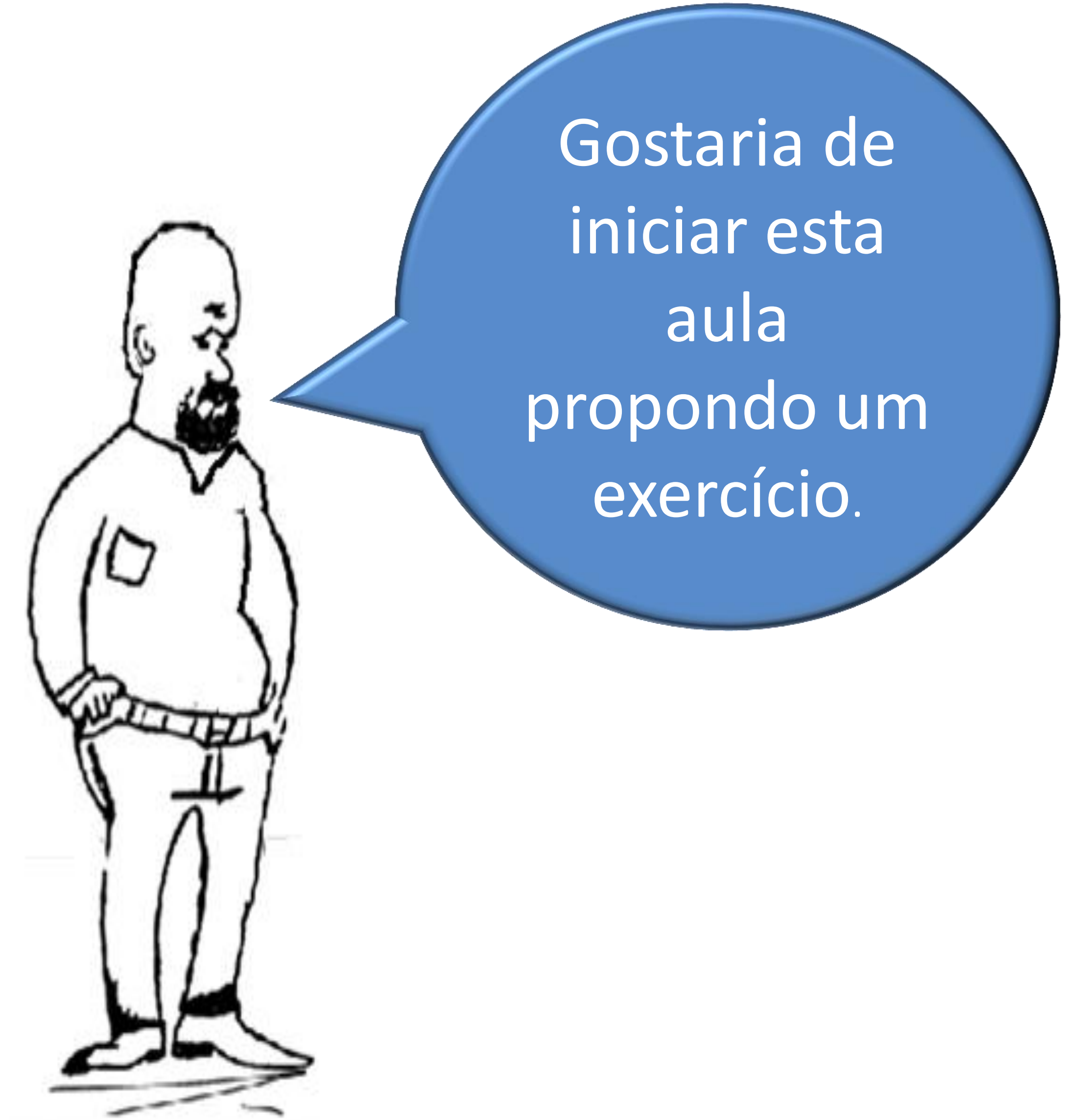
Aula 12 de ME5330

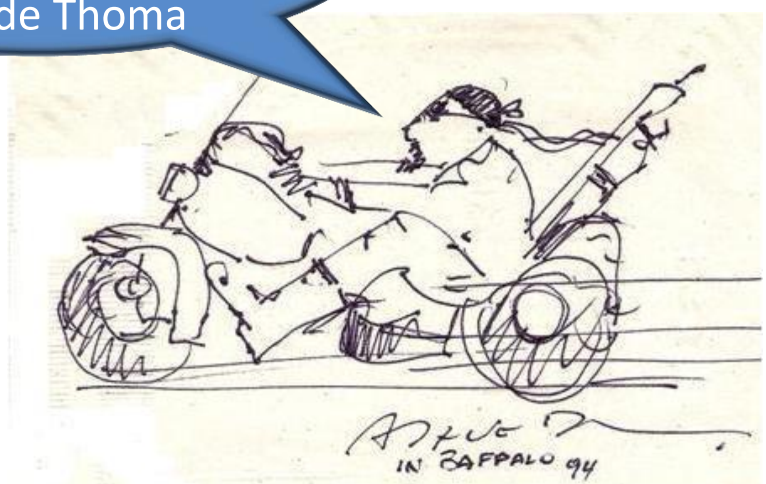
Primeiro semestre de 2015

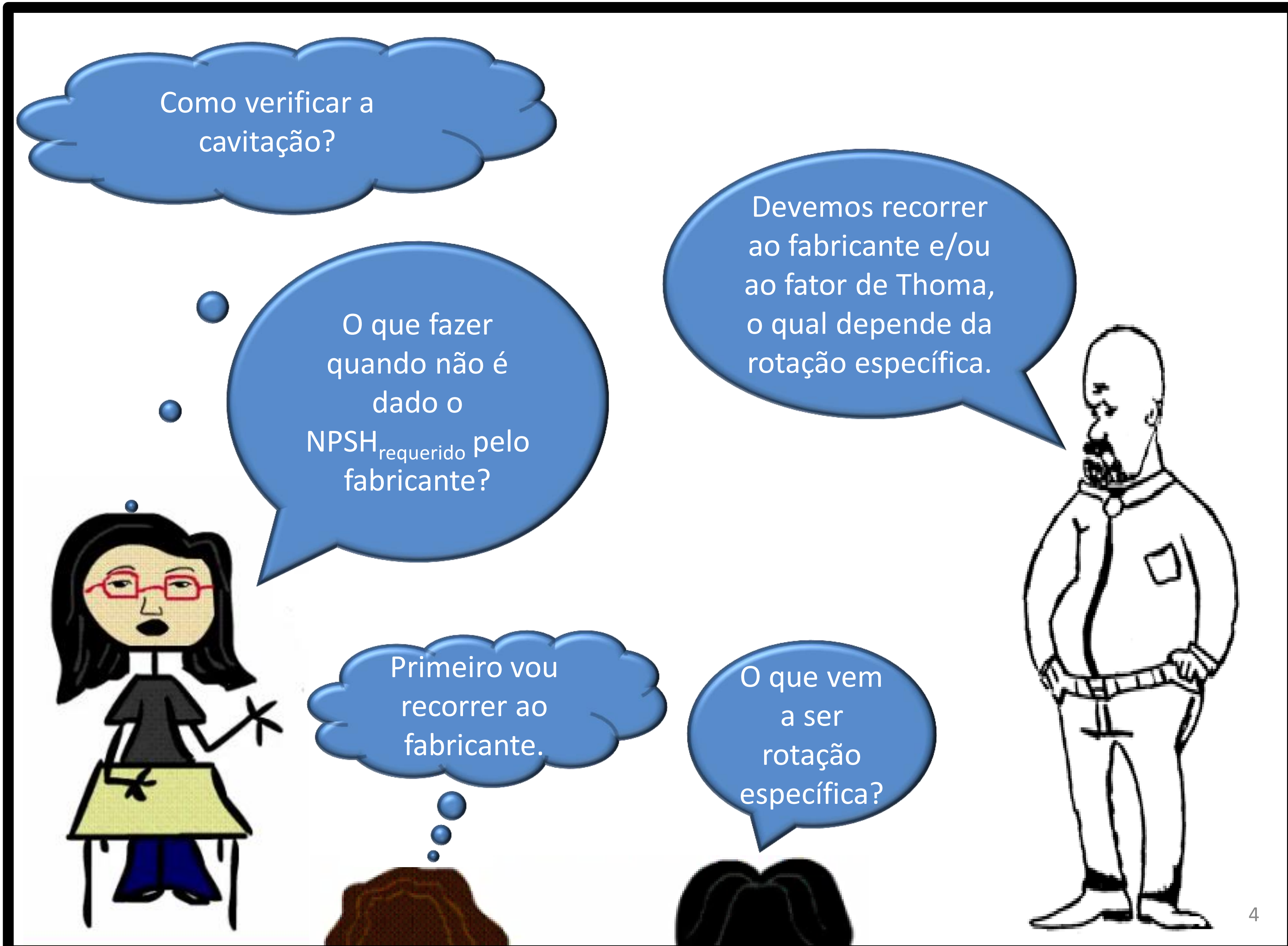

Gostaria de iniciar esta aula propondo um exercício.

80^0 – Uma bomba Sulzer de 1750 rpm instalada a 3,0 m acima do nível de captação transporta água a 40^0C através de uma carga manométrica de 45,5 m num local com pressão barométrica igual a 700 mmHg. Nesta condição de funcionamento a pressão manométrica medida através de um manovacuômetro é -395 mmHg e a velocidade na sua entrada é igual a 1,5 m/s. Verifique a existência, ou não, do fenômeno de cavitação; estime o rendimento da bomba e escolha o motor elétrico adequado para acionar a bomba.

Dado: tubulação antes da bomba de aço 40 com diâmetro nominal igual a 3”.

Estime o $NPSH_{req}$ através da fórmula da Sulzer e através do fator de Thoma




Como verificar a cavitação?
O que fazer quando não é dado o NPSH$_{requerido}$ pelo fabricante?
Devemos recorrer ao fabricante e/ou ao fator de Thoma, o qual depende da rotação específica.
Primeiro vou recorrer ao fabricante.
O que vem a ser rotação específica?

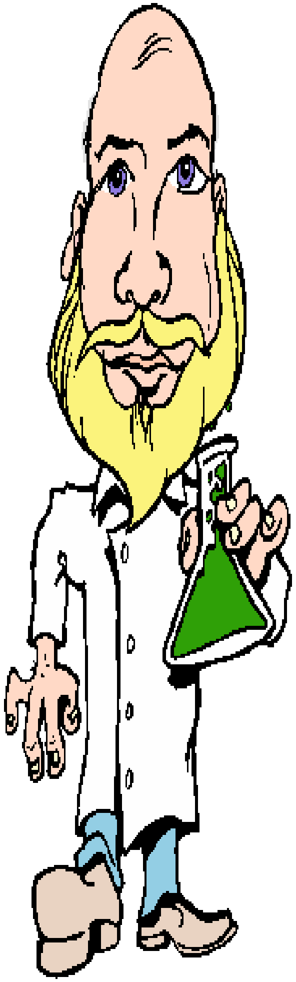

Importante salientar que existem fórmulas especificas dos fabricantes para a determinação do $NPSH_{requerido}$, para exemplificar este fato forneço a fórmula comumente utilizada pela Sulzer.
5

A fórmula comumente utilizada pela Sulzer:

$$NPSH_{requerido} = (0{,}3 \text{ a } 0{,}5) \times n \times \sqrt{Q}$$

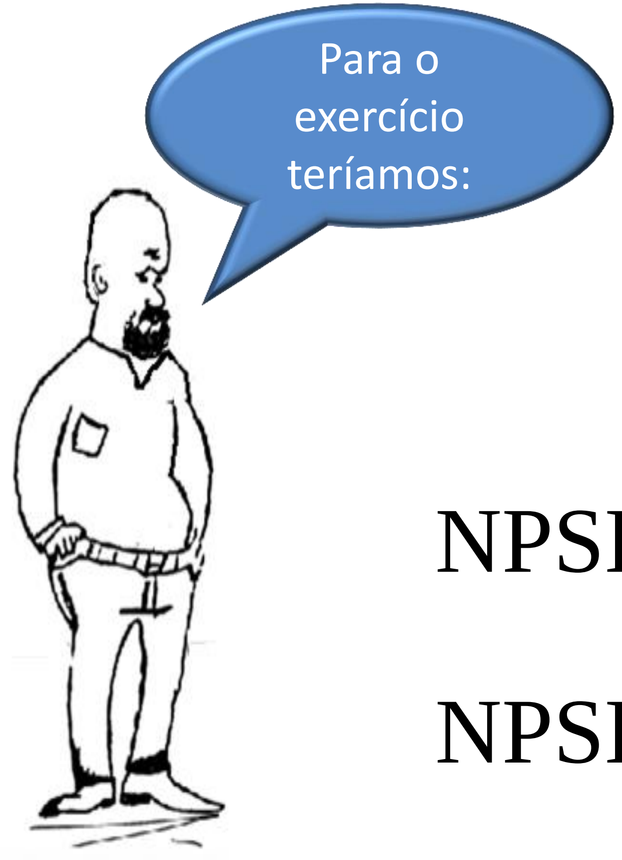
$$[n] = rps$$

$$[Q] = \frac{m^3}{s}$$



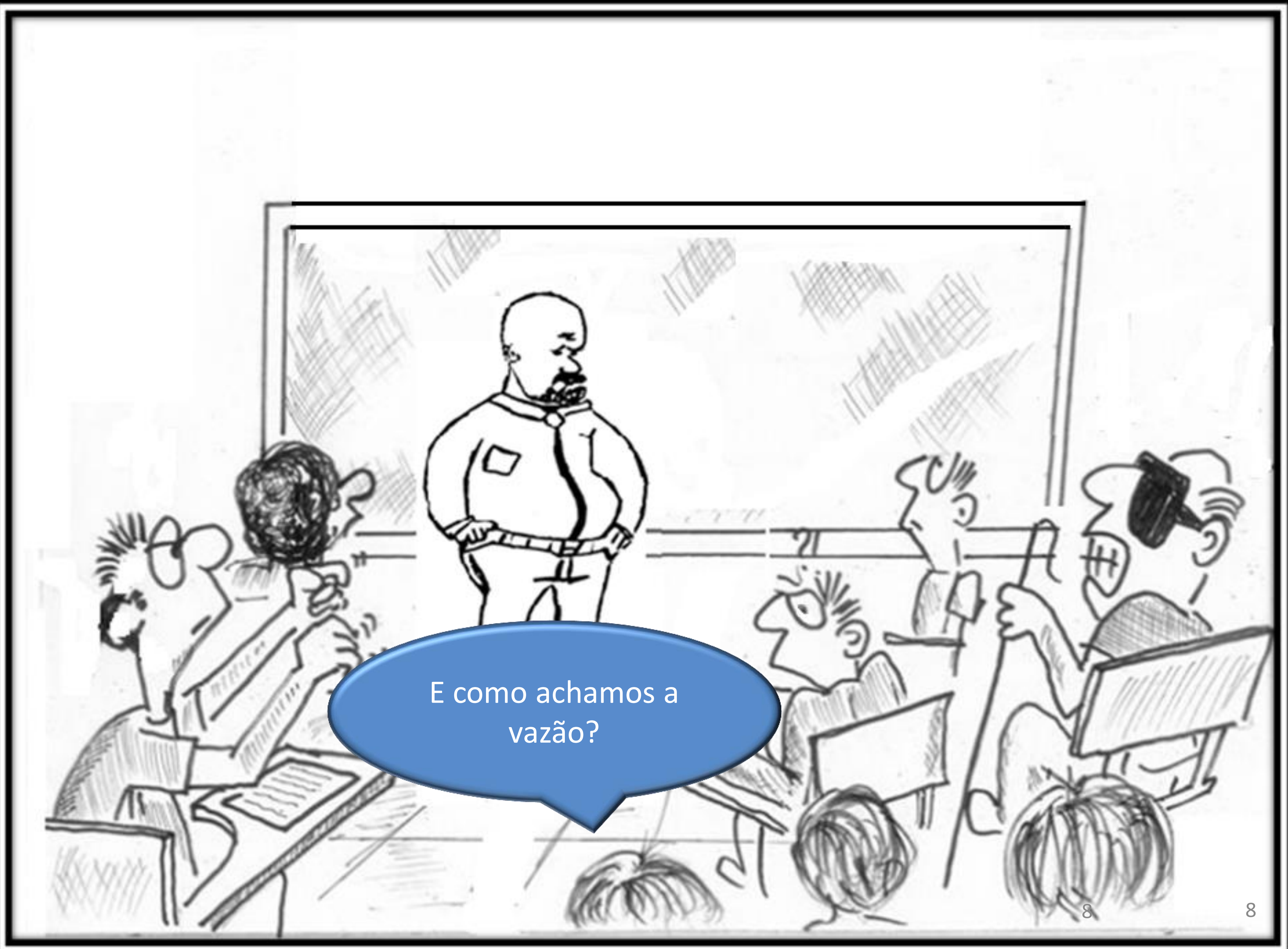
$$NPSH_{requerido} = 0{,}3 \times \frac{1750}{60} \times \sqrt{Q}$$

$$NPSH_{requerido} = ?$$



$$NPSH_{requerido} = 0{,}5 \times \frac{1750}{60} \times \sqrt{Q}$$

$$NPSH_{requerido} = ?$$

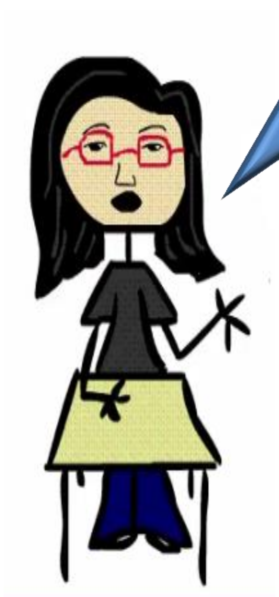

E como achamos a
vazão?
8

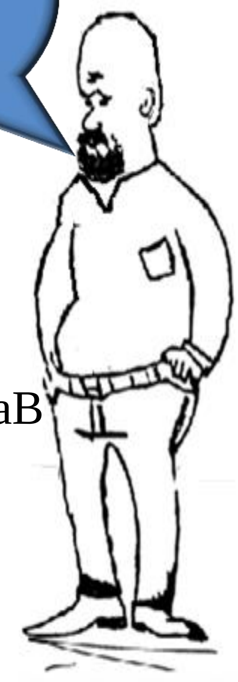
$$Q = 1{,}5 \times 47{,}7 \times 10^{-4} = 7{,}155 \times 10^{-3}\ \frac{m^3}{s}$$

$$NPSH_{requerido} = 0{,}5 \times \frac{1750}{60} \times \sqrt{7{,}155 \times 10^{-3}}$$

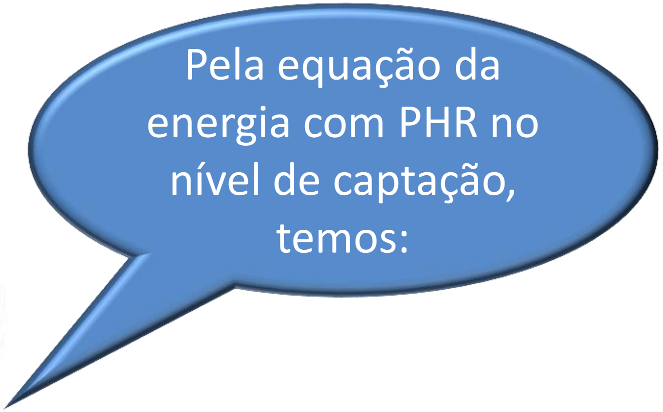
$$NPSH_{requerido} = 1{,}233563816 \cong 1{,}24m$$

Por segurança trabalhamos com o $NPSH_{req}$ maior





$$NPSH_{disp} = z_{inicial_{PHR\_eixo}} + \frac{p_{inicial_{abs}} - p_{vapor}}{\gamma} - H_{p_{aB}}$$



$$\text{água a } 40^0\text{C} \Rightarrow \rho_a = 992{,}2\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3};\ \nu_{agua} = 0{,}658 \times 10^{-6}\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$p_{vapor_{abs}} = 0{,}07375\text{bar}$$

$$\text{mercúrio a } 40^0\text{C} \Rightarrow \rho_{Hg} = 13497\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3};$$

$$H_i = H_e + H_{p_{aB}} \Rightarrow 0 = 3 - \frac{0{,}395 \times 13600 \times 9{,}8}{992{,}2 \times 9{,}8} + \frac{\alpha_e \times 1{,}5^2}{19{,}6} + H_{p_{aB}}$$

$$\text{tubo aço } 40 \Rightarrow D_{int} = 77{,}9\text{mm};\ A = 47{,}7\text{cm}^2$$

$$\text{Re} = \frac{1{,}5 \times 77{,}9 \times 10^{-3}}{0{,}658 \times 10^{-6}} \cong 177584 \Rightarrow \alpha_e \cong 1{,}0$$

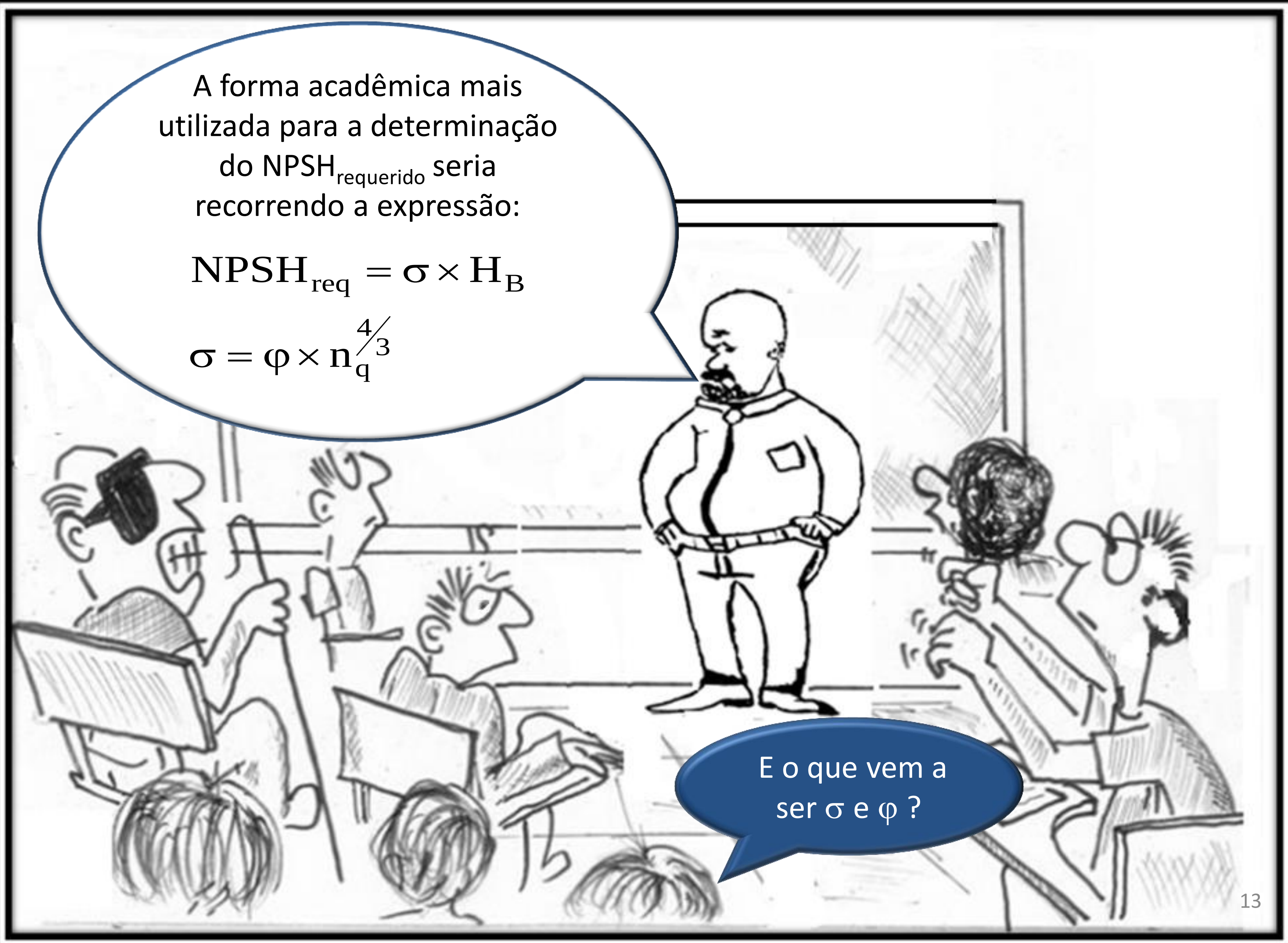
$$\therefore H_{p_{aB}} \cong 2{,}23\text{m}$$

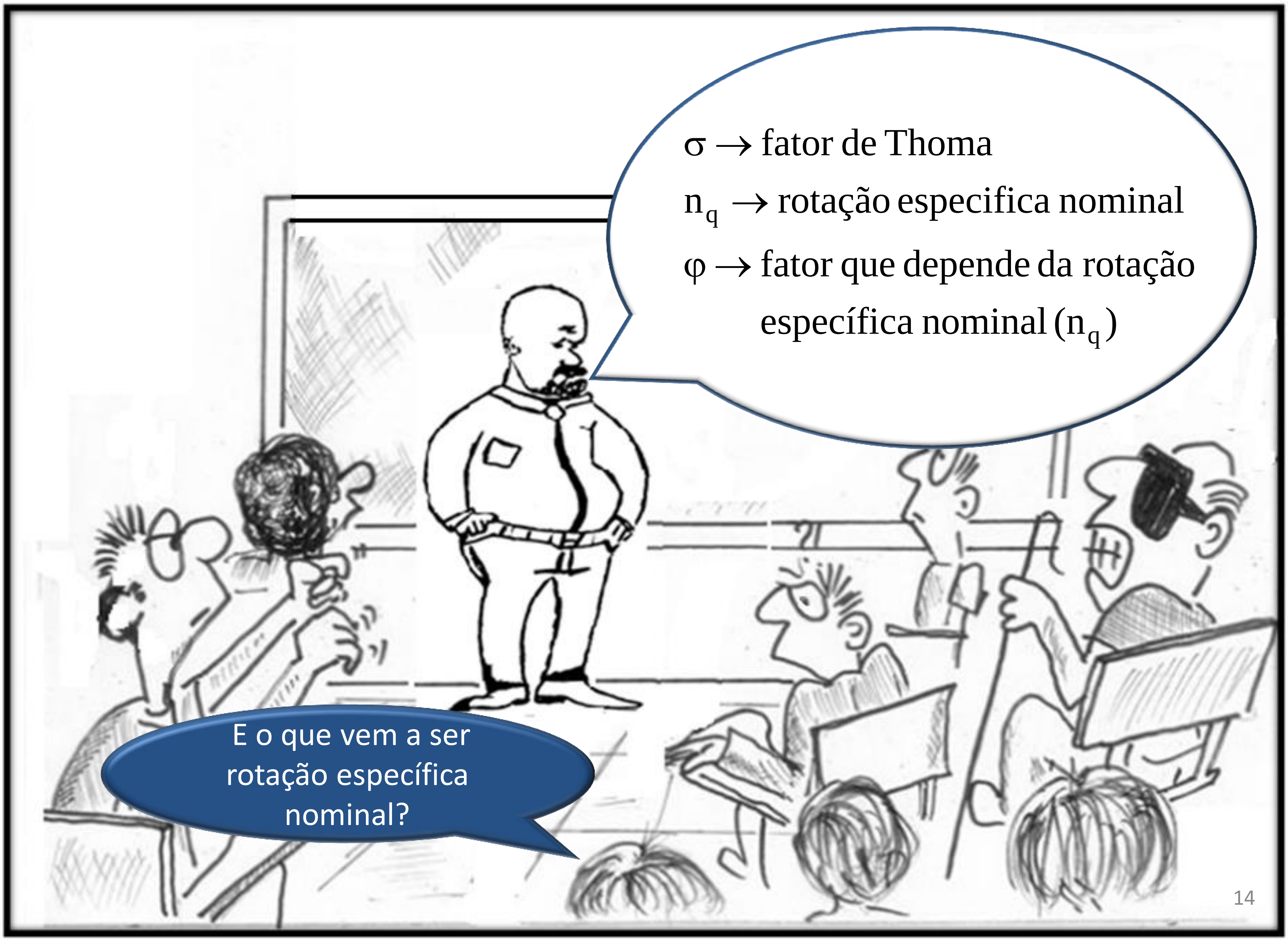
$$NPSH_{disp} = z_{inicial_{PHR\_eixo}} + \frac{p_{inicial_{abs}} - p_{vapor}}{\gamma} - H_{p_{aB}}$$

$$NPSH_{disp} = -3 + \frac{0{,}7 \times 13497 \times 9{,}8 - 0{,}07375 \times 10^5}{992{,}2 \times 9{,}8} - 2{,}23$$

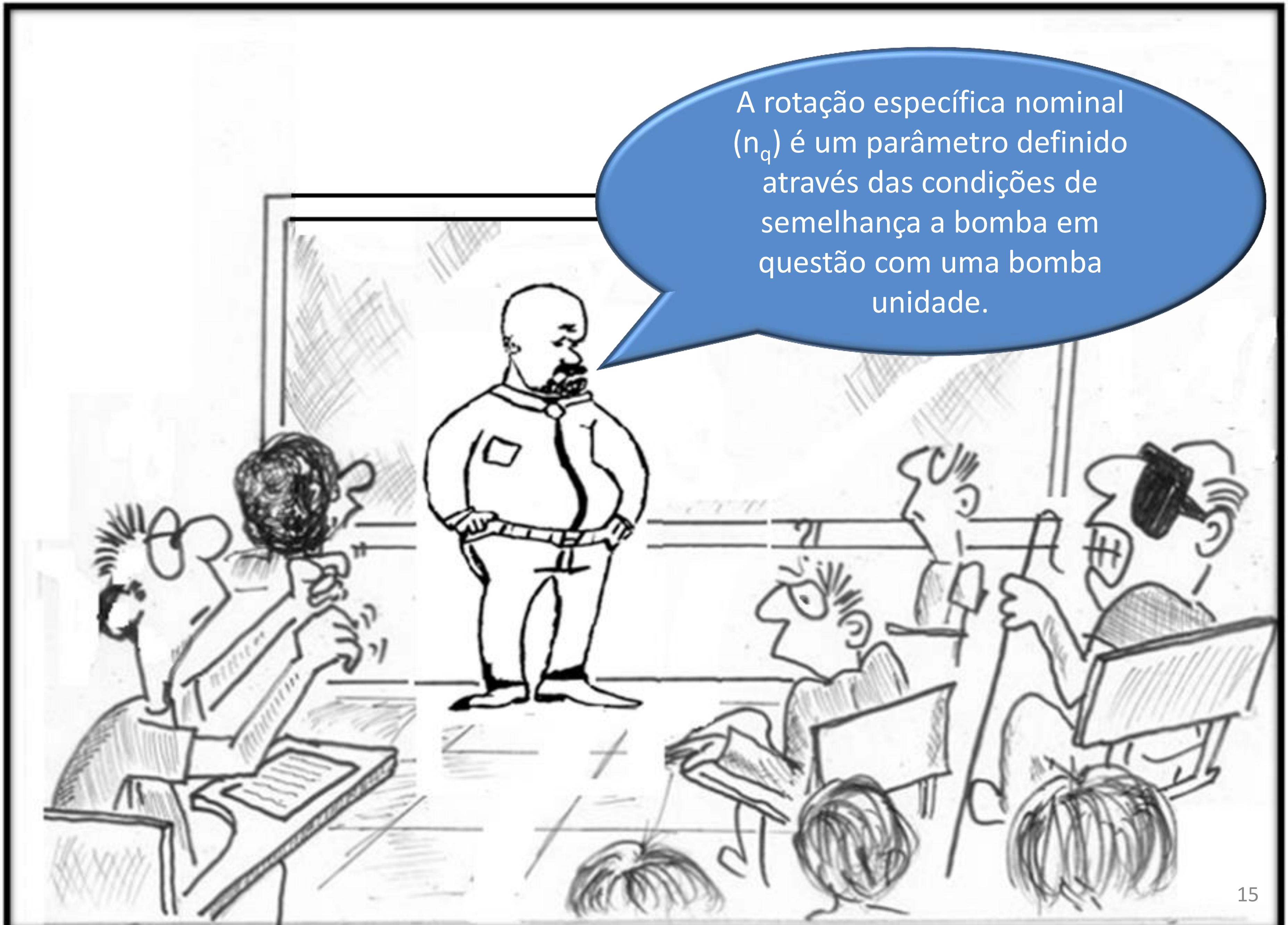
$$NPSH_{disp} = 3{,}533705886\text{m} \approx 3{,}5\text{m}$$

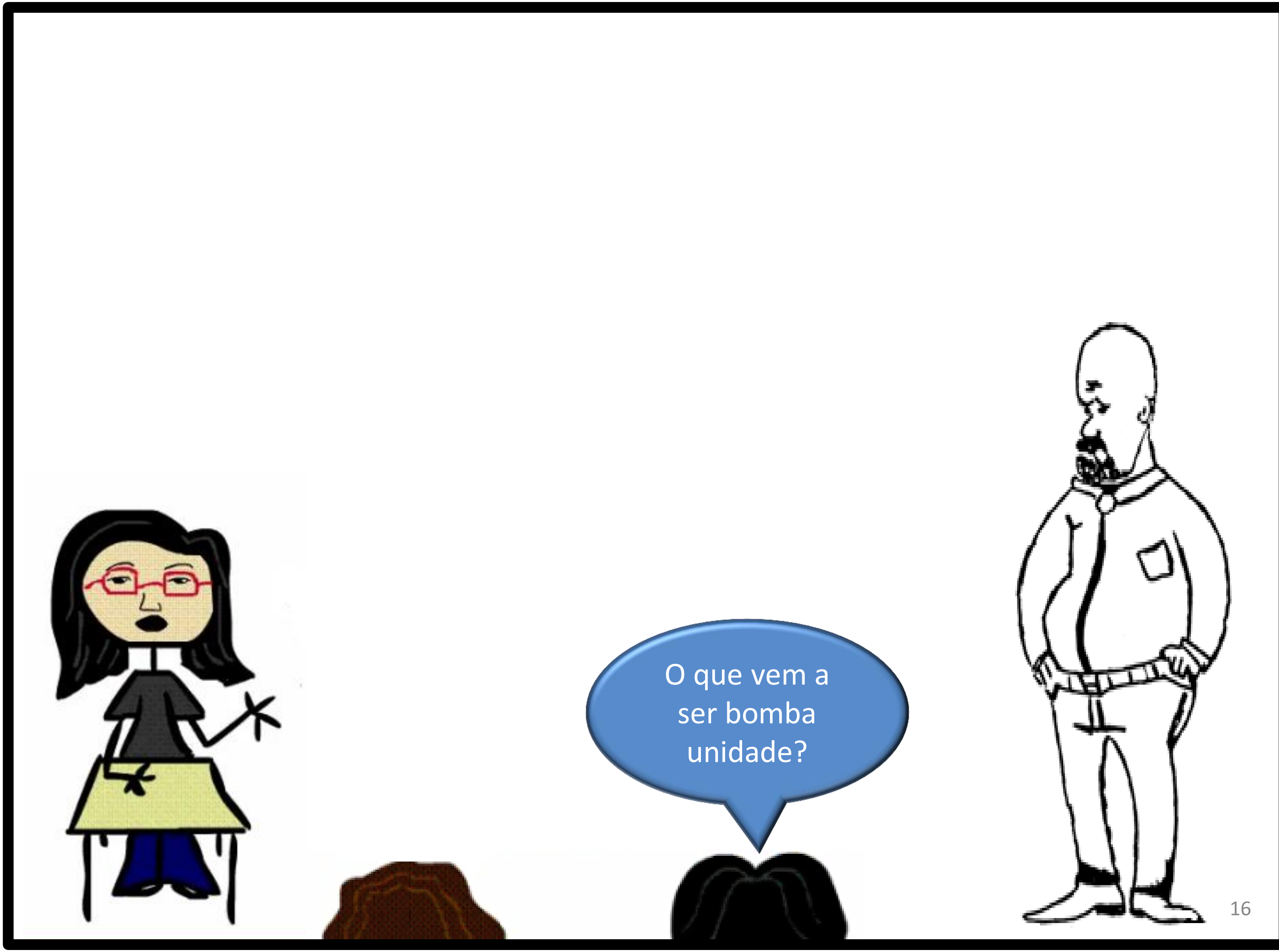
$$\therefore NPSH_{disp} - NPSH_{req} = 3{,}5 - 1{,}24 = 2{,}26\text{m}$$


A forma acadêmica mais utilizada para a determinação do $NPSH_{requerido}$ seria recorrendo a expressão:
$NPSH_{req} = \sigma \times H_B$
$\sigma = \varphi \times n_q^{4/3}$
E o que vem a ser σ e φ ?



$\sigma \rightarrow$ fator de Thoma
$n_q \rightarrow$ rotação especifica nominal
$\varphi \rightarrow$ fator que depende da rotação específica nominal (n_q)
E o que vem a ser rotação específica nominal?


A rotação específica nominal (n_q) é um parâmetro definido através das condições de semelhança a bomba em questão com uma bomba unidade.


O que vem a
ser bomba
unidade?


Definição da bomba unidade: é a bomba que semelhante a todas as bombas.
E ela que deu origem ao cálculo da rotação específica!

Impomos as condições de semelhança entre a bomba unidade e a bomba considerada.

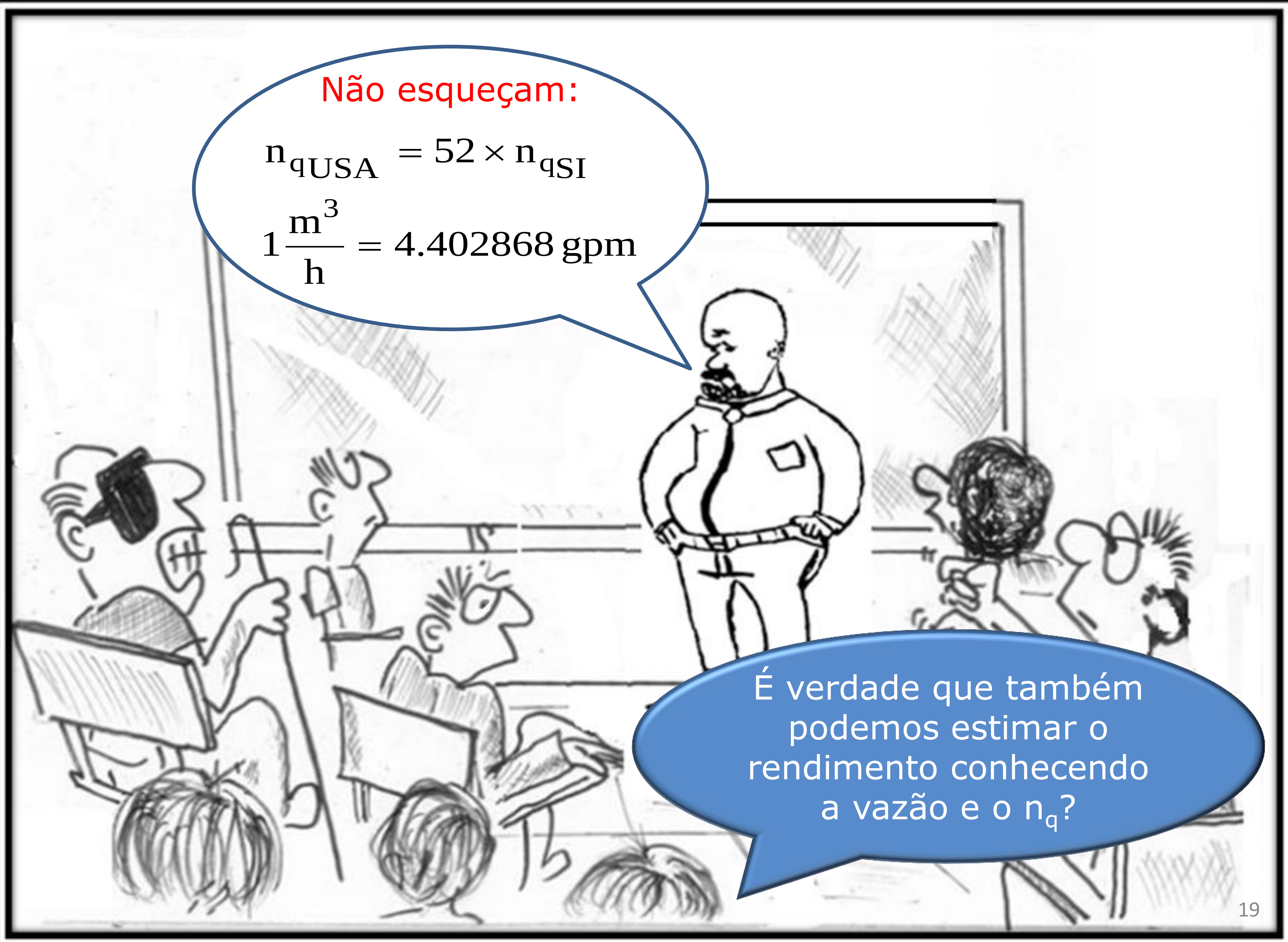
$$\frac{1}{n_q^2 \times D_{rm}^2} = \frac{H_B}{n^2 \times D_{rp}^2} \therefore \frac{D_{rm}^2}{D_{rp}^2} = \left(\frac{n}{n_q}\right)^2 \times \frac{1}{H_B} \rightarrow (I)$$

$$\frac{1}{n_q \times D_{rm}^3} = \frac{Q}{n \times D_{rp}^3} \therefore \frac{D_{rm}^3}{D_{rp}^3} = \frac{n}{n_q} \times \frac{1}{Q} \rightarrow (II)$$

$$(I)^3 \text{ e } (II)^2 \therefore \left(\frac{n}{n_q}\right)^6 \times \left(\frac{1}{H_B}\right)^3 = \left(\frac{n}{n_q}\right)^2 \times \left(\frac{1}{Q}\right)^2$$

$$\left(\frac{n}{n_q}\right)^4 = \left(\frac{1}{Q}\right)^2 \times (H_B)^3 \therefore n_q = n \times \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}}$$

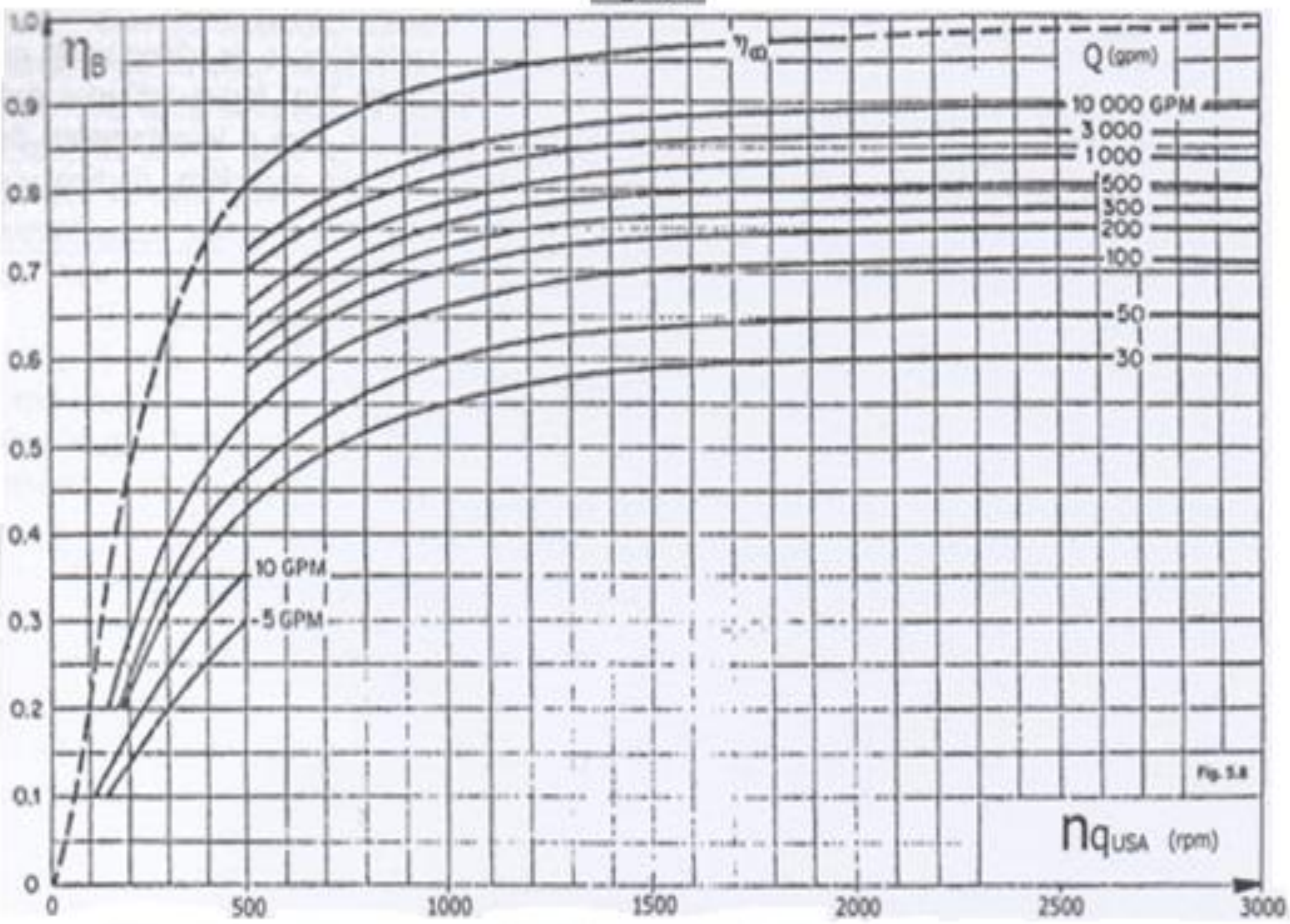
E ela no ponto de maior rendimento opera com $Q = 1 m^3/s$, $H_B = 1 m$ e com rotação específica nominal (n_q)


Não esqueçam:
$n_{qUSA} = 52 \times n_{qSI}$
$1\,\frac{m^3}{h} = 4.402868\,\text{gpm}$
É verdade que também podemos estimar o rendimento conhecendo a vazão e o n_q?

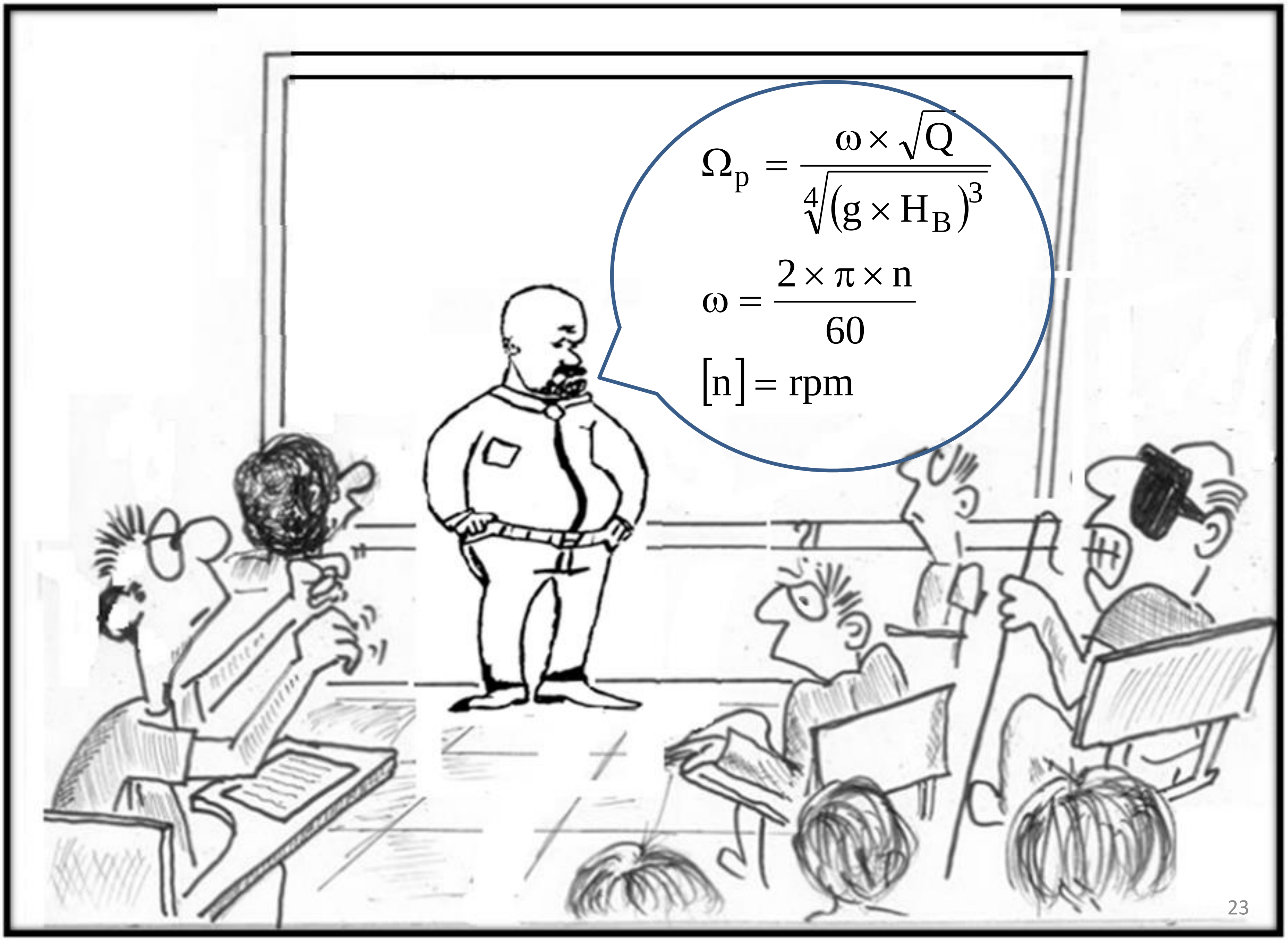

Exatamente,
vejam o próximo
slide!

Bombas & Instalações de Bombeamento –3ª ed.- Sérgio Lopes dos Santos

Fig. 5.8




Existe um outro diagrama que trabalha com números adimensionais


$\Omega_p = \frac{\omega \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{(g \times H_B)^3}}$
$\omega = \frac{2 \times \pi \times n}{60}$
$[n] = rpm$

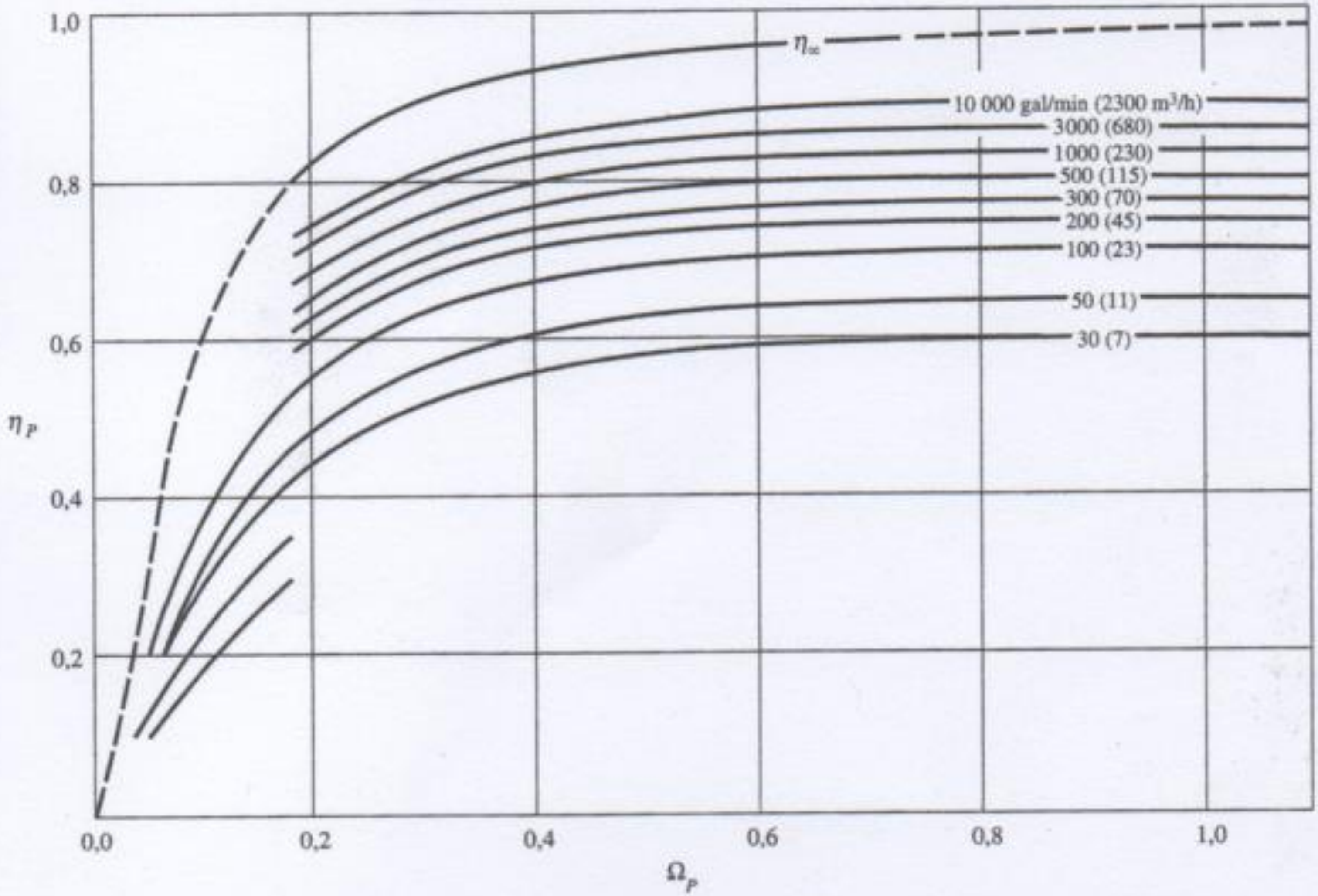
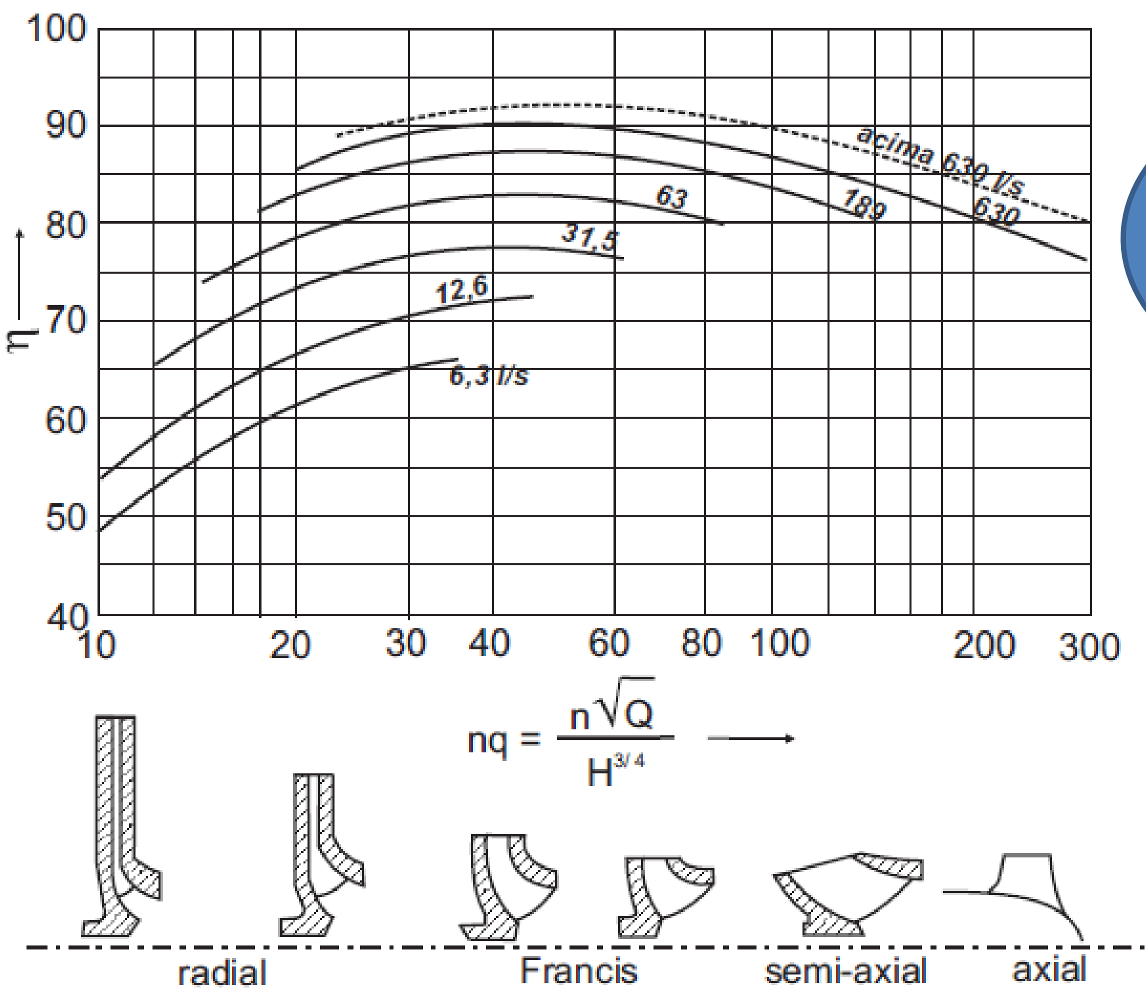
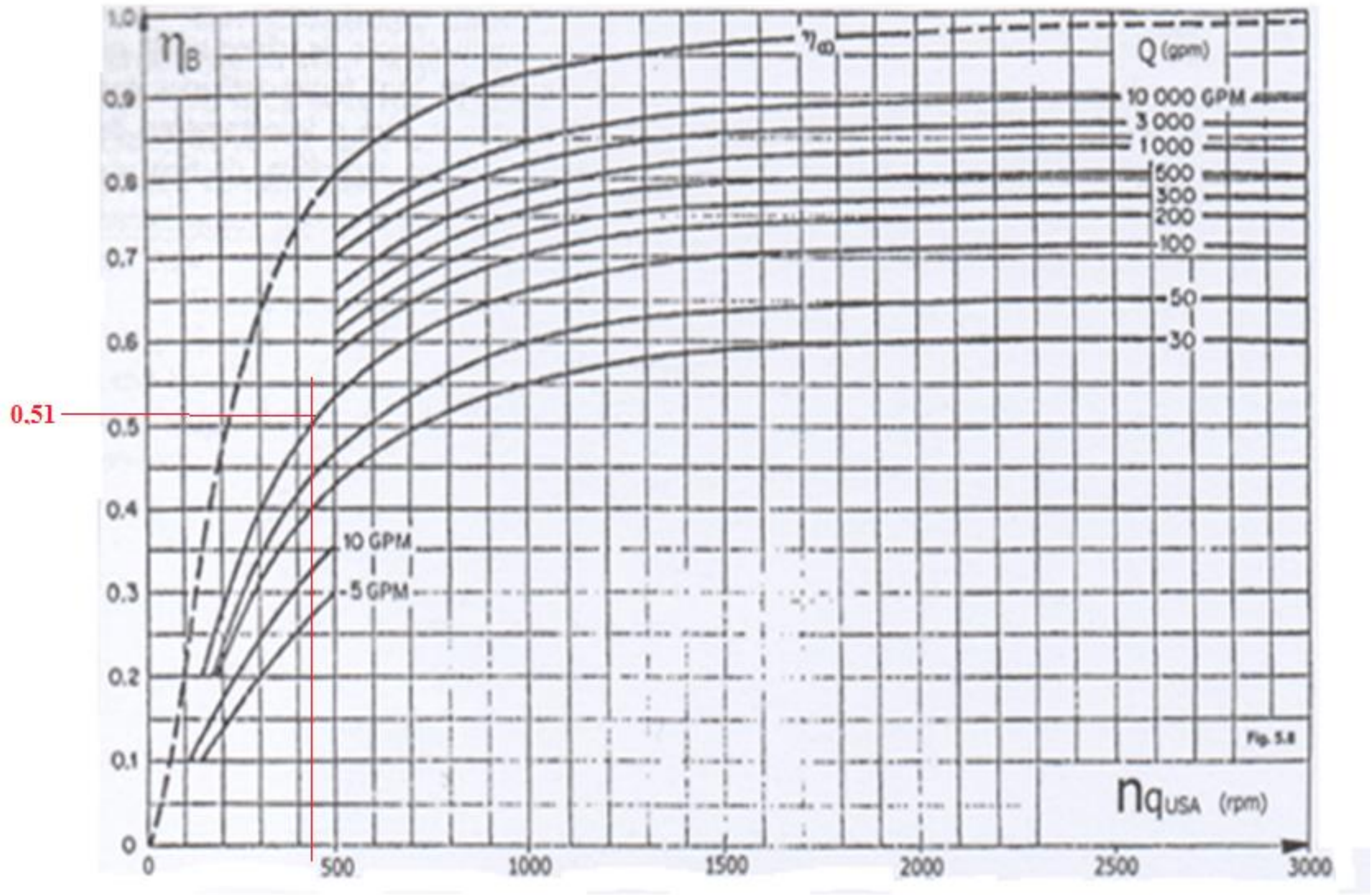


FIGURA 12.15 Eficiência máxima em função da velocidade específica e descarga para bombas de fluxo radial. (Adaptada com autorização de Karassik et al., 1986.)

TIPOS DE ROTORES X VELOCIDADE ESPECÍFICA



$\eta_B \cong 51\%$



0.51
ηB
ηω
Q (gpm)
10 000 GPM
3 000
1000
500
300
200
100
50
30
10 GPM
5 GPM
Fig. 5.8
nqUSA (rpm)
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1.0
500
1000
1500
2000
2500
3000

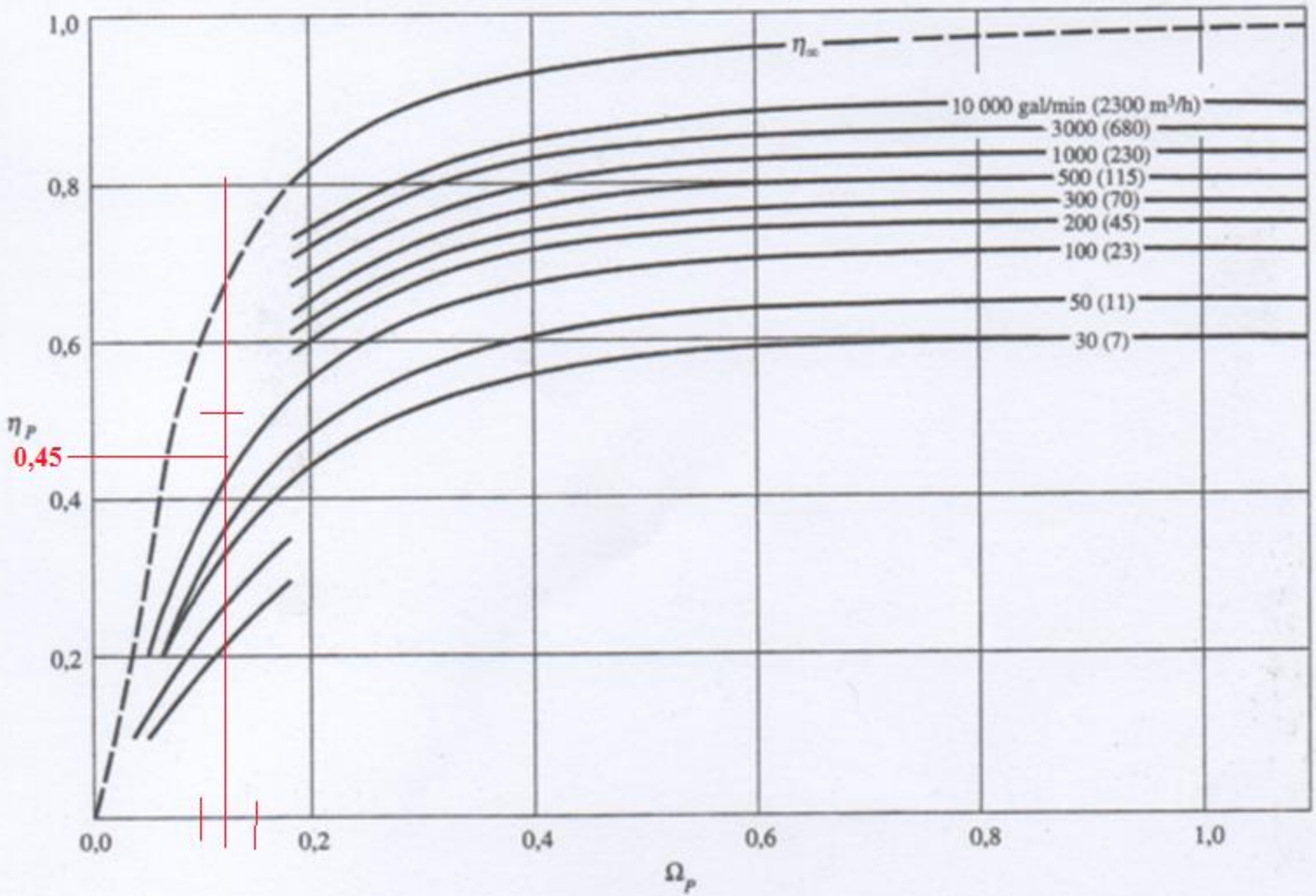
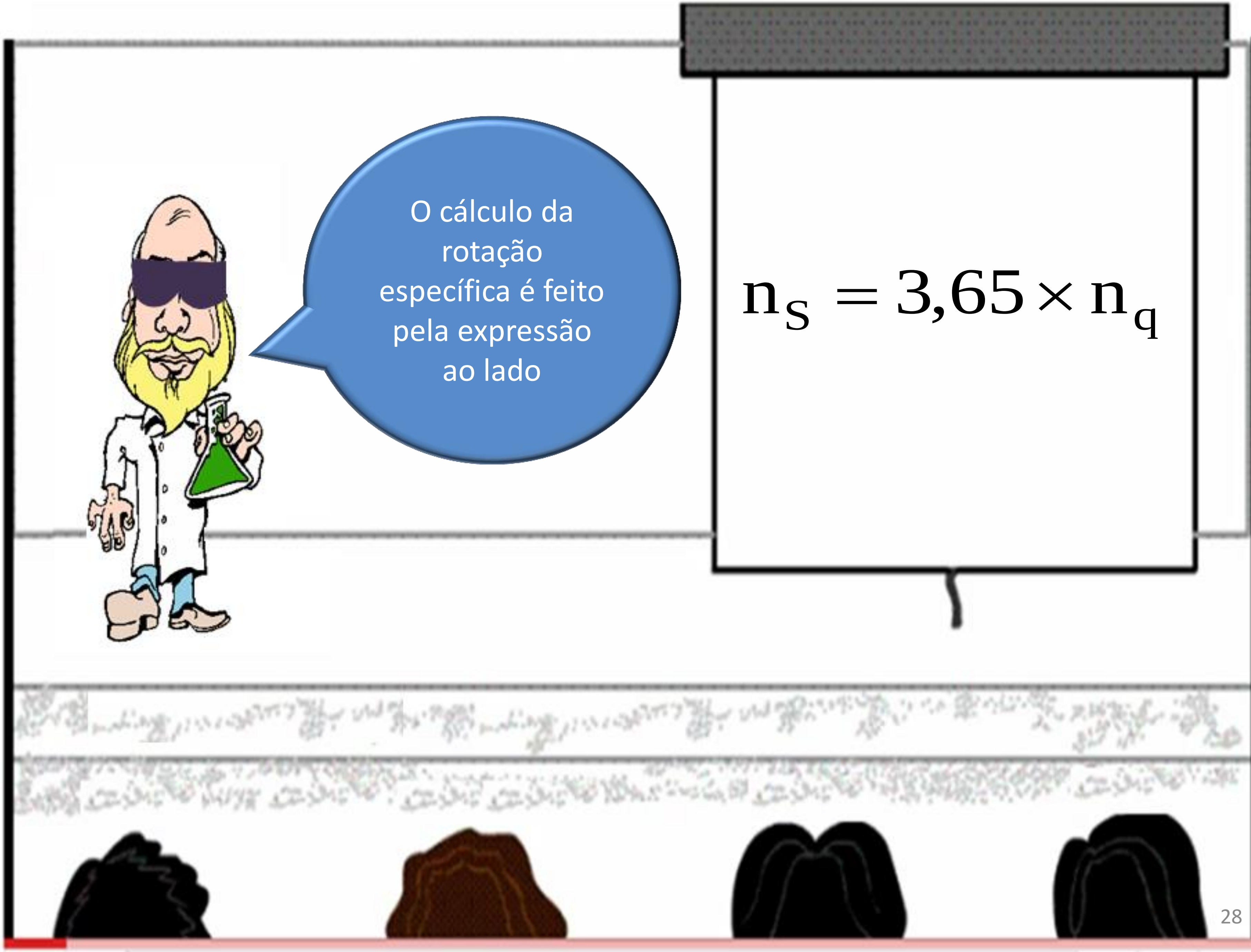


FIGURA 12.15 Eficiência máxima em função da velocidade específica e descarga para bombas de fluxo radial. (Adaptada com autorização de Karassik et al., 1986.)


O cálculo da rotação específica é feito pela expressão ao lado
$n_S = 3{,}65 \times n_q$

Portanto:

$$n_S = 3{,}65 \times \frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}}$$

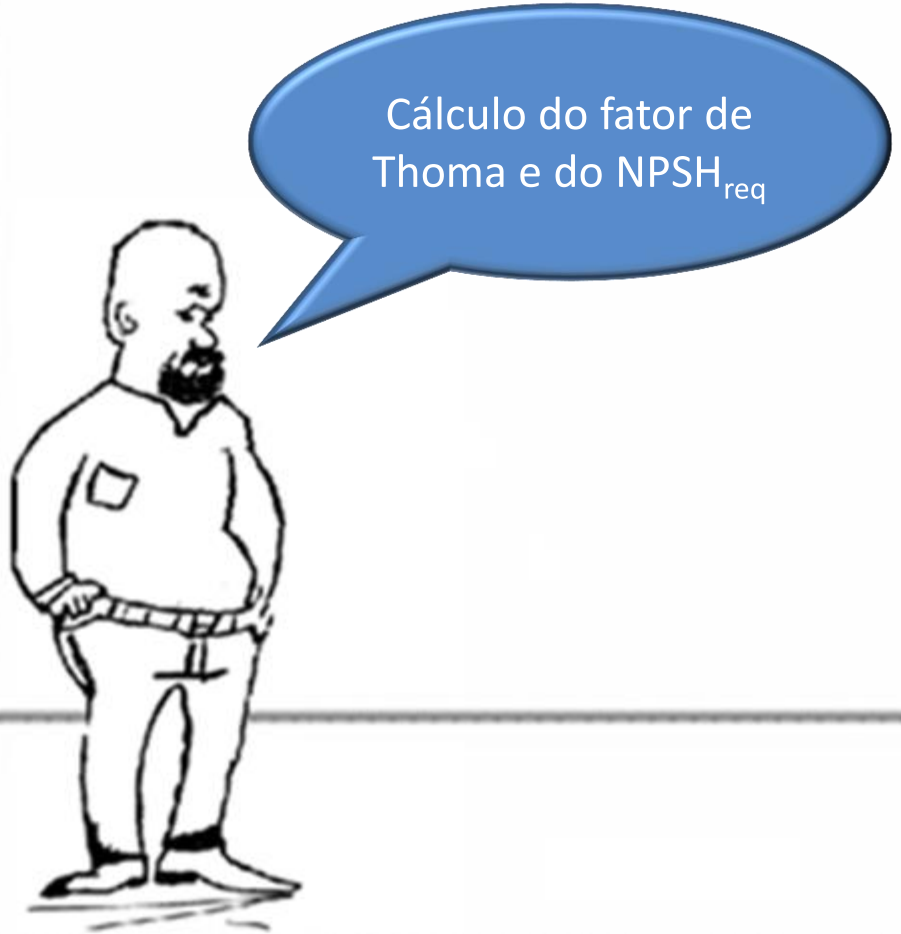
Denomina-se número específico de rotações por minuto ou velocidade específica da bomba.

Se na equação acima a Q for dada em L/s ao invés de m³/s, o fator 3,65 se converte em 0,1155.

Baseados nos resultados obtidos com as bombas ensaiadas e no seu custo, o qual depende das dimensões da bomba, os fabricantes elaboraram tabelas, gráficos e ábacos, delimitando o campo de emprego de cada tipo conforme a rotação específica, de modo a proceder a uma escolha que atenda as exigências de bom rendimento e baixo custo.

CLASSIFICAÇÃO BÁSICA

1. $30 < n_S < 90$ rpm = rotor radial de bomba centrífuga pura, lenta, alta pressão e vazões baixas
2. $90 < n_S < 130$ rpm = rotor radial, bombas semelhantes as anteriores.
3. $130 < n_S < 220$ rpm – rotor radial de bomba centrífuga pura , rápida, altas pressão, vazões médias, pás de dupla curvatura
4. $220 < n_S < 440$ rpm = rotor hélico-centrifugo, bomba diagonal (fluxo misto), vazões médias e elevadas, pressões médias.
5. $440 < n_S < 500$ rpm – rotor helicoidal de bomba diagonal (semi-axial) para vazões elevadas e pressões médias.
6. $n_S > 500$ rpm – rotor axial de uma bomba axial (propulsoras-hélice), vazões elevadas, pressões baixas.



$$\sigma = \varphi \times n_q^{4/3}$$

$$NPSH_{req} = \sigma \times H_B$$

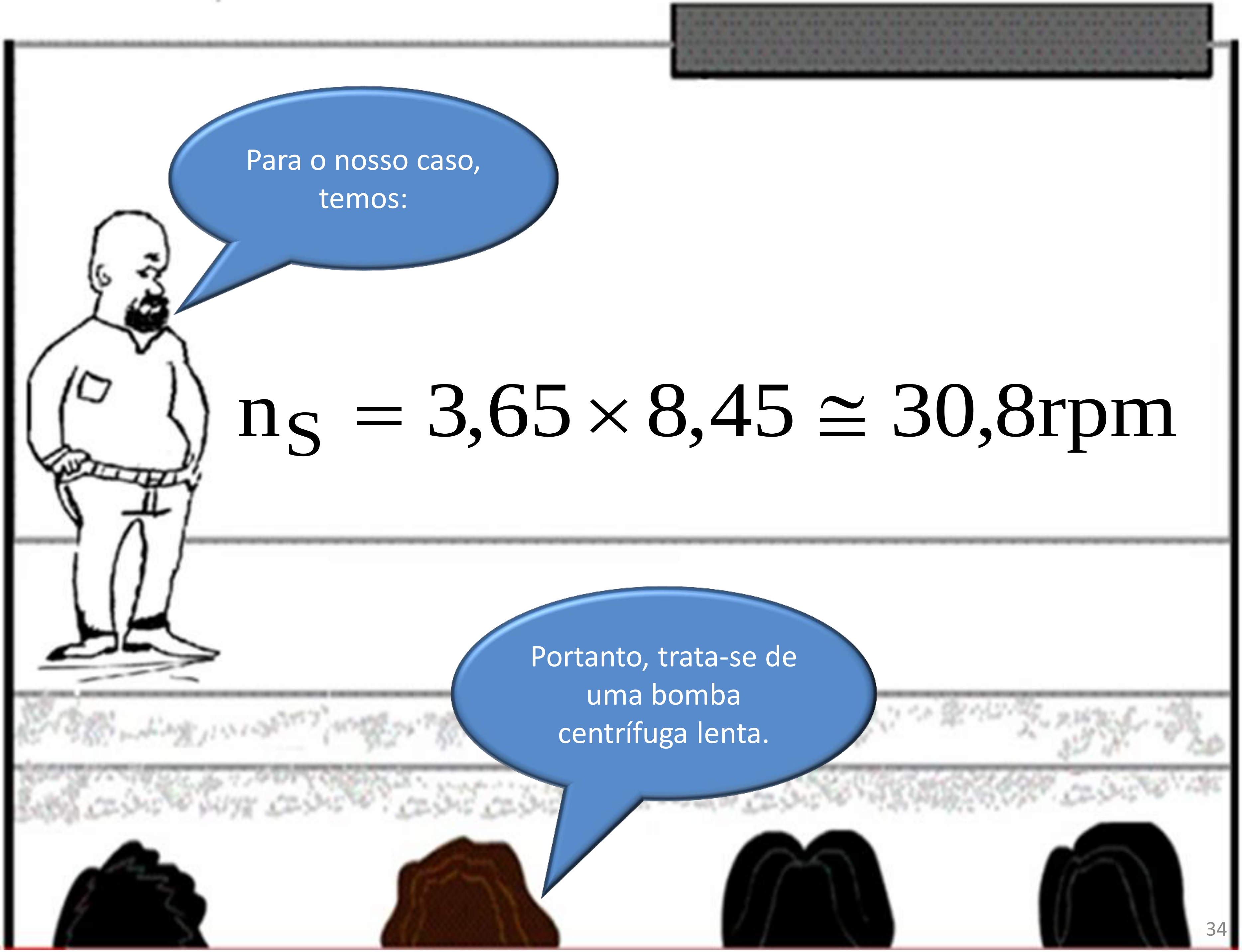

Com a rotação específica (ns) obtemos a classificação básica da bomba e estabelecemos o fator φ.

Conhecida a rotação específica (ns), podemos fixar o fator φ já que:

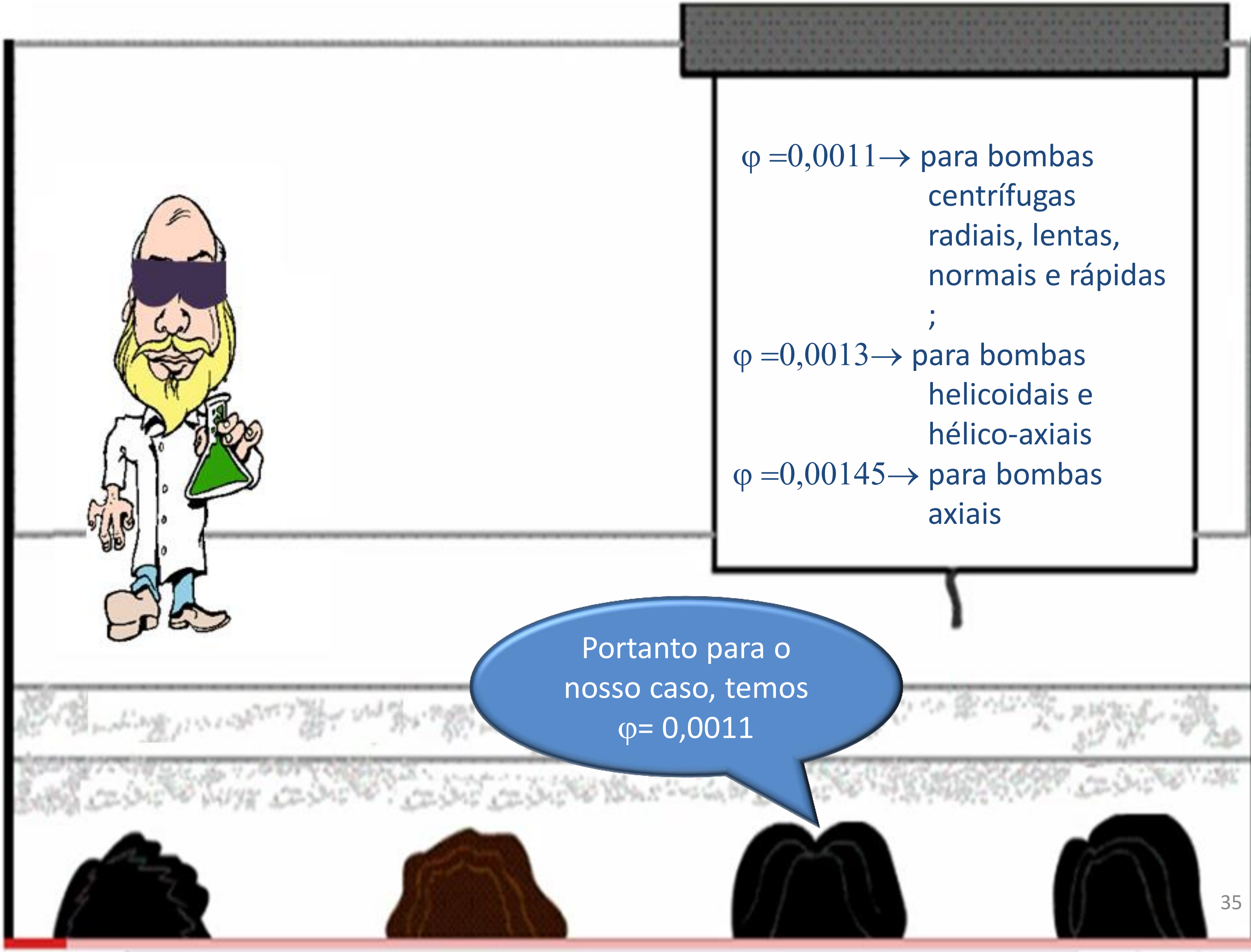
φ =0,0011→ para bombas centrífugas radiais, lentas, normais e rápidas ;

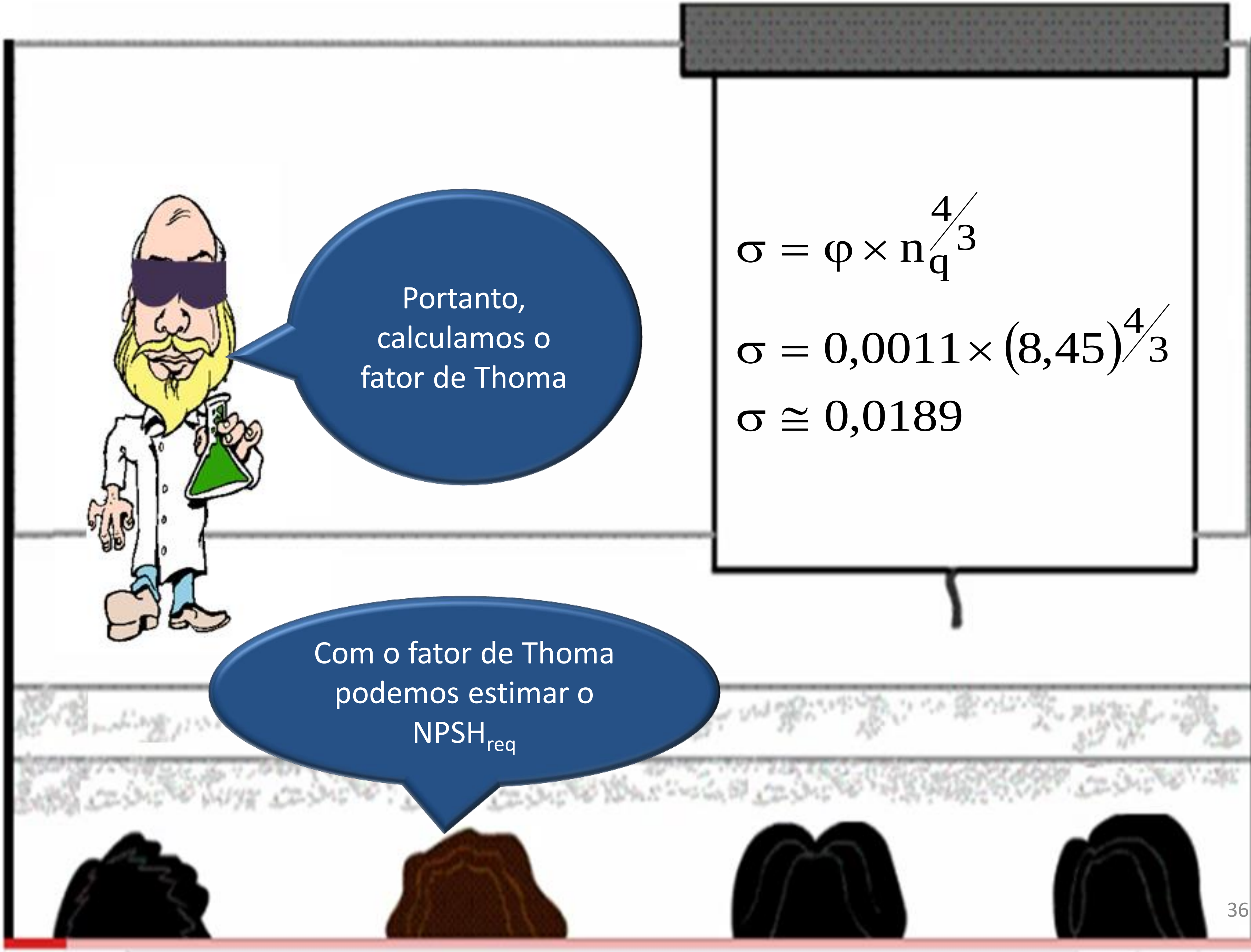
φ =0,0013→ para bombas helicoidais e hélico-axiais

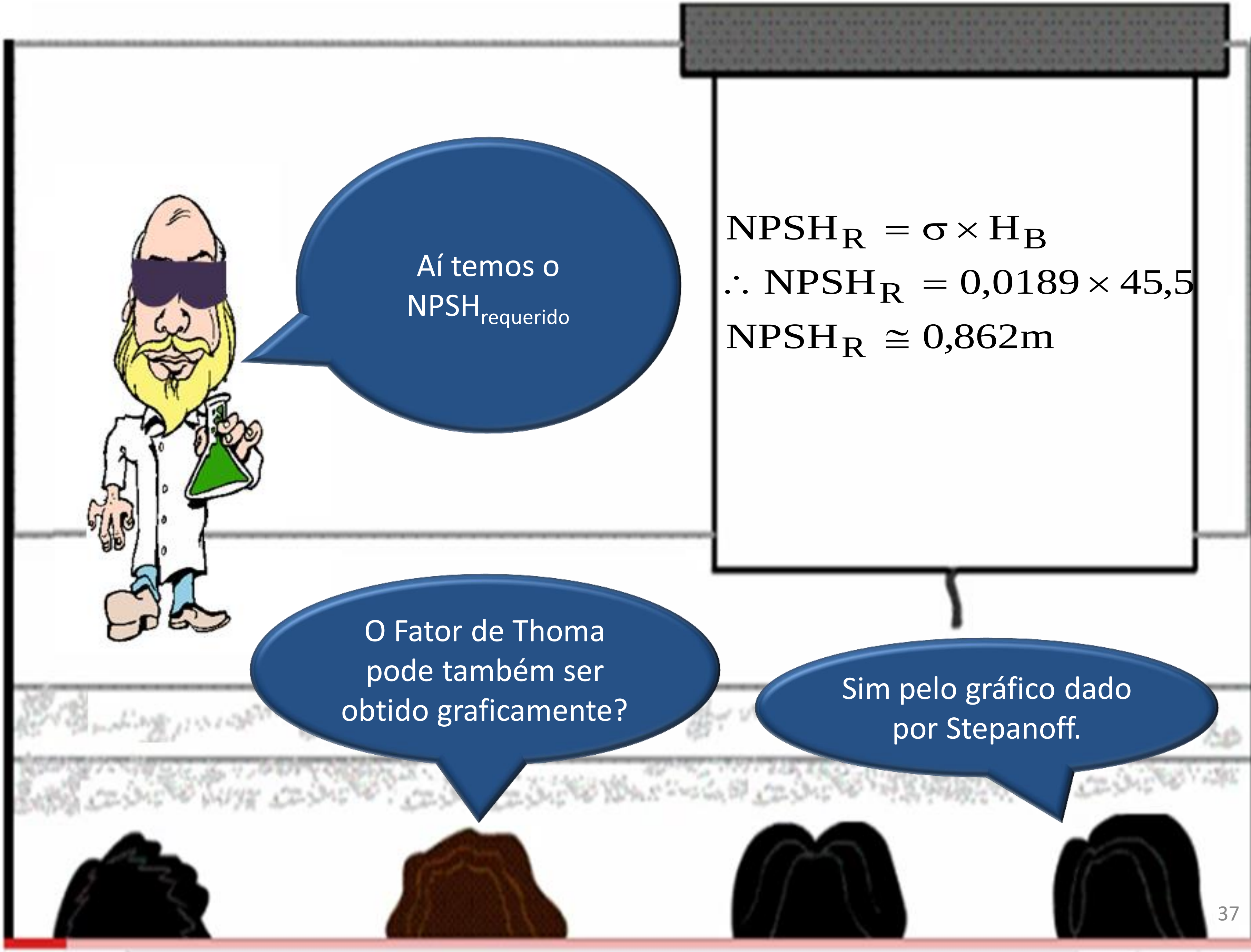
φ =0,00145→ para bombas axiais

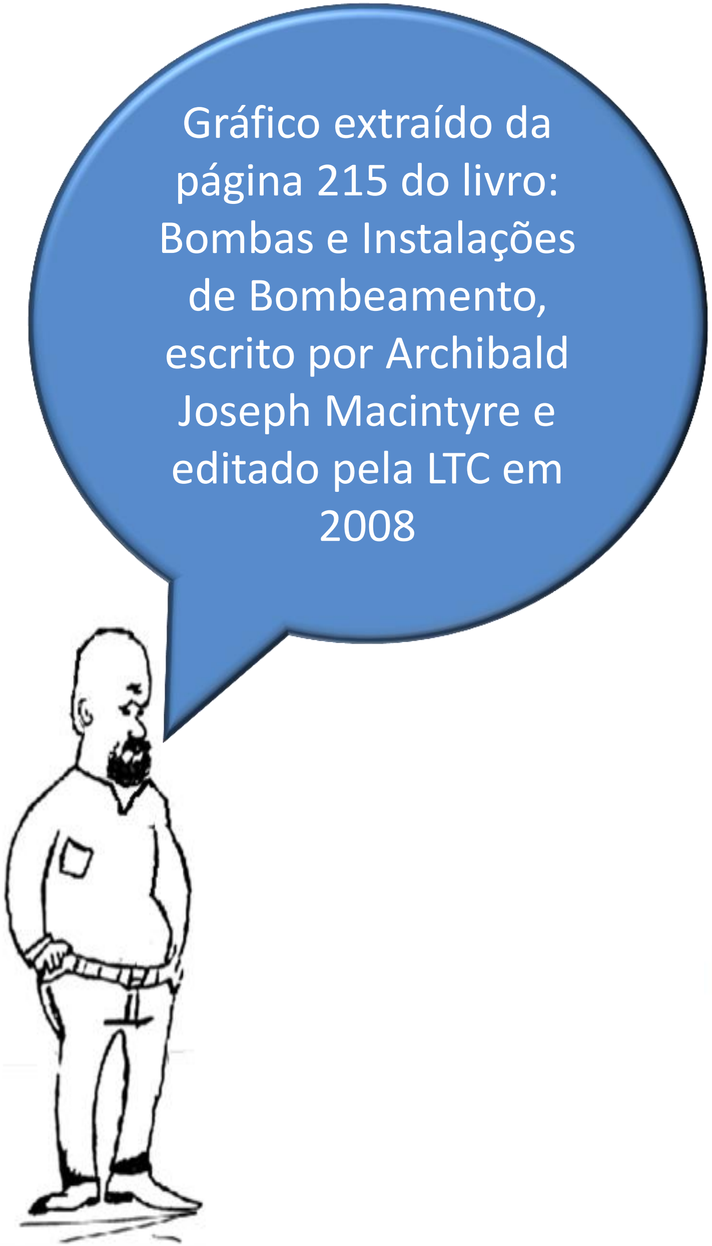


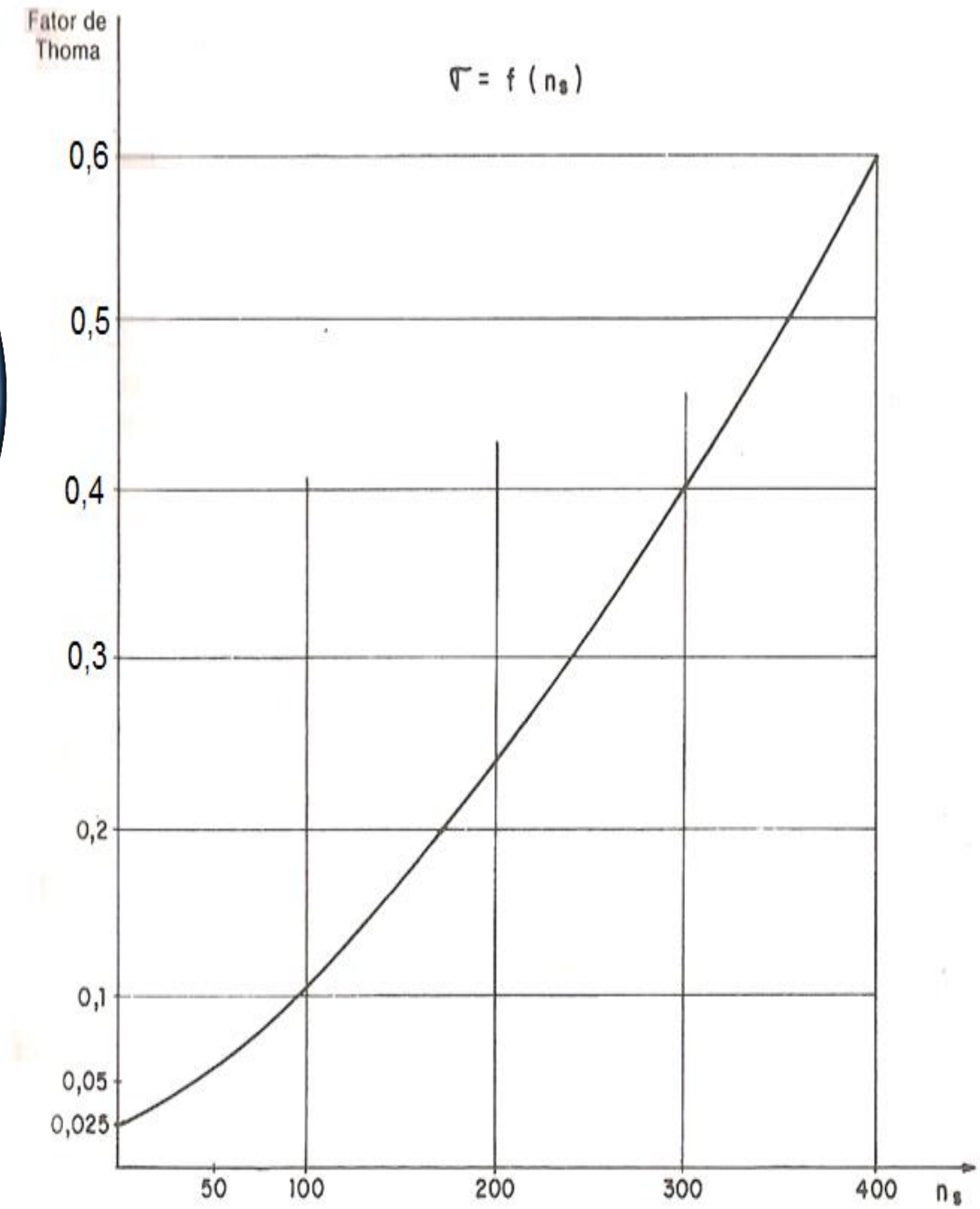
$$n_S = 3{,}65 \times 8{,}45 \cong 30{,}8\,\text{rpm}$$


$\varphi = 0{,}0011 \rightarrow$ para bombas centrífugas radiais, lentas, normais e rápidas ;
$\varphi = 0{,}0013 \rightarrow$ para bombas helicoidais e hélico-axiais
$\varphi = 0{,}00145 \rightarrow$ para bombas axiais
Portanto para o nosso caso, temos $\varphi = 0{,}0011$

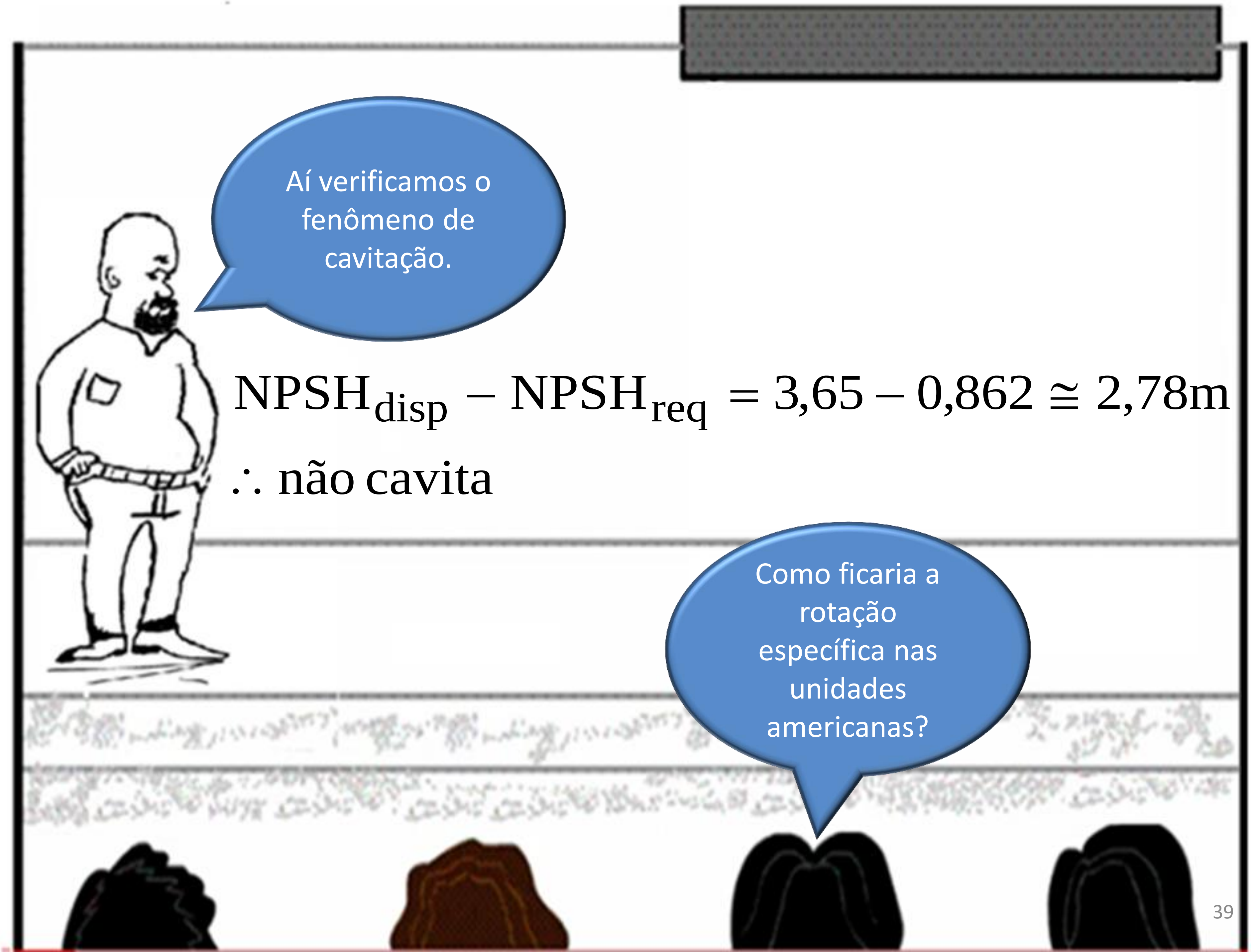

Portanto, calculamos o fator de Thoma
$\sigma = \varphi \times n_q^{4/3}$
$\sigma = 0{,}0011 \times (8{,}45)^{4/3}$
$\sigma \cong 0{,}0189$
Com o fator de Thoma podemos estimar o $NPSH_{req}$


Aí temos o $NPSH_{requerido}$
$NPSH_R = \sigma \times H_B$
$\therefore NPSH_R = 0{,}0189 \times 45{,}5$
$NPSH_R \cong 0{,}862m$
O Fator de Thoma pode também ser obtido graficamente?
Sim pelo gráfico dado por Stepanoff.





Fator de cavitação de Thoma em função da velocidade específica.



$$NPSH_{disp} - NPSH_{req} = 3{,}65 - 0{,}862 \cong 2{,}78\,\text{m}$$

$\therefore$ não cavita

As condições de semelhança originam:

$$n_q = \frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}};[n] = rpm;$$

$$[Q] = \frac{m^3}{s};[H_B] = m$$

Os norte-americanos usam U.S galão por minuto como unidade de vazão e pés para a carga manométrica, de modo que teremos que converter as unidades:

$$n_{S_{\text{métrico}}} = \frac{n_{qUSA}}{14{,}15} \Rightarrow \therefore n_{qUSA} \cong 14{,}15 \times n_{S_{\text{métrico}}}$$

Gostaria de visualizar esta relação!


Atendo o seu pedido nos próximos slide

Bomba unidade → $[Q] = 1\text{gpm}$

$[H_B] = 1\text{ft}$

$[n_{qUSA}] = \text{rpm}$

Bomba → Q

H_B

n

Condições de semelhança

$$\psi_{unidade} = \psi \Rightarrow \frac{1}{n_{qUSA}^2 \times D_{rm}^2} = \frac{H_B}{n^2 \times D_r^2} \Rightarrow \frac{D_r^2}{D_{rm}^2} = \left(\frac{n_{qUSA}}{n}\right)^2 \times \left(\frac{H_B}{1}\right) \rightarrow (I)$$

$$\phi_{unidade} = \phi \Rightarrow \frac{1}{n_{qUSA} \times D_{rm}^3} = \frac{H_B}{n \times D_r} \Rightarrow \frac{D_r^3}{D_{rm}^3} = \left(\frac{n_{qUSA}}{n}\right) \times \left(\frac{Q}{1}\right) \rightarrow (II)$$

$$(I)^3 = (II)^2 \Rightarrow \left(\frac{n_{qUSA}}{n}\right)^6 \times \left(\frac{H_B}{1}\right)^3 = \left(\frac{n_{qUSA}}{n}\right)^2 \times \left(\frac{Q}{1}\right)^2$$

$$\therefore n_{qUSA}^4 = n^4 \times \frac{\left(\frac{Q}{1}\right)^2}{\left(\frac{H_B}{1}\right)^3} \Rightarrow n_{qUSA} = n \times \frac{\sqrt[4]{\left(\frac{Q}{1}\right)^2}}{\sqrt[4]{\left(\frac{H_B}{1}\right)^3}}$$

Lembrando que: 1 gpm = 6,30902 x 10^{-5} m³/s
e que 1 ft = 0,3048 m, temos:

$$n_{qUSA} = n \times \frac{\sqrt[4]{\left(\frac{Q}{1}\right)^2}}{\sqrt[4]{\left(\frac{H_B}{1}\right)^3}} = n \times \frac{\sqrt[4]{\left(\frac{Q}{6{,}30902 \times 10^{-5}}\right)^2}}{\sqrt[4]{\left(\frac{H_B}{0{,}3048}\right)^3}}$$

$$n_{q_{USA}} = n \times \frac{\sqrt[4]{\left(\frac{Q}{6{,}30902 \times 10^{-5}}\right)^2}}{\sqrt[4]{\left(\frac{H_B}{0{,}3048}\right)^3}} = \frac{125{,}8980629}{2{,}437747827} \times n \times \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}}$$

$$n_{q_{USA}} \cong 51{,}64523643 \times n \times \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}} \cong 51{,}64523643 \times n_{q_{métrico}}$$

$$n_S = 3{,}65 \times n_{q_{métrico}} \therefore n_{q_{métrico}} = \frac{n_S}{3{,}65}$$

$$n_{q_{USA}} \cong \frac{51{,}64523643}{3{,}65} \times n_{q_{métrico}} \cong 14{,}15 \times n_{S_{métrico}} \rightarrow \text{cqd}$$