

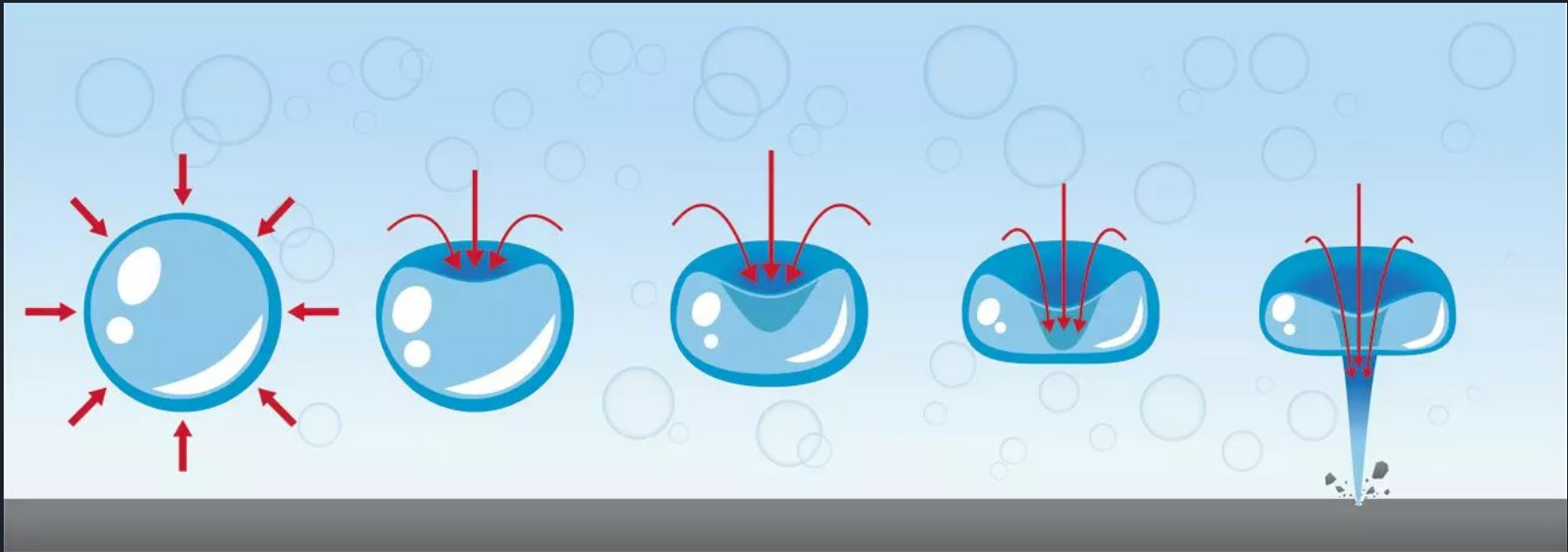


Cavitação em bombas

- O que é?
- Como identificar/medir?
- Como evitar e resolver?

Bruno Leonardo de Sales Norte
Christian Willian Almeida da Silva
Lucas Amorim da Silva

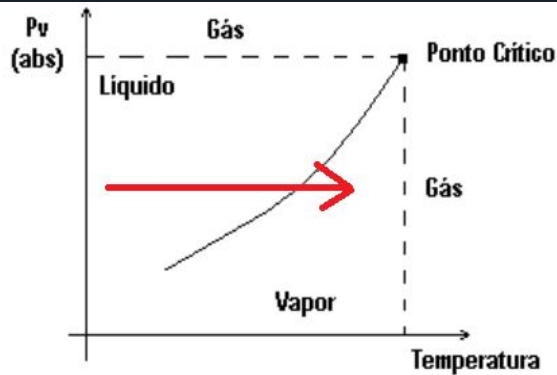
1 - O que é cavitação ?



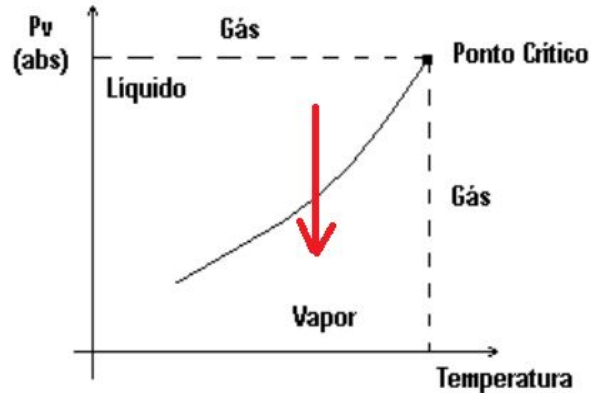
a) Formação das bolhas:

Antes de falar de cavitação é necessário entender alguns conceitos, como o processo para formação das bolhas:

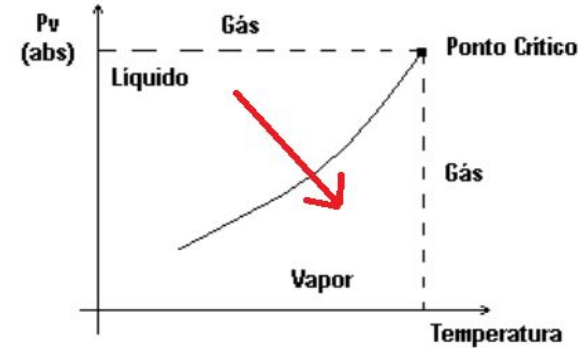
A formação de bolhas de vapor, pode ser através de um aumento de temperatura em uma mesma pressão, ou então diminuindo a pressão para uma mesma temperatura.



(i) Mantendo a pressão constante e variando a temperatura;



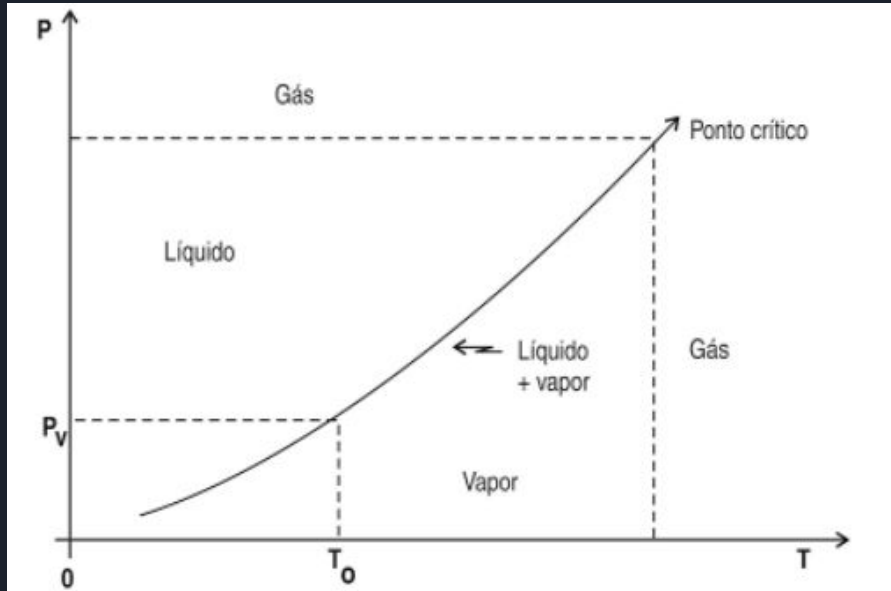
(ii) Mantendo a temperatura constante e variando a pressão;



(iii) Variando a pressão e a temperatura.

b) Pressão de vapor:

Dada uma temperatura, pressão de vapor é a pressão em que ocorre a vaporização de um líquido, ou então é aquela na qual o fluido coexiste em suas fases líquido e vapor .



Para uma dada temperatura, quando tivermos uma

- Pressão maior que a pressão de vapor: haverá somente a fase líquida.
- Pressão menor que a pressão de vapor: haverá somente a fase vapor.

Curva de
Pressão vapor
x Temperatura

b) Pressão de vapor:

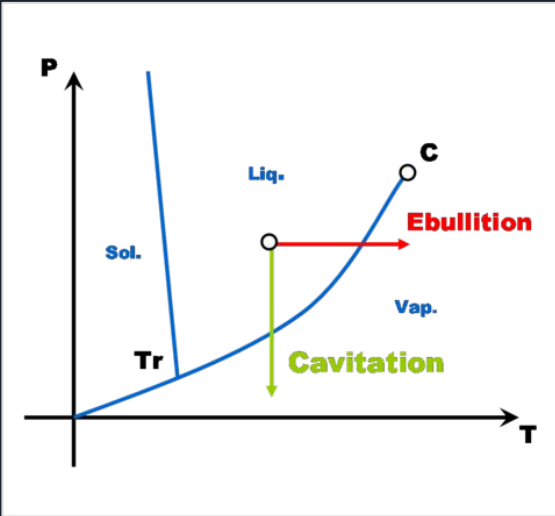
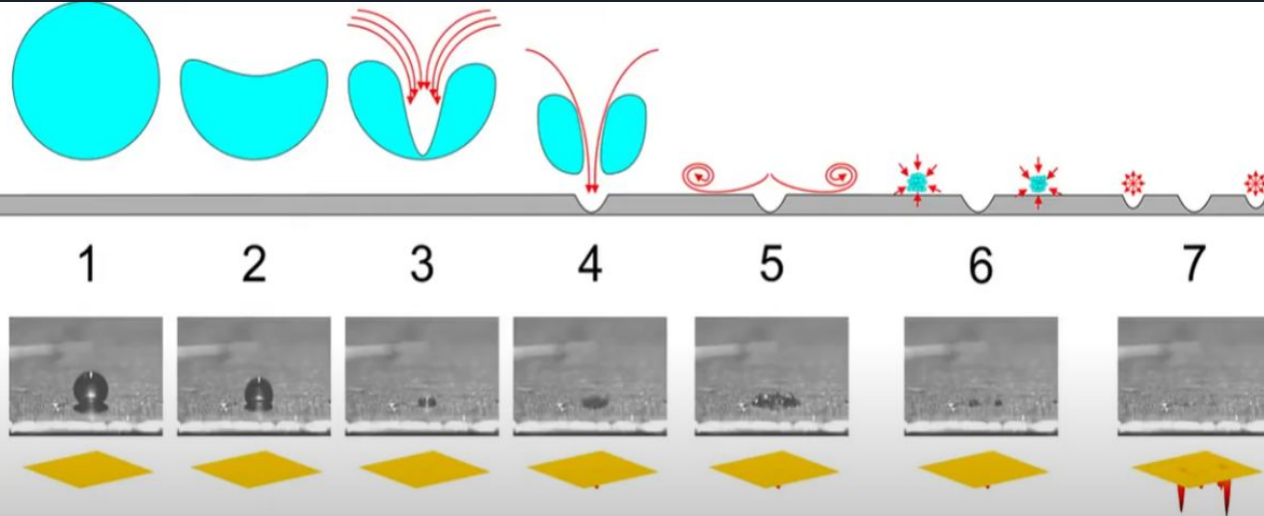
Para a água e em diferentes temperaturas de escoamento

0,01 °C	0,6113 kPa	35 °C	5,628 kPa	70 °C	31,19 kPa
5 °C	0,8721 kPa	40 °C	7,384 kPa	75 °C	38,58 kPa
10 °C	1,2276 kPa	45 °C	9,593 kPa	80 °C	47,39
15 °C	1,705 kPa	50 °C	12,35 kPa	85 °C	57,83 kPa
20 °C	2,339 kPa	55 °C	15,758 kPa	90 °C	70,14 kPa
25 °C	3,169 kPa	60 °C	19,941 kPa	95 °C	84,55 kPa
30 °C	4,246 kPa	65 °C	25,03 kPa	100 °C	101,3 kPa

A tabela mostra o que foi indicado no gráfico: a pressão de vapor de um líquido cresce com o aumento da temperatura.

c) Cavitação:

Se a pressão absoluta do fluido, em qualquer ponto do sistema de bombeamento, for reduzida (ou igualada) abaixo da pressão de vapor, na temperatura de bombeamento, ocorrerá a implosão das bolhas de vapor, com a condensação do vapor e o retorno à fase líquida do fluido.



A implosão gera vibrações, ruídos e perturbações no sistema, como desgaste e remoção de materiais dos componentes mecânicos próximos.



d) Cavitação em bombas

O foco em bombas centrífugas se deve ao fato de que além de serem mais utilizadas e mais facilmente encontradas, o funcionamento desta baseia-se, praticamente, na criação de uma zona de baixa pressão e de uma zona de alta pressão.

Apesar do tema ser direcionado a bombas, vale ressaltar que embora seja comum explicar exemplificando bombas, este fenômeno ocorre em qualquer dispositivo ou ponto do escoamento onde a pressão do líquido diminui a ponto de atingir a pressão de vapor.

Além disso, a título de comparação, há uma situação semelhante à cavitação, que é a injeção de gases em um escoamento, provocando os mesmos efeitos.

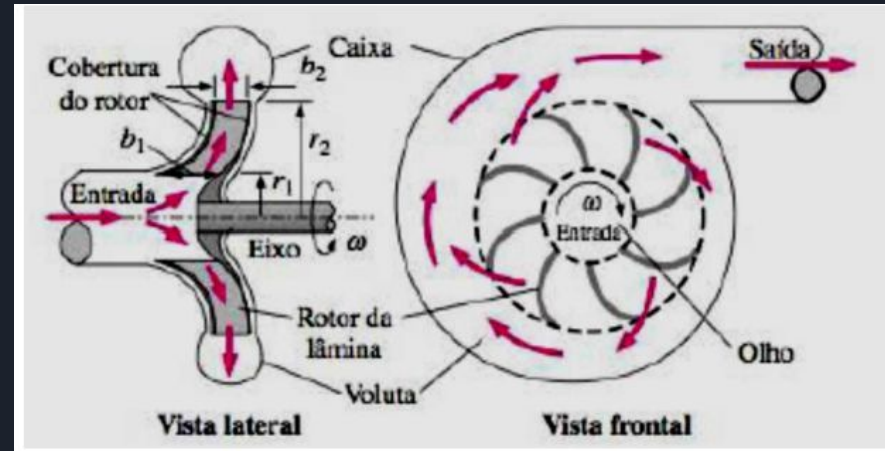
d) Cavitação em bombas

Principalmente as centrífugas, por serem mais comuns.

Devido à rotação do rotor, ligado a uma fonte externa, normalmente um motor elétrico, o fluido é arrastado do centro para a periferia do impelidor.

Prodiz-se assim uma depressão interna ao rotor, o que acarreta um fluxo vindo através da conexão de sucção.

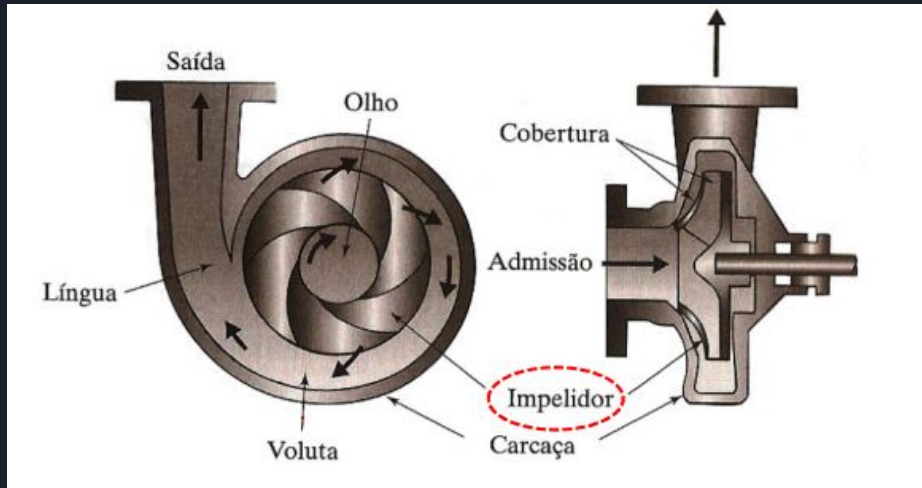
O líquido impulsionado sai do rotor pela sua periferia, em alta velocidade e é lançado na carcaça que contorna o rotor. Na carcaça, grande parte da energia cinética do líquido é transformada em energia de pressão, pela voluta.



d) Cavitação em bombas

Em um escoamento, da tubulação até a entrada da bomba a pressão é diminuída.

Ao passar pelo impelidor, o líquido ganha energia aumentando assim a sua pressão, chegando no ponto de pressão máxima (saída do impelidor) e isto ocorre em um trecho curto.



Tendo isso em vista, a região mais crítica é o olhal do impelidor, onde a pressão é mínima devido ao líquido ainda não ter recebido nenhum acréscimo de energia (pressão).

Imagem ilustrativa de uma bomba centrífuga de sucção única

d) Cavitação em bombas

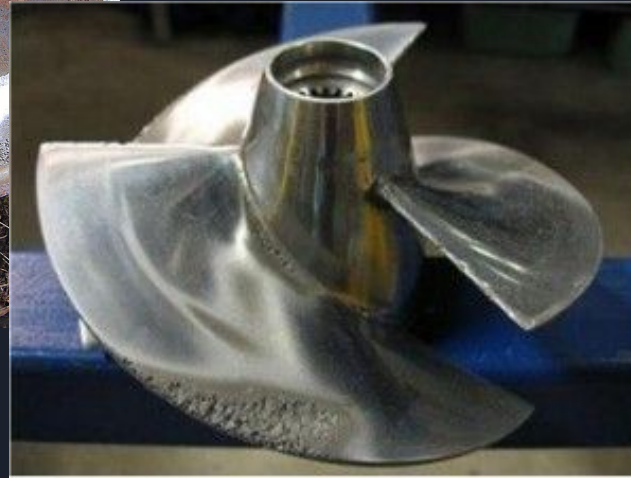


e) Consequências da cavitação em bombas

Com o desgaste significativo e a remoção de material do impelidor e de suas pás/lâminas, o rotor perde sua uniformidade de massa e o fenômeno de desbalanceamento rotativo pode ser observado.



Além disso, a formação de grandes áreas de cavitação nas pás/lâminas podem alterar significativamente sua forma hidrodinâmica e causar perdas hidráulicas adicionais que reduzem a eficiência do sistema.



Existem casos, que a cavitação é tão severa, que gera uma vibração mecânica muito excessiva, de tal maneira, capaz de causar danos a elementos de máquinas mais sensíveis, como por exemplo, os selos mecânicos, vindo a falhar muito além da vida útil esperada.



2 - Como identificar/medir?

A cavitação pode ser mensurada via:

- Expressões analíticas: cálculo de NPSH;
- Medição de grandezas influenciadas pela cavitação. Ou seja, trata-se de uma medição indireta.

Portanto, existem três grandezas principais pelas quais é possível “medir” cavitação:

- Pressão
- Vibração
- Ruído

Além destas, é possível monitorar a vazão/fluxo através da saída, como também utilizar ultrassom de modo a monitorar as cavidades/bolhas.



2 - Como identificar/medir?

A ocorrência da cavitação pode ser estudada por meio do cálculo de NPSH (Net Positive Suction Head), que basicamente é uma medida de pressão.

O NPSH disponível (NPSH_d) é a quantidade de pressão que o sistema fornece ao líquido e depende:

- Das características do sistema;
- Do líquido bombeado

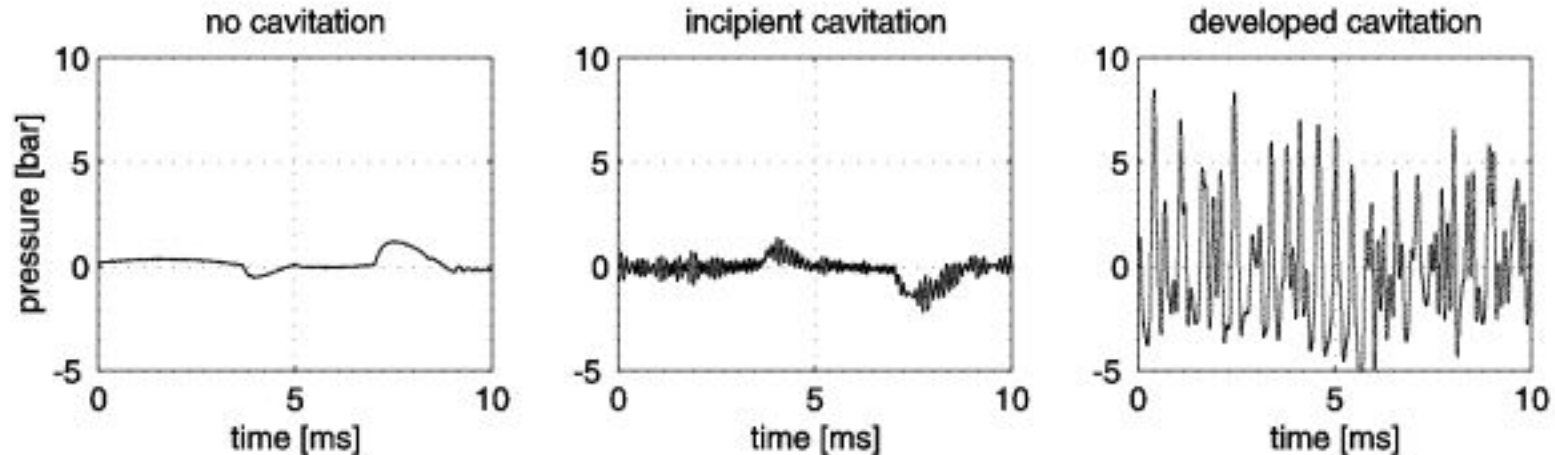
Já a determinação do NPSH requerido (NPSH_r), depende exclusivamente das características da bomba. É obtido através do ensaio de cavitação da bomba.

Se NPSH_d > NPSH_r não ocorrerá cavitação; caso contrário, sim.

$$NPSH_{disp} = h_s + \frac{P_a - P_v}{\gamma} = \left(\frac{P_s}{\gamma} \pm Z_s - h_{fs} \right) + \frac{P_a - P_v}{\gamma}$$

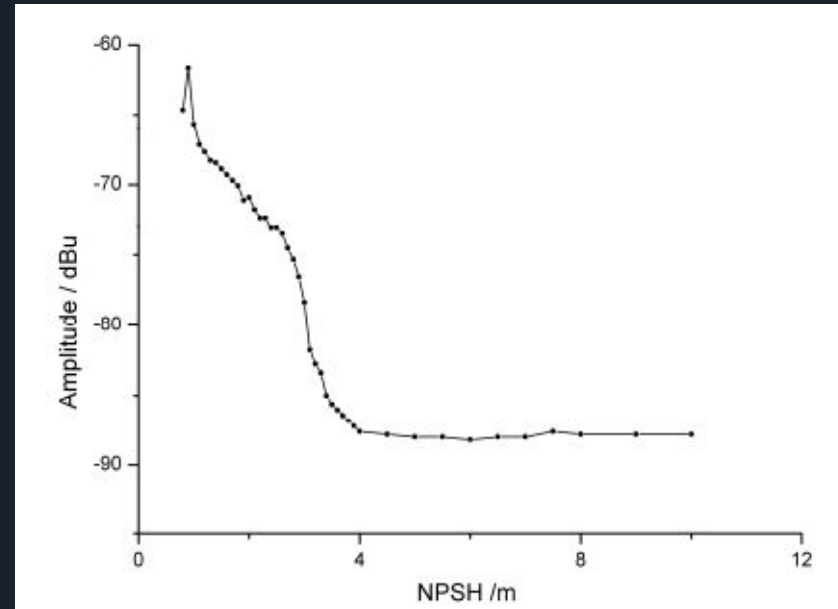
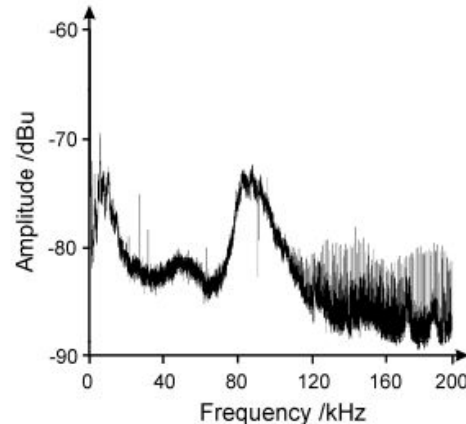
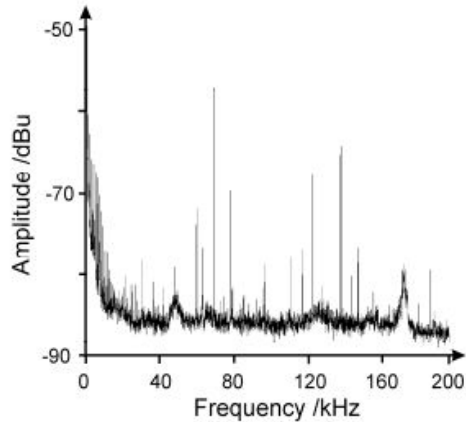
a) Monitoramento da Pressão

- A cavitação vai gerar flutuações de pressão.
- A cavitação é iniciada em frequências muito altas;
- Deve-se usar transdutores de pressão com alta taxa de aquisição;



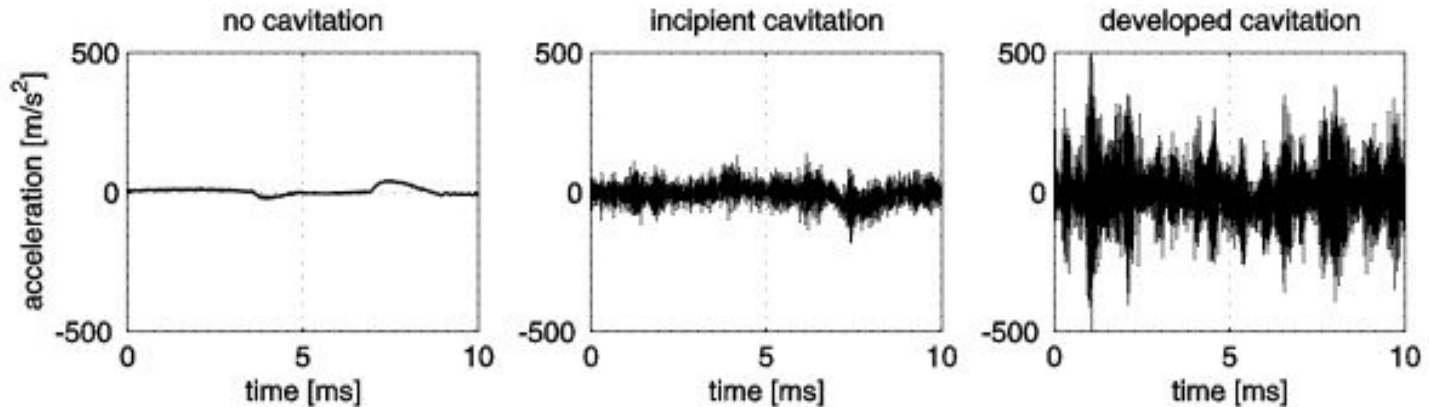
a) Monitoramento da Pressão

- Para frequências acima de 40 kHz:
 - Sem cavitação (NPSHd = 20 m) - Amplitude em torno de -85 dBu
 - Com cavitação (NPSHd = 2 m) - Amplitude em torno de -72 dBu
- O pico de pressão é dependente do NPSH



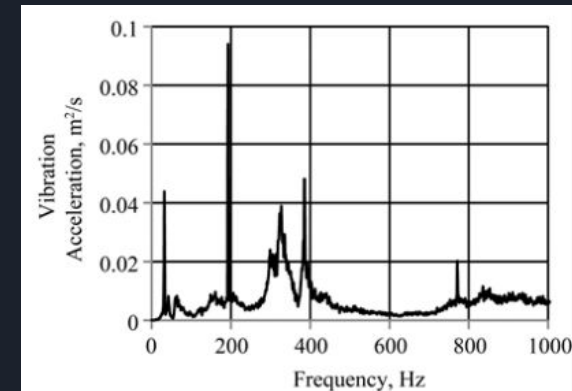
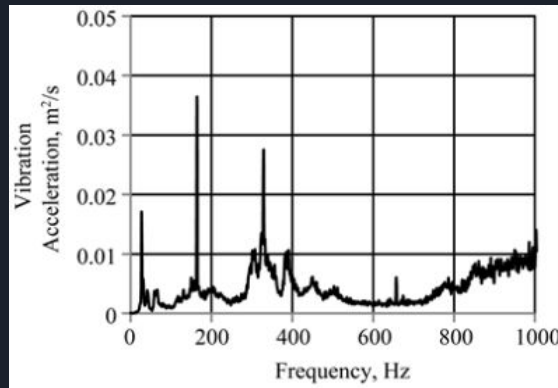
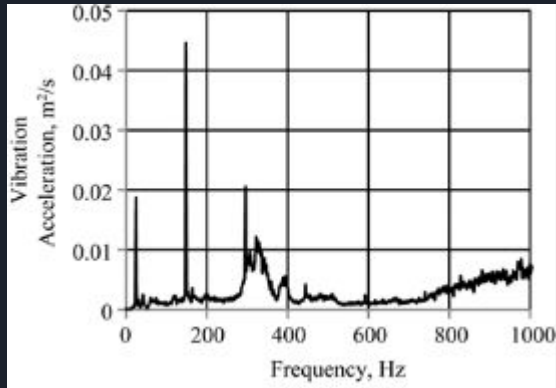
b) Monitoramento da Vibração

- É análogo à medição de pressão estática;
- As ondas de choques induzidas pelas implosões se propagam continuamente no fluido fazendo com que a estrutura vibre;
- Portanto a presença de vibração indica cavitação.



b) Monitoramento da Vibração

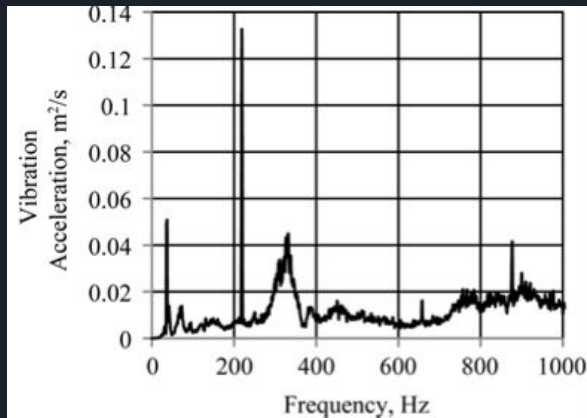
- Analisando a vibração no domínio da frequência para situações sem cavitação: baixas amplitudes de vibração



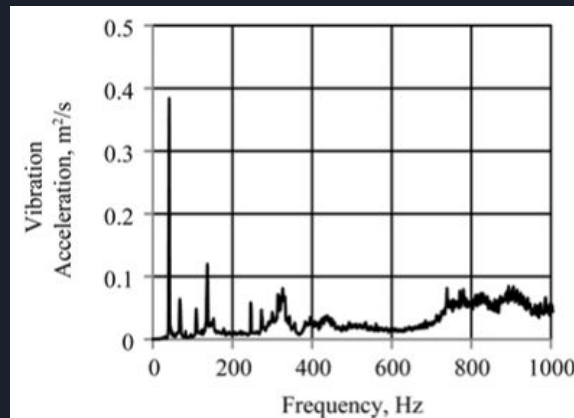
b) Monitoramento da Vibração

- Analisando a vibração no domínio da frequência para situações de cavitação: altas amplitudes de vibração
- Vibração dependente da “força de cavitação”.

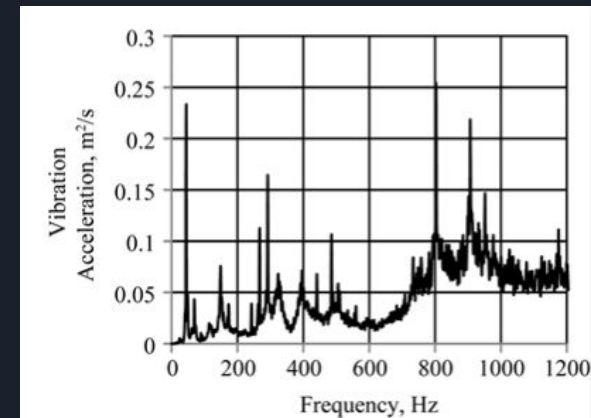
$$\xi = 100 \times \frac{\text{NPSH}_R - \text{NPSH}_A}{\text{NPSH}_R}$$



$\xi = 10,24 \%$



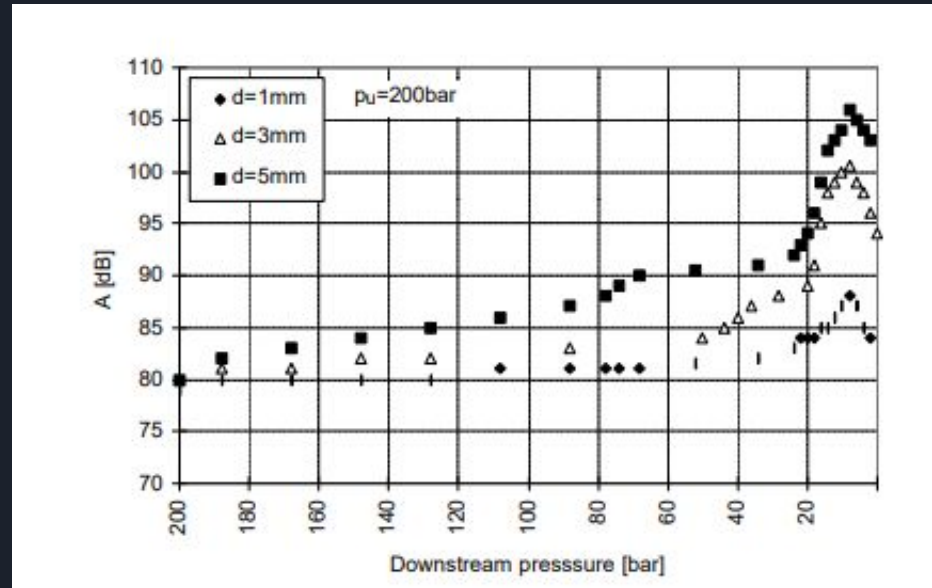
$\xi = 58,10 \%$



$\xi = 40,63 \%$

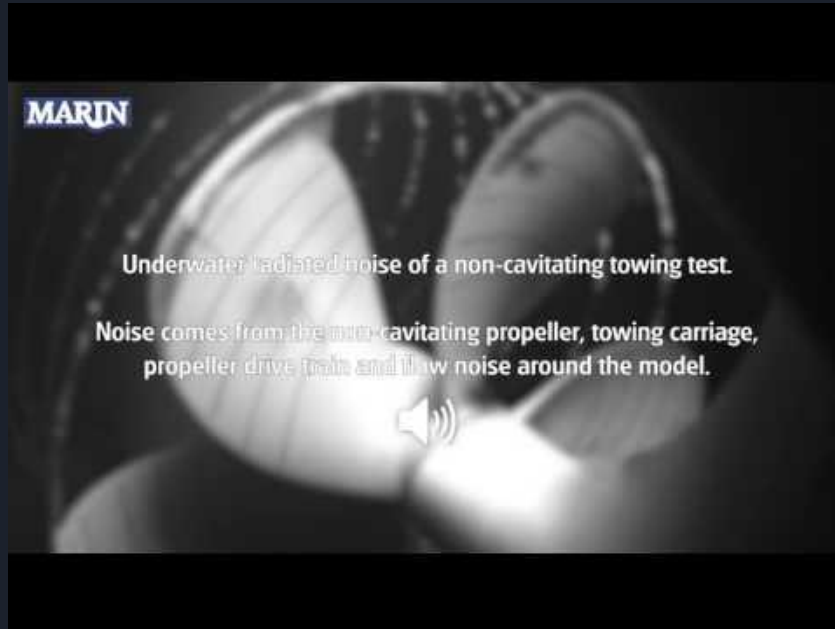
c) Monitoramento do Ruído

- O colapso das bolhas emite um ruído de alta frequência;
- O início da cavitação não é audível ao ouvido humano, mas pode ser captado com uso de microfones;
- Quando a cavitação está desenvolvida, o ruído pode ser ouvido sem uso de equipamentos.



Nível do ruído em função da pressão à jusante.

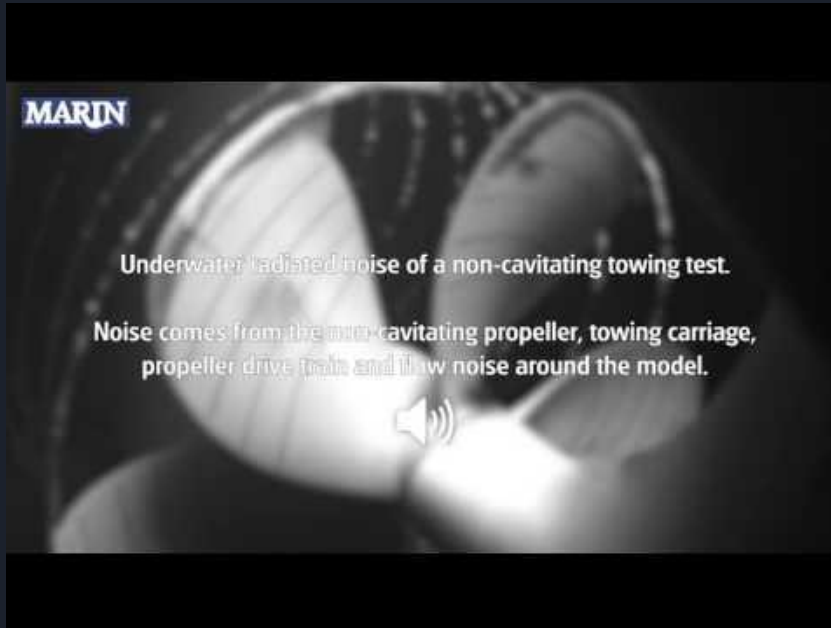
c) Monitoramento do Ruído



- Quando o fluxo está livre de cavitação, o nível de ruído permanece bastante constante sendo devido, principalmente, ao som do ambiente externo.

Ruídos sem cavitação

c) Monitoramento do Ruído

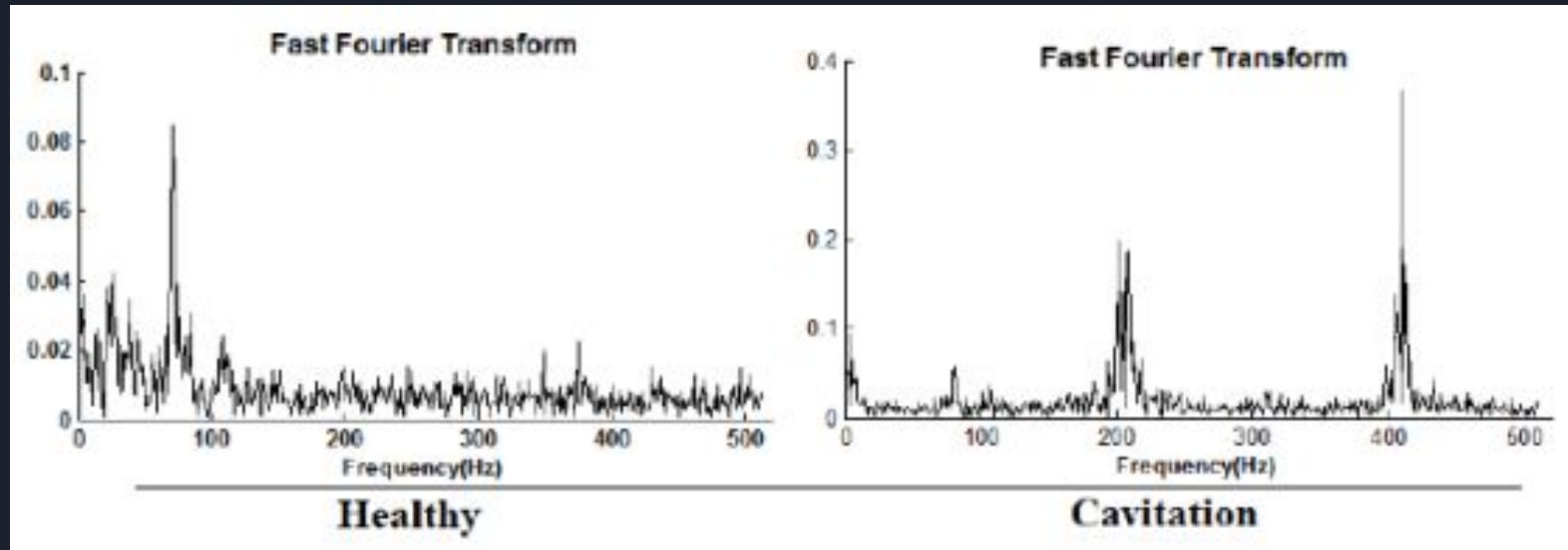


- Quando a cavitação já está desenvolvida, a pressão acústica aumenta rapidamente.

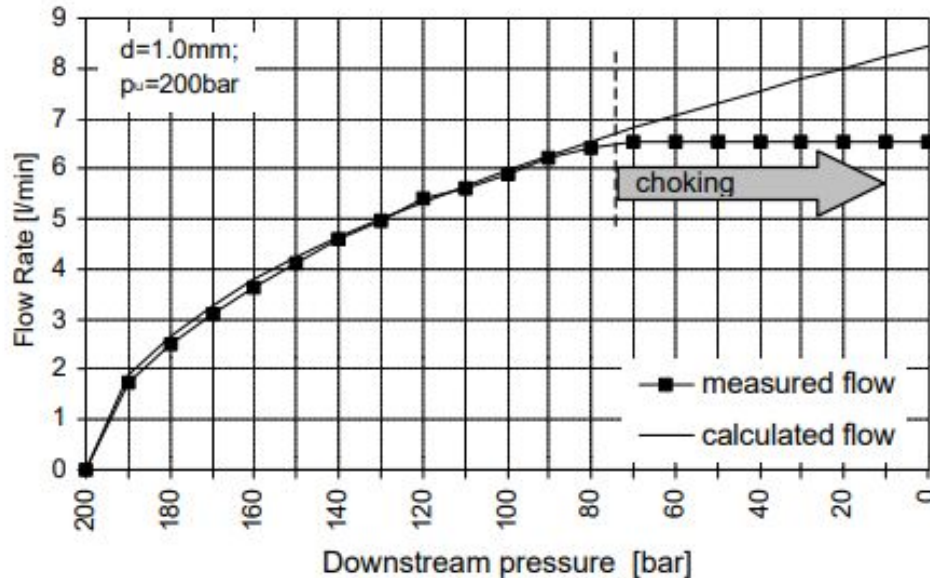
Ruídos com cavitação

c) Monitoramento do Ruído

- A imagem mostra dois espectros do ruído em bombas na situação sem cavitação e com cavitação;
- A cavitação fez com que os picos de amplitude ocorram em frequências mais altas e com amplitudes bem maiores.



d) Monitoramento do fluxo/vazão em regime permanente



- **Saturação:** a vazão é estabilizada mesmo que a variação de pressão continue mudando;
- Quando a saturação é atingida, a eficiência da bomba é comprometida pois a bomba não estará completamente cheia devido à presença de ar. Portanto, a medição de vazão na saída da bomba pode indicar a presença de cavitação.



e) Monitoramento por Ultrassom

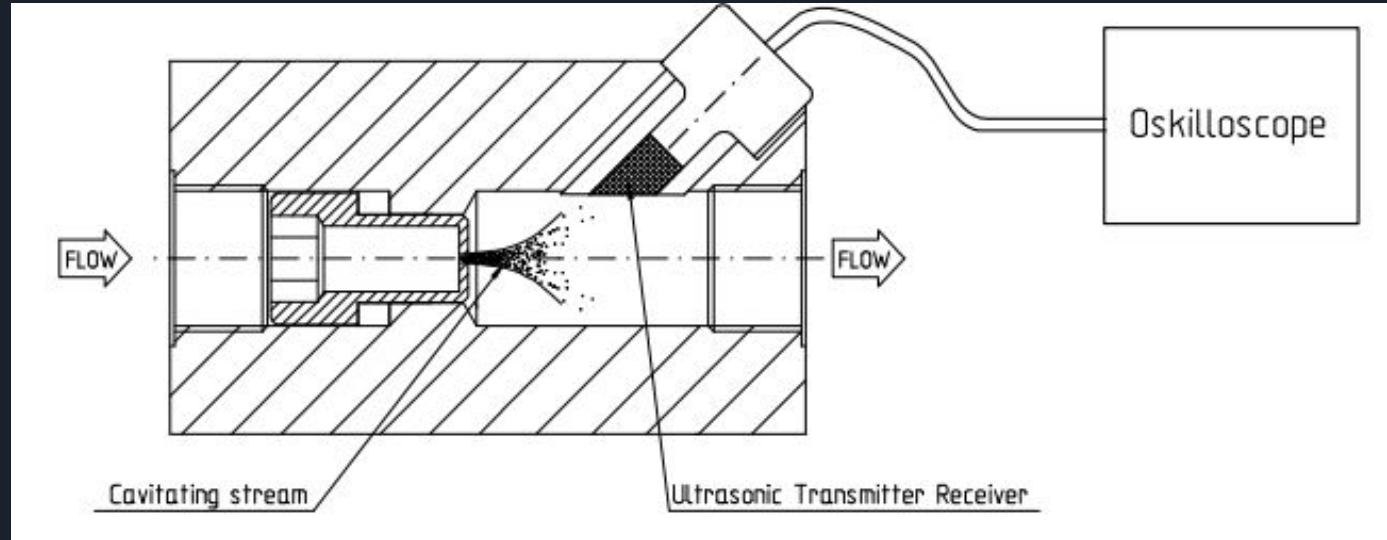
A detecção de cavitação pode ser baseada pela atenuação, reflexão ou espalhamento de ondas ultrassônicas (frequência: 20...10MHz) das bolhas.

A onda ultra-sônica reflete parcialmente nas bolhas de vapor e um pulso de reflexão é visto por um sensor de recepção.

A impedância acústica específica das bolhas é menor do que a em um fluido, evidenciando que o volume das bolhas é grande o suficiente.

e) Monitoramento por Ultrassom

O experimento é baseado na reflexão de ondas ultrassônicas de uma nuvem de cavidades/bolhas.



O sensor para este tipo de aplicação deve possuir feixe largo e o efeito Doppler deve ser considerado ao projetar a largura de banda do sensor.

Além disso, a geometria da câmara de óleo e a localização e orientação do sensor devem ser otimizadas para evitar reflexões pelas paredes da câmara.



3 - Como evitar e resolver a cavitação?

Para evitar as implicações da cavitação, os fabricantes de bombas propuseram o uso de um indutor axial a montante do impelidor da bomba, isto é, antes da entrada.

Desta forma, a pressão estática do fluxo é aumentada antes de entrar na bomba e, como consequência, o fenômeno da cavitação é significativamente reduzido.

Embora o uso deste indutor melhore o comportamento de cavitação da bomba, ainda assim, às vezes bolhas de vapor são desenvolvidas perto da entrada do indutor como resultado das condições de fluxo criadas especialmente nos casos em que a bomba é operada em vazões parciais.

3 - Como evitar e resolver a cavitação?

Conforme previsto, para evitar a cavitação, deve-se manter o NPSH disponível sempre maior que o NPSH requerido, e uma das formas claras é diminuindo a vazão do escoamento conforme o gráfico abaixo.

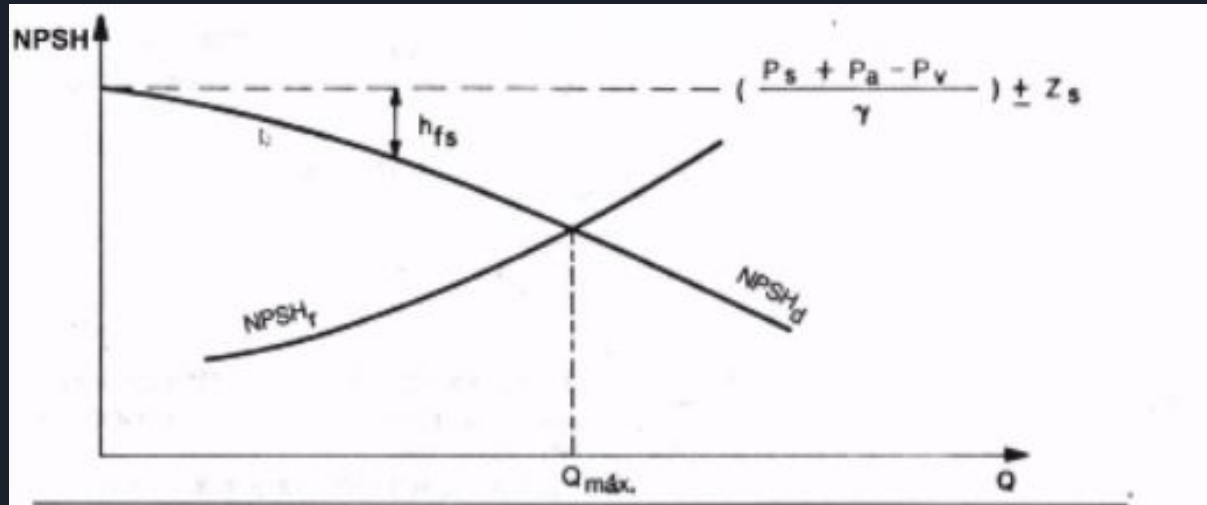


fig 10.16 - Vazão máxima para efeito de cavitação.

Tal fato, deve-se ao motivo de que as perdas de carga (h_{fs}) na linha de sucção crescem com a vazão.

Sendo assim, a bomba deve operar sempre abaixo do $Q_{máx}$ para impedir o início da cavitação.



3 - Como evitar e resolver a cavitação?

O método do NPSH não pode garantir a detecção do início da cavitação.

Isto ocorre devido à incapacidade de se quantificar o efeito na máquina no intervalo de tempo entre o início e a cavitação totalmente desenvolvida.

Como consequência, as diferentes técnicas experimentais citadas anteriormente são realizadas com o objetivo de detectar o início da cavitação.

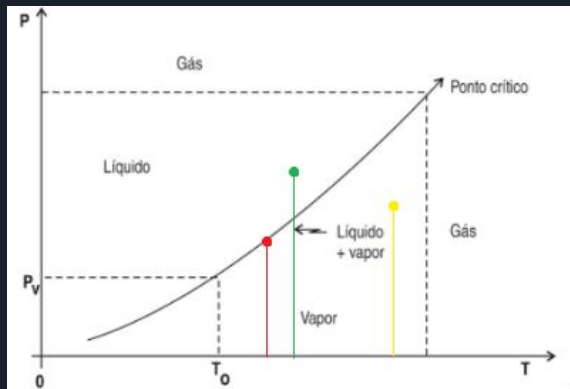
3 - Como evitar e resolver a cavitação?

Outras formas de evitar, consistem na etapa de montagem do maquinário e posicionamento dos equipamentos, isto é:

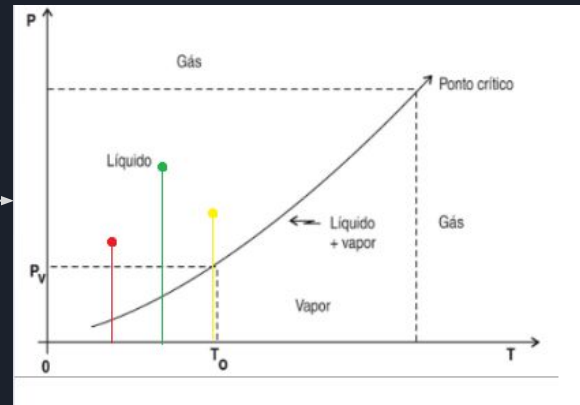
- Selecionar um tipo de válvula que tenha uma queda de pressão menor;
- Usar uma válvula com diâmetro maior que o diâmetro nominal da tubulação.

Além disso, conforme visto nos gráficos da pressão de vapor, podemos:

- Diminuir a temperatura do fluido;



Diminuindo a
temperatura



Em todos os pontos, a pressão do líquido é maior que a pressão de vapor, evitando assim a cavitação.



3 - Como evitar e resolver a cavitação?

É recomendado manter sempre uma altura de sucção positiva, para isso pode-se:

- Aumentar a altura do tanque acima da bomba
- Abaixar o ponto de sucção.

Isto é, ao aumentar a altura de sucção negativa (ao diminuir a altura de sucção positiva), menor será o NPSH disponível e maior será a chance de causar cavitação.

$$NPSH_{disp} = h_s + \frac{P_a - P_v}{\gamma} = \left(\frac{P_s}{\gamma} \pm Z_s - h_{fs} \right) + \frac{P_a - P_v}{\gamma}$$

Além disso, de modo a evitar que a bomba "sugue" ar, caso análogo à injeção de gases, é recomendado que a tubulação fique sempre cheia, como também a bomba deve ficar escorvada, isto é, cheia de líquidos.

5 - Resumindo

De forma resumida, podemos apresentar:

Método Experimental	Configuração do experimento	Custo econômico	Capacidade de detecção
Pressão Estática	Sensores localizados nas partes estacionárias e rotativas da bomba, por exemplo, carcaça e pás, etc.	Baixo custo dos sensores e sua instalação	É capaz de detectar a localização de implosão da bolha
	Atenção diligente para o correto funcionamento dos sensores	Alto custo em caso de sistema de telemetria ou transmissão de sinal através de eixo oco	A banda de baixa frequência não é afetada pelo ruído mecânico
	Uso de sistemas de telemetria para localizar o sensor nas partes rotativas da bomba	Não econômico quando é necessário múltiplos sensores	
	Impraticável para os casos industriais	Sem custo para filtros e amplificadores	



5 - Resumindo

Método Experimental	Configuração do experimento	Custo econômico	Capacidade de detecção
Aceleração da Vibração	Facilmente instalado ao redor da máquina	Alto custo dos sensores e filtros passa alta	É possível detectar o início da cavitação
	O uso de um filtro passa alta é necessário	Sem custo para instalação	Monitoramento multi direcional
	Praticável para os casos industriais		Não aplicável para análise ultrassonica

5 - Resumindo

Pressão Sonora	Hidrofone	Sensores localizados no interior do rotor e próximos da sucção do impelidor	Baixo custo dos sensores e sua instalação	É capaz de detectar e monitorar fenômenos de alta frequência
		Atenção diligente para o correto funcionamento dos sensores	Custo elevado do filtro de passagem	Os sinais são sensíveis à propagação de ondas
		Uso de filtros passa alta		
		Impraticável para os casos industriais		
	Microfone	Há flexibilização para posicionar sensores em diferentes posições próximas a máquina	Baixo custo dos sensores e sua instalação	É capaz de detectar e monitorar fenômenos de alta frequência
		Uso de filtros passa alta	Sem custo para instalação	O ruído do ambiente afeta o sinal e a análise de baixas frequências
		Praticável para os casos industriais	Custo elevado do filtro de passagem	
	Sensor de EA	Facilmente instalado ao redor da máquina	Alto custo dos sensores, amplificadores e filtros passa alta	É capaz de detectar e monitorar fenômenos de alta frequência
		O uso de amplificadores e filtro passa alta são necessários	Sem custo para instalação	É possível detectar o início da cavitação
		Praticável para os casos industriais		

5 - Resumindo

Para o caso de carcaças transparentes, ou regiões transparentes:

Método Experimental	Configuração do experimento	Custo econômico	Capacidade de detecção
Visualização do Escoamento	Uso de janelas transparentes na carcaça e no revestimento do rotor (para o caso de bombas com rotor fechado)	Alto custo dos sensores da câmera de alta velocidade, dos amplificadores e dos filtros passa alta	Deteção implícita e confiável
	Câmera de alta velocidade e estroboscópio são localizados próximos à janela transparente	Alto custo da concepção e fabricação de janelas transparentes	Possível detecção da localização da bolha na implosão
	É impraticável instalar partes transparentes em bombas industriais		