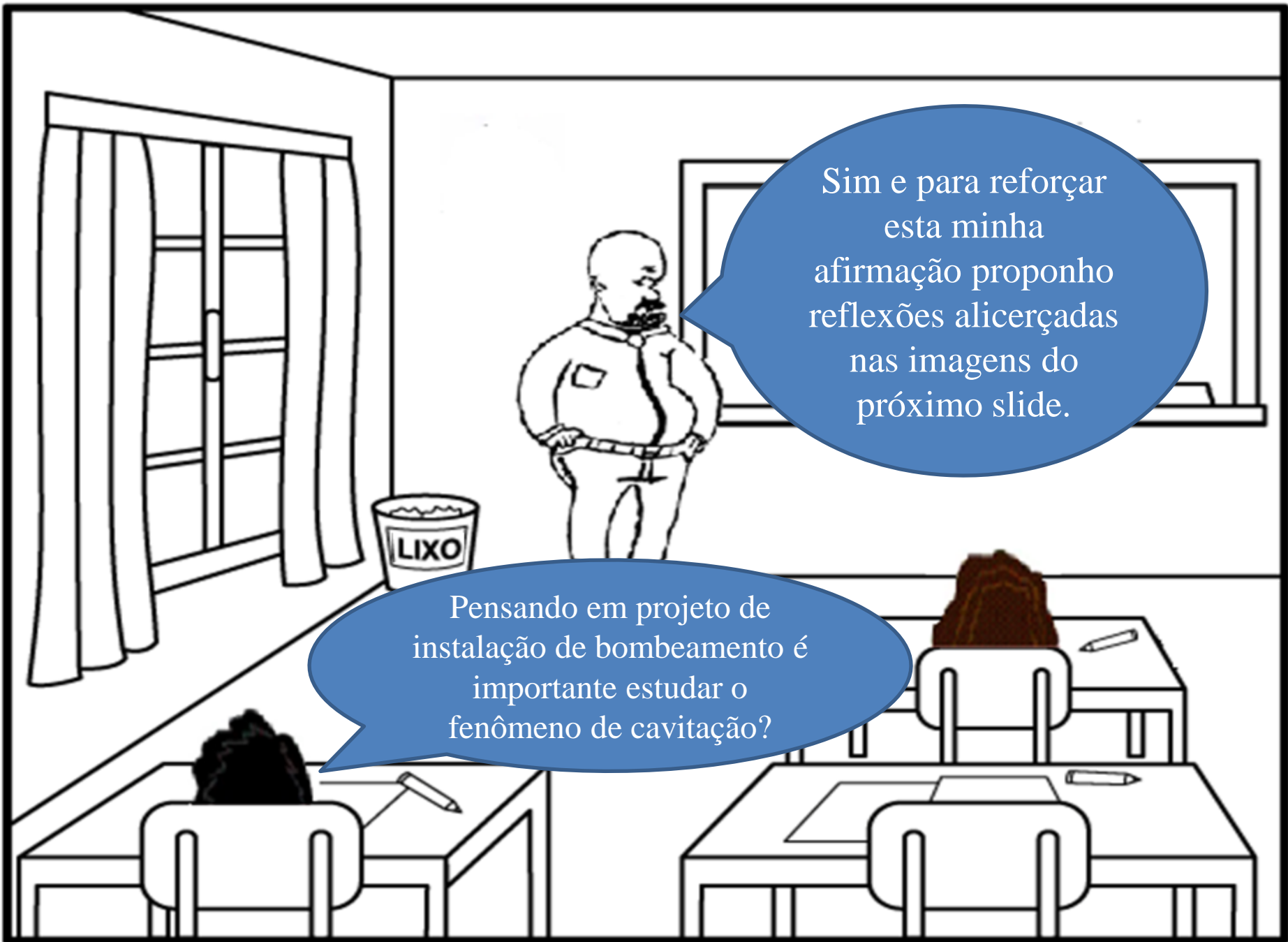


Aula 10 de laboratório de ME5330

Experiência relacionada à cavitação





Sim e para reforçar esta minha afirmação proponho reflexões alicerçadas nas imagens do próximo slide.

Pensando em projeto de instalação de bombeamento é importante estudar o fenômeno de cavitação?

A figura a seguir foi extraída da dissertação apresentada por Welington Ricardo Coelho para obtenção do título de mestre em engenharia mecânica junto a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho no capítulo de revisão bibliográfica página 7.

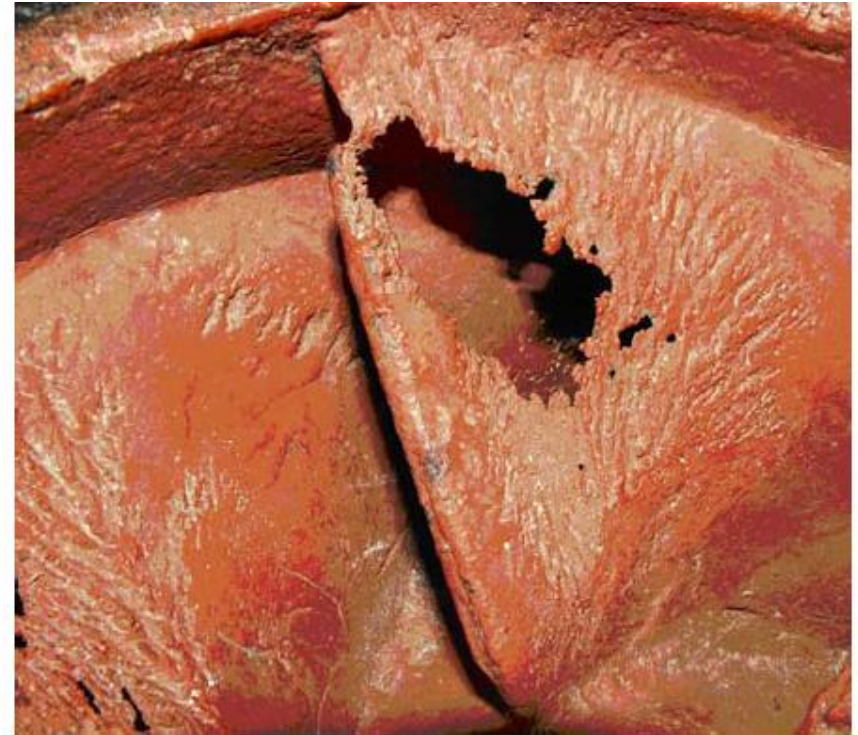
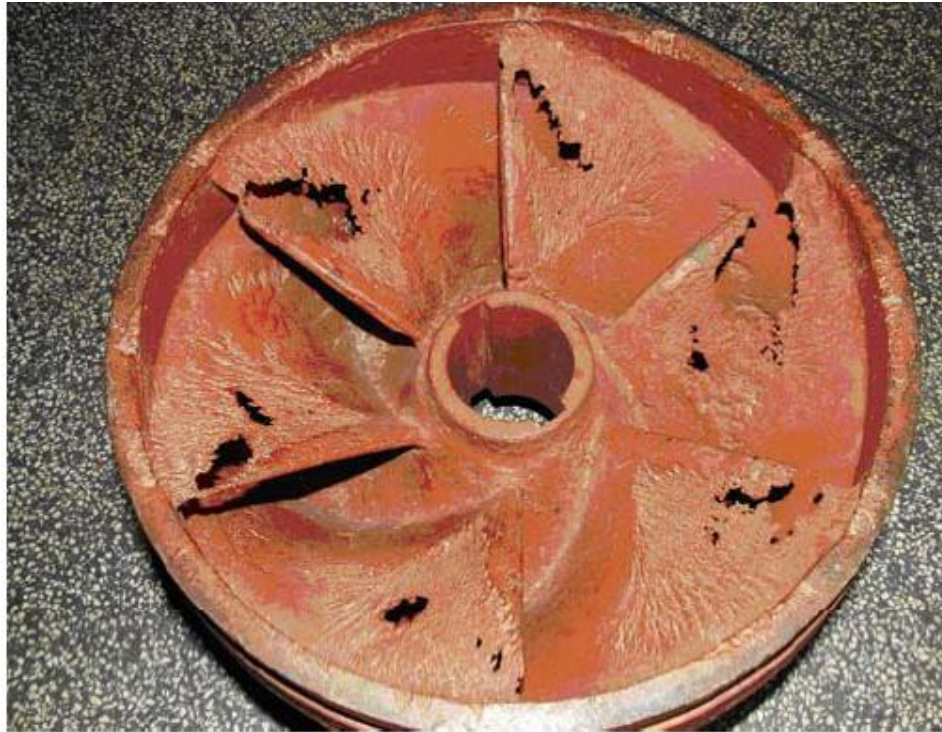
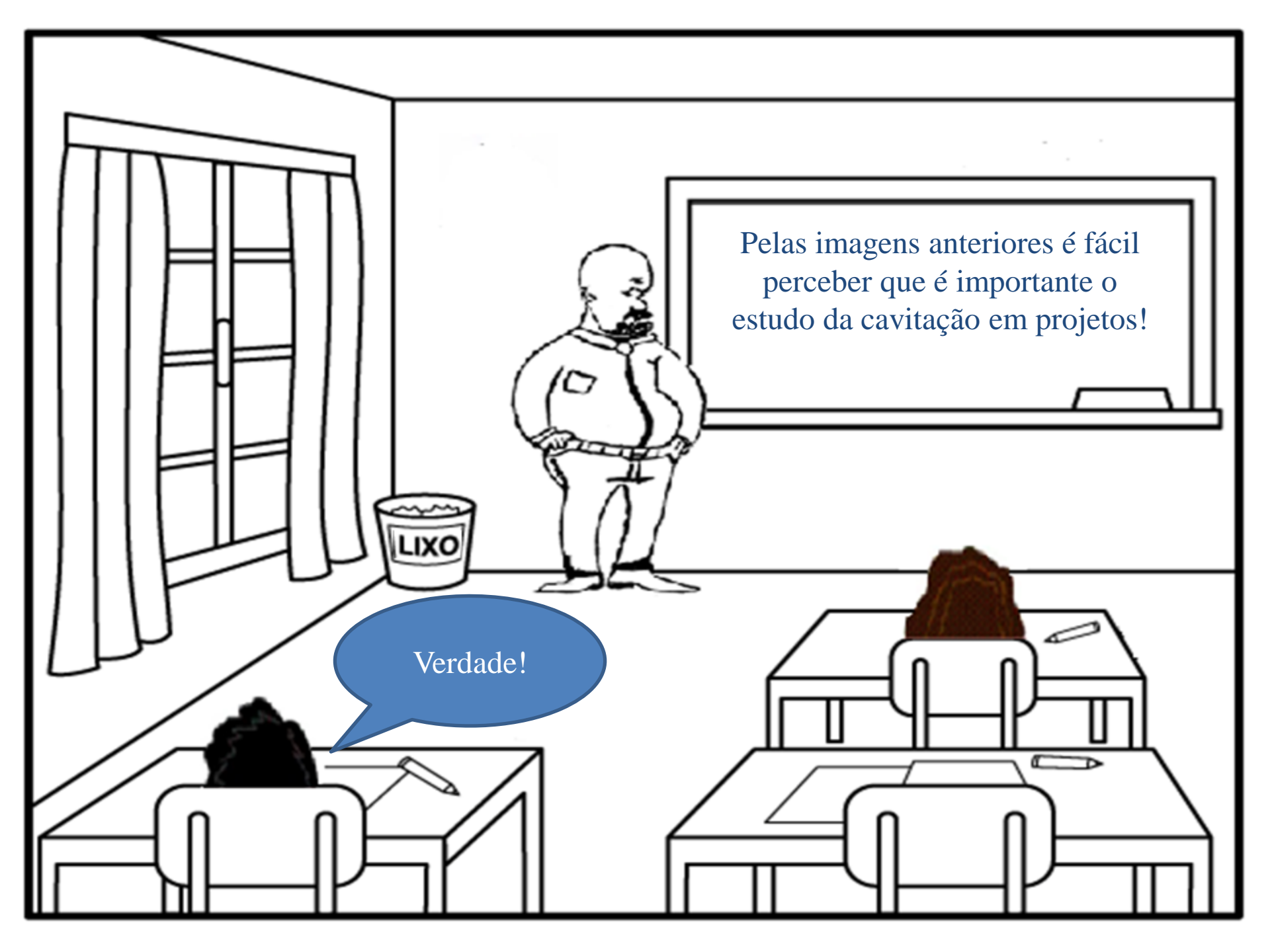
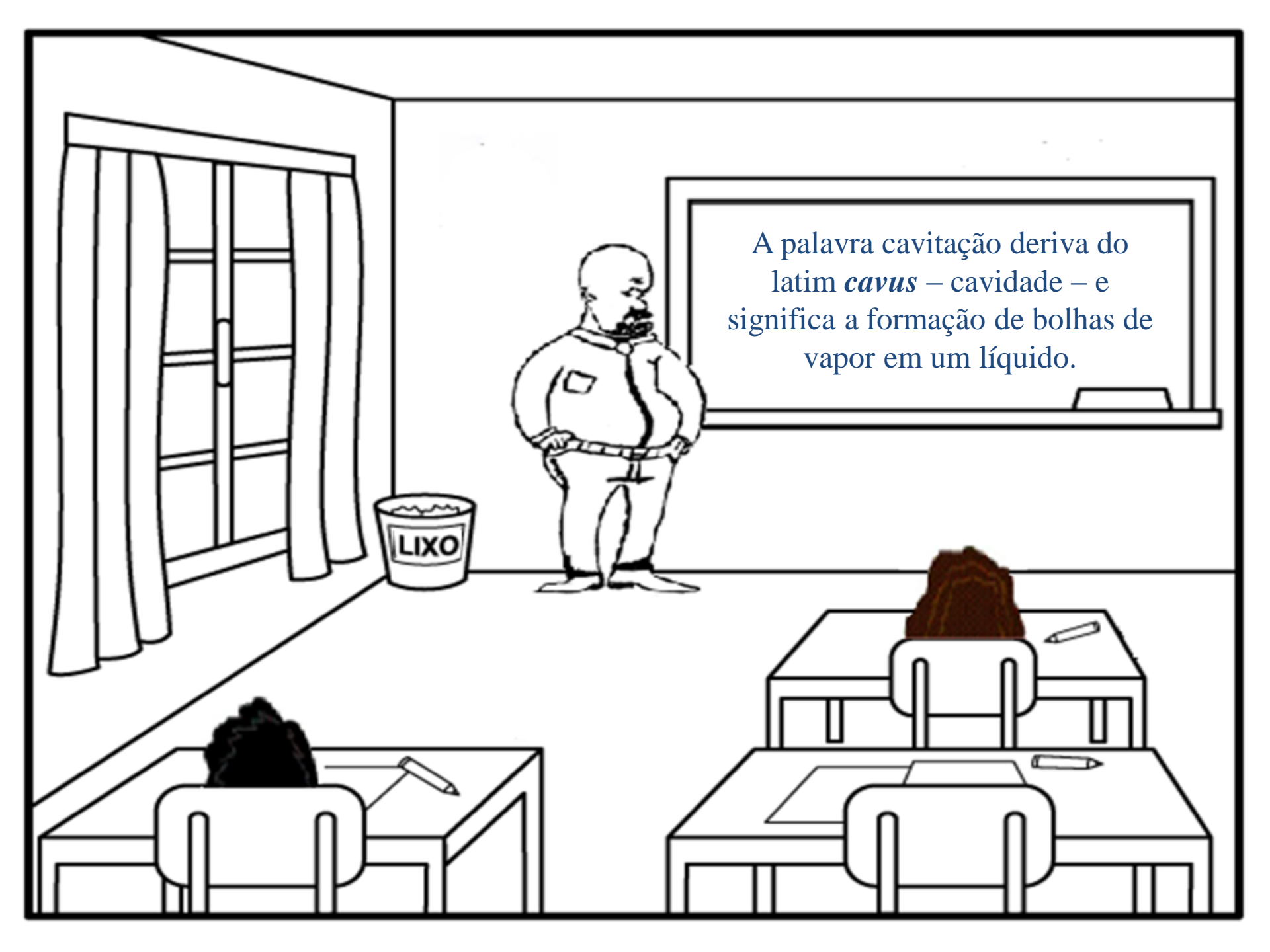


Figura 1.3 – Rotor de bomba centrífuga danificado pela cavitação.



Pelas imagens anteriores é fácil
perceber que é importante o
estudo da cavitação em projetos!

Verdade!



A palavra cavitação deriva do latim *cavus* – cavidade – e significa a formação de bolhas de vapor em um líquido.

Em toda região onde temos um grande aumento de energia cinética e em consequência uma grande redução da energia de pressão este fenômeno pode ser observado, já que podemos atingir pressões menores ou iguais a pressão de vapor.

É o caso da bancada utilizada em nosso laboratório e que é mostrada nos próximos slides.



CAVITATION APPARATUS



THROAT AREA= 36.34
UPSTREAM AREA= 164.89
SAGGE HEIGHT CORRECTION=182.5mm
FLOW ←



Venturi

CAVITATION APPARATUS

armfield



THROAT AREA = 36.24
UPSTREAM AREA = 44.89
GAUGE HEIGHT CORRECTION = 0.25 mm
FLOW ←

The equipment is to be used only with water with the maximum temperature of 20°C. Students using the apparatus must be properly supervised. The use of petroleum products, flammable liquids, acids or alkalis is prohibited. See the instruction leaflet for details.



Área mínima = A_2

Área máxima = A_1

THROAT AREA= 36.34mm²

UPSTREAM AREA= 144.89 mm²

GAUGE HEIGHT CORRECTION=162.5mm

FLOW





CE armfield

QAT. REF. F10

SERIAL No. 11557-2

INSPECTED BY WJ

AOE 24 REV 2

Manômetro que lê a pressão na seção de aproximação do Venturi = p_1





Vacuômetro que lê a pressão na garganta do Venturi = p_2

THROAT AREA= 36.34
UPSTREAM AREA= 144.89
GAUGE HEIGHT CORRECTION
FLOW ←

Nas regiões de menor pressão, forma-se pequenas bolsas, bolhas ou cavidades, onde o líquido se vaporiza. Em seguida, as bolhas de vapor são conduzidas pelo fluxo líquido atingindo regiões de pressão mais elevada, onde se processa o seu colapso (dimensões se reduzem bruscamente e o líquido circundante se desloca para o seu interior ocorrendo a condensação). Para exemplificar o mencionada observe a figura a seguir e que foi extraída de uma palestra da KSB proferida pelo Engenheiro Carlos.

CAVITAÇÃO



Intensa formação de bolhas de vapor na zona de baixa pressão e posterior colapso destas bolhas na região de alta pressão.

Eng° Tiago Rafael Niero
Instrutor Técnico
tiago.niero@ksb.com.br

CONSEQÜÊNCIAS DA CAVITAÇÃO

- Barulho e vibração
- Alteração na performance da bomba
- "Pitting" das palhetas do rotor

Eng° Carlos Guilherme Chachá
Eng° de Produção
carlos.chachá@ksb.ind.br



As informações a seguir foram extraídas da dissertação apresentada por Welington Ricardo Coelho.

As superfícies metálicas onde se chocam as pequenas porções de líquido resultantes da condensação são submetidas a atuação de forças complexas, oriundas da energia liberada dessas partículas, desagregando elementos de material de menor coesão, formando pequenos depressões. O prosseguimento desse fenômeno estabelece um aspecto esponjoso, rendilhado e corroído à superfície. É a erosão por cavitação. O desgaste pode assumir proporções tais que pedaços de material podem soltar-se das peças. Cada bolha de vapor assim formada tem um ciclo entre crescimento e colapso, da ordem de poucos milésimos de segundo e induz altíssimas pressões que atingem concentradamente a região afetada. Para se ter idéia desse processo, Grein & Wyss, (1974) e Knapp *et al.*, (1970) mencionam que este ciclo é repetido numa frequência que pode atingir a ordem de 25.000 bolhas por segundo e que a pressão provavelmente transmitida às superfícies metálicas adjacentes ao centro de colapso das bolhas pode atingir 1000 atm.

Um outro aspecto que merece atenção é que, tendo em vista o caráter cíclico do fenômeno, as ações mecânicas repetidas na mesma região metálica ocasionam um aumento local de temperatura de até 800°C.

Pode-se dividir a cavitação em quatro (4) níveis distintos e que segundo Ball e al. (1975) são:

1^o – cavitação incipiente;

2^o – cavitação crítica;

3^o – cavitação com perigo incipiente;

4^o – cavitação plenamente estabelecida.

Para as vazões pequena ainda teríamos o que é denominado de *cavitação pulsante* e que geralmente gera a *recirculação*.

Esta pulsação geralmente tem uma frequência de 2 a 10 Hz e ela pode existir sempre que se tem baixos gradientes de pressão.

A recirculação no caso de bomba é mostrada na figura a seguir e que foi também extraída da dissertação de Welington Ricardo Coelho.

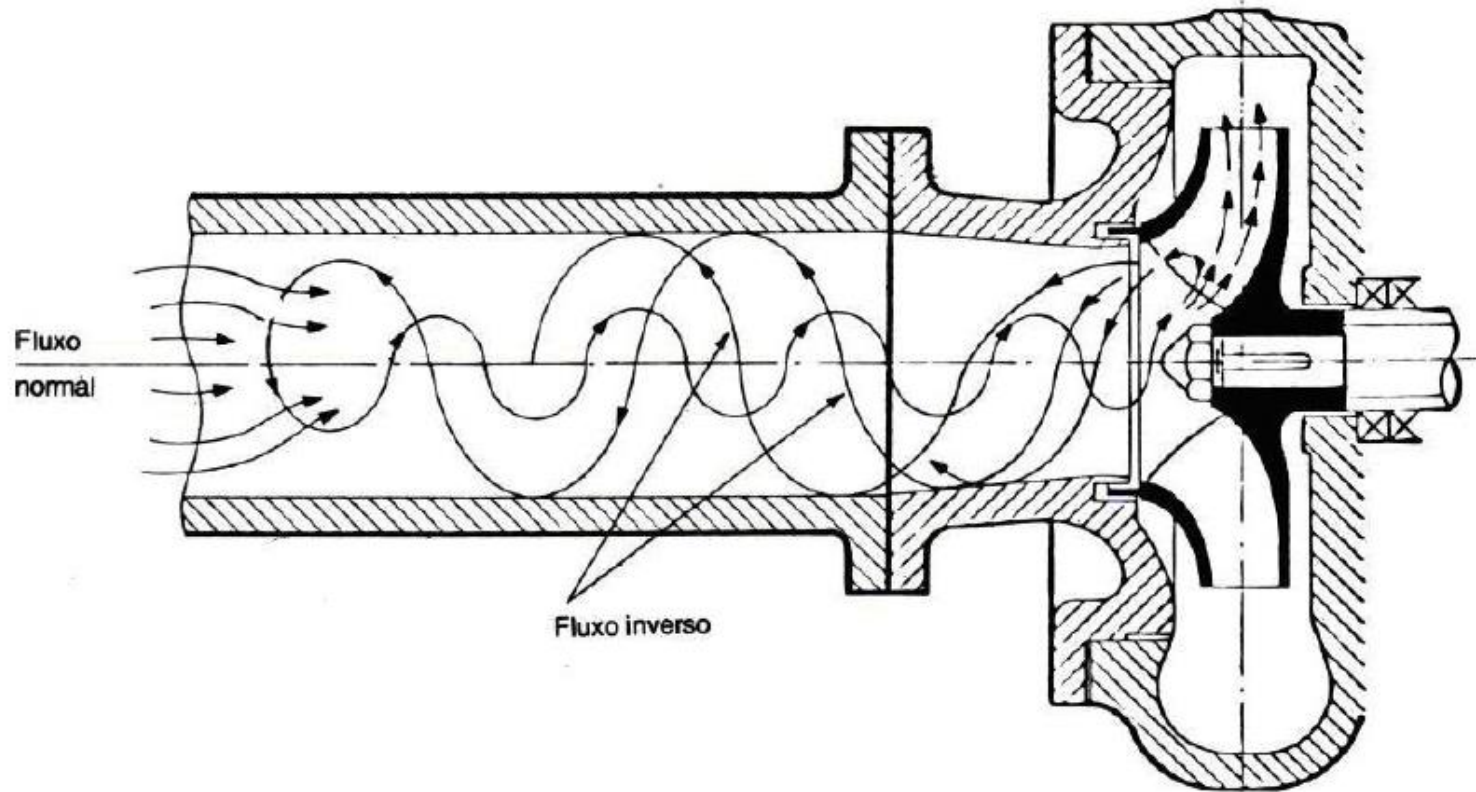


Figura 2.2 – Fluxo em sentido inverso na entrada de sucção para vazões bem inferiores à de projeto. (Mattos e Falco, 1998).

O parâmetro de avaliação dos efeitos de cavitação mais tradicional é denominado de número (ou fator) de Thoma (σ), ou também conhecido como coeficiente de cavitação, que é o parâmetro adimensional quantitativo do fenômeno.

O número de Thoma mede a resistência à ocorrência da cavitação. Quanto maior for (σ) menor será a possibilidade da ocorrência da cavitação. Se o número de Thoma diminui por decréscimo da pressão estática ou por aumento da velocidade do escoamento, o fenômeno passa a ter uma maior probabilidade de ocorrência.

Para bombas centrífugas o fator de Thoma é obtido em função da rotação (ou velocidade) nominal (n_q).

$$n_q = \frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}} \therefore n_S = 3,65 \times n_q \rightarrow n_S = \text{rotação específica}$$

$$N_q = \frac{n \sqrt{Q_{opt}}}{H^{3/4}}$$

 **Vazão (m³/s)**

 **Altura manométrica (m)**

 **Rotação (rpm)**

$$\sigma = \varphi \times n_q^{4/3} = \varphi \times \left(\frac{n \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_B^3}} \right)^{4/3}$$

e

$$\text{NPSH}_{\text{requerido}} = \sigma \times H_B$$

$\varphi = 0,0011 \rightarrow$ para bombas centrífugas radiais, lentas e normais ;

$\varphi = 0,0013 \rightarrow$ para bombas helicoidais e hélico-axiais

$\varphi = 0,00145 \rightarrow$ para bombas axiais

O fator de
Thoma também
pode ser obtido
graficamente.



O gráfico a seguir foi extraído da dissertação apresentada por Welington Ricardo Coelho.

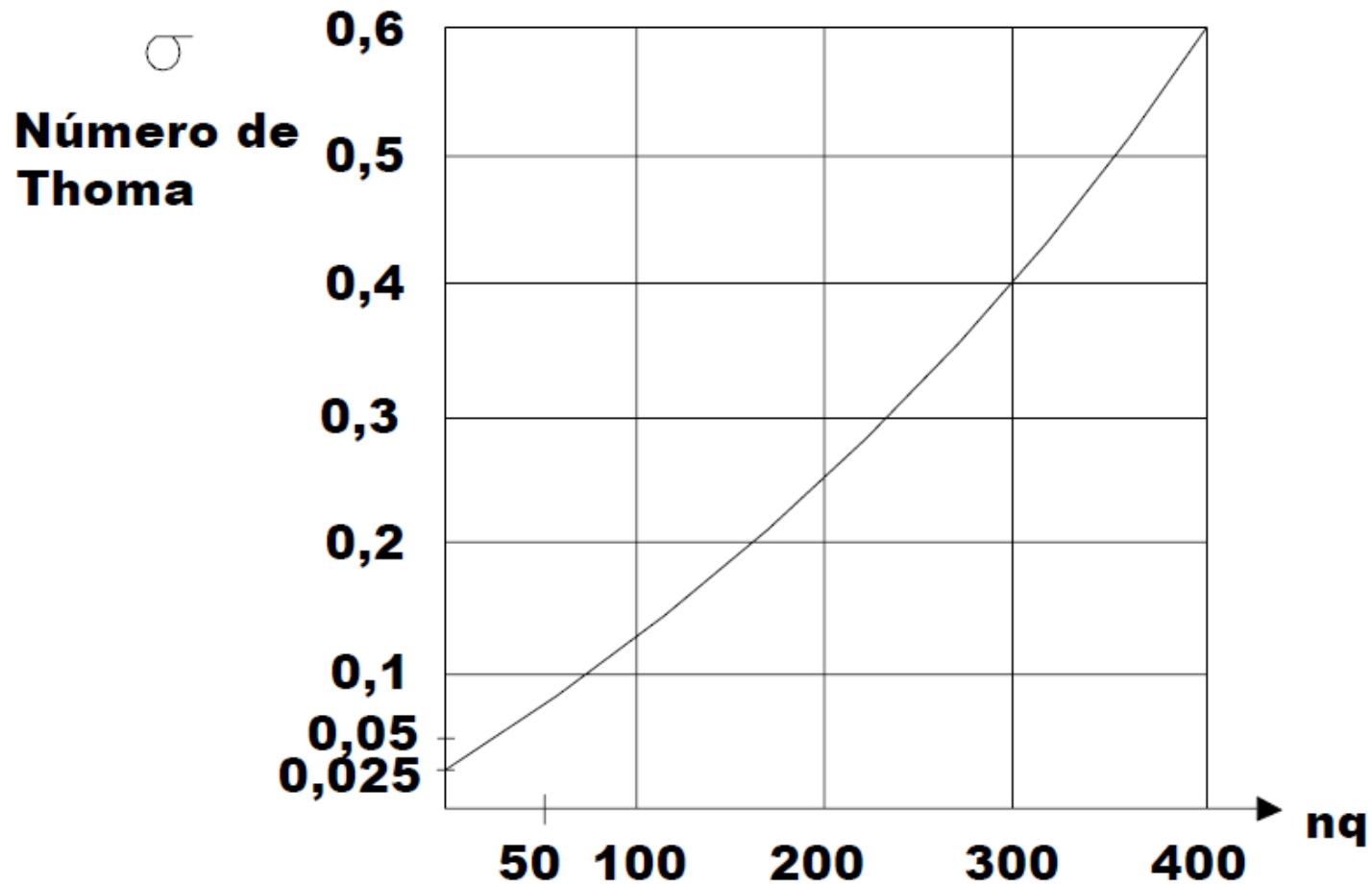
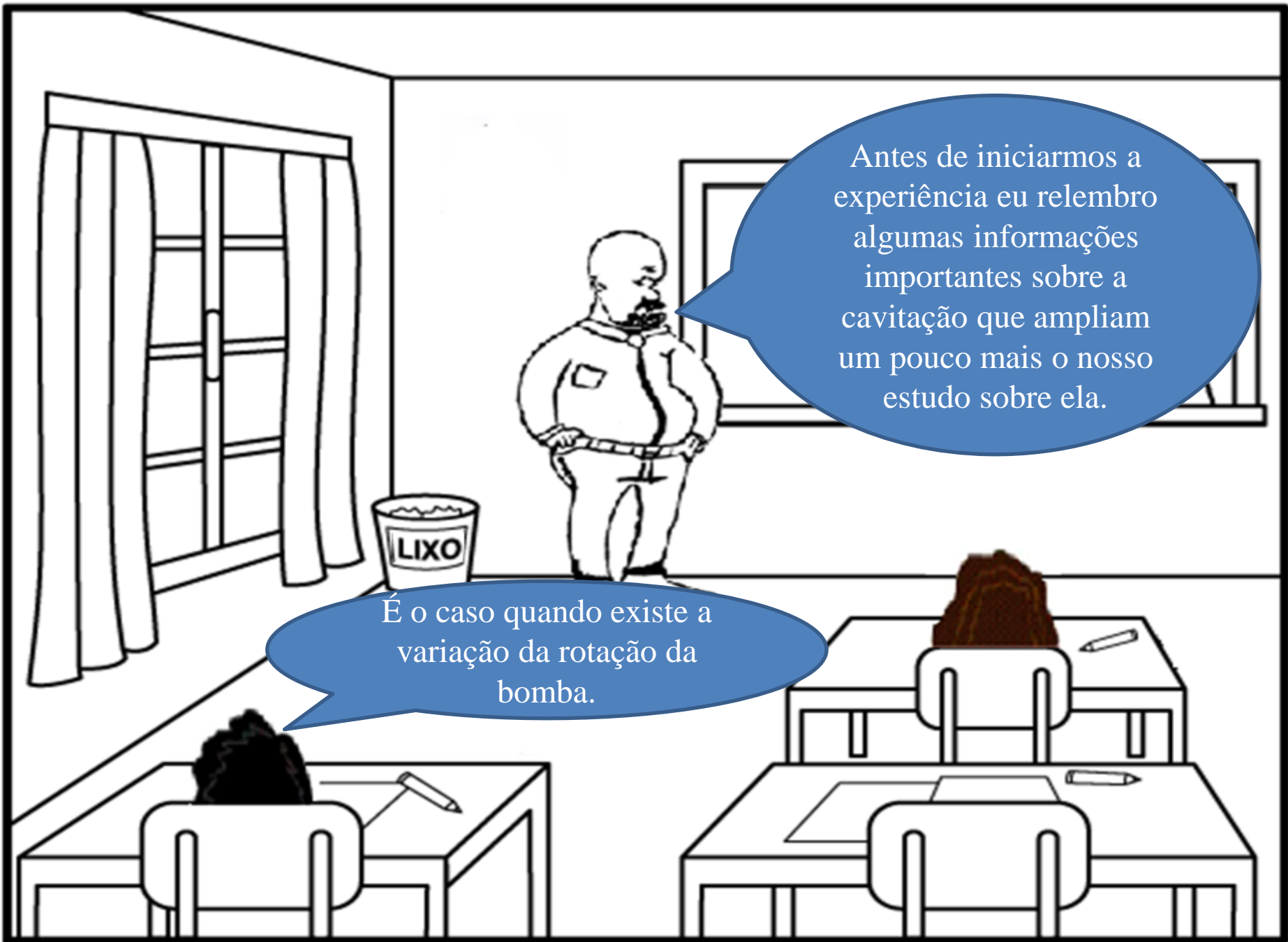


Figura 2.3 – Curva do Fator de Thoma (σ) \times Velocidade Específica (n_q) (Mattos e Falco, 1998).



Antes de iniciarmos a experiência eu relembro algumas informações importantes sobre a cavitação que ampliam um pouco mais o nosso estudo sobre ela.

É o caso quando existe a variação da rotação da bomba.

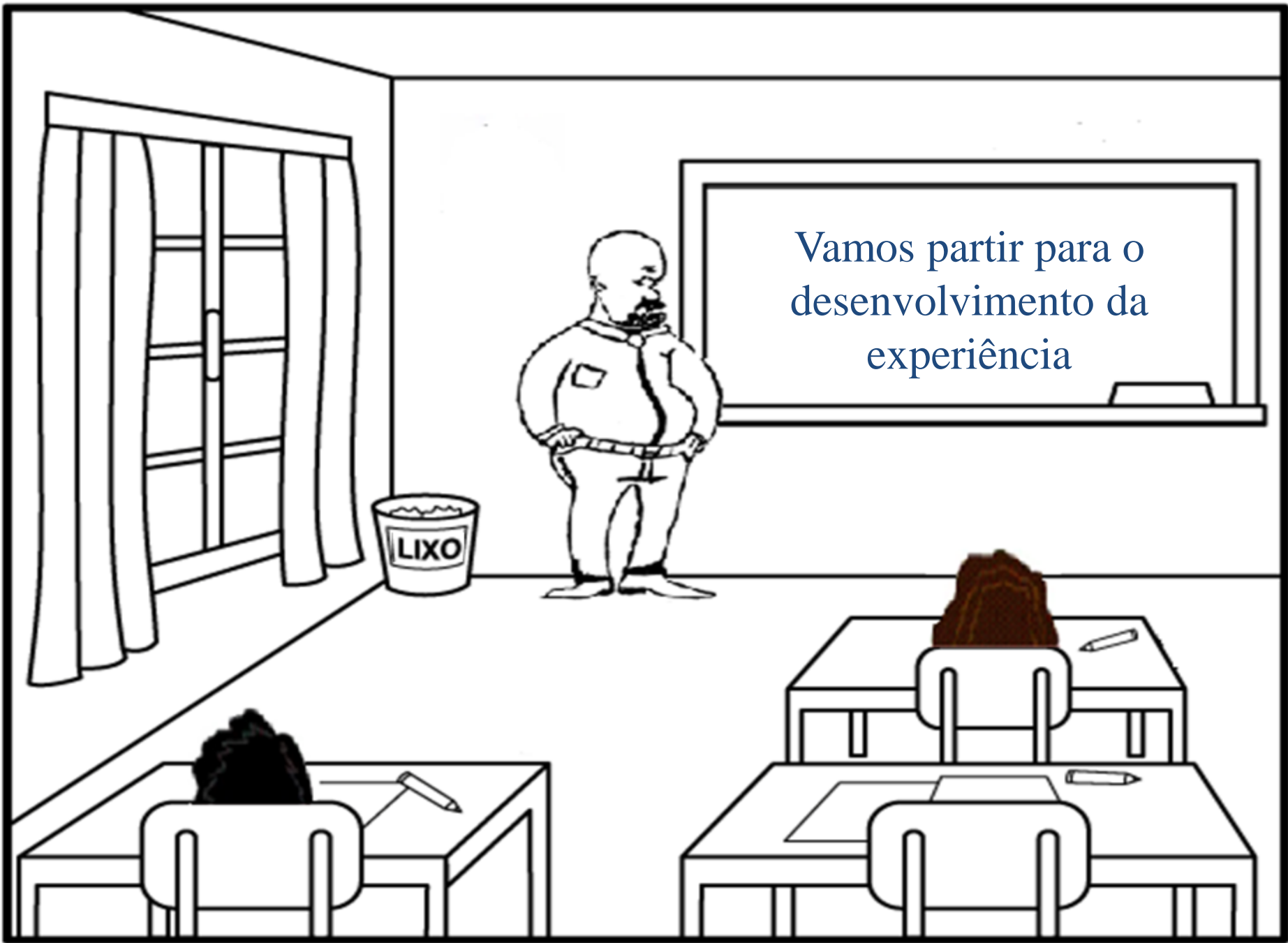
Esta é uma primeira dificuldade que surge quando trabalhamos com rotações diferentes da fornecida pelo fabricante.

Consultando fabricantes de bomba é comum eles sugerirem a expressão:

$$\text{NPSH}_{\text{requerido}_n} = \text{NPSH}_{\text{requerido}_{n_1}} \times \left(\frac{n}{n_1} \right)^2$$

Este procedimento também é apresentado pelas normas técnicas especializadas, mas é apenas indicado para se efetuar o ajuste das curvas do $\text{NPSH} = f(Q)$ para quando as variações da rotação se limitam a 3%, ou seja:

$$0,97 \leq \frac{n}{n_1} \leq 1,03$$



Vamos partir para o desenvolvimento da experiência

LIXO





CAVITATION APPARATUS



6

Objetivos:

1. Calcular a perda de carga no venturi em função do coeficiente de vazão ou o coeficiente de velocidade;
2. Obtenção do coeficiente de perda de carga singular do venturi;
3. Visualizar o fenômeno de cavitação e comparar o número de cavitação teórico na condição de cavitação;
4. Estimar o $NPSH_{\text{requerido}}$.

Legal!



Como calcular a perda no venturi?



$$K_S = \left(\frac{1}{C_d^2} - 1 \right) \times \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)$$

aplicado à v_2

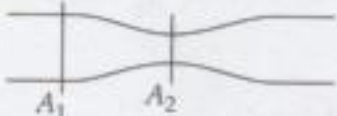
$$h_S = K_S \times \frac{v_2^2}{2g}$$

É uma perda de carga singular!



Consultando o livro: Mécanique des Fluides Appliquée pg 107, temos:



Venturi :	
	$\left[\frac{1}{C_v^2} - 1 \right] \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]$
	applicable à v_2

Neste experimento
objetivamos também
calcular o número de
cavitação que é um número
adimensional e que é
utilizado para caracterizar o
potencial do escoamento em
gerar a cavitação.



$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho v^2}, \text{ onde :}$$


σ → número de cavitação

p → pressão estática no escoamento não perturbado (Pa)

p_v → pressão de vapor do fluido (Pa)

ρ → massa específica do fluido (kg/m³)

v → velocidade média do escoamento (m/s)



O número de cavitação pode ser considerado como a razão entre a pressão estática líquida disponível para colapsar a bolha com a pressão dinâmica disponível para iniciar a formação da bolha.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:

1. Comece abastecimento de água na vazão mínima e vá abrindo a válvula muito lentamente para não danificar os ponteiros dos manômetro metálicos (manômetro na área máxima e vacuômetro na área mínima).
2. Regule a vazão de água através da secção de teste com o auxílio da válvula instalada a montante da área máxima do Venturi.
3. Determine vazão de água de forma direta no tanque da bancada 7.
4. Para cada vazão anote a pressão na seção máxima (p_1) e na seção mínima (p_2) do Venturi.

Equacionamento

1. Determinação das áreas (A_1 e A_2)
2. Cálculo do número teórico da cavitação

$$\sigma_t = \frac{p_1 - p_v}{\frac{1}{2} \rho v_2^2}$$

3. Cálculo do número experimental da cavitação

$$\sigma_{\text{exp}} = \frac{p_1 - p_2}{\frac{1}{2} \rho v_2^2}$$

4. Cálculo da vazão

$$Q = \frac{\Delta h \times A_t}{t}$$

Equacionamento (continuação)

1. Determinação das velocidades

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} \rightarrow v_2 = \frac{Q}{A_2}$$

Aí é construir
a tabela de
dados e
resultados



THROAT AREA= 36.34mm²
UPSTREAM AREA= 144.89 mm²
GAUGE HEIGHT CORRECTION=162.5mm
FLOW ←

Tabela de dados:

Só depois que cavitatar

Ensaio	P_{m1} (bar)	P_{m2} (bar)	Δh (mm)	t (s)	P_{maB} (mmHg)	P_{mdB} (kPa)	n (rpm)
1	0,1						
2	0,15						
3	0,20						
4	0,25						
5	0,30						
6	0,35						
7	0,40						
8	0,45						

Ensaio	Q_{REAL} (m ³ /s)	$Q_{\text{TEÓRICA}}$ (m ³ /s)	Cd	Ks	v_2 (m/s)	σ_t	σ_{exp}	v_{eB} (m/s)	v_{dB} (m/s)	H_B (m)	$\text{NPSH}_{\text{reqexp}}$ (m)
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											

Condição teórica para a cavitação, $\sigma_t > \sigma_{\text{exp}}$