

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.

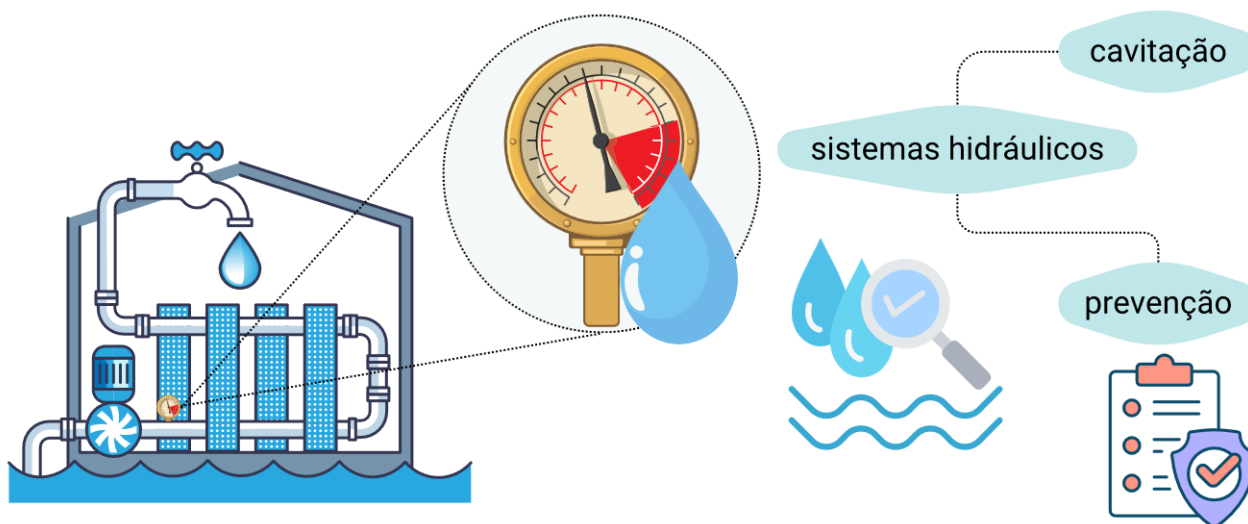
Palavras-chave: Fenômeno de transporte. Cavitação. Prevenção. Sistemas hidráulicos. Danos.

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).

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 é um fenômeno que ocorre nos materiais componentes das turbo bombas ou canalizações, ela é 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 são as 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).

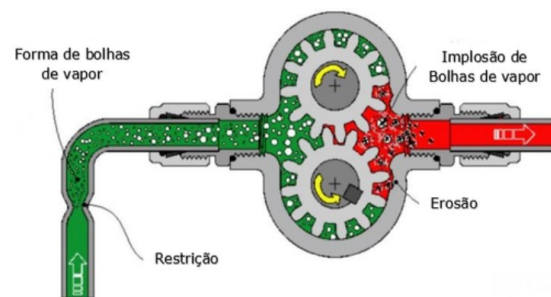


Fig. 1 Sistema hidráulico. Fonte: Luis Cyrino / Manutenção em Foco (2019).

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	e	Ligas de Aço Inox (18 % Cr - 8 % Ni)

A rigor não existe material que não seja afetado pela cavitação. A resistência dos materiais é 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 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	-	-	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 Liberação 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:

$$NPSH_{disponivel} = +H_s + \frac{P_e}{\gamma} + \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} + \frac{V^2}{2 * g} - \Delta h_s$$

Onde:

- H_s** = altura estática de sucção em m; + bomba afogada - sucção positiva; - bomba succionando - sucção negativa.
- P_e** = pressão externa em kgf/m²; + tanque pressurizado; - tanque à vácuo.
- P_{atm}** = pressão atmosférica em função da altitude em relação ao nível do mar em kgf/m².
- P_v** = pressão de vapor a temperatura de projeto em kgf/m².
- V** = velocidade média do fluxo na sucção, referenciada ao diâmetro maior (m/s).
- Δh_s** = 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/m².
- g** = 9,81 (m/s²) aceleração da gravidade.

Observações:

1. Para cálculo da pressão atmosférica ou barométrica **P_{atm}** em kgf/m² (para a água a 4 °C e γ = 1,0 g/cm³).

$$P_{atm} = 1 \times 10^4 * (1 - 2,257 \times 10^{-5} \times h)^{5,25}$$
 sendo **h** = altura em relação ao nível do mar em metros
2. Para outros valores de temperatura que não 4 °C, deve-se dividir **P_{atm}** pela densidade da água em (g/m³) 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:

$$\gamma = 1000 \text{ kgf/m}^3$$

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

$$\frac{P_{atm}}{\gamma} = 10 \text{ kgf/m}^2$$

$$NPSH_{disponivel} = \pm H_s + 10 - h_s$$

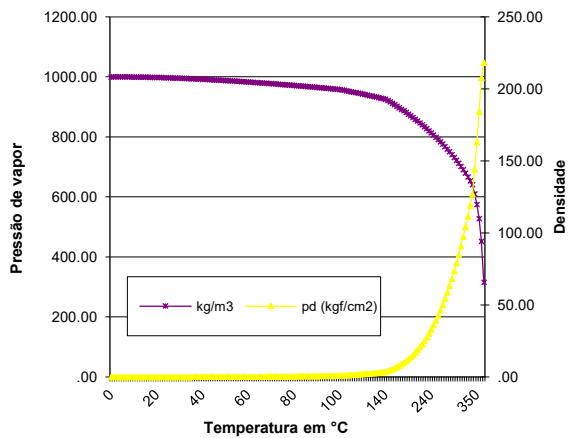


Fig. 2 Gráfico da variação da pressão de vapor e densidade da água em função da temperatura.

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.

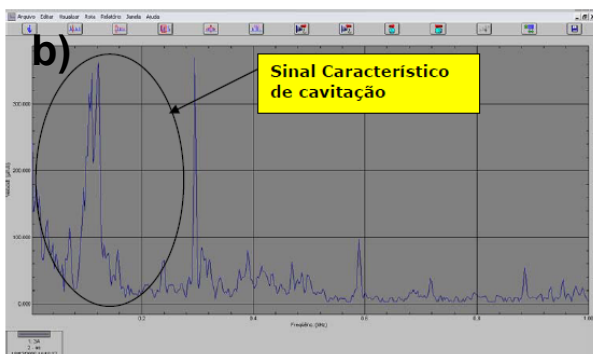


Fig. 3 Rotor danificado pelo efeito da cavitação (a) e sinal coletado de um mancal em uma bomba centrífuga (b). Fonte: Goiás (2018); Oliveira, (sd.).

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 sensíveis.

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 fluido 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 obstrução 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 obstrução 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 obstrução também será mais reduzida e, conseqüentemente, 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.

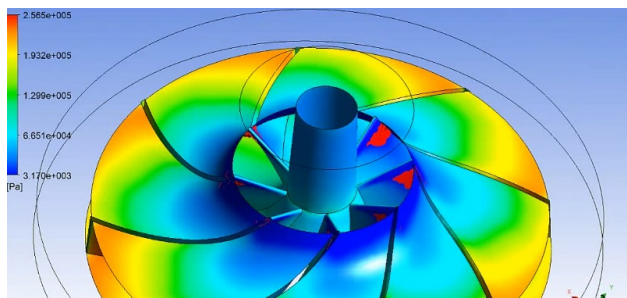


Fig. 4 Ação da pressão sobre a turbina hidráulica. Fonte: Mecânica Industrial (2017).

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.

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/>.

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.

- 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.