


**Segundo semestre de 2012**  
Mecânica dos Fluidos para a  
engenharia química  
**Aula 6 de teoria**



Vamos fechar esta primeira parte do curso executando parte de um projeto de instalação de bombeamento real.



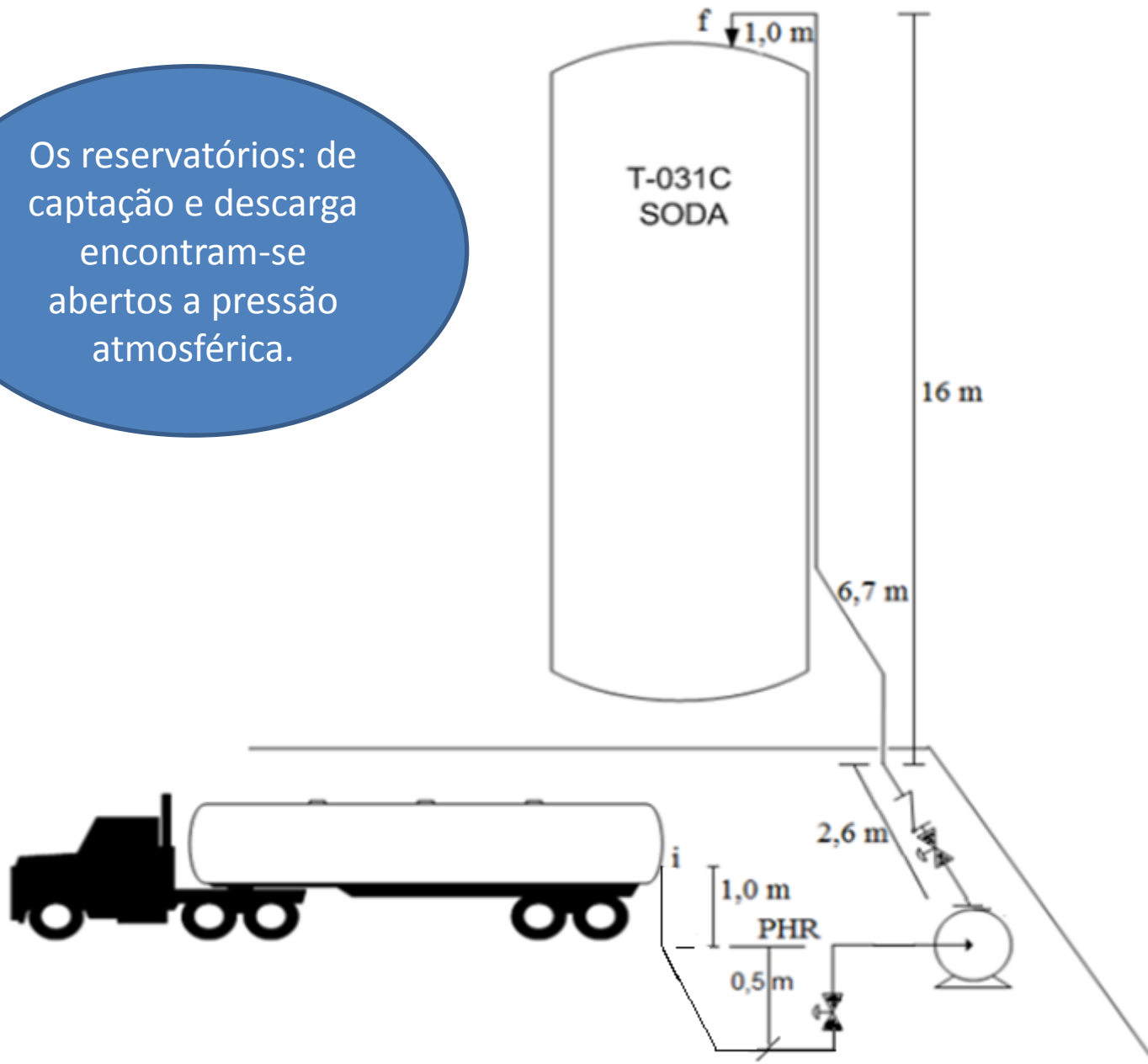
Este exemplo prático nos foi encaminhado pelo engenheiro Tobias Alexandre Romanelli de Carvalho, que foi nosso monitor por quatro semestres .



Uma empresa que produz silicato de sódio utiliza como matéria prima em seu processo soda cáustica 50%. Devido o aumento da produção necessita trocar a bomba de descarregamento de soda cáustica conforme instalação indicada no próximo slide.



Os reservatórios: de captação e descarga encontram-se abertos a pressão atmosférica.

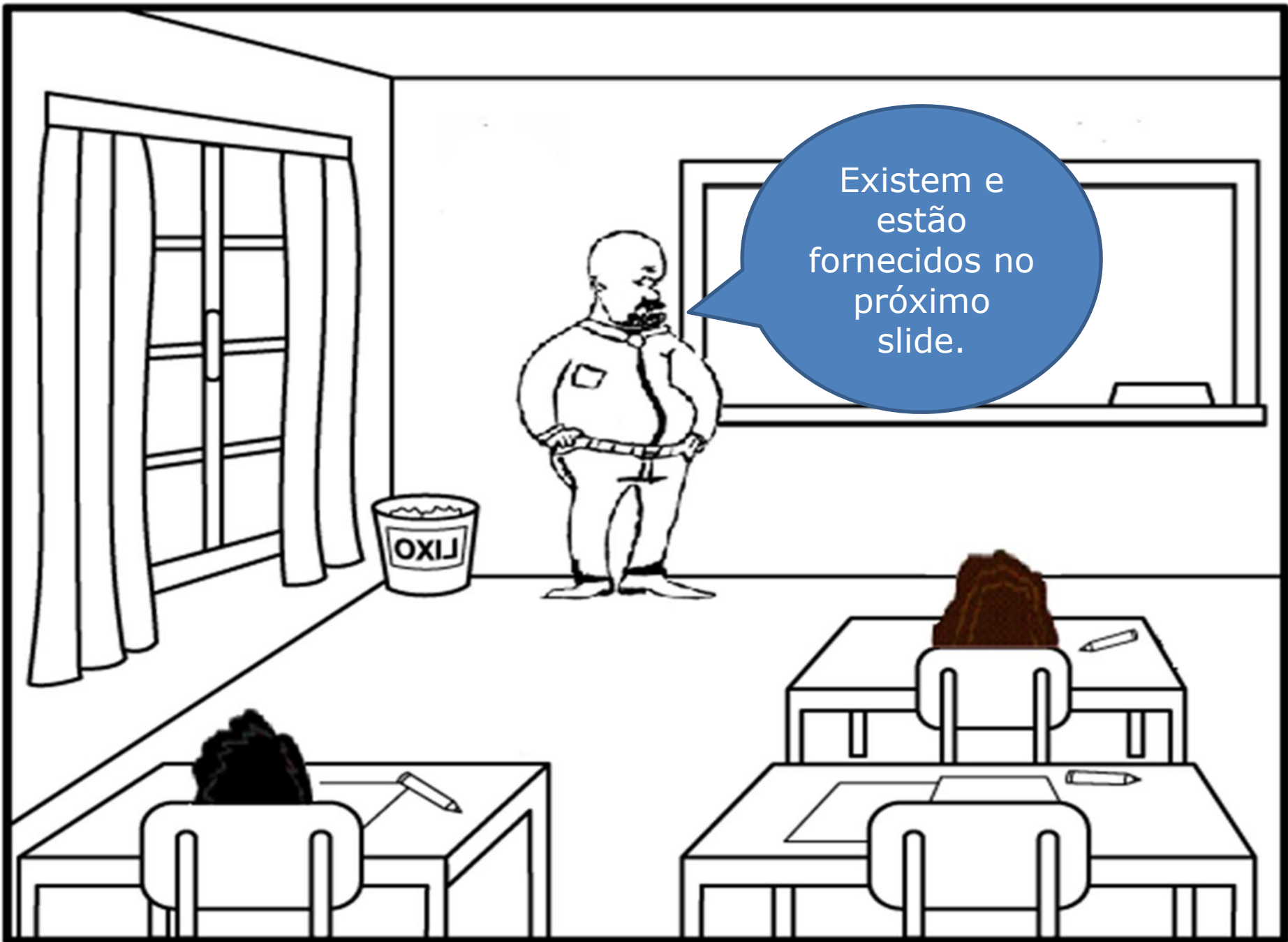


Sabendo que a vazão desejada é  $41 \text{ m}^3/\text{h}$ , pede-se dimensionar as tubulações e escrever a equação da CCI e com o que já estudamos selecionar a bomba.

Não existem outros dados?

LIXO



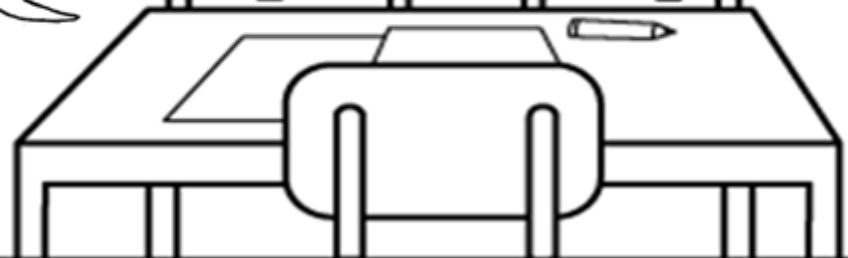
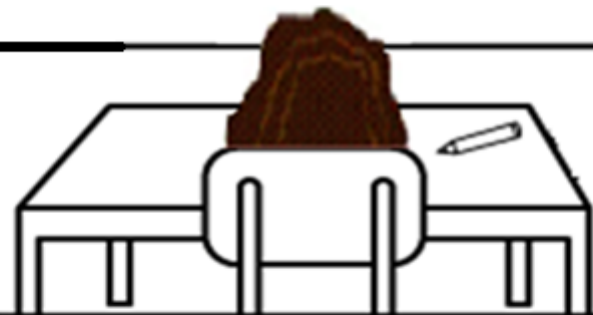


Existem e  
estão  
fornecidos no  
próximo  
slide.

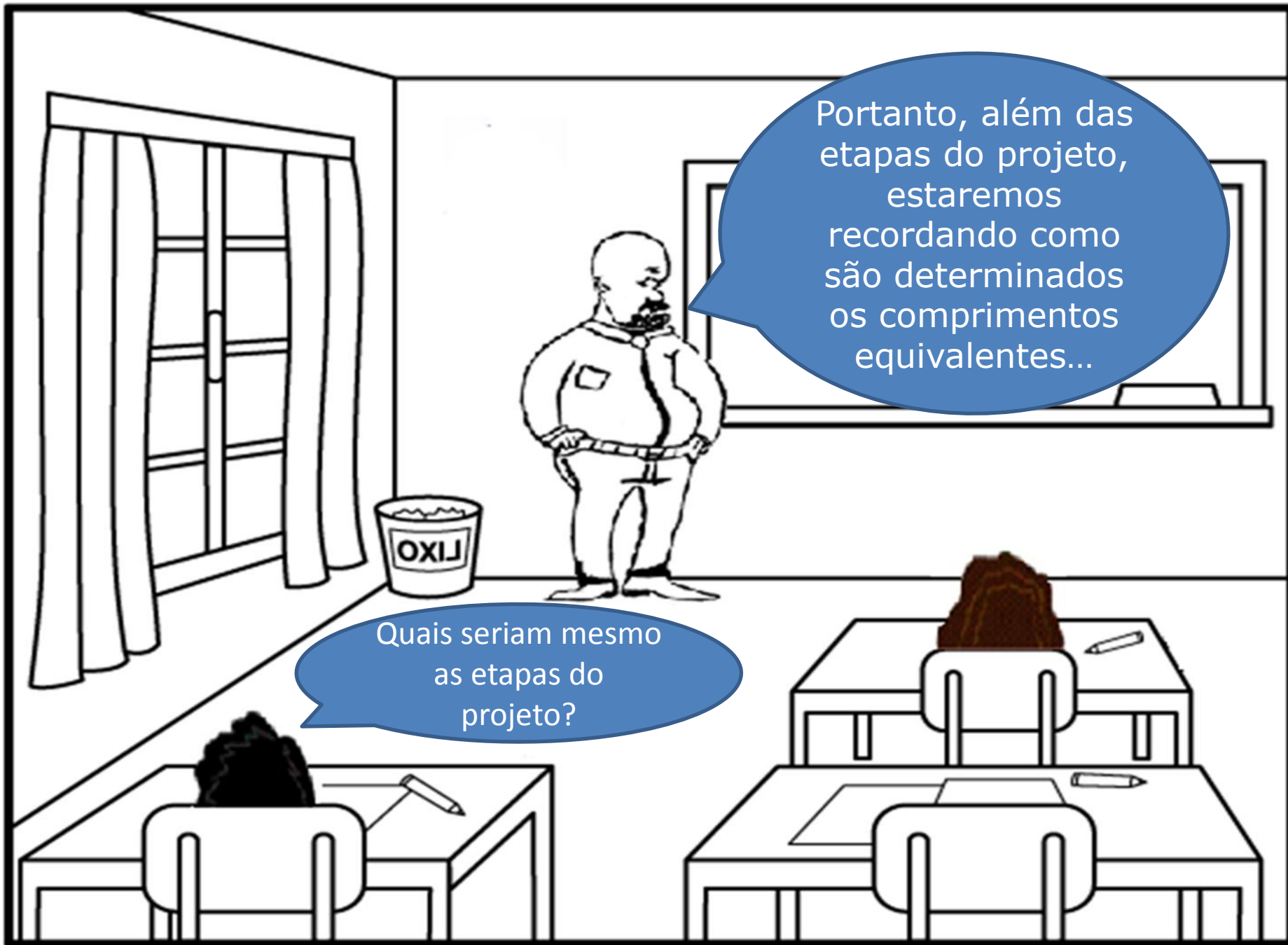
Temperatura (°C)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade (mPas)	Pressão de vapor (mm Hg)
20	1530	100	14

Dados:	Leq (m)	Patm (mmHg)	Comprimento	L(m)
Curva			Antes da bomba (aB)	3,2
Válvula globo		700	Depois da bomba (dB)	19,6
Válvula retenção				

Na verdade são curvas e válvulas globo

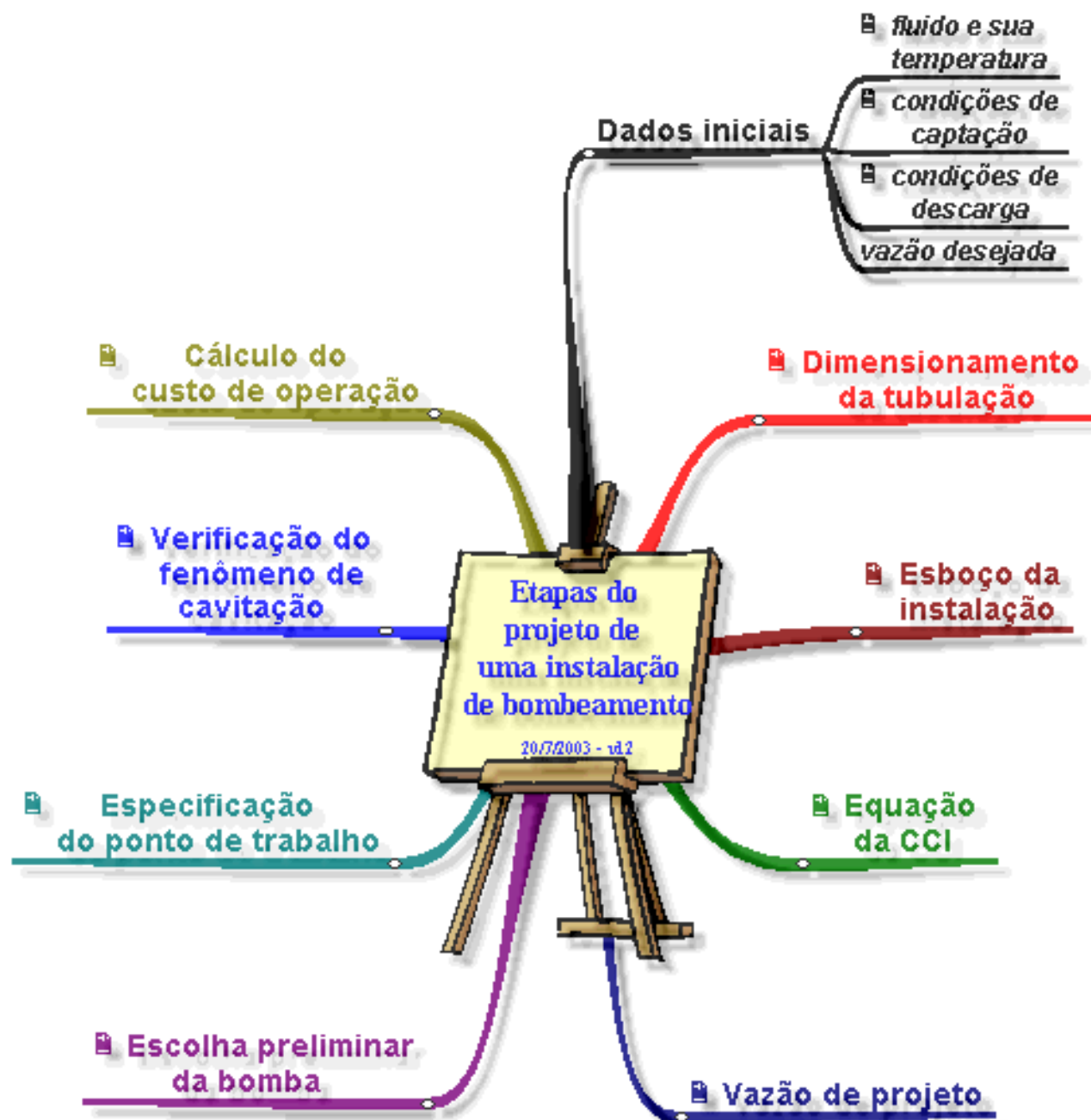






Portanto, além das etapas do projeto, estaremos recordando como são determinados os comprimentos equivalentes...

Quais seriam mesmo as etapas do projeto?



Das etapas anteriores, temos:

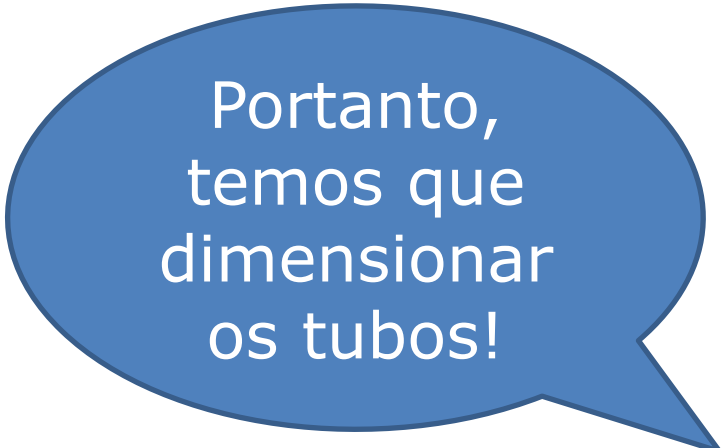
1. O fluido: soda cáustica 50%
2. Temperatura do escoamento: 20°C
3. Condições de captação:

$$H_i = z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{y_i \times \alpha_i \times Q^2}{2g \times A_i^2} = 1\text{m}$$

4. Condições de descarga:

$$H_f = z_f + \frac{p_f}{\gamma} + \frac{y_f \times \alpha_f \times Q^2}{2g \times A_f^2} = 16 + \frac{\alpha_f \times Q^2}{19,6 \times A_f^2}$$

5. Vazão desejada: 41 m³/h
6. Esboço da instalação.




Portanto,  
temos que  
dimensionar  
os tubos!



Para o dimensionamento dos tubos, iniciamos sempre com a tubulação após a bomba (tubulação de recalque) e para isto lembramos que:

$$Q_{\text{desejada}} = V_{\text{econômica}} \times \frac{\pi \times D_{\text{referência}}^2}{4}$$



A velocidade econômica pode ser obtida na página:

<http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/dimensionamento%20da%20tubula%C3%A7%C3%A3o.pdf>

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

Tabela 7.3

$$\frac{41}{3600} = 1,5 \times \frac{\pi \times D_{\text{referência}}^2}{4}$$

$$\therefore D_{\text{referência}} = \sqrt{\frac{4 \times 41}{3600 \times 1,5 \times \pi}} \cong 0,0983\text{m} \cong 98,3\text{mm}$$



Com o diâmetro de referência e a norma ANSI, escolhemos o diâmetro depois da bomba.





Escolhido o diâmetro do tubo de recalque adota-se para antes da bomba um diâmetro imediatamente superior, isto para se tentar evitar o fenômeno de cavitação.

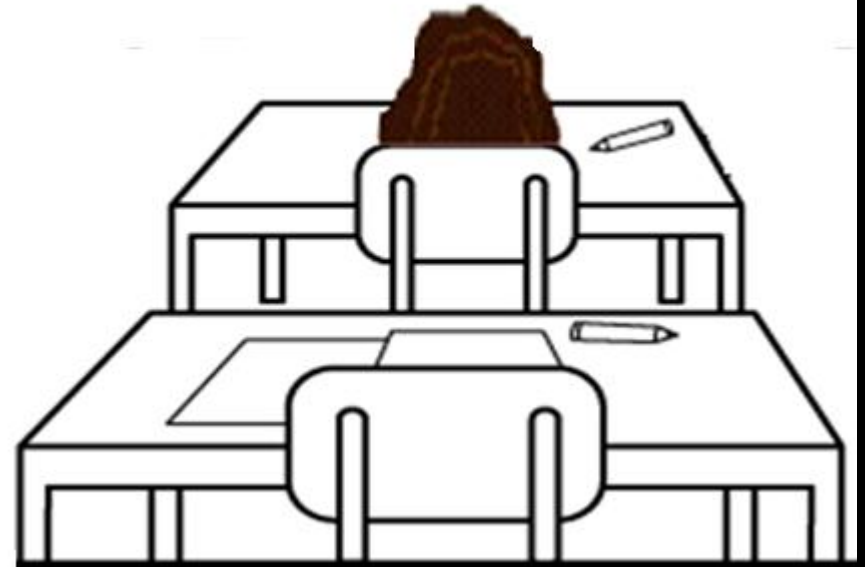
**Cavitação?!**



Para as instalações hidráulicas, em particular a bomba hidráulica, cavitacão implica em se ter na própria temperatura de escoamento uma vaporização parcial ou total e em seguida a condensação, isto acarreta um funcionamento totalmente inadequado da bomba.



E é por isso que devemos tomar aqueles cuidados mencionados na aula anterior?



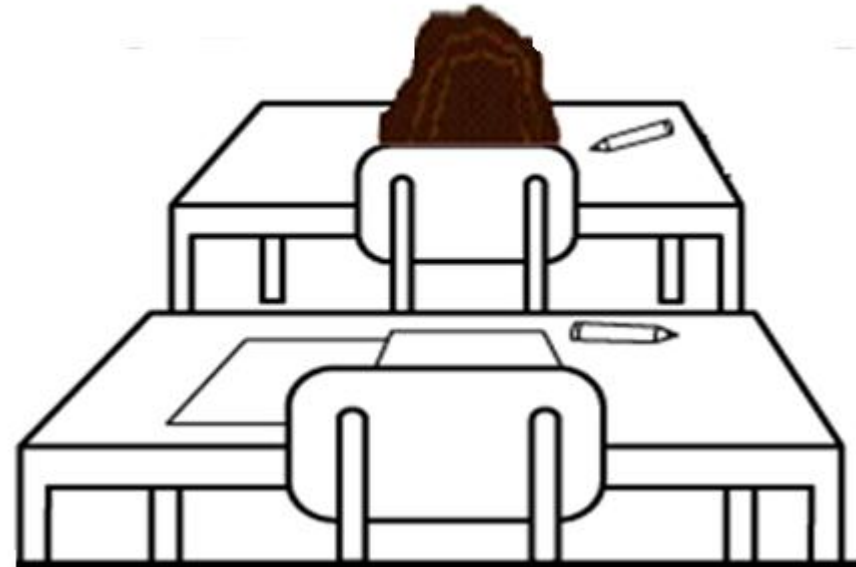
1º → a bomba deve ser instalada o mais perto possível do nível de captação com a finalidade de diminuir  $Z_e$ , ou, se possível, a bomba deve ser instalada abaixo do nível de captação (bomba "afogada") com isto  $Z_e < 0$ .

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  $H_{paB}$ .

Sim, cuidados preliminares na tentativa de evitar o fenômeno de cavitação





Consultando a norma ANSI B36.10 para aço ( $k=4,6 \times 10^{-5} \text{ m}$ ), temos para o tubo antes da bomba o tubo de diâmetro nominal de 5" e espessura 40:

DIMENSÕES				IDENTIF.		
NOMINAL	 m/m EXTERNO	 m/m INTERNO	 m/m PAREDE	 kg / m	DENOM.	SCHEDULE Nº
5"	141,3	128,30	6,55	21,75	STD	40
		122,26	9,52	30,92	XS	80
		115,90	12,70	40,25		120
		109,54	15,88	49,01		160
		103,20	19,05	57,36	XXS	

Dimensionados os tubos,  
podemos obter a equação da  
CCI (Curva Característica da  
Instalação)



## CCI

É a curva que representa os lugares geométricos que caracterizam a energia por unidade de peso, que o fluido necessita receber da bomba hidráulica, de tal forma que origine um escoamento em regime permanente na instalação a uma vazão  $Q$ .

Para uma instalação com uma entrada e uma saída a CCI é representada por  $H_S = f(Q)$  e é obtida aplicando a equação da energia da seção inicial a final.



$$H_i + H_S = H_f + H_{p_{\text{totais}}}$$

$$1 + H_S = 16 + \frac{\alpha_f \times Q^2}{19,6 \times (82,1 \times 10^{-4})^2} + H_{p_{5''}} + H_{p_{4''}}$$

$$H_S = 15 + 756,94 \times \alpha_f \times Q^2 + H_{p_{5''}} + H_{p_{4''}}$$

## Calculando as perdas

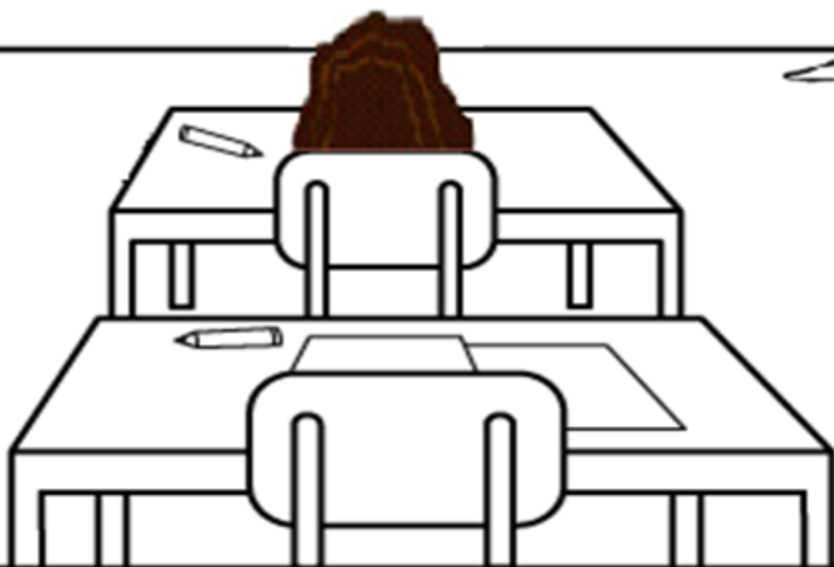
	L(m)	ΣLeq		
		Cotovêlo	VGA	
5"	3,2	4 x 4,7	1 x 43	
		Curva	VGA	V <sub>RetVert</sub>
4"	19,6	5 x 2,18	1 x 34	1 x 12,9

$$H_{pD} = f_D \times \frac{(L + \sum Leq)_D}{D_{H_D}} \times \frac{Q^2}{2g \times A_D^2}$$

$$H_{p_{total}} = f_{5''} \times \frac{(3,2 + 61,8)}{0,1283} \times \frac{Q^2}{19,6 \times (129,3 \times 10^{-4})^2} + f_{4''} \times \frac{(19,6 + 57,8)}{0,1023} \times \frac{Q^2}{19,6 \times (82,1 \times 10^{-4})^2}$$

$$H_{p_{total}} = f_{5''} \times 154608,6 \times Q^2 + f_{4''} \times 572694,5 \times Q^2$$

Calculada a perda de carga total, podemos escrever a equação da CCI





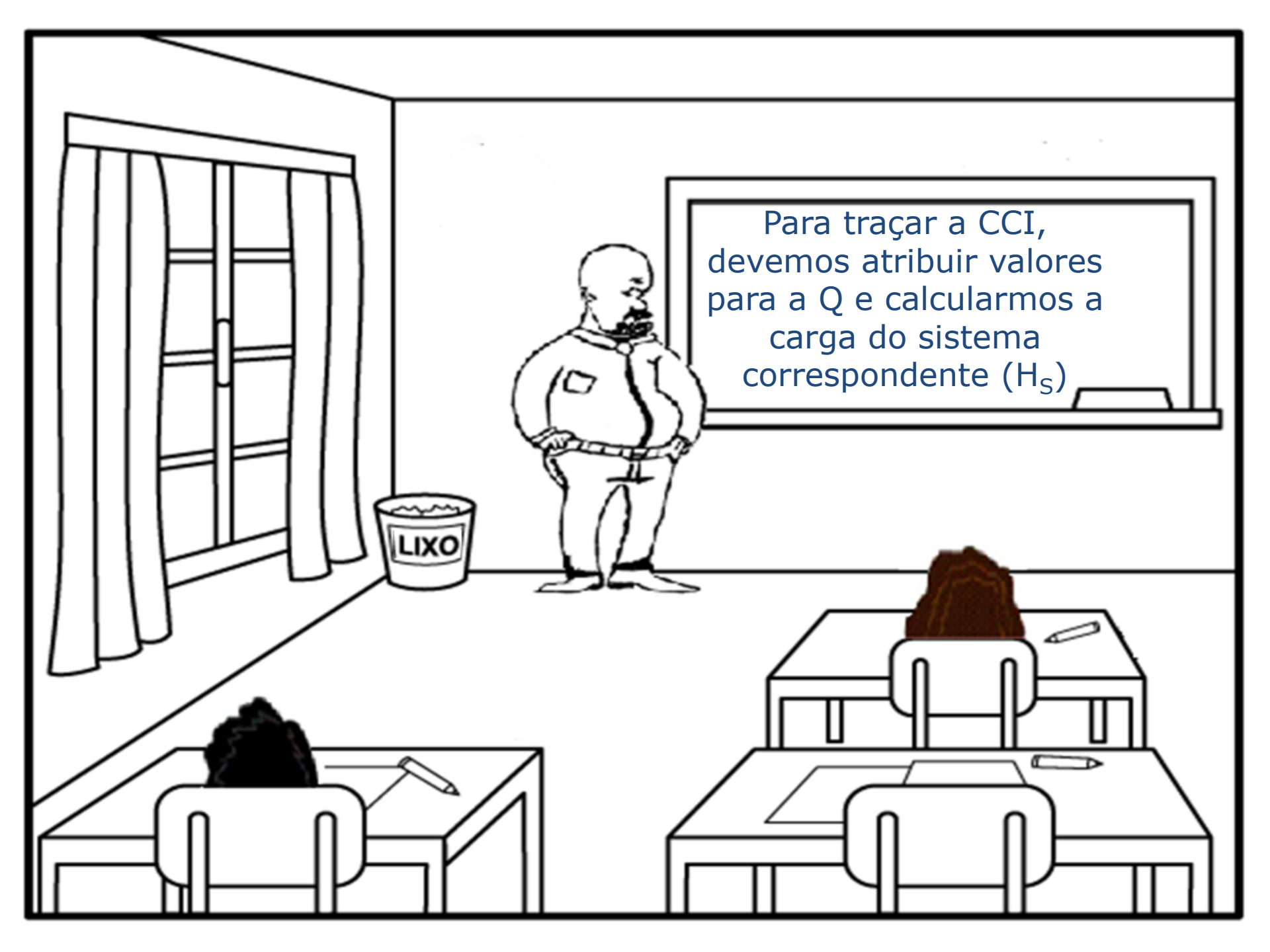
$$H_s = 15 + 756,94 \times \alpha_f \times Q^2 + (f_{5''} \times 154608,6 + f_{4''} \times 572694,5) \times Q^2$$

Importante observar que a carga estática ( $H_{est}$ ) é positiva e isto indica que há necessidade de uma bomba para viabilizar o escoamento

$$H_{estática} = H_{est} = 15m$$

$$H_{estática} = H_{est} = (z_f + z_i) + \frac{(p_f - p_i)}{\gamma}$$





Para traçar a CCI,  
devemos atribuir valores  
para a Q e calcularmos a  
carga do sistema  
correspondente ( $H_s$ )

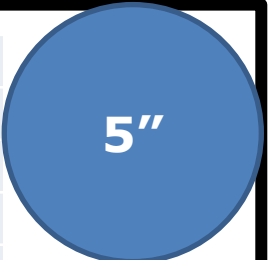
propriedades do fluido transportado

temp (°C)		$\mu$ (kg/ms)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$p_v$ (Pa)	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
20		1,00E-01	1530	1866,5	6,536E-05

propriedades do local

g =	9,8	m/s <sup>2</sup>
patm =	93325.66	Pa
mat. tubo aço		
	Dint	
espessura	(mm)	A (cm <sup>2</sup> )
40	128,3	129,3
	K(m)	DH/k
	4,60E-05	2789

Q
m <sup>3</sup> /h
4,0
8,0
12,0
16,0
20,0
24,0
28,0
32,0
36,0
40,0
44,0



Q(m <sup>3</sup> /h)	v(m/s)	Re	<del>f<sub>Haaland</sub></del>	f <sub>Swamee e Jain</sub>	f <sub>Churchill</sub>	f <sub>planilha</sub>	f <sub>calculado</sub>
4,0	0,09	169	<del>0,160</del>	0,379	0,379	0,379	0,379
8,0	0,17	337	<del>0,108</del>	0,190	0,190	0,190	0,190
12,0	0,26	506	<del>0,0888</del>	0,126	0,126	0,126	0,126
16,0	0,34	675	<del>0,0780</del>	0,0949	0,0949	0,0948	0,0949
20,0	0,43	843	<del>0,0710</del>	0,0759	0,0759	0,0758	0,0759
24,0	0,52	1012	<del>0,0659</del>	0,0632	0,0632	0,0632	0,0632
28,0	0,60	1181	<del>0,0620</del>	0,0542	0,0542	0,0542	0,0542
32,0	0,69	1349	<del>0,0589</del>	0,0474	0,0474	0,0474	0,0474
36,0	0,77	1518	<del>0,0564</del>	0,0422	0,0422	0,0421	0,0422
40,0	0,86	1687	<del>0,0543</del>	0,0379	0,0379	0,0379	0,0379
44,0	0,95	1856	<del>0,0525</del>	0,0345	0,0345	0,0345	0,0345

propriedades do fluido transportado

temp (°C)	$\mu$ (kg/ms)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	pv (Pa)
20	1,00E-01	1530	1866,5

propriedades do local

g =	9,8	m/s <sup>2</sup>	v (m <sup>2</sup> /s)
patm =	93325.66	Pa	6,536E-05
Dint			
espessura	(mm)	A (cm <sup>2</sup> )	
40	102,3	82,1	
K(m)		DH/k	
4,60E-05		2224	

4"

Q
m <sup>3</sup> /h
4,0
8,0
12,0
16,0
20,0
24,0
28,0
32,0
36,0
40,0
44,0

Q(m <sup>3</sup> /h)	v(m/s)	Re	f <sub>Haaland</sub>	f <sub>Swamee e Jain</sub>	f <sub>Churchill</sub>	f <sub>planilha</sub>	f <sub>calculado</sub>
4,0	0,14	212	0,140	0,302	0,302	0,302	0,302
8,0	0,27	424	0,097	0,151	0,151	0,151	0,151
12,0	0,41	635	0,0801	0,101	0,101	0,101	0,101
16,0	0,54	847	0,0709	0,0755	0,0755	0,0756	0,0755
20,0	0,68	1059	0,0648	0,0604	0,0604	0,0605	0,0604
24,0	0,81	1271	0,0603	0,0504	0,0504	0,0504	0,0504
28,0	0,95	1483	0,0569	0,0432	0,0432	0,0432	0,0432
32,0	1,08	1695	0,0542	0,0378	0,0378	0,0378	0,0378
36,0	1,22	1906	0,0520	0,0336	0,0336	0,0336	0,0336
40,0	1,35	2118	0,0501	0,0305	0,0305	0,0489	0,0302
44,0	1,49	2330	0,0485	0,0310	0,0313	0,0475	0,0275

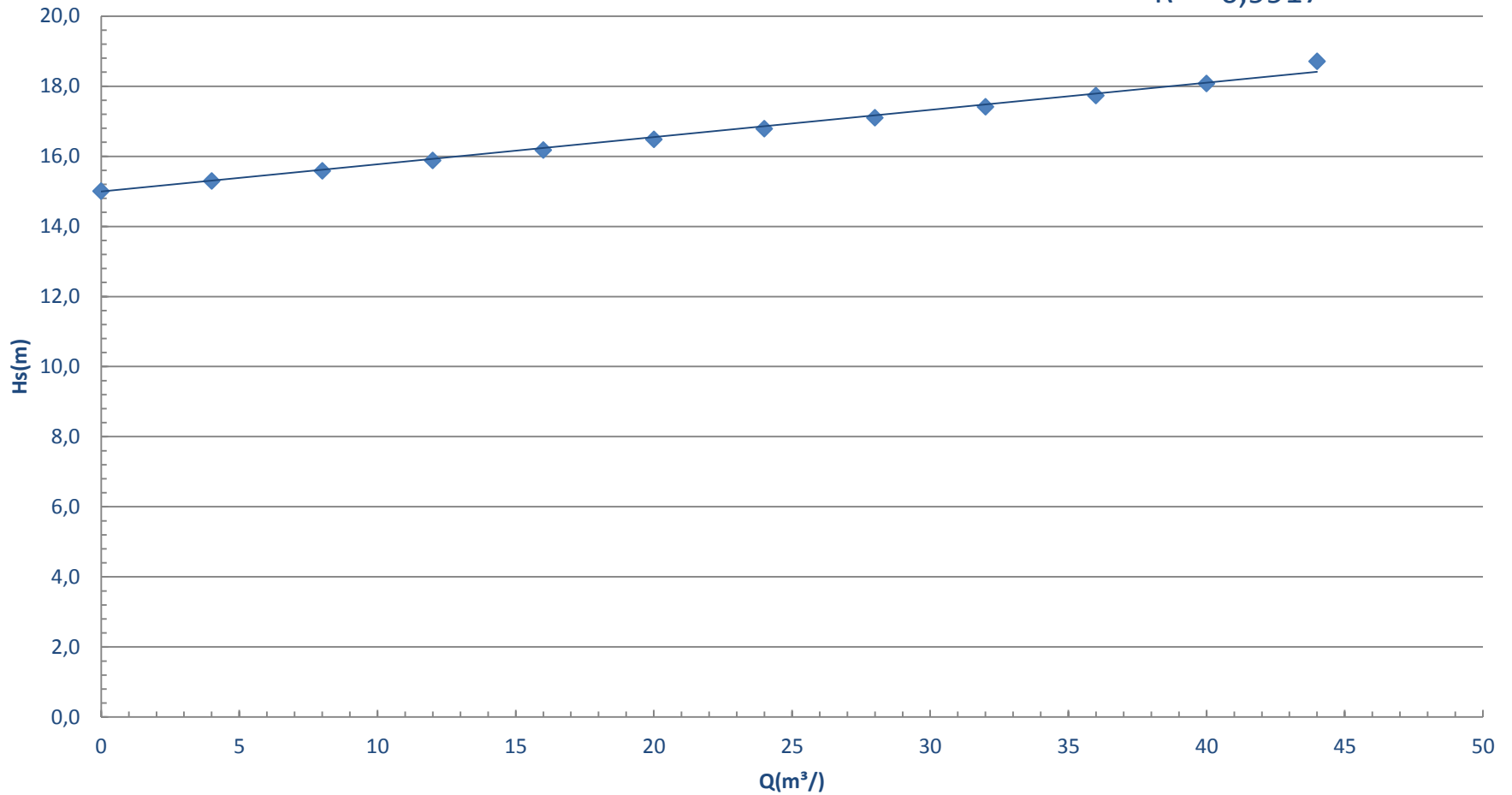
## VALORES DA CCI

Q(m <sup>3</sup> /h)	f <sub>5"</sub>	f <sub>4"</sub>	Re <sub>4"</sub>	$\alpha$	H <sub>s</sub> (m)
0					15,0
4	0,379	0,302	211,8	2	15,3
8	0,190	0,151	423,7	2	15,6
12	0,126	0,101	635,5	2	15,9
16	0,0949	0,0755	847,3	2	16,2
20	0,0759	0,0604	1059,1	2	16,5
24	0,0632	0,0504	1271,0	2	16,8
28	0,0542	0,0432	1482,8	2	17,1
32	0,0474	0,0378	1694,6	2	17,4
36	0,0422	0,0336	1906,4	2	17,7
40	0,0379	0,0305	2118,3	2	18,1
44	0,0345	0,0313	2330,1	2	18,7

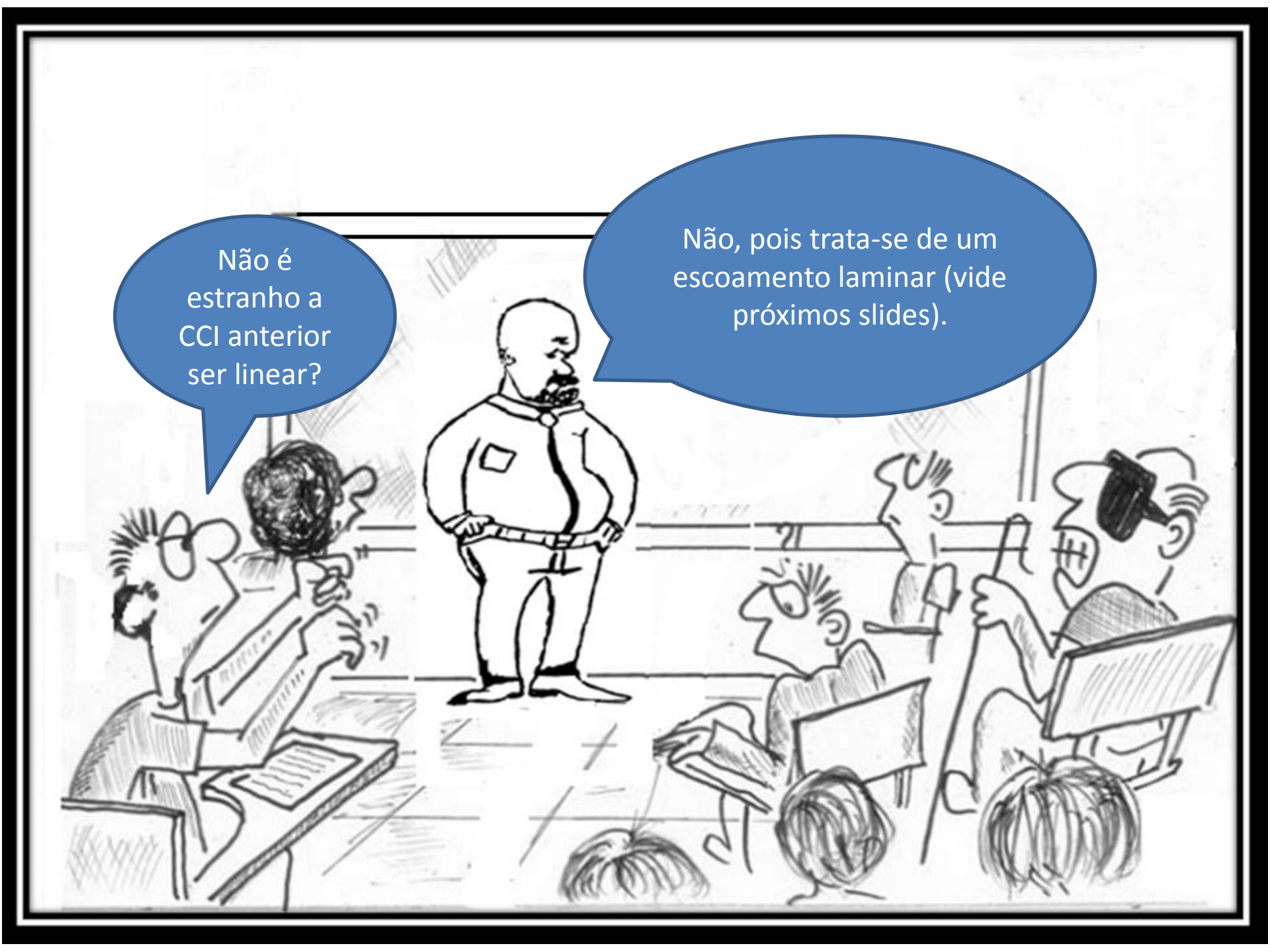
CCI

$$H_s = 0,0774Q + 15$$

$$R^2 = 0,9917$$



◆ HS(m) — Linear (HS(m))

A black and white cartoon illustration of a lecture hall. A lecturer stands at the front with hands on hips. Several students are seated at desks, some looking at the lecturer, some at their papers. Two blue speech bubbles are overlaid on the image. The first bubble, on the left, contains a question in Portuguese. The second bubble, on the right, contains an answer in Portuguese. The drawing style is simple and sketchy.

Não é  
estranho a  
CCI anterior  
ser linear?

Não, pois trata-se de um  
escoamento laminar (vide  
próximos slides).

Demonstração que a CCI para escoamento laminar dá uma equação do primeiro grau, ou seja, linear.

Vamos considerar uma instalação de bombeamento com um único diâmetro e sem carga cinética na seções inicial e final.

$$H_S = H_{\text{est}} + \frac{64}{\text{Re}} \times \frac{(L + \sum \text{Leq})}{D_H} \times \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

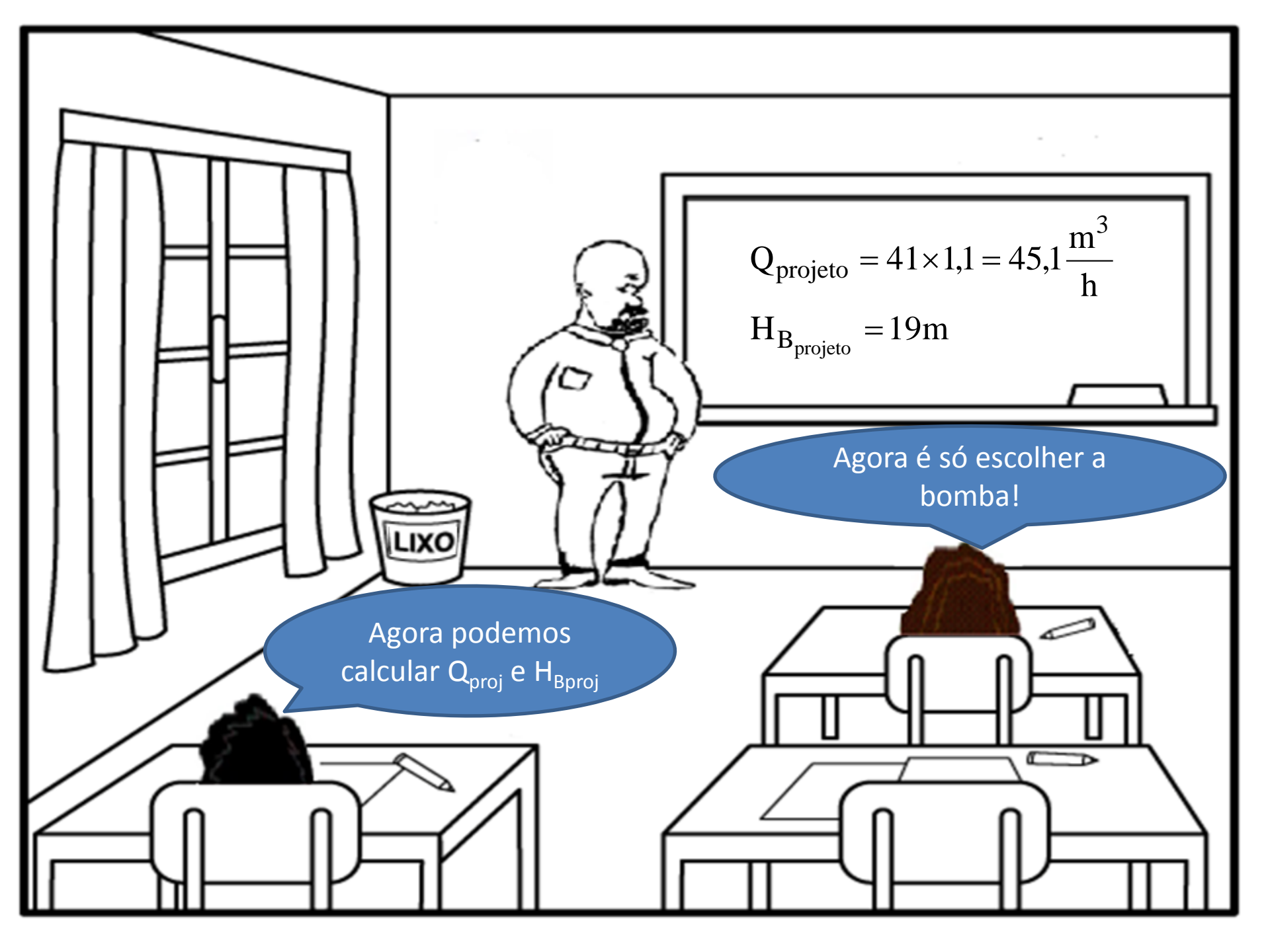
$$\text{Re} = \frac{v \times D}{\nu} = \frac{Q \times 4 \times D}{\pi \times D^2 \times v} = \frac{4Q}{\pi D v}$$

$$H_S = H_{\text{est}} + 64 \times \frac{\pi D v}{4Q} \times \frac{(L + \sum \text{Leq})}{D_H} \times \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

$$H_S = H_{\text{est}} + 16 \times \pi \times v \times (L + \sum \text{Leq}) \times \frac{Q}{2g \times A^2}$$

$$H_S = H_{\text{est}} + \frac{16 \times \pi \times v \times (L + \sum \text{Leq})}{2g \times A^2} \times Q$$




$$Q_{\text{projeto}} = 41 \times 1,1 = 45,1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$H_{B_{\text{projeto}}} = 19\text{m}$$

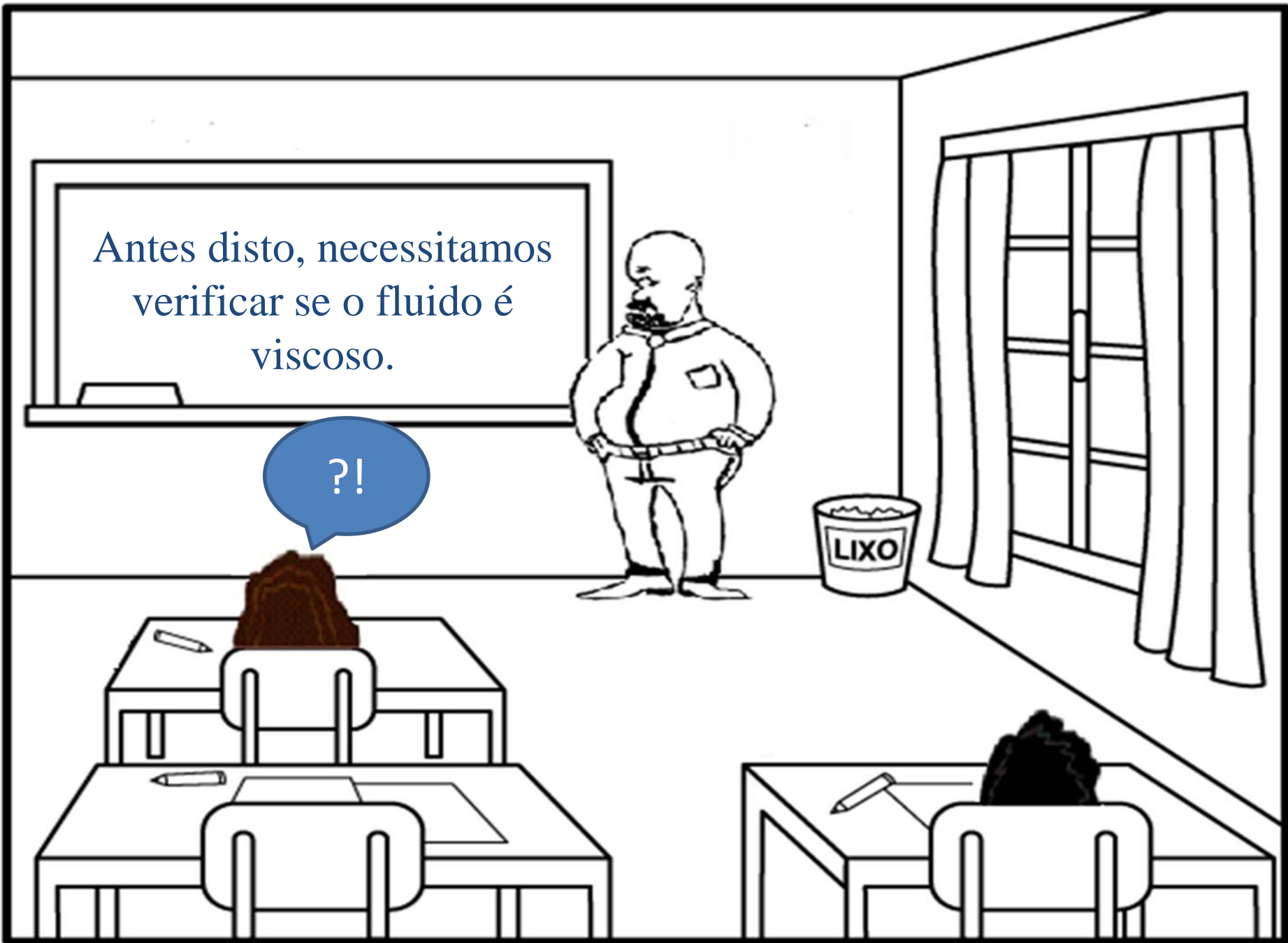
Agora é só escolher a bomba!


Agora podemos calcular  $Q_{\text{proj}}$  e  $H_{B_{\text{proj}}}$

Antes disto, necessitamos  
verificar se o fluido é  
viscoso.

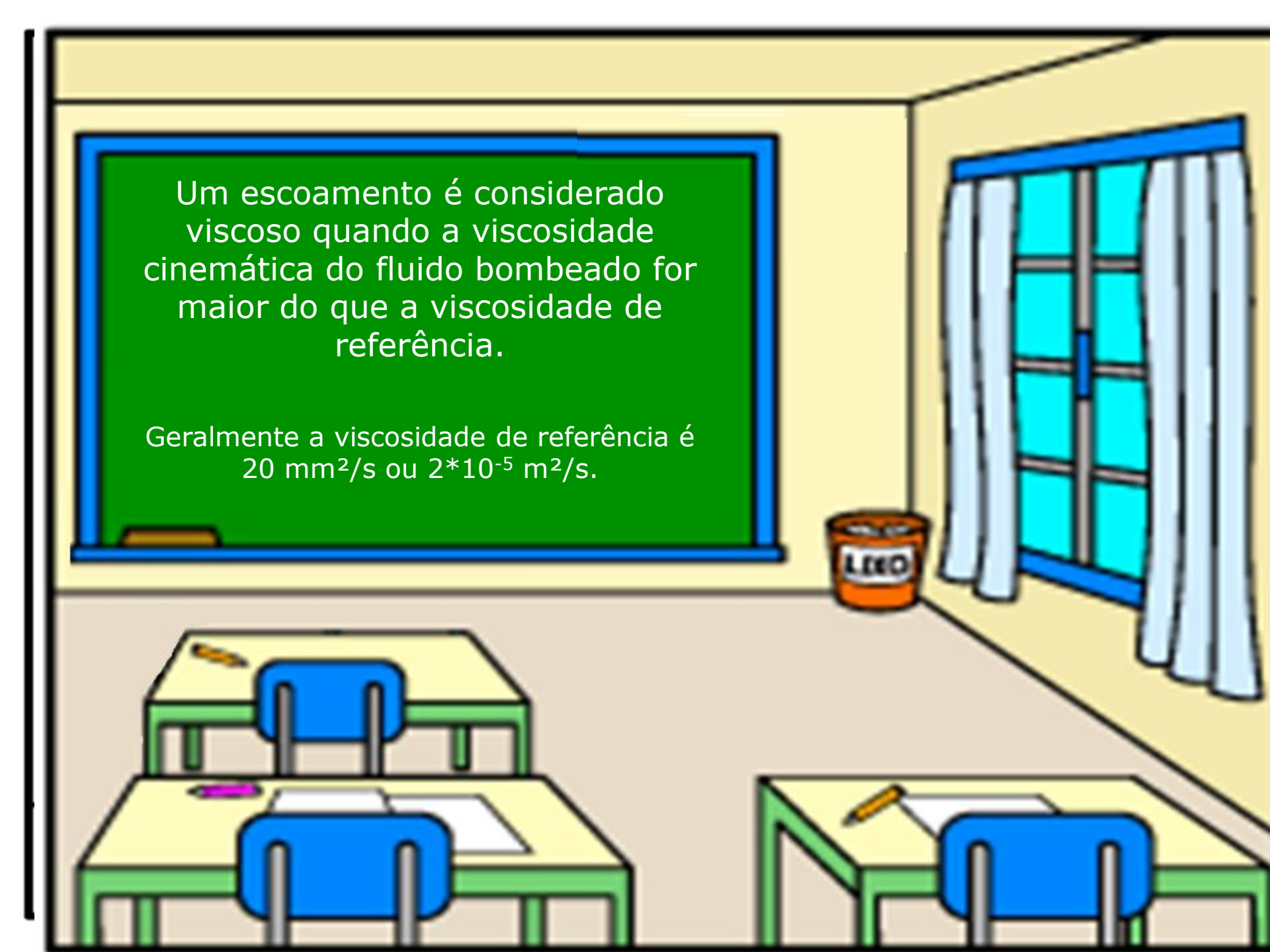
?!

LIXO



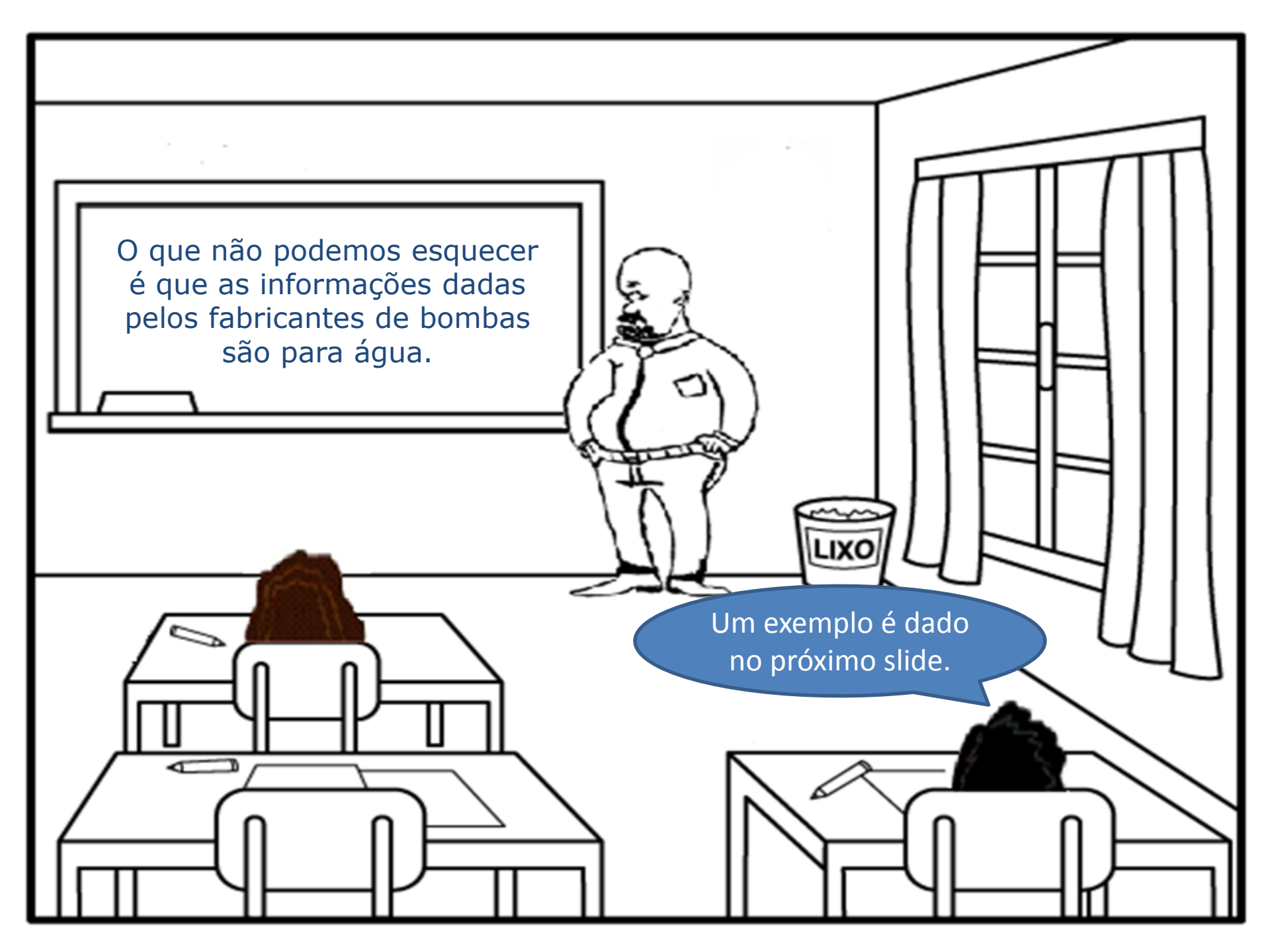


Como o escoamento foi laminar (CCI linear), isto pode ser um indício de ser um escoamento viscoso e se for não poderemos escolher a bomba de imediato.



Um escoamento é considerado viscoso quando a viscosidade cinemática do fluido bombeado for maior do que a viscosidade de referência.

Geralmente a viscosidade de referência é  $20 \text{ mm}^2/\text{s}$  ou  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .



O que não podemos esquecer  
é que as informações dadas  
pelos fabricantes de bombas  
são para água.

Um exemplo é dado  
no próximo slide.



**Atenção:** Os valores de NPSH indicados nas curvas são valores mínimos e representam o limite para início da cavitação, considerando como líquido bombeado água desgaseificada.

Por razões de segurança deve ser considerado no mínimo 0,5 m de acréscimo aos valores lidos nas curvas de NPSH.

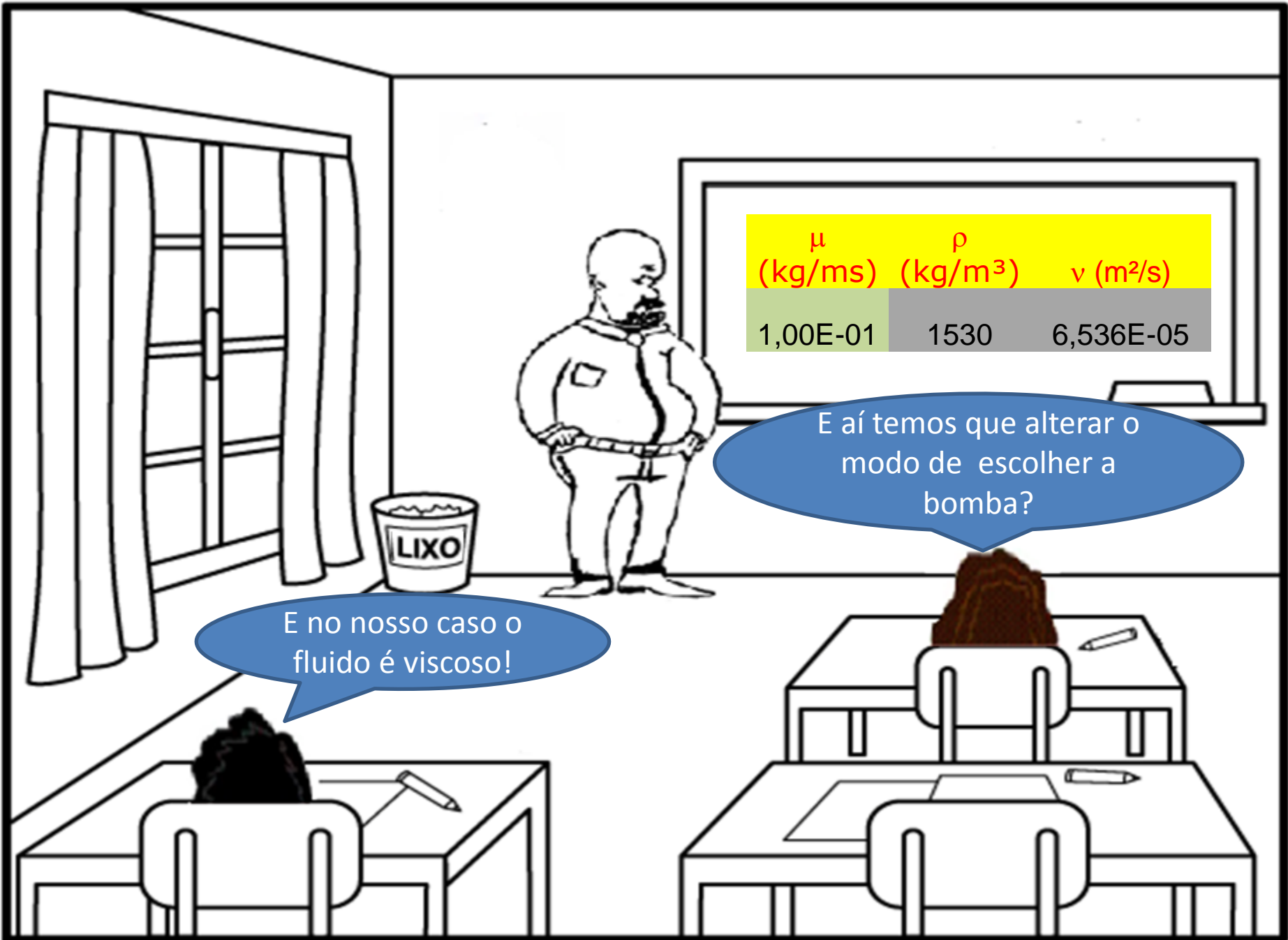
- Garantia das características de funcionamento conforme ISO 9906 anexo "A".
- Os valores de altura manométrica e vazão são válidos para fluídos com densidade  $\rho = 1,0 \text{ kg/dm}^3$  e viscosidade cinemática máxima  $\nu = 20 \text{ mm}^2/\text{s}$ .
- Se a densidade for  $\neq 1,0 \text{ kg/dm}^3$  os dados de potência necessária deverão ser multiplicados pelo valor de  $\rho$ .
- Para rotores executados com material ASTM A 743 CF8M os valores de rendimento que constam nas curvas devem ser reduzidos conforme tabela abaixo:

Largura Rotor (mm)	Pontos de Redução
até 12 mm	3 pontos
de 12 mm até 15 mm	2 pontos
acima de 15 mm	sem redução

**Warning:** The NPSH values given in the performance curve sheets are minimum values which correspond to the cavitation limit. They apply to degassed water.

For reasons of safety the curve values must, therefore, be increased by at least 0.5 m for application.

- The measured values in the performance curves comply with ISO 9906 appendix - A.
- The total heads and the performance characteristics refer to media with a density  $\rho = 1.0 \text{ kg/dm}^3$  and a kinematic viscosity  $\nu$  up to  $20 \text{ mm}^2/\text{s}$ .



$\mu$ (kg/ms)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
1,00E-01	1530	6,536E-05

E no nosso caso o fluido é viscoso!

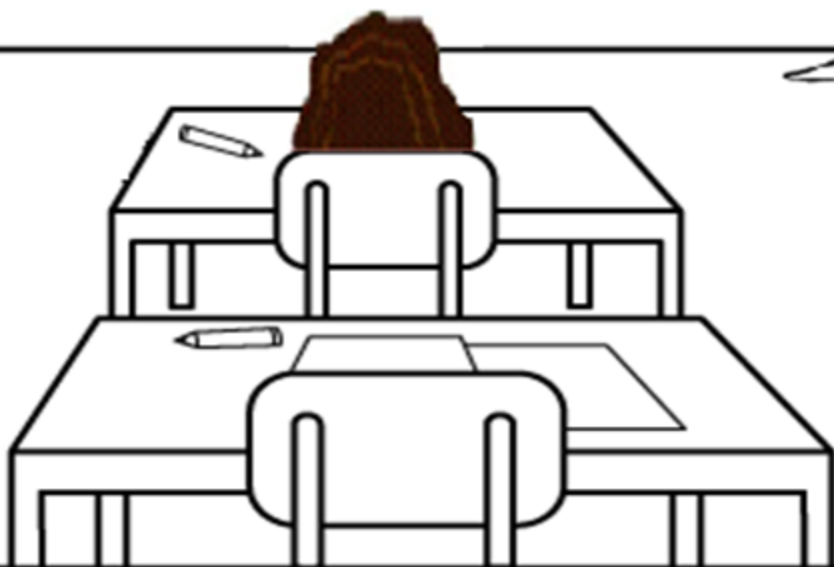
E aí temos que alterar o modo de escolher a bomba?



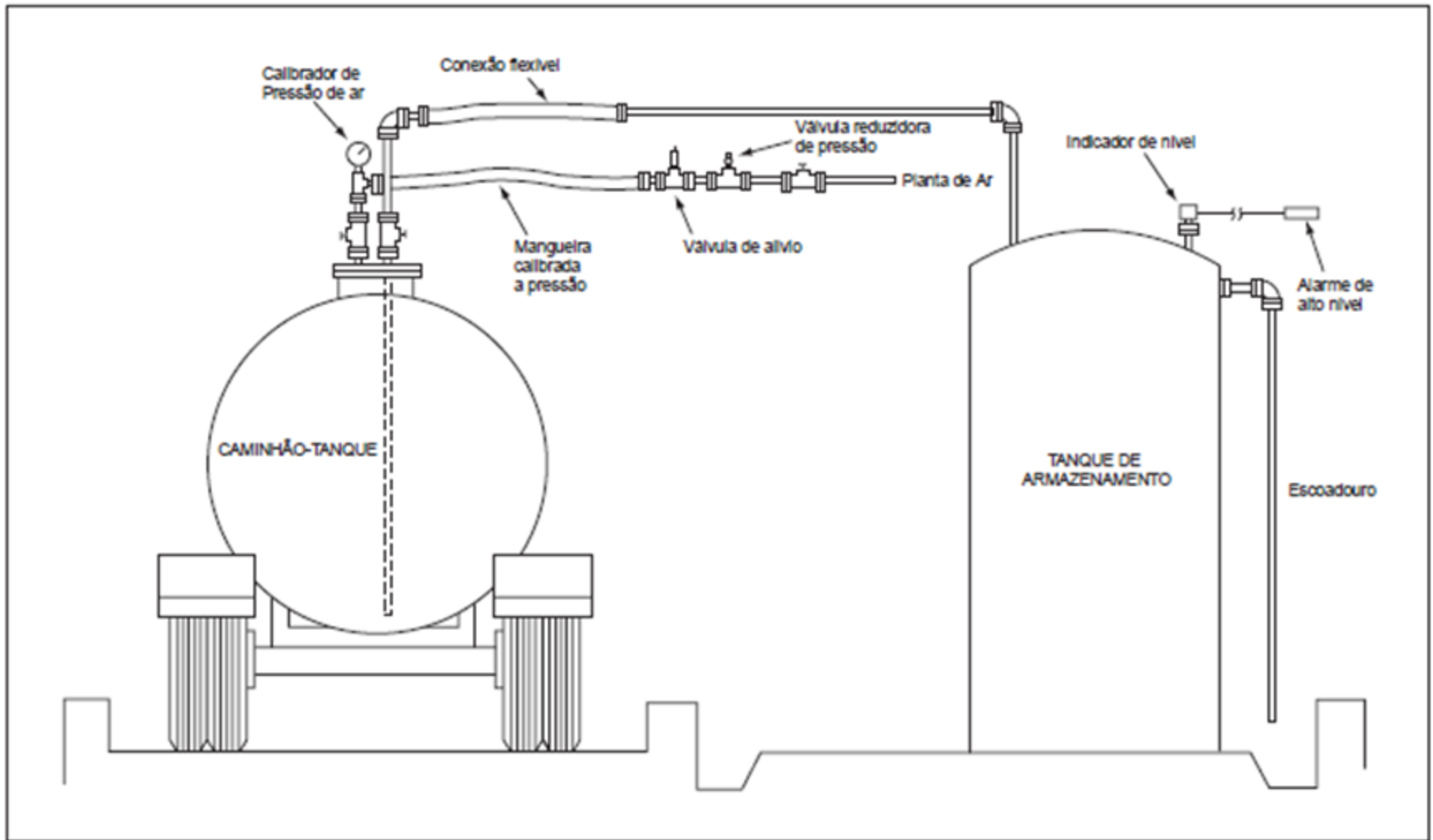
Isto mesmo, mas este  
tema estaremos  
estudando na próxima  
aula, portanto após a  
primeira prova oficial.



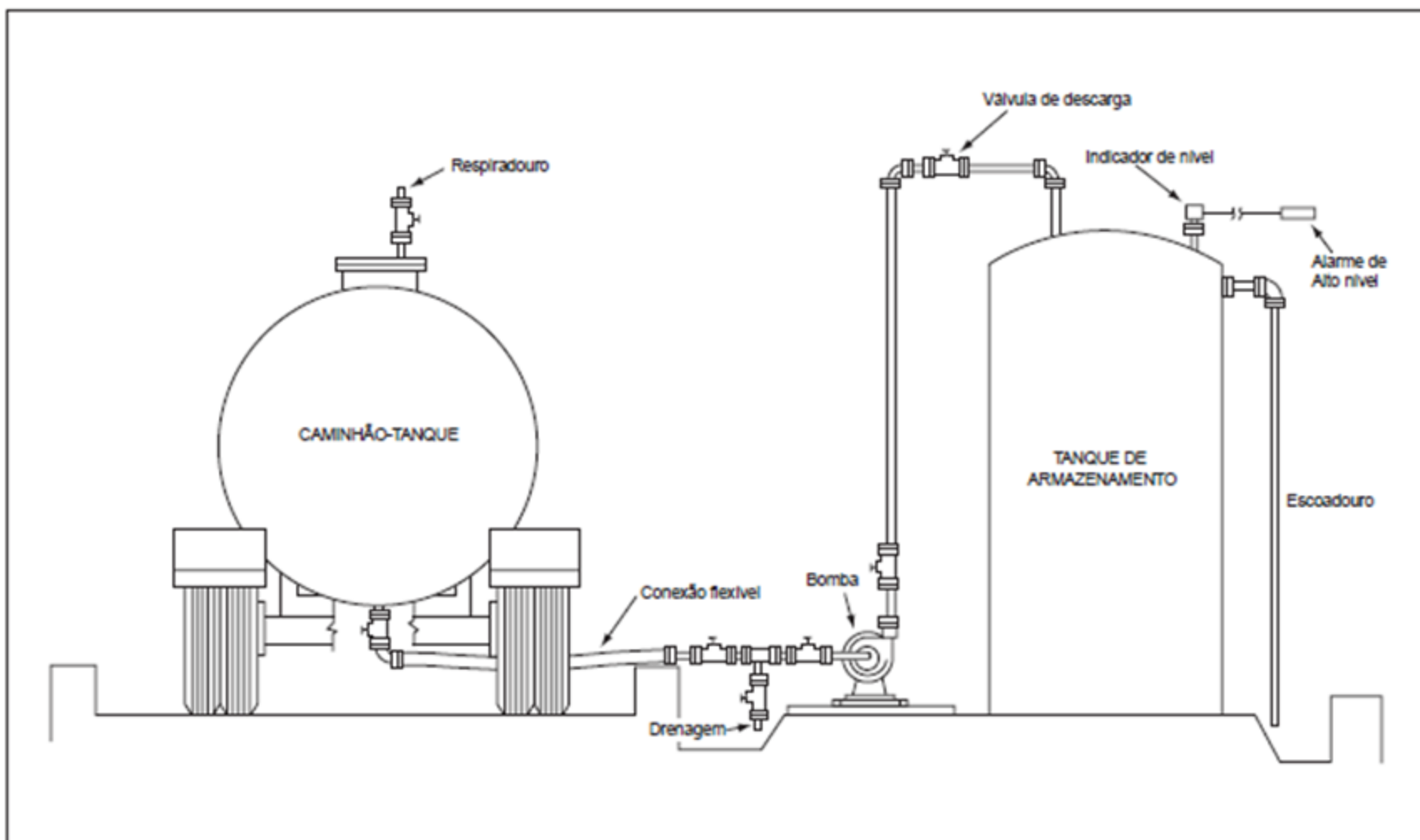
Os próximos slides mostram  
outras possibilidades de  
descarregar o caminhão com  
soda cáustica 50% e algumas  
das suas propriedades.



**Figura 10** Descarregamento de Soda Cáustica por Cima do Caminhão-Tanque com Pressão de Ar



**Figura 11** Descarregamento de Soda Cáustica por Baixo do Caminhão-Tanque com Bomba



Para obtenção da viscosidade da soda cáustica

