenciado pelos seguintes fatores:

- arranjo físico da instalação (layout).
- sucção positiva (bomba afogada).
- sucção negativa (bomba aspirando).
- altura da instalação em relação ao nível do mar.
- pressão adicional na sucção (tanque de sucção pressurizado ou submetido à vácuo).
- pressão de vapor do líquido (varia com tipo de líquido e também com a temperatura de trabalho).
- peso específico do líquido (também varia com a temperatura).
- perda de carga no trecho de tubulação de sucção à vazão de projeto.
- detalhes construtivos da instalação de sucção (especificamente em relação as dimensões do canal ou bacia de sucção, material empregado, tipo de válvula, conexões, velocidade do fluxo etc.).

Neste sentido, podemos definir que:

$$NPSHdisponivel = +Hs + \frac{Pe}{\gamma} + \frac{Patm}{\gamma} - \frac{Pv}{\gamma} + \frac{V^2}{2 * g} - \Delta hs$$

Onde:

Hs = altura estática de sucção em m; + bomba afogada - sucção positiva; - bomba succionando - sucção negativa.
Pe = pressão externa em kgf/m^2; + tanque pressurizado; - tanque à vácuo.
Patm = pressão atmosférica em função da altitude em relação ao nível do mar em kgf/m^2.
Pv = pressão de vapor a temperatura de projeto em kgf/m^2.
V = velocidade média do fluxo na sucção, referenciada ao diâmetro maior (m/s).
Δhs = perda de carga na sucção a vazão de projeto em m.c.a.
γ = ρ x g = peso específico do fluido a temperatura de projeto em kgf/m^2.
g = 9,81 (m/s^2) aceleração da gravidade.

Observações:

1. Para cálculo da pressão atmosférica ou barométrica ***Patm*** em kgf/m^2 (para a água a 4 °C e γ = 1,0 g/cm^3).

   $$Patm = 1 \times 10^4 * (1 - 2{,}257 \times 10^{-5} \times h)^{5{,}25}$$

   sendo ***h*** = altura em relação ao nível do mar em metros
2. Para outros valores de temperatura que não 4 ^{0}C, deve-se dividir ***Patm*** pela densidade da água em (g/m^3) na nova temperatura para correção.
3. Pressão de vapor (consulte **Tabela 3** e **Fig. 2**).
4. O valor de NPSH pode ser simplificado para condições normais e fluido sendo água e admitindo o seguinte:

γ = 1000 kgf/m^3

$$\frac{Pe}{\gamma} = 0$$

$$\frac{Patm}{\gamma} = 10\ kgf/m^2$$

NPSH disponível = ± *Hs* + 10 - hs

g = 10 m/s^2

$$\frac{V^2}{2 * g} = 0$$

$$\frac{Pv}{\gamma} = 1{,}0\ kgf/m^2$$

5. Os valores de $(V^2/2 * g)$ muitas vezes podem ser eliminados quando o seu valor e desprezível e também por não ser considerado pelos fabricantes norte-americanos na determinação do NPSH requerido, por isso não devem ser comparados nestes casos.

Portanto agora podemos definir a condição que deve ser atendida necessariamente em todas as instalações de bombeamento sendo esta:

NPSH disponível > NPSH requerido + S

onde: **S** = coeficiente de segurança (algumas literaturas sugerem 0,5 a 1,0 m.c.l e o fabricante "KSB" adota valor de 0,5 m.c.l.)

3.3 Determinação do NPSH requerido para o fabricante KSB

O fabricante de bombas KSB de origem germânica possui maneira própria de fornecimento do NPSH requerido, apresentando o valor diferenciadamente em relação a outros fabricantes norte americanos e nacionais. Suas informações vêm contidas no gráfico de performance, situados na parte superior e à direita com a indicação do valor de Hs em metros de coluna de água, variando em função da vazão.

Para se determinar o valor de NPSH requerido devemos aplicar a equação abaixo:

$$NPSH = 10 - Hs + \frac{V^2}{2 * g} + s$$

Hs = valor tabelado em função da vazão
$\frac{v^2}{2*g}$ = energia cinética em m.c.l.
s = coeficiente de segurança.
dado do fabricante (*s* = 0,5)

Observação:

1. O fabricante KSB utiliza o valor de $V^2/2 * g$ para cálculo do $NPSH_{requerido}$, portanto para cálculo do NPSH disponível, este valor deverá ser considerado tornando-se real assim a comparação.
2. O fabricante KSB calcula suas bombas e referência o valor de Hs para altura acima do nível do mar igual a 150 metros; líquido sendo água com peso específico de 1000 Kgf/m^3 a temperatura de 15 °C, portanto qualquer diferença com os dados de projeto, estes deverão ser corrigidos no valor do NPSH disponível para comparação.

Tabela 3 Pressão de vapor e densidade da água em função da temperatura

t (°C)	pd (bar)	pd (kgf/cm^2)	γ (kg/dm^3)	γ (kg/m^3)	t (°C)	pd (bar)	pd (kgf/cm^2)	γ (kg/dm^3)	γ (kg/m^3)	t (°C)	pd (bar)	pd (kgf/cm^2)	γ (kg/dm^3)	γ (kg/m^3)
0	0,00611	0,00603	0,9998	999,8	51	0,12961	0,12791	0,9876	987,6	104	1,1668	1,1515	0,9552	955,2
1	0,00657	0,00648	0,9999	999,9	52	0,13613	0,13434	0,9871	987,1	106	1,2504	1,2340	0,9537	953,7
2	0,00706	0,00697	0,9999	999,9	53	0,14293	0,14105	0,9866	986,6	108	1,3390	1,3214	0,9522	952,2
3	0,00758	0,00748	0,9999	999,9	54	0,15002	0,14805	0,9862	986,2	110	1,4327	1,4139	0,9507	950,7
4	0,00813	0,00802	1,0000	1000,0	55	0,15741	0,15534	0,9857	985,7	112	1,5316	1,5115	0,9491	949,1
5	0,00872	0,00861	1,0000	1000,0	56	0,16511	0,16294	0,9852	985,2	114	1,6362	1,6147	0,9476	947,6
6	0,00935	0,00923	1,0000	1000,0	57	0,17313	0,17086	0,9846	984,6	116	1,7465	1,7236	0,9460	946,0
7	0,01001	0,00988	0,9999	999,9	58	0,18147	0,17909	0,9842	984,2	118	1,8628	1,8383	0,9445	944,5
8	0,01072	0,01058	0,9999	999,9	59	0,19016	0,18766	0,9837	983,7	120	1,9854	1,9593	0,9429	942,9
9	0,01147	0,01132	0,9998	999,8	60	0,19920	0,19659	0,9832	983,2	122	2,1145	2,0867	0,9412	941,2
10	0,01227	0,01211	0,9997	999,7	61	0,2086	0,2059	0,9826	982,6	124	2,2504	2,2209	0,9396	939,6
11	0,01312	0,01295	0,9997	999,7	62	0,2184	0,2155	0,9821	982,1	126	2,3933	2,3619	0,9379	937,9
12	0,01401	0,01383	0,9996	999,6	63	0,2286	0,2256	0,9816	981,6	128	2,5435	2,5101	0,9362	936,2
13	0,01497	0,01477	0,9994	999,4	64	0,2391	0,2360	0,9811	981,1	130	2,7013	2,6658	0,9346	934,6
14	0,01597	0,01576	0,9993	999,3	65	0,2501	0,2468	0,9805	980,5	132	2,867	2,829	0,9328	932,8
15	0,01704	0,01682	0,9992	999,2	66	0,2615	0,2581	0,9799	979,9	134	3,041	3,001	0,9311	931,1
16	0,01817	0,01793	0,9990	999,0	67	0,2733	0,2697	0,9793	979,3	136	3,223	3,181	0,9294	929,4
17	0,01936	0,01911	0,9988	998,8	68	0,2856	0,2819	0,9788	978,8	138	3,414	3,369	0,9276	927,6
18	0,02062	0,02035	0,9987	998,7	69	0,2984	0,2945	0,9782	978,2	140	3,614	3,567	0,9258	925,8
19	0,02196	0,02167	0,9985	998,5	70	0,3116	0,3075	0,9777	977,7	145	4,155	4,100	0,9214	921,4
20	0,02337	0,02306	0,9983	998,3	71	0,3253	0,3210	0,9770	977,0	150	4,760	4,698	0,9168	916,8
21	0,02485	0,02452	0,9981	998,1	72	0,3396	0,3351	0,9765	976,5	155	5,433	5,362	0,9121	912,1
22	0,02642	0,02607	0,9978	997,8	73	0,3543	0,3496	0,9760	976,0	160	6,181	6,100	0,9073	907,3
23	0,02808	0,02771	0,9976	997,6	74	0,3696	0,3647	0,9753	975,3	165	7,008	6,916	0,9024	902,4
24	0,02982	0,02943	0,9974	997,4	75	0,3855	0,3804	0,9748	974,8	170	7,920	7,816	0,8973	897,3
25	0,03166	0,03124	0,9971	997,1	76	0,4019	0,3966	0,9741	974,1	175	8,924	8,807	0,8921	892,1
26	0,03360	0,03316	0,9968	996,8	77	0,4189	0,4134	0,9735	973,5	180	10,027	9,895	0,8869	886,9
27	0,03564	0,03517	0,9966	996,6	78	0,4365	0,4308	0,9729	972,9	185	11,233	11,086	0,8815	881,5
28	0,03778	0,03728	0,9963	996,3	79	0,4547	0,4487	0,9723	972,3	190	12,551	12,386	0,8760	876,0
29	0,04004	0,03951	0,9960	996,0	80	0,4736	0,4674	0,9716	971,6	195	13,987	13,803	0,8704	870,4
30	0,04241	0,04185	0,9957	995,7	81	0,4931	0,4866	0,9710	971,0	200	15,550	15,346	0,8647	864,7
31	0,04491	0,04432	0,9954	995,4	82	0,5133	0,5066	0,9704	970,4	205	17,243	17,017	0,8588	858,8
32	0,04753	0,04691	0,9951	995,1	83	0,5342	0,5272	0,9697	969,7	210	19,077	18,827	0,8528	852,8
33	0,05029	0,04963	0,9947	994,7	84	0,5557	0,5484	0,9691	969,1	215	21,060	20,784	0,8467	846,7
34	0,05318	0,05248	0,9944	994,4	85	0,5780	0,5704	0,9684	968,4	220	23,198	22,894	0,8403	840,3
35	0,05622	0,05548	0,9940	994,0	86	0,6011	0,5932	0,9678	967,8	225	25,501	25,166	0,8339	833,9
36	0,05940	0,05862	0,9937	993,7	87	0,6249	0,6167	0,9671	967,1	230	27,976	27,609	0,8273	827,3
37	0,06274	0,06192	0,9933	993,3	88	0,6495	0,6410	0,9665	966,5	235	30,632	30,230	0,8205	820,5
38	0,06624	0,06537	0,9930	993,0	89	0,6749	0,6660	0,9658	965,8	240	33,478	33,039	0,8136	813,6
39	0,06991	0,06899	0,9927	992,7	90	0,7011	0,6919	0,9652	965,2	245	36,523	36,044	0,8065	806,5
40	0,07375	0,07278	0,9923	992,3	91	0,7281	0,7185	0,9644	964,4	250	39,776	39,254	0,7992	799,2
41	0,07777	0,07675	0,9919	991,9	92	0,7561	0,7462	0,9638	963,8	255	43,246	42,678	0,7916	791,6
42	0,08198	0,08090	0,9915	991,5	93	0,7849	0,7746	0,9630	963,0	260	46,943	46,327	0,7839	783,9
43	0,08639	0,08526	0,9911	991,1	94	0,8146	0,8039	0,9624	962,4	265	50,877	50,209	0,7759	775,9
44	0,09100	0,08981	0,9907	990,7	95	0,8453	0,8342	0,9616	961,6	270	55,058	54,335	0,7678	767,8
45	0,09582	0,09456	0,9902	990,2	96	0,8769	0,8654	0,961	961,0	275	59,496	58,715	0,7593	759,3
46	0,10086	0,09954	0,9898	989,8	97	0,9094	0,8975	0,9602	960,2	280	64,202	63,359	0,7505	750,5
47	0,10612	0,10473	0,9894	989,4	98	0,9430	0,9306	0,9596	959,6	285	69,186	68,278	0,7415	741,5
48	0,11162	0,11015	0,9889	988,9	99	0,9776	0,9648	0,9586	958,6	290	74,461	73,484	0,7321	732,1
49	0,11736	0,11582	0,9884	988,4	100	1,0133	1,0000	0,9581	958,1	295	80,037	78,986	0,7223	722,3
50	0,12335	0,12173	0,9880	988,0	102	1,0878	1,0735	0,9567	956,7	300	85,927	84,799	0,7122	712,2
t (°C)	pd (bar)	pd (kgf/cm^2)	γ (kg/dm^3)	γ (kg/m^3)	t (°C)	pd (bar)	pd (kgf/cm^2)	γ (kg/dm^3)	γ (kg/m^3)	t (°C)	pd (bar)	pd (kgf/cm^2)	γ (kg/dm^3)	γ (kg/m^3)
305	92,144	90,935	0,7017	701,7	320	112,890	111,408	0,6669	666,9	350	165,350	163,180	0,5743	574,3
310	98,700	97,405	0,6906	690,6	325	120,560	118,978	0,6541	654,1	360	186,750	184,299	0,5275	527,5
305	92,144	90,935	0,7017	701,7	330	128,630	126,942	0,6404	640,4	370	210,540	207,777	0,4518	451,8
310	98,700	97,405	0,6906	690,6	340	146,050	144,133	0,6102	610,2	374,15	221,200	218,297	0,3154	315,4
315	105,610	104,224	0,6791	679,1										

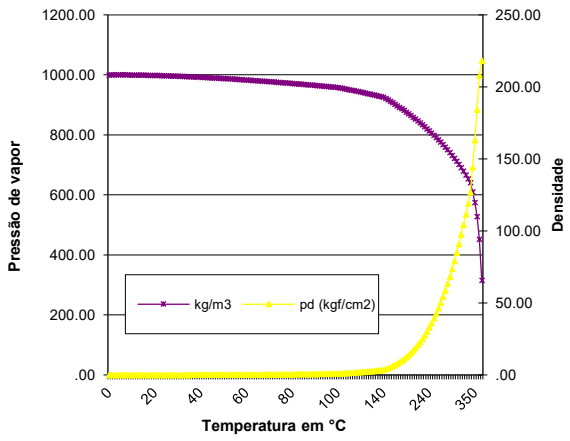


Fig. 2 Gráfico da variação da pressão de vapor e densidade da água em função da temperatura.

3.4 Identificando cavitação por ferramentas preditivas

A cavitação, além de causar danos físicos aos componentes hidráulicos, também gera assinaturas características em análises preditivas, tornando possível sua identificação antes que o problema evolua para falhas catastróficas. A análise de vibração é uma ferramenta essencial nesse processo, pois os sinais gerados pela cavitação exibem características específicas que podem ser detectadas nos espectros de vibração.

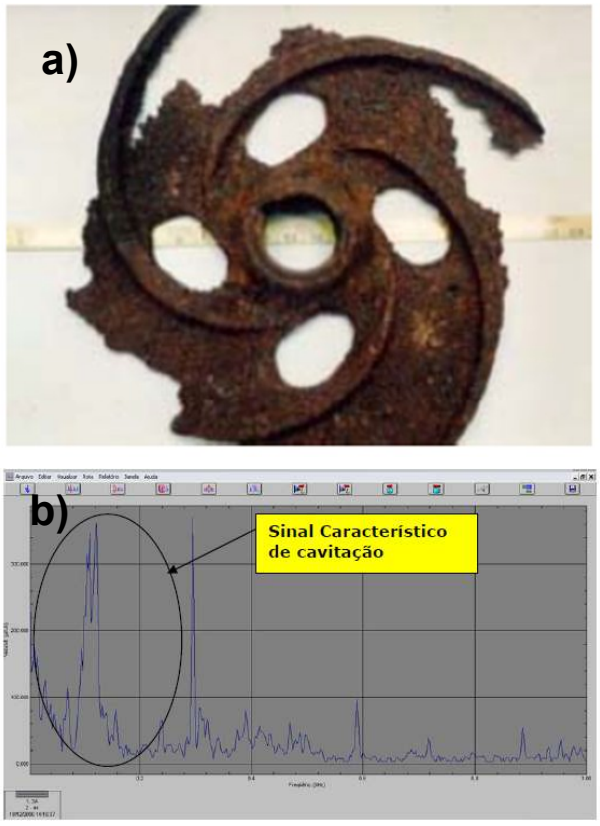


Fig. 3 Rotor danificado pelo efeito da cavitação (a) e sinal coletado de um mancal em uma bomba centrífuga (b). Fonte: Goiás (2018); Oliveira, (sd.).

Nos espectros de velocidade, a cavitação é frequentemente identificada por sinais randômicos, ou seja, padrões não periódicos e sem definição exata, que se destacam na região de baixa frequência, tipicamente entre 80 e 200 Hz. Esses sinais representam a energia liberada durante o colapso das bolhas de vapor, que ocorre em uma taxa relativamente baixa, mas com efeitos destrutivos consideráveis.

Nos espectros de aceleração, a cavitação manifesta-se em faixas de alta frequência. Esse comportamento decorre da rápida liberação de energia mecânica e ondas de choque geradas pelo colapso das bolhas em áreas de alta pressão, especialmente nas proximidades de rotores e componentes sujeitos a fluxo turbulento. Essa característica é crucial para diferenciar a cavitação de outros fenômenos, como desalinhamento ou desbalanceamento, que também geram vibração, mas apresentam padrões espectrais distintos. Observa-se o impacto da cavitação, conforme ilustrado na **Fig. 3**, que apresenta o rotor danificado pelo efeito da cavitação (a) e o sinal coletado de um mancal em uma bomba centrífuga (b).

A identificação precoce desse fenômeno é essencial para implementar ações corretivas, como ajustes no sistema de bombeamento ou mudanças no projeto hidráulico, evitando que o problema comprometa o desempenho do equipamento ou cause danos irreversíveis. Assim, a análise preditiva, quando bem aplicada, torna-se uma ferramenta indispensável na manutenção confiável de sistemas hidráulicos.

3.5 Como a cavitação pode ser controlada?

Como em qualquer problema que devemos nos atentar em máquinas e equipamentos, os problemas de cavitação também requerem a necessidade de um processo de manutenção confiável contemplando nesse processo técnicas preditivas a fim de identificar esse fenômeno antes que evolua a condições de serem identificados através das inspeções sensitivas.

As técnicas preditivas são recomendadas para identificação da cavitação antes que os componentes dos sistemas de bombeamento estejam comprometidos e o desempenho dos sistemas de bombeamento estejam impactados.

Na prática, a cavitação pode ser evitada (ou controlada), se a pressão em todos os pontos da máquina for mantida acima da pressão de vapor do líquido de trabalho. À velocidade constante, isso requer que uma pressão algo maior do que a pressão de vapor do líquido seja mantida na entrada da bomba (a sucção ou aspiração). Por causa das perdas de pressão na tubulação de entrada, a pressão de sucção pode estar abaixo da atmosférica. Por isso, é importante limitar cuidadosamente a queda de pressão na tubulação de sucção.

Os tópicos citados acima demonstram a importância do dimensionamento adequado dos sistemas de bombeamento, desde a indicação adequada da bomba, motor e tubulações para o fluído a ser bombeado e a sua respectiva aplicação (em instalações prediais, sistema de tratamentos de águas e ou distribuição).

Em análise à Norma ANBT: NBR 5626/1998 - Instalação predial de água fria, que estabelece exigências e recomendações relativas ao projeto, execução e manutenção da instalação predial de água fria (ABNT, 1998). As exigências e recomendações aqui estabelecidas emanam fundamentalmente do respeito aos princípios de bom desempenho da instalação e da garantia de potabilidade da água no caso de instalação de água potável; especificamente a cavitação é tratada em seu anexo C; destacamos alguns dos principais componentes envolvidos no sistema hidráulico, onde depreendemos algumas considerações, conforme se segue.

Em tubulações de água nas residências e prédios, ou ainda no sistema de tratamento de água, pode ocorrer ruído de escoamento, que é o ruído proveniente de tubulação é gerado quando suas paredes sofrem vibração pela ação do escoamento

da água. O ruído de escoamento de fato não é significativo para velocidade média da água inferior a 3 m/s.

Ainda que a cavitação seja frequente em peças de utilização, ela não é comum em tubulação porque, a pressões normais, é necessária uma velocidade média da água da ordem de 8 m/s para produzir cavitação em um cotovelo típico. Entretanto, pressões baixas que ocorrem nas partes mais altas das instalações prediais de água fria, como em colunas de distribuição longas, podem causar cavitação mesmo em velocidades baixas e, assim, tais tubulações, se possível, devem ser evitadas, porque para se manter os níveis de ruído dentro de limites aceitáveis é essencial que a cavitação seja prevenida.

Com relação às peças de utilização, tais como: torneiras, torneiras de boias e outras peças, as bruscas mudanças de direção e de seção de escoamento, assim como baixos valores de pressão a jusante que ocorrem na região de obturação das peças de utilização, favorecem a ocorrência de cavitação. Esse fenômeno é a principal causa de ruído em tais componentes, os quais são as principais fontes de ruído de escoamento em instalações prediais de água fria. Basicamente, o início da cavitação pode ser impedido através da elevação da pressão nos pontos onde ela ocorreria e pela redução da velocidade da água. Por exemplo, em peças de utilização a pressão no ponto de ocorrência da cavitação pode ser elevada pela redução de seção a jusante desse ponto (normalmente esta é uma preocupação do projetista e fabricante de peças de utilização, ainda que simples instalação de dispositivo silenciador em uma torneira de bóia incorpore este princípio).

No tocante à bomba hidráulica, uma bomba bem projetada, instalada e usada nas condições, corretas não gera ruído excessivo. Se, entretanto, a vazão é maior que a prevista, ou a pressão de sucção é insuficiente, há risco de cavitação e turbulência, resultando em ruído e vibração.

3.6 Como a cavitação em tubulações de água nas residências e prédios, ou ainda no sistema de tratamento de água, pode ser controlada?

A velocidade da água em tubulações, escoante na região de obturação de uma peça de utilização, local usual de origem da cavitação, pode ser reduzida (ou controlada) através de mudanças no projeto da própria peça, ou pela redução da pressão da água no ponto de alimentação da peça, no projeto da instalação predial de água fria.

Se tal redução da pressão provoca a necessidade de maior abertura de uma peça de utilização para manter o valor da vazão, a velocidade da água na região de obturação também será mais reduzida e, consequentemente, a peça operará de forma mais silenciosa. Assim, uma torneira de boia operará de forma mais silenciosa sob pressão menor, enquanto o valor de sua vazão pode ser mantido pelo aumento do diâmetro do furo de passagem da sede do vedante.

Quanto ao ruído de transmissão proveniente de bombas pode ser reduzido pelo uso de isoladores de vibrações, tipo mangote flexível, colocado entre a saída da bomba e a tubulação de recalque. Isoladores eficazes restringem a transmissão de vibração da própria tubulação. Pode ser que seja necessário, também, isolar a tubulação da estrutura do edifício, pela inserção de material resiliente nos suportes de fixação da tubulação. A mesma técnica pode, também, ser necessária para fixação da bomba à estrutura.

Para evitar (ou controlar) a cavitação de uma bomba, dependendo da situação, deve-se adotar as seguintes providências:

- Reduzir-se a altura de sucção e o comprimento desta tubulação, aproximando-se ao máximo a bomba da captação;
- Reduzir-se as perdas de carga na sucção, com o aumento do diâmetro dos tubos e conexões;
- Refazer todo o cálculo do sistema e a verificação do modelo da bomba;
- Quando possível, sem prejudicar a vazão e/ou a pressão final requeridas no sistema, pode-se eliminar a cavitação trabalhando-se com registro na saída da bomba "estrangulado", ou, alterando-se o(s) diâmetro(s) do(s) rotor(es) da bomba. Estas, porém são providências que só devem ser adotadas em último caso, pois podem alterar substancialmente o rendimento hidráulico do conjunto.

E ainda, a bomba nestas condições funcionará normalmente, porém, deve-se evitar:

- Aumento da vazão, pois para qualquer sistema de sucção, existe uma vazão que não pode ser excedida, se o escoamento através da bomba deve permanecer livre de cavitação;
- Aumento do nível dinâmico da captação, pois as perdas de pressão de entrada podem ser reduzidas aumentando o diâmetro do tubo de aspiração; por essa razão, muitas bombas centrífugas têm flanges ou conexões maiores na entrada do que na saída;
- Aumento da temperatura da água, pois o aquecimento de um líquido eleva a sua pressão de vapor. Dessa forma, o bombeamento de um líquido quente requer pressão adicional na entrada da bomba para prevenir cavitação.

3.7 Como a cavitação presente em turbinas prejudica o funcionamento e o aproveitamento, no nível ótimo, da força hidráulica de usinas elétricas?

Como definido anteriormente, a cavitação é a formação de bolhas de vapor no líquido que flui através de qualquer turbina hidráulica. A cavitação ocorre quando a pressão estática do líquido cai abaixo da sua pressão de vapor. É mais provável que ocorra perto das lâminas de movimentação rápida das turbinas e na região de saída das turbinas.

Causas da cavitação: o líquido entra nas turbinas hidráulicas em alta pressão; esta pressão é uma combinação de componentes estáticos e dinâmicos. A pressão dinâmica do líquido é dada pela virtude da velocidade do fluxo e do outro componente, a pressão estática, é a pressão real que o fluido aplica e que é atuada sobre ele. A pressão estática governa o processo de formação de bolhas de vapor ou de ebulição. Assim, a cavitação pode ocorrer perto das lâminas de movimentação rápida da turbina onde a cabeça dinâmica local aumenta devido à ação das lâminas que faz com que a pressão estática caia (ver **Fig. 4**). A cavitação também ocorre na saída da turbina, pois o líquido perde a maior parte de sua pressão e qualquer aumento na pressão dinâmica levará a queda na pressão estática causando cavitação.

Efeitos prejudiciais da cavitação: a formação de bolhas de vapor na cavitação não é um grande problema em si, mas o colapso dessas bolhas gera ondas de pressão, que podem ser de frequências muito altas, causando danos à maquinaria. As bolhas que entram em colapso perto da superfície da máquina são mais prejudiciais e causam erosão nas superfícies chamadas de erosão de cavitação. Os colapsos de bolhas menores criam ondas de maior frequência do que bolhas maiores. Assim, bolhas menores são mais prejudiciais para as máquinas hidráulicas.

Bolhas menores podem ser mais prejudiciais para o corpo hidráulico da máquina, mas não causam redução significativa na eficiência da máquina. Com uma diminuição adicional da pressão estática, mais um número de bolhas é formado e seu tamanho também aumenta. Essas bolhas coalescem entre si para formar bolhas maiores e, eventualmente, bolsas de vapor. Isso perturba o fluxo de líquido e causa a separação do fluxo, o que reduz o desempenho da máquina nitidamente. A cavitação é um fator importante a ser considerado ao projetar turbinas hidráulicas.

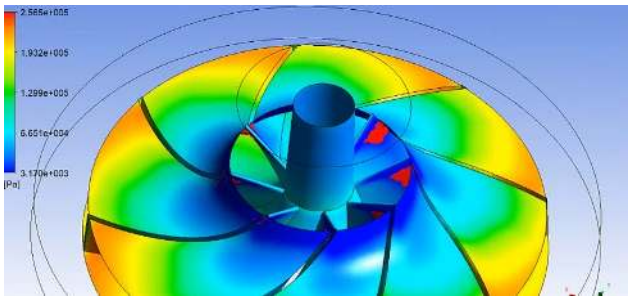


Fig. 4 Ação da pressão sobre a turbina hidráulica. Fonte: Mecânica Industrial (2017).

3.8 Quais os cuidados que se deve tomar com a manutenção destas instalações?

Para evitar a cavitação durante o funcionamento, os parâmetros das turbinas hidráulicas devem ser configurados de modo que, em qualquer ponto de fluxo, a pressão estática não caia abaixo da pressão de vapor do líquido. Esses parâmetros para controlar a cavitação são a pressão, a vazão e a pressão de saída do líquido. Os parâmetros de controle para operação livre de cavitação de turbinas hidráulicas podem ser obtidos através da realização de testes nos protótipos da turbina a ser usada. Os parâmetros quando a cavitação começa a subir e a eficiência da turbina caem significativamente devem ser evitados durante o funcionamento das turbinas hidráulicas.

A separação do fluxo na saída da turbina no tubo de descarga causa vibrações que podem danificar o tubo de descarga. Para amortecer a vibração e estabilizar, o fluxo de ar é injetado no tubo de descarga. Para evitar totalmente a separação do fluxo e a cavitação no tubo de descarga, ele é submerso abaixo do nível da água na tração de cauda.

4. Conclusões

A cavitação é um desafio técnico que requer uma abordagem multidisciplinar para minimizar seus impactos. O estudo revelou que, embora nenhum material seja completamente imune à cavitação, o uso de ligas específicas e revestimentos elastoméricos pode aumentar significativamente a resistência dos componentes. Parâmetros como o NPSH e a liberação de gases dissolvidos desempenham um papel crucial na prevenção do fenômeno, destacando a importância do dimensionamento adequado e do monitoramento contínuo dos sistemas. O uso de ferramentas preditivas, como análise de vibração, mostrou-se indispensável para a detecção precoce de sinais de cavitação, permitindo ações corretivas antes de danos severos. Por fim, medidas como o controle de velocidades e pressões em tubulações e ajustes no projeto de componentes hidráulicos podem evitar a ocorrência de cavitação, promovendo maior eficiência e vida útil dos sistemas. A integração dessas estratégias em projetos e manutenções assegura o desempenho ideal de turbinas, bombas e instalações prediais, contribuindo para a sustentabilidade e confiabilidade das operações hidráulicas.

Contribuições dos Autores

F.J.B.V.; J.C.P.J.: Curadoria de Dados, Redação - Preparação do Rascunho Original; Edição, Revisão e Edição. O autor leu e aprovou o manuscrito final.

Conflitos de Interesses

Os autores declaram que não têm interesses conflitantes.

Referências

Abdala Neto, E. F., Aquino, M. D., Ribeiro, J. P., Vidal, C. B., Nascimento, R. F. D., & Sousa, F. W. D. (2014). O uso da cavitação hidrodinâmica aplicado ao tratamento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental, 19*, 105-112. https://doi.org/10.1590/S1413-41522014000200001

Almeida, M. T. (2005). *Manutenção preditiva: Confiabilidade e qualidade*. Itajubá, MG: Consultoria MTA.

Almeida, M. T., & Góz, R. D. S. (1994). *Análise de vibrações I: Medidas e diagnósticos* (Apostila). Itajubá: FUPAI, Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1998). *NBR 5626: Instalação predial de água fria* (Anexo C).

Colt, J., Plesha, P., & Huguenin, J. (2006). Impact of net positive suction head on the design and operation of seawater pumping systems for use in aquaculture. *Aquacultural engineering*, *35*(3), 239-257. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.03.001

Cyrino, L. (2019). Cavitação e seus conceitos. *Blog Manutenção Em Foco*. Acesso em 13 de setembro de 2020. Disponível em: <https://www.manutencaoemfoco.com.br/cavitacao-e-seus-conceitos/>.

Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J., & Leylegian, J. C. (2010). *Introdução à mecânica dos fluidos* (8ª ed). Rio de Janeiro: LTC Editora

Goiás. (2018). *Manual Operacional de Bombeiros*: *Bombas hidráulicas.* Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás. Goiânia. 116 p.

Mecânica Industrial. (2020). *Cavitação em turbinas hidráulicas: causas e efeitos*. Acesso em 13 de setembro de 2020. Disponível em https://www.mecanicaindustrial.com.br/cavitacao-em-turbinas-hidraulicas-causas-e-efeitos/

Oliveira, J. R. de. (sd). *Cavitação: Como entender este fenômeno?* MGS Tecnologia.

Ribeiro, H. O., Buschinelli, A. J. D. A., & Dutra, J. C. (2010). Resistência à erosão por cavitação de aços inoxidáveis austeníticos CrMnSiN depositados por PTA. *Soldagem & Inspeção, 15,* 121-129. https://doi.org/10.1590/S0104-92242010000200006

SKF Reliability Systems. (2005). *Programa para Certificação de Técnicos de Monitoramento de Condição de Máquinas – Especialista em Vibração Nível I* (Apostila). São Paulo, Brasil.