

## A cavitação em bombas centrífugas

• Fernando B. M. Monteiro

*A cavitação é um fenômeno que pode ocorrer no funcionamento das bombas quando o líquido se vaporiza ao chegar ao rotor, formando bolhas que serão novamente transformadas em líquido ao atingirem as regiões de maior pressão. Isto provoca na bomba vibrações, ruídos, alterações das curvas características e especialmente danos físicos ao rotor.*

### 1. GENERALIDADES:

Todo líquido, a uma determinada temperatura, tem uma pressão mínima abaixo da qual ele se vaporizará. Esta pressão mínima chama-se de tensão de vaporização do líquido à temperatura considerada. É uma das constantes físicas do líquido. Para a água, por exemplo, temos os valores abaixo relacionados para a tensão de vaporização, em várias temperaturas:

t(°C)	Pv(kg/cm <sup>2</sup> )	t(°C)	Pv(kg/cm <sup>2</sup> )
1	0,006695	60	0,2031
3	0,007724	65	0,2550
5	0,008891	70	0,3178
10	0,012513	75	0,3931
15	0,017377	80	0,4829
20	0,02383	85	0,5894
25	0,03229	90	0,7149
30	0,04580	95	0,8619
35	0,05733	100	1,0332
40	0,07520	105	1,2320
45	0,09771	110	1,4609
50	0,12578	115	1,7260
55	0,16050	120	2,0270

\* Engenheiro Civil, Prof. Titular da Universidade de Fortaleza  
Prof. Adjunto da Universidade Federal do Ceará

Se a pressão reinante em uma determinada massa líquida à temperatura  $t$  for menor do que a pressão  $P_v$  o líquido vaporizará.

## 2. DESCRIÇÃO DO FENÔMENO

Se a pressão em um ponto qualquer no interior de uma bomba, atinge um valor abaixo da tensão de vaporização correspondente à temperatura no líquido em operação, o mesmo se vaporizará, isto é, passará para o estado gasoso, formando bolha de vapor.

Considerando que a água, estando a cerca de  $20^{\circ}$ , ao passar do estado líquido para o gasoso aumenta seu volume milhares de vezes, pode ocorrer o estreitamento das seções de escoamento, com uma conseqüente redução da vazão e do rendimento da bomba.

Em casos extremos de vaporização, ocorre a fragmentação da massa líquida, o que provoca a imediata suspensão do bombeamento.

As bolhas de vapor formadas são então arrastadas pela corrente até alcançar a região de maior pressão do rotor, na saída das pás. Aí as bolhas de vapor são destruídas, por esmagamento, pela elevada pressão reinante.

Ao destruir-se referidas bolhas, produz-se um violentíssimo choque do líquido com as paredes adjacentes do rotor, indo em casos extremos até o difusor.

A súbita entrada do líquido na cavidade, que se criou com o desaparecimento da bolha de vapor, torna necessário o consumo de energia para acelerar a água, a fim de alcançar a grande velocidade requerida para encher o espaço vazio, o que provoca uma ação perfuradora, causando uma destruição mecânica do material.

Assim o fenômeno da cavitação é a destruição do material do rotor ou do difusor, pela ação perfuradora do líquido, originada do esmagamento das bolhas de vapor, formadas pela baixa pressão reinante na entrada da bomba.

A cavitação tem sempre uma característica desagradável que lhe é própria, que é a de vir acompanhada de intensos ruídos que variam nas diferentes bombas, desde um barulho surdo a estridentes golpes, os quais dão lugar a uma forte vibração na máquina.

Por outro lado, a água, em condições normais de temperatura e pressão, contém gases em dissolução, ocupando cerca de 1,8% de seu volume.

Com a diminuição da pressão reinante, parte dos gases dissolvidos na água se liberta, dando lugar a uma ação química sobre o material da bomba, resultando uma corrosão.

Em certos casos, os gases liberados, também sob a forma de bolhas, acumulam-se em locais de baixa pressão, dando origem a uma destruição química do material localizado nestes pontos.

Assim podemos considerar a cavitação com dois aspectos: um físico, que provoca a destruição do material por impacto do líquido com as pás e as paredes do rotor, exercendo uma ação perfuradora, outro químico, que resulta do ataque dos gases liberados sobre o material da bomba.

A cavitação nas bombas produz-se principalmente na saída do rotor, tanto nas pás como nas paredes laterais e as vezes no difusor. A erosão e o desgaste do material devidos a cavitação não ocorrem no ponto de menor pressão, onde se formam as bolhas de vapor, e sim nos pontos onde elas desaparecem por esmagamento.

## 3. CONDIÇÕES DE ASPIRAÇÃO

O fenômeno da cavitação está intimamente ligado com as zonas de baixa pressão, então, nada mais lógico do que estudar as condições de aspiração da bomba, local destas pressões.

Imaginemos a representação esquemática de uma instalação de bombeamento conforme mostrado na figura 1, onde aparecem as distintas fases do processo e as pressões do líquido nas diversas etapas.

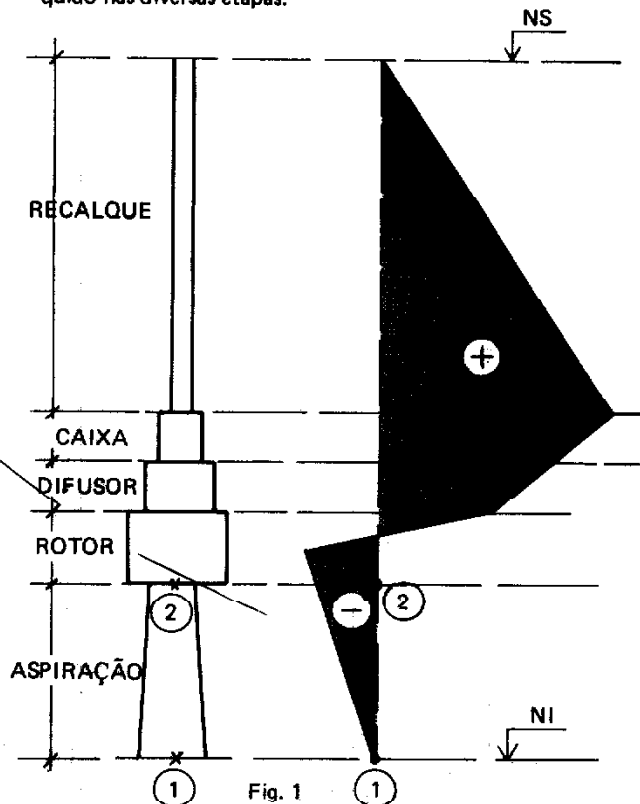


Fig. 1

Observemos que a pressão do líquido apresenta um valor mínimo em um ponto dentro do rotor, logo após a entrada no ponto 2.

Para que a cavitação não ocorra, devemos ter que a menor pressão existente no bombeamento seja sempre igual ou maior do que a tensão de vaporização do líquido na temperatura considerada.

Isto é, devemos ter o seguinte:

$$P \text{ mínima bombeamento} \geq P \text{ vaporização}$$

Assim, o líquido nunca vaporizará, portanto em momento algum aparecerão as bolhas de vapor que dão origem à cavitação.

Analisemos, então, as condições de aspiração tendo em vista as energias postas em jogo (figura 2)

Assim teremos:

no ponto 1:

$$E_1 = H_1 + 0 + 0$$

Onde  $H_1$  é a pressão reinante no ambiente, se o local for fechado, ou a pressão barométrica do local, se for aberto.

No ponto 2:

$$E_2 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_a + h_p$$

Onde

$P_2$  = pressão do líquido em 2  
 $V_2$  = velocidade do líquido em 2  
 $h_a$  = altura estática de aspiração  
 $h_p$  = perda de carga na aspiração

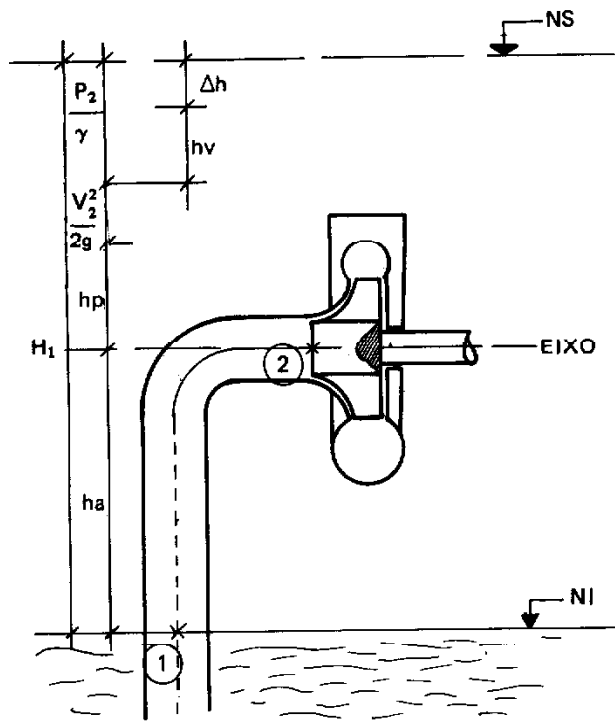


FIG. 2

Como, pelo teorema de Bernoulli, devemos ter:

$$E_1 = E_2$$

$$H_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_a + h_p$$

ou, se  $H_1 = H_b$ , isto é, se o reservatório inferior for aberto

$$H_b = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_a + h_p$$

Onde  $H_b$  é pressão barométrica no local.

Para não existir cavitação, ou seja, para o líquido não vaporizar, a pressão no ponto 2 deve ser maior do que a tensão de vaporização do líquido à temperatura do bombeamento, uma vez que, conforme vimos, o ponto de menor pressão não é o ponto 2 e sim um ponto no interior do rotor.

Se nós chamarmos de  $\Delta h$  a queda de pressão entre o ponto 2 e o ponto onde a pressão atinge seu mínimo valor, poderemos escrever:

$$\frac{P_2}{\gamma} > h_v \quad (h_v = \frac{P_v}{\gamma})$$

ou

$$\frac{P_2}{\gamma} = h_v + \Delta h$$

O valor  $\Delta h$  é chamado de "altura mínima de entrada" ou de "depressão crítica" e representa as perdas de pressão ocorridas, por diversas causas, entre a entrada do rotor (ponto 2) e o ponto de mínima pressão em seu interior. Assim poderemos escrever a seguinte equação:

$$H_b = h_v + \Delta h + \frac{V_2^2}{2g} + h_a + h_p$$

ou

$$H_b = h_a + h_p + h_v + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h$$

#### 4. SALDO POSITIVO DA ALTURA DE SUCCÃO

Observando a equação final do item anterior, verificamos que a energia que o líquido dispõe na entrada do rotor é

$$\frac{V_2^2}{2g} + \Delta h, \text{ uma vez que:}$$

- $h_a$  — foi consumida para vencer o desnível  $h_a$
- $h_p$  — foi consumida para vencer as perdas de carga existentes na tubulação de aspiração
- $h_v$  — é a altura representativa da pressão necessária para o líquido não vaporizar.

A esta sobra de energia na entrada da bomba chama-se **Saldo Positivo da Altura de Sucção** ou como é mais conhecido na literatura técnica sobre a matéria **NPSH (Net Positive Suction Head)**.

Isto é:

$$h_{NPSH} = \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h$$

Então podemos escrever:

$$H_b = h_a + h_p + h_v + h_{NPSH}$$

Equação clássica no estudo da cavitação nas bombas centrífugas.

Observando esta equação vemos que para um mesmo local, com uma temperatura do líquido constante, num mesmo ponto de funcionamento, para não ocorrer o fenômeno da cavitação, o valor da altura estática de aspiração,  $h_a$ , é limitado.

Isto é:

$$h_a = H_b - (h_p + h_v + h_{NPSH})$$

#### 5. NPSH REQUERIDO E NPSH DISPONÍVEL

Observando as equações até agora encontradas verificamos que o NPSH pode apresentar valores distintos.

Ou seja, podemos ter:

$$h_{NPSH} = \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h$$

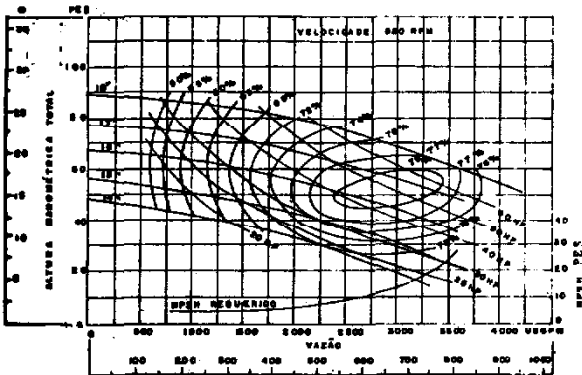
$$h_{NPSH} = H_b - (h_a + h_p + h_v)$$

O primeiro valor é chamado de NPSH requerido e representa uma característica da bomba.

O segundo valor é denominado de NPSH disponível, sendo uma característica da instalação a qual está a bomba acoplada.

O valor do NPSH requerido cresce com a vazão e depende exclusivamente de parâmetros ligados à bomba. É portanto uma das características da bomba, que acompanham a mesma em qualquer local ou situação em que for instalada. A curva do NPSH requerido é determinada, como as demais curvas características da bomba, em um ensaio de laboratório.

Na figura vemos um conjunto de curvas características de uma bomba, onde aparece a curva do NPSH requerido.



O NPSH requerido representa o saldo de energia na entrada da bomba, exigido para fazer face ao deslocamento do líquido e para suprir as perdas  $\Delta h$  no interior da bomba para uma determinada vazão. Quanto maior a vazão evidentemente maiores serão as velocidades do líquido e as perdas internas  $\Delta h$ , portanto maior o valor do NPSH requerido. O valor do NPSH disponível é influenciado por quatro parâmetros que são totalmente independentes da bomba.

Ou seja:

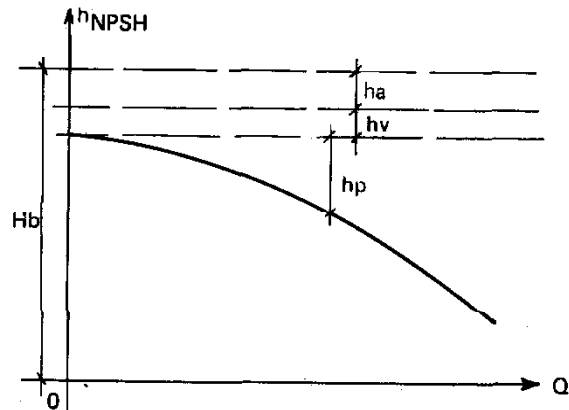
- $H_b$  = altura barométrica, depende do local da instalação
- $h_a$  = altura estática de aspiração, depende das características da instalação
- $h_p$  = perdas de carga na aspiração, depende dos acessórios e da tubulação da instalação
- $h_v$  = tensão de vaporização, depende da temperatura do líquido operado.

Isto é, o valor do NPSH disponível é exclusivamente dependente de valores associados a instalação da bomba, sendo portanto uma característica da referida instalação.

O NPSH disponível independe totalmente das características da bomba. Podemos ter uma mesma bomba, com uma mesma vazão funcionando com valores distintos do NPSH disponível.

A equação do NPSH disponível,  $h_{NPSH} = H_b - (h_a + h_p + h_v)$ , indica que seu valor diminui com a vazão, uma vez que as perdas de carga são proporcionais a  $Q^2$ .

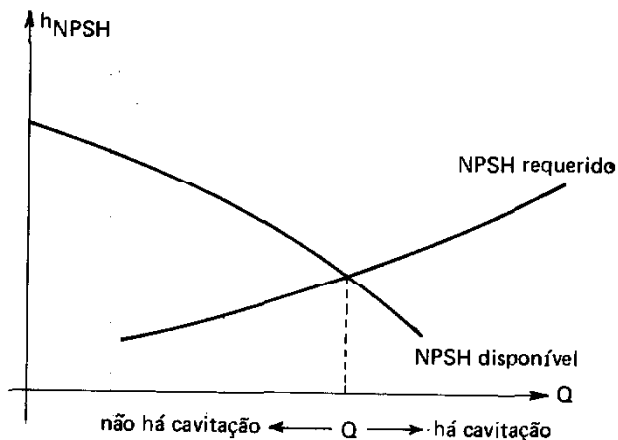
Assim sua representação gráfica será:



O NPSH disponível representa o saldo de energia na entrada da bomba, utilizável para fazer face ao deslocamento do líquido e as perdas  $\Delta h$  no interior da bomba.

Isto é, a bomba requer um saldo de energia em sua entrada e a instalação dispõe de um saldo de energia. Se o saldo disponível for maior do que o saldo requerido não haverá no bombeamento pressões menores do que a tensão de vaporização, conseqüentemente não haverá cavitação. Ao contrário, se o saldo requerido for maior do que o saldo disponível, as pressões tornar-se-ão menores do que a tensão de vaporização, originando, portanto, a cavitação.

Gráficamente teríamos o descrito representado da seguinte maneira:



Para vazões maiores do que  $Q$  haverá cavitação na bomba, para vazões menores do que  $Q$  não haverá cavitação.

Assim, conhecido o  $h_{NPSH}$  requerido de uma bomba para uma determinada vazão, podemos determinar a altura estática de aspiração máxima com que a mesma poderá operar sem perigo do aparecimento da cavitação.

Isto é:

$$h_{a \text{ max}} = H_b - (h_p + h_v + h_{NPSH \text{ req.}})$$

Esta equação é da maior importância na fase de projeto, de uma instalação de bombeamento, uma vez que determinará a distância máxima que a bomba poderá ficar acima do líquido.

Nos casos de bombeamento em condições extremas, como por exemplo com líquidos quentes ou instalações em altas altitudes o valor da altura estática de aspiração pode apresentar um sinal negativo, significando que o líquido deve estar acima da bomba. Dizemos então que a bomba trabalha "afogada", isto é, o líquido entra na aspiração por gravidade.

## 6. FATORES QUE INTERVÊM NA CAVITAÇÃO

Para evitar a cavitação, a pressão mínima na aspiração deve manter-se acima da pressão crítica na qual ela se inicia, ou seja, acima da pressão de vaporização do líquido na temperatura de operação.

Conforme vimos, isto é conseguido mantendo um valor do NPSH disponível sempre maior do que o NPSH requerido.

Observando as equações que representam estes dois valores, podemos afirmar que os fatores abaixo relacionados intervêm diretamente no fenômeno da cavitação:

a) A pressão atmosférica no local da instalação, quando o depósito inferior for aberto, ou a pressão no reservatório de aspiração, quando o mesmo for fechado. Nas instalações situadas em altitudes elevadas ou que tenham uma baixa pressão no reservatório de aspiração, devem ser tomados cuidados especiais na escolha da bomba.

b) A temperatura do líquido operado, a qual deve ser tão baixa quanto possível, uma vez que a pressão de vaporização aumenta com a temperatura.

c) A altura estática de aspiração, que deve ter um valor compatível com o tipo de bomba empregado, especialmente em relação a suas características cavitacionais. Em condições normais de funcionamento, os diversos tipos de bombas apresentam os seguintes valores médios para sua altura estática de aspiração máxima:

bombas axiais	2,0m
bombas helicoidais	3,0m
bombas helico-centrífugas	4,5m
bombas centrífugas radiais	5,5m

d) As perdas de carga na tubulação de aspiração, que devem ter um valor mínimo. Para tanto a velocidade na tubulação de aspiração deve ser mantida baixa, como também deve ser usada uma tubulação de aspiração curta e direta, com poucos elementos de resistência, tais como válvulas, curvas, registros, cotovelos, etc., para que as perdas por atrito e turbulência sejam mínimas.

e) A velocidade do líquido na entrada do rotor, que deve ser baixa para não aumentar o valor de  $v^2/2g$ .

f) A altura mínima de entrada ou depressão crítica, que sendo influenciada por diversos parâmetros, deve ter um pequeno valor. Os fatores que mais influenciam o valor de  $\Delta h$  são os seguintes:

- 1) Os bordos de entrada das pás, que devem ser bem arredondados e com uma pequena espessura na entrada.
- 2) O número de pás do rotor, que devem ser suficientes para garantir uma boa condução do líquido.
- 3) A curva de entrada do rotor, que deve ter um raio grande.

4) O acabamento das pás e paredes do rotor, que devem ter o melhor polimento possível, especialmente na entrada.

Dependendo das circunstâncias, pode haver uma maior preponderância de alguns destes fatores sobre os demais, motivo pelo qual especial atenção deve ser dada pelo projetista, quando da elaboração do projeto da instalação ou

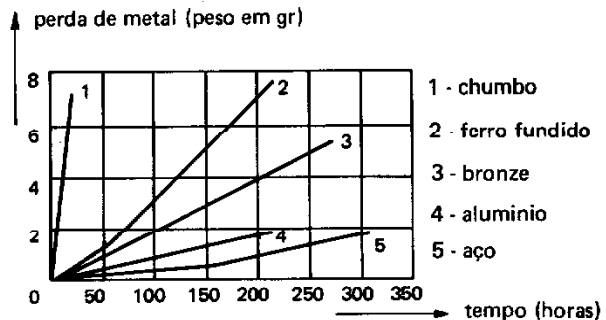
mesmo quando do projeto da bomba, para evitar o aparecimento da cavitação.

## 7. COMBATE À CAVITAÇÃO

Embora possamos retardar a destruição de um rotor empregando-se materiais especiais com superfícies muito lisas, devemos ter em mente que nenhum material pode resistir ao ataque da cavitação por muito tempo.

Na figura podemos observar o desgaste sofrido por rotores construídos com diversos materiais, quando sujeitos a uma operação com cavitação.

### PERDA DE METAL DEVIDO A CAVITAÇÃO



Mesmo os materiais mais resistentes são corroídos depois de certo número de horas de funcionamento com cavitação.

Assim, a recomendação para manter uma bomba com um funcionamento em boas condições não é a seleção de materiais especiais e caros para o rotor, e sim evitar de antemão o aparecimento da cavitação em sua operação normal pelo controle de sua aspiração. O combate à cavitação é feito evitando-se que em qualquer ponto da bomba, a pressão reinante seja menor do que a tensão de vaporização do líquido operado.

Em circunstâncias extremas, quando as condições da instalação obrigarem no funcionamento da bomba nos limites da cavitação, pode-se admitir, excepcionalmente, a confecção de rotores com materiais especiais de alta resistência, tais como aço cromo-vanádio.

### DADOS BIBLIOGRÁFICOS

- FOCKE, Rodolfo. *Bombas Rotativas*, Buenos Aires, Ediciones Libreria del Colegio, 1952, 460p.
- CHURCH, A. H. *Bombas y Máquinas Soplantes Centrífugas*, Barcelona, Editorial Reverté S.A., 1954, 312p.
- SCHULZ, Fuchslocher. *Bombas*, 10e, Barcelona, Editorial Labor S.A., 1964, 332p.
- STEPANOFF, A.J. *Centrifugal And Axial Flow Pumps*, 2e, New York, John Wiley and Row Publishers Inc, 1970, 582p.
- KARASSIK, I. J. et alii. *Pump Handbook*, New York, Mc Graw - Hill Book Company, 1976, 1102p.
- PFLEIDERER, Carl. *Bombas Centrífugas y Turbocon presores*, 4e, Barcelona, Editorial Labor S.A., 1960, 631 p.
- MARTINS, J. A. et alii. *Bombas e Estações Elevatórias*, 2e, São Paulo, Universidade de São Paulo, 1968, 330p.