

Primeira aula de teoria de ME5330

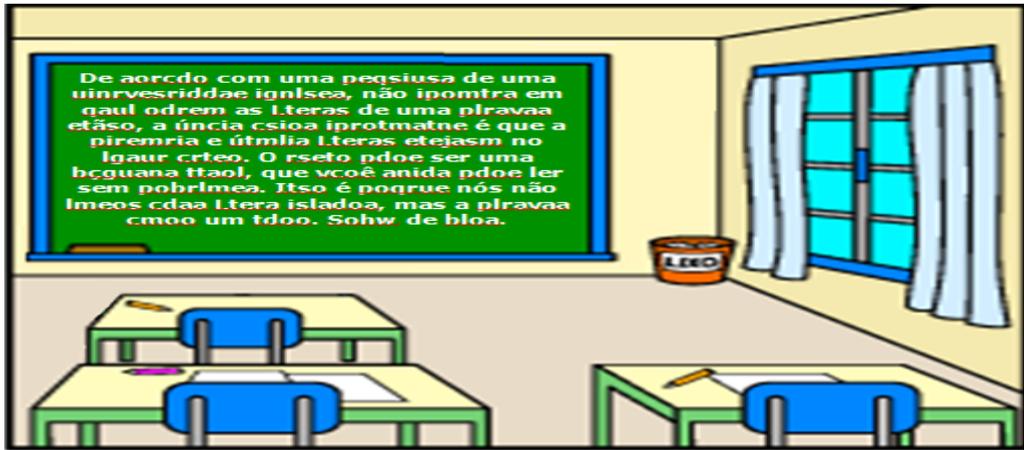
Primeiro semestre de 2014





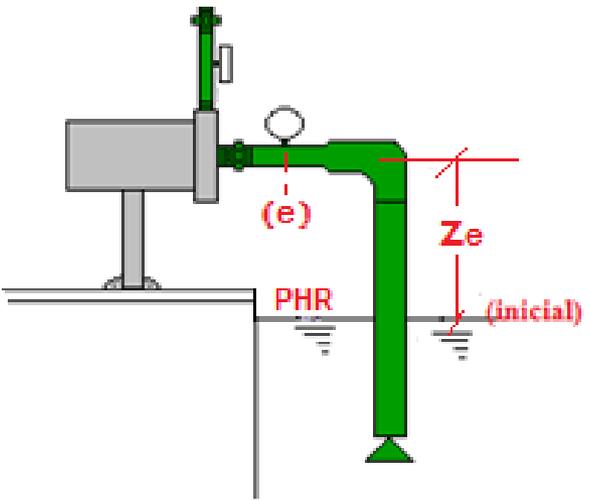
Se não sei para
onde vou
qualquer caminho
serve!

Lewis Carroll
ALICE NO PAÍS DAS MARAVILHAS
Tradução de Clélia Regina Ramos



No intuito de se estabelecer um caminho, apresento o que estudaremos.

E que está baseado em um curso de 72 horas distribuídas semanalmente com duas horas aula de teoria e duas horas aula de laboratório.



OBJETIVO CENTRAL DO CURSO



Relacionar e ampliar os estudos de mecânica dos fluidos nas principais aplicações da engenharia química, o que nos leva a estudar: o projeto de uma instalação hidráulica básica, onde dimensionamos as tubulações, escolhemos a bomba adequada, analisamos o fenômeno de cavitação e calculamos o custo de operação; a determinação experimental do rendimento da bomba; a associação série e paralelo de bombas hidráulicas; utilização do inversor de frequência tanto no controle da vazão do escoamento, como na redução da potência consumida pelo sistema; correções das curvas características das bombas (CCB) para fluidos “viscosos” e determinação do $NPSH_{\text{requerido}}$ em função da rotação específica.

Projeto de uma instalação de bombeamento

Projeto, já estava na hora!

Vamos apresentar as suas etapas básicas



1ª - Dados iniciais como fluido e sua temperatura de escoamento, condições de captação e descarga e a vazão desejada!

Condições de captação e descarga, o que vem a ser isto?

Seria conhecer os dados para calcular a carga inicial e final (H_i e H_f)



Para viabilizar o cálculo das cargas mencionadas, vamos considerar uma seção x qualquer:

$$H_x = z_x + \frac{p_x}{\gamma} + \frac{\alpha_x \times v_x^2}{2g}$$

$\alpha_x \cong 2,0 \rightarrow$ escoamento laminar

$\alpha_x \cong 1,0 \rightarrow$ escoamento turbulento

γ = peso específico
 v = velocidade média
 g = aceleração da gravidade

Para definir a cota z , devemos adotar um plano horizontal de referência (PHR) e se a pressão for lida por um manômetro metálico, pode haver necessidade de correção!

Lembrei!

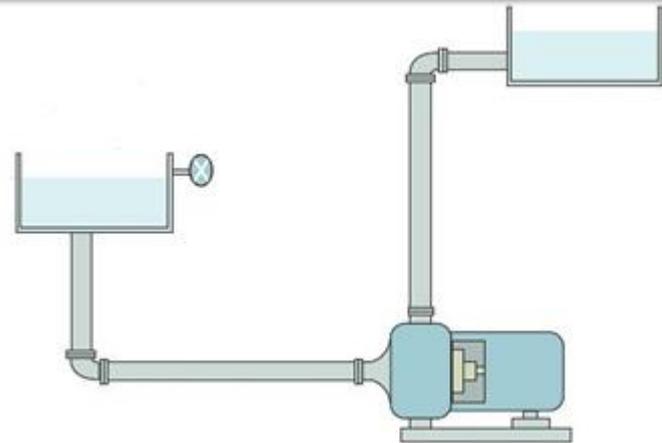
2ª - Com a vazão desejada ($Q = \text{volume/tempo} = \text{velocidade média} \times \text{área da seção formada pelo fluido}$) dimensionamos os tubos, ou seja especificamos o seu material, seu diâmetro nominal, sua espessura, seu diâmetro interno e a sua área de seção livre, para tal devemos recorrer a expressão a seguir:

$$Q = v \times A$$

4ª - Tendo o esboço escrevemos a equação da curva característica da instalação (CCI), que representa a carga que o fluido necessita para escoar na instalação com uma vazão Q .

$$H_i + H_S = H_f + H_{pT}$$

3ª - Aí, indo ao local do projeto, esboçamos a instalação a ser projetada, definindo desta forma a sua cota crítica, seus comprimentos e seus acessórios hidráulicos.



5ª - Obtemos a vazão de projeto (Q_{projeto}) multiplicando a vazão desejada (Q) por um fator de segurança, que é no mínimo igual a 1,1.

6ª - Com a vazão de projeto na equação da CCI calculamos a carga manométrica de projeto (H_{Bprojeto}).

7ª - Com a Q_{projeto} , o H_{Bprojeto} e a aplicação da instalação, desde de que a viscosidade (μ) seja menor que a de referência, escolhemos a bomba.



8ª - Se a viscosidade do fluido for maior que a viscosidade de referência, efetuamos as correções das curvas $H_B = f(Q)$ e do $\eta_B = f(Q)$ da bomba.

9ª - No cruzamento da CCI com a CCB obtemos o diâmetro do rotor e o ponto de trabalho da bomba (Q_τ , $H_{B\tau}$, $\eta_{B\tau}$ e $NPSH_{req}$).



10ª - Verificamos o fenômeno de cavitação (vaporização e condensação do fluido na própria temperatura de escoamento). Aqui talvez haja a necessidade de se usar o conceito de rotação específica (parâmetro que classifica as bombas e que permite estimar o $NPSH_{req}$).

11ª - Calculamos o consumo de operação.

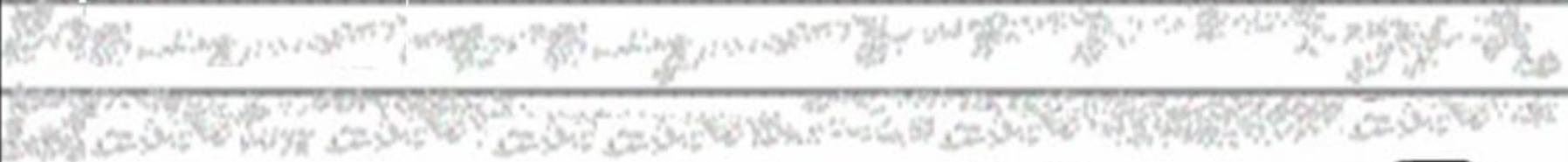
Se houver alterações no processo alimentado pela instalação, já que existe uma bomba reserva na casa de máquina verificamos a possibilidade de se associar as bombas em série ou paralelo.



E como os assuntos serão apresentados neste trabalho, no intuito de facilitar a compreensão do desenvolvimento do projeto mencionado?



Apresento a seguir o caminho adotado neste trabalho para o desenvolvimento das aulas de "TEORIA" e de "LABORATÓRIO"





TEORIA

1. Pré-requisitos:

1.1. Equação da energia para regime permanente

1.2. Cálculos relacionados ao escoamento permanente de fluido incompressível em condutos forçados

2. Etapas de um projeto de uma instalação hidráulica básica de bombeamento

2.1. Dados iniciais; cálculo das cargas iniciais e finais da instalação a ser projetada;

2.2. Dimensionamento das tubulações que constituem a instalação;

2.3. Determinação da equação da curva característica da instalação (CCI);

- 2.4. Escolha preliminar da bomba e estabelecimento do seu ponto de trabalho;
- 2.5. Conceito de supercavitação e cavitação e estabelecimento das condições para que este fenômeno não ocorra na instalação a ser projetada;
- 2.6. Especificação do motor elétrico e cálculo da potência consumida pela instalação hidráulica de bombeamento;

3. Rotação específica

4. Correção das curvas de bomba para o bombeamento de fluido viscoso.

5. A utilização do inversor de frequência.

6. Associação série e paralelo de bombas hidráulicas.



Estes assuntos estarão sendo desenvolvidos interligados às atividades de laboratório!



LABORATÓRIO

1. Determinação da carga total em secções de uma instalação hidráulica de bombeamento e cálculo das perdas de carga antes e depois da bomba
2. Determinação do coeficiente de perda de carga distribuída (f) e do comprimento equivalente (L_{eq})
3. Determinação da vazão pelo parâmetro Reynolds raiz de “ f ”
4. Correção da CCB em função do escorregamento existente no acoplamento da bomba hidráulica com o motor elétrico (utilização do tacômetro)

5. Estudos ligados à cavitação e a sua visualização no laboratório.
6. Determinação do rendimento da bomba.
7. Experiência do inversor de frequência.
8. Experiência da associação em série de bombas hidráulicas.
9. Experiência da associação em paralelo de bombas hidráulicas.
10. Influência da perda de carga na vazão máxima de operação de uma bomba hidráulica

Como este material será utilizado em um curso de formação dos futuros engenheiros químicos eu proponho uma metodologia de avaliação.





Critério de
avaliação

$$A = \text{fator} \times M_{\text{provas}}$$

$$M_{\text{provas}} = \frac{\sum P_i}{2}$$

$$0,8 \leq \text{fator} \leq 1,2 \Rightarrow M_{\text{Lab}} = \frac{P_{L1} + P_{L2}}{2}$$

$$M_{\text{Lab}} \geq 8,0 \Rightarrow \text{fator} = 1,2$$

$$M_{\text{Lab}} \leq 4,0 \Rightarrow \text{fator} = 0,8$$

$$4,0 \leq M_{\text{Lab}} \leq 8,0 \Rightarrow \text{fator} = 0,1 \times M_{\text{Lab}} + 0,4$$

As provas (P_1 , P_2 e P_3) serão constituídas de duas partes cada uma valendo 5,0.

A primeira parte ocorrerá em 80 minutos e será sem consulta.

A segunda parte ocorrerá 10 minutos após o término da primeira e será com consulta aos apontamentos e tendo a duração máxima de 160 minutos.

Nestas provas a matéria avaliada será tanto referente as aulas de teoria como as de laboratório.

Já as provas de laboratório (P_{L1} e P_{L2}) ocorrerão sempre uma semana antes das semanas de provas (da $P1$ e da $P2$) e terão uma parte prática de 20 minutos e uma “teórica” de 80 minutos, sem consulta e onde a matéria avaliada será referente as aulas de laboratório.

Optei em apresentar este trabalho na internet, primeiro para democratizar o seu uso e romper limites de utilização e segunda para estar aberto para uma melhoria continua.

Existem bibliografias para o seu acompanhamento?



Sim e as apresento a seguir,
salientando que encontram-
se com link na página:

www.escoladavida.eng.br



BIBLIOGRAFIA BÁSICA

- Mecânica dos fluídos para engenharia química – publicado no sítio:

http://www.escoladavida.eng.br/mecanica_dos_fluidos_para_eng_quimica.htm

MACINTYRE, Archibald Joseph. Bombas e instalações de bombeamento – 2ª edição – Rio de Janeiro: LTC, 2008.

SANTOS, Sérgio Lopes dos. Bombas & Instalações Hidráulicas - 3ª edição

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

GOMIDE, R. Operações com fluídos – Operações Unitárias – Volume II – 2ª. parte – Edição do Autor, 1997

MATTOS, E.E./Falco, R. Bombas Industriais – Rio de Janeiro, Editora Interciência Ltda., 1998

Outras bibliografias complementares encontram-se disponível na página:
http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/planejamento_22012/bibliografia_complementar_4.htm

Para facilitar os estudos propostos, iniciamos evocando alguns conceitos que foram abordados no curso de mecânica dos fluidos básica.

Ainda bem, pois eu já esqueci praticamente tudo!



No intuito de ajudar a recordar, ampliarei a síntese de mecânica dos fluidos básica e vou iniciar recordando o conceito de pressão, escalas de pressão, pressão em um ponto fluido, carga de pressão e equação manométrica.

Isto foi estudado em "ESTÁTICA DOS FLUIDOS"





Em se tratando de uma pressão constante, ou média, temos:

$$p = \frac{|F_N|}{A}$$

Quando consideramos a pressão atmosférica igual a zero, passamos a trabalhar na escala efetiva ou relativa, ou seja, aquela que adota como zero da escala a pressão atmosférica.



Pressão em um ponto fluido pertencente a um fluido contínuo, incompressível, em repouso e na escala efetiva:

$$p = \gamma \times h$$



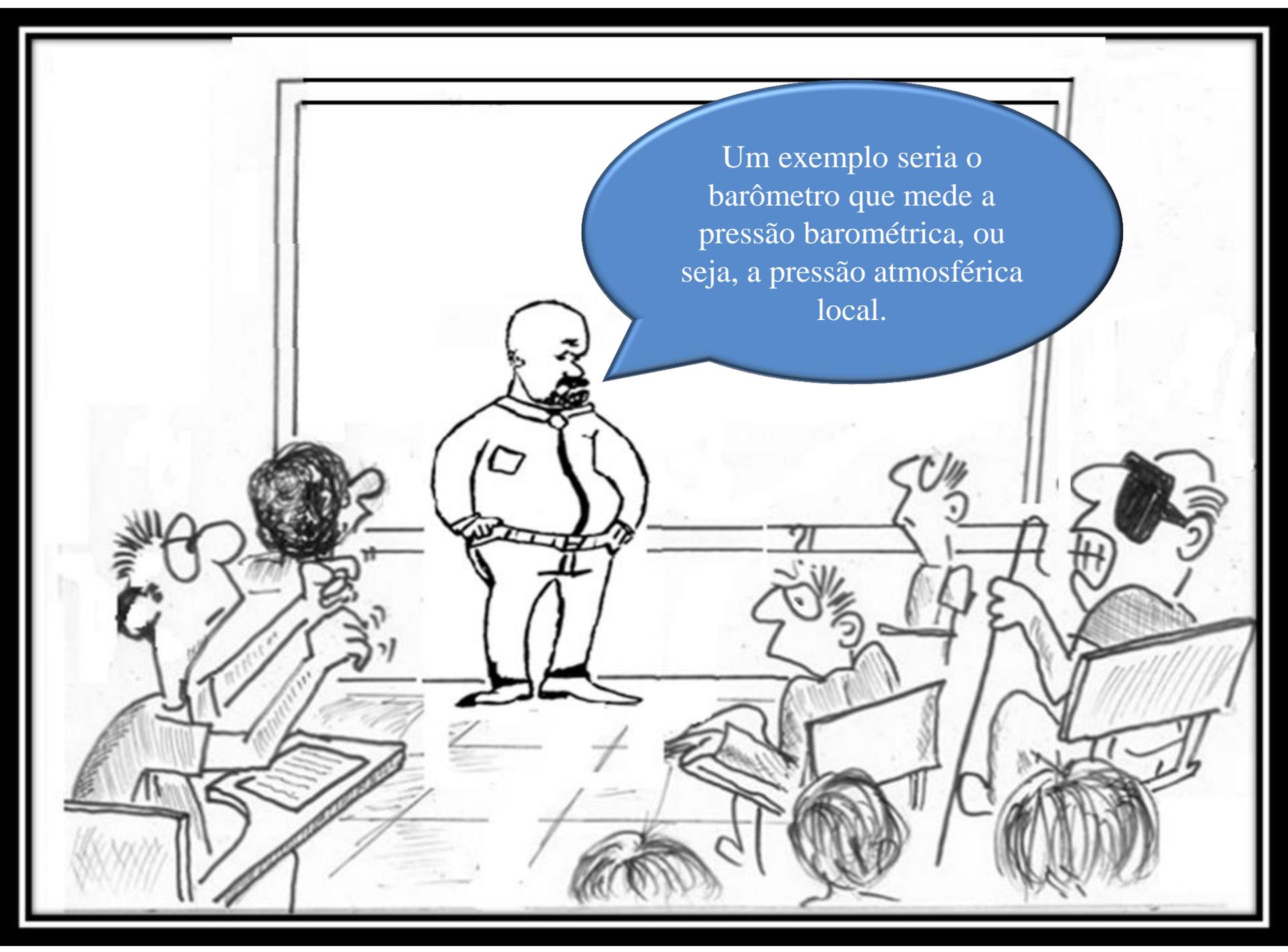
A cota h é denominada de carga de pressão e sua unidade é sempre uma unidade de comprimento acrescida do nome do fluido considerado, exemplo: mmHg



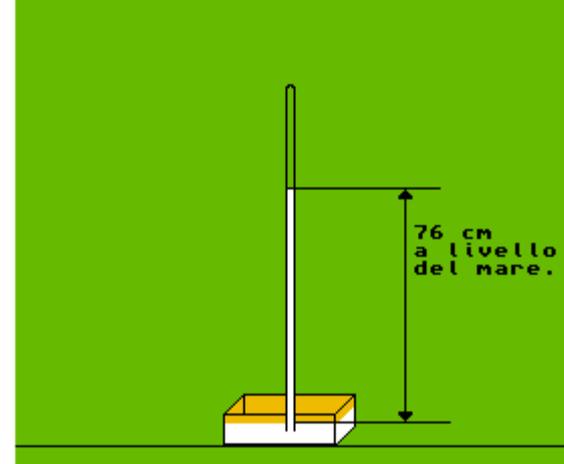
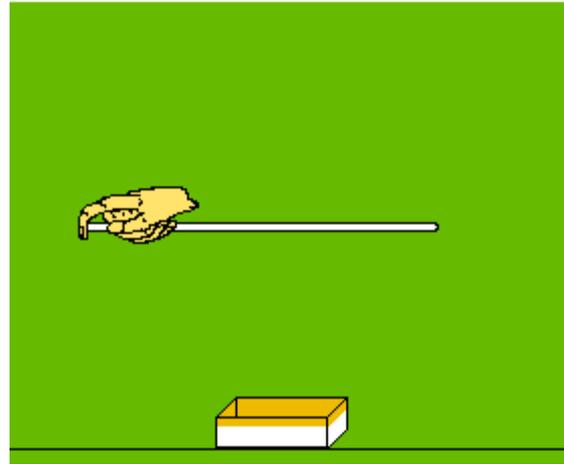
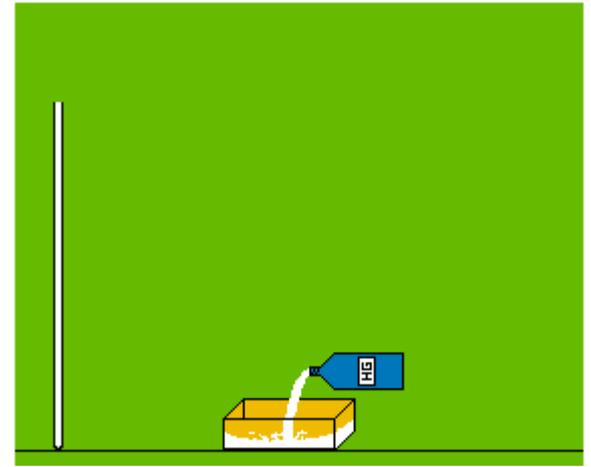
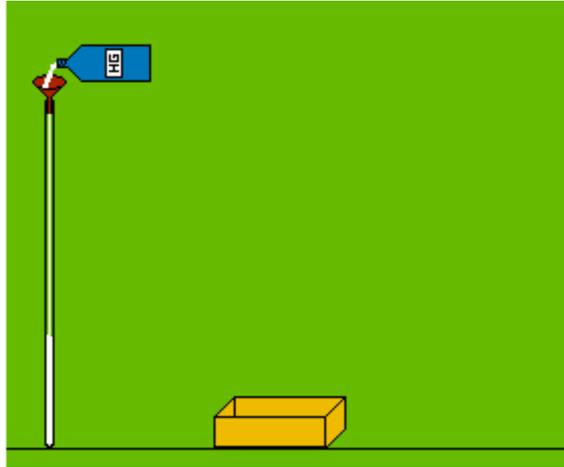
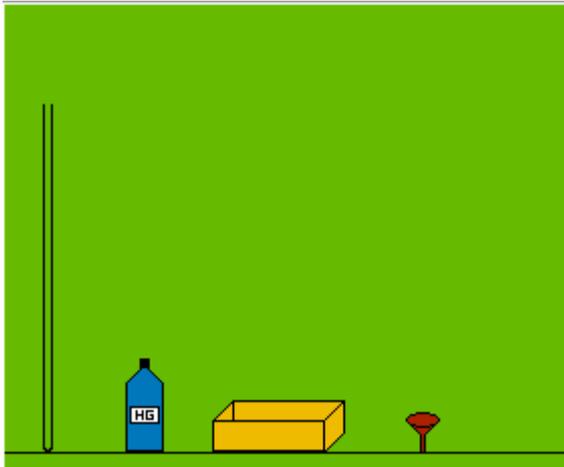
$$h = \frac{p}{\gamma}$$

E qual aparelhos lêem a carga de pressão?



A black and white cartoon illustration of a classroom. A teacher, a bald man with a beard wearing a sweater and tie, stands at the front with his hands on his hips. Several students are seated at desks, some looking at the teacher. A large blue speech bubble originates from the teacher, containing text in Portuguese. The scene is framed by a simple line drawing of a room with a window in the background.

Um exemplo seria o
barômetro que mede a
pressão barométrica, ou
seja, a pressão atmosférica
local.



Em relação ao vácuo absoluto temos:

$$P_{\text{atm}}_{\text{local}} = \gamma_{\text{Hg}} \times h$$



Neste caso a escala observada é a escala absoluta, que adota como o zero o vácuo absoluto, ou seja, ausência total de matéria, e por isto mesmo, nesta escala só existem pressões positivas, teoricamente, a pressão poderia ser nula que corresponderia ao vácuo absoluto.

A black and white cartoon illustration of a lecture hall. A professor with a beard and a white shirt stands at the front, looking towards the students. Several students are seated at desks, some looking at the professor, others looking at their papers or books. The drawing style is simple and sketchy.

E o barômetro trabalha nesta escala!

Outro exemplo seria
o piezômetro que
mede a carga de
pressão (h)



- É um tubo de vidro graduado.

piezômetro



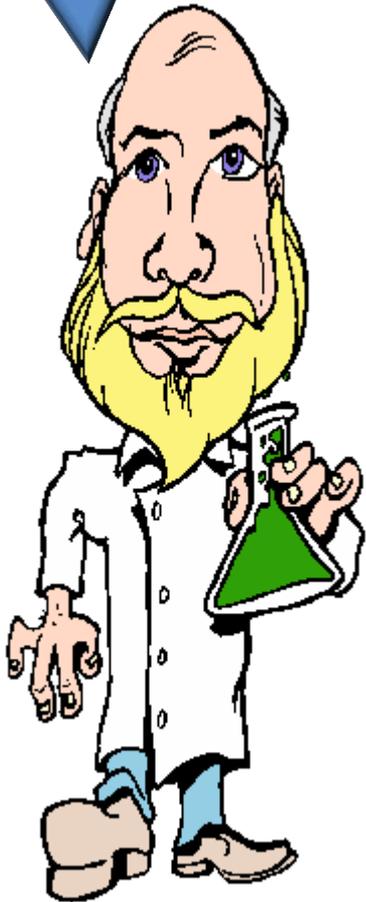
Só serve para pressão efetiva positiva e não elevada.





Ok! E o que vem
a ser pressão
manométrica?

A PRESSÃO
MANOMÉTRICA (p_m) é
lida nos manômetros
metálicos tipo bourdon



p_m = é a pressão registrada em um manômetro metálico ou de Bourdon e que se encontra na escala efetiva, a escala que adota como zero a pressão atmosférica local, que também é chamada de pressão barométrica.



$$p_m = p_{int} - p_{ext}$$

$$p_{ext} = p_{atm} = 0$$

Na figura temos um
manovacúômetro já
que existem duas
escalas, a positiva e
negativa.

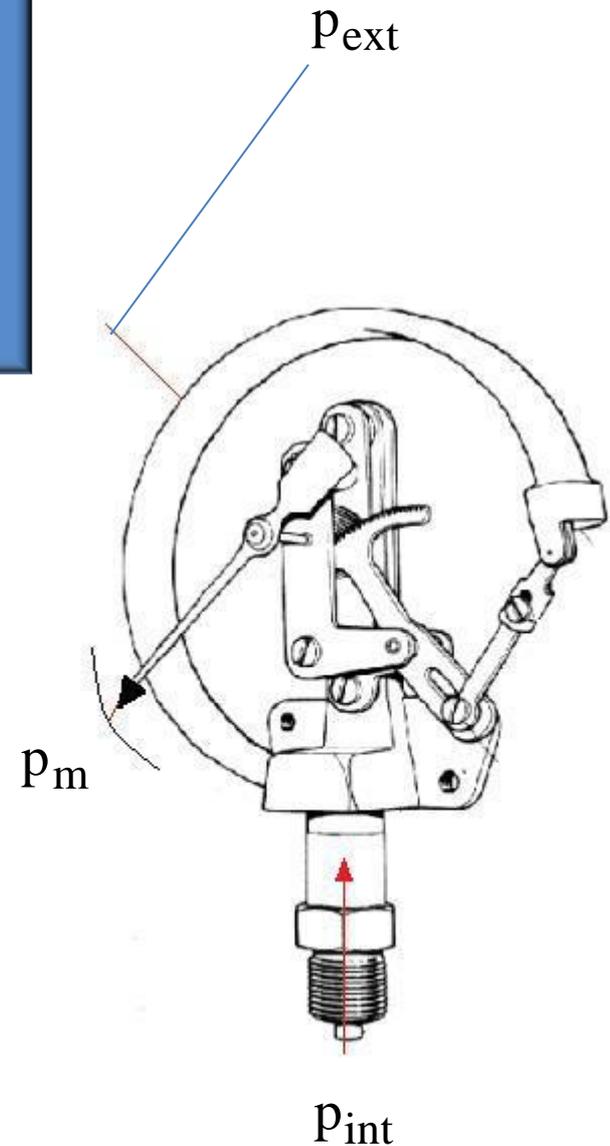


Adriano
Cunha

O princípio de funcionamento deste tipo de aparelho é o princípio da "língua da sogra" como mostra o esquema a seguir e onde a pressão manométrica é igual a pressão interna menos a pressão externa.

MANÔMETRO METÁLICO TIPO BOURDON

Se só existir a escala positiva o aparelho é chamado de manômetro, só escala negativa é chamado de vacuômetro e ambas é chamado de manovacuômetro



$$P_m = P_{int} - P_{ext}$$

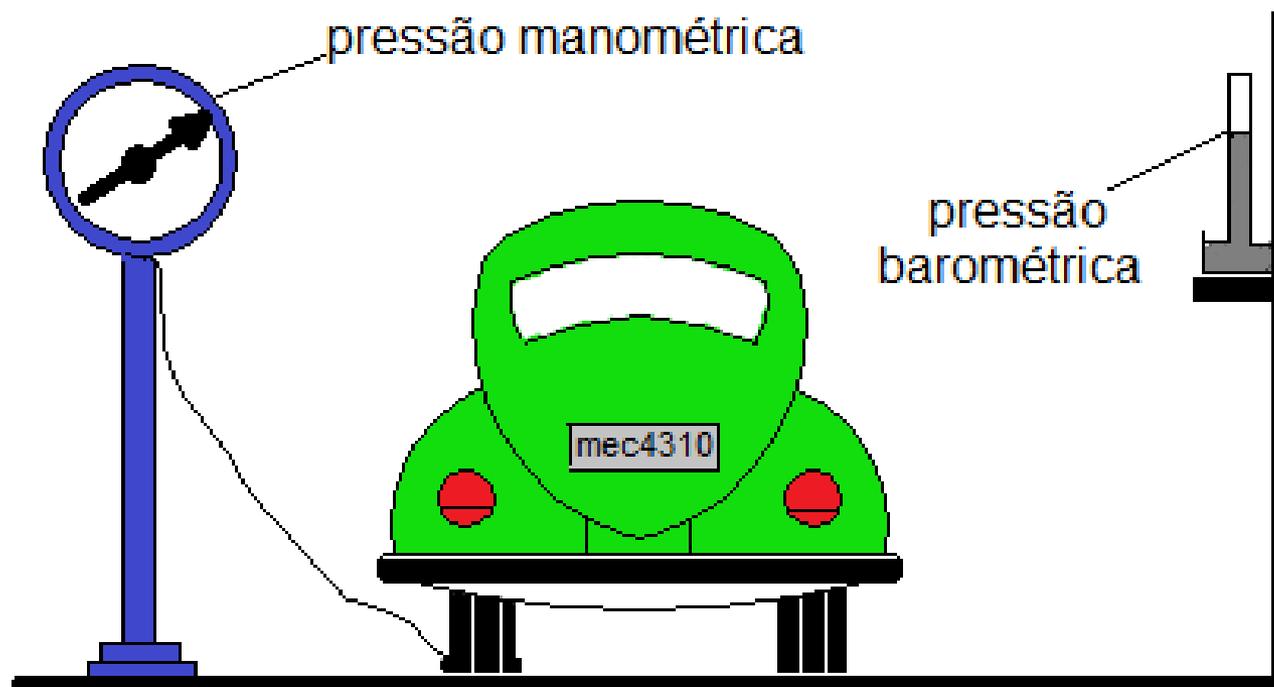


Manovacuômetro =
apresenta a escala
negativa e a escala
positiva

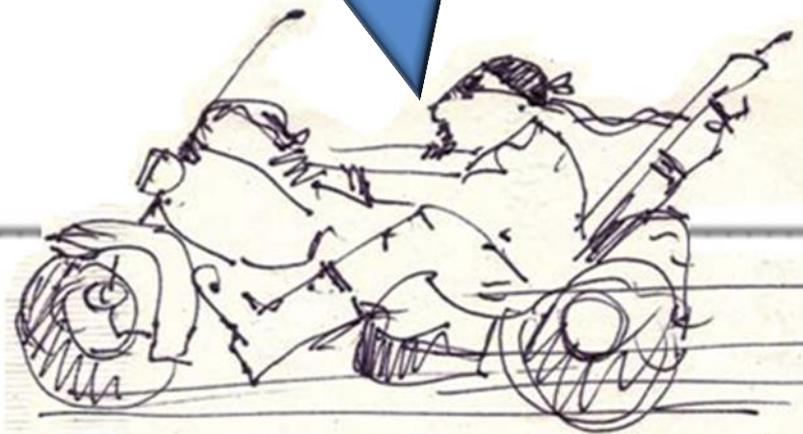
$$p_m = p_{int} - p_{ext}$$

$$\text{Se } p_{ext} = p_{atm} \rightarrow p_m = p_{int}$$

Para não esquecer a diferença
entre pressão manométrica e
barométrica!



Recordando a
equação
manométrica !



É a equação que aplicada nos manômetros de coluna de líquidos, resulta em uma diferença de pressões entre dois pontos fluidos, ou na pressão de um ponto fluido.



Para se obter a equação manométrica, deve-se adotar um dos dois pontos como referência. Parte-se deste ponto, marcando a pressão que atua no mesmo e a ela soma-se os produtos dos pesos específicos com as colunas descendentes ($+\sum\gamma*h_{descendente}$), subtrai-se os produtos dos pesos específicos com as colunas ascendentes ($-\sum\gamma*h_{ascendente}$) e iguala-se à pressão que atua no ponto não escolhido como referência.



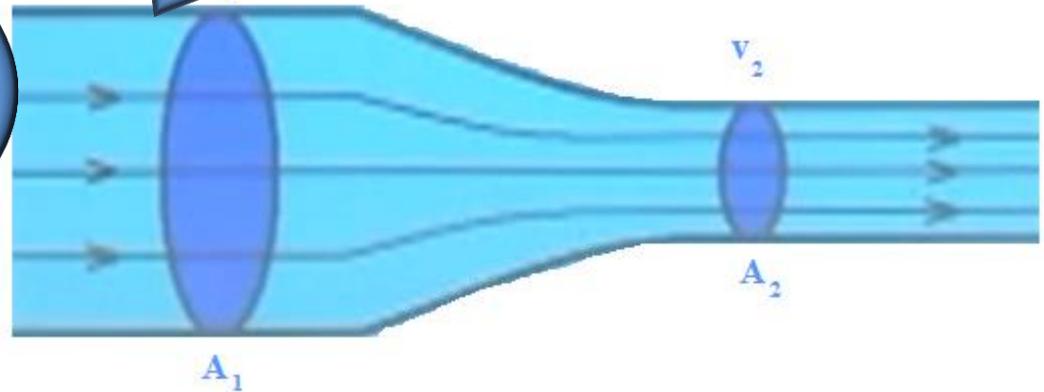


Vamos recordar também a equação da continuidade aplicada a um escoamento considerado incompressível e em regime permanente!

Vamos considerar duas seções: A_1 e A_2 e escrever a equação da continuidade:



Entre elas não existe acúmulo nem falta de massa!



$$\therefore m_{\text{entra}} = m_{\text{saí}} \rightarrow (\div t)$$

$$Q_{m1} = Q_{m2}$$

$$\rho_1 \times v_1 \times A_1 = \rho_2 \times v_2 \times A_2$$

Para o escoamento incompressível, temos:

$$\rho_1 = \rho_2 = \text{cte} \Rightarrow v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2 \therefore Q_1 = Q_2 = \text{cte}$$

A equação da continuidade é fundamental para dimensionar os tubos, isto porque sempre conhecemos a vazão desejada e em função da instalação conhecemos também a velocidade econômica.

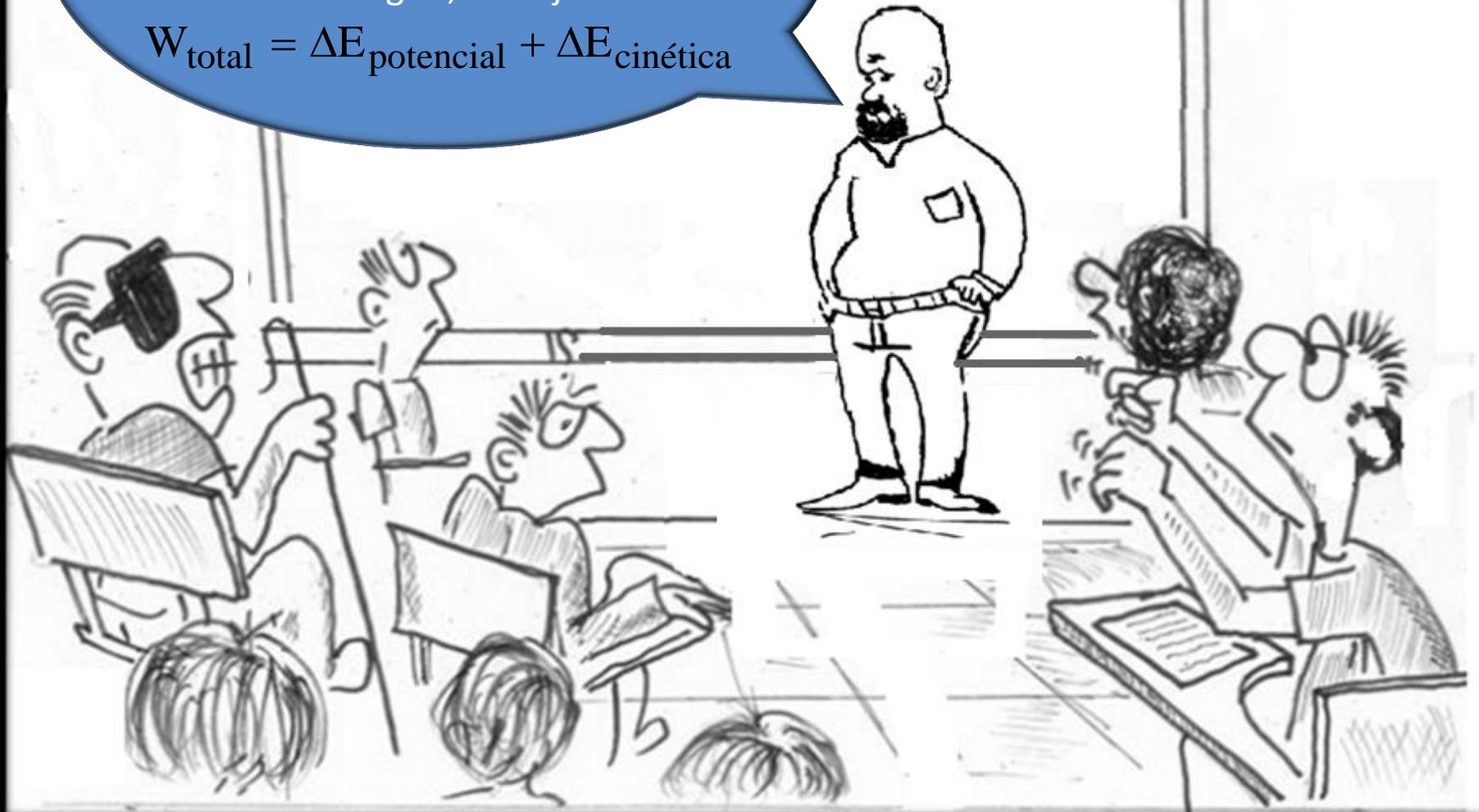
$$Q = v \times A = v \times \frac{\pi \times D_{\text{ref}}^2}{4}$$

E aí calculamos o diâmetro de referência.



A partir deste ponto,
recordamos a equação de
Bernoulli e para isto vamos
lembrar do teorema de trabalho
e energias, ou seja:

$$W_{\text{total}} = \Delta E_{\text{potencial}} + \Delta E_{\text{cinética}}$$



$$\Delta E_{\text{potencial}} = m \times g \times (z_2 - z_1) = \rho \times v \times A \times dt \times g \times (z_2 - z_1)$$

$$\Delta E_{\text{cinética}} = \frac{1}{2} \times m \times (v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} \times \rho \times v \times A \times dt \times (v_2^2 - v_1^2)$$

$$(p_1 - p_2) \times v \times A \times dt = \rho \times v \times A \times dt \times g \times (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \times \rho \times v \times A \times dt \times (v_2^2 - v_1^2)$$

$$p_1 - p_2 = \rho \times g \times (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \times \rho \times (v_2^2 - v_1^2) \rightarrow (\div \rho \times g = \gamma)$$

$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} = z_2 - z_1 + \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \therefore \frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = H_1$$

$$\frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} = H_2$$

$$H = \text{cte} = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

Equação de
Bernoulli



Aplicando a equação de Bernoulli ao tubo de Pitot.

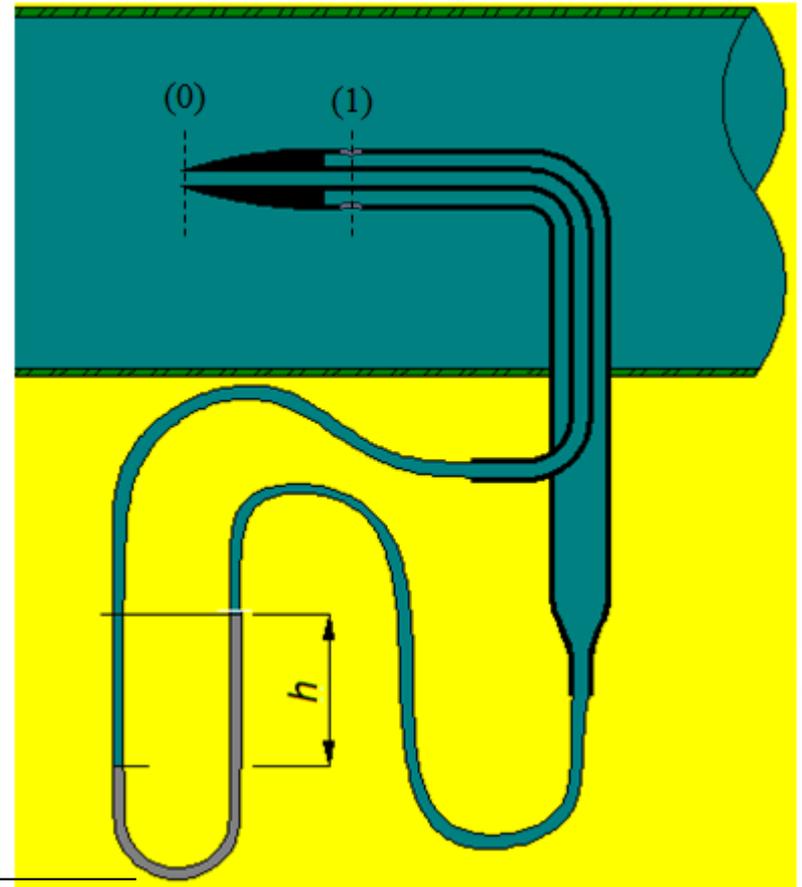
$$Z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} = Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}$$

Como $Z_0 = Z_1$

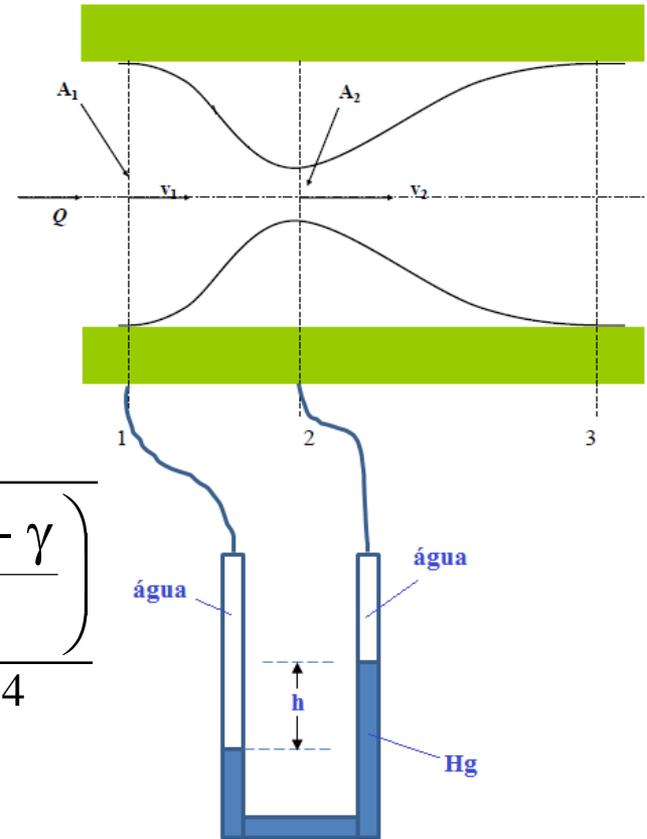
e $v_0 = 0$ e ainda $p_0 - p_1 = p_d$

tem - se :

$$v_1 = \sqrt{2g \times \frac{p_d}{\gamma}} = \sqrt{2g \times h \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma} \right)}$$

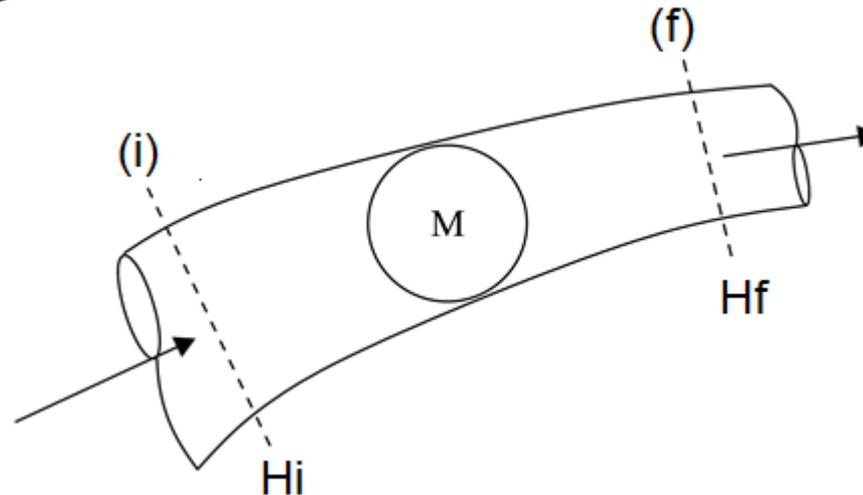


Outra aplicação da equação de Bernoulli é no medidor de vazão tipo Venturi.



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

Equação da energia para regime permanente em uma instalação com uma entrada e uma saída e na presença de uma máquina hidráulica.



Vamos considerar o trecho ao lado.



Neste caso efetuamos um balanço de carga, onde temos 4 termos:

$$H_{\text{inicial}} + H_M = H_{\text{final}} + H_{p_{i-f}}$$

onde:

H_{inicial} = carga inicial e H_{final} = carga final

H_M = carga manométrica da máquina

$H_{p_{i-f}}$ = perda de carga da seção inicial a final

$$H_x = z_x + \frac{p_x}{\gamma} + \frac{\alpha_x \times v_x^2}{2g} \rightarrow \alpha_x = 2 \Rightarrow Re \leq 2000$$

$$\rightarrow \alpha_x \cong 1 \Rightarrow Re \geq 4000$$

→ quando for bomba $\Rightarrow H_M = +H_B$

→ quando for turbina $\Rightarrow H_M = -H_T$

$$Re = \frac{\rho \times v \times D_H}{\mu} = \frac{v \times D_H}{\nu}$$

$$D_H = 4 \times \frac{A}{\sigma}$$

E como
calculamos as
perdas?



Apesar de existirem várias possibilidades para o cálculo das perdas, optamos em calculá-las pelas equações a seguir:

$$H_p = \sum h_f + \sum h_s \Rightarrow h_f = f \times \frac{L}{D_H} \times \frac{v^2}{2g} \rightarrow e \rightarrow h_s = K_s \times \frac{v^2}{2g}$$

ou

$$H_p = \sum h_f \Rightarrow h_f = f \times \frac{\left(L + \sum Leq\right)}{D_H} \times \frac{v^2}{2g}$$

h_f = perda distribuída; f = coeficiente de perda de carga distribuída

L = comprimento da tubulação; D_H = diâmetro hidráulico

h_s = perda singular ou localizada; k_s = coeficiente de perda de carga localizada

v = velocidade média do escoamento; g = aceleração da gravidade

Leq = comprimento equivalente



Até para conhecer o conhecimento de cada um em relação a mecânica dos fluidos básica, vamos aplicar os conceitos estudados lá e aqui sintetizados na primeira aula de laboratório.

Este era meu medo!