

Operações Unitárias

Cavitação e NPSH

Seleção da bomba para uma instalação

Prof. Simões

Objetivos dessa aula

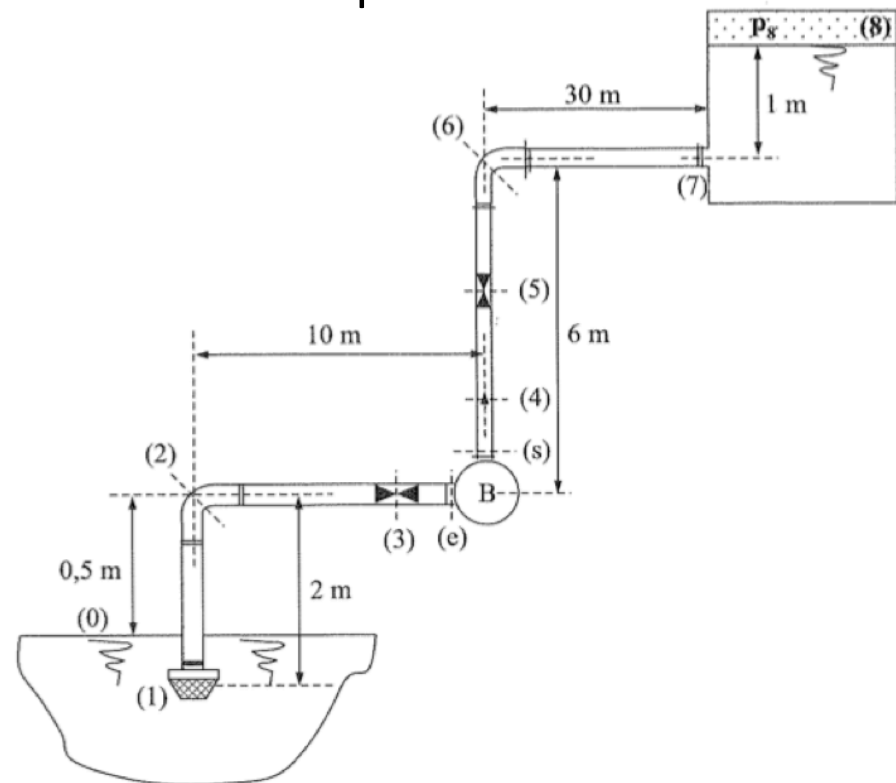
- Entender como são organizados os catálogos técnicos dos fabricantes
- Compreender o que é pressão de vapor e sua importância no projeto
- Definir cavitação e suas causas
- Identificar as condições para a ocorrência da cavitação
- Compreender os parâmetros $NPSH_D$ e $NPSH_R$ no projeto
- Calcular esses parâmetros
- Usar esses elementos para fazer a seleção da bomba

Problema típico

A vazão da instalação abaixo é de 40 L/s de água ($\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$; $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). O diâmetro da tubulação de sucção é de 15 cm e a de recalque é de 10 cm, ambas de ferro galvanizado. A pressão no reservatório superior é mantida constante a 532 kPa. A instalação opera na temperatura de 30°C a uma altitude de 600 m. Utilizar o método das perdas localizadas, com os valores dados abaixo. Selecionar a bomba do catálogo do fabricante disponível no conteúdo da disciplina.

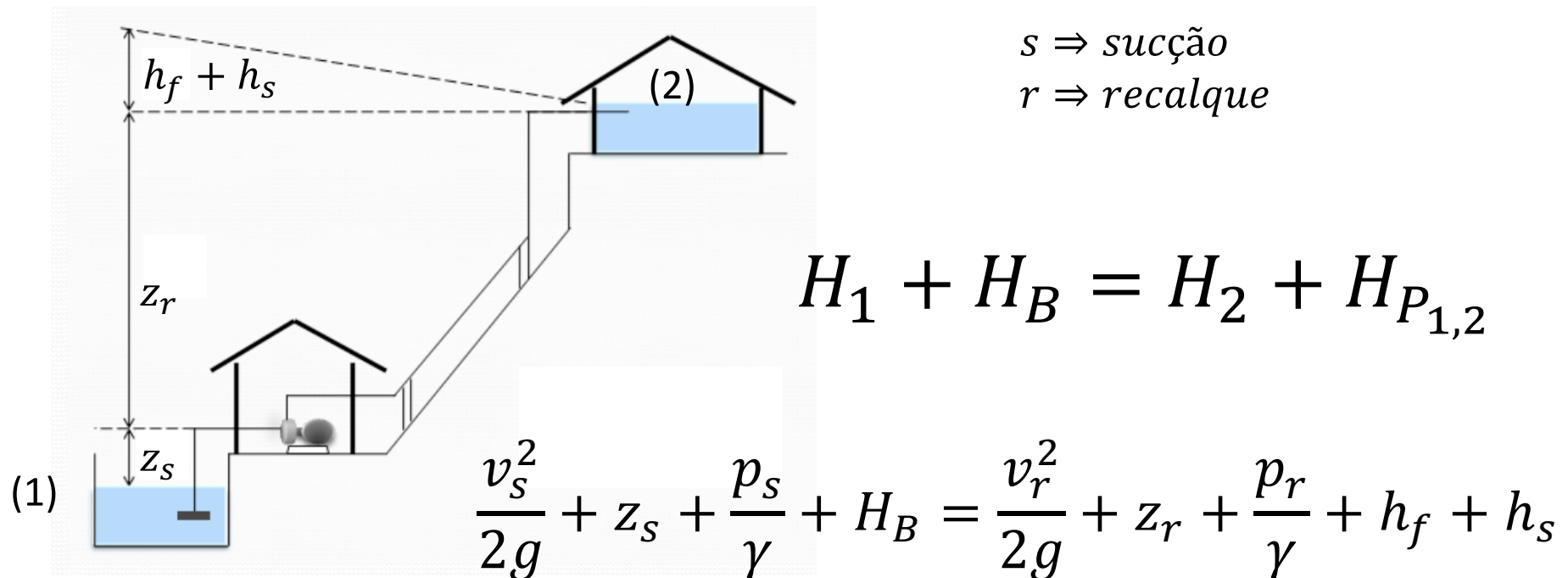
Conexões:

- (1) Válvula de pé com crivo, $k_{s1}=15$
- (2) e (6) Cotovelos, $k_{s2}=k_{s6}=0,9$
- (3) e (5) Registros globo, $k_{s3}=k_{s5}=10$
- (4) Válvula de retenção, $k_{s4}=0,5$
- (7) Alargamento brusco, $k_{s7}=1,0$



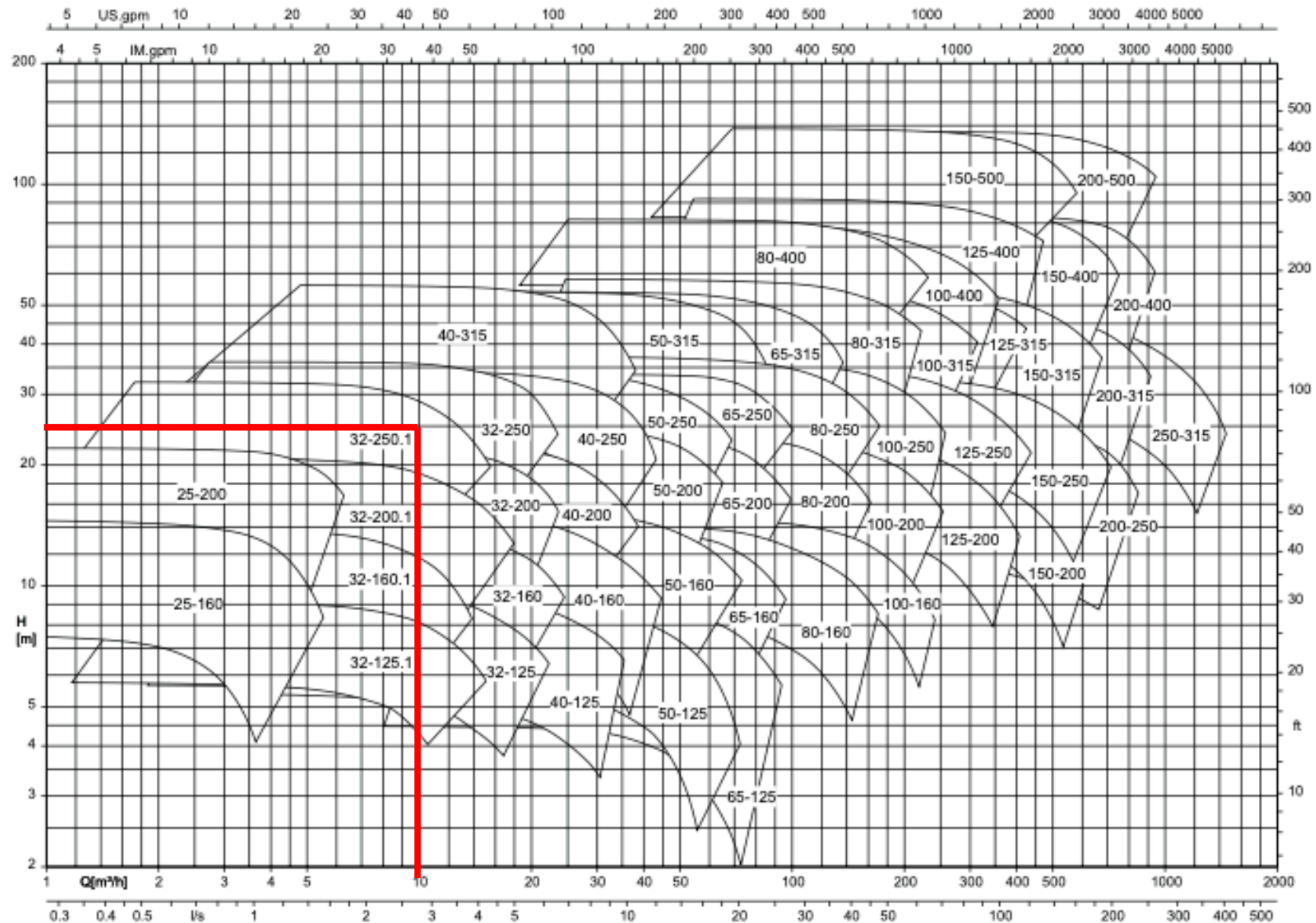
Seleção da bomba

- As bombas centrífugas são fabricadas em uma grande variedade de potências, diâmetros e rotações.
- Usualmente, os catálogos dos fabricantes ilustram inicialmente um Diagrama de Cobertura Hidráulica para a pré-seleção da família de modelos.
- A pré-seleção é feita com base na **vazão do projeto** e da **altura manométrica H_B** .



Seleção da bomba

- Exemplo KSB, vazão, $10 \text{ m}^3/\text{h}$ $H_B=25 \text{ mca}$: família 32.250.1



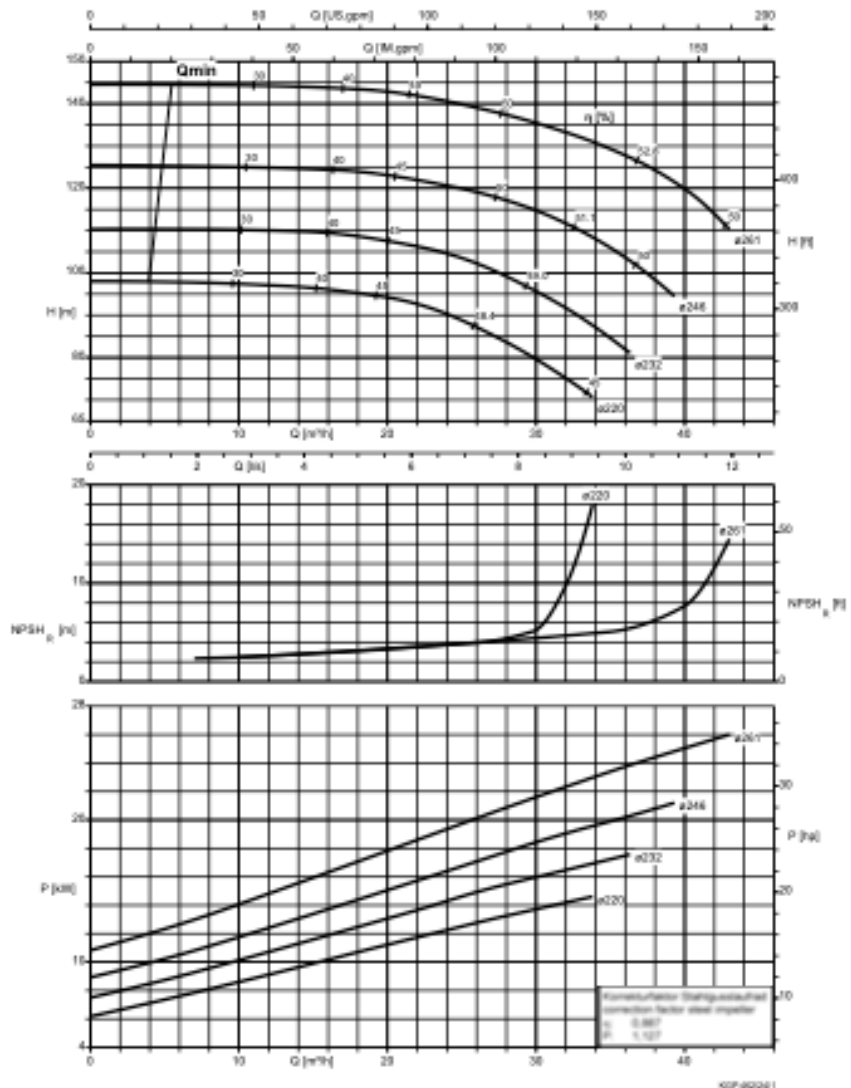
Seleção da bomba

- Essa família é composta por 4 diâmetros de rotores, e para cada um deles será fornecido o **rendimento**, o **NPSH** requerido e a **potência** desenvolvida.
- O **NPSH** é um fator importante na escolha da bomba, impactando sua durabilidade e o conforto da instalação, essencial em muitos projetos.
- Vamos discutir seu significado antes de prosseguir com a seleção da bomba



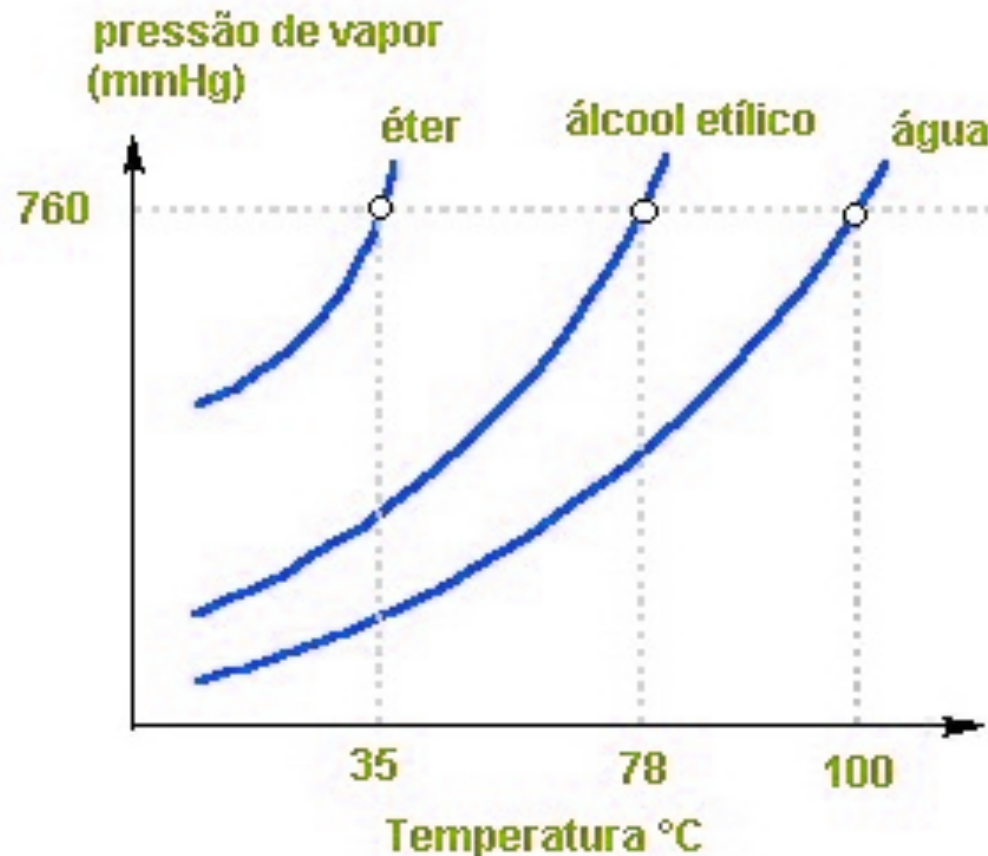
Bombas centrífugas com vedação do eixo
Bomba padronizada para uso geral

Meganorm 650-032-250, $n = 3.500 \text{ rpm}$



Pressão de vapor

- Para entender o que a função do NPSH da bomba, é necessário recordar o que é **pressão de vapor**.
- Define a pressão em que o fluido está em equilíbrio termodinâmico com o meio, ou seja, a quantidade de líquido que evapora é a mesma que condensa

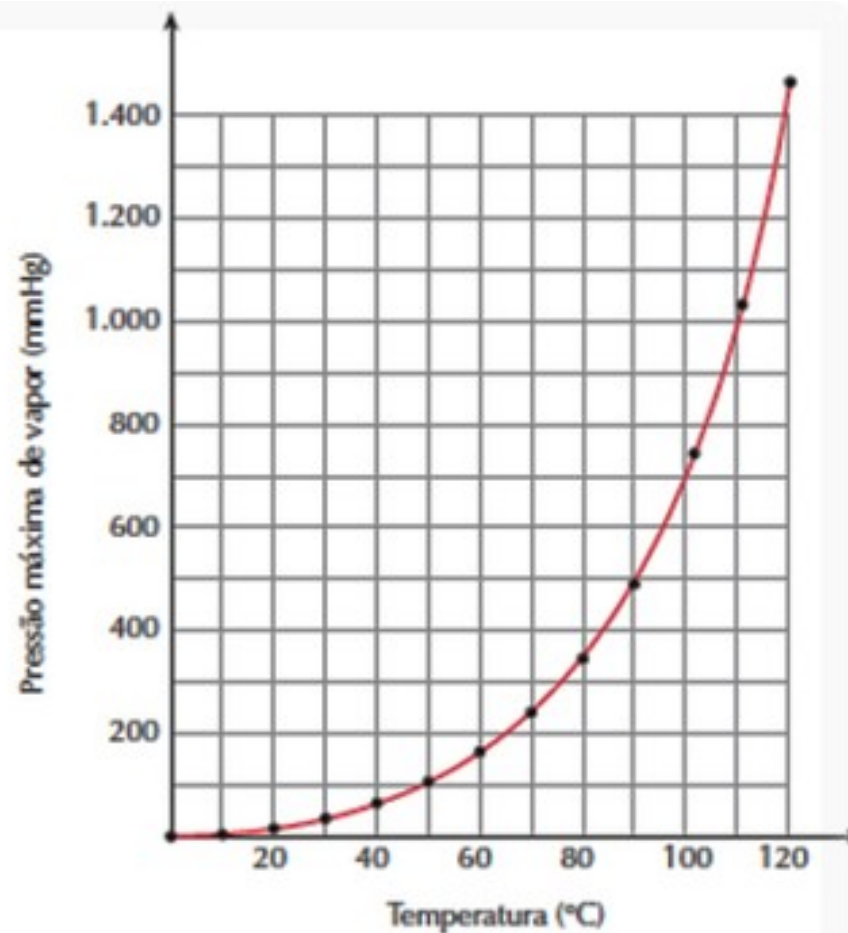


Para que um fluido passe para o estado de vapor, é necessário que a pressão sobre ele seja inferior à pressão de vapor naquela temperatura

Pressão de vapor

- Por exemplo, se a pressão externa for de 760 mmHg (1,0 atm), será necessária uma temperatura de 100°C. Porém, se a pressão for de 17,5 mmHg, a água passará para vapor à temperatura de 20°C

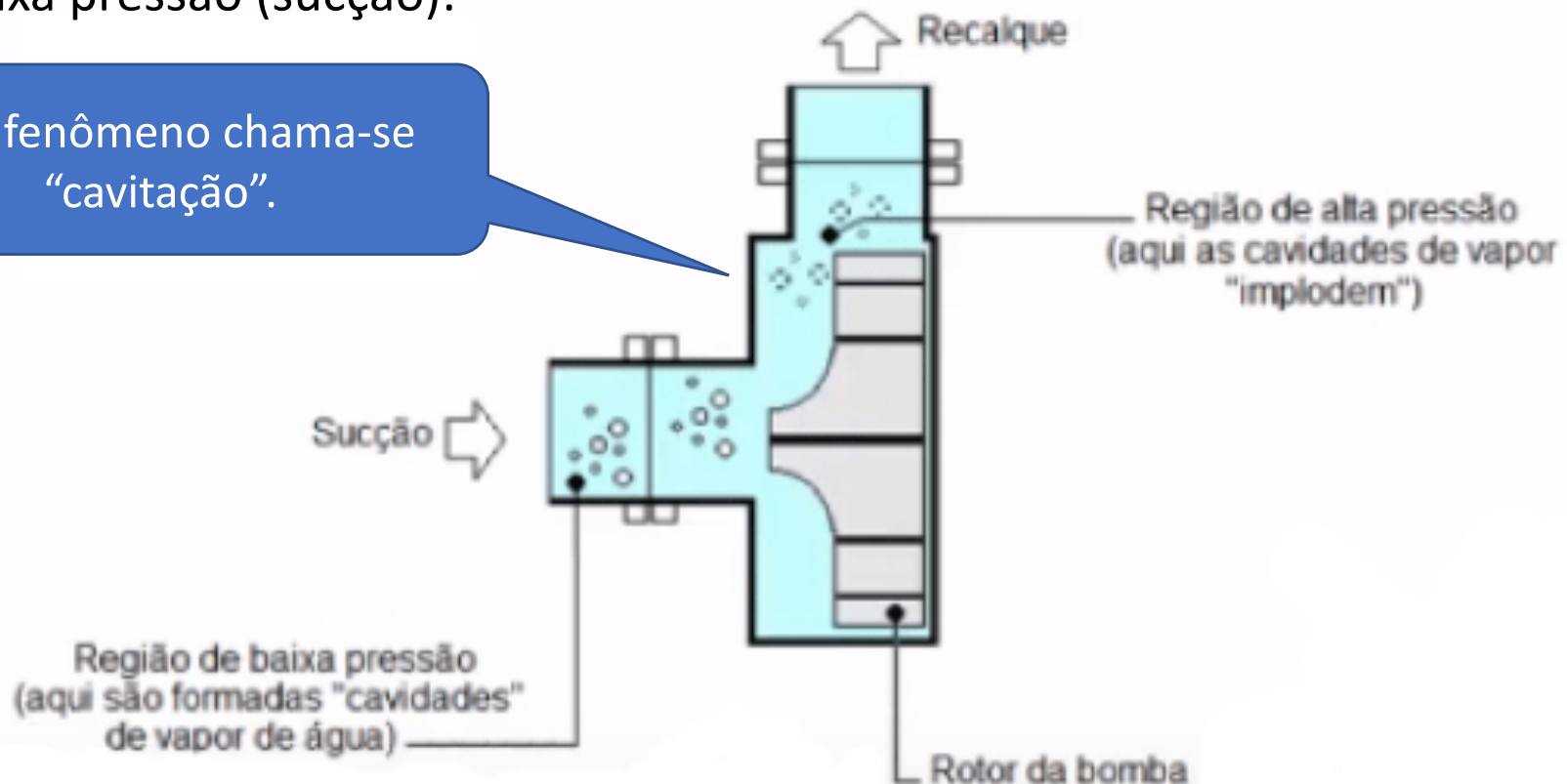
Água pura	
Temperatura (°C)	Pressão máxima de vapor (mmHg)
0	4,6
10	9,2
20	17,5
30	31,8
40	55,3
50	92,5
60	149,4
70	233,7
80	355,1
90	525,8
100	760,0
110	1.074,6
120	1.489,1



Cavitação

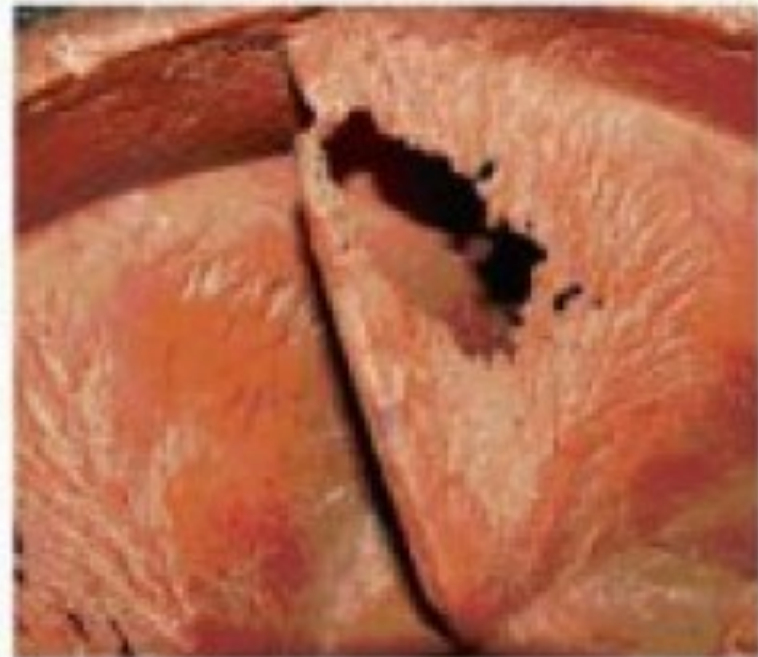
- Um líquido pode ser “empurrado”, uma vez que é incompressível.
- Ao ser “puxado”, porém, a baixa pressão a que é submetido pode, eventualmente, ser inferior à sua pressão de vapor na temperatura de operação do sistema hidráulico.
- Isso ocasionará o surgimento de pequenas bolhas de vapor na região de baixa pressão (sucção):

Esse fenômeno chama-se
“cavitação”.



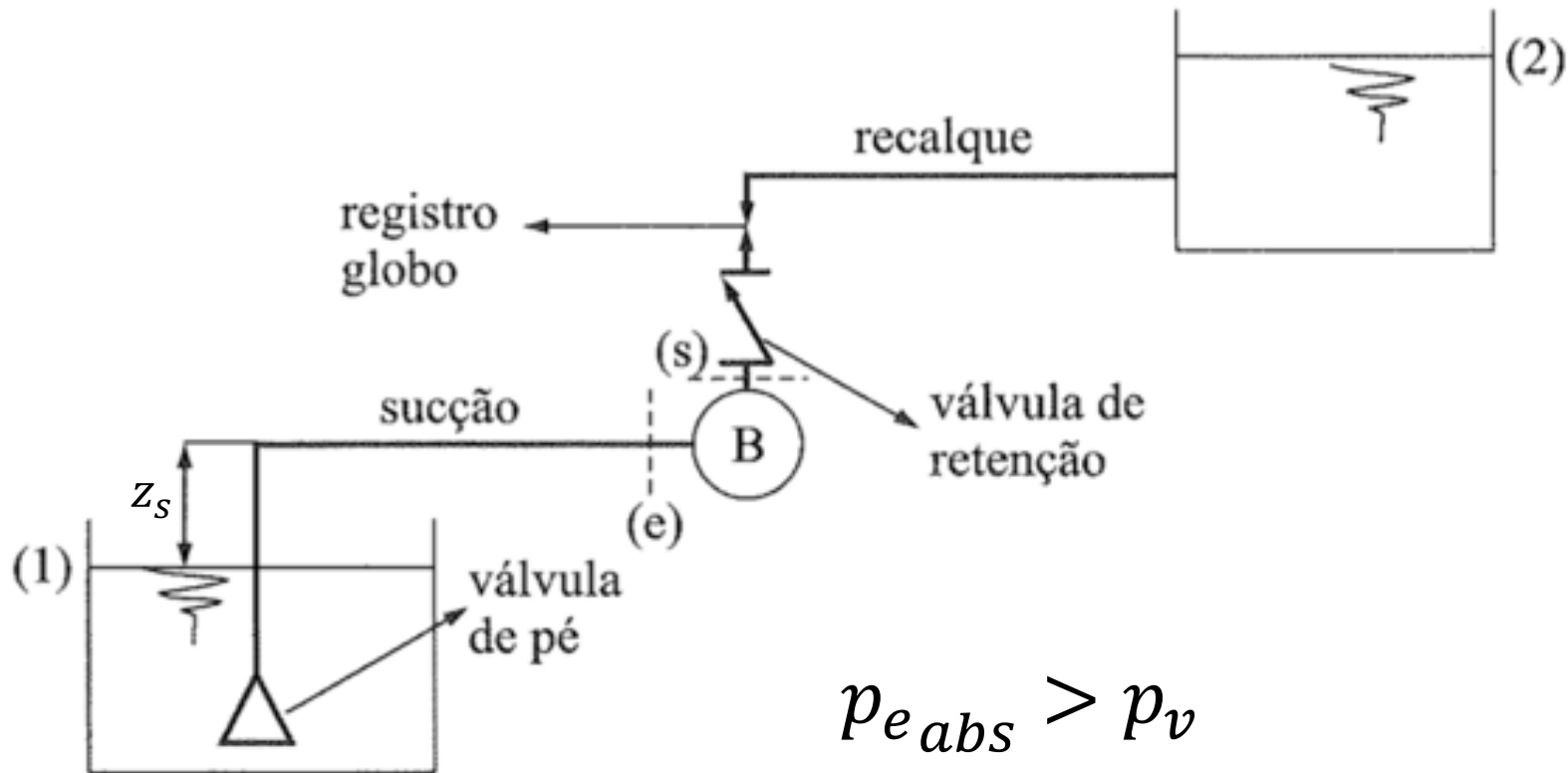
Cavitação

- Assim que há um restabelecimento da pressão, essas bolhas de vapor **implodem**, com um micro choque mecânico.
- Esse choque, porém, é de grande intensidade, e, quando ocasionado por muitas bolhas, podem causar grandes danos ao rotor da bomba, além de considerável ruído na tubulação.



Cavitação

- Para garantir que não ocorra cavitação, é importante que a pressão na sucção da bomba seja superior à pressão de vapor do líquido.



$$p_{e_{abs}} > p_v$$

$$p_{e_{abs}} = p_e + p_{atm}$$

Cavitação

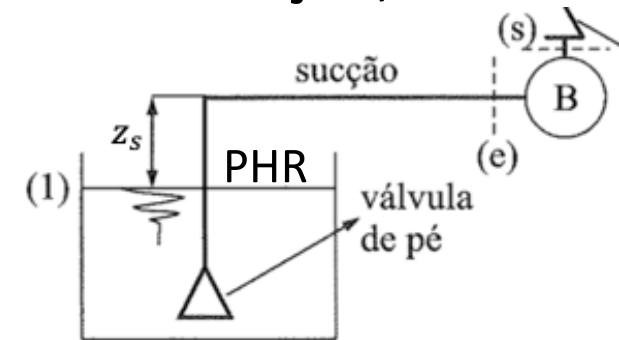
- Por exemplo no circuito anterior, no trecho de sucção, temos que

$$H_1 = H_e + H_{p_{1,e}}$$

$$0 = \frac{v_e^2}{2g} + z_s + \frac{p_e}{\gamma} + h_f + h_s$$

$$p_e = -\gamma \left(\frac{v_e^2}{2g} + z_s + h_f + h_s \right)$$

$$p_{e_{abs}} = p_{atm} - \gamma \left(\frac{v_e^2}{2g} + z_e + h_f + h_s \right)$$



$$H_1 = \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = 0$$

$$H_e = \frac{v_e^2}{2g} + z_s + \frac{p_e}{\gamma}$$

$$H_{p_{1,e}} = h_f + h_s$$

Cavitação

- Das equações obtidas:

$$p_{e_{abs}} = p_{atm} - \gamma \left(\frac{v_e^2}{2g} + z_s + h_f + h_s \right)$$

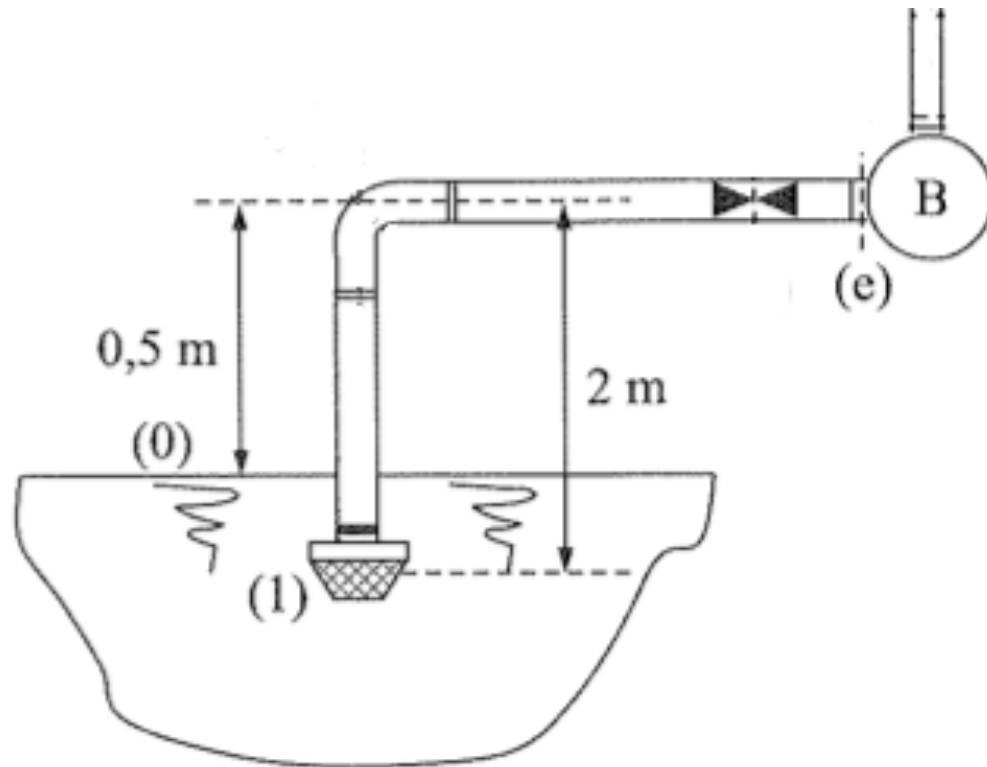
$$p_{e_{abs}} > p_v$$

é possível concluir que, para evitar a cavitação, as seguintes condições são importantes:

- a) menor velocidade do fluido (ou seja, maior diâmetro na sucção)
- b) menor cota z_s possível (a bomba o mais próximo possível do nível de sucção)
- c) menores perdas de carga distribuídas e localizadas

Exemplo

- Analise a possibilidade de cavitação na linha de sucção representada, sabendo que:
 - Temperatura ambiente: 30°C
 - Vazão: 40 L/s
 - Diâmetro int.: 15 cm
 - Perdas: $7,0\text{ m}$
 - $p_{\text{atm}}: 1,01 \times 10^5\text{ Pa}$
 - $\gamma = 9810\text{ N/m}^3$

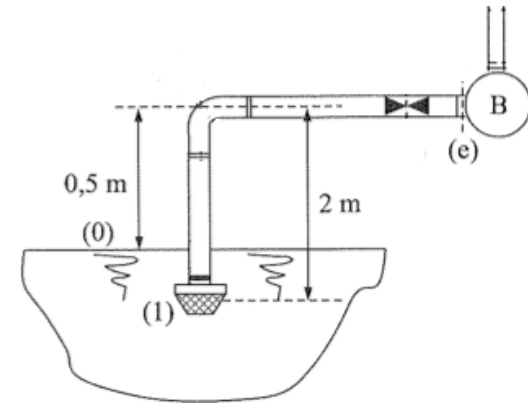


Exemplo, resolução

- Pressão absoluta na entrada da bomba

$$p_{e_{abs}} = p_{atm} - \gamma \left(\frac{v_e^2}{2g} + z_s + h_f + h_s \right)$$

- p_{atm} : $1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- $\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$
- $v_e = \frac{Q}{A} = \frac{4 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,15^2} \Rightarrow v_e = 2,26 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $z_s = 0,5 \text{ m}$
- $h_f + h_s = 7,0 \text{ m}$



$$p_{e_{abs}} = 1,01 \cdot 10^5 - 9810 \cdot \left(\frac{2,26^2}{2 \cdot 9,8} + 0,5 + 7 \right) \Rightarrow p_{e_{abs}} = 2,49 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

- Pressão de vapor a 30°C

$$p_v = 31,8 \text{ mmHg} = 4,34 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\left(1 \text{ mmHg} = 133,3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)$$

$$24,9 \cdot 10^3 > 4,34 \cdot 10^3$$
$$p_{e_{abs}} > p_v$$
$$\therefore \text{n\~{o} haver\~{a} cavita\~{c}\~{a}o}$$

NPSH (Net Positive Suction Head)

- Embora esse seja o fundamento teórico, na prática adota-se um parâmetro chamado **NPSH** (Altura Positiva Líquida de Sucção).
- O NPSH representa a disponibilidade de energia com que o líquido penetra na entrada da bomba.
- Para fins de projeto, é necessário conhecer dois valores de NPSH
 - $NPSH_R$ – NPSH requerido: é o valor de NPSH mínimo **necessário** para o funcionamento da bomba e deve ser fornecido pelo fabricante
 - $NPSH_D$ – NPSH disponível: depende das condições do projeto e deve ser calculado pelo projetista
- A condição para evitar cavitação é que $NPSH_D > NPSH_R$

Recomendação prática: $NPSH_D > 1,1 \text{ a } 1,15 \cdot NPSH_R$

NPSH (Net Positive Suction Head)

- O NPSH disponível é calculado por:

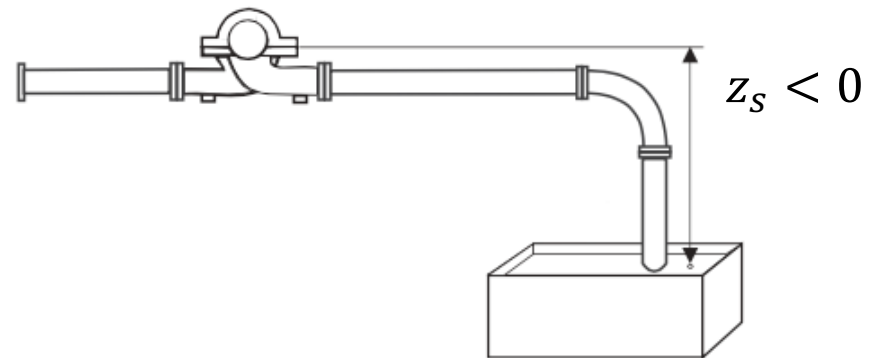
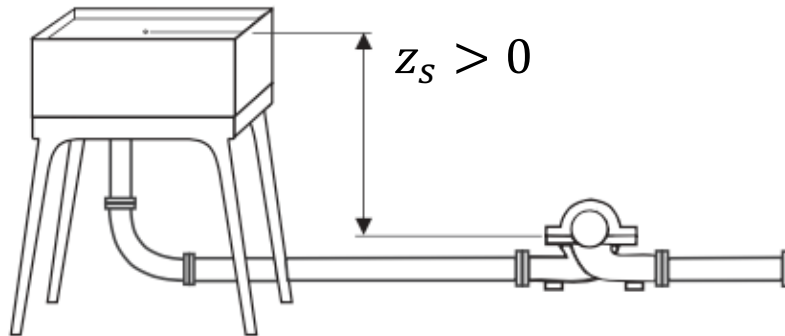
$$NPSH_D = \pm z_s + \frac{P_{atm}}{\gamma} - \left(\frac{P_v}{\gamma} + H_{p_s} \right)$$

Onde:

$z_s \Rightarrow$ altura de sucção

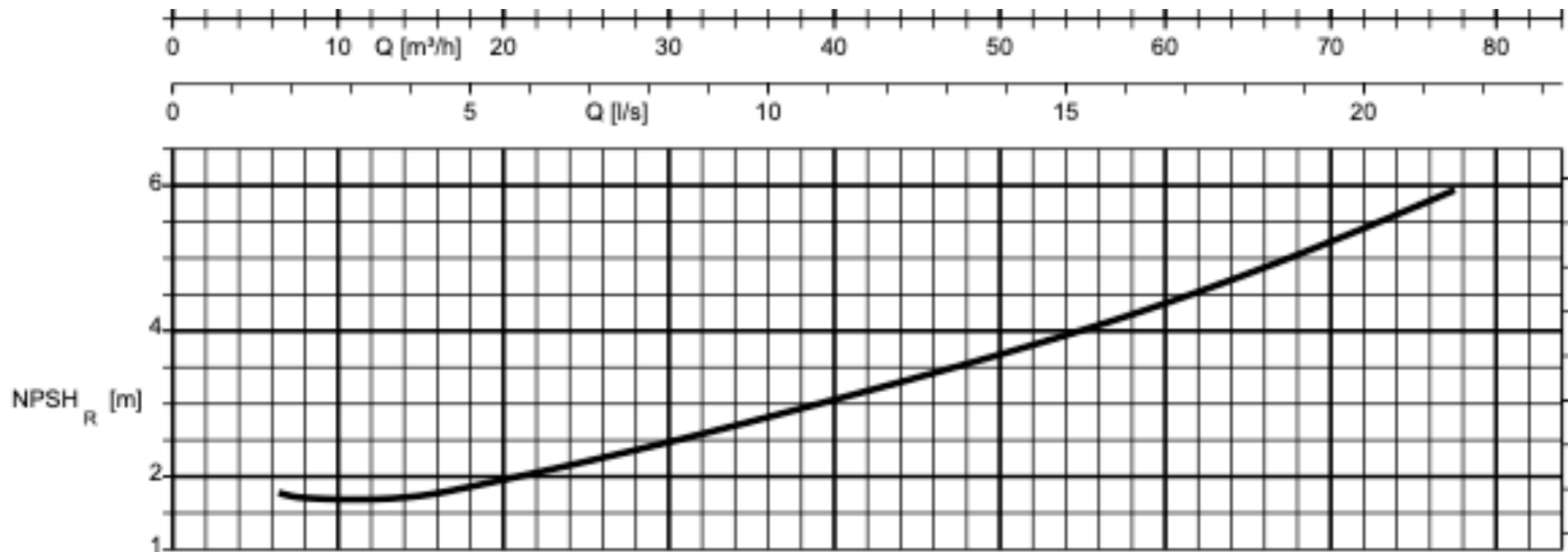
$p_v \Rightarrow$ pressão de vapor

$H_{p_s} \Rightarrow$ perda de carga na linha de sucção



NPSH (Net Positive Suction Head)

- O NPSH requerido deve ser obtido nos dados técnicos da bomba



Meganorm 065-040-200, n = 3.500 rpm

Seleção de bomba, exemplo

- Utilizaremos um caso já resolvido para as perdas de carga para ilustrar o processo de seleção de bomba centrífuga.
- Como exemplo, será utilizado o catálogo do fabricante KSB.
- Os dados e resultados já calculados estão a seguir.
- Além deles serão necessárias as tabelas abaixo

DADOS DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA PARA DETERMINADAS ALTITUDES LOCAIS										
Altitude em Relação ao Mar (metros)	0	150	300	450	600	750	1000	1250	1500	2000
Pressão Atmosférica (mca)	10,33	10,16	9,98	9,79	9,58	9,35	9,12	8,83	8,64	8,08

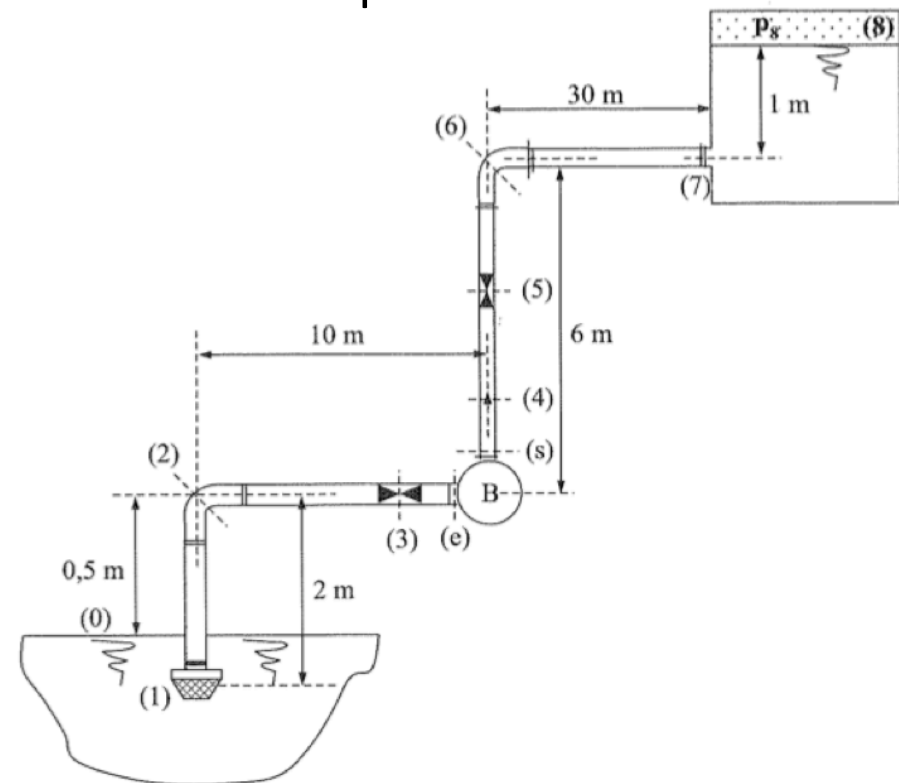
PRESSÃO DE VAPOR DA ÁGUA PARA DETERMINADAS TEMPERATURAS											
Temperatura da água (°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100	
Pressão de Vapor da água (mca)	0,062	0,083	0,125	0,239	0,433	0,753	1,258	2,31	4,831	10,33	

Seleção de bomba, exemplo

A vazão da instalação abaixo é de 40 L/s de água ($\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$; $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). O diâmetro da tubulação de sucção é de 15 cm e a de recalque é de 10 cm, ambas de ferro galvanizado. A pressão no reservatório superior é mantida constante a 532 kPa. A instalação opera na temperatura de 30°C a uma altitude de 600 m. Utilizar o método das perdas localizadas, com os valores dados abaixo. Selecionar a bomba do catálogo do fabricante disponível no conteúdo da disciplina

Conexões:

- (1) Válvula de pé com crivo, $k_{s1}=15$
- (2) e (6) Cotovelos, $k_{s2}=k_{s6}=0,9$
- (3) e (5) Registros globo, $k_{s3}=k_{s5}=10$
- (4) Válvula de retenção, $k_{s4}=0,5$
- (7) Alargamento brusco, $k_{s7}=1,0$



Obs.: a parte das perdas desse exemplo já foi resolvida anteriormente.

Seleção de bomba, exemplo

1. Calcular as perdas de carga (já calculadas anteriormente)

- $H_{Ps} = 7,19 \text{ m}$
- $H_{Pr} = 26,9 \text{ m}$
- $H_{P1,2} = 34,1 \text{ m}$

2. Calcular a altura manométrica da bomba (já calculada anteriormente)

- $H_B = 94,8 \text{ m}$

3. Escolher a **família de bombas**

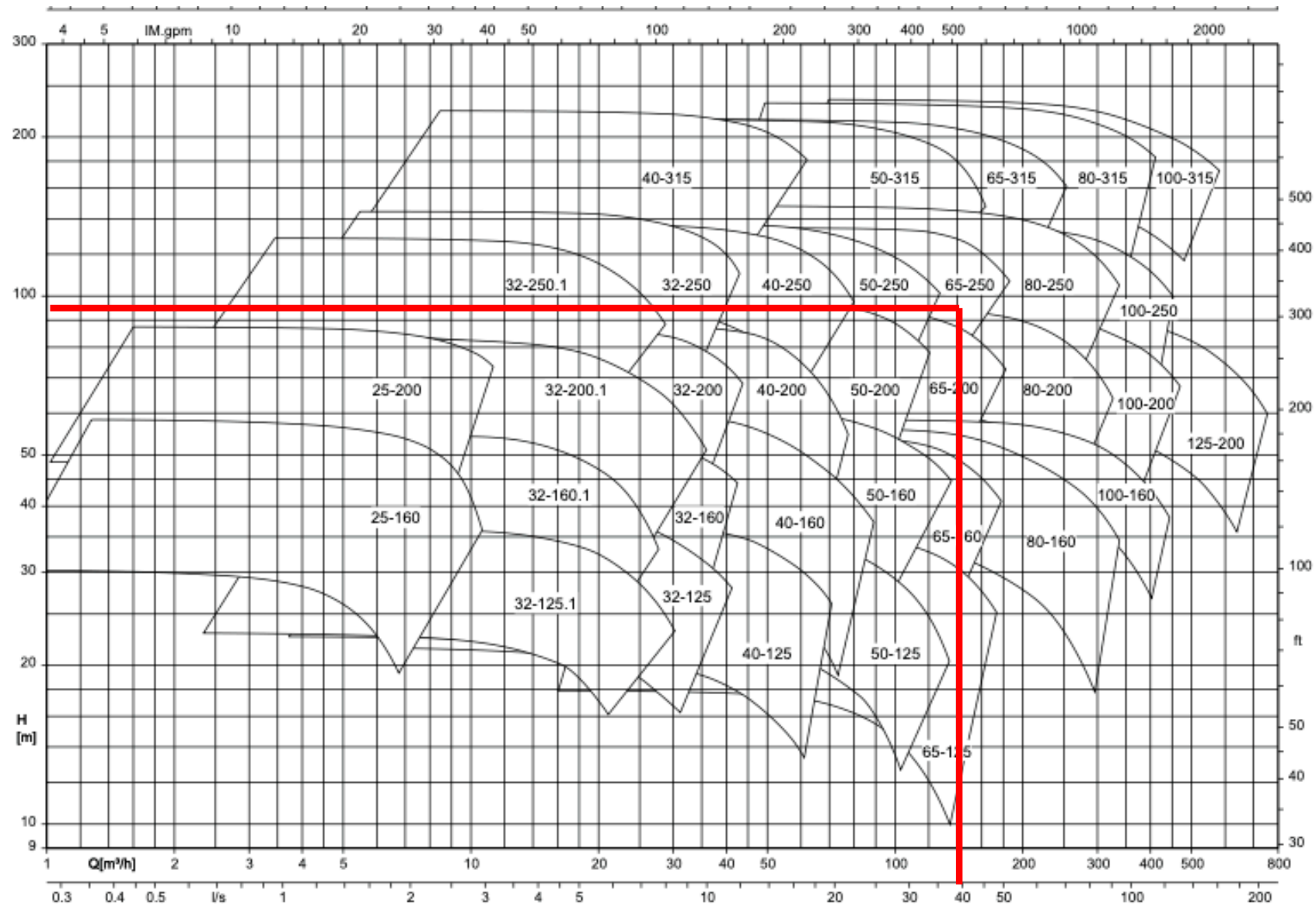
- Ponto de projeto (vazão, altura manométrica)

$$Q = \frac{40}{1000} \cdot 3600 = 144 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Ponto de projeto (144, 94,8)

Seleção de bomba, exemplo

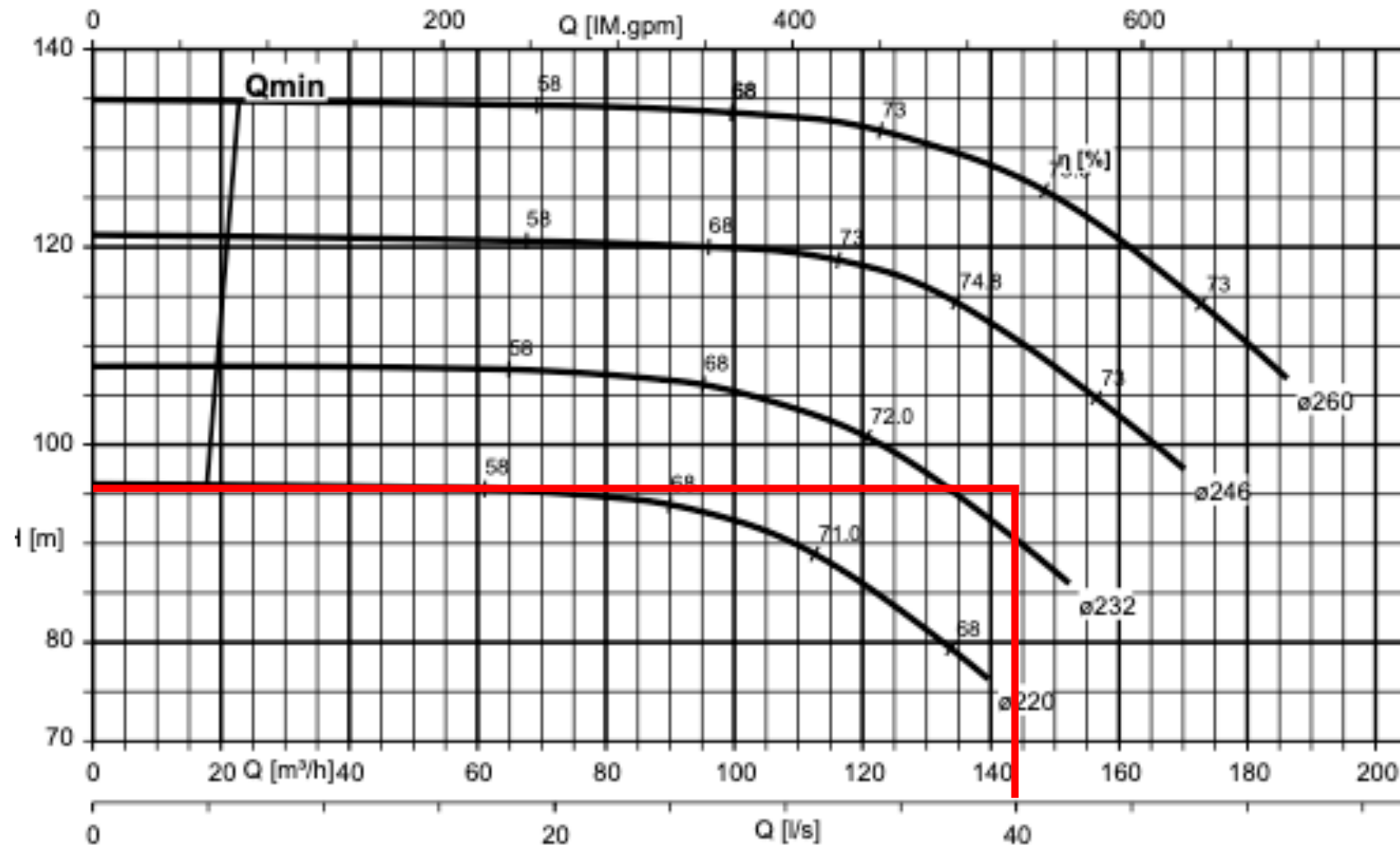
- No catálogo disponível, uma possível seleção seria a família 65-250



Seleção de bomba, exemplo

4. Escolha do diâmetro do rotor

- O catálogo nos remete às curvas características da bomba, a primeira sendo a do rendimento e diâmetro dos rotores; deve ser escolhido o que fica **acima do ponto de projeto**: 246 mm.



Seleção de bomba, exemplo

5. Ponto de trabalho

- Feita a escolha, é necessário verificar o novo ponto de funcionamento do sistema.
- Isso significa determinar a sua equação de funcionamento
- Uma metodologia é utilizar a fórmula de Hazen-Williams, adaptada para esse sistema específico por meio da variável k :

$$H_B = H_G + k \cdot Q^{1,852}$$

- No nosso caso:

$$H_G = z_s + z_r = 0,5 + 7,0 = 7,5 \text{ m}$$

$$94,8 = 7,5 + k \cdot 144^{1,852}$$

$$k = 8,78 \cdot 10^{-3}$$

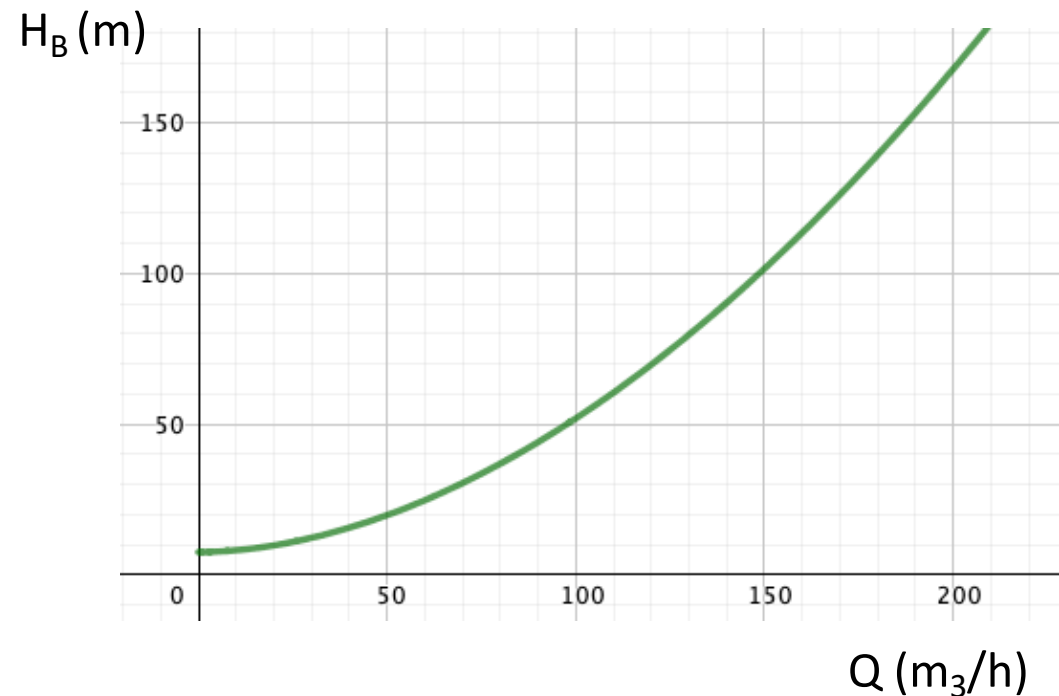
Seleção de bomba, exemplo

- Assim, a equação de nosso sistema é

$$H_B = 7,5 + 8,78 \cdot 10^{-3} \cdot Q^{1,852}$$

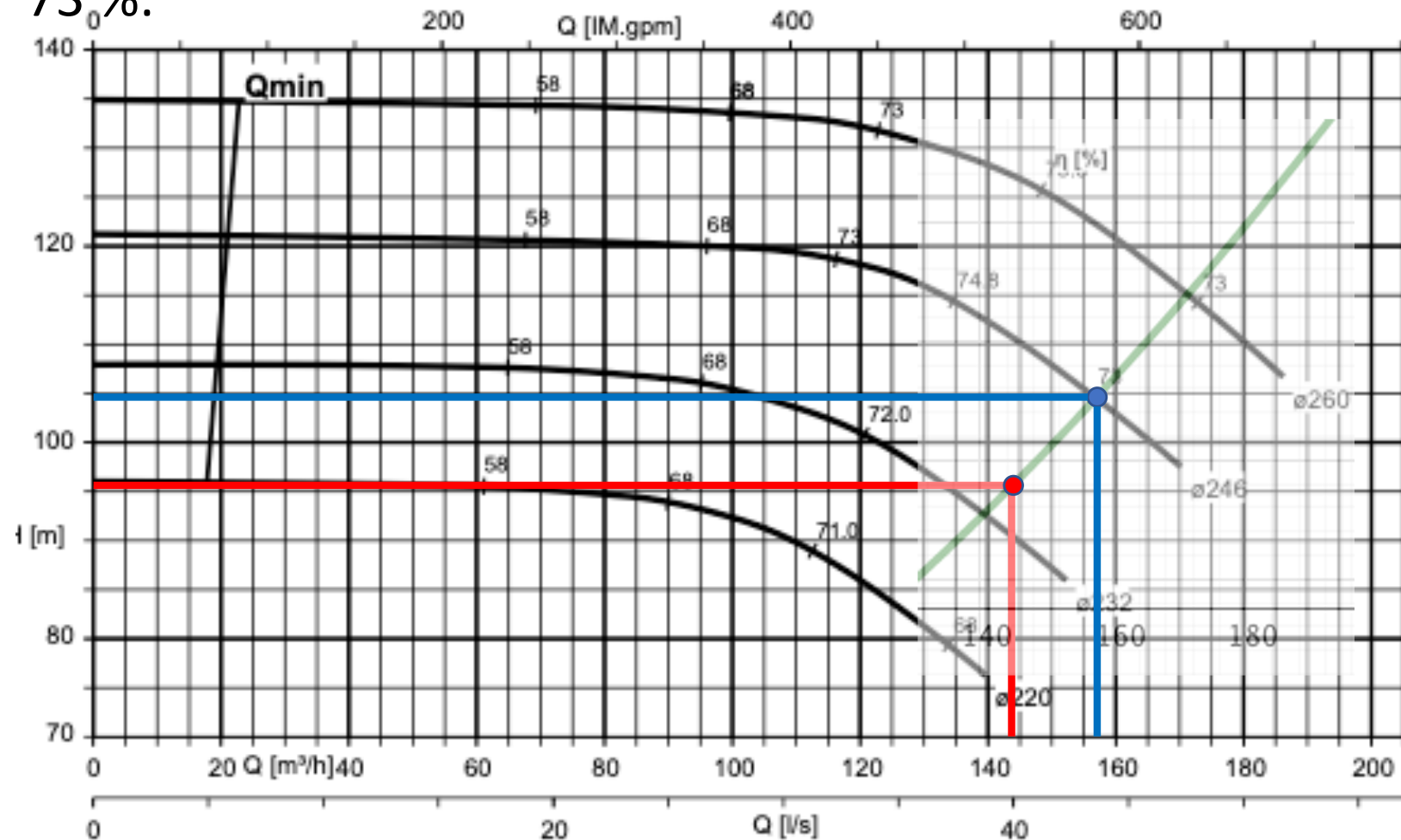
- Atribuindo valores para Q, acima do valor de projeto, verificamos que:

Vazão (m ₃ /h)	H _B (m)
140	90
150	102
160	114
170	126
180	139
190	153
200	168



Seleção de bomba, exemplo

- É possível constatar pelo gráfico que o ponto de trabalho do sistema será de $Q = 157 \text{ m}^3/\text{h}$ ($43,6 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$) para uma altura manométrica de $H_B = 104 \text{ m}$, com um rendimento de 73 %.



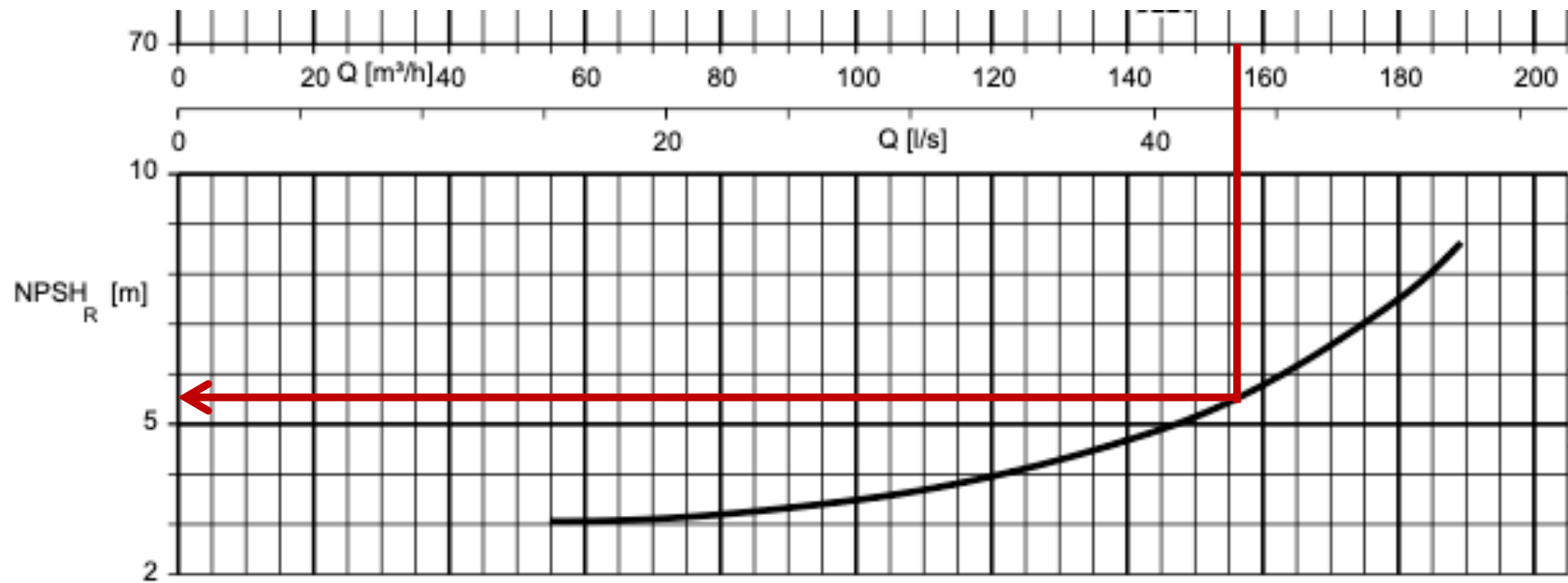
● Ponto de projeto

● Ponto de trabalho

Seleção de bomba, exemplo

6. Verificação da cavitação

- NPSH requerido:
 - Para esta vazão, temos a seguinte informação do fabricante



Assim, $NPSH_R = 5,5 \text{ m}$

Seleção de bomba, exemplo

- NPSH disponível

$$NPSH_D = \pm z_s + \frac{p_{atm}}{\gamma} - \left(\frac{p_v}{\gamma} + H_{p_s} \right) \qquad 1,0 \text{ mca} = 9,81 \cdot 10^3 \frac{N}{m^2}$$

$$z_s = -0,5 \text{ m (bomba acima do nível de sucção)}$$

$$p_{atm} = 9,58 \text{ mca (600 m de altitude)} = 9,39 \cdot 10^4 \frac{N}{m^2}$$

$$\gamma = 9810 \frac{N}{m^3}$$

$$p_v = 0,433 \text{ mca (30° C)} = 4,25 \cdot 10^3 \frac{N}{m^2}$$

$$H_{p_s} = 7,19 \text{ m}$$

$$NPSH_D = -0,5 + \frac{9,39 \cdot 10^4}{9810} - \left(\frac{4,25 \cdot 10^3}{9810} + 7,19 \right)$$

$$NPSH_D = 1,46 \text{ m}$$

$$NPSH_D < NPSH_R$$



Haverá
cavitação

Seleção de bomba, exemplo

- Tentativa: aumentar o diâmetro na sucção para 20 cm e trocar a válvula globo por uma de gaveta ($k_s=0,07$), e da válvula de pé por um modelo com $k_s=10$
- Nova velocidade:

$$v_s = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_H^2} = \frac{4 \cdot 43,6 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,2^2} \Rightarrow v_s = 1,39 \frac{m}{s}$$

- Perda, trechos retos:

$$Re = \frac{v \cdot D_H}{\nu} = \frac{1,39 \cdot 0,20}{10^{-6}} \Rightarrow Re = 2,8 \cdot 10^5$$

$$\frac{D_H}{k} = \frac{0,2}{1,52 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow \frac{D_H}{k} = 1316$$

$$f(2,8 \cdot 10^5; 1316) = 0,020$$

$$h_{f_s} = f \cdot \frac{L}{D_H} \cdot \frac{v_s^2}{2g} \Rightarrow h_{f_s} = 0,020 \cdot \frac{12}{0,20} \cdot \frac{1,39^2}{2 \cdot 9,8} \Rightarrow h_{f_s} = 0,12 \text{ m}$$

Seleção de bomba, exemplo

- Perdas localizadas (novas conexões)
 - $k_{s_1} = 10$ (*válvula de pé com crivo*)
 - $k_{s_2} = 0,9$ (*cotovelo*)
 - $k_{s_3} = 0,07$ (*válvula de gaveta*)

$$h_{s_s} = \sum k_{s_i} \cdot \frac{v_s^2}{2g} \Rightarrow h_{s_s} = (10 + 0,9 + 0,07) \cdot \frac{1,39^2}{2 \cdot 9,8} \Rightarrow h_{s_s} = 1,08 \text{ m}$$

- Perda na sucção

$$h_s = h_{f_s} + h_{s_s} \Rightarrow h_s = 0,12 + 1,08 \Rightarrow h_s = 1,2 \text{ m}$$

- Novo $NPHS_D$

$$NPSH_D = -0,5 + \frac{9,39 \cdot 10^4}{9810} - \left(\frac{4,25 \cdot 10^3}{9810} + 1,2 \right) \Rightarrow NPSH_D = 7,44 \text{ m}$$

$$NPSH_D > 1,15 \cdot NPSH_R$$

$$7,44 > 1,15 \cdot 5,5 \Rightarrow 7,44 > 6,33$$

A bomba não cavitará. 👍

Seleção de bomba, exemplo

7. Determinação da potência da bomba

$$Q = \frac{157}{3600} = 4,36 \cdot 10^{-2} \frac{m^3}{s}$$

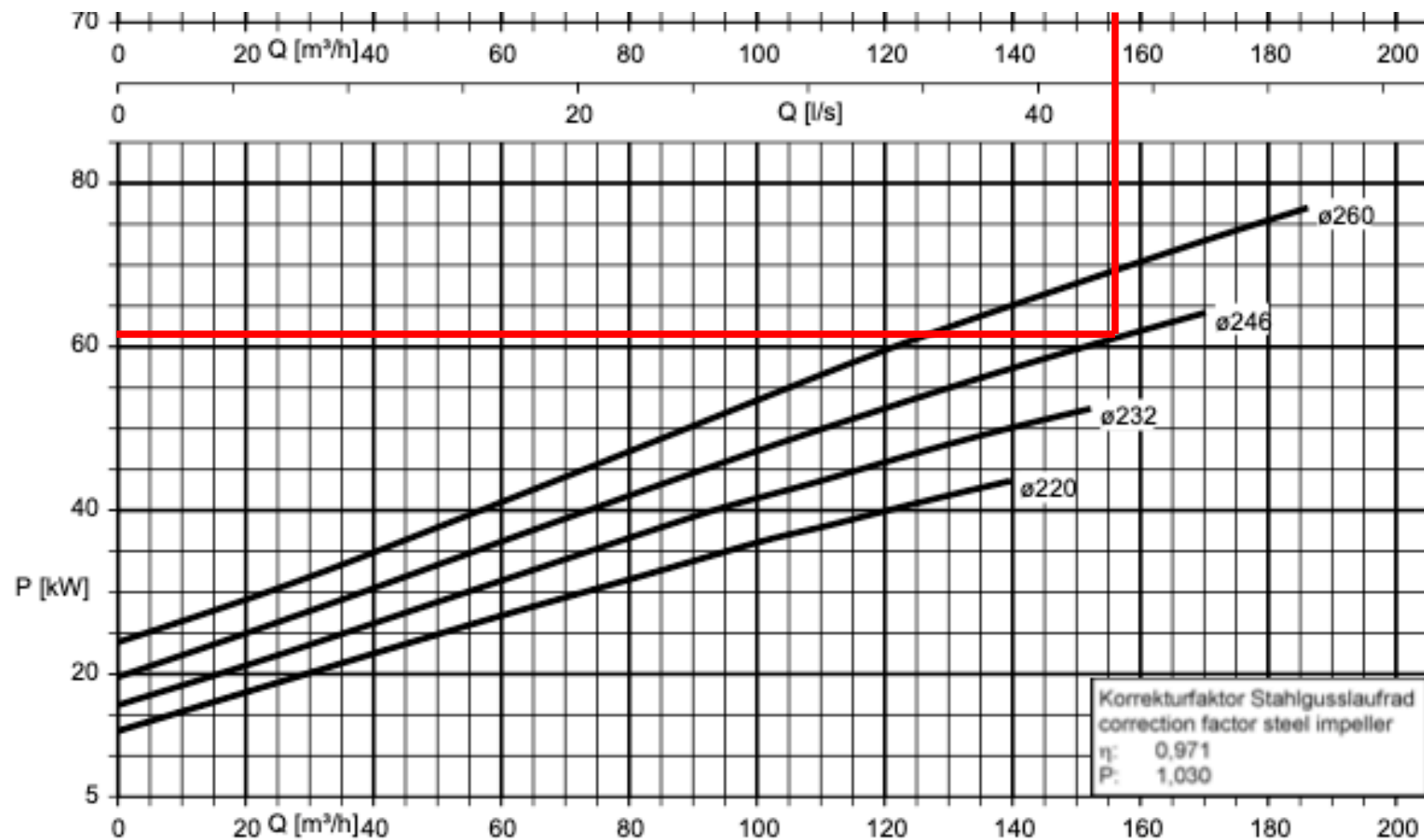
$$N_B = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_B}{\eta_B}$$

$$N_B = \frac{9810 \cdot 4,36 \cdot 10^{-2} \cdot 104}{0,73}$$

$$N_B = 6,10 \cdot 10^4 \text{ W}$$

Seleção de bomba, exemplo

- Essa previsão é confirmada pela análise da terceira curva característica da bomba:



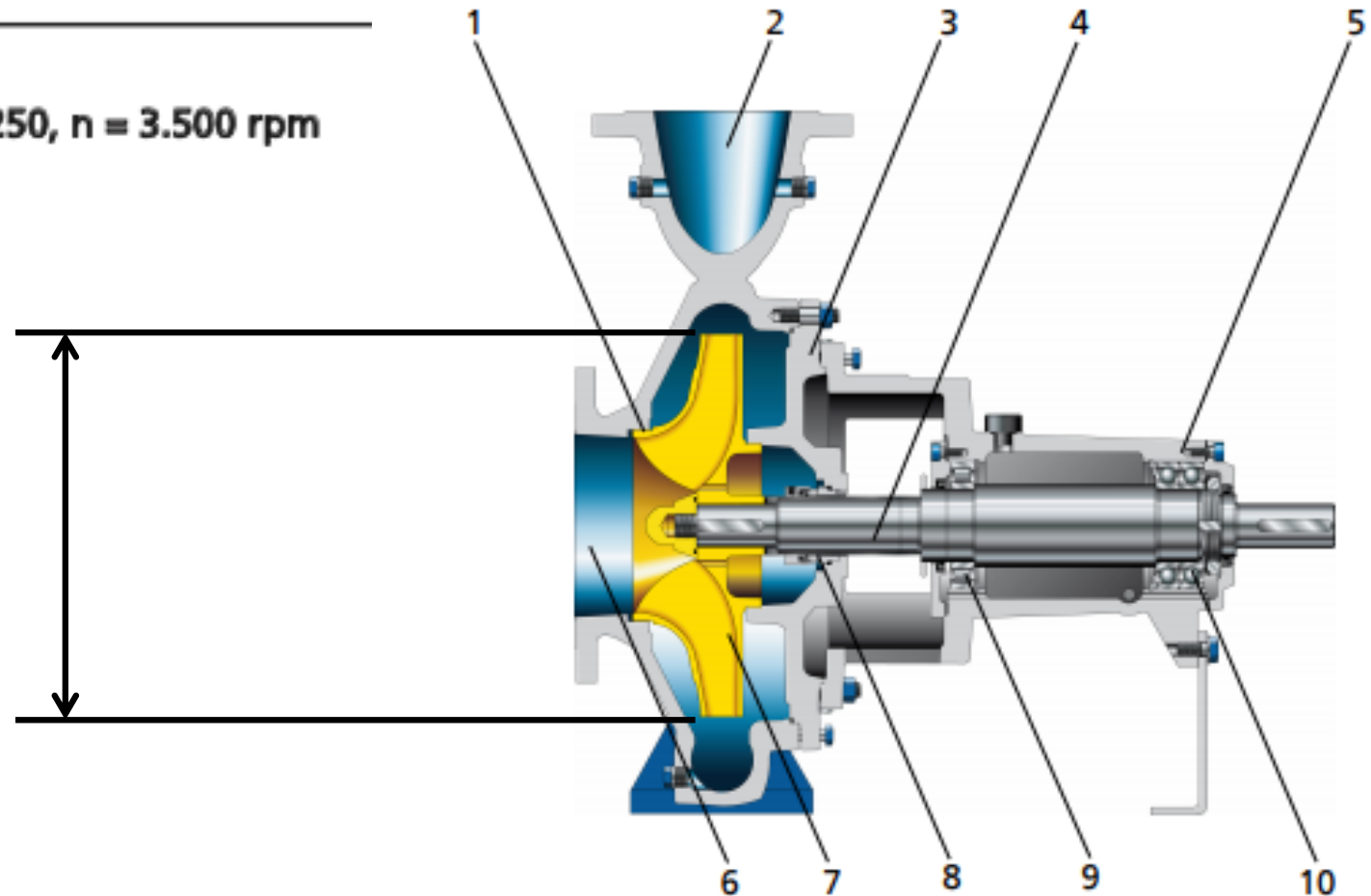
Seleção de bomba, exemplo

- Definição da bomba
 - Portanto, nesse exemplo, a bomba recomendada seria



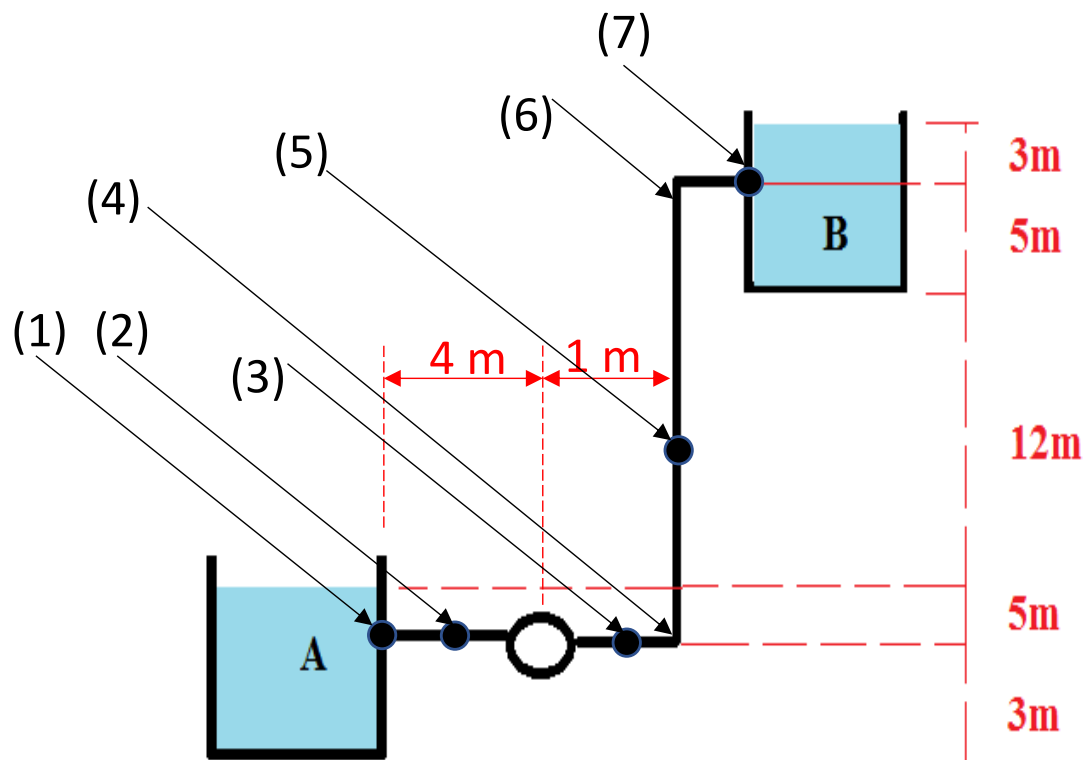
Meganorm 100-065-250, $n = 3.500 \text{ rpm}$

Ø 246 mm



Exercício proposto

Um sistema de bombeamento deve ser projetado para retirar a água ($\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$; $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) de um reservatório A e elevá-la para um reservatório B. A vazão de projeto é $90,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e o diâmetro da tubulação no sistema é de $10,0 \text{ cm}$ de ferro galvanizado. Determine o diâmetro do rotor e potência da bomba. Para o cálculo das perdas, utilize o método das perdas localizadas; verificar sistema quanto à cavitação.



Conexões:

- (1) Entrada: $k_{s1}=0,5$
- (2) V. gaveta: $k_{s2}=0,16$
- (3) V. globo: $k_{s3}=6,0$
- (4) Curva 90° : $k_{s4}=0,19$
- (5) V. retenção: $k_{s5}=2,0$
- (6) Curva 90° : $k_{s6}=0,19$
- (7) Saída: $k_{s7}=0,5$

Ambiente:

Altitude: nível do mar

Temperatura: 30°C

Resposta: uma possível escolha: bomba KSB
Megamorm, 3500 RPM, modelo 50-125, D. rotor: 142
mm, 10 kW; $\text{NPSH}_D=9,6 \text{ m}$

Trabalho

- Dados da instalação

- Vazão: $200 \text{ m}^3/\text{h}$
- Fluido: água, $\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$; $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $p_v = 0,433 \text{ mca}$
- Material dos tubos: ferro galvanizado, $k = 1,52 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
- Local da instalação: cidade litorânea

- Sucção

- Diâmetro interno: 250 mm
- Altura de sucção: 2,0 m abaixo da bomba
- Comprimento reto: 6,0 metros
- Conexões:
 - 1 válvula de pé com crivo, $k_s=5,7$
 - 1 curva 90° , $k_s=0,12$

- Recalque

- Diâmetro interno: 200 mm
- Altura de recalque: 24 m acima da bomba
- Comprimento reto: 1000 metros
- Conexões
 - 1 válvula de retenção, $k_s=3,0$
 - 3 curvas 90° , $k_s=0,15$
 - 2 curvas 45° , $k_s=0,16$
 - 1 válvula de gaveta, $k_s=0,07$
 - 1 saída simples, $k_s=1,0$

Determinar:

1. Perdas de carga
2. Altura manométrica da bomba
3. Ponto de projeto e família de bombas (KSB)
4. Diâmetro do rotor
5. Ponto de trabalho
6. Cavitação (NPSH_R e NPSH_D)
7. Potência da bomba

Resposta: possível escolha: 80-315,
D334 mm, $210 \text{ m}^3/\text{h}$, 44,8 m,
 $\text{NPSH}_D = 7,44 \text{ M}$, 33 KW.

Resumo

- Ao final dessa aula, você deve ser capaz de:
 - Compreender o que é cavitação
 - Calcular as condições que podem causar a cavitação e como evitá-la
 - Compreender os parâmetros $NPSH_R$ e $NPSH_D$
 - Calcular o $NPSH_D$
 - Calcular os demais parâmetros que determinam a seleção de uma bomba centrífuga
 - Utilizar esses parâmetros e o catálogo do fabricante para selecionar a bomba comercial adequada para a instalação.