Hidráulica 1 – SHS0409
HIDRÁULICA DOS CONDUTOS FORÇADOS

Sistemas Elevatórios - **Cavitação**

(Aula 14)

CONTEÚDO AULA 14

02/06/14

Sistemas Elevatórios ou de recalque

Cavitação

- Cavitação, NPSH (5.9)

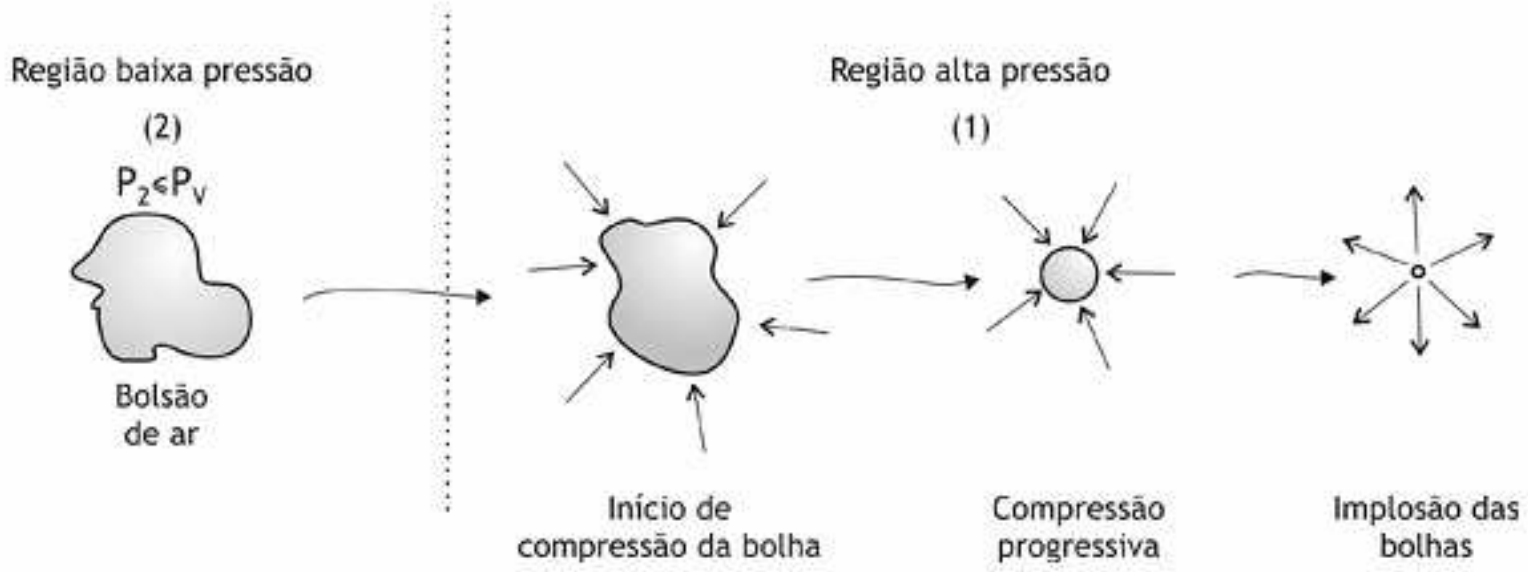
Aplicação: Exercício 5.14 e 5.16 *(cavitação)*

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

- O FENÔMENO:

1. Região de baixa pressão;
2. Líquido atinge pressão de vapor;
3. Ocorre vaporização do líquido;
4. Há formação de bolhas de vapor;
5. Bolhas são levadas pela corrente;
6. Pressão aumenta;
7. Ocorre colapso das bolhas por implosão;
8. Esses “estouros” provocam a “erosão” do material em contato com o líquido;
9. Em breves palavras → isso é a cavitação.

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO



Região de Baixa Pressão (E)

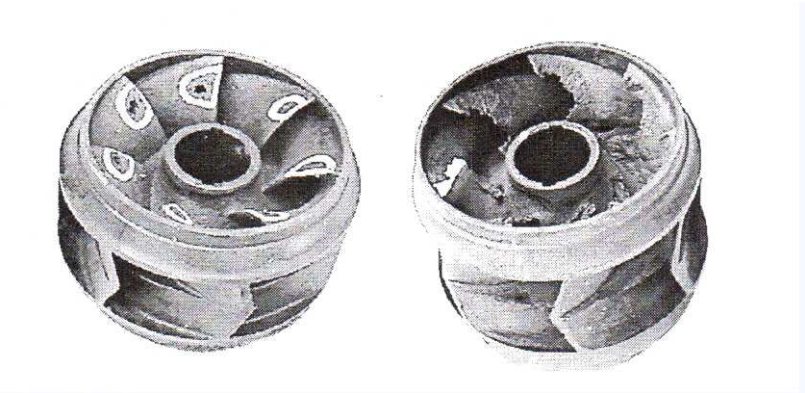
Região de Alta Pressão (S)

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

- Nas bombas → o ponto mais crítico corresponde à entrada do rotor:

- Pode haver necessidade de vencer o desnível geométrico de sucção, no caso da bomba não afogada

- Além disso, ocorrem perdas de carga que dependem do diâmetro, da vazão, do comprimento da tubulação, do material (rugosidade).



SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

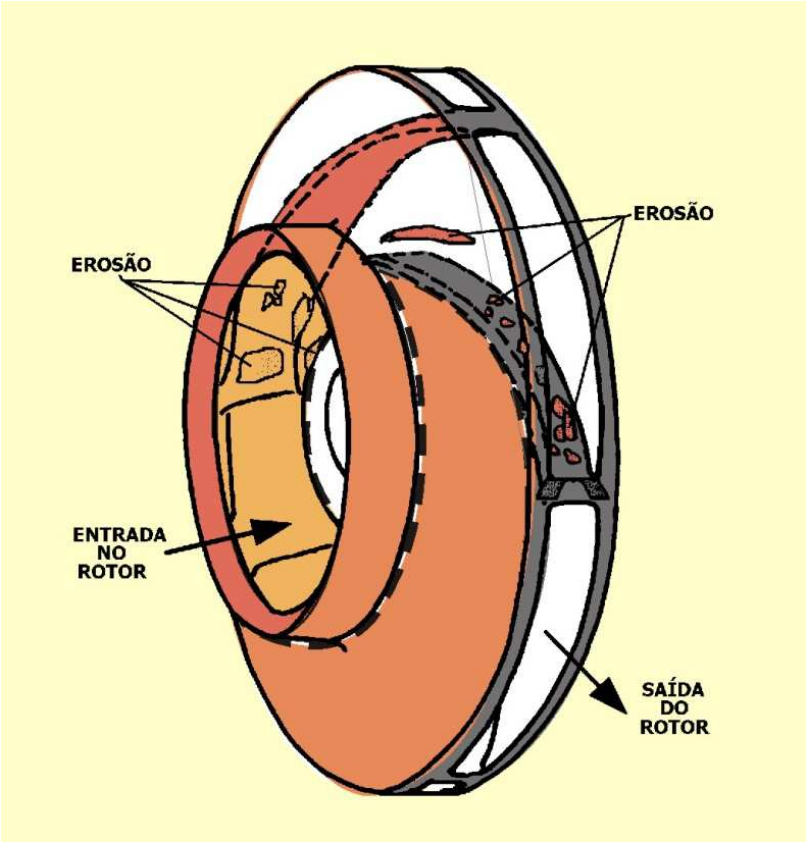


Figura: Erosão do rotor da bomba causado pela cavitação

Figura: Detalhes da erosão do rotor de uma bomba centrífuga

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

Figura: Rotor cavitado de uma bomba centrífuga

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

Dois critérios de projeto (cavitação)

- O critério do NPSH (*net positive suction head)*
- O critério do coeficiente de Thoma

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

critério do NPSH (*net positive suction head*) :

$NPSH_d > NPSH_r$

→ é <u>mais seguro</u> verificar o critério na fase final de projeto, quando o equipamento já está especificado.

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

- $NPSH_d$ (*net positive suction head*) **disponível**:

  – Energia do líquido (mH_2O) a montante do flange de sucção da bomba (entrada=ponto 2) **acima da pressão de vapor do líquido** (função da temperatura).

$$NPSH_d = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{p_V}{\gamma} \rightarrow \text{por definição}$$

Energia disponível na entrada da Bomba

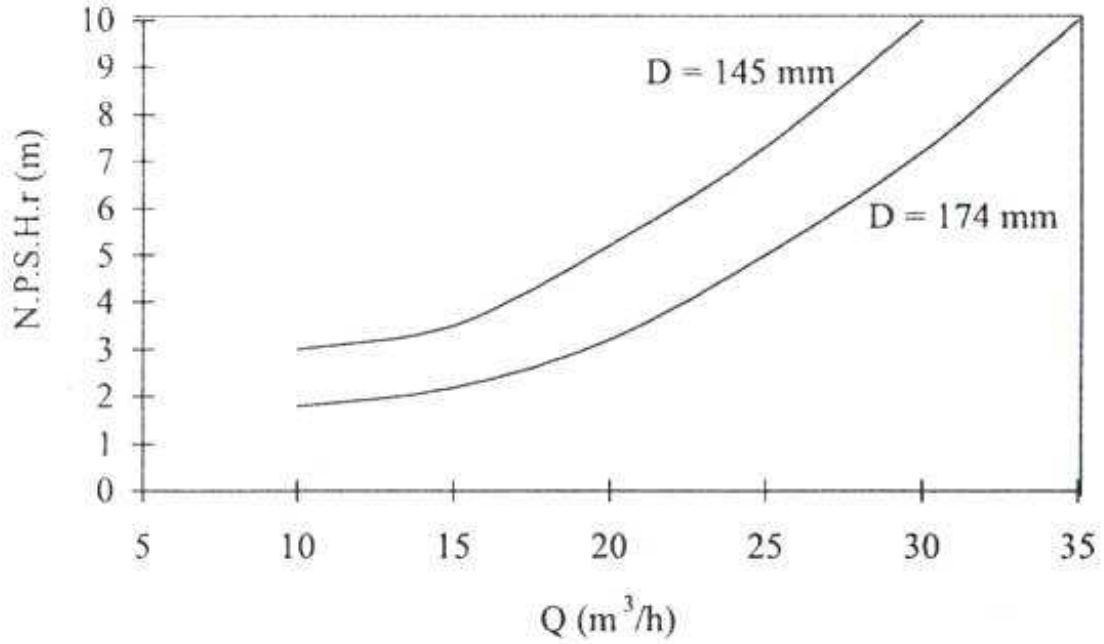
  – É uma característica da instalação para determinada vazão (depende das condições de projeto) → pode ser alterada pelo projetista.

  $Z \rightarrow$ altura geométrica de sucção

  $\Delta H_s \rightarrow$ material, Q, D_s e L_s

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

- NPSH (*net positive suction head*) **requerido:**
  - Uma das curvas que caracterísiticam uma bomba → fornecidas pelo fabricante → $NPSH_r$ x Vazão.
  - Depende: do diâmetro do rotor, rotação, rotação específica.



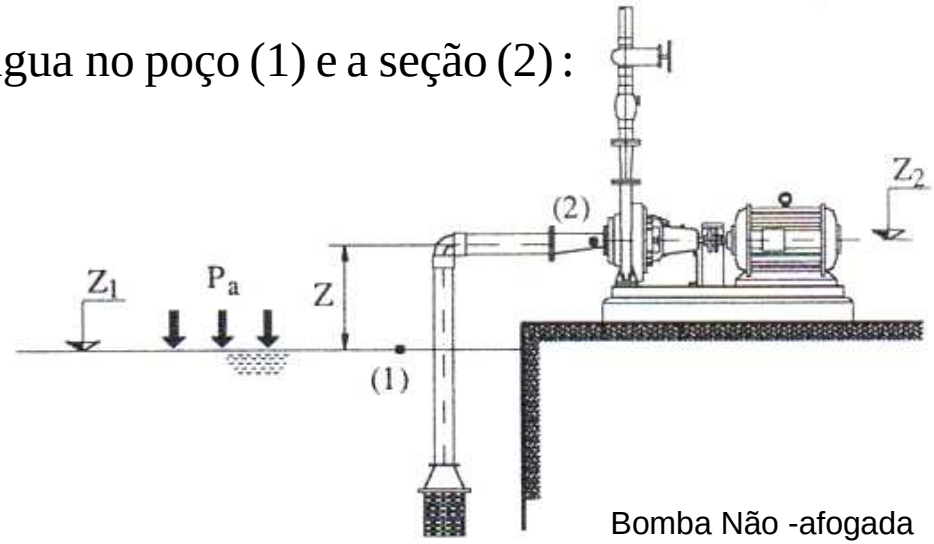
SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

Estamos acostumados a trabalhar com pressões efetivas, vamos trabalhar aqui com **pressões absolutas!**

$$NPSH_d = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{p_V}{\gamma} \rightarrow \text{por definição}$$

Teorema de Bernoulli entre a superfície da água no poço (1) e a seção (2):

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \Delta H_s$$



Bomba Não -afogada

sendo:

$\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_a}{\gamma} \rightarrow$ pressão amtosférica

$\frac{V_1^2}{2g} = 0 \rightarrow$ nível constante no reservatório

$z_1 = 0 \rightarrow$ superfície da água no poço é o plano de referência

$z_2 = Z \rightarrow$ altura estática de succção: distância vertical entre (1) e o eixo da bomba

$\Delta H_s \rightarrow$ perda de carga na sucção: lineares e singulares

Daí resulta :

$$\frac{p_a}{\gamma} - Z - \Delta H_s = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Sendo
Z = Z1 - Z2;
P_a = Patm
P_2 = **pressão absoluta**

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

Daí resulta :

$$\frac{p_a}{\gamma} - Z - \Delta H_s = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$NPSH_d = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{p_V}{\gamma} \rightarrow \text{por definição}$$

que combinado com a definição de $NPSH_d$ acima fica :

$$NPSH_d = \frac{p_a - p_V}{\gamma} - Z - \Delta H_s \qquad \rightarrow \textbf{Bomba Não - Afogada}$$

Para bomba afogada (cota da superfície do poço acima da cota do eixo da bomba) :

$$NPSH_d = \frac{p_a - p_V}{\gamma} + Z - \Delta H_s \qquad \rightarrow \textbf{Bomba Afogada}$$

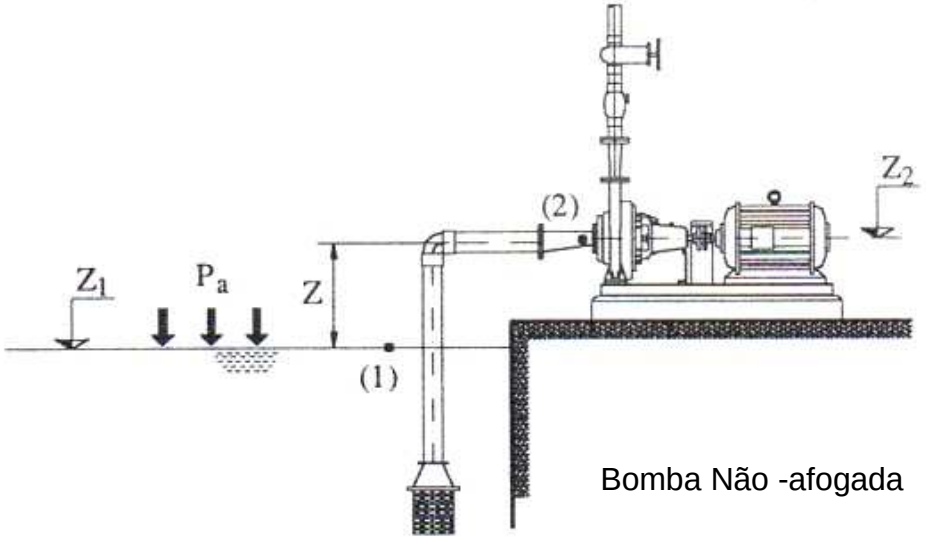
SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

+ Z se a bomba estiver **afogada**

- Z se a bomba **não** estiver **afogada**

$$NPSH_d = \left(\frac{P_{atm} - P_{vapor}}{\gamma} \right) \pm Z - hf_{succao}$$

QUANTO **MAIOR** O $NPSH_d$ **MENOR** A POSSIBILIDADE DE CAVITAÇÃO



Bomba Não -afogada

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

- PRESSÃO ATMOSFÉRICA E PRESSÃO DE VAPOR

  – A pressão atmosférica varia com a altitude e com as condições climáticas → até 2000 m de altitude, pode ser calculada pela fórmula:

$$\frac{p_a}{\gamma} = 13{,}6.\left[\frac{760 - 0{,}081.h}{1000}\right] \quad (mH_2O)$$

onde h é altitude do local em metros

  – A pressão de vapor varia com a temperatura:

Tabela 5.2 – Valores de pressão de vapor da água em mH_2O

T (°C)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
p_v/γ (m)	0,09	0,13	0,17	0,24	0,32	0,43	0,57	0,75	0,98	1,25
T (°C)	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
p_v/γ (m)	1,61	2,03	2,56	3,20	3,96	4,86	5,93	7,18	8,62	10,33

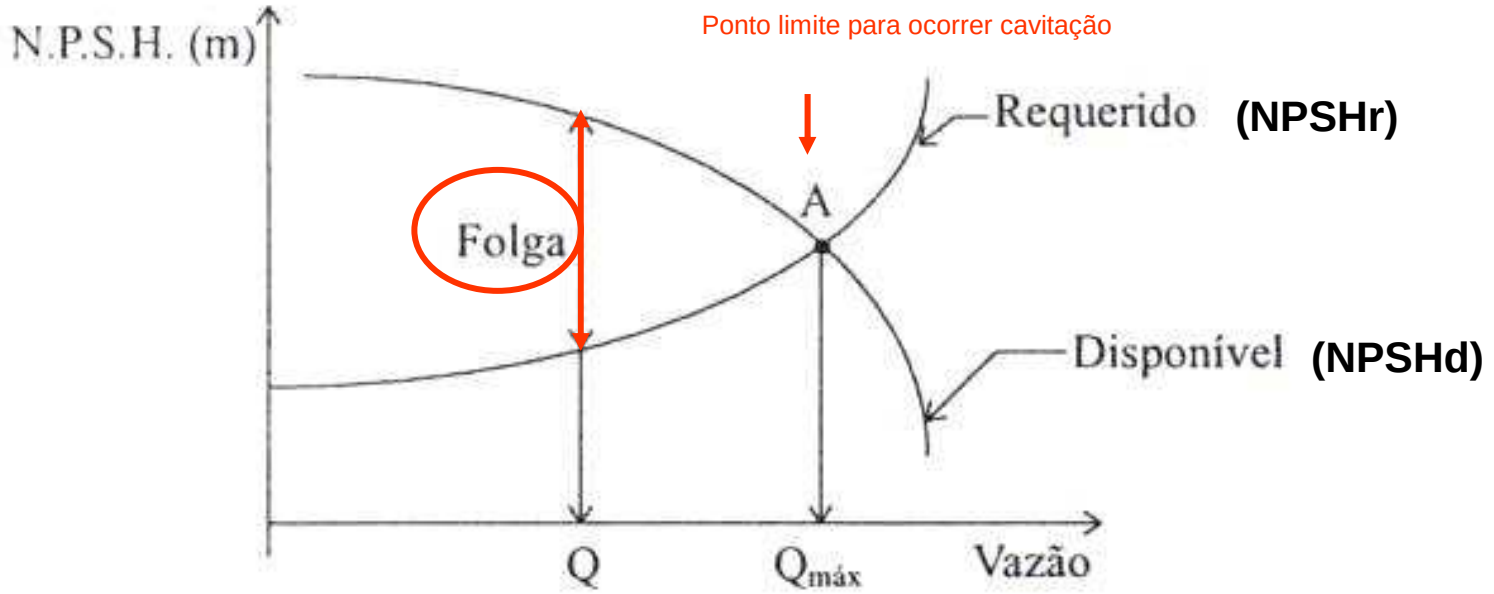
SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

Condições para o funcionamento da bomba **sem** cavitação:

$NPSH_{disponível}$ é uma característica das instalações de sucção, que **pode ser calculado**

$NPSH_d > NPSH_r$

$NPSH_{requerido}$ é uma característica hidráulica da bomba, fornecida pelo **fabricante** (curvas características)



$NPSH_d > NPSH_r$ → na prática deve-se deixar folga de no **mínimo 0,50 m**

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

- MÁXIMA ALTURA ESTÁTICA DE SUCÇÃO, Z
  - Para aumentar $NPSH_d$ pode-se alterar o Z ou ΔH_s
  - No limite → $NPSH_d = NPSH_r$, tem-se o valor de Z máximo:

$$Z_{max} = \pm \left[NPSH_r - \frac{p_a - p_V}{\gamma} + \Delta H_s \right]$$

Sinal **positivo (+)** para bomba **afogada**
Sinal **negativo (-)** para bomba **não afogada**

O valor de $NPSH_r$ é obtido da curva do fabricante para a vazão de recalque

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

•critério do coeficiente de Thoma

•→ deve ser usado na fase inicial → primeira indicação da Zmax → precisa conhecer Q e H e a rotação da bomba.

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

- COEFICIENTE DE CAVITAÇÃO DE THOMA

Adimensional que indica a possibilidade ou grau do fenômeno → *número de cavitação, σ:*

Se $p >>> p_V \rightarrow$ menores são as chances de cavitação

Se $p \cong p_V \rightarrow$ a cavitação tende a ocorrer $\rightarrow \sigma \cong 0$

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

- ## COEFICIENTE DE CAVITAÇÃO DE THOMA

Numa bomba a pressão diminui na seção de sucção do rotor → seção crítica :

$$\frac{V_c^2}{2g} = \frac{p_a - p_c}{\gamma} - Z - \Delta H_s$$

como a altura total de sucção é $h_s = Z + \Delta H_s$, resulta :

$$\sigma = \frac{V_c^2}{2gH} = \frac{\frac{p_a - p_c}{\gamma} - h_s}{H}$$

H é a altura total de elevação (ou altura manométrica)

Se $p_c \rightarrow p_v \rightarrow cavitação \quad i\min ente - \sigma = \frac{NPSH_d}{H}$

σ deve ser maior que um valor crítico → $\sigma > \sigma_c$ para não ocorrer cavitação

σ_c depende do tipo de máquina e é função da rotação específica N_s

Para bombas centrífugas radiais lentas e normais, tem-se :

$$\sigma_c = 2{,}0.10^{-4}.N_s^{4/3}$$

SISTEMAS ELEVATÓRIOS – CAVITAÇÃO

- COEFICIENTE DE CAVITAÇÃO DE THOMA

$$\sigma_c = 2{,}0.10^{-4}.N_s^{4/3}$$

MÁXIMA ALTURA ESTÁTICA DE SUCÇÃO, Z:

Com base na definição de σ_c pode-se redefinir a altura máxima de sucção:

$$Z_{max} = \pm\left[\sigma_c H - \frac{p_a - p_V}{\gamma} + \Delta H_s\right]$$

Sinal **positivo (+)** para bomba **afogada**

Sinal **negativo (-)** para bomba **não afogada**

σ_c aumenta com N_s ∴ bombas de N_s elevadas exigem Z reduzidas ou mesmo negativa (afogadas)

Aplicação

Exercícios 5.14 e 5.16

Exercício 5.14 - livro

Uma bomba centrífuga está montada em uma cota topográfica de 845,00m, em uma instalação de recalque cuja tubulação de sucção tem 3,5 m de comprimento, 4” de diâmetro, em P.V.C. rígido, C = 150, constado de uma válvula de pé com crivo e um joelho 90º. Para um recalque de água na temperatura de 20ºC e uma curva de N.P.S.. Requerido dado pela Figura 2.25, determine a máxima vazão a ser recalcada para a cavitação incipiente. Se a vazão recalcada for 15 l/s, qual a folga entre o N.P.S.H. disponível e N.P.S.H. requerido. Altura estática de sucção igual a 2,0m e a bomba é não afogada.

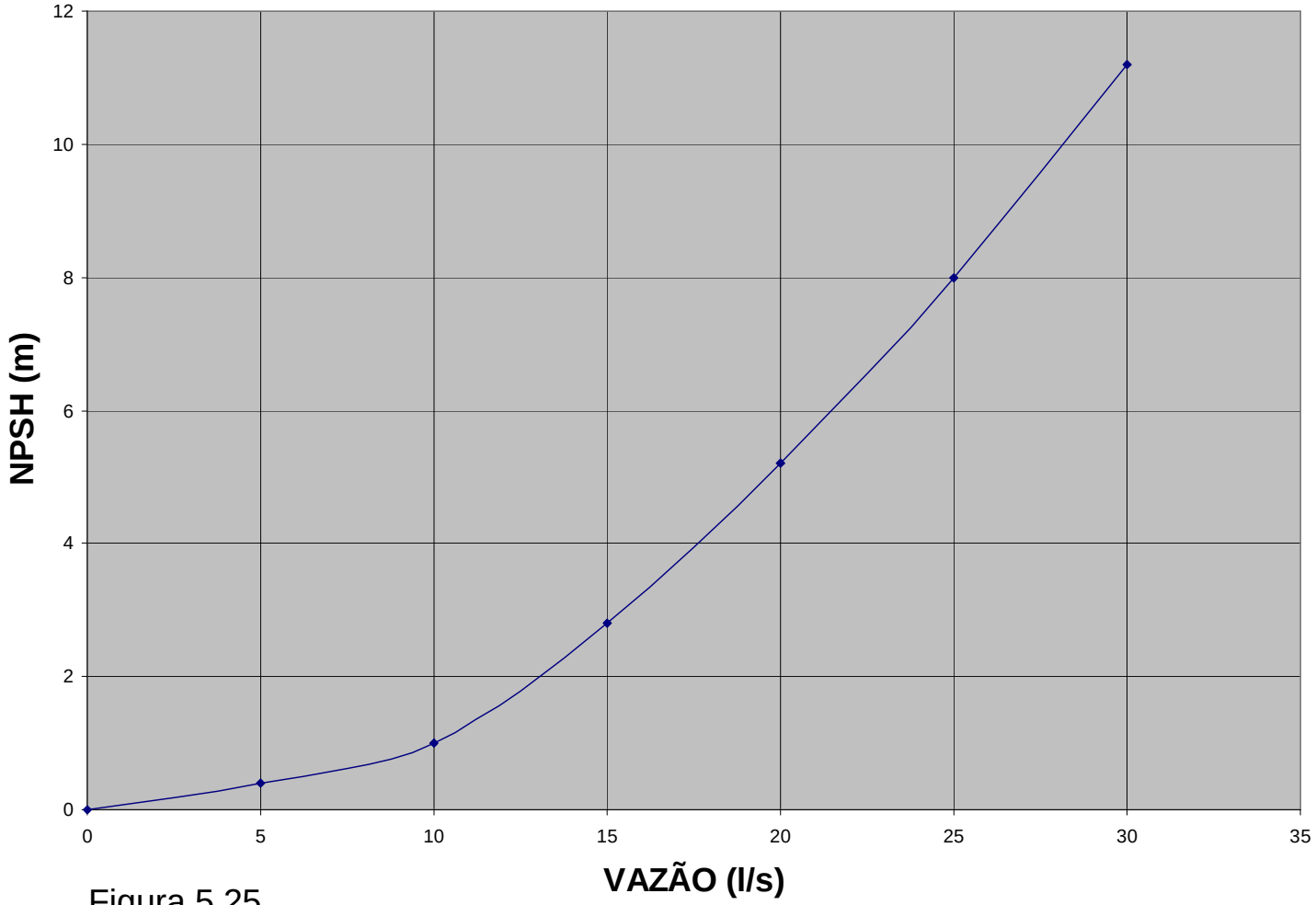
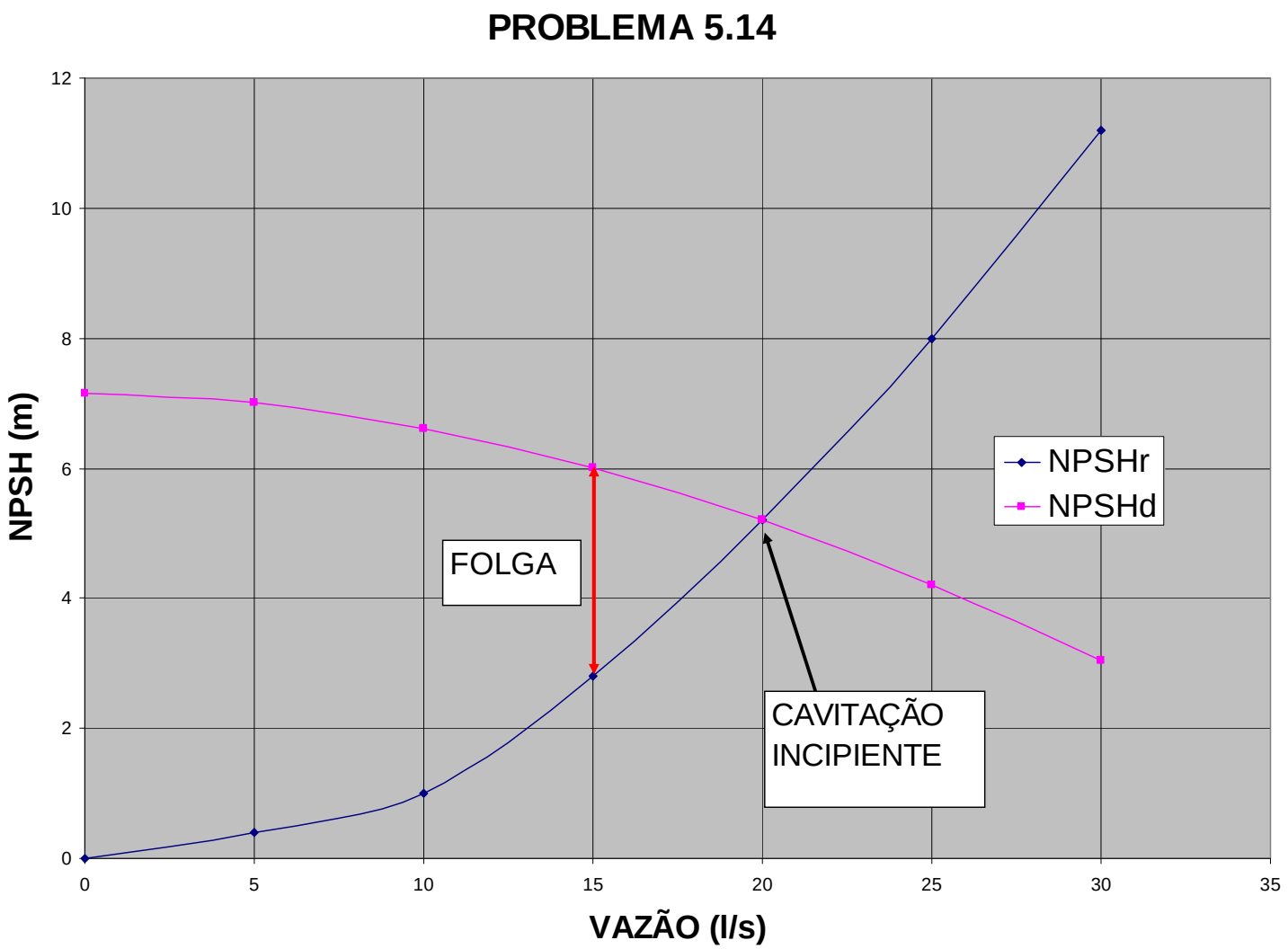


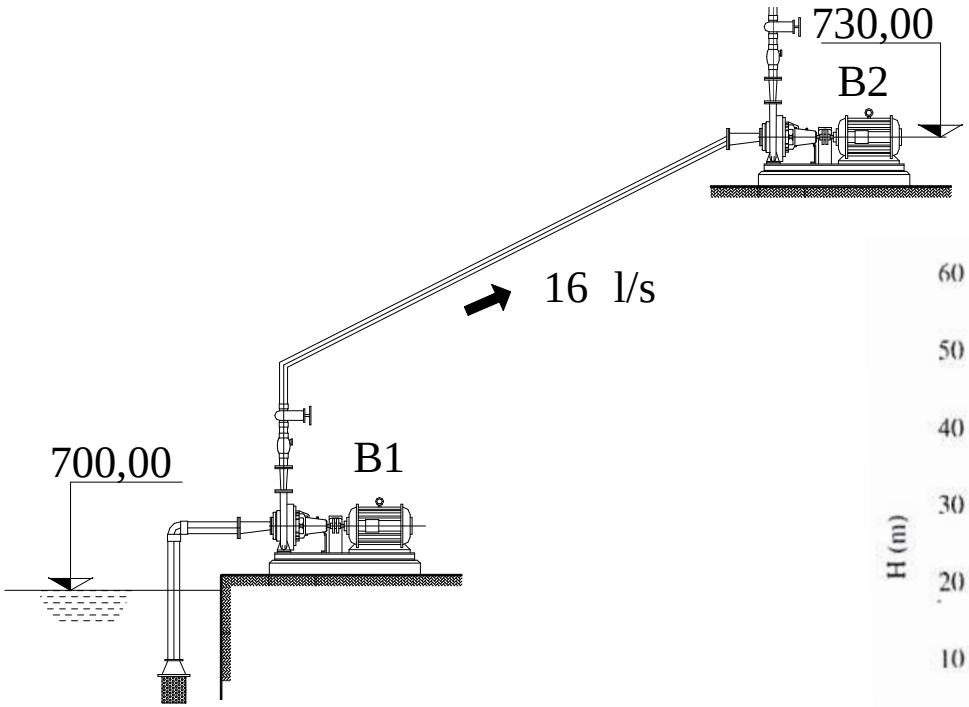
Figura 5.25

Resposta - Exercício 5.14 - livro



Exercício 5.16 - livro

No sistema de bombeamento mostrado na Figura 5.27a para a vazão de recalque igual a 16 l/s, a perda de carga total na tubulação de sucção da bomba B_1 é de 1,40 m. Para esta vazão, o N.P.S.H. requerido pela bomba é B_2 é igual a 5,0 m. Pretendendo-se que a folga entre o N.P.S.H. disponível e N.P.S.H. requerido pela bomba B_2 seja igual a 3,20 m, calcule o máximo comprimento do trecho da adutora entre as duas bombas. Toda adutora, sucção e recalque é de P.V.C. rígido C = 150, e de 4" de diâmetro. Temperatura média da água de 20º C. Dada a curva característica da Bomba B_1 (Figura 5.27b). Desprezar as perdas de carga localizadas.



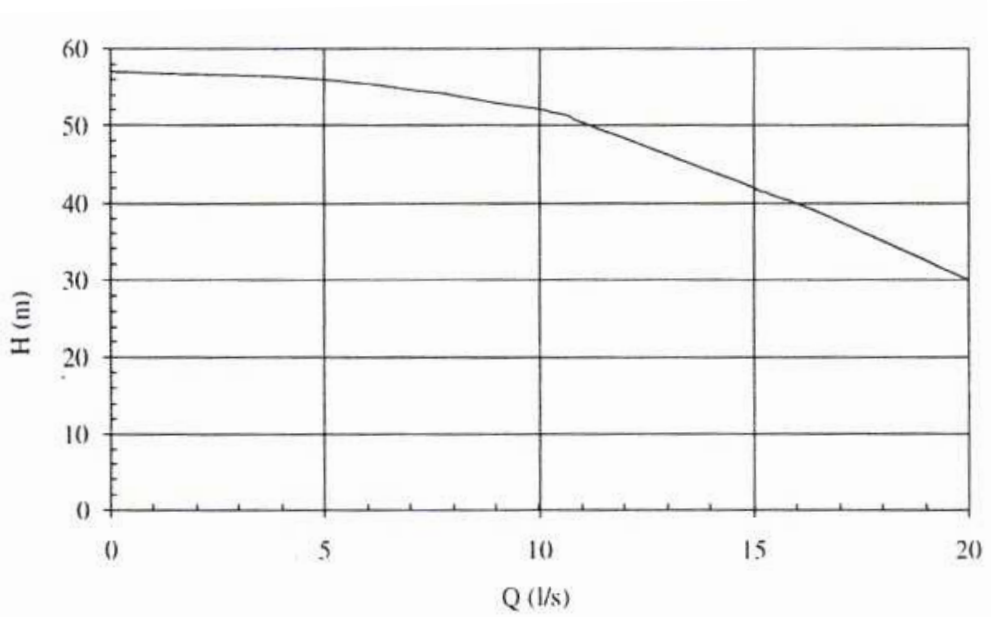


Figura 5.27b

Resposta - Exercício 5.16 - livro

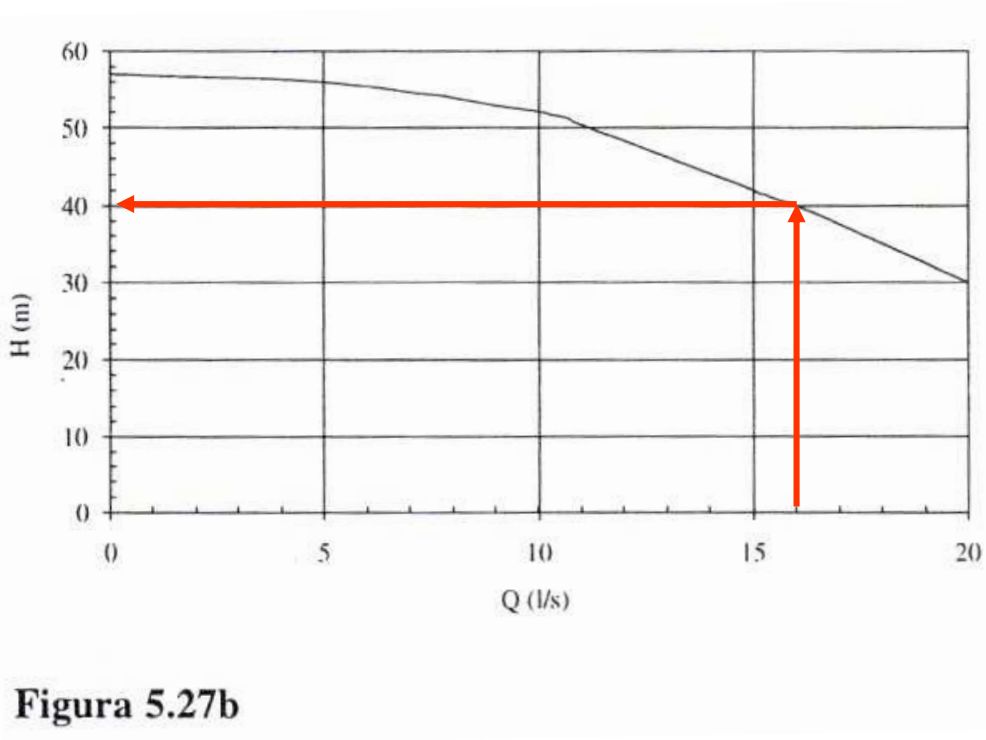
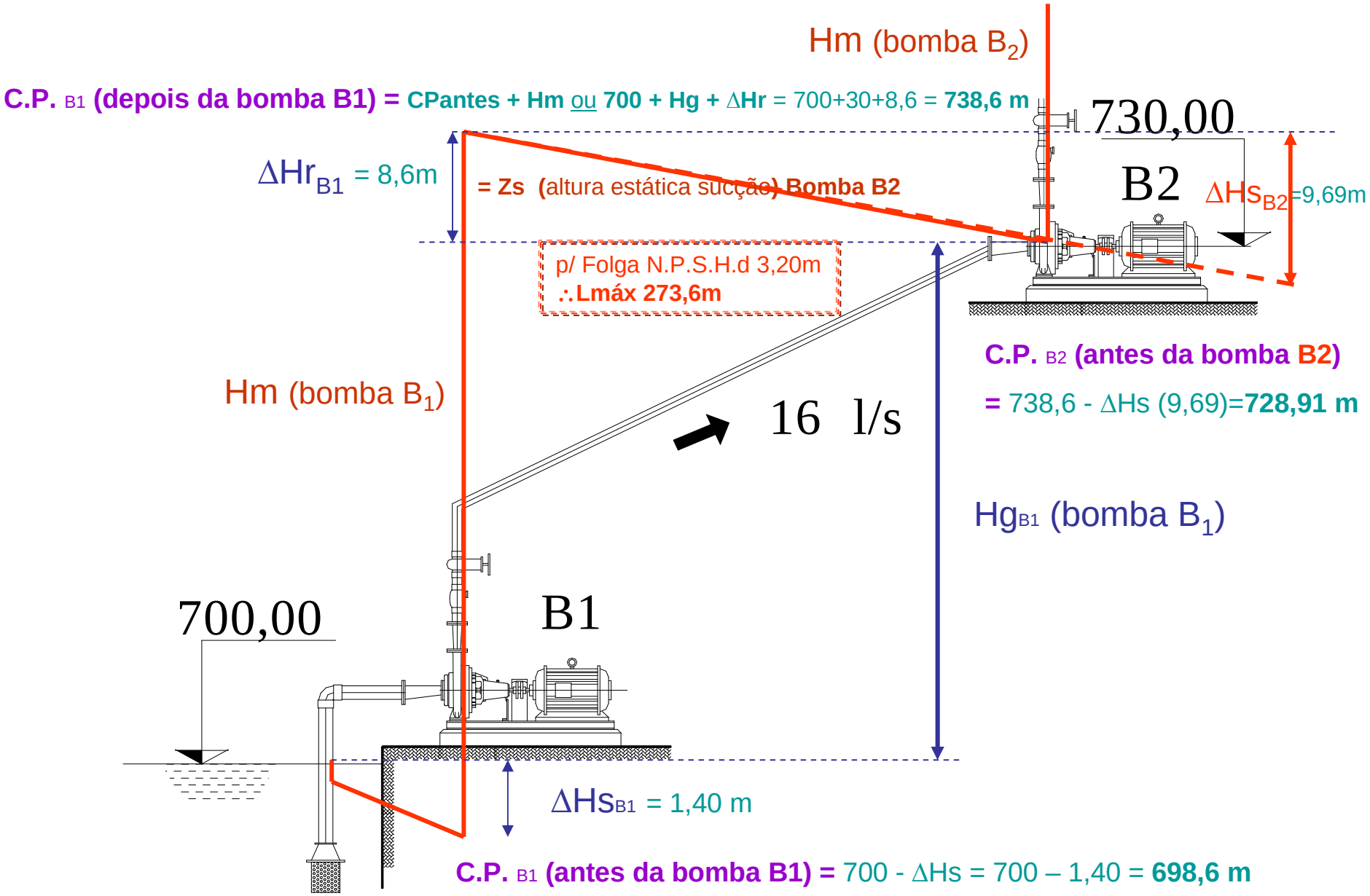


Figura 5.27b



Linha Piezométrica - Exercício 5.16 - livro

- Desafio (Aula 12)

Livro Porto (1998)

- Exercícios 5. 8 e 5.18

- Obrigada!