

Aula 3 de Operações Unitárias I

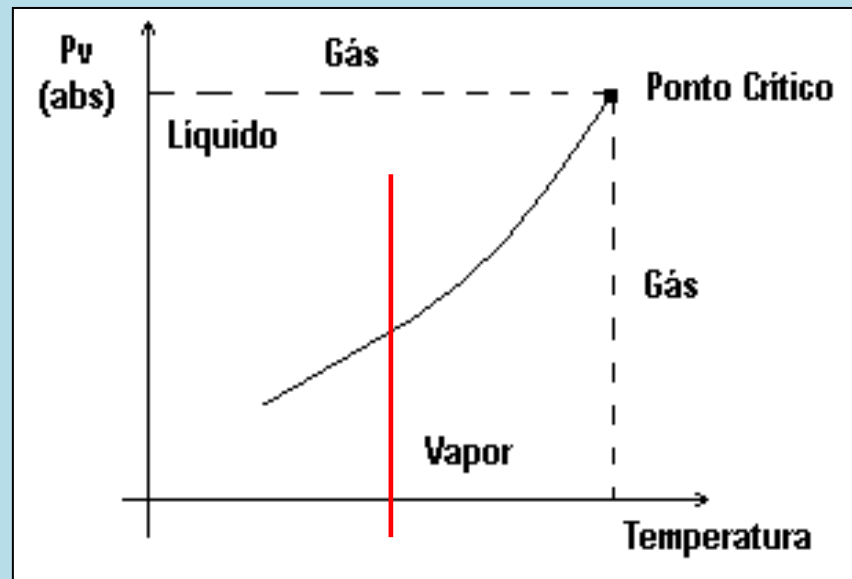
Prof. Geronimo

CAVITAÇÃO

- Cavitação é um fenômeno de ocorrência limitada a líquidos, com consequências danosas para o escoamento e para as regiões sólidas onde a mesma ocorre.
- O estudo da cavitação pode ser dividido em duas partes: o fenomenológico, que corresponde à identificação e combate à cavitação e seus efeitos; e o teórico, onde interessa o equacionamento do fenômeno, visando a sua quantificação no que se refere às condições de equilíbrio, desenvolvimento e colapso das bolhas.
- Para o perfeito entendimento da cavitação, torna-se necessário abordar o conceito de pressão de vapor.

Pressão de Vapor

- Pressão de vapor de um líquido a uma determinada temperatura é aquela na qual o fluido coexiste em suas fases líquido e vapor.



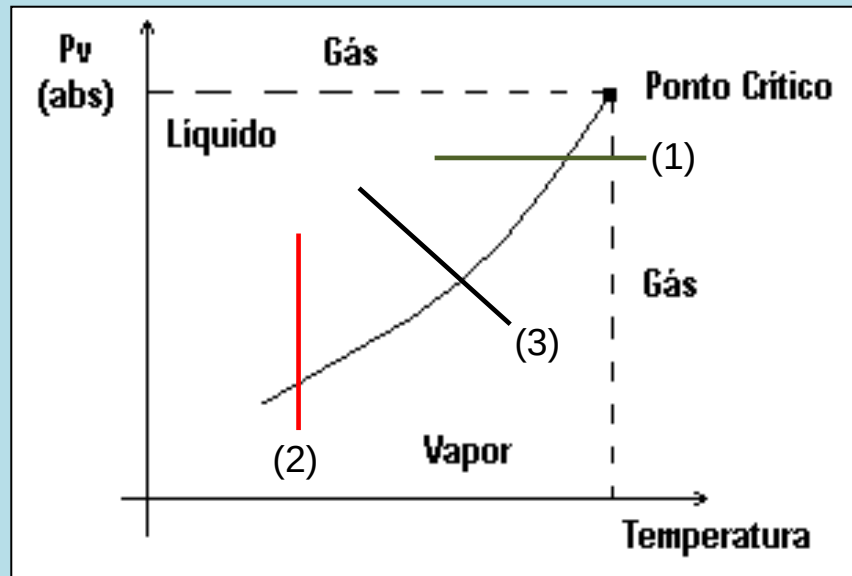
- Em uma mesma temperatura, quando tivermos uma pressão maior que a pressão de vapor, haverá somente a fase líquida e quando tivermos uma pressão menor, haverá somente a fase vapor.

Pressão de Vapor

Observa-se, que a pressão de vapor de um líquido cresce com o aumento da temperatura. Analisando a curva de pressão de vapor, verifica-se que pode-se passar de uma fase para outra, de varias maneiras, por exemplo:

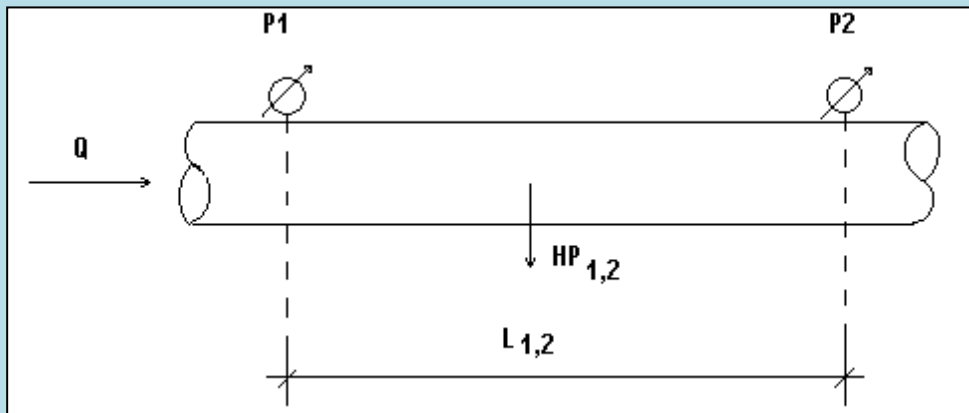
1. mantendo a pressão constante e variando a temperatura.
2. mantendo a temperatura constante e variando a pressão.
3. variando pressão e temperatura.

Assim, mantendo-se a pressão de um líquido constante, (por ex. pressão atmosférica) e aumentando-se a temperatura, chega-se até um ponto em que a temperatura corresponde à pressão de vapor e passa-se a ter a ebulição.



Conceito de Cavitação

- ❑ Pelo conceito de pressão de vapor, vimos que mantendo-se um fluido a uma temperatura constante e diminuindo-se a pressão, o mesmo ao alcançar a pressão de vapor, começará a vaporizar.
- ❑ Este fenômeno ocorre nas bombas centrífugas, pois o fluido perde pressão ao longo do escoamento na tubulação de sucção.
- ❑ O esquema abaixo representa duas seções (1) e (2), quaisquer, no sistema de escoamento na sucção de uma bomba



$$H_1 - HP_{1,2} = H_2$$

$$\left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right) - HP_{1,2} = \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right)$$

$$\text{mas: } V_1 = V_2 \quad \text{e} \quad Z_1 = Z_2$$

$$\frac{P_1}{\gamma} = HP_{1,2} = \frac{P_2}{\gamma}$$

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} - HP_{1,2}$$

Conceito de Cavitação

- ❑ Se a pressão absoluta do líquido, em qualquer ponto do sistema de bombeamento, for reduzida (ou igualada) abaixo da pressão de vapor, na temperatura de bombeamento; parte deste líquido se vaporizará, formando “cavidades” no interior da massa líquida. Estará aí iniciado o processo de cavitação.
- ❑ As bolhas de vapor assim formadas são conduzidas pelo fluxo do líquido até atingirem pressões mais elevadas que a pressão de vapor **(normalmente na região do rotor)**, onde então ocorre a **implosão (colapso)** destas bolhas, com a condensação do vapor e o retorno à fase líquida. Tal fenômeno é conhecido como CAVITAÇÃO.
- ❑ Normalmente a cavitação é acompanhada por ruídos, vibrações e com possível erosão das superfícies sólidas (pitting).
- ❑ Deve-se salientar, que a erosão por cavitação não ocorre no local onde as bolhas se formam, mas sim onde as mesmas implodem.

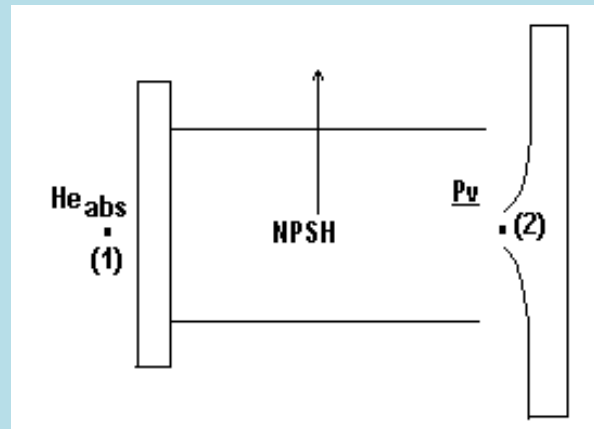
Conceito de Cavitação

- ❑ Os efeitos da cavitação dependem do tempo de sua duração, da sua intensidade, das propriedades do líquido e da resistência do material à erosão por cavitação.
- ❑ A cavitação, naturalmente, apresenta um barulho característico, acompanhado de redução na altura manométrica e no rendimento. Se de grande intensidade, aparecerá vibração, que comprometerá o comportamento mecânico da bomba.
- ❑ Em resumo, são os seguintes, os inconvenientes da cavitação:
 - a) Barulho e vibração.
 - b) Alteração das curvas características.
 - c) Erosão - remoção de partículas metálicas - pitting.
- ❑ O ponto crítico para a cavitação é a entrada do rotor. Nesta região a quantidade de energia é mínima, pois o líquido ainda não recebeu nenhuma energia por parte do rotor.
- ❑ A cavitação, normalmente, inicia-se nesse ponto, em seguida, as cavidades são conduzidas pela corrente líquida provocada pelo movimento do rotor, alcançando regiões de pressão superior à de vapor do fluido, onde se processa a implosão das cavidades (bolhas).

NPSH – Net Positive Suction Head

- ❑ O NPSH é um conceito oriundo da escola americana, que predominou entre os fabricantes instalados no país e na norma da ABNT que trata de ensaios de cavitação em bombas.
- ❑ A condição $P_{e_{abs}} > P_v$ é necessária mas não suficiente, pois pôr detalhes construtivos poderá ocorrer cavitação no interior da própria máquina.
- ❑ Em termos práticos, o procedimento usual para analisarmos a operação de determinada bomba num sistema, é através do conceito de **NPSH_{REQ.}** e **NPSH_{DISP.}**
- ❑ O NPSH representa a “Energia Absoluta” no flange de sucção, acima da pressão de vapor do fluído naquela temperatura.

$$NPSH = He_{abs} - \frac{P_{VAPOR}}{\gamma}$$

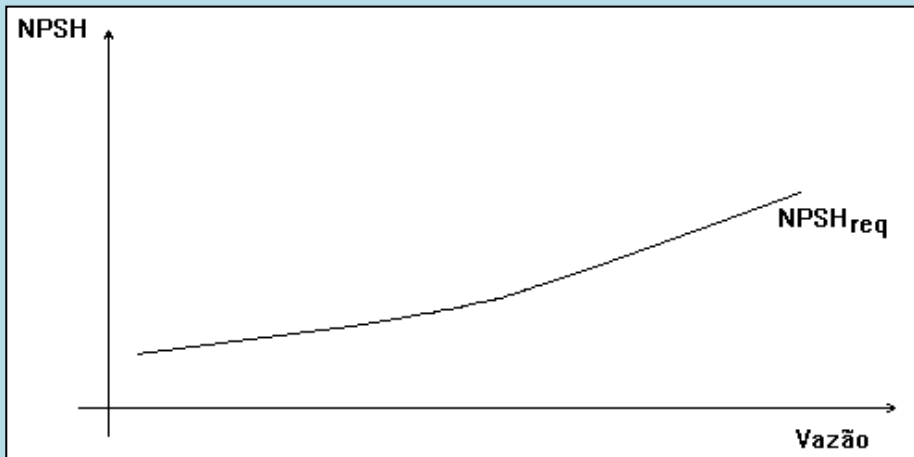


$$NPSH = He_{abs} - \frac{P_v}{\gamma}$$

$$He_{abs} - NPSH = \frac{P_v}{\gamma}$$

NPSH – Requerido

- ❑ Cada bomba, em função de seu tamanho, características construtivas, etc..., necessita de uma determinada energia absoluta (acima da pressão de vapor) em seu flange de sucção, de tal modo que a perda de carga que ocorrerá até à entrada do rotor não seja suficiente para acarretar cavitação, quando operada naquelas condições de vazão. A esta energia denominamos NPSH REQUERIDO.
- ❑ Os fabricantes de bombas fornecem o NPSH requerido, através de uma curva $NPSH_{req}$ x VAZÃO, para cada bomba de sua linha de fabricação, conforme padrão abaixo:



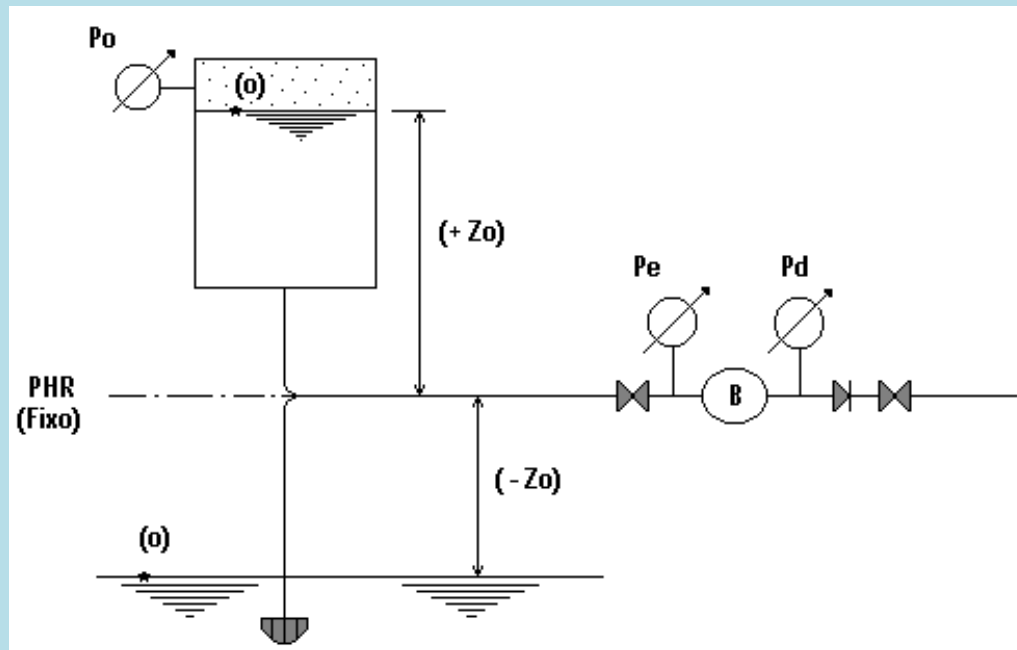
Esta curva é uma característica própria da bomba, sendo obtida experimentalmente, através de testes de cavitação em bancadas do fabricante, com água fria a 20° C. Portanto, o NPSH requerido, representa a energia absoluta do líquido, acima de sua pressão de vapor, necessária no flange de sucção da bomba, de tal forma que garanta a não ocorrência de cavitação na mesma.

NPSH – Disponível

- O NPSH disponível é uma característica do sistema e representa, ou define, a quantidade de energia absoluta disponível no flange de sucção da bomba, acima da pressão de vapor do fluido naquela temperatura.
- O NPSH disponível pode ser calculado de duas formas:
 - fase de projeto
 - fase de operação

$NPSH_{DISP}$ - Fase de Projeto

- ❑ O esquema abaixo representa duas situações de instalações hidráulicas:
- ❑ Uma com a bomba succionando de um reservatório cujo nível está acima da linha de centro da bomba (bomba afogada)
- ❑ E outra com a bomba succionando de um reservatório com cota inferior à linha de centro da bomba.



Vamos aplicar o balanço de energia na sucção.
Pela definição:

$$NPSH_{DISP} = He_{ABS} - \frac{P_v}{\gamma}$$

$$Ho_{ABS} - HP_{SUC} = He_{ABS}$$

NPSH_{DISP} - Fase de Projeto

❑ Então temos:

$$\left(\frac{P_O + P_{ATM}}{\gamma} \right) + \frac{V_0^2}{2g} \pm Z_{SUC} - HP_{SUC} = He_{ABS}$$

❑ Substituindo o valor da energia absoluta de entrada em função do NPSH_{disp.}, temos:

$$NPSH_{DISP} = \left(\frac{P_O + P_{ATM}}{\gamma} \right) + \frac{V_0^2}{2g} \pm Z_{SUC} - HP_{SUC} - \frac{P_V}{\gamma}$$

❑ Para $v_0 = 0$, ou seja nível do reservatório constante.

$$NPSH_{DISP} = \left(\frac{P_O + P_{ATM} - P_V}{\gamma} \right) \pm Z_{SUC} - HP_{SUC}$$

P_O - pressão manométrica no reservatório de sucção.

P_{ATM} - pressão atmosférica local.

P_V - pressão de vapor do fluido à temperatura de bombeamento.

HP_{SUC} - perda de carga total na sucção.

Z_{SUC} - cota da superfície do nível do reservatório de sucção.

NPSH_{DISP} - Fase de Projeto

- ❑ Analisando-se a expressão do NPSH_{DISP}, verifica-se que para obter valores elevados, deve-se tomar as seguintes providencias:
- ❑ diminuir a altura geométrica de sucção negativa ($-Z_{SUC}$), ou aumentar a altura geométrica de sucção positiva ($+Z_{SUC}$),
- ❑ diminuir a perda de carga na sucção. Para tal recomenda-se:
 - utilizar tubulações curtas.
 - baixar a velocidade do fluído na sucção, aumentando-se o seu diâmetro.
 - reduzir número de acessórios (curvas, válvulas, etc...).
- ❑ diminuir a temperatura do fluído bombeado, para diminuir a pressão de vapor do mesmo.

$NPSH_{DISP}$ - Fase de Operação

❑ Do balanço de energia na sucção temos:

$$NPSH_{DISP} = H_{e_{ABS}} - \frac{P_V}{\gamma}$$

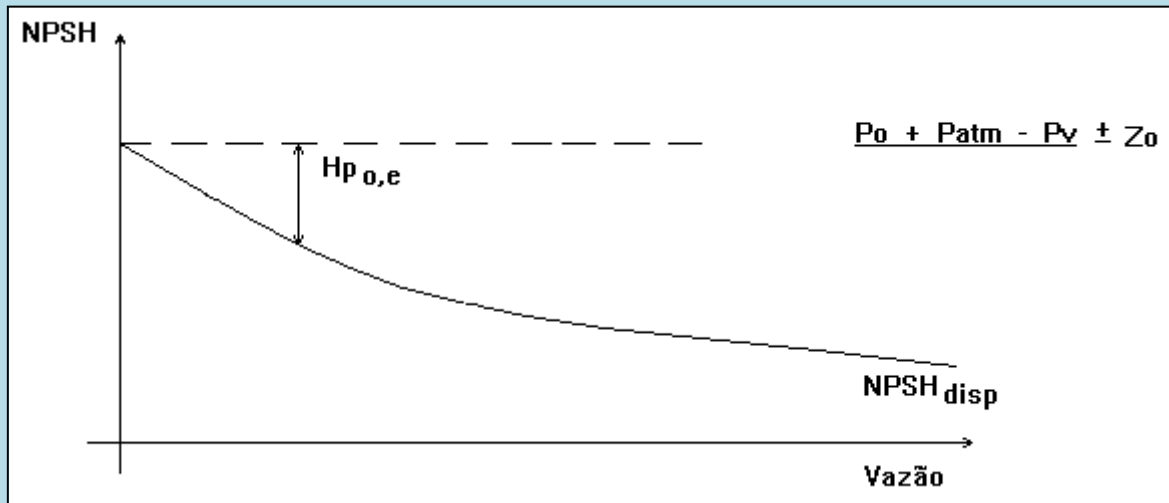
$$NPSH_{DISP} = \left[\left(\frac{P_e + P_{ATM}}{\gamma} \right) + \frac{V_e^2}{2g} + Z_e \right] - \frac{P_V}{\gamma}$$

$$NPSH_{DISP} = \left[\left(\frac{P_e + P_{ATM} - P_V}{\gamma} \right) + \frac{V_e^2}{2g} + Z_e \right]$$

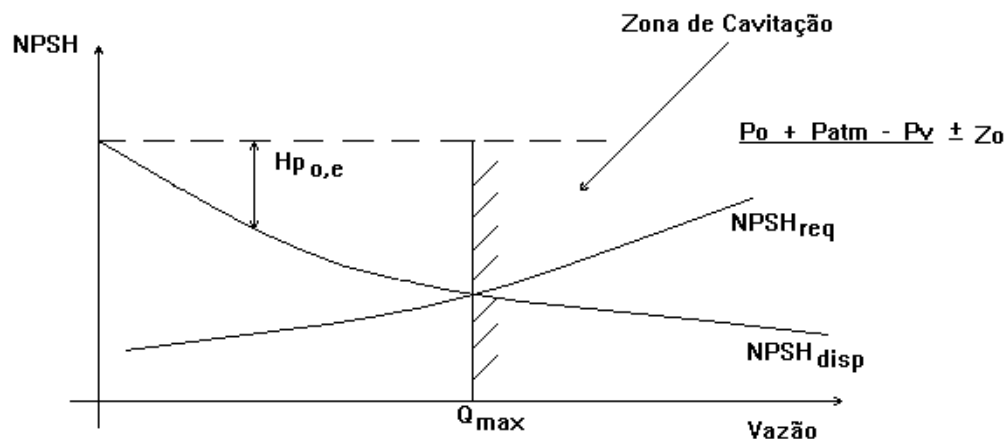
- ONDE:
- P_e - pressão na entrada da bomba, isto é, no flange de sucção (manométrica).
- P_{ATM} - pressão atmosférica local.
- P_V - pressão de vapor do líquido à temperatura de bombeamento.
- V_e - velocidade do fluxo na sucção da bomba (local da tomada de pressão).
- Z_e - distancia entre a linha de centro da bomba e do manômetro.

NPSH_{DISP} - Fase de Operação

□ Dessa forma temos a curva.



□ Analisando as curvas $NPSH_{Req.}$ E $NPSH_{Disp.}$



Para não ocorrer cavitação, devemos ter:

$$NPSH_{DISP} \geq NPSH_{REQ}$$

Na prática utilizamos:

$$NPSH_{DISP} \geq 1,20 \ NPSH_{REQ}$$

No mínimo:

$$NPSH_{DISP} \geq (NPSH_{REQ} + 1,0) \text{ m}$$

- Exercício.
- No esquema da figura abaixo, qual deve ser a máxima altura z para que não haja cavitação com a água a 20 °C? Dados: $Q = 12 \text{ L/s}$; $D = 10 \text{ cm}$; $p_{\text{atm}} = 93,6 \text{ kPa}$; $p_{\text{vap}} = 2,46 \text{ kPa (abs)}$; tubo de aço comercial. ($\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\gamma = 10^4 \text{ N/m}^3$).

