


Nona aula de laboratório de ME5330


Primeiro semestre de 2015



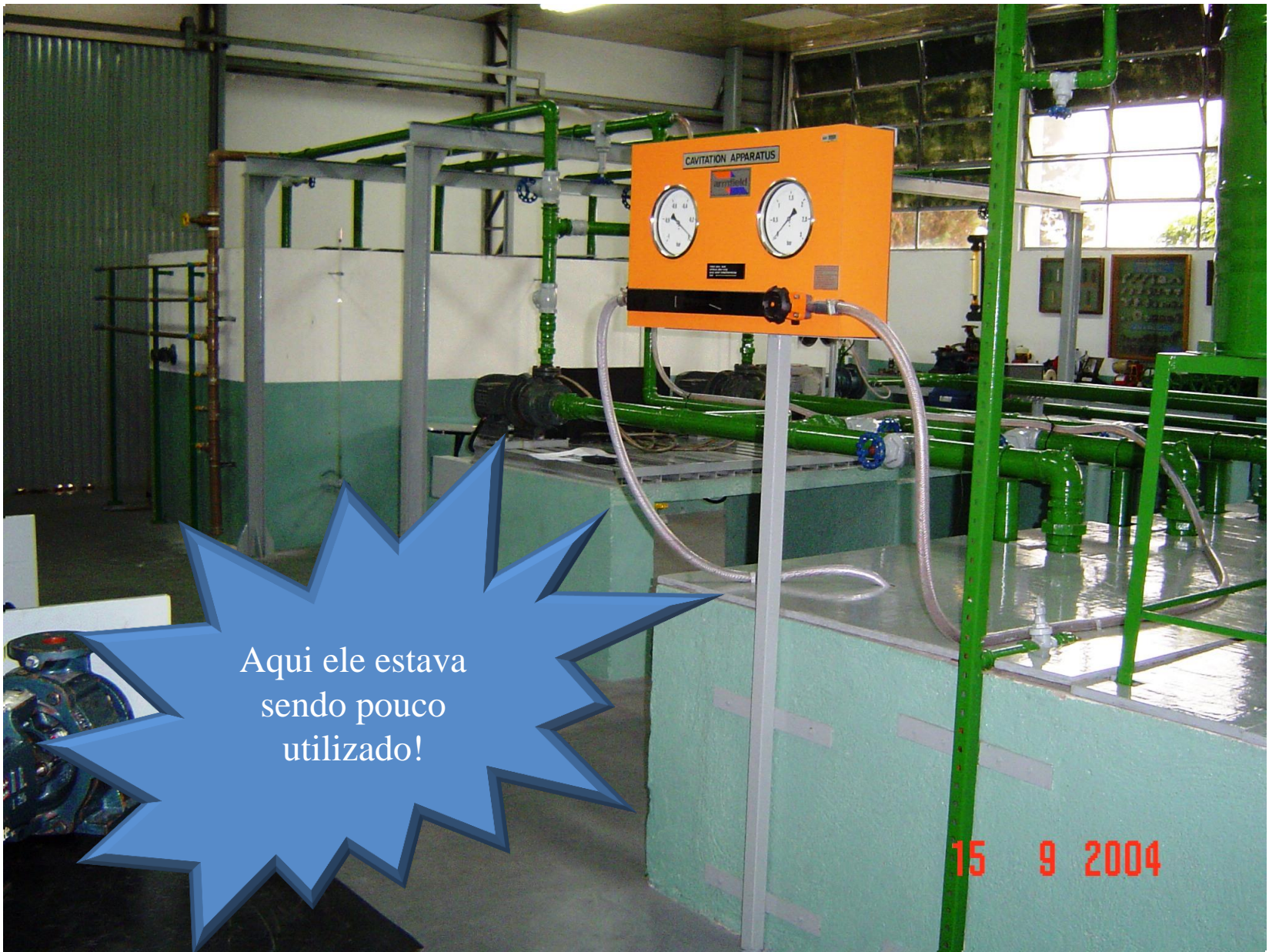
Por eles tenho que ter força e coragem
para participar da construção de um
mundo melhor!



A experiência
possibilitará a
visualização da cavitação
através de um venturi e
evocar e ampliar a
experiência dos
medidores de vazão.



Achei o venturi para
esta visualização no
laboratório da
mecânica!




Aqui ele estava
sendo pouco
utilizado!

15 9 2004

Pedi a sua transferência para a sala IS01, laboratório utilizado para a disciplina de mecânica dos fluidos para engenharia química.

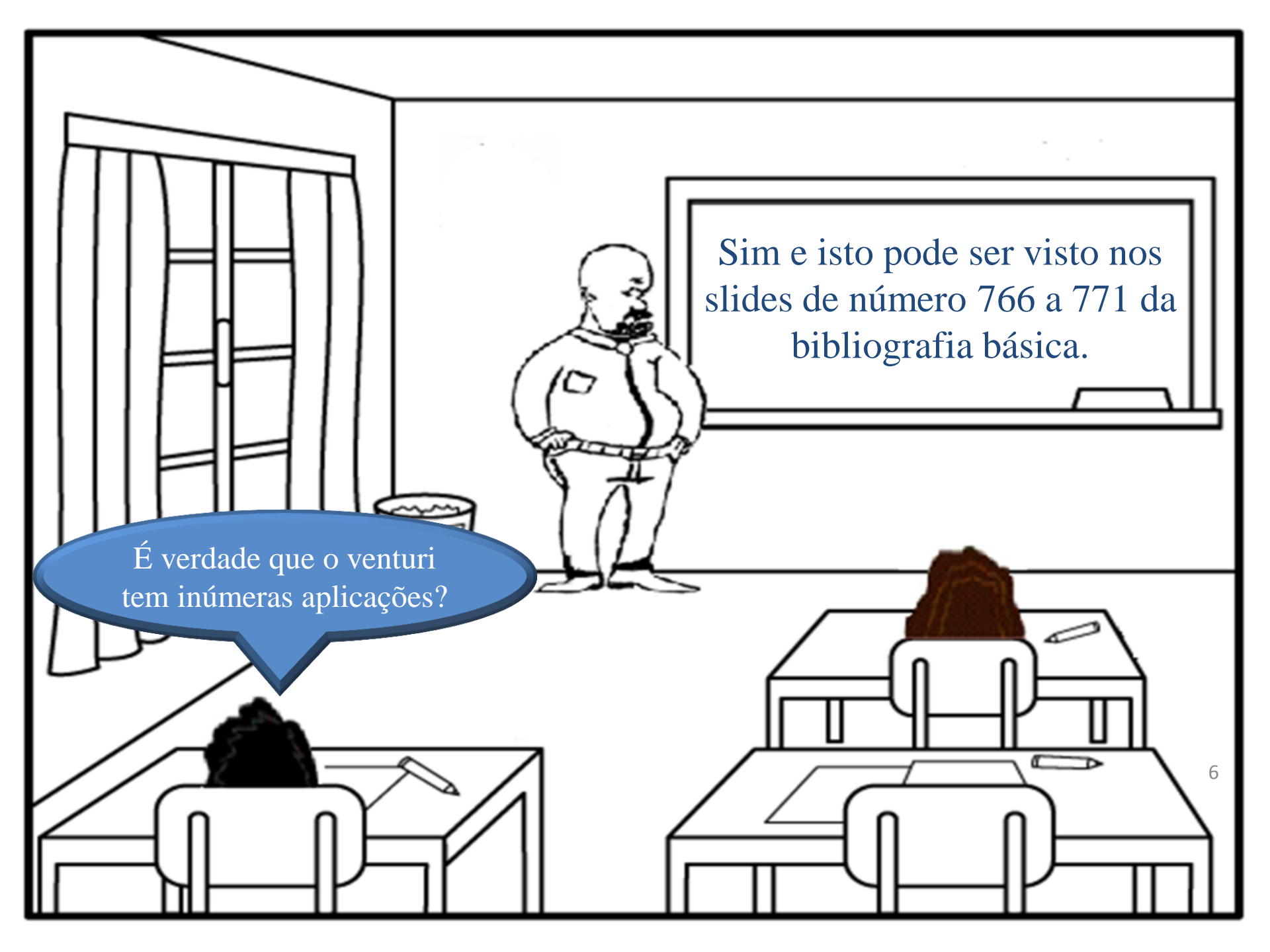
E aqui passou a ser utilizada para o laboratório da disciplina ME5330.



A black and white line drawing of a classroom. A teacher with a beard and a white shirt stands at the front of the room, looking towards the students. There are three desks with chairs, each with a student's head visible. A window with curtains is on the left. Two blue speech bubbles contain text.

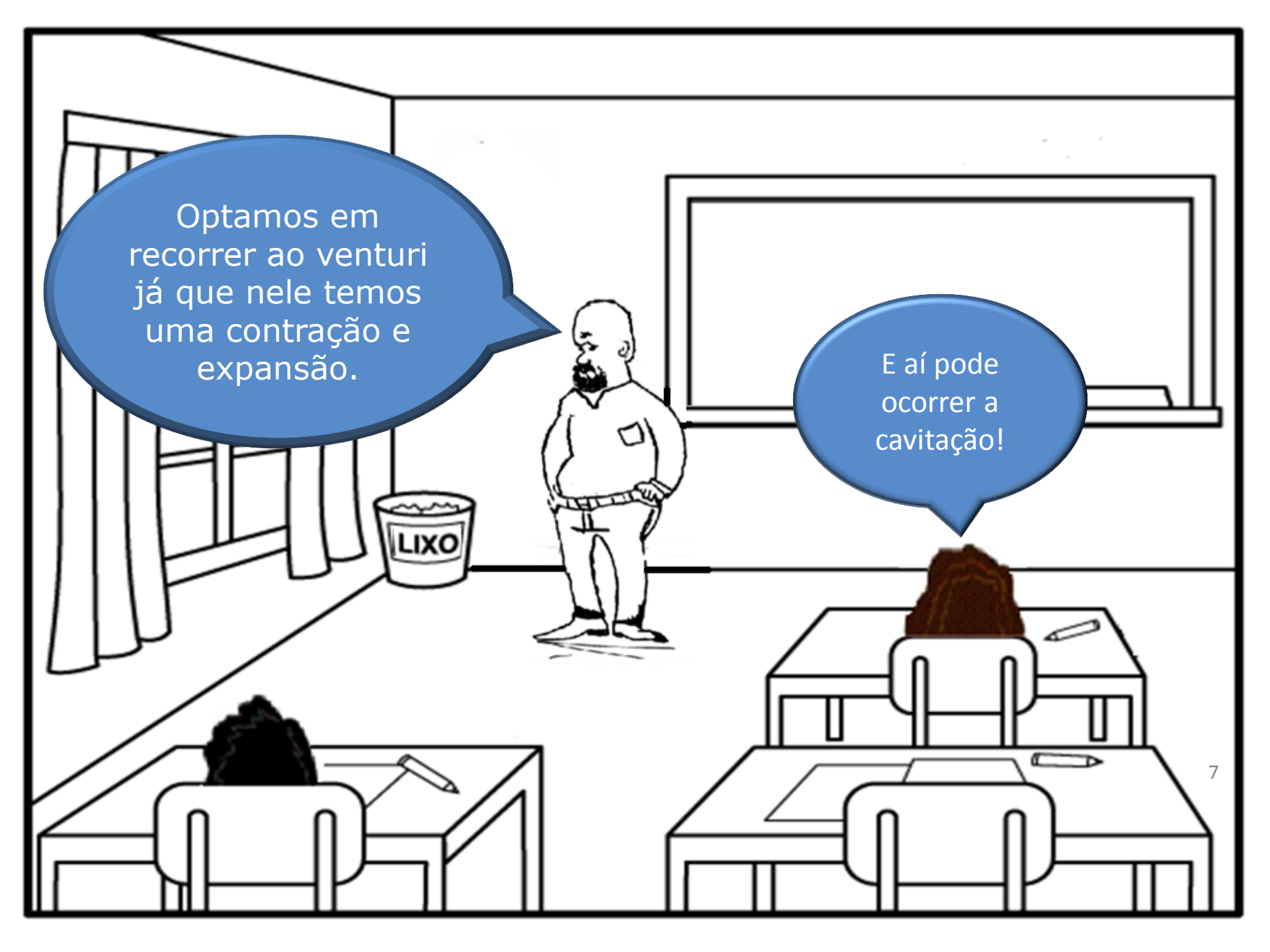
Quando um líquido flui de uma região de pressão relativamente alta a uma região de baixa pressão, pode ocorrer cavitação, isto é, a pressão pode ser menor ou igual a pressão de vapor.

Isso pode ocorrer nos fluxos de tubos em que existe uma contração e expansão, nas pás de uma bomba centrífuga, perto das pontas das hélices, em hidrofólios, ponta de tubos de Pitot e torpedos.



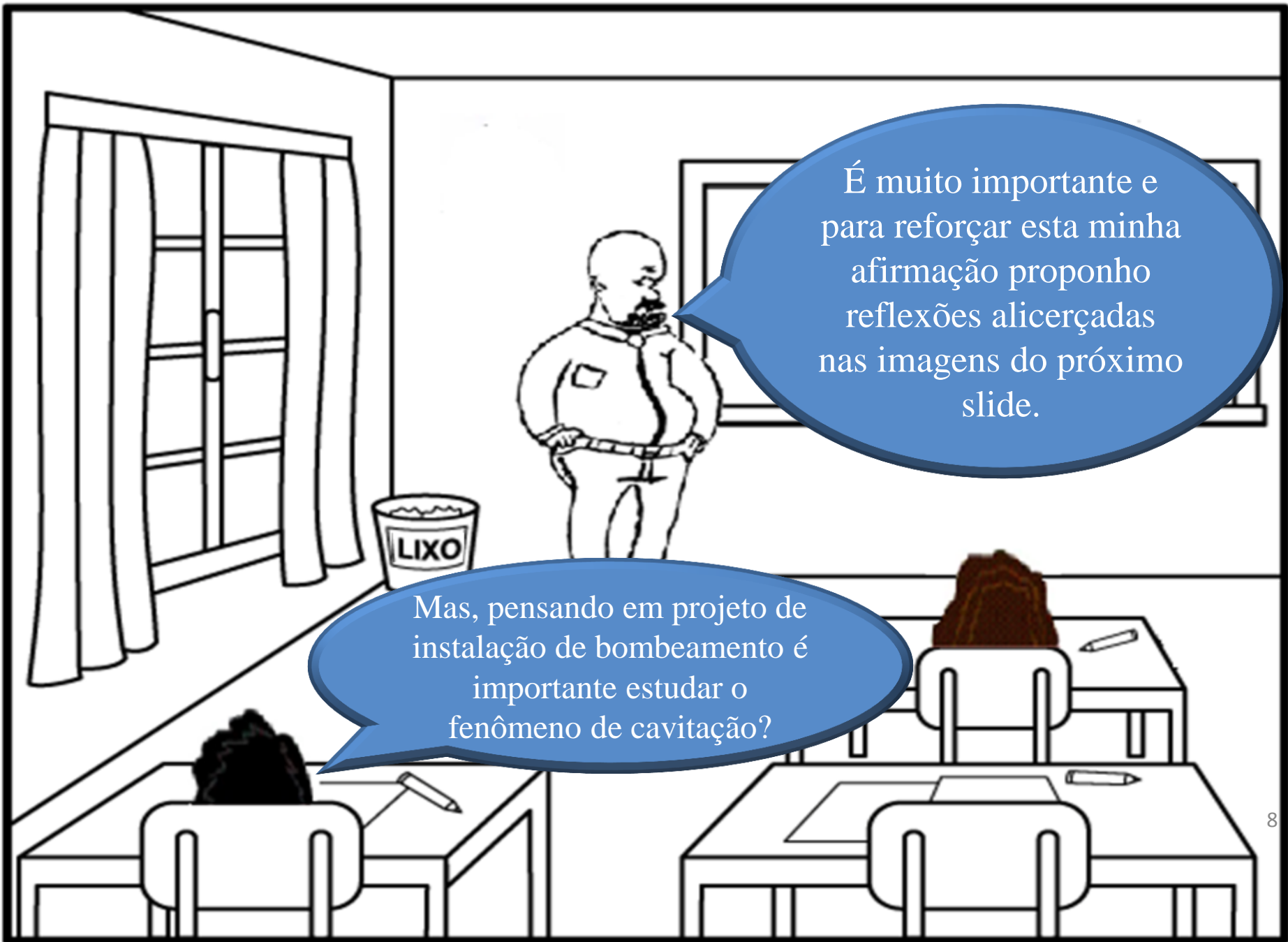
Sim e isto pode ser visto nos
slides de número 766 a 771 da
bibliografia básica.

É verdade que o venturi
tem inúmeras aplicações?



Optamos em recorrer ao venturi já que nele temos uma contração e expansão.

E aí pode ocorrer a cavitação!



É muito importante e para reforçar esta minha afirmação proponho reflexões alicerçadas nas imagens do próximo slide.

Mas, pensando em projeto de instalação de bombeamento é importante estudar o fenômeno de cavitação?

A figura a seguir foi extraída da dissertação apresentada por Wellington 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.

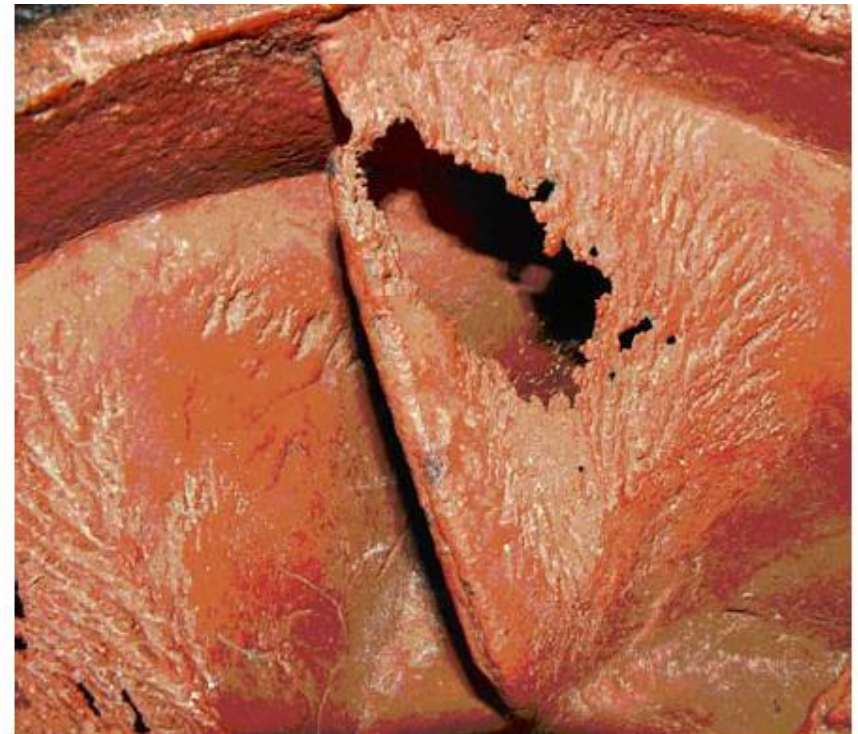
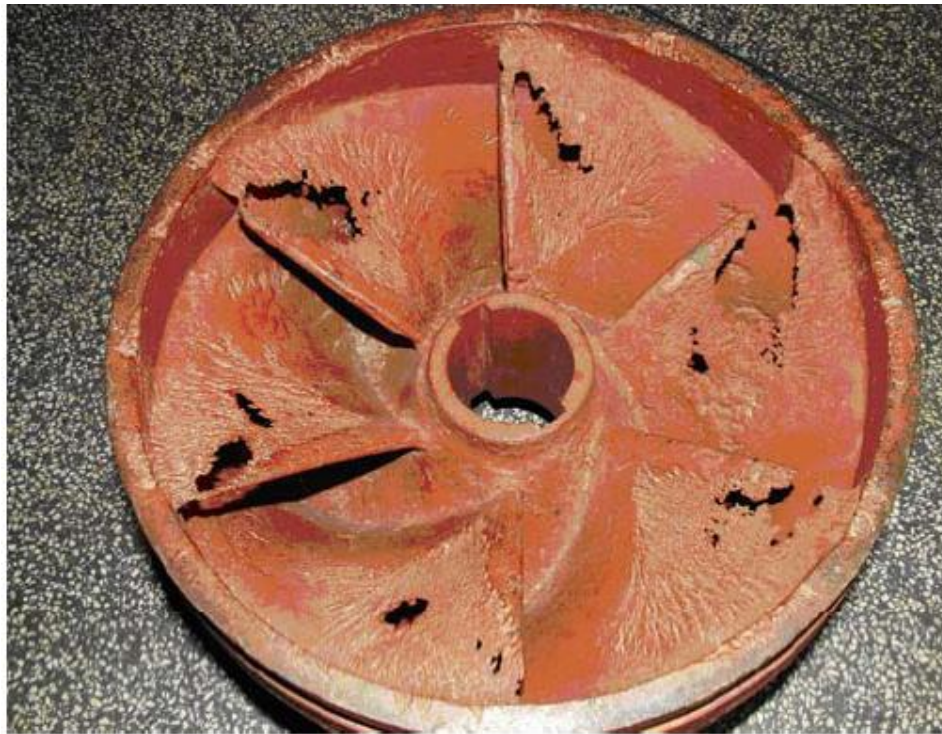
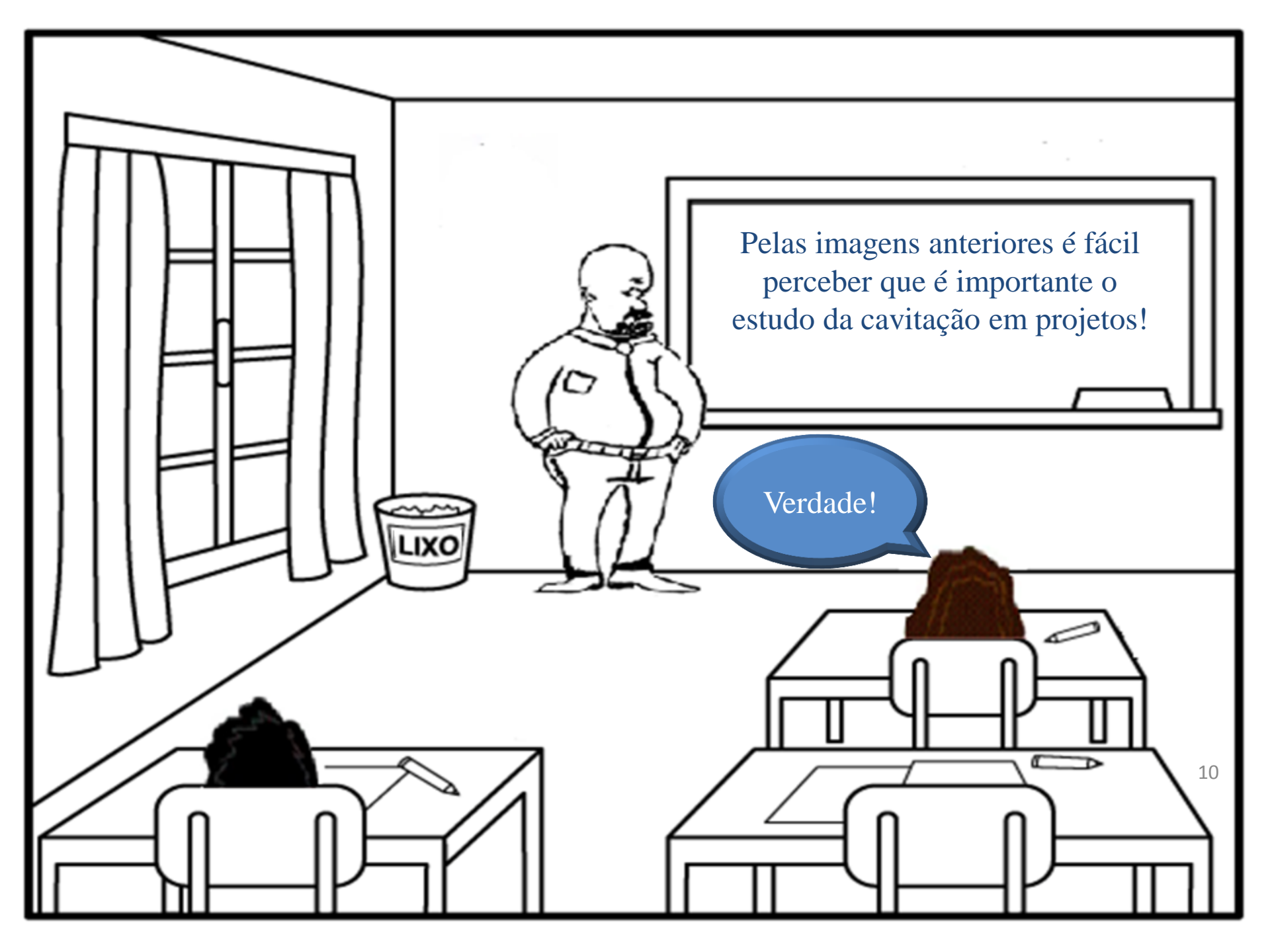
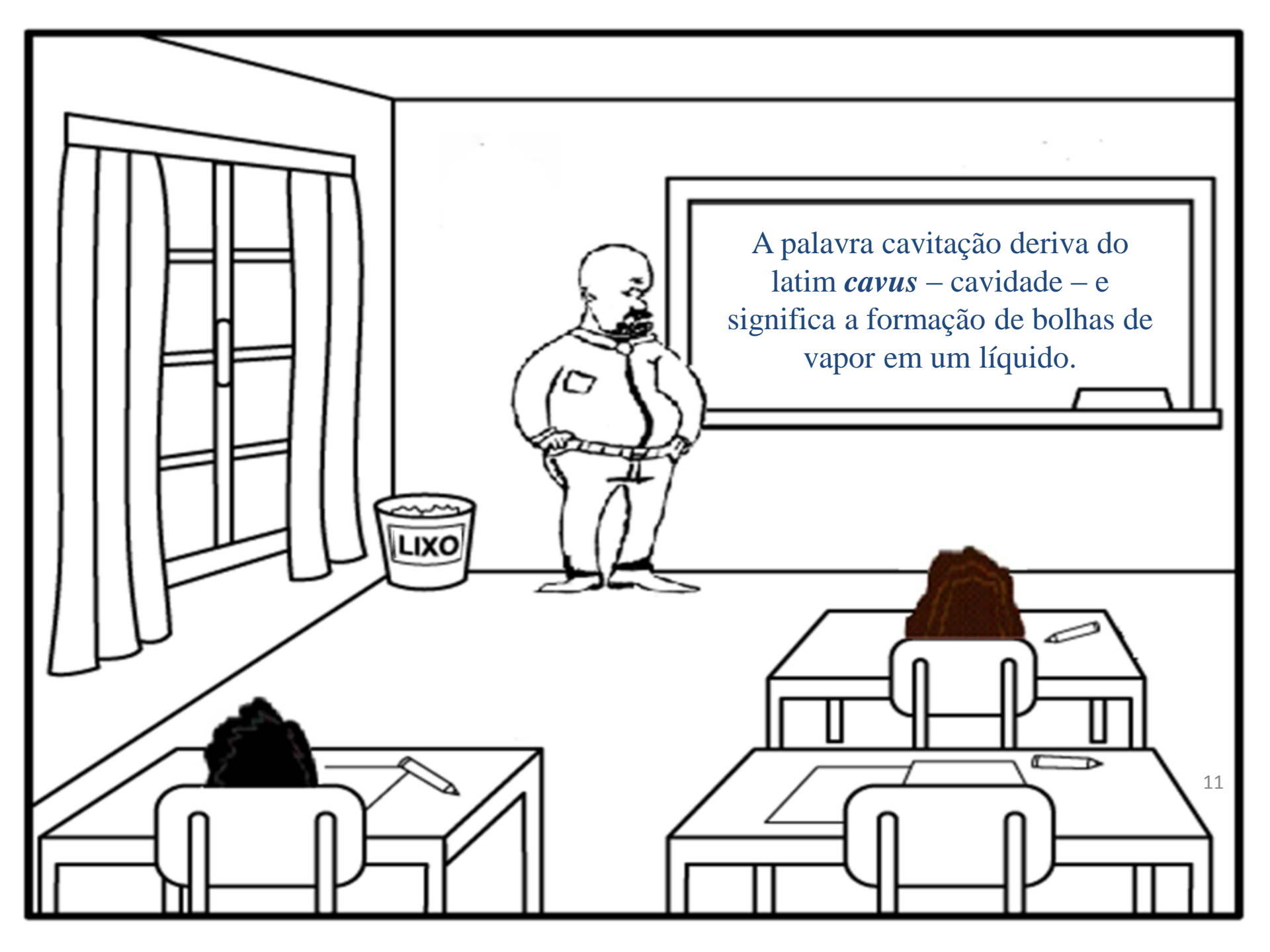


Figura 1.3 – Rotor de bomba centrífuga danificado pela cavitação.



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.

Quero enfatizar que em toda região onde temos um aumento de energia cinética e em consequência uma 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 no laboratório do Centro Universitário da FEI e que é mostrada nos próximos slides.



CAVITATION APPARATUS



THROAT AREA= 36.34
UPSTREAM AREA= 164.89
SAGGE HEIGHT CORRECTION=162.5mm
FLOW ←



Venturi

CAVITATION APPARATUS



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

The equipment is to be used only in accordance with the instructions in this manual.
Students using the apparatus must be properly supervised.
It is essential to inspect the unit at all times to ensure that it is in good working order.
Do not attempt to use the apparatus if it is damaged or if it is not working properly.



Área mínima = A_2

Área máxima = A_1

THROAT AREA= 36.34mm²

UPSTREAM AREA= 144.89 mm²

GAUGE HEIGHT CORRECTION=162.5mm

FLOW





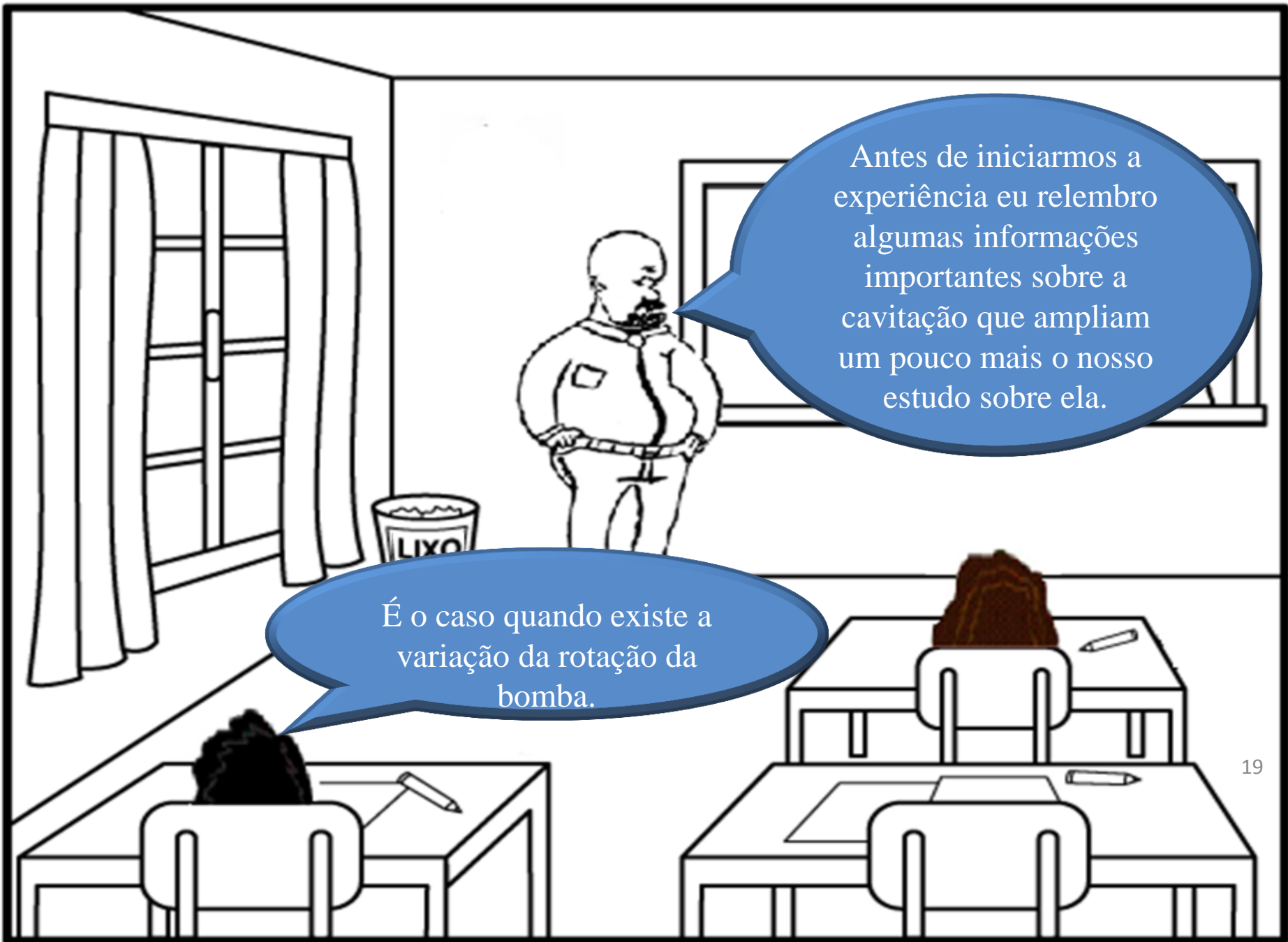
Manômetro que lê a pressão na seção de aproximação do Venturi = p_1





Vacuômetro que lê a pressão na garganta do Venturi = p_2

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



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



CAVITATION APPARATUS



Shorrer Ruler

Tanque da
bancada 7



Objetivos:

1. Calcular o coeficiente de vazão no venturi;
2. Calcular o coeficiente de perda de carga singular em função do coeficiente de vazão ou o coeficiente de velocidade;
3. Obtenção da perda de carga singular do venturi;
4. Visualizar o fenômeno de cavitação
5. Calcular o número (ou índice) de cavitação
6. Obter a curva de calibração e característica da placa de orifício.

Determinação do
coeficiente de
vazão (Cd) para o
venturi



$$C_d = \frac{Q_{\text{real}}}{Q_{\text{teórica}}}$$

$$Q_{\text{real}} = \frac{\Delta h \times A_{\text{tanque}}}{t}$$

$$Q_{\text{teórica}} = \frac{\pi \times D_2^2}{4} \times \sqrt{\frac{2g \times \left(\frac{p_1 - p_2}{\gamma} \right)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}}$$

Tendo as vazões
real e teórica,
calculamos o Cd



Como calcular a perda no venturi?



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

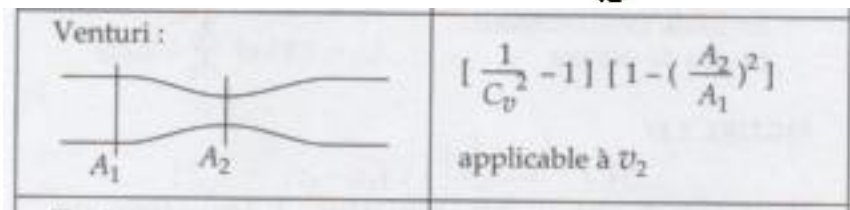
aplicado à v_2

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

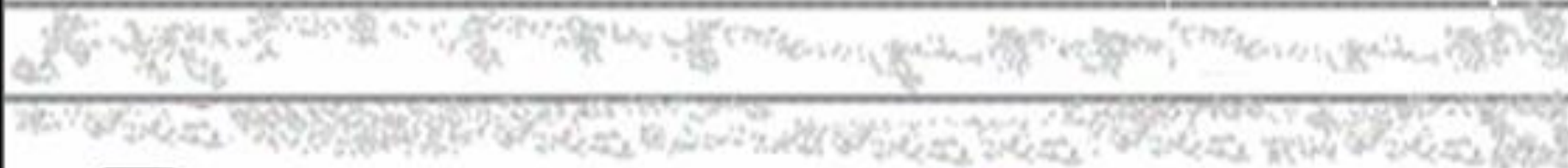
Portanto, temos que achar o coeficiente de vazão (C_d) do Venturi



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



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 PARA A BANCADA DO VENTURI:

1. Inicie a experiência com a válvula fechada (vazão nula) e abra-a 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
apresentada no
próximo slide.



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

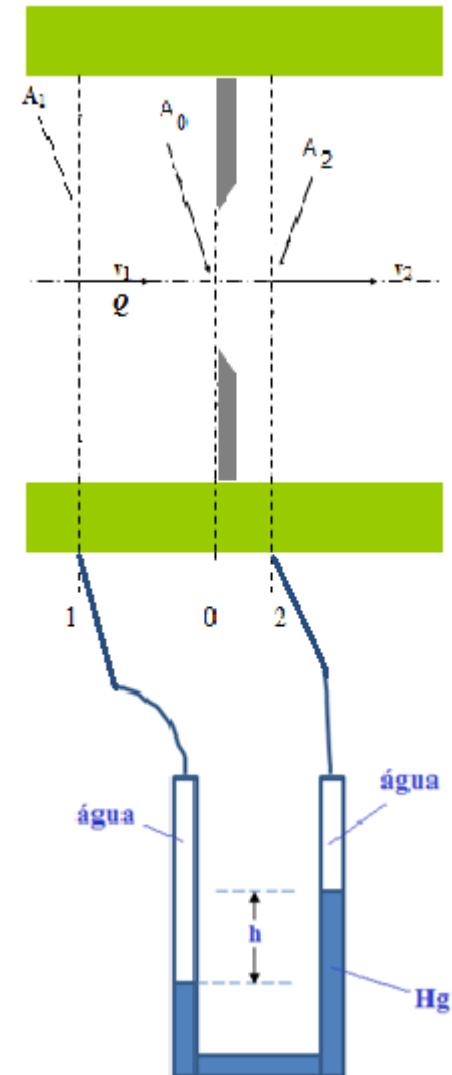
Tabela de dados:

Ensaio	P_{m1} (bar)	P_{m2} (bar)	Δh (mm)	t (s)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

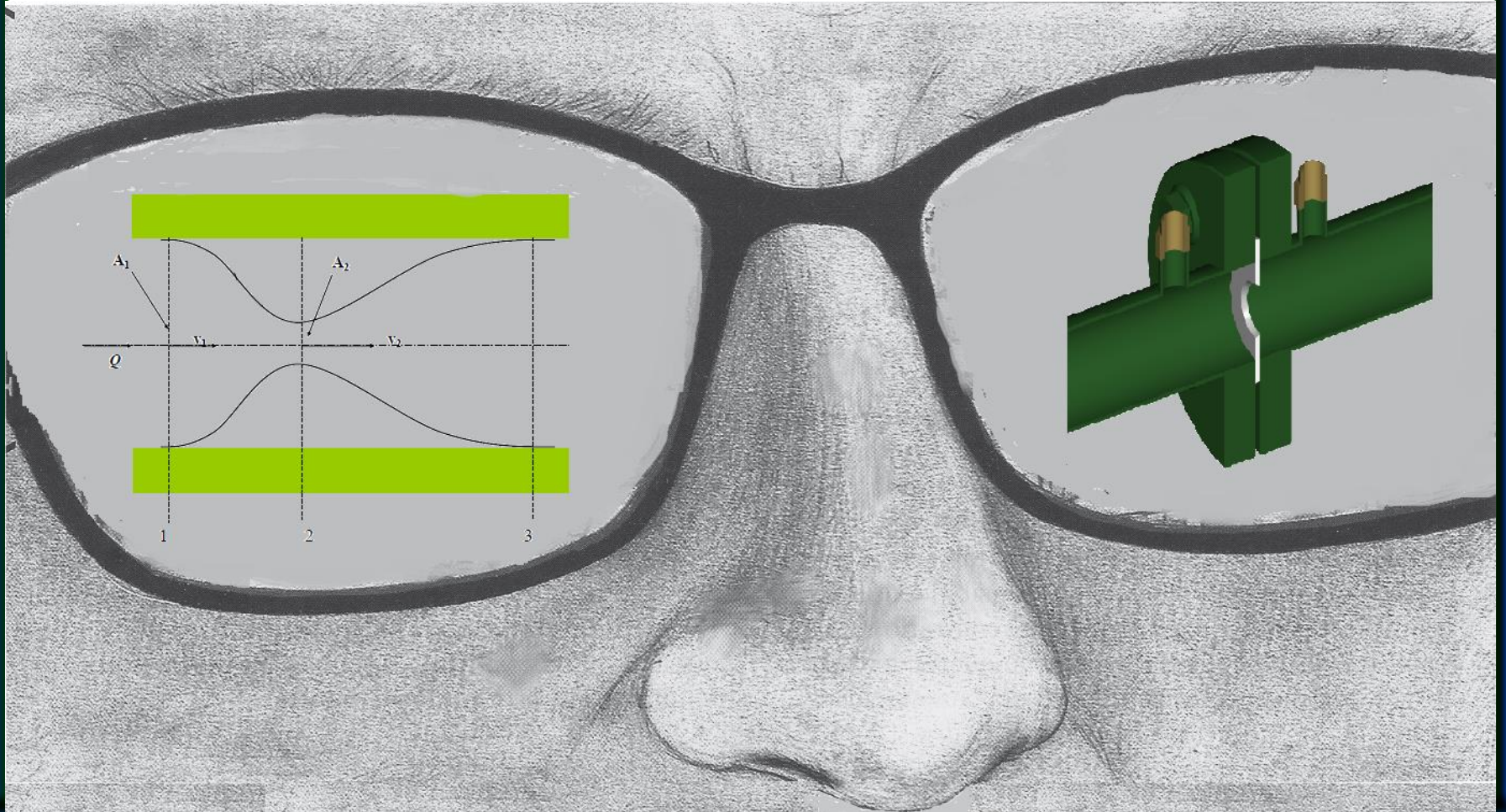
Tabela de resultados:

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

Obtenção das
curvas de
calibração e
característica do
medidor de
vazão tipo placa
de orifício.



Estaremos recordando o medidor tipo venturi e ampliando nossos estudos referente ao medidor tipo placa de orifício.



Em ambos os medidores tem-se uma redução de área, no venturi tem-se a área da garganta (seção 2) e na placa de orifício tem-se a área do orifício

$$A_0.$$

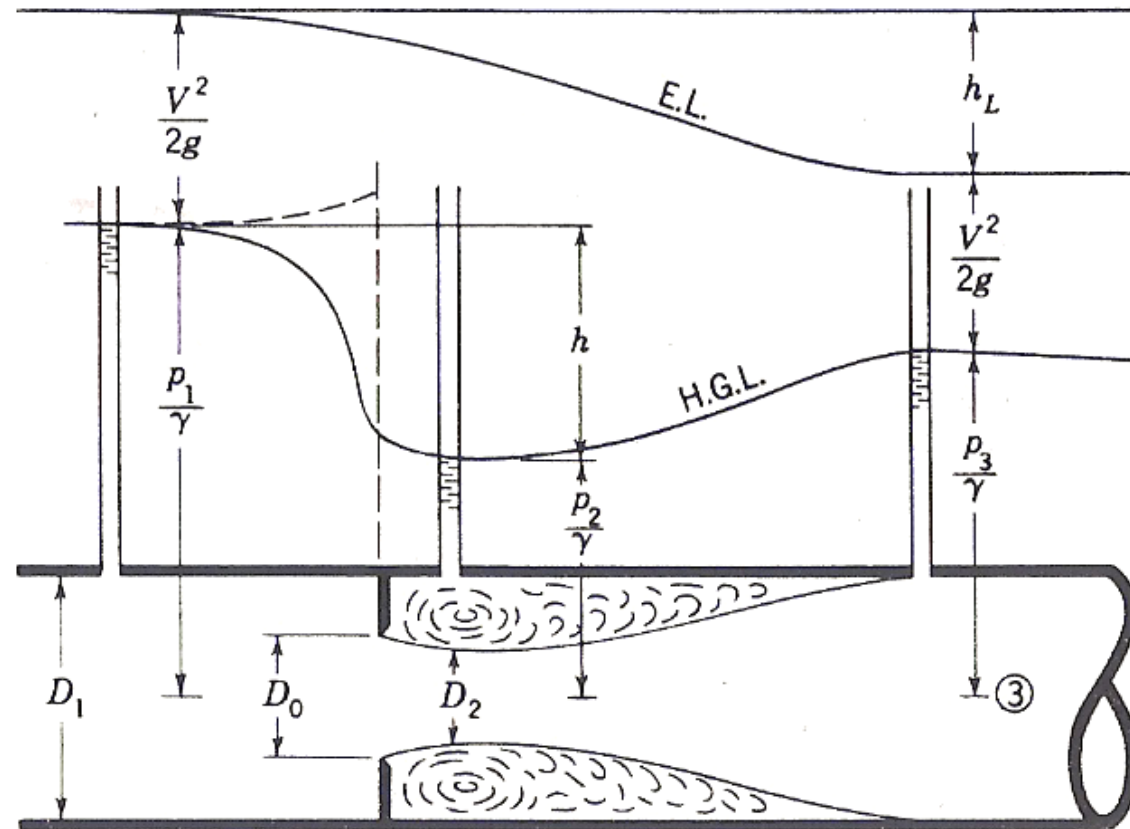
Portanto o comum é que em ambos se tem uma redução de área.

Importante: no venturi a área mínima corresponde a área da garganta e na placa de orifício corresponde a área contraída

$$(A_2).$$



Observe as figuras abaixo:



Aplicando a equação de Bernoulli de (1) a (2) resulta:

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

$$\therefore v_2^2 - v_1^2 = 2g \times \frac{p_1 - p_2}{\gamma}$$

E pela equação da continuidade aplicada a um escoamento incompressível e em regime permanente temos:

$$v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2$$

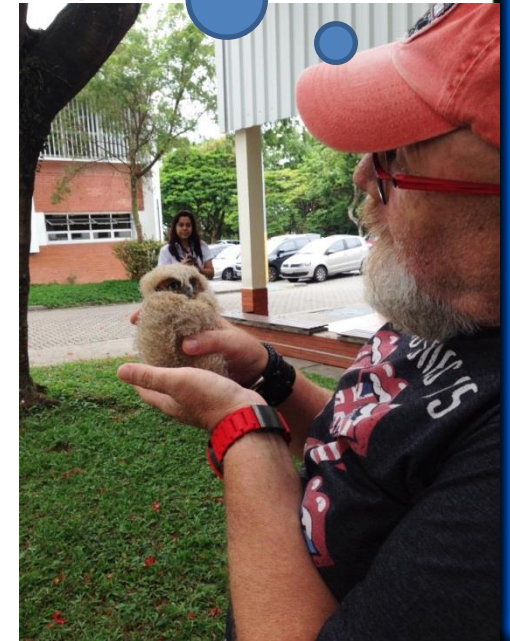


O Alemão que vá!



No caso do venturi $A_2 = A_{\text{garganta}}$ que é a área do diâmetro menor e que é facilmente determinada.

Porém no caso da placa de orifício esta área é muito difícil de se determinar e por este motivo se recorre a definição do coeficiente de contração (C_C).



Coeficiente de contração:



$$C_C = \frac{A_{\text{contraída}}}{A_{\text{orifício}}} = \frac{A_2}{A_0}$$

$$\therefore A_2 = C_C \times A_0$$

No caso do venturi
ele é projetado
para $C_C = 1,0$,
portanto:

$$A_2 = A_{\text{garganta}}$$



Portanto:

$$v_1 \times A_1 = C_C \times v_2 \times A_o$$

$$\therefore v_1 = v_2 \times C_C \times \frac{A_o}{A_1} = v_2 \times C_C \times \frac{D_o^2}{D_1^2}$$

Substituindo na equação anterior :

$$v_2^2 \left[1 - C_C^2 \times \left(\frac{D_o}{D_1} \right)^4 \right] = 2g \times \frac{p_1 - p_2}{\gamma}$$

Através de uma manômetro diferencial em forma de U instalado entre as seções 1 e 2, tem-se:

$$p_1 - p_2 = h \times (\gamma_m - \gamma)$$

$$\therefore v_2 = \sqrt{\frac{2gh \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma} \right)}{1 - C_C^2 \times \left(\frac{D_o}{D_1} \right)^4}}$$

A velocidade v_2 calculada anteriormente é teórica, isto porque se considerou um fluido ideal, ou seja, um fluido que escoar sem ter perda de carga.



Portanto determinamos a vazão teórica e com a definição de coeficiente de velocidade a vazão real:

$$Q_{\text{teórica}} = v_2 \times A_2 = C_C \times A_o \times v_2$$

$$\text{Coeficiente de velocidade} \rightarrow C_v = \frac{v_{2\text{real}}}{v_{2\text{teórico}}}$$

$$\therefore Q_{\text{real}} = C_C \times A_o \times C_v \times \sqrt{\frac{2gh \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma} \right)}{1 - C_C^2 \times \left(\frac{D_o}{D_1} \right)^4}}$$

Pelo conceito de coeficiente de vazão ou descarga, para a placa de orifício tem-se:

$$C_d = C_C \times C_v$$

$$\therefore Q_{\text{real}} = C_d \times A_o \times \sqrt{\frac{2gh \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma} \right)}{1 - C_C^2 \times \left(\frac{D_o}{D_1} \right)^4}}$$

Ou ainda:

$$K = \frac{C_d}{\sqrt{1 - C_c^2 \times \left(\frac{D_o}{D_1}\right)^4}}$$

$$\therefore Q_{\text{real}} = k \times A_0 \times \sqrt{2gh \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right)}$$

Considerando o livro do professor Brunetti, onde podemos observar que o Reynolds de aproximação é calculado com a vazão real.

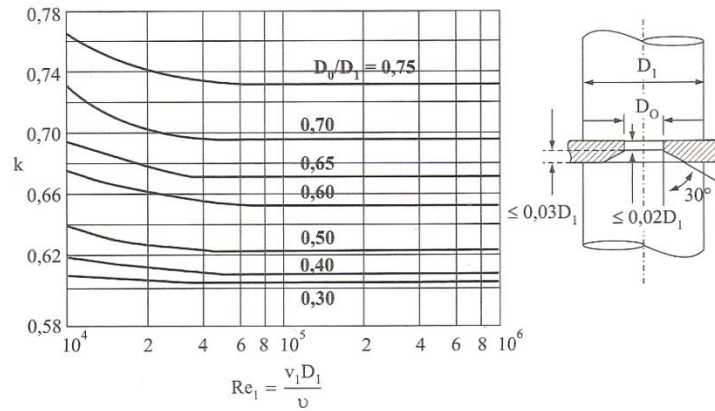
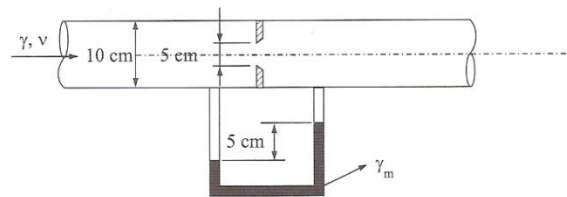


Figura 8.11

EXEMPLO

No orifício da figura, está instalado um manômetro diferencial cujo fluido manométrico, de $\gamma_m = 3 \times 10^4 \text{ N/m}^3$, indica um desnível de 5 cm. Sendo o diâmetro do tubo 10 cm e o do orifício 5 cm, determinar a vazão, sabendo que o fluido que escoia é água. ($\gamma = 10^4 \text{ N/m}^3$; $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).



Solução

$$A_o = \frac{\pi D_o^2}{4} = \frac{\pi \times 5^2}{4} \times 10^{-4} = 1,96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Aplicando a equação manométrica:

$$p_1 + \gamma h - \gamma_m h = p_2$$

ou

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \left(\frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right) h$$

portanto:

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \left(\frac{3 \times 10^4}{10^4} - 1 \right) \times 0,05 = 0,1 \text{ m}$$

O valor de k deve ser obtido da Figura 8.11. Como, porém, não se conhece a vazão, v_1 não é conhecido, logo não se pode calcular Re. Note-se, porém, que o k, a partir de um certo valor de Re, torna-se constante.

O valor de k será adotado e deverá ser verificado posteriormente.

Com $\frac{D_o}{D_1} = \frac{5}{10} = 0,5$, tem-se: $k = 0,624$ para $Re \geq 7 \times 10^4$.

Continuação do exercício do slide anterior:

216 ■ Mecânica dos Fluidos

Logo:

$$Q = 0,624 \times 1,96 \times 10^{-3} \sqrt{2 \times 10 \times 0,1}$$
$$Q = 1,73 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Agora deverá ser feita a verificação:

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi D_1^2} = \frac{4 \times 1,73 \times 10^{-3}}{\pi \times 0,1^2} = 0,22 \text{ m/s}$$

e

$$\text{Re} = \frac{v_1 D_1}{\nu} = \frac{0,22 \times 0,1}{10^{-6}} = 2,2 \times 10^4, \text{ que é menor que o adotado } (7 \times 10^4).$$

Portanto, deve ser feita a correção. O novo k será obtido com o valor do $\text{Re} = 2,2 \times 10^4$ e $\frac{D_0}{D_1} = 0,5$; portanto: $k = 0,63$.

Logo:

$$Q = 0,63 \times 1,96 \times 10^{-3} \sqrt{2 \times 10 \times 0,1}$$
$$Q = 1,75 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

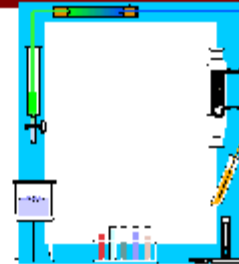
Verificação:

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi D_1^2} = \frac{4 \times 1,75 \times 10^{-3}}{\pi \times 0,1^2} = 0,223 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{v_1 D_1}{\nu} = \frac{0,223 \times 0,1}{10^{-6}} = 2,23 \times 10^4$$

Note-se que o Re variou muito pouco; logo, a vazão obtida na segunda tentativa pode ser adotada como verdadeira. Assim: $Q = 1,75 \text{ L/s}$.

obter a curva de calibração



Através da experiência
deseja-se

27/04/2005 - v2



obter a curva característica