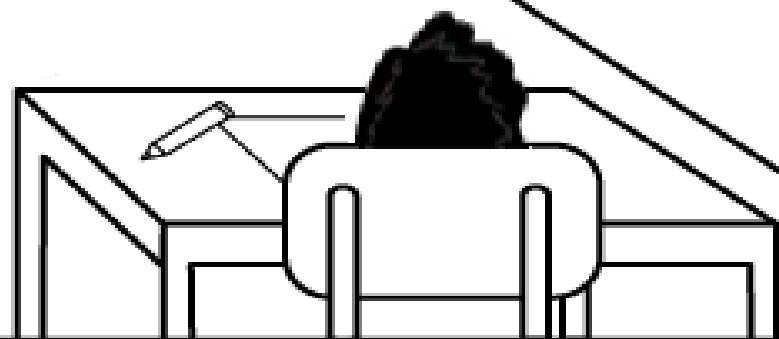
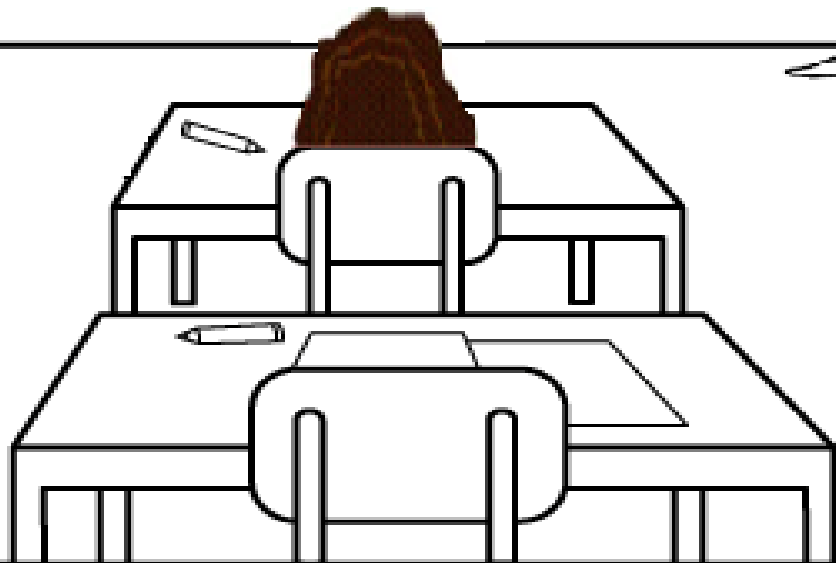
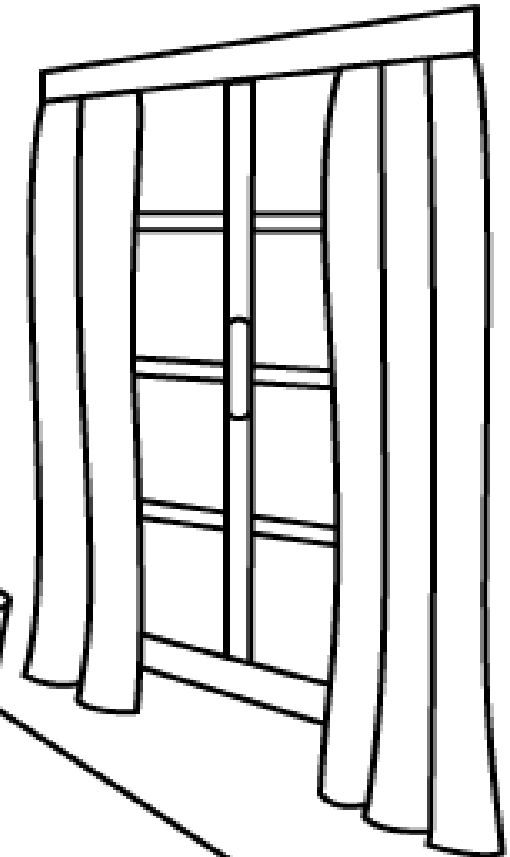
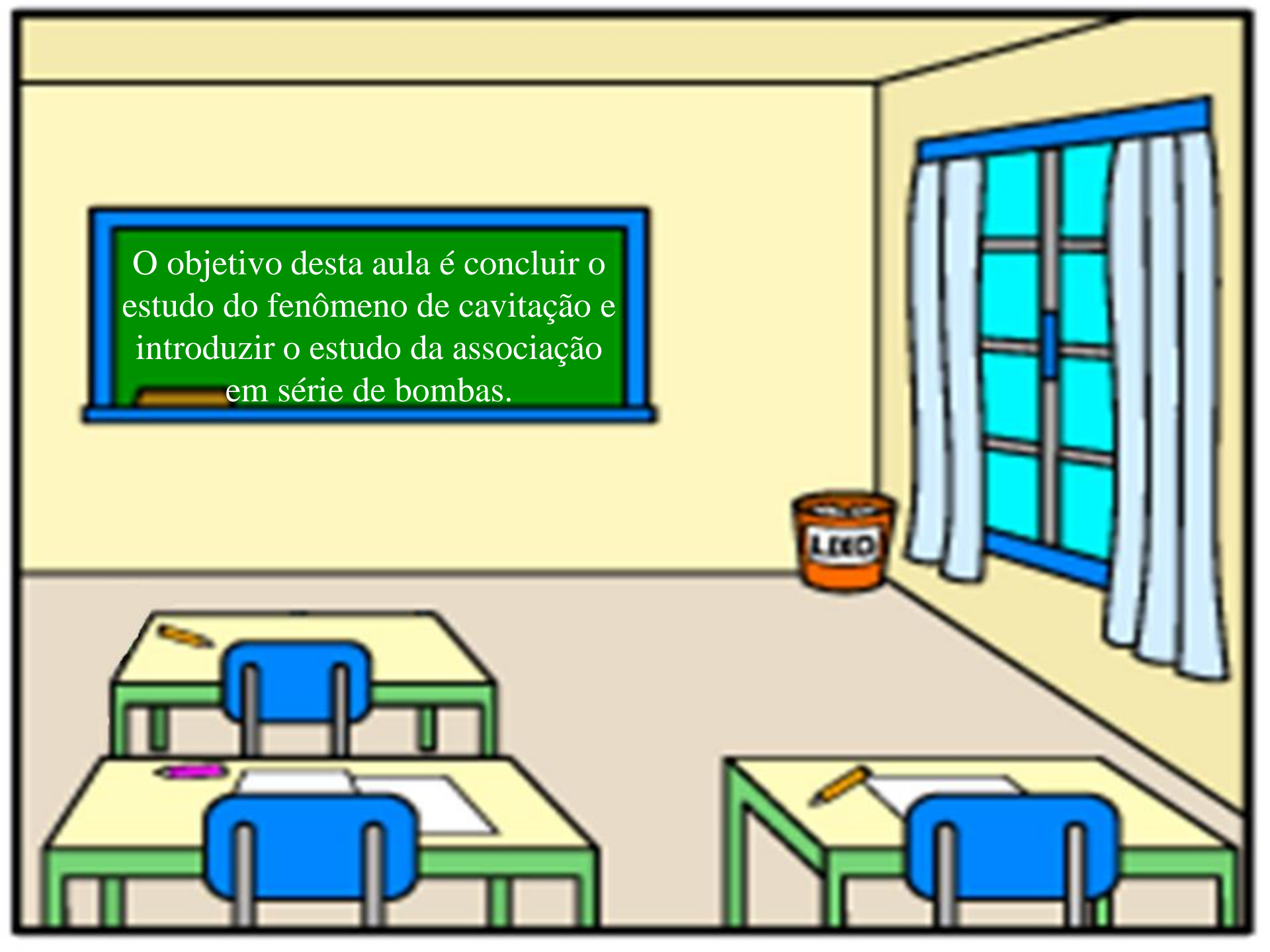


Primeiro semestre de 2013
Mecânica dos Fluidos para a
engenharia química
Aula 8 de teoria

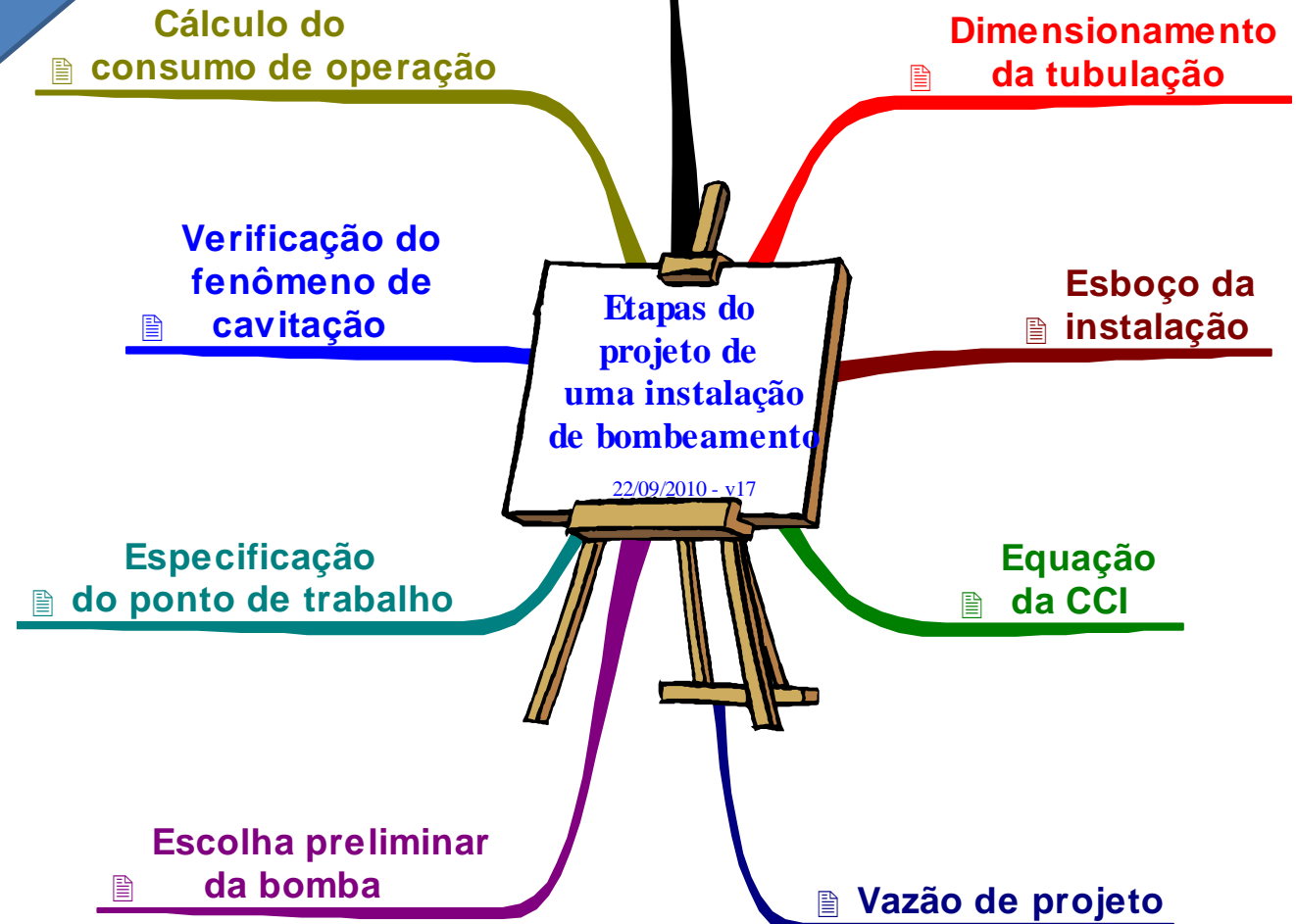





O objetivo desta aula é concluir o estudo do fenômeno de cavitação e introduzir o estudo da associação em série de bombas.

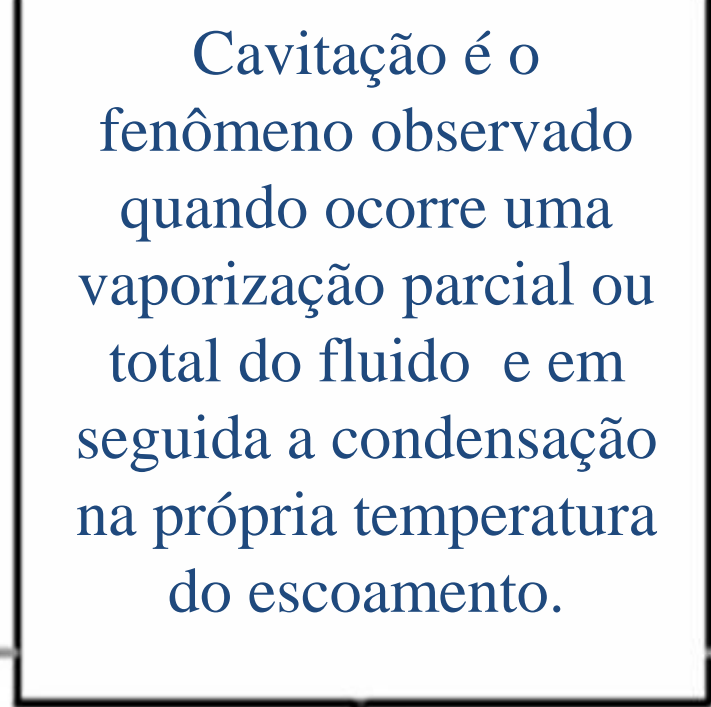
LEGO

Além dos objetivos anteriores, vamos mencionar novamente as etapas do projeto.





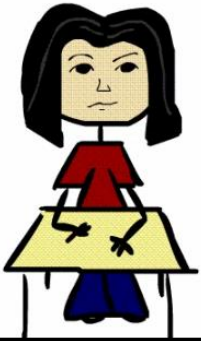
É isso aí,
vamos
completar os
estudos
referentes a
cavitação.



Cavitação é o
fenômeno observado
quando ocorre uma
vaporização parcial ou
total do fluido e em
seguida a condensação
na própria temperatura
do escoamento.



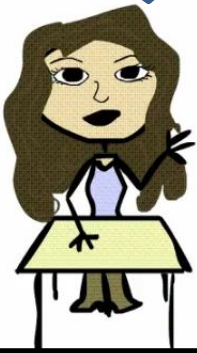
Estou pensando em um escoamento d'água a 20°C e aí me pergunto: como pode ocorrer a vaporização, seja parcial ou total?



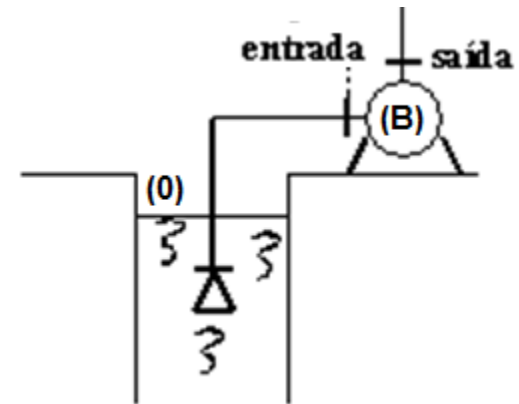
Simplesmente diminuindo a pressão. Com a diminuição da pressão, podemos chegar a um valor de pressão onde observamos o início da transformação de líquido para vapor (pressão de vapor).



E aonde pode ocorrer esta pressão tão baixa?



Inicialmente se pensava ser na entrada da bomba.





Aplicando a equação da energia do nível (0) até a entrada da bomba, temos:

$$H_0 = H_e + H_{p_{aB}}$$

$$z_o + \frac{p_o}{\gamma} + \frac{v_o^2}{2g} = z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{v_e^2}{2g} + H_{p_{aB}}$$

$$H_{p_{aB}} = f_{aB} \times \frac{(L + \sum Leq)_{aB}}{D_{H_{aB}}} \times \frac{Q^2}{2g \times A_{aB}^2}$$

$$0 = z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{v_e^2}{2g} + H_{p_{aB}}$$

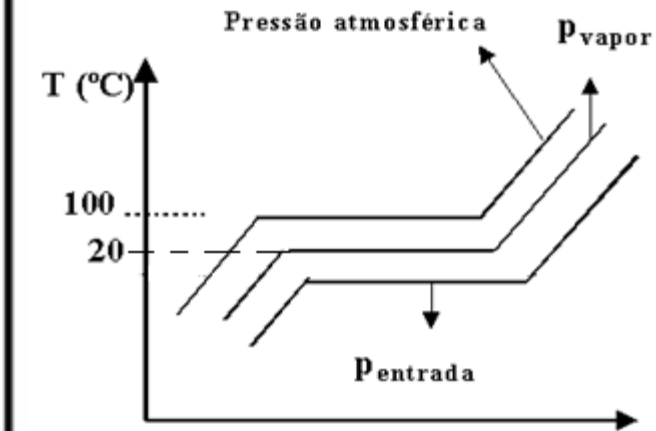
$$\therefore p_e = -\gamma \left[z_e + \frac{v_e^2}{2g} + H_{p_{aB}} \right]$$

$$p_{e_{abs}} = p_e + p_{atm_{local}}$$

Importante observar que só temos a expressão anterior se o PHR for adotado no nível de captação, se o escoamento ocorrer em regime permanente e se for considerada a escala efetiva, certo?

Isso mesmo!





Supondo que a p_{e_abs} é menor ou igual a p_{vapor} , afirmamos que ocorre o início do fenômeno de cavitação.



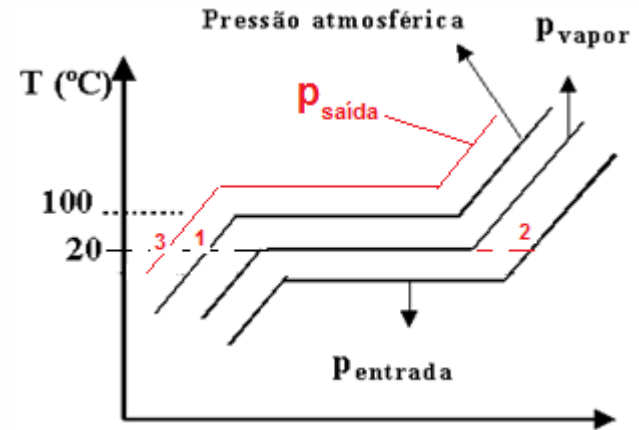
O fluido bombeado é a água a 20°C ?

Exatamente!

Como já vimos:
cavitar na entrada
é ter a
supercavitação!



Na seção de saída a
pressão é maior que a
pressão atmosférica e o
que era vapor se
condensa completando
o fenômeno de
cavitação!



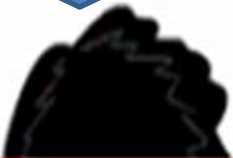
1 = líquido subresfriado
2 = vapor superaquecido
3 = líquido subresfriado

Ocorre a liberação
de calor!

O
rendimento
caí!

Surgem as vibrações!

O tempo vida
da bomba é
reduzido!



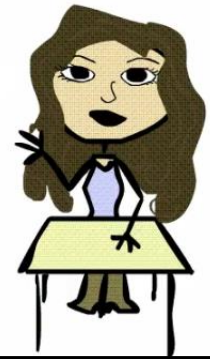
Se estiver cavitando (supercavitando) e desejarmos eliminar esse fenômeno, devemos aumentar a pressão na entrada da bomba.



$$p_e = -\gamma \left[z_e + \frac{v_e^2}{2g} + H_{p_{aB}} \right]$$
$$H_{p_{aB}} = f_{aB} \times \frac{(L + \sum Leq)_{aB}}{D_{H_{aB}}} \times \frac{Q^2}{2g \times A_{aB}^2}$$

E nesse sentido, devemos:

1. Diminuir a cota da entrada, ou até torná-la negativa (bomba afogada)
2. Adotar para a tubulação antes da bomba um diâmetro imediatamente superior ao dimensionado para o recalque.



3. Ter o comprimento da tubulação antes da bomba o menor possível.
4. Utilizar antes da bomba as singularidades estritamente necessárias.

Infelizmente a condição da $p_{ent_abs} > p_{vapor}$ não é condição suficiente para não se ter o fenômeno da cavitação.



Condição necessária e suficiente para não se ter a cavitação será:



$$NPSH_{\text{disponível}} - NPSH_{\text{requerido}} > 0$$

$$NPSH_{\text{requerido}} = H_{\text{entrada}_{\text{abs}}} - \frac{P_{\text{vapor}}}{\gamma}$$

$NPSH_{\text{requerido}}$ → fornecido pelo fabricante

$$NPSH_{\text{disponível}} = H_{\text{inicial}_{\text{abs}}} - H_{P_{\text{aB}}} - \frac{P_{\text{vapor}}}{\gamma}$$

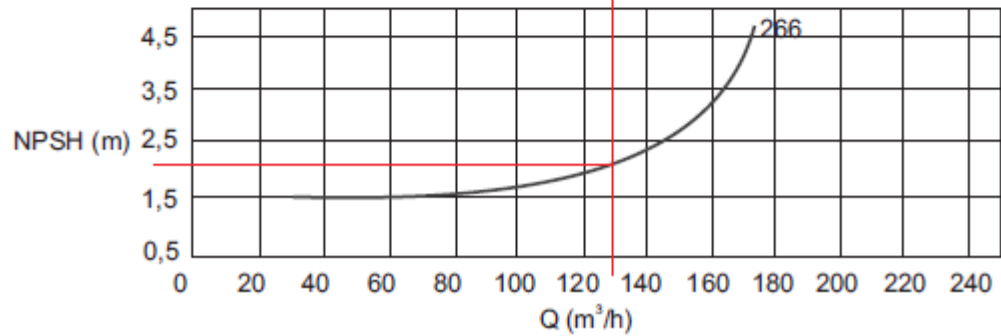
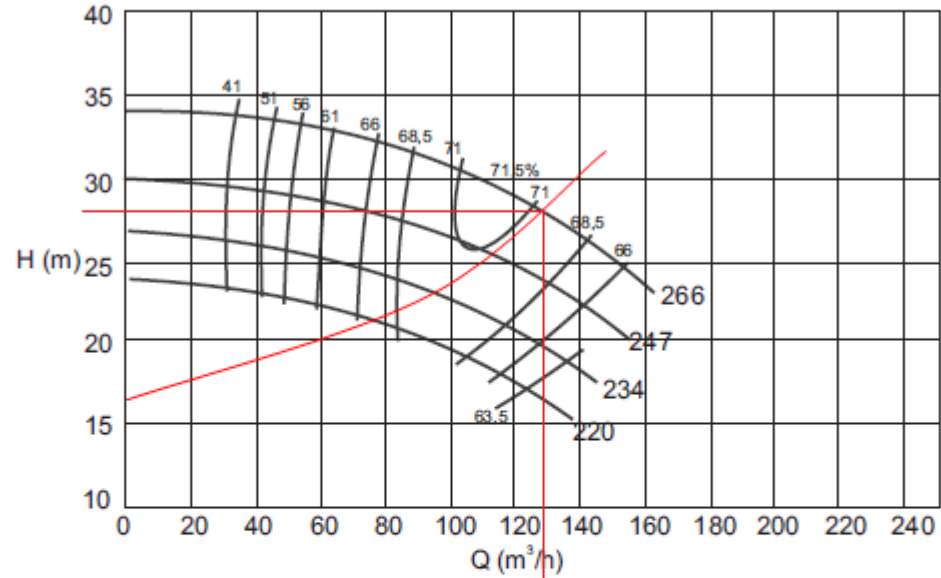
$H_{P_{\text{aB}}}$ → calculada com a Q_{τ}

$$H_{\text{inicial}_{\text{abs}}} = Z_{\text{inicial}} + \frac{P_{\text{inicial}_{\text{abs}}}}{\gamma} + \frac{y_i \times \alpha_i \times Q^2}{2g \times A_{\text{inicial}}^2}$$

Z_{inicial} → obtido com o PHR no eixo da bomba

O $NPSH_{\text{req}}$ é obtido no ponto de trabalho.

KSB Meganorm 80 - 250 - IV pólus (1750 rpm)



$NPSH_{\text{disponível}} - NPSH_{\text{requerido}} = \text{reserva contra cavitação}$

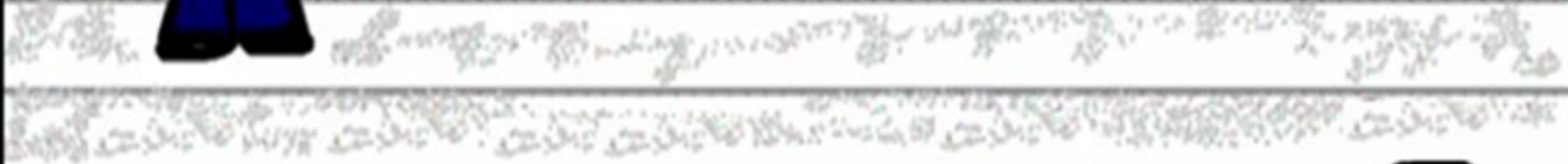


A reserva contra cavitação é fundamental para a escolha da bomba!

Gostaria de ver um exemplo de cálculo ligado a esse assunto!



Atendo a pedido, o próximo slide introduz um exemplo ligado a verificação do fenômeno de cavitação.

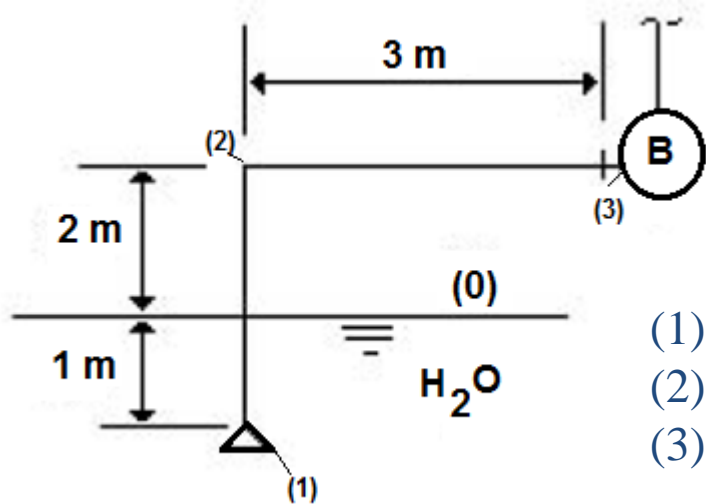


O desenho abaixo representa a tubulação de sucção de uma instalação de bombeamento. Calcule o $NPSH_{\text{disponível}}$.

São Dados:

$$p_v = 0,0429 \text{ kgf} / \text{cm}^2 \rightarrow (\text{abs}) \rightarrow 30^\circ \text{ C} \rightarrow Q = 16 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$p_{\text{atm}} = 695 \text{ mm Hg} ; f_{\text{sucção}} = 0,0211 \text{ e } \varnothing \text{ nominal de sucção} = 3'' - \text{Sch 40}$$



(1) - válvula de poço - $L_{\text{eq}} = 32 \text{ m}$

(2) - joelho fêmea - $L_{\text{eq}} = 2,82 \text{ m}$

(3) - estreitamento de 3 x 2,5 - $L_{\text{eq}} = 0,53 \text{ m}$

$$\text{NPSH}_{\text{disponível}} = z_0 + \frac{p_{0_{\text{abs}}} - p_{\text{vapor}}}{\gamma} - H_{p_{aB}}$$

$$\text{NPSH}_{\text{disponível}} = -2 + \frac{92659,05 - 4207,053}{995,7 \times 9,8} - 0,0211 \times \frac{(6 + 35,35)}{0,0779} \times \frac{\left(\frac{16}{3600}\right)^2}{19,6 \times (47,7 \times 10^{-4})^2}$$

$$\text{NPSH}_{\text{disponível}} = 6,5\text{m}$$



Não esquecer de adotar o PHR no eixo da bomba e de trabalhar na escala absoluta.

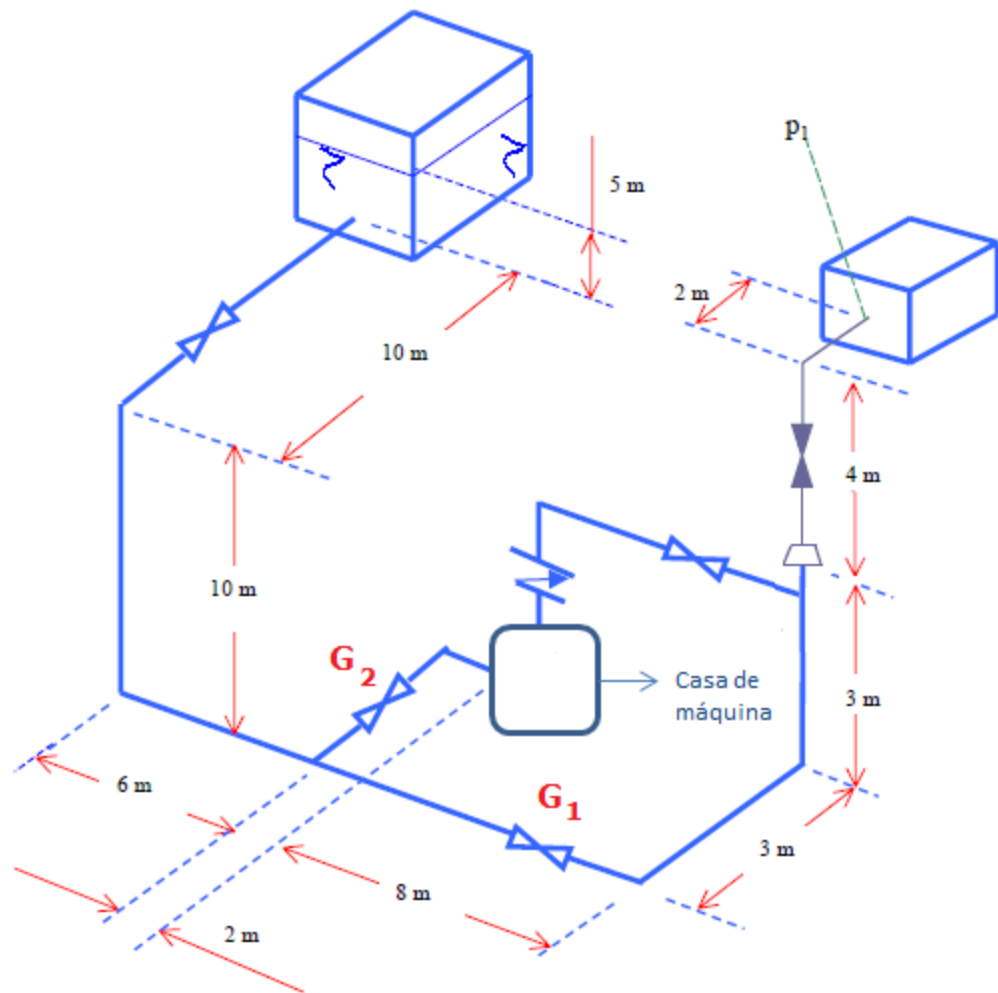


Vamos fazer mais um exercício!



7.12.15 A instalação da figura deve atender um tanque de processo e a pressão na entrada deste tanque (1) deve ser $p_1 = 1,5 \text{ kgf / cm}^2$, se o escoamento for por gravidade (G_2 - fechada). A bomba H 50 - C com diâmetro de rotor igual a 214 mm será acionada sempre que o processo exigir uma pressão $p_1 = 3,5 \text{ kgf/cm}^2$ (G_1 - fechada). Pede-se:

- a equação da CCI para as duas possibilidades mencionadas acima;
- o ponto de trabalho para as possibilidades de funcionamento da instalação



Nota: **—** = 3" Sch 40

— = 2" Sch 40

Notas:

1ª - A tabela I fornece os valores para a construção das seguintes curvas características para o diâmetro do rotor igual a 185 mm.

$Q \left(\frac{m^3}{h} \right)$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$H_B (m)$	24	23,5	23	22,5	22	21,5	21	20,5	19	17	15
$\eta_B (\%)$	-	-	32,5	45	55	61,25	66	69	67,5	63	57,5

Tabela I

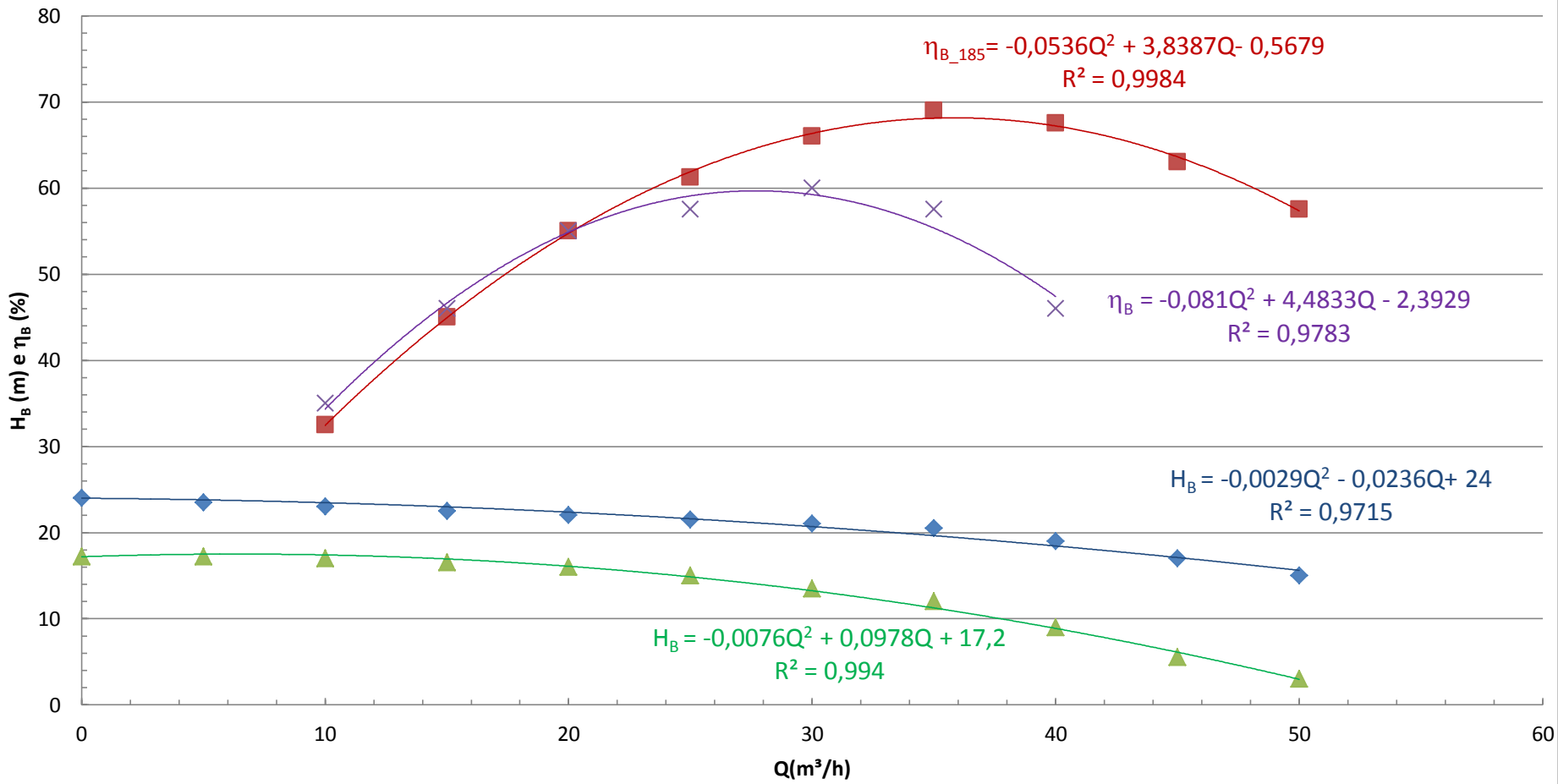
Considere a água a 22°C
e a rugosidade do aço
igual a 4,6 e-5 m

2ª - A tabela II fornece os valores para a construção das seguintes curvas características para o diâmetro do rotor igual a 214 mm.

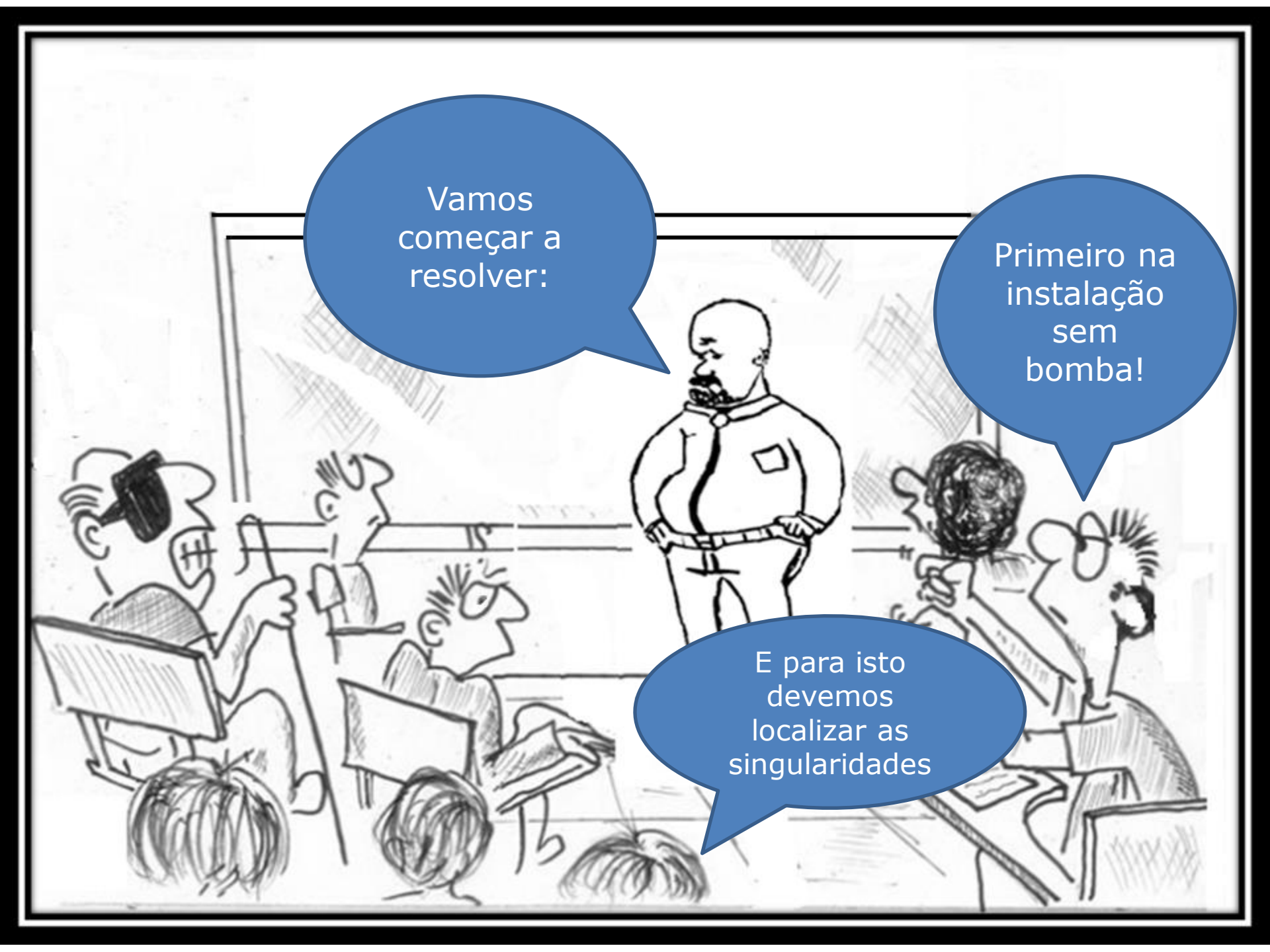
$Q \left(\frac{m^3}{h} \right)$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$H_B (m)$	17,2	17,2	17	16,5	16	15	13,5	12	9	5,5	3
$\eta_B (\%)$	-	-	35	46	55	57,5	60	57,5	46	-	-

Tabela II

$H_B = f(Q)$ e $\eta_B = f(Q)$



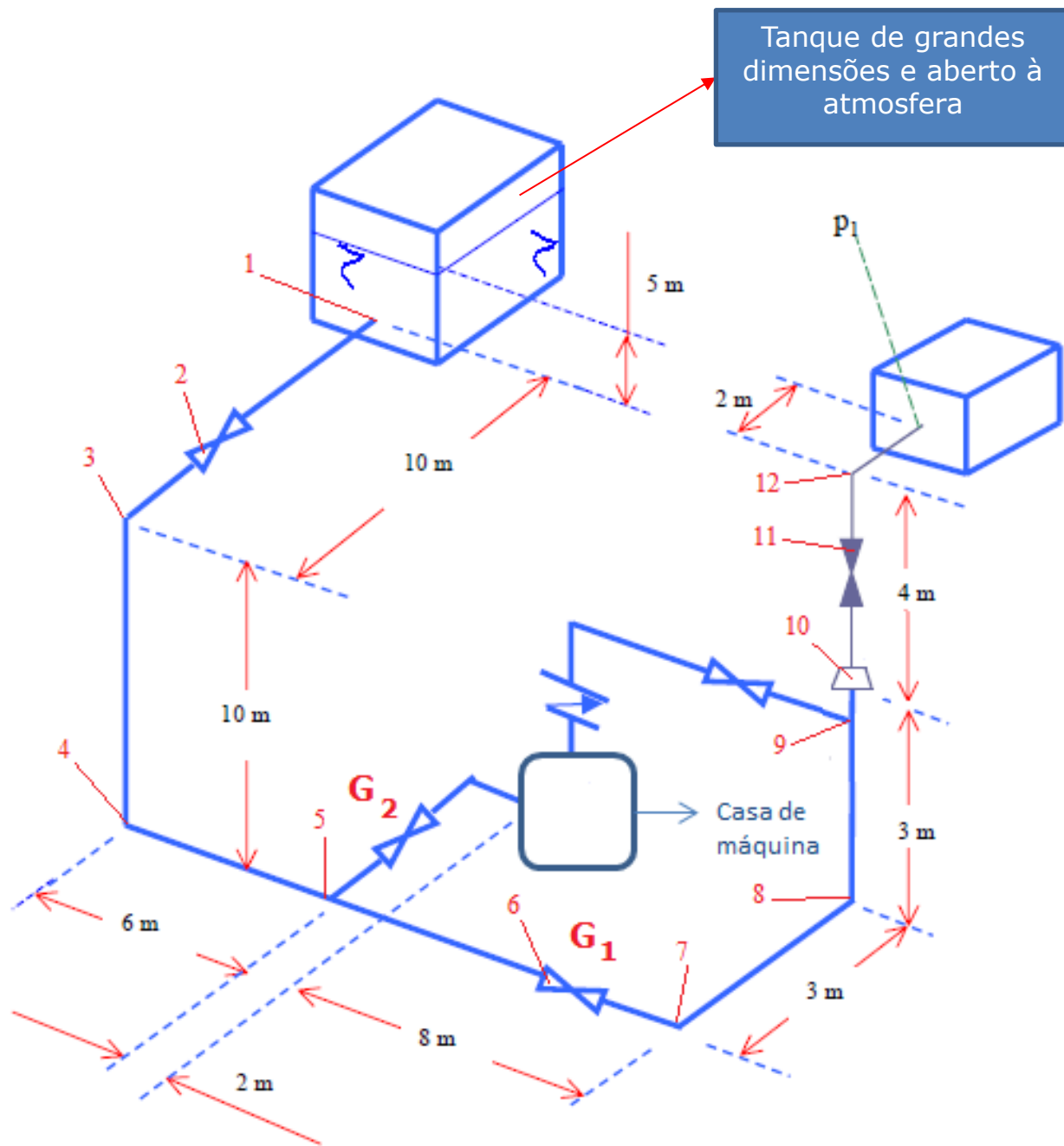
- ◆ HB185 (m)
- rend_185
- ▲ CCB_214
- × rend_214
- Polinômio (HB185 (m))
- Polinômio (rend_185)
- Polinômio (CCB_214)
- Polinômio (rend_214)



Vamos
começar a
resolver:


Primeiro na
instalação
sem
bomba!

E para isto
devemos
localizar as
singularidades



Número	Singularidade
1	Saída normal de reservatório
2	Válvula gaveta
3	Joelho fêmea de 90°
4	Joelho fêmea de 90°
5	Tê de passagem direta
6	Válvula gaveta
7	Joelho fêmea de 90°
8	Joelho fêmea de 90°
9	Tê de passagem direta
10	Redução de 3 para 2"
11	Válvula globo reta sem guia
12	Joelho fêmea de 90°

Número	Singularidade	Leq (m)	Referência	D _N	Dint (mm)	A (cm ²)
1	Saída normal de reservatório	1,1	Tupy	3"	77,9	47,7
2	Válvula gaveta	1,03	Mipel	3"	77,9	47,7
3	Joelho fêmea de 90 ⁰	2,82	Tupy	3"	77,9	47,7
4	Joelho fêmea de 90 ⁰	2,82	Tupy	3"	77,9	47,7
5	Tê de passagem direta	0,50	Tupy	3"	77,9	47,7
6	Válvula gaveta	1,03	Mipel	3"	77,9	47,7
7	Joelho fêmea de 90 ⁰	2,82	Tupy	3"	77,9	47,7
8	Joelho fêmea de 90 ⁰	2,82	Tupy	3"	77,9	47,7
9	Tê de passagem direta	0,50	Tupy	3"	77,9	47,7
10	Redução de 3 para 2"	0,70	Tupy	2"	52,5	21,7
11	Válvula globo reta sem guia	17,68	Mipel	2"	52,5	21,7
12	Joelho fêmea de 90 ⁰	1,88	Tupy	2"	52,5	21,7

A black and white cartoon illustration of a lecture hall. A lecturer with a beard and a bow tie stands at the front, looking towards the students. Several students are seated at desks, some holding papers or books. One student on the right is wearing sunglasses. The scene is framed by a simple border.

Como as uniões tem comprimentos equivalentes muito pequenos ($0,01\text{ m}$), poderíamos até desprezá-las, mas vamos considerar a existência de 1 apenas.

Eta
precisão!

Situação 1 = válvula 2 fechada e a 1 aberta

$$H_{\text{estática}} = (7 - 15) + \left(\frac{1,5 \times 10^4 \times 9,8 - 0}{997,8 \times 9,8} \right)$$

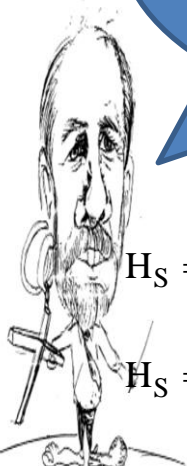
$$H_{\text{estática}} \cong 7,1\text{m}$$

Como a carga estática deu positiva, podemos afirmar que não existe o escoamento em queda livre.

A equação abaixo mostra a equação da CCI supondo instalação sem bomba (válvula G₂ fechada).

$$H_S = 7,1 + \frac{Q^2}{19,6 \times (21,7 \times 10^{-4})^2} + f_{3''} \times \frac{(42 + 15,45)}{0,0779} \times \frac{Q^2}{19,6 \times (47,7 \times 10^{-4})^2} + f_{2''} \times \frac{(6 + 20,26)}{0,0525} \times \frac{Q^2}{19,6 \times (21,7 \times 10^{-4})^2}$$

$$H_S = 7,1 + 10834,9 \times Q^2 + f_{3''} \times 1653711,5 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2$$





Supondo que seja viável fechar o reservatório de captação e sobre o nível d'água impor uma pressão inicial (p_i) através da injeção de um ar comprimido, pede-se determinar o valor da pressão inicial para se ter uma vazão de queda livre igual a $25 \text{ m}^3/\text{h}$.

Neste caso, teremos alteração da carga estática.

Exatamente.



$$H_{\text{estática}} = (7 - 15) + \left(\frac{1,5 \times 10^4 \times 9,8 - p_i}{997,8 \times 9,8} \right)$$

$$H_{\text{estática}} \cong 7,1 - \frac{p_i}{997,8 \times 9,8}$$

$$H_S = 7,1 - \frac{p_i}{9778,44} + 10834,9 \times Q^2 + f_{3''} \times 1653711,5 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2$$

No caso de existir a vazão de queda livre temos $H_s = 0$

$$0 = 7,1 - \frac{P_i}{9778,44} + 10834,9 \times Q^2 + f_{3''} \times 1653711,5 \times Q^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times Q^2$$

$$\frac{P_i}{9778,44} = 7,1 + 10834,9 \times \left(\frac{25}{3600}\right)^2 + f_{3''} \times 1653711,5 \times \left(\frac{25}{3600}\right)^2 + f_{2''} \times 5419508,3 \times \left(\frac{25}{3600}\right)^2$$

$$\frac{P_i}{9778,44} = 7,622516397 + f_{3''} \times 79,75074749 + f_{2''} \times 261,3574605$$

Portanto, devemos calcular $f_{2''}$ e $f_{3''}$



propriedades do fluido transportado

temp (°C)		μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	pv (Pa)	v (m ² /s)
22		9,55E-04	997,8		9,570E-07

propriedades do local

g = m/s²
 patm = Pa

mat. tubo
aço

espesura	Dint (mm)	A (cm ²)
	52,5	21,7

K(m)	DH/k
4,60E-05	1141

Legenda

- deve ser preenchida
- será calculada
- preenchimento opcional
- copiado de outra planilha



Este é o f₂''

Q Q(m³/s) Q(L/s) Q(L/min)
 deve transformar para m³/h
 m³/h
 25,0

Q(m ³ /h)	v(m/s)	Re	f _{Haaland}	f _{Swamee e Jain}	f _{Churchill}	f _{planilha}
25,0	3,20	175560	0,0205	0,0209	0,0209	0,0207

propriedades do fluido transportado

temp (°C)		μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	pv (Pa)	v (m ² /s)
22		9,55E-04	997,8		9,570E-07

propriedades do local

g = m/s²
 patm = Pa

mat. tubo
aço

espessura	Dint (mm)	A (cm ²)
	77,9	47,7

K(m)	DH/k
4,60E-05	1693

Legenda

- deve ser preenchida
- será calculada
- preenchimento opcional
- copiado de outra planilha



Este é o f₃"

Q (L/min)
 Q (m³/s) Q (L/s))
 deve transformar para
 m³/h
 25,0

Q(m ³ /h)	v(m/s)	Re	f _{Haaland}	f _{Swamee e Jain}	f _{Churchill}	f _{planilha}
25,0	1,46	118507	0,0200	0,0204	0,0204	0,0203

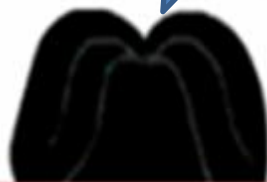
Tendo os coeficientes de perda de carga distribuída, temos



$$\frac{P_i}{9778,44} = 7,622516397 + 0,0204 \times 79,75074749 + 0,0209 \times 261,3574605$$

$$\therefore p_i \cong 143858,5\text{Pa} \approx 143,9\text{kPa}$$

Com esta pressão a carga estática fica negativa?



Exatamente



$$H_{\text{estática}} = (7 - 15) + \left(\frac{1,5 \times 10^4 \times 9,8 - 143858,5}{997,8 \times 9,8} \right)$$

$$H_{\text{estática}} \cong -7,7\text{m}$$

E com a carga
estática negativa,
temos a vazão de
queda livre

