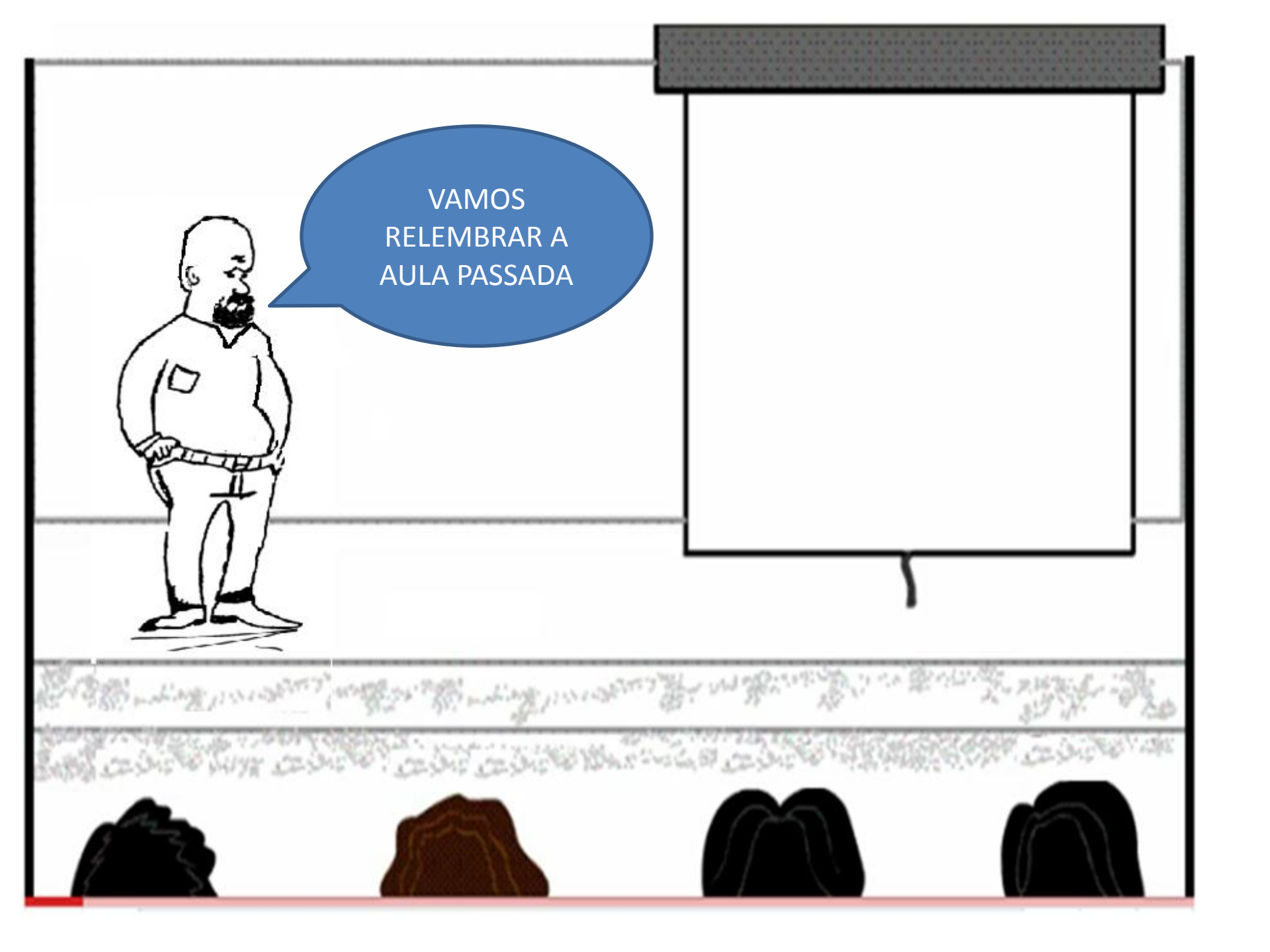


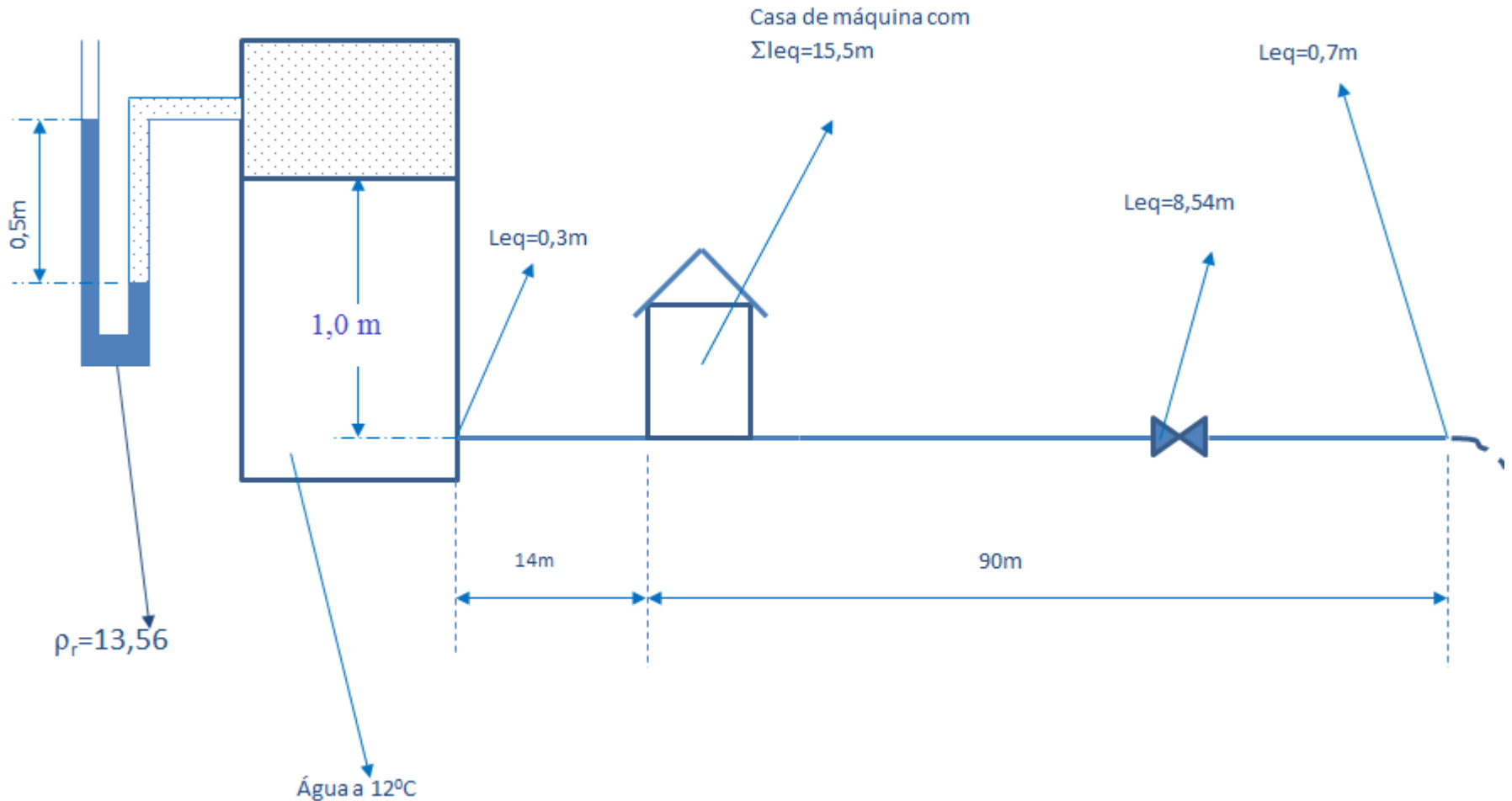
# Aula 5 de teoria de ME5330

Segundo semestre de 2012



VAMOS  
RELEMBRAR A  
AULA PASSADA

Para a instalação hidráulica abaixo, que tem um único diâmetro, que é de aço 40 com  $D_N = 1''$ , pede-se escrever a equação da CCI, obter sua representação gráfica e, se existir, obter a vazão de queda livre.



$$H_s = -7,8 + 164449,9 \times \alpha \times Q^2 + f \times 797767346,2 \times Q^2$$

A equação acima foi obtida através da equação da energia. Atribuindo valores para a vazão nós chegamos a vazão de queda livre: 0,578 L/s.

Desejando a vazão de 3 L/s nós partimos para escolha da bomba.

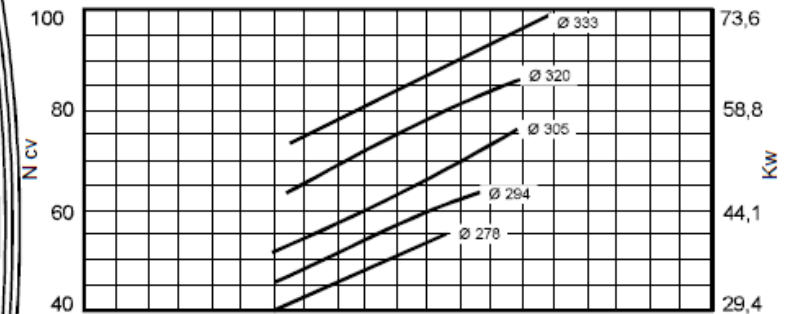
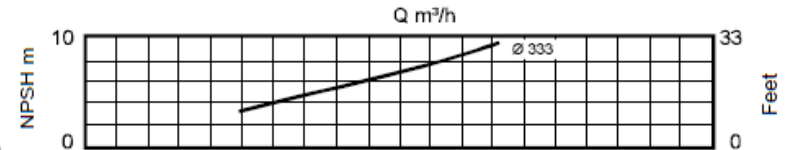
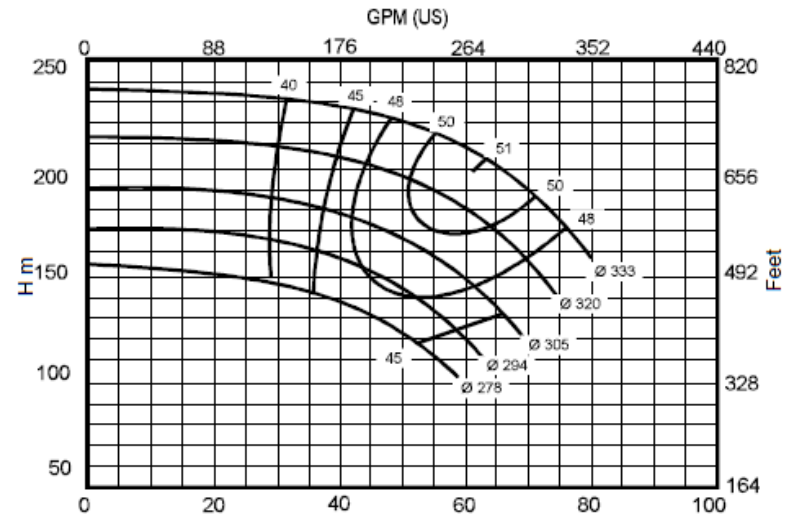




Inicialmente  
escolhemos a bomba  
INI 40-315 e em  
seguida o diâmetro  
do rotor.

## INI 40-315

3500 rpm

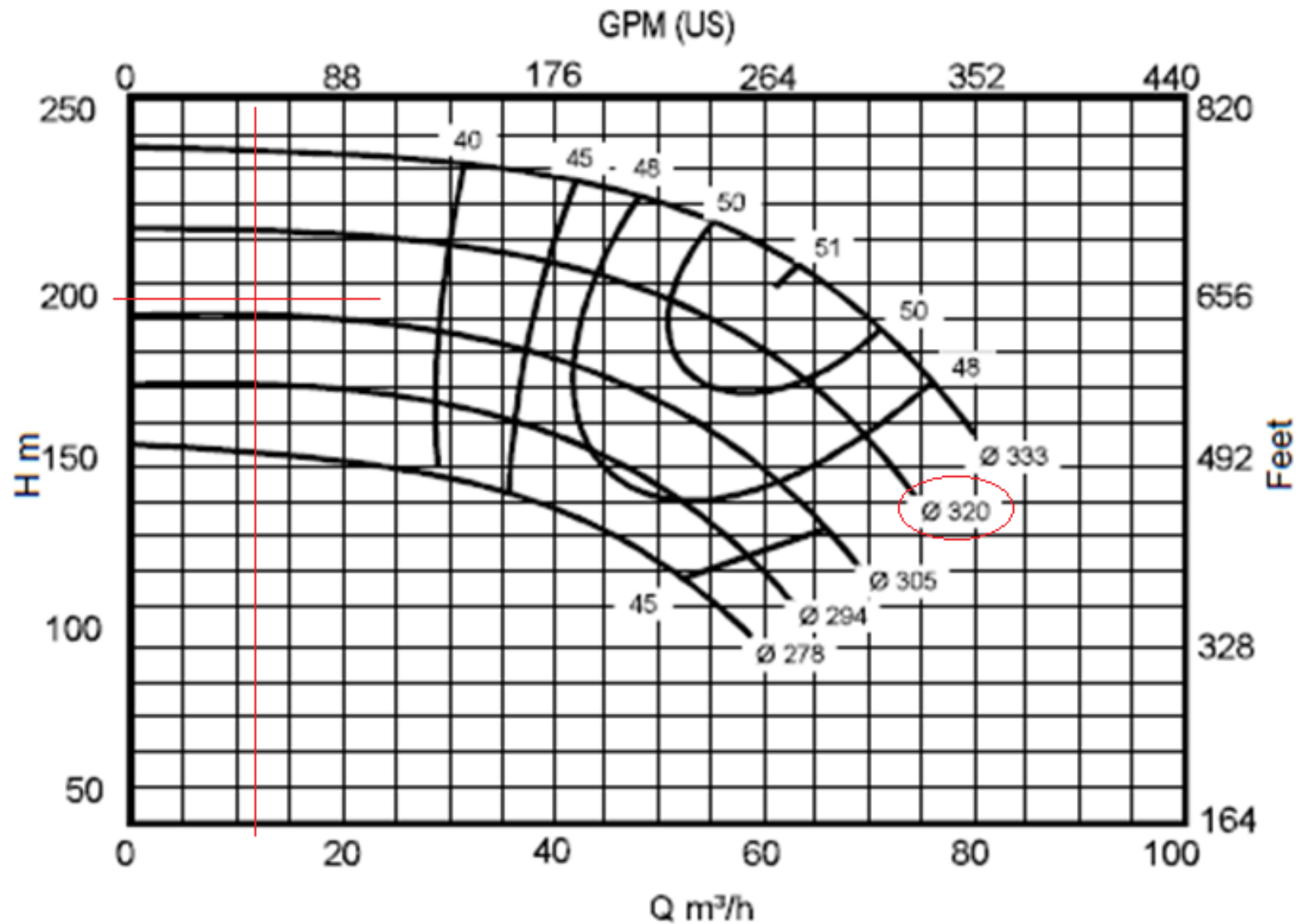


**Rotor Ø Máximo 333 mm**  
Rotor Ø Mínimo 278 mm  
Largura do Rotor 9 mm  
Viscosidade  $\mu = 1\text{cP}$

**Flange de Sucção 65 mm**  
Flange de Pressão 40 mm  
Peso Específico  $\gamma = 1\text{kgf/dm}^3$

**INI 40-315**

**3500 rpm**



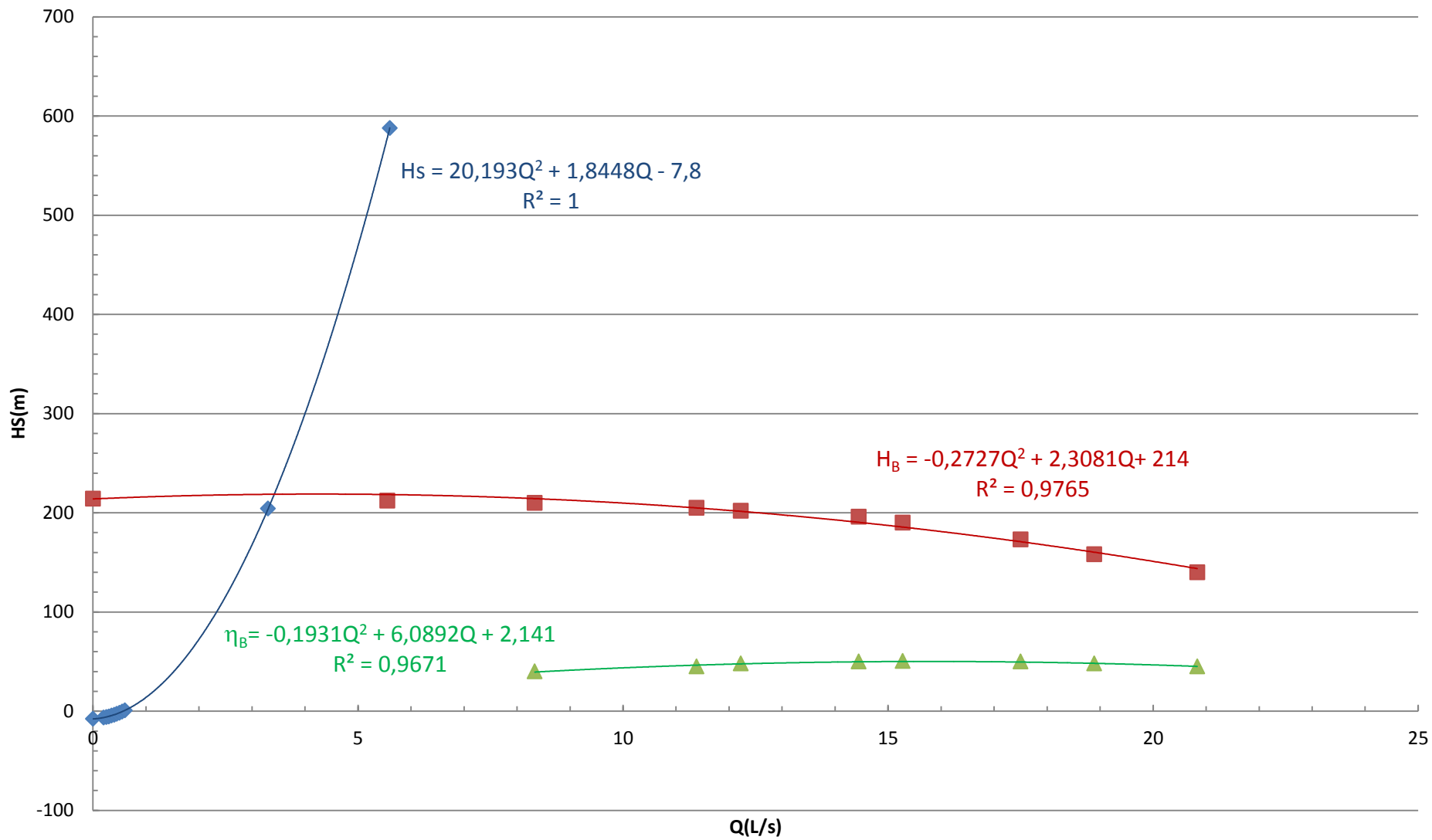
Lendo a CCB para diâmetro do rotor igual a 320 mm,  
temos:

CCB			
Q(m <sup>3</sup> /h)	Q(L/s)	H <sub>B</sub> (m)	η <sub>B</sub> (%)
0	0	214	
20	5,6	212	
30	8,3	210	40
41	11,4	205	45
44	12,2	202	48
52	14,4	196	50
55	15,3	190	50,5
63	17,5	173	50
68	18,9	158	48
75	20,8	140	45

# CCI para o intervalo adequado de vazões

Q (L/s)	f	Re	$\alpha$	Hs(m)
0				-7,8
0,2	0,0359	7727	1	-6,6
0,25	0,0341	9659	1	-6,1
0,3	0,0328	11591	1	-5,4
0,35	0,0318	13523	1	-4,7
0,4	0,031	15455	1	-3,8
0,45	0,0303	17387	1	-2,9
0,5	0,0298	19319	1	-1,8
0,55	0,0293	21251	1	-0,679
0,6	0,0289	23182	1	0,559
3,3	0,0242	127503	`1	204,2
5,6	0,0236	216369	`1	587,8





◆ Hs(m)   
 ■ CCB   
 ▲ rendimento   
 — Polinômio (Hs(m))   
 — Polinômio (CCB)   
 — Polinômio (rendimento)

## Determinação do ponto de trabalho:

$$H_S = 20,193Q^2 + 1,8448Q - 7,8$$

$$H_B = -0,2727Q^2 + 2,3081Q + 214$$

$$\text{Ponto de trabalho: } H_S = H_B$$

$$20,193Q^2 + 1,8448Q - 7,8 = -0,2727Q^2 + 2,3081Q + 214$$

$$20,4657Q^2 - 0,4633Q - 221,8 = 0$$

$$Q_\tau = \frac{0,4633 + \sqrt{0,4633^2 + 4 \times 20,4657 \times 221,8}}{2 \times 20,4657} \cong 3,3 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$H_{B\tau} = -0,2727 \times 3,3^2 + 2,3081 \times 3,3 + 214 \cong 218,6 \text{m}$$

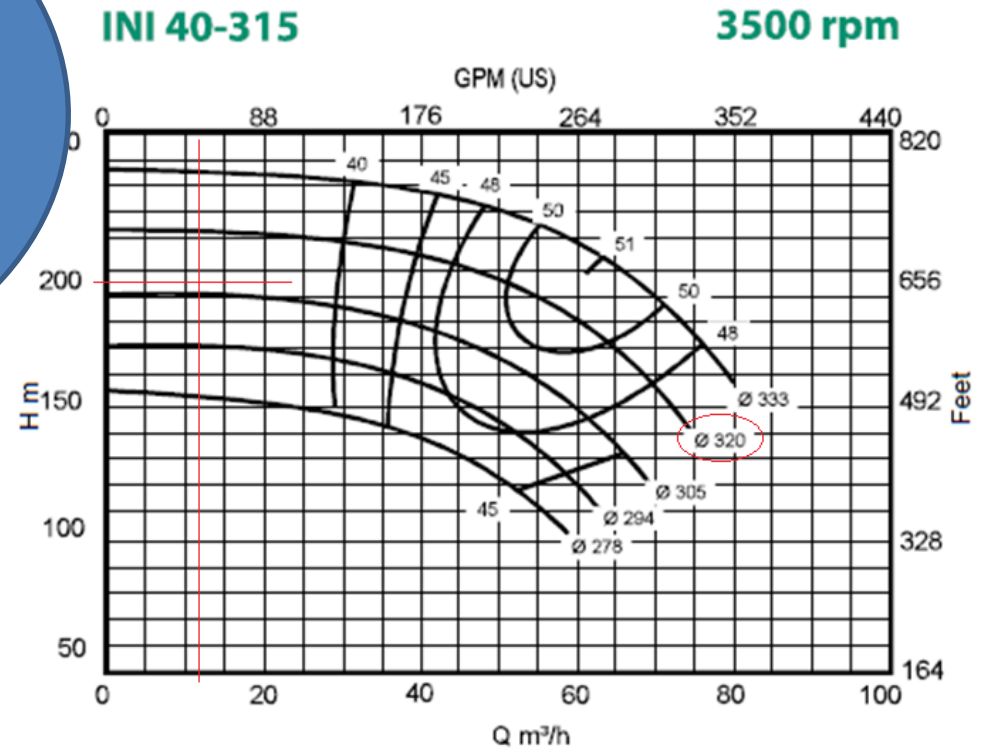
$$\eta_{B\tau} = -0,1931 \times 3,3^2 + 6,0892 \times 3,3 + 2,141 \cong 20,1\%$$

$$N_{B\tau} = \frac{999,5 \times 9,8 \times (3,3 \times 10^{-3}) \times 218,6}{0,201} \cong 35154,2 \text{W} \approx 35,2 \text{kW}$$



# Refletindo sobre a CCB

Consideramos  
a vazão do  
ponto de  
rendimento  
máximo.



CCB			
Q(m <sup>3</sup> /h)	Q(L/s)	H <sub>B</sub> (m)	η <sub>B</sub> (%)
0	0	214	
20	5,6	212	
30	8,3	210	40
41	11,4	205	45
44	12,2	202	48
52	14,4	196	50
55	15,3	190	50,5
63	17,5	173	50
68	18,9	158	48
75	20,8	140	45

Portanto para o rendimento máximo de 50,5%, teríamos uma vazão de 15,3 L/s.

Poderíamos considerar a faixa de trabalho:

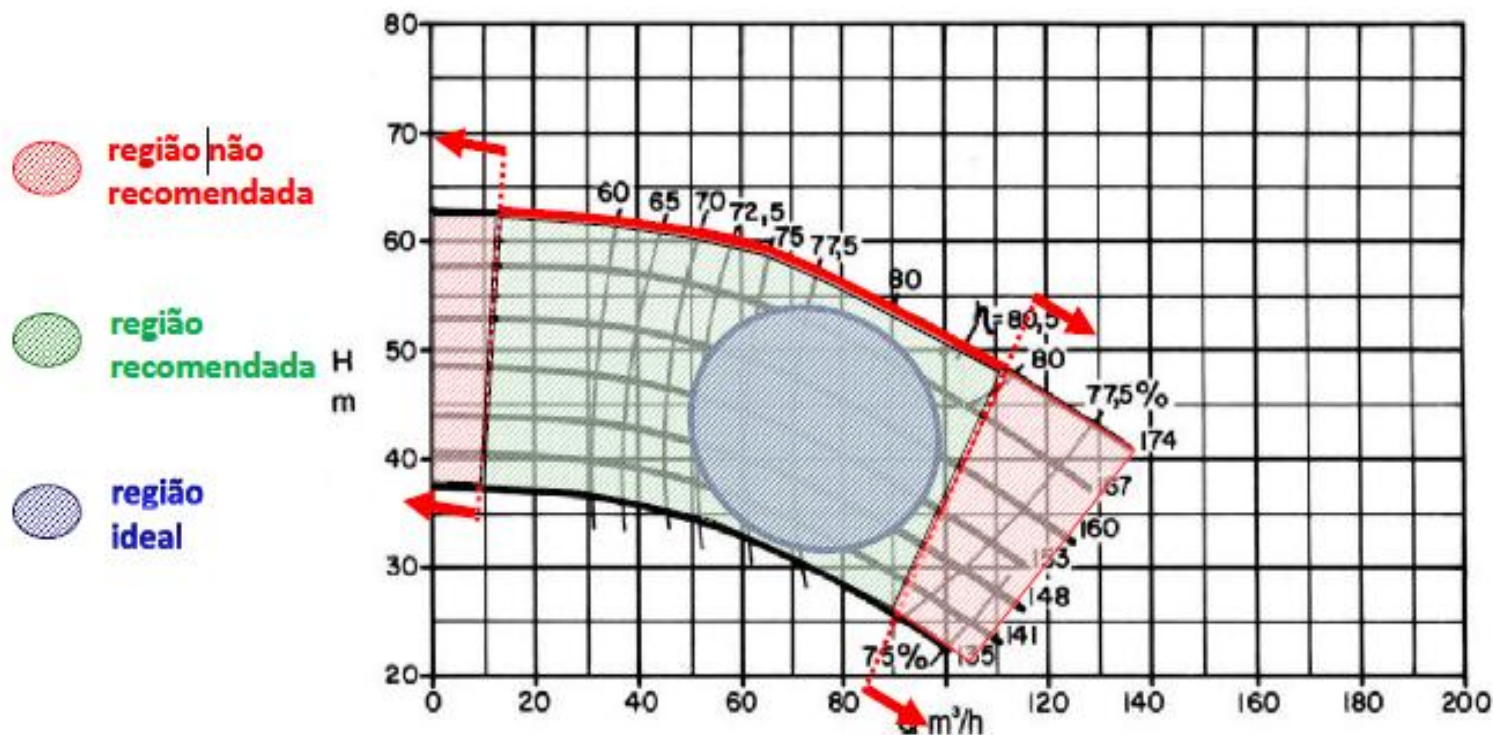
$$0,5 * Q_{\eta B_{\text{máx}}} \leq Q \leq 1,2 * Q_{\eta B_{\text{máx}}}$$

No caso de vazões inferiores a  $0,5 * Q_{\eta B_{\text{máx}}}$  existem os problemas causados pela **recirculação** (na verdade a recirculação inicia com 70% da vazão do rendimento máximo) e acima de  $1,2 * Q_{\eta B_{\text{máx}}}$  **maior probabilidade de ocorrer o fenômeno de cavitação.**





# CUIDADOS NA SELEÇÃO



HYDRAULIC INSTITUTE – qualquer ponto dentro da região recomendada

API 610 10ª ed. – faixa compreendida entre 0,7 e 1,2 da Qoptima



**NO CASO DO  
EXERCÍCIO:**

$$0,5 \times 15,3 \leq Q \leq 1,2 \times 15,3$$

$$\therefore 7,65 \leq Q \leq 18,36 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

**No exercício  
estamos tendo  
a recirculação!**

**O que  
fazer?!**

**Trocar a  
bomba?**



Antes de pensar em trocar a bomba, vamos analisar a velocidade de escoamento.

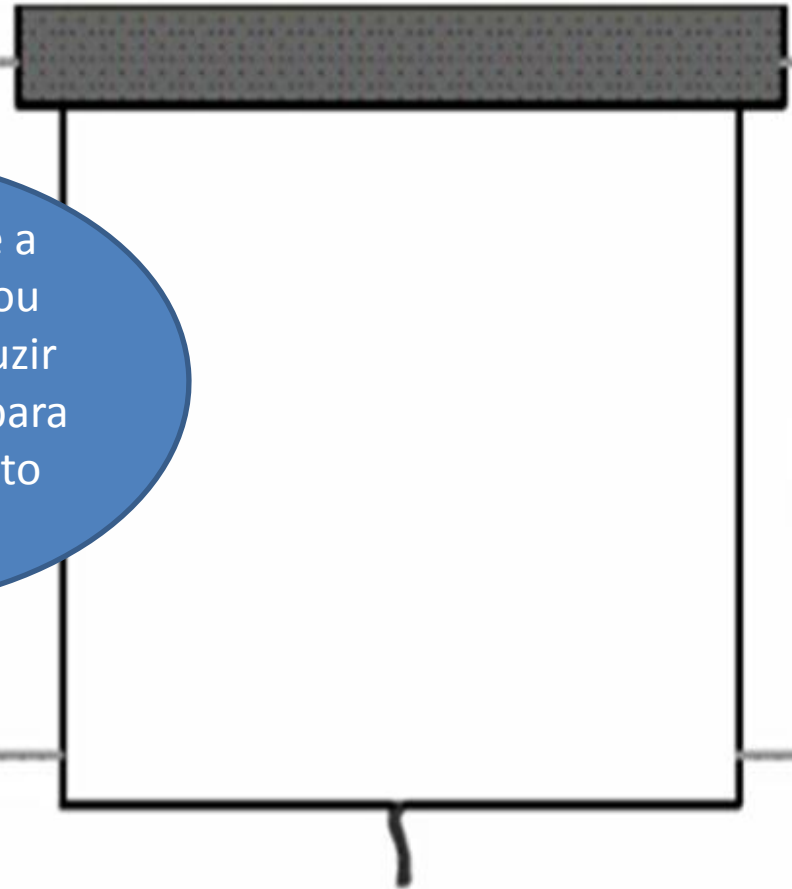
$$Q = v \times A \therefore v = \frac{Q}{A} = \frac{3,3 \times 10^{-3}}{5,57 \times 10^{-4}}$$
$$v \cong 5,4 \text{ m/s}$$

Será que esta velocidade é alta?





Para responder se a  
velocidade é alta ou  
não, vamos introduzir  
os procedimentos para  
o dimensionamento  
das tubulações



# Dimensionamento da tubulação

Em função do fluido a ser transportado e da sua temperatura de escoamento, procura-se estabelecer o material da tubulação e desta forma fixar a norma que a rege, exemplo: aço regido pela norma ANSI B3610.

Apresento a no próximo slide uma tabela que pode nos auxiliar tanto na escolha do material como na especificação dos seus diâmetros (de referência, nominal, externo e interno), porém deixo claro que:

- 1 → dependendo da aplicação, considera-se outros fatores;
- 2 → os tubos de PVC hoje ganham espaço nas aplicações industriais;
- 3 → o objetivo deste trabalho é ser uma referência bibliográfica básica, o que equivale dizer que outras fontes devem ser consultadas;
- 4 → a tabela além do material mais usado para a fabricação do tubo, fornece também a faixa de velocidade, ou a velocidade recomendada, que é denominada de velocidade econômica.

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
Bombas:		
- linha de sucção	0,9 a 2,2	aço
- linha de recalque	2,1 a 3,0	aço
Ácido clorídrico	1,5	rev. de borracha
Ácido sulfúrico 88 a 98%	1,2	F° F°
Amoníaco	1,8	aço
Benzeno	1,8	aço
Cloro	1,5	aço
FLUIDO (líquido)	Velocidade econômica (m/s)	Material da Tubulação
Clorofórmio	1,8	cobre e aço
Hidróxido de sódio		
- solução até 30%	1,8	aço
- solução de 30 a 50%	1,5	aço
- solução de 50 a 73%	1,2	aço
Óleo lubrificante	1,8	aço
Óleo combustível	1,8	aço
Salmoura (CaCl <sub>2</sub> )	1,2	aço
Tetracloro de Carbono	1,8	aço
Tricloro etileno	1,8	aço



Após o preestabelecimento do material e da velocidade econômica, calculamos o diâmetro de referência da tubulação após a bomba.

$$D_{\text{referência}} = D_{\text{ref}}$$

$$Q = v \times A \therefore A = \frac{Q}{v}$$

Considerando tubo circular e forçado:

$$\frac{\pi \times D_{\text{ref}}^2}{4} = \frac{Q}{v}$$

$$\therefore D_{\text{ref}} = \left[ \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times v}} \right] \times 1000, \text{ onde:}$$

$$[D_{\text{ref}}] \rightarrow \text{mm}; [Q] \rightarrow \text{m}^3/\text{s};$$

$$[v] = \text{m/s}$$

E antes da bomba, como fica?



Adota-se um diâmetro imediatamente superior para a tubulação antes da bomba.

$$D_{\text{referência}} = D_{\text{ref}}$$

$$Q = v \times A \therefore A = \frac{Q}{v}$$

Considerando tubo circular e forçado :

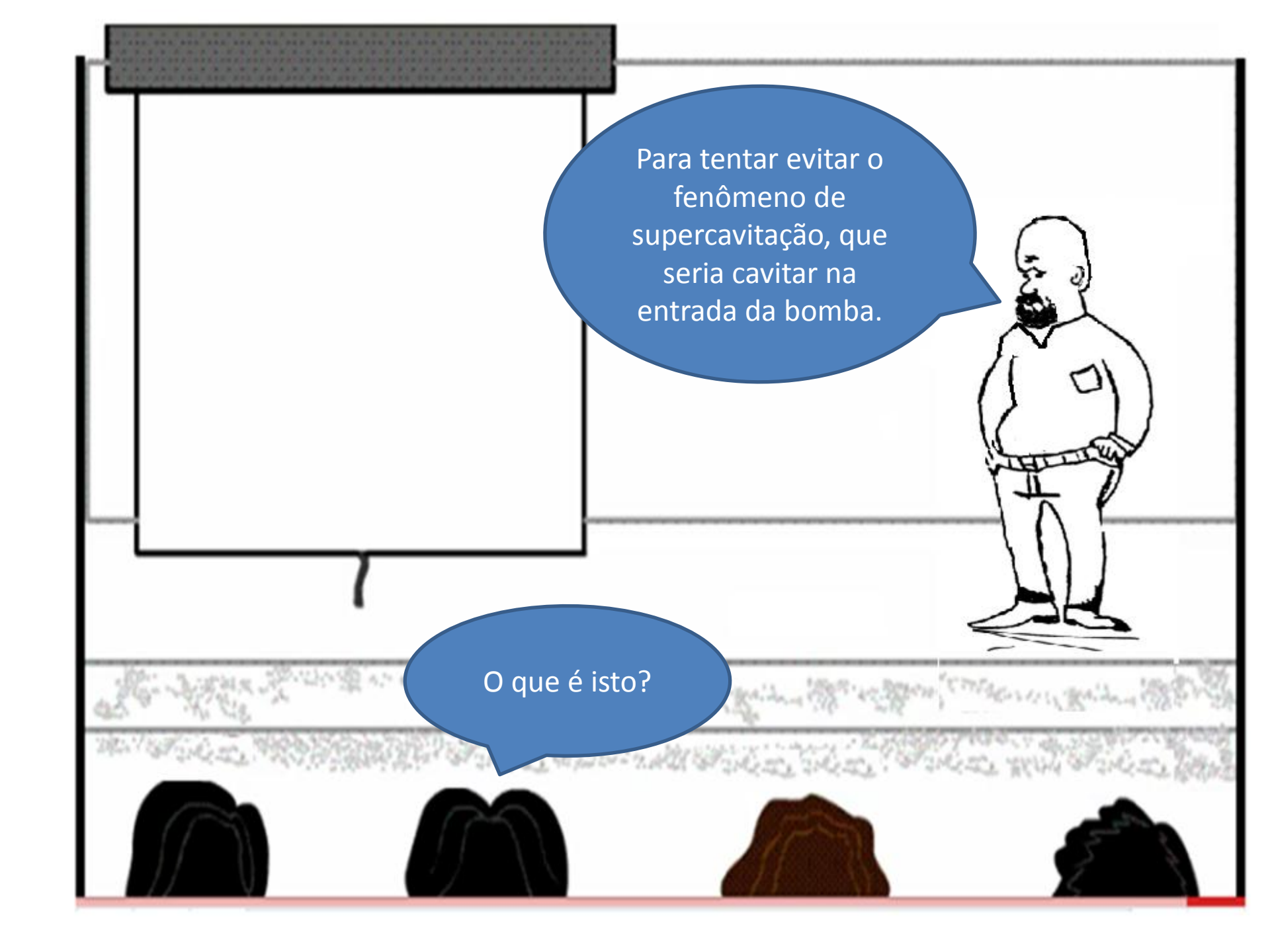
$$\frac{\pi \times D_{\text{ref}}^2}{4} = \frac{Q}{v}$$

$$\therefore D_{\text{ref}} = \left[ \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times v}} \right] \times 1000, \text{ onde :}$$

$$[D_{\text{ref}}] \rightarrow \text{mm}; [Q] \rightarrow \text{m}^3/\text{s};$$

$$[v] = \text{m/s}$$

Por que?



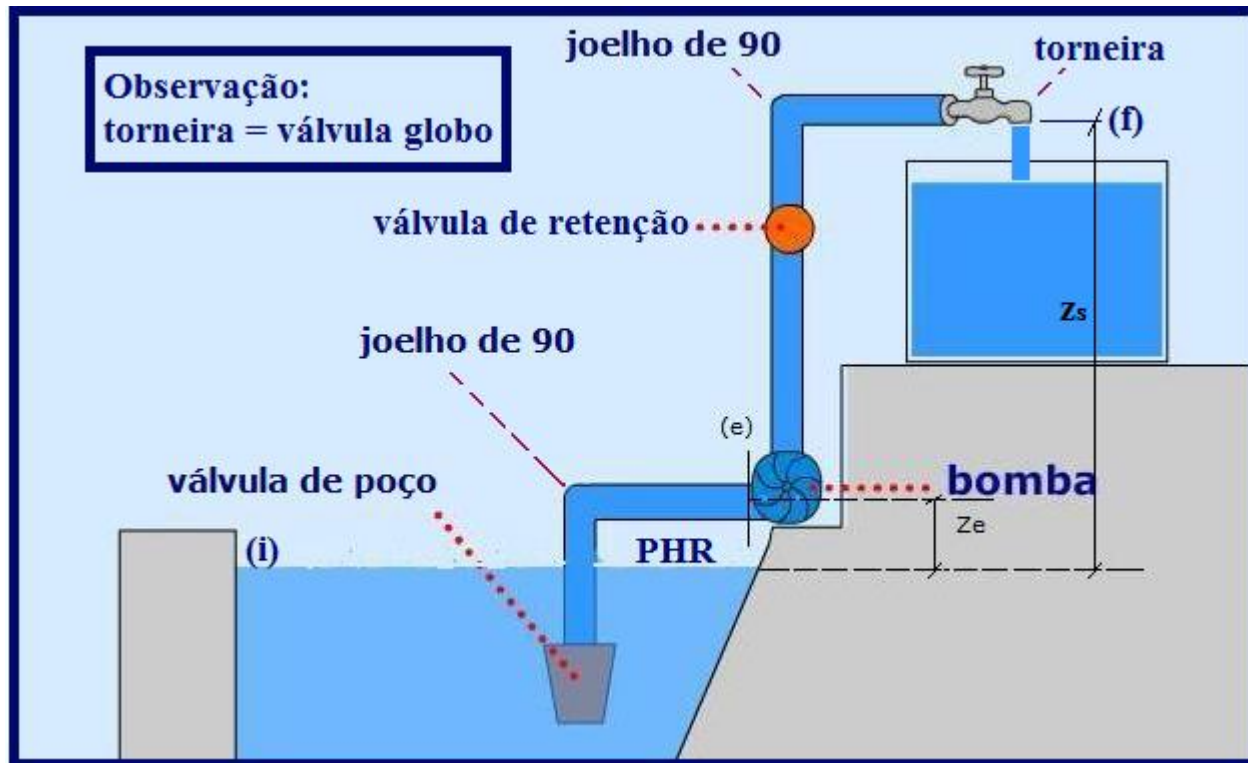
Para tentar evitar o fenômeno de supercavitação, que seria cavar na entrada da bomba.

O que é isto?

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 a pressão de vapor.

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





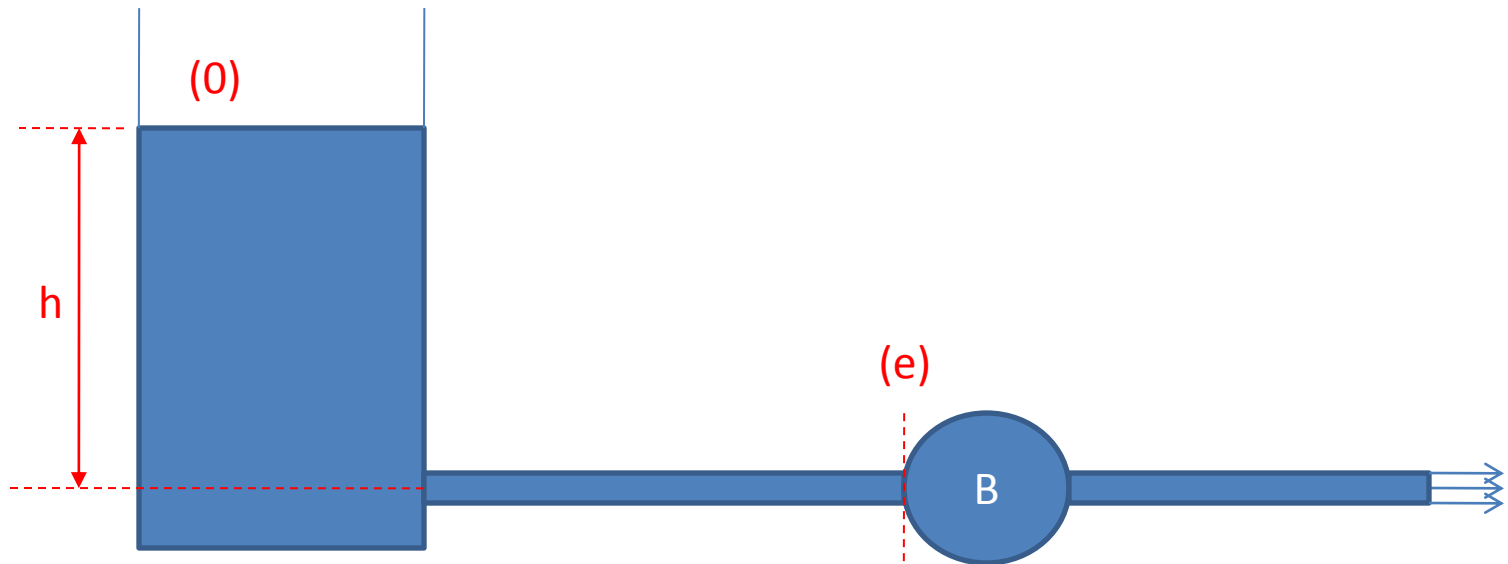
# Adotando o PHR no nível de captação, temos:

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

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



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



# Adotando o PHR no nível de captação, temos:

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

Conclui-se que não, portanto a pressão de entrada deve ser determinada aplicando-se a equação da energia.



# Visualizando a cavitação



Fenômeno de vaporização

# Visualizando a cavitação



Fenômeno de vaporização

O fenômeno de cavitação, geralmente propicia os seguintes problemas:

1º → erosão que originam ruídos

2º → vibrações

3º → diminuição do rendimento

4º → diminuição do tempo vida 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 objetiva-se 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?

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



Os cuidados adotados para procurar-se evitar o fenômeno de cavitação são:

1º → 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  $Z_e < 0$ .

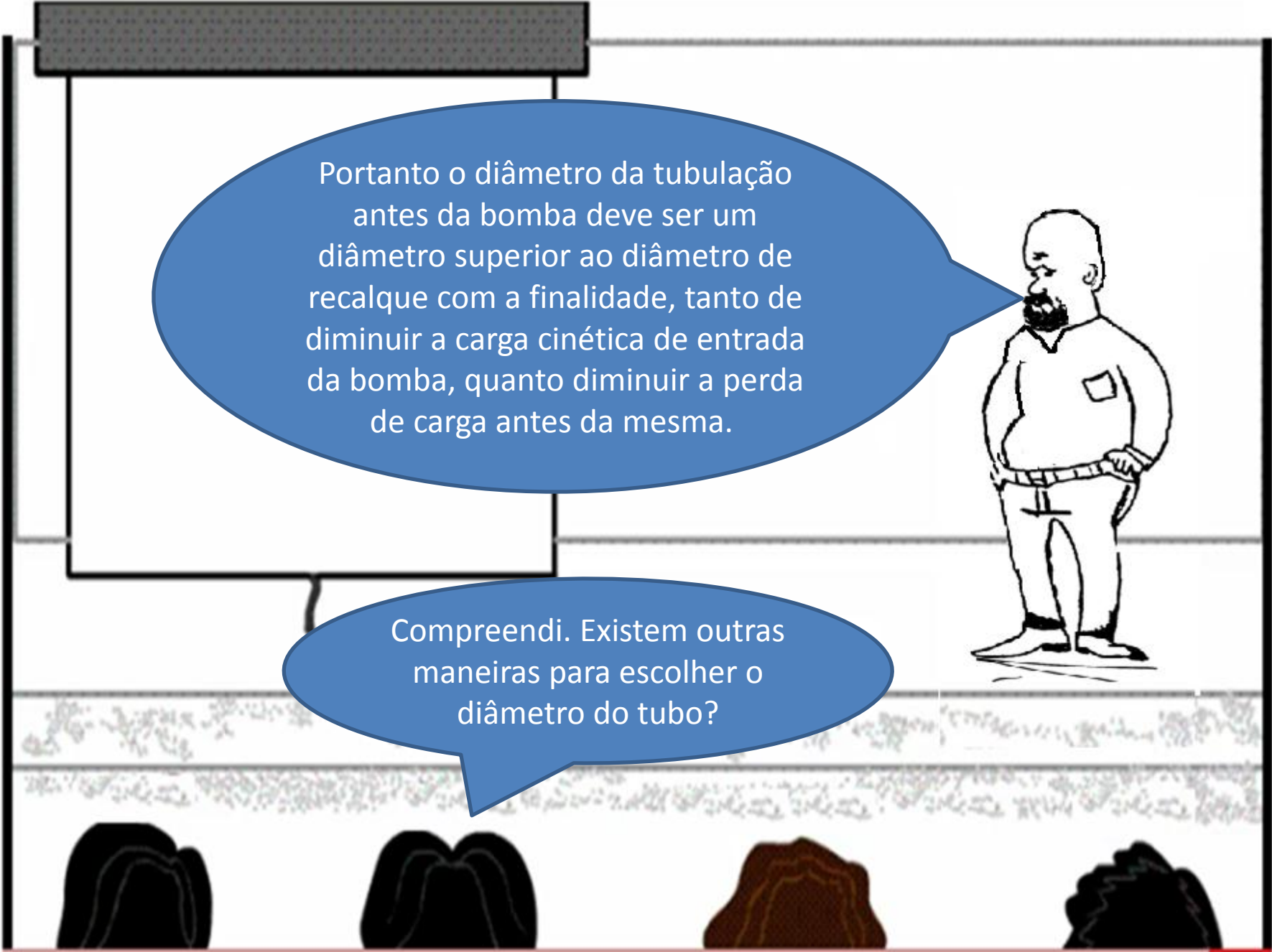
2º → a tubulação antes da bomba deve ser a menor possível com a finalidade de diminuir a  $H_{paB}$ .

3º → na tubulação antes da bomba devem ser usados os acessórios estritamente necessários com a finalidade de diminuir a  $H_{paB}$ .

4º → o diâmetro da tubulação antes da bomba deve ser um diâmetro superior ao diâmetro de recalque com a finalidade, tanto de diminuir a carga cinética de entrada da bomba, quanto diminuir  $H_{paB}$ .

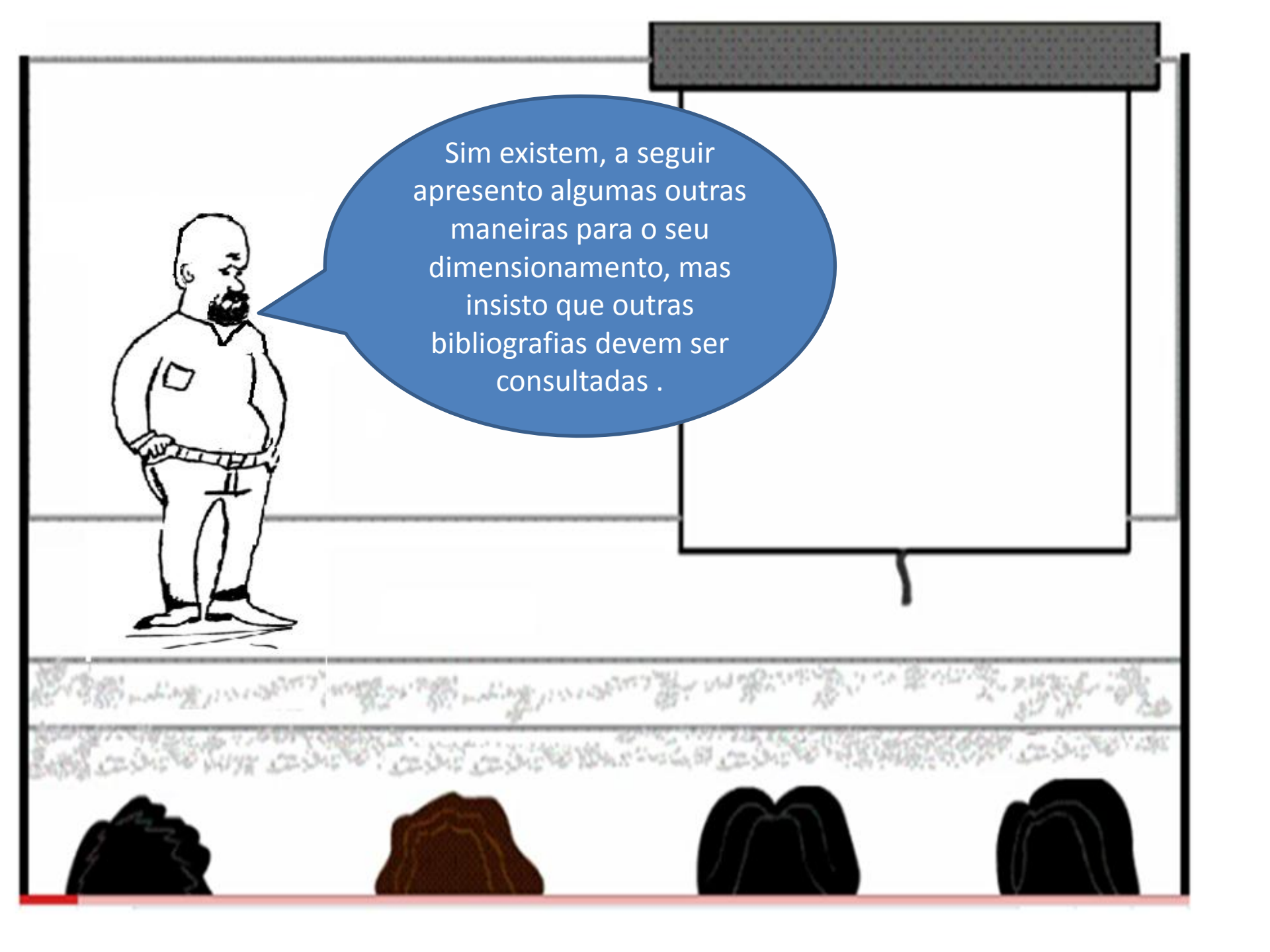
5º → o ponto de trabalho da bomba deve estar o mais próximo do ponto de rendimento máximo.

**Nota:** Por questão de economia, sempre que possível, não se considera o cuidado 4º mencionado acima, já que quanto maior o diâmetro maior o custo da tubulação.

A diagram showing a pipe system. At the top, a grey rectangular box represents a pump or reservoir. A pipe descends from it, then turns right and then down again. A man with a beard, wearing a white shirt and pants, stands to the right of the pipe, looking at it. A blue speech bubble points from him to the pipe. Below the pipe, there are four dark, rounded shapes representing valves or fittings. The background is white with a black border.

Portanto o diâmetro da tubulação antes da bomba deve ser um diâmetro superior ao diâmetro de recalque com a finalidade, tanto de diminuir a carga cinética de entrada da bomba, quanto diminuir a perda de carga antes da mesma.

Compreendi. Existem outras maneiras para escolher o diâmetro do tubo?

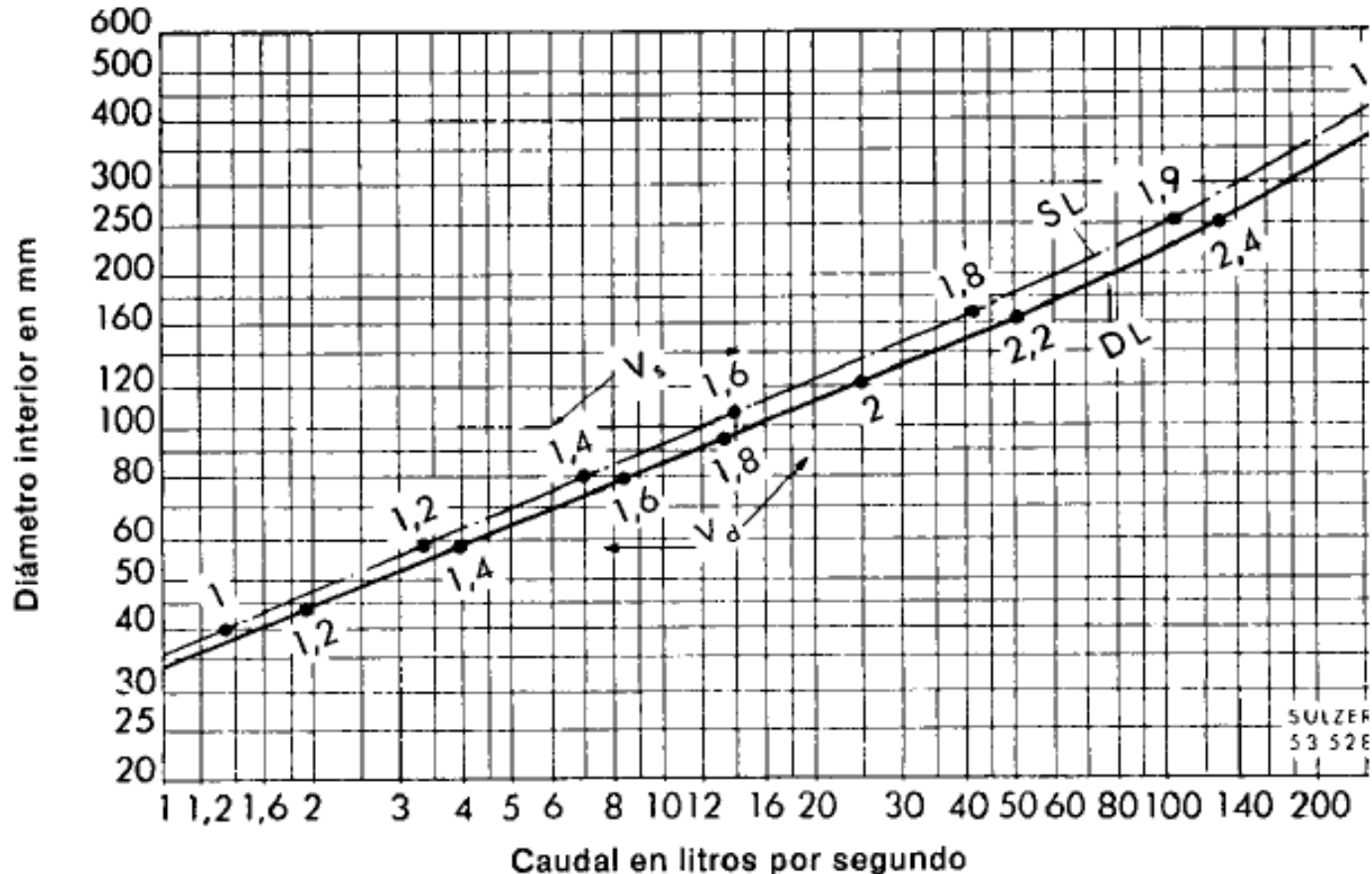


Sim existem, a seguir apresento algumas outras maneiras para o seu dimensionamento, mas insisto que outras bibliografias devem ser consultadas .

## Tabela de velocidades recomendadas pela Alvenius Equipamentos Tubulares S/A

Fluido	Velocidade (m/s)
Água - redes em cidades	1 a 3
- redes industriais	2 a 4
- alimentação de caldeiras	4 a 8
- sucção de bombas	0,75 a 1,8
Água salgada	1,5 a 2,5
Ar comprimido	15 a 20
Vapor - até 2 kgf/cm <sup>2</sup> saturado	20 a 40
- de 2 a 10 kgf/cm <sup>2</sup>	40 a 80
- mais de 10 kgf/cm <sup>2</sup>	80 a 200
Hidrocarbonetos líquidos em instalações industriais	
- linhas de sucção	1 a 2
- linhas de recalque	1,5 a 2,5
Hidrocarbonetos gasosos em instalações industriais	25 a 30
Acetileno	20 a 25
Amônia - líquida	2
- gás	25 a 35
Hidrogênio	20 a 35
Cloro - líquido	1,5 a 2,0
- gás	15 a 30
Soda cáustica - 0 a 30%	2
- 30 a 50%	1,5
- 50 a 75%	1,2
Cloreto de sódio	1,5 a 2,0
Cloreto de Cálcio	1,5
Tetra-Cloreto de carbono	2,0
Ácido sulfúrico	1,0 a 1,2

# Companhia Sulzer



#### 4. Diâmetros interiores de tubérias de aspiração y de presión

(las cifras que aparecen a lo largo de las curvas indican las velocidades)

$v_s$  = velocidad en m/s en el conducto de aspiración SL

$v_d$  = velocidad en m/s en la tubería de impulsión DL

No caso da tubulação de PVC pode-se ainda especificar o diâmetro através da vazão

Vazão	Diâmetro do tubo de PVC
Até 2.500 litros/hora	25 mm
Entre 2.500 e 5.000 litros/hora	32 mm
Entre 5.000 e 10.000 litros/hora	40 mm
Entre 10.000 e 20.000 litros/hora	50 mm



Qualquer que seja a tabela considerada fica fácil observar que devemos redimensionar a tubulação. No caso, eu vou supor um único diâmetro e opto por um de 2" espessura 40.

$$Q = v \times A \therefore v = \frac{Q}{A}$$

Considerando tubo de  $D_N = 2''$  e espessura 40:

$$v = \frac{3,3 \times 10^3}{21,7 \times 10^{-4}}$$

$$v \cong 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Esta velocidade está adequada!

Vamos  
refazer o  
exercício  
para este  
novo  
diâmetro.





Para a instalação hidráulica abaixo, que tem um único diâmetro, que é de aço 40 com  $D_N = 2''$ , pede-se escrever a equação da CCI, obter sua representação gráfica e, se existir, obter a vazão de queda livre. E considerando a bomba anteriormente escolhida, especifique seu novo ponto de trabalho.

**Importante:** Com a instalação operando em queda livre o fluido não passa pela casa de máquina e aí a somatória dos comprimentos equivalentes é considerada igual a 9,94 m e existe um aumento do comprimento da tubulação de 2 m.

