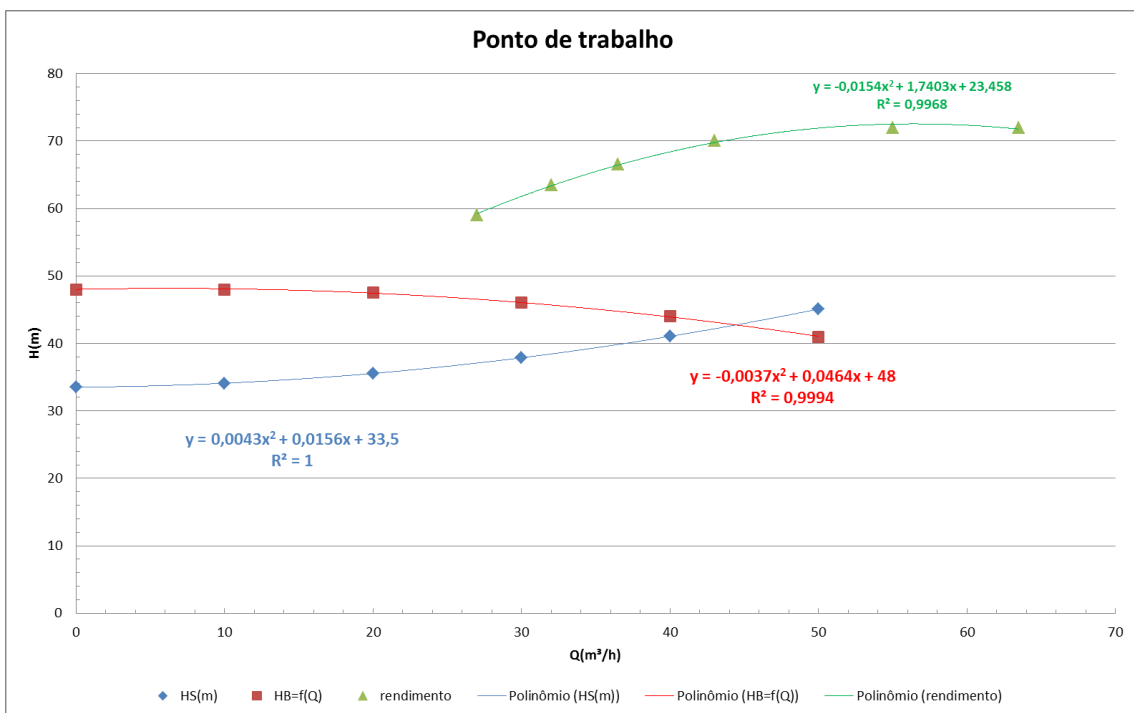


Quarta aula de ME 5330 – primeiro semestre de 2015

Nesta aula objetivo estabelecer a região ideal para o funcionamento das bombas hidráulicas e estudar o fenômeno de cavitação.

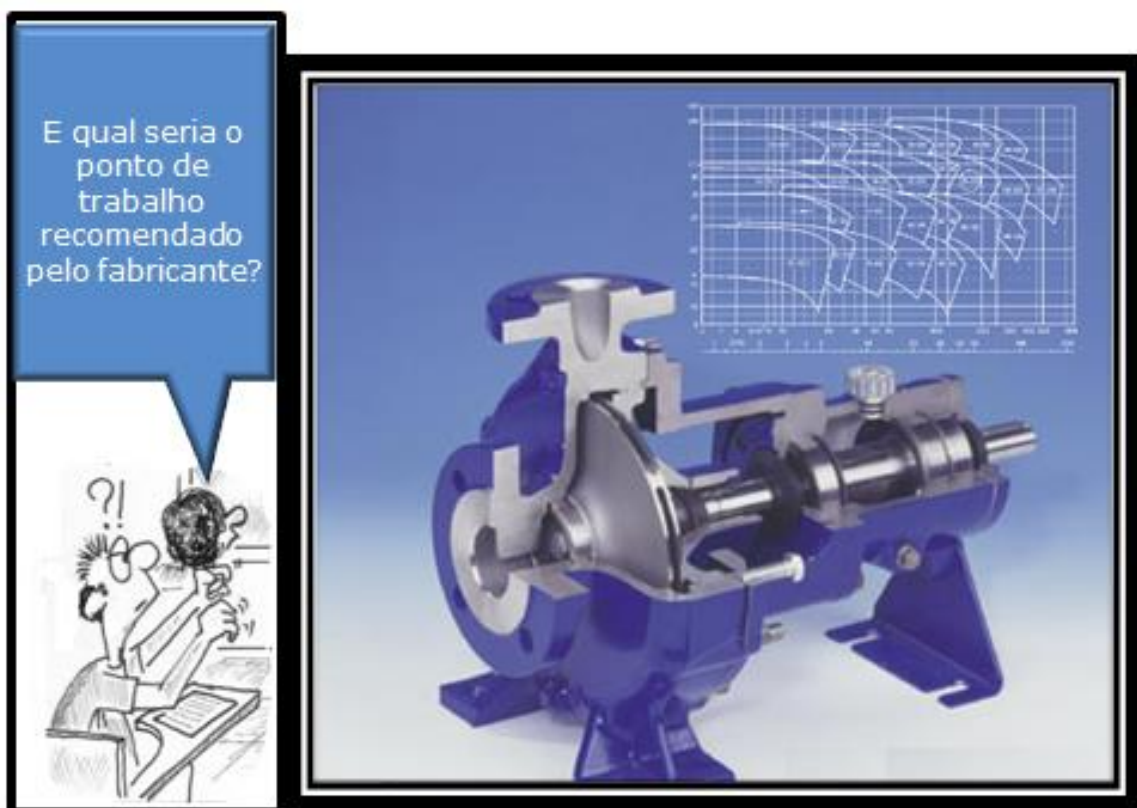


Para o nosso projeto, optando pela bomba 40-160 de 3500 rpm da KSB, obtivemos o ponto de trabalho:

$$Q_{\tau} = 44,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}; H_{B_{\tau}} = 42,7\text{m}; \eta_{B_{\tau}} = 70,4\%;$$

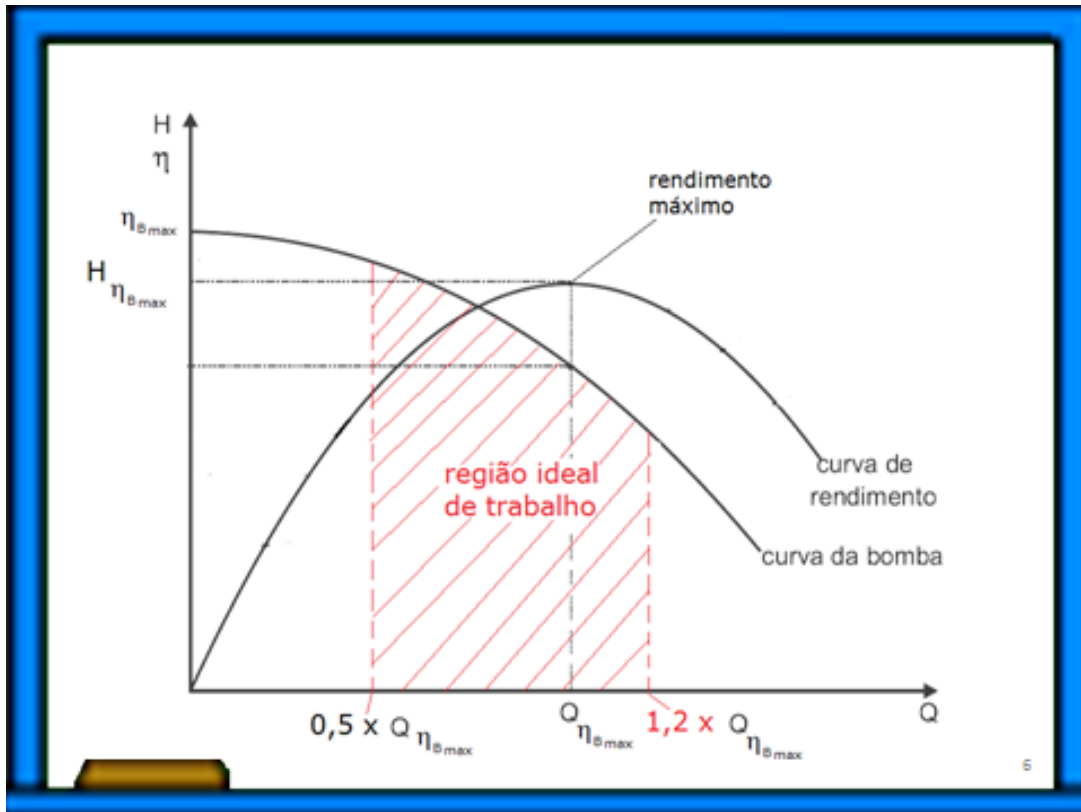
$$N_{B_{\tau}} = 7334,3\text{W}$$

Poderíamos nos questionar: o ponto de trabalho obtido é o ponto de trabalho recomendado pelo fabricante?



O fabricante recomenda trabalhar no rendimento máximo e a este ponto o fabricante denomina de “ponto de projeto” o qual pode ser diferente do ponto de projeto do projetista e que foi definido pelo produto da vazão desejada pelo fator de segurança e esta vazão aplicada na equação da CCI originou a carga manométrica de projeto, ambas utilizadas para escolha preliminar da bomba.





Mas como obter o rendimento máximo para a bomba escolhida?

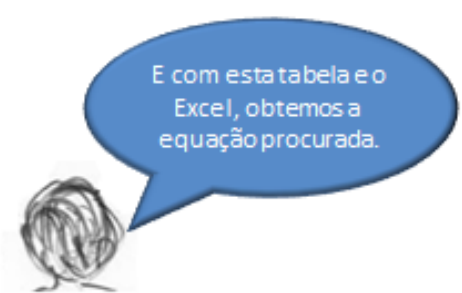
Para obtê-lo, ou o vemos no próprio gráfico do fabricante, ou obtemos através do conceito de ponto de máximo a vazão que permite calculá-lo.



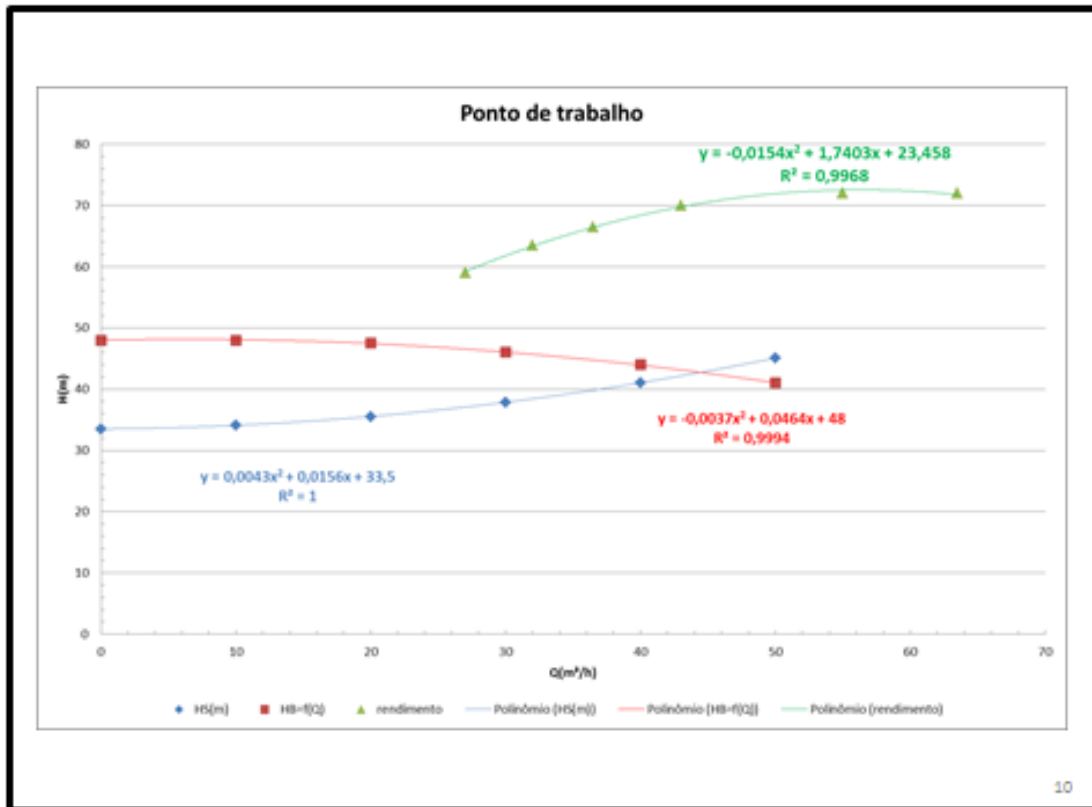


Para resolvê-lo primeiro obtemos a equação que representa a curva do rendimento da bomba em função da vazão e para isto através das curvas fornecidas pelo fabricante, temos a tabela dada no próximo slide

| Q(m ³ /h) | hB(%) |
|----------------------|-------|
| 27 | 59 |
| 32 | 63,5 |
| 36,5 | 66,5 |
| 43 | 70 |
| 55 | 72 |
| 63,5 | 72 |



E com esta tabela e o Excel, obtemos a equação procurada.



A equação do rendimento da bomba em função da vazão é representada pela equação:

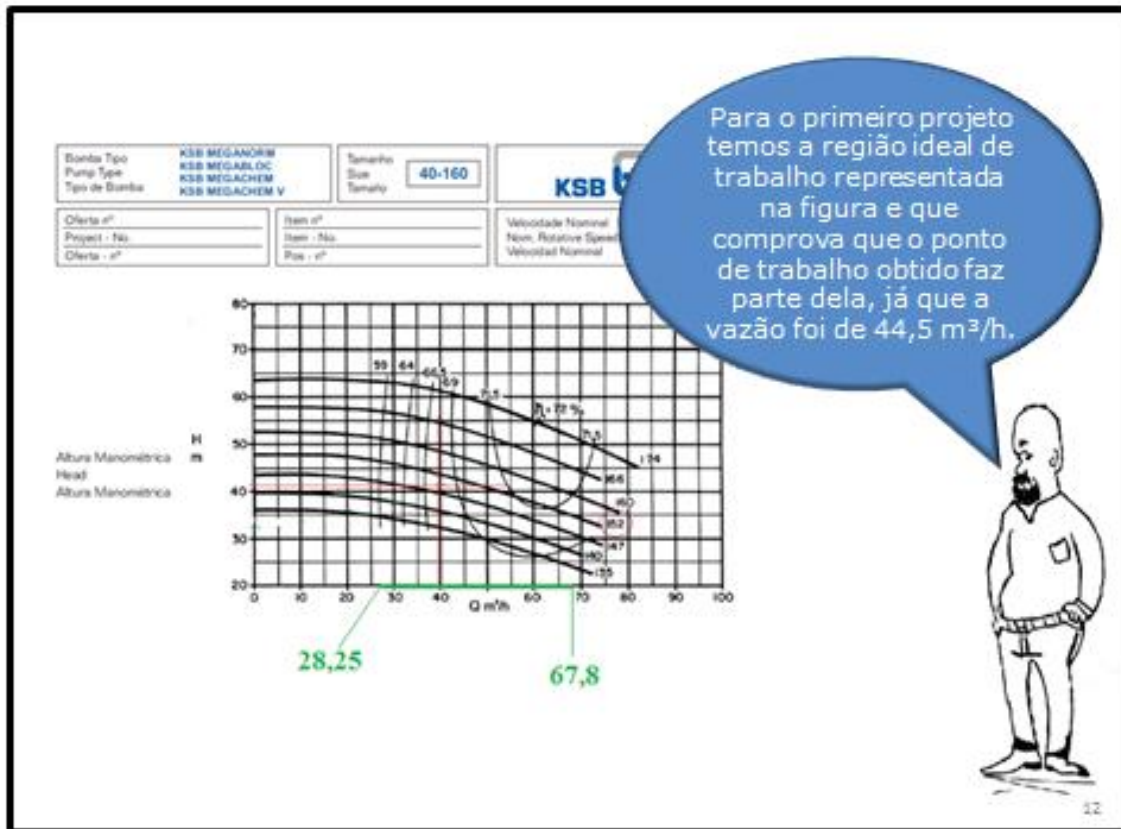
$$\eta_B = -0,0154 \times Q^2 + 1,7403 \times Q + 23,458$$


$$\eta_B = -0,0154 \times Q^2 + 1,7403 \times Q + 23,458$$

$$\frac{d\eta_B}{dQ} = 0 \Rightarrow Q_{\eta_{B_{\max}}}$$

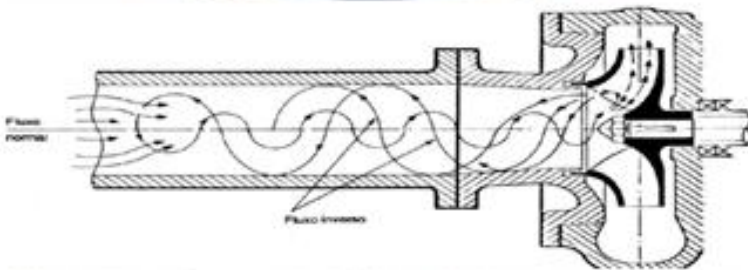
$$-0,0154 \times 2 \times Q_{\eta_{B_{\max}}} + 1,7403 = 0$$

$$\begin{aligned} \therefore Q_{\eta_{B_{\max}}} &\cong 56,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \Rightarrow 0,5 \times Q_{\eta_{B_{\max}}} \cong 28,25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \\ &\Rightarrow 1,2 \times Q_{\eta_{B_{\max}}} \cong 67,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$





Na verdade, abaixo de 70% da vazão do rendimento máximo já ocorre o fenômeno de recirculação, porém é abaixo de 50% que este fenômeno passa a originar ruídos e danos significativos para a bomba.



14



E por que evitar vazões acima de 120% da vazão do rendimento máximo?

15

Com vazões acima de 120% da vazão do rendimento máximo a probabilidade de ocorrer o fenômeno de cavitação é maior!



Figura 1.3 – Rotor de bomba centrífuga danificado pela cavitação.



16



Figura 1.3 – Rotor de bomba centrífuga danificado pela cavitação.

Cavitação,
que fenômeno
é este?



17

Em instalação hidráulica cavitação é o fenômeno de vaporização total, ou parcial do fluido na própria temperatura de escoamento devido estar submetido a uma pressão muito baixa e posteriormente voltar a ser líquido com o aumento da pressão, também em um processo isotérmico.

Inicialmente se imaginou que a seção de menor pressão era a seção de entrada da bomba e aí se estudou o fenômeno de cavitação, o qual foi denominado de supercavitação e este ocorre sempre que p_{eabs} for menor ou igual à pressão de vapor.

Vamos procurar visualizar o fenômeno de cavitação.



A foto anterior e a seguinte são de uma bancada existente no laboratório de mecânica dos fluidos na sala IS01 do Centro Universitário da FEI e através desta bancada desenvolvemos a experiência de CAVITAÇÃO.

Visualizando a cavitação



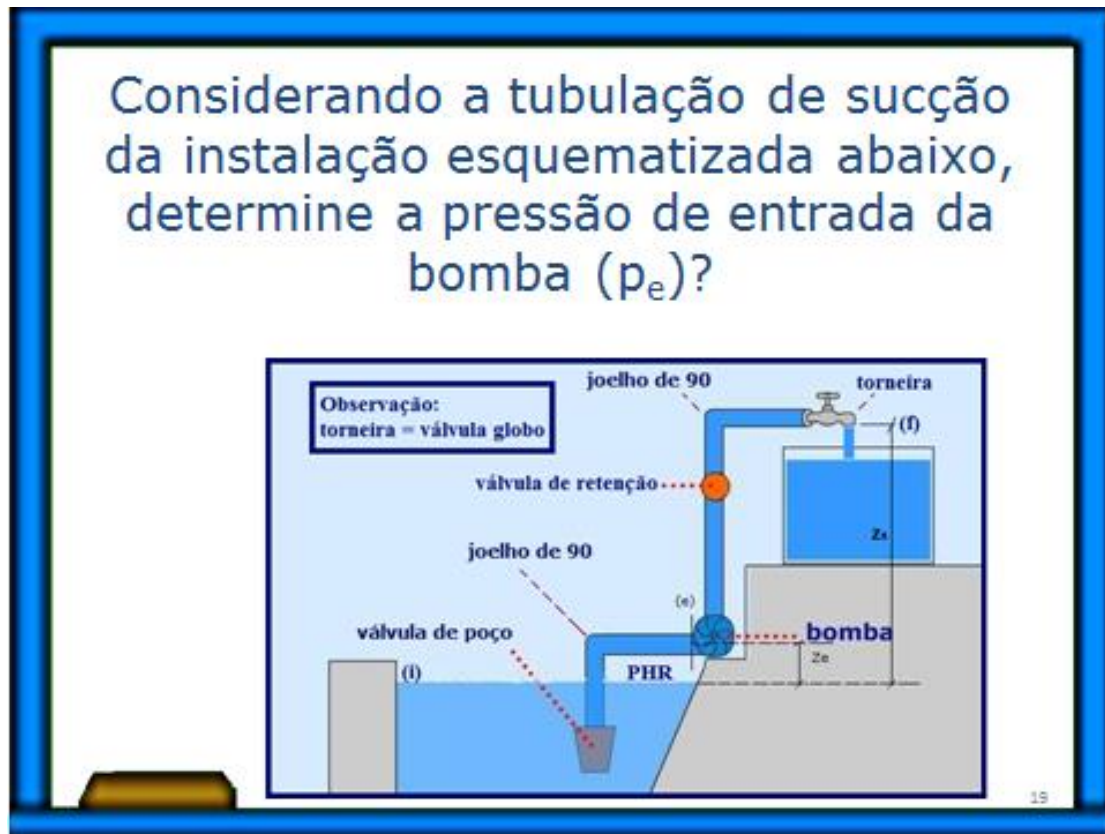
Fenômeno de vaporização

20



21

Considerando a tubulação de sucção da instalação esquematizada abaixo, determine a pressão de entrada da bomba (p_e)?



Aplicamos a equação da energia da seção inicial até a entrada da bomba e como trata-se de uma instalação com uma entrada e uma saída com o fluido considerado incompressível e com escoamento em regime permanente, temos:

$$H_{\text{inicial}} = H_{\text{entrada}} + H_{\text{pantes_da_bomba}}$$

$$z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{y_i \times \alpha_i \times v_i^2}{2g} = z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{y_e \times \alpha_e \times v_e^2}{2g} + H_{\text{paB}}$$

Adotando o PHR no nível de captação e trabalhando na escala efetiva, temos:

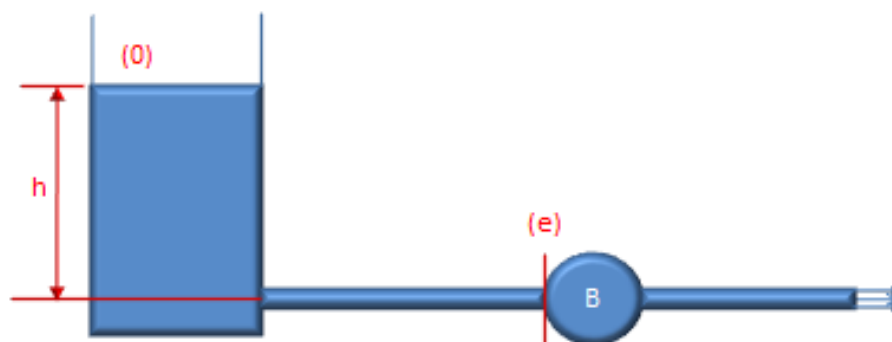
$$P_e = -\gamma \times \left[z_e + \frac{v_e^2}{2g} + f \times \frac{(L_{aB} + \sum L_{eq_{aB}})}{D_H} \times \frac{v_e^2}{2g} \right]$$

Será que a equação anterior pode-se ser aplicada em todas as instalações?



20

Para responder a pergunta anterior, calcule a pressão na entrada da bomba para o esquema a seguir:



21

Adotando o PHR no nível de captação e trabalhando na escala efetiva, temos:

$$P_e = -\gamma \times \left[z_e + \frac{v_e^2}{2g} + f \times \frac{(L_{aB} + \sum L_{eqaB})}{D_H} \times \frac{v_e^2}{2g} \right]$$

Será que a equação anterior pode-se ser aplicada em todas as instalações?



20

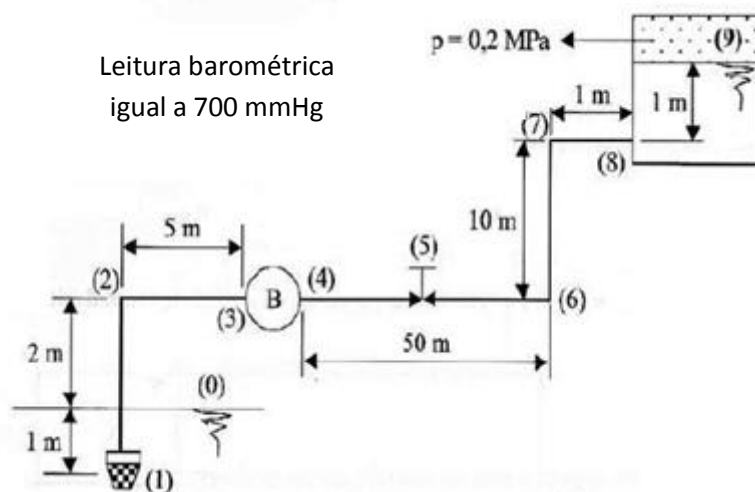
Vamos aplicar isto no nosso primeiro projeto, onde tínhamos:

- a. Fluido: água a 20°C, portanto:

$$\rho_{\text{água}} = 998,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \nu_{\text{água}} = 1,004 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}; \mu_{\text{água}} = 10^{-3} \frac{\text{N} \times \text{s}}{\text{m}^2}$$

$$p_{\text{vapor}} = 0,02337 \text{bar(abs)}$$

- b. Instalação:



c. Para a tubulação antes da bomba

$$D_N = 4'' \Rightarrow D_{\text{int}} = 102,3\text{mm} \rightarrow A = 82,1\text{cm}^2$$

(1) Válvula de poço ou válvula de pé com crivo da Mipel - $Leq_1 = 42,65\text{m}$

(2) Joelho fêmea de 90° da Tupy - $Leq_2 = 3,76\text{m}$

$$H_{p4''} = f_{4''} \times 402587,9 \times Q^2$$

Com a vazão de trabalho ($44,5 \text{ m}^3/\text{h}$), obtemos o coeficiente de perda de carga distribuída e a perda de carga antes da bomba ($H_{p4''}$).

| propriedades do fluido transportado | | | | |
|-------------------------------------|---------------|-----------------------------|------------|---------------------------|
| temp (°C) | μ (kg/ms) | ρ (kg/m ³) | p_v (Pa) | ν (m ² /s) |
| 20 | 1,00E-03 | 998,2 | | 1,004E-06 |

| propriedades do local | |
|-----------------------|------------------|
| g = | m/s ² |
| patm = | Pa |
| | |

| mat. tubo aço | | |
|---------------|-----------|----------------------|
| espessura | Dint (mm) | A (cm ²) |
| | 102,3 | 82,1 |
| K(m) | DH/k | |
| 4,60E-05 | 2224 | |

| FLUIDO (líquido) | Velocidade econômica (m/s) | Material da Tubulação |
|-------------------|----------------------------|-----------------------|
| Água: | | |
| - serviços gerais | 0,9 a 2,5 | aço |
| - rede industrial | 0,9 a 2,2 | aço |

| Q | Q(m ³ /s) | Q(L/s) | Q(L/min) |
|------|----------------------|--------|----------|
| 44,5 | | | |

deve transformar para m³/h

| Q(m ³ /h) | v(m/s) | Re | f_{Haaland} | $f_{\text{Swamee e Jain}}$ | $f_{\text{Churchill}}$ | f_{planilha} |
|----------------------|--------|--------|----------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|
| 44,5 | 1,51 | 153411 | 0,0188 | 0,0192 | 0,0192 | 0,0191 |

$$\text{Portanto: } H_{p4''} = 0,0192 \times 402587,9 \times \left(\frac{44,5}{3600}\right)^2 \cong 1,18\text{m}$$

Através da equação da energia de (0) a (3) com o PHR em (0), temos:

$$0 = 2 + \frac{p_3}{998,2 \times 9,8} + \frac{1 \times 1,51^2}{19,6} + 1,18$$

$$p_e = p_3 \cong -32236,3\text{Pa}$$

$$p_{e\text{abs}} = -32236,3 + 0,7 \times 13546 \times 9,8 \cong 60689,3\text{Pa}$$

Como a $p_{e\text{abs}} = 60689,3\text{Pa}$ é maior que a $p_{\text{vapor_abs}} = 2337\text{Pa}$, podemos afirmar que não ocorre a supercavitação (cavitação na seção de entrada da bomba).

Pelo fato do fenômeno de cavitação poder comprometer todo o projeto de uma instalação de bombeamento alguns cuidados preliminares devem ser tomados para evitá-lo, cuidados estes onde objetivamos trazer a p_e o mais perto possível da p_{atm} , ou até mesmo superior a ela.

Considerando a equação abaixo, quais seriam os cuidados que deveriam ser adotados?

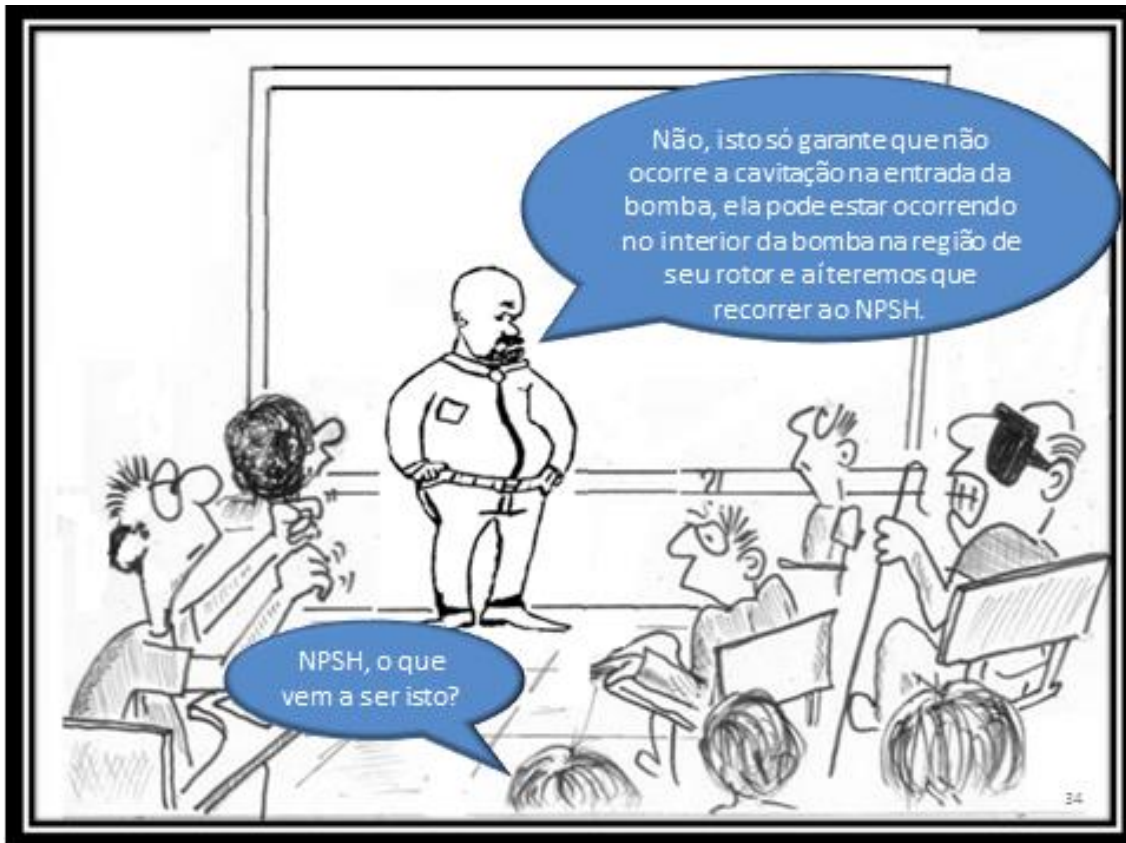
$$P_e = -\gamma \times \left[z_e + \frac{v_e^2}{2g} + f \times \frac{(L_{aB} + \sum Leq_{aB})}{D_H} \times \frac{v_e^2}{2g} \right]$$

Os cuidados adotados na tentativa de evitar o fenômeno de cavitação seriam:

1. a bomba deve ser instalada o mais perto possível do nível de captação com a finalidade de diminuir Z_e , ou, se possível, a bomba deve ser instalada abaixo do nível de captação (bomba “afogada”) com isto $Z_e < 0$.
2. a tubulação antes da bomba deve ser a menor possível com a finalidade de diminuir a H_{paB} .
3. na tubulação antes da bomba devem ser usados os acessórios estritamente necessários com a finalidade de diminuir a H_{paB} .
4. o diâmetro da tubulação antes da bomba deve ser um diâmetro imediatamente superior ao diâmetro de recalque com a finalidade, tanto de diminuir a carga cinética de entrada da bomba, quanto diminuir H_{paB} .
5. o ponto de trabalho da bomba deve estar o mais próximo do ponto de rendimento máximo.

Nota: Por questão de economia, sempre que possível, não se considera o cuidado mencionado no item 4 acima, já que quanto maior o diâmetro maior o custo da tubulação e a decisão de não considerá-lo será tomada no final do projeto, caso ao torna-lo igual ao diâmetro de recalque continua existindo a reserva contra a cavitação
 (Reserva _ contra _ cavitação = $NPSH_{disp} - NPSH_{req}$).

A condição de não existir a supercavitação ($p_{e_{abs}} > p_{vapor}$) é condição necessária e suficiente para não existir o fenômeno de cavitação?



N → **NET**
P → **POSITIVE**
S → **SUCTION**
H → **HEAD**

DISPONÍVEL ≥ **REQUERIDO**

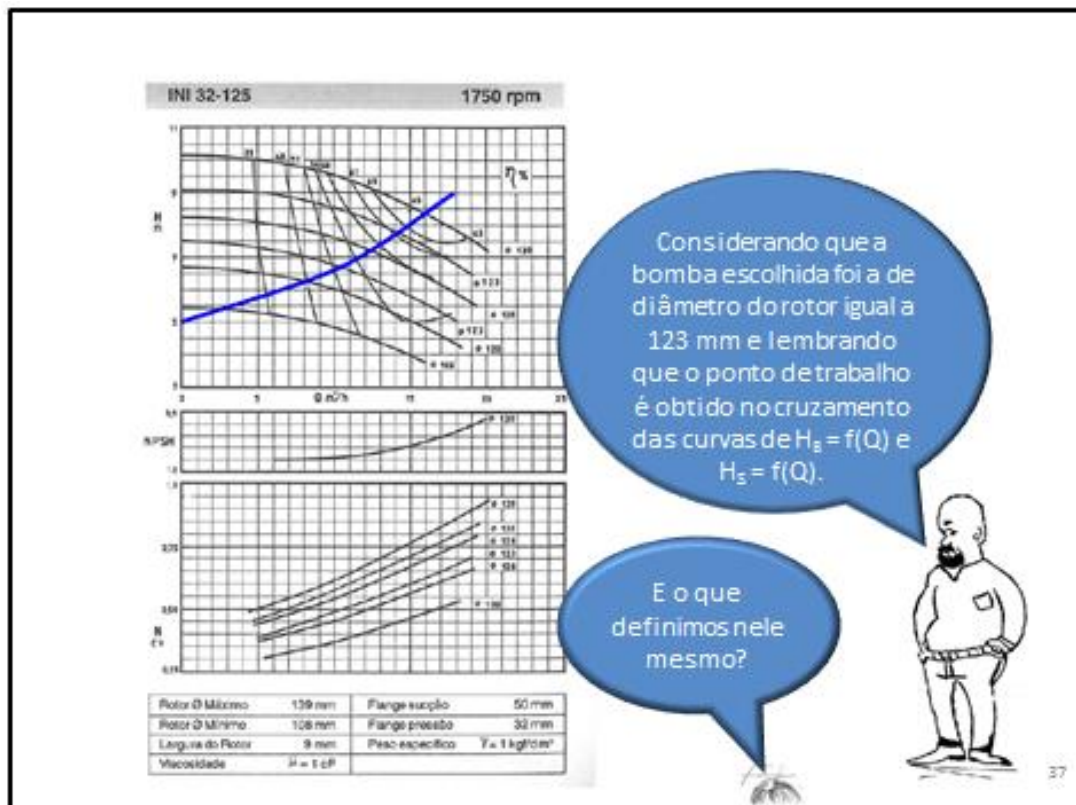
calculado pelo projetista
 fornecido pelo fabricante

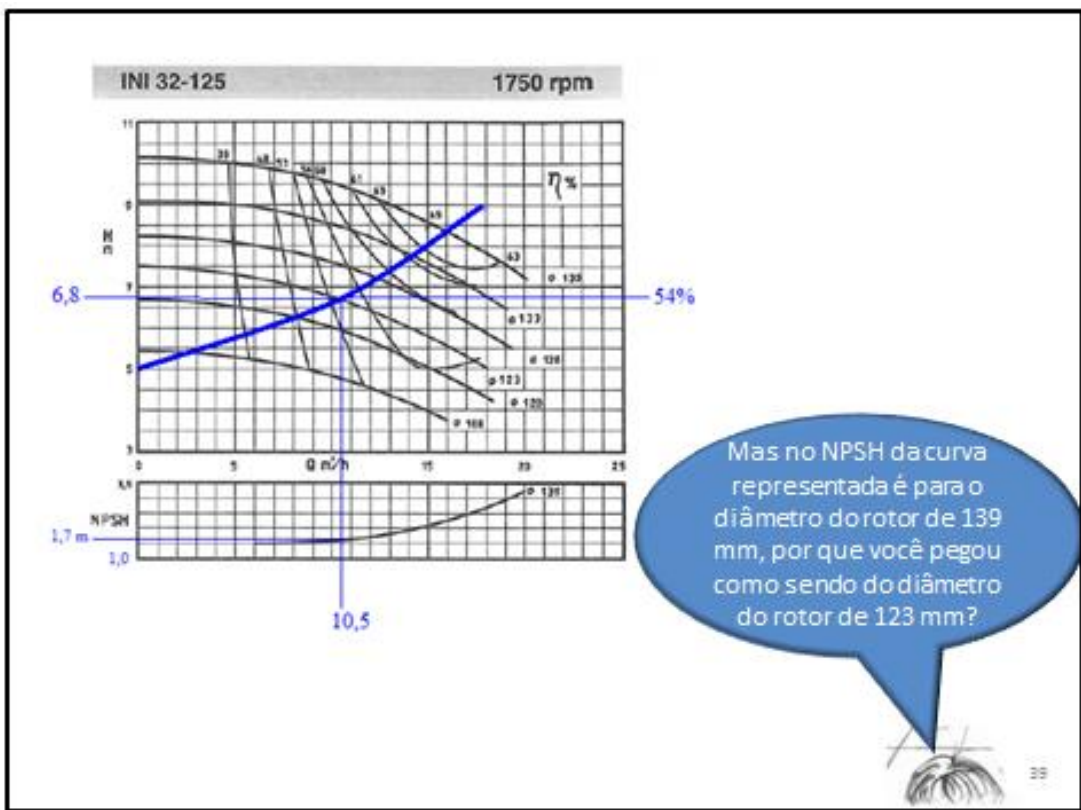
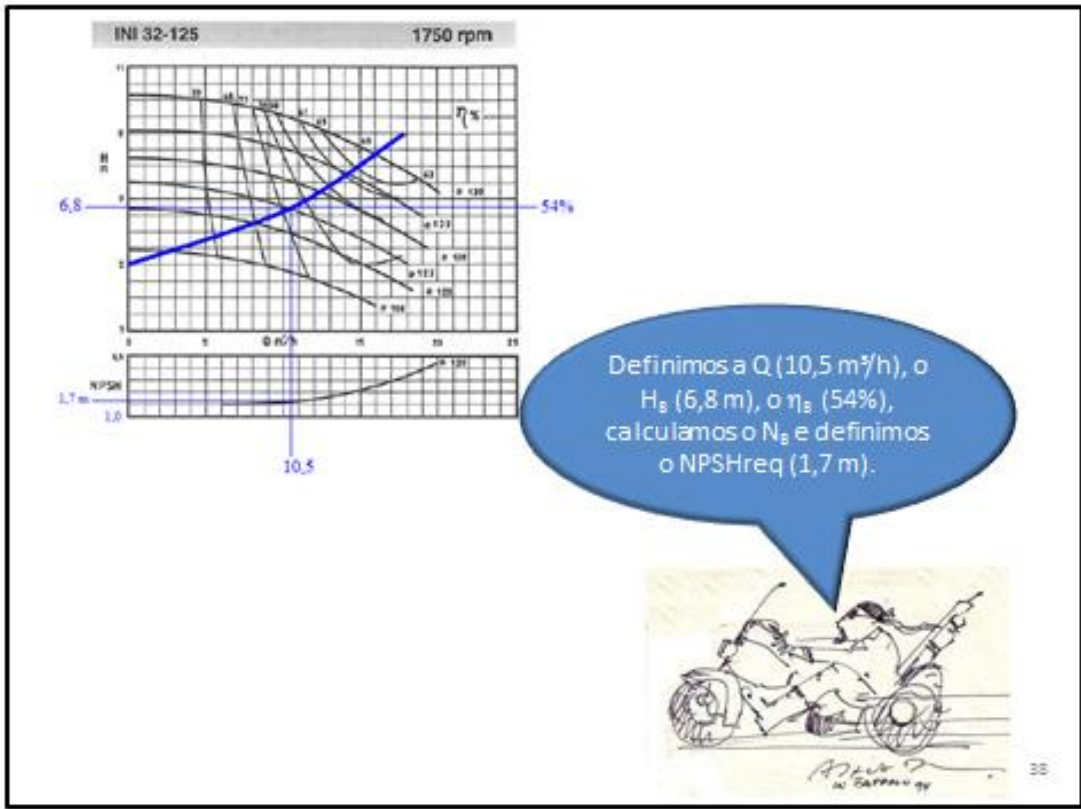
IMPORTÂNCIA ?

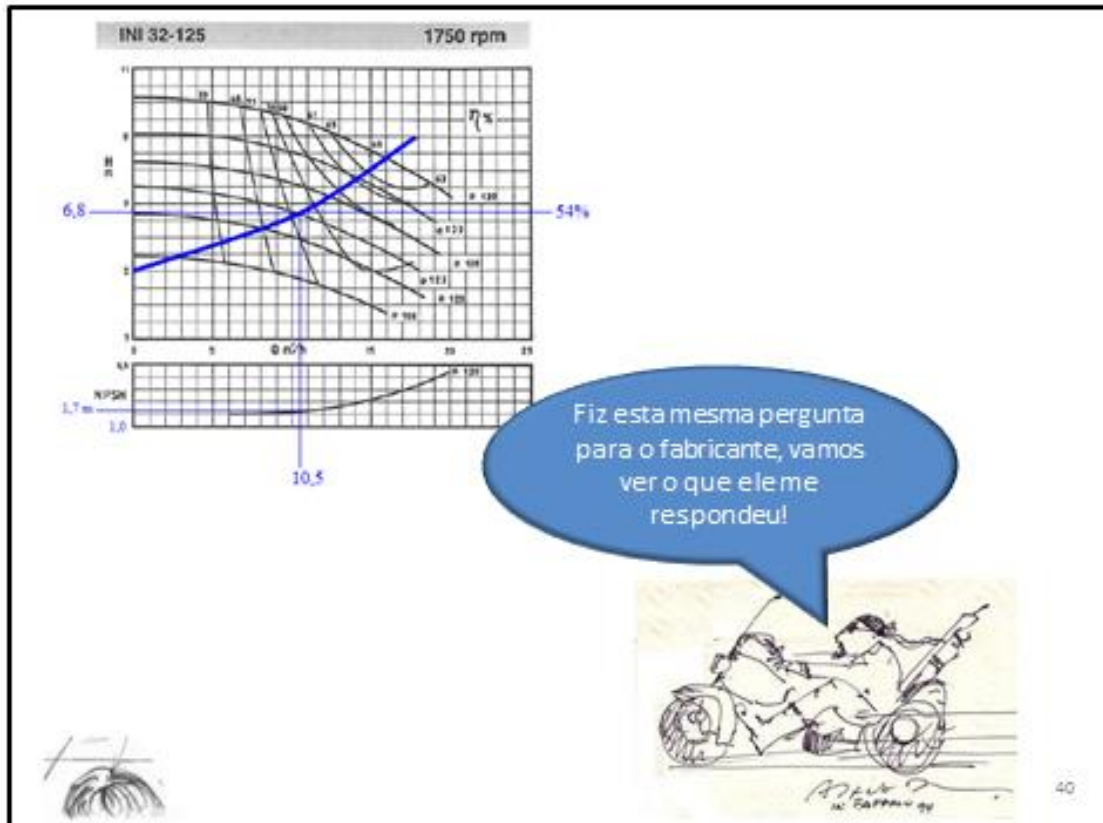
Tanto o NPSH do fabricante como o do projetista são calculados com o PHR no eixo da bomba e com a vazão de trabalho!

$$NPSH_{requerido} = H_{e_{abs}} - \frac{P_{vapor}}{\gamma}$$

$$NPSH_{disponivel} = H_{0_{abs}} - H_{PaB} - \frac{P_{vapor}}{\gamma}$$







Entrando em contato com a KSB, fabricante de bombas hidráulicas, para esclarecimento do porque em muitas CCB só existir a curva do $NPSH_{req}$ para um único diâmetro, recebi a resposta abaixo:

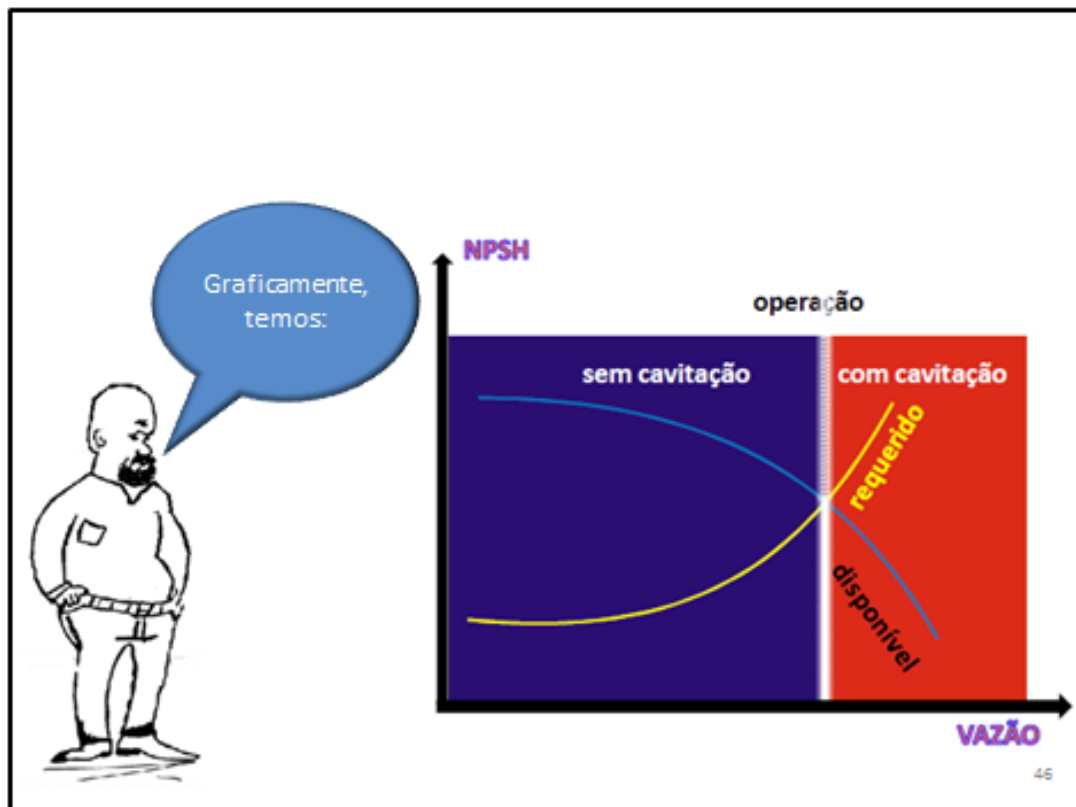
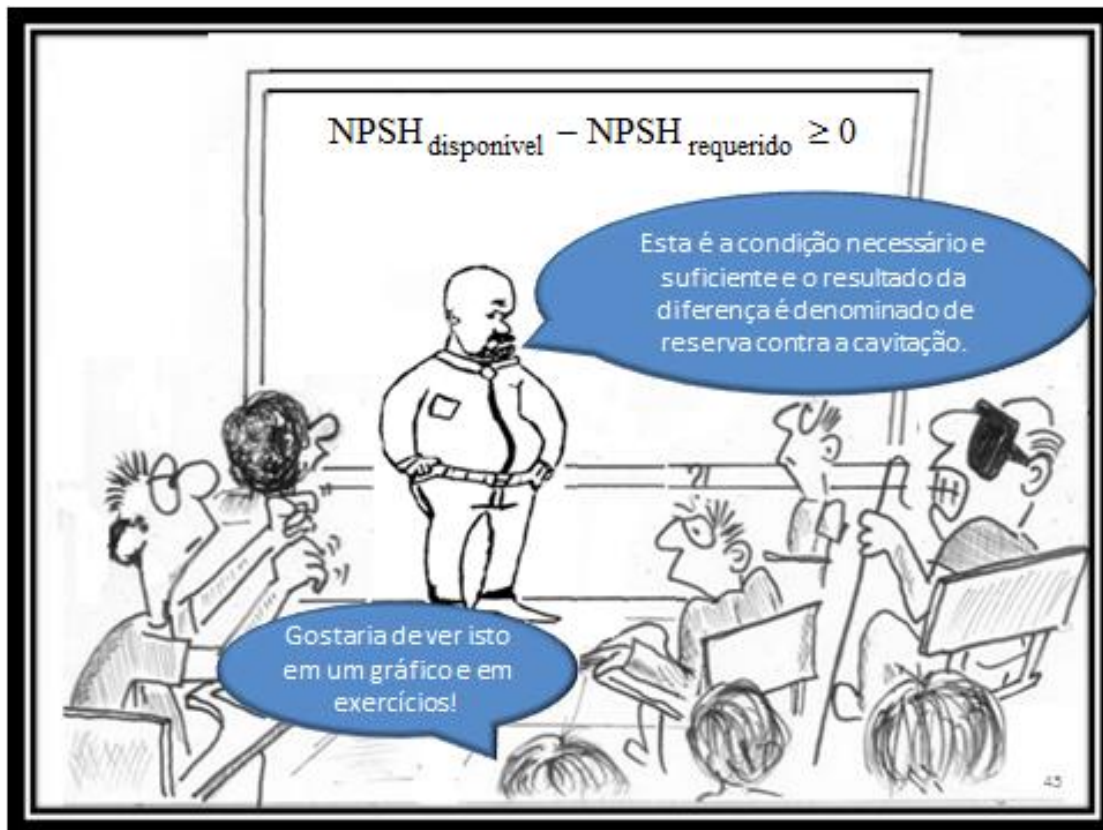
Prezado Raimundo, a diferença entre os valores de NPSH para os diâmetros mínimos e máximo dos rotores é muito pequena, motivo pelo qual é apresentada apenas a curva com os valores maiores.

Atenciosamente,

Paulo Sérgio F. de Vilhena
Gerente Setorial de Vendas
Distribuição -Building Service - Irrigação
KSB Bombas Hidráulicas S.A.
Fone: (11) 4596-8735
pvilhena@ksb.com.br

Acredito que ficou respondido!

41



36°

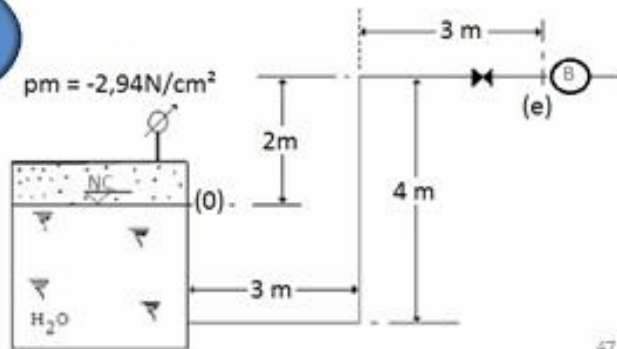
(7.12.45) A bomba hidráulica utilizada na instalação de recalque, cuja tubulação de sucção é esquematizada abaixo, tem o NPSHr = 2,0 m. Verifique o fenômeno de cavitação.

Dados:

$$f = 0,02; p_{\text{atm}} = 700 \text{ mmHg}; \gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 9800 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}; Q = 4 \text{ L/s};$$

$$D_N = 2" \rightarrow \text{esp.40}; p_{\text{vapor}} = 0,1778 \text{ mca}; \sum L_{e_{aB}} = 44,6 \text{ m}$$

Este é um exercício para constatar a existência ou não da cavitação.



47

$$NPSH_d = Z_0 + \frac{p_{i_{\text{abs}}} - p_{\text{vapor}}}{\gamma} + \frac{\gamma_i \times Q^2}{2g \times A_i^2} - f_{aB} \times \frac{(L_{aB} + \sum L_{e_{aB}})}{D_{H_{aB}}} \times \frac{Q^2}{2g \times A_{aB}^2}$$

$$\gamma_i = 0$$

$$Z_0 = -2 \text{ m}$$

$$p_{i_{\text{abs}}} = -0,3 \times 10^4 + 0,7 \times 13600 = 6520 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$p_{\text{vapor}} = 0,1778 \times 1000 = 177,8 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$\therefore NPSH_d = -2 + \frac{6520 - 177,8}{1000} + 0 - 0,02 \times \frac{(10 + 44,6)}{0,0525} \times \frac{(4/1000)^2}{2 \times 10 \times (21,7 \times 10^{-4})^2}$$

$$NPSH_d = 0,81 \text{ m}$$

Como:

$$NPSH_{\text{disponível}} - NPSH_{\text{requerido}} = 0,81 - 2 = -1,19 \text{ m}$$

Portanto, está cavitando!



48

Além do exercício anterior, proponho a segunda lista de exercícios que é constituída dos exercícios:

| Número do exercício | Página na proposta do mangá |
|---------------------|-----------------------------|
| 22 | 119 |
| 23 | 128 |
| 24 | 138 |
| 25 | 194 |
| 27 | 216 |
| 28 | 224 |
| 29 | 240 |
| 30 | 247 |
| 31 | 258 |
| 32 | 292 |
| 33 | 388 |
| 34 | 400 |
| 35 | 429 |
| 39 | 456 |
| 40 | 459 |
| 41 | 462 |
| 42 | 468 (aula monitoria) |
| 43 | 470 (aula monitoria) |
| 44 | 471 (aula monitoria) |
| 45 | 473 (aula monitoria) |