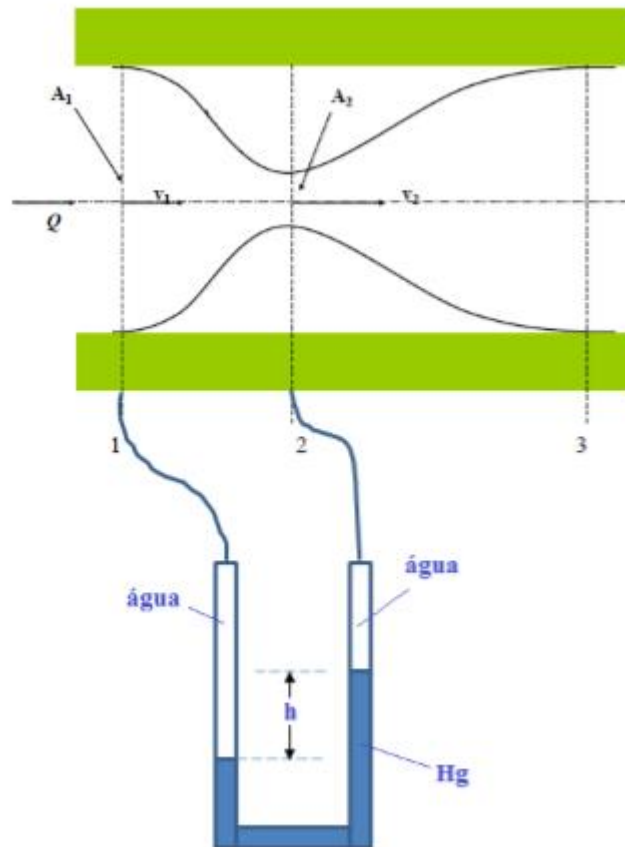


Exercício 101: Considerando o venturi (medidor de vazão) representado a seguir, sabendo que o diâmetro interno da seção (1) é igual a 40,8 mm (segundo a norma ANSI B3610 para o aço 40 corresponde a um diâmetro nominal de 1,5" e uma área de seção livre (A_1) igual a 13,1 cm²), que o desnível do fluido manométrico ($\rho_m = \rho_{Hg} = 13521 \text{ kg/m}^3$) é igual a 20 cm, especifique a vazão de escoamento considerando o fluido transportado, no caso a água ($\rho_{\text{água}} = 998 \text{ kg/m}^3$), como sendo ideal. **Dados:** $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ e $D_2 = 25 \text{ mm}$.



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

$$H_1 = H_2 \Rightarrow z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

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

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g \times \left[\frac{p_1 - p_2}{\gamma} \right] \rightarrow \text{equação (1)}$$

A equação (1) apresenta quatro (4) incógnitas: p_1 , p_2 , v_1 e v_2 .

Aplicando a equação manométrica de (1) a (2):

$$p_1 - p_2 = h \times (\gamma_{\text{Hg}} - \gamma_{\text{água}}) = h \times g \times (\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{água}}) \rightarrow \text{equação (2)}$$

Considerando a equação (2) na equação (1), resulta:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g \times h \times \left[\frac{\gamma_{\text{Hg}} - \gamma_{\text{água}}}{\gamma_{\text{água}}} \right] = 2g \times h \times \left[\frac{\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}} \right] \rightarrow \text{equação (3)}$$

A equação (3) apresenta duas (2) incógnitas: v_1 e v_2 .

Aplicando a equação da continuidade entre (1) e (2):

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2$$

$$v_1 \times \frac{\pi \times D_1^2}{4} = v_2 \times \frac{\pi \times D_2^2}{4} \therefore v_1 = v_2 \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$$

$$v_1^2 = v_2^2 \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 \rightarrow \text{equação (4)}$$

Considerando a equação (4) na equação (3), calculamos a velocidade média de escoamento na seção (2):

$$v_2^2 - v_2^2 \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 = 2g \times h \times \left[\frac{\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}} \right]$$

$$v_2^2 \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 \right] = 2g \times h \times \left[\frac{\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}} \right]$$

$$\therefore v_2 = \sqrt{\frac{2g \times h \times \left[\frac{\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}} \right]}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4}}$$

Tendo a velocidade média na seção (2), calculamos a vazão, **no caso teórica**, isto porque consideramos a água como um fluido ideal, ou seja, sem viscosidade.

$$Q_{\text{teórica}} = v_2 \times A_2 = \frac{\pi \times D_2^2}{4} \times \sqrt{\frac{2g \times h \times \left[\frac{\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}} \right]}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4}} \quad \text{equação 35}$$

$$Q_{\text{teórica}} = \frac{\pi \times 0,025^2}{4} \times \sqrt{\frac{2 \times 9,8 \times 0,2 \times \left[\frac{13521 - 998}{998} \right]}{1 - \left(\frac{25}{40,8} \right)^4}}$$

$$Q_{\text{teórica}} \cong 3,72 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 3,72 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

E COMO ACHAMOS A VAZÃO REAL?

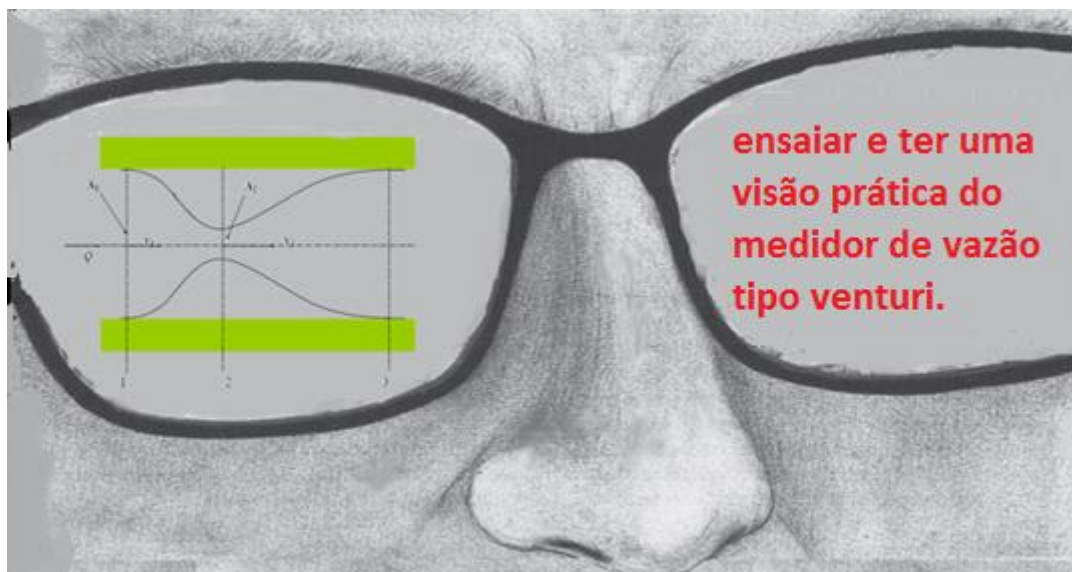


Através do coeficiente de vazão, também denominado de coeficiente de descarga - C_d

$$C_d = \frac{Q_{\text{real}}}{Q_{\text{teórica}}} \quad \text{equação 36}$$

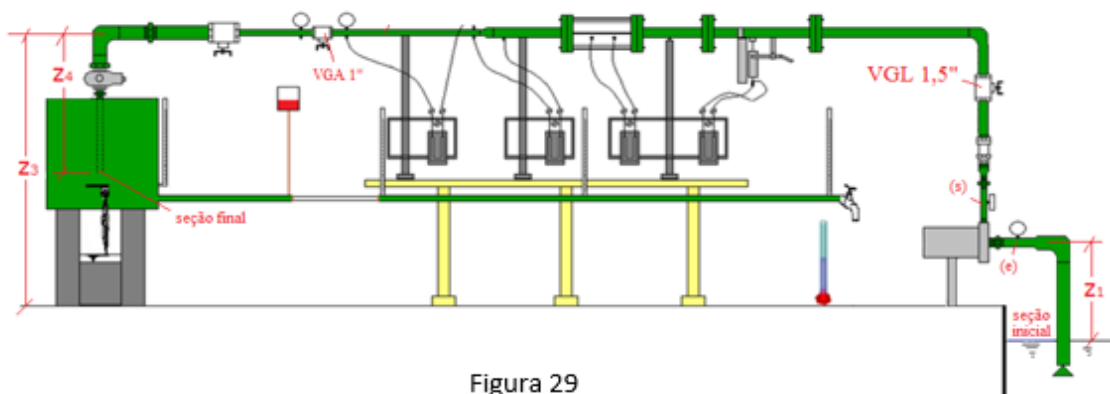
O coeficiente de vazão C_d é determinado através de ensaios em laboratório.

4.5. Simulação da experiência do medidor de vazão venturi.





A figura 29 representa a bancada utilizada para a coleta de dados.



Através da válvula globo de 1,5" variamos a vazão de zero (válvula totalmente fechada) a vazão máxima (válvula totalmente aberta).

Para uma dada posição da válvula globo de 1,5", lemos o desnível do fluido manométrico (h), como mostra a foto a seguir:

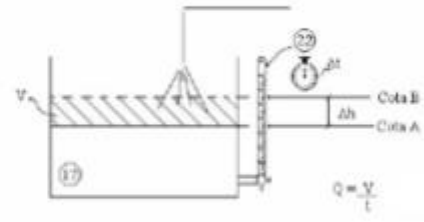


Com o desnível h e conhecendo as dimensões do venturi ensaiado, como diâmetro de aproximação (D_1), diâmetro mínimo (D_2) e as características do fluido bombeado (água) e do fluido manométrico (mercúrio), calculamos a vazão teórica do escoamento pela equação 37, que é praticamente igual a equação 35.

$$Q_{\text{teórica}} = v_2 \times A_2 = \frac{\pi \times D_2^2}{4} \times \sqrt{\frac{2g \times h \times \left[\frac{\gamma_{\text{Hg}} - \gamma_{\text{água}}}{\gamma_{\text{água}}} \right]}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4}} \quad \text{equação 37}$$

Também para cada posição da válvula globo de 1,5", a vazão real do escoamento é obtida no tanque superior, cronometrando o tempo (t) para que o nível d'água suba um Δh .

$$Q_{\text{real}} = \frac{\text{Volume}}{\text{tempo}} = \frac{\Delta h \times A_{\text{tanque}}}{t} \quad \text{equação 38}$$



Calculadas as vazões teórica e real, calculamos o coeficiente de vazão correspondente pela equação 36.

A experiência possibilita a obtenção da curva característica (figura 30), onde o **número de Reynolds de aproximação (Re_1)** é calculado com a vazão real.

$$v_1 = \frac{Q_{\text{real}}}{A_1} \rightarrow Re_1 = \frac{v_1 \times D_1}{\nu}$$

A curva característica por ter na ordenada (C_d) e na abscissa (Re_1), ambos números adimensionais (números considerados universais) é considerada para uma relação de diâmetros (D_2/D_1) uma **curva universal** (figura 30).

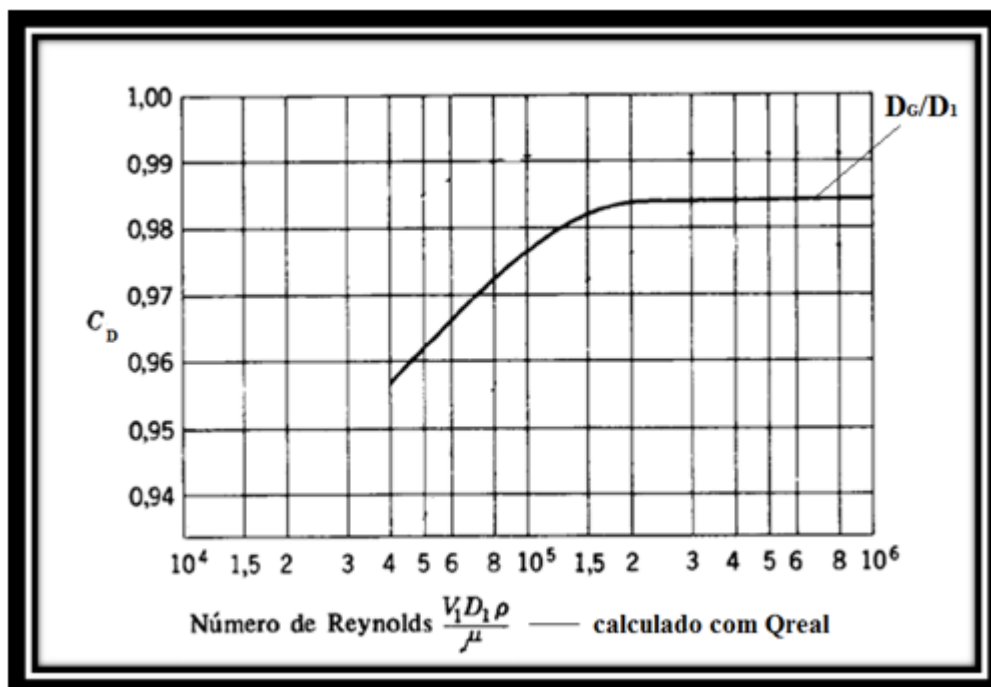


Figura 30

Já a curva de calibração (exemplo na figura 31), por ter nos eixos números dimensionais é considerada uma curva particular, ou seja, válida para as condições de ensaio.

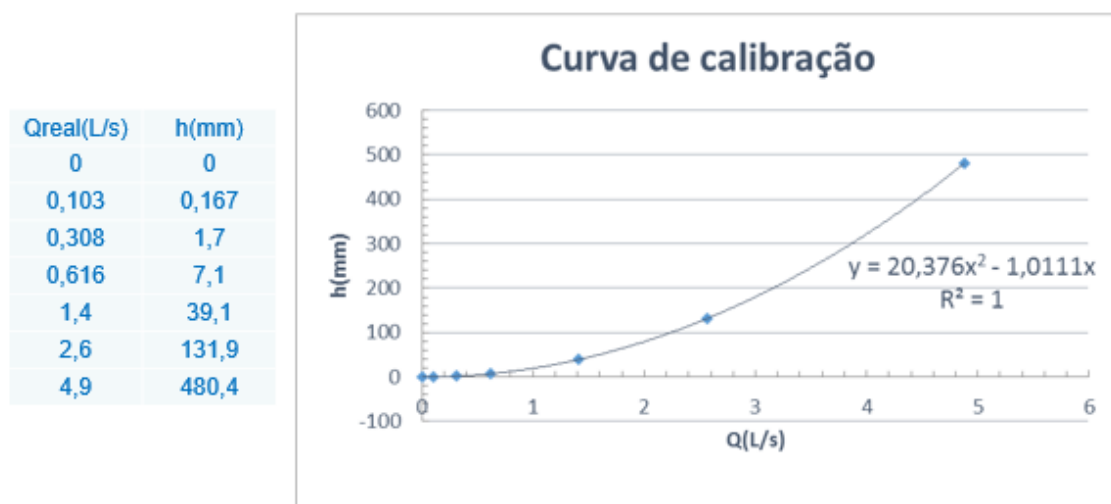


Figura 31

Tabela de dados

Ensaio	Δh (mm)	t(s)	h_{med} (mm)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

$$D_{medidor} = 25\text{mm}$$

$$D_1 = 40,8\text{mm} \rightarrow A_1 = 13,1\text{cm}^2$$

$$\text{temperatura} = \dots\dots\dots ^\circ\text{C}; \rho_{\text{água}} = \dots\dots\dots \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \rho_{\text{Hg}} = \dots\dots\dots \frac{\text{kg}}{\text{m}^3};$$

$$A_{\text{tanque}} = 0,5476\text{m}^2$$

Exercício 102: Faça o relatório da experiência do medidor venturi e construa as curvas característica e de calibração.

Dados:



Experiência dos medidores de vazão tipo Venturi e placa de orifício - parte teórica

<https://www.youtube.com/watch?v=WK7q3EIaSoc&feature=youtu.be>

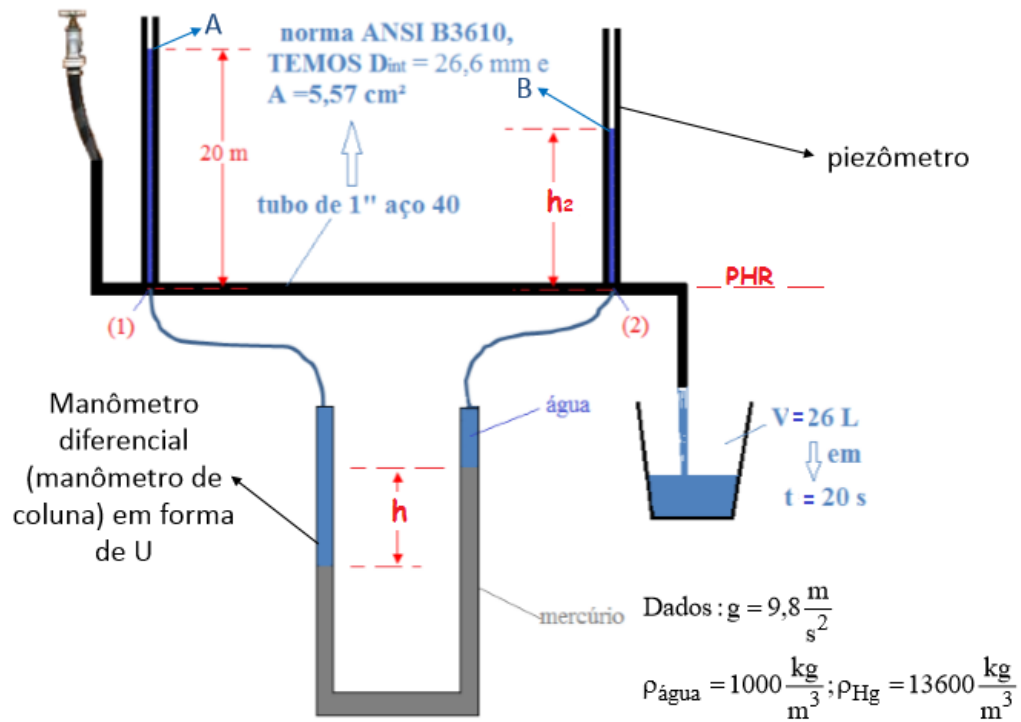


Experiência dos medidores de vazão tipo Venturi - coleta de dados

<https://www.youtube.com/watch?v=Z94mVzmKuDI&feature=youtu.be>



Agora proponho
reflexões alicerçadas na
solução do exercício 96.



$$Q = \frac{V}{t} = \frac{26}{20} = 1,3 \frac{\text{L}}{\text{s}} \Rightarrow A = 5,57 \text{ cm}^2 = \text{cte} \therefore v_1 = v_2 = \frac{Q}{A} = \frac{1,3 \times 10^{-3}}{5,57 \times 10^{-4}} \cong 2,334 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Pela equação de Bernoulli, temos:

$$H_1 = H_2$$

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

$$z_1 = z_2$$

$$\therefore \frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} = h_2 = 20 \text{ m}$$

$$p_1 = p_2 \Rightarrow h = 0$$



Isto pode ser observado na prática?

A única possibilidade de ocorrer na prática seria as seções (1) e (2) estarem muito próximas, ou seja, L_{1-2} ser desprezível (figura 33).

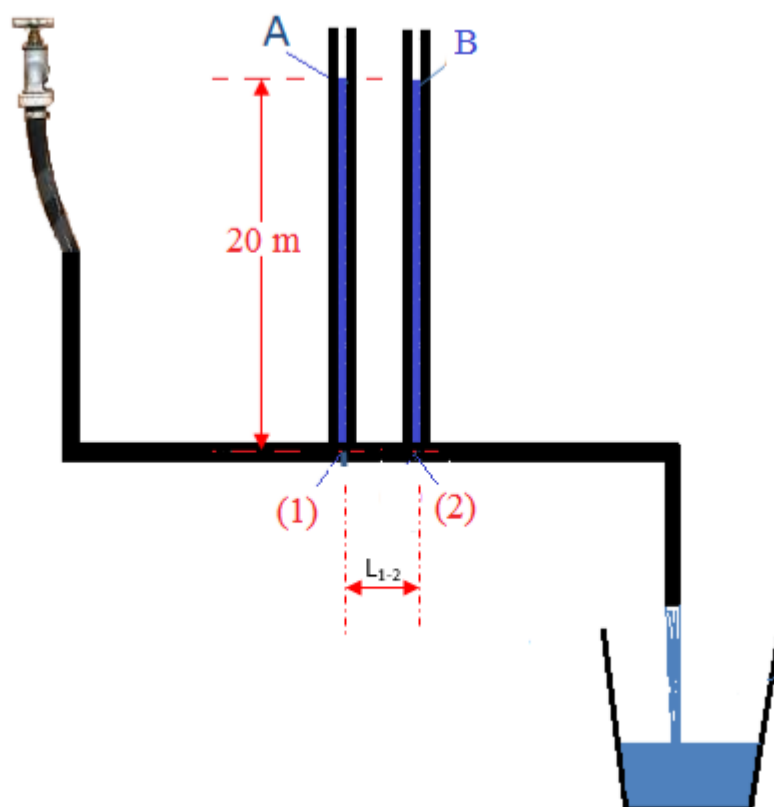


Figura 33

Mas volto a perguntar, esta condição é observada em alguma aplicação?

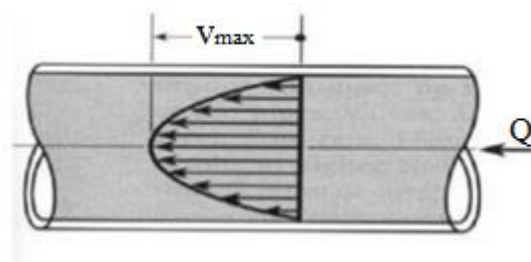




4.6. Tubo de Pitot

O instrumento foi apresentado em 1732 por Henry de Pitot, que afirmou: “a idéia deste instrumento é tão simples e natural que no momento que eu o concebi, corri imediatamente a um rio para fazer o primeiro experimento com um tubo de vidro”.

O Pitot representado pela figura 34 possibilita a determinação da velocidade real do escoamento, mas para isto, tem que ser instalado sempre no sentido contrário ao escoamento.



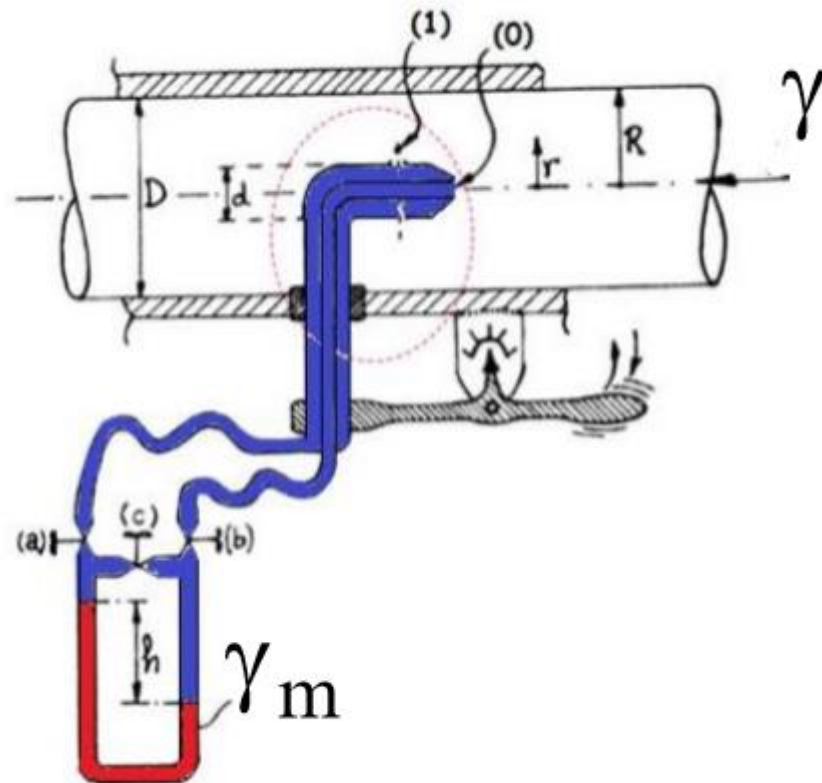


Figura 34

Para compreender o funcionamento do tubo de Pitot, é necessário ter claro o conceito de pressão total, pressão estática e pressão dinâmica.

Pressão dinâmica surge com a transformação da energia cinética em energia de pressão (figura 35).



Figura 35

Pressão estática é aquela que é obtida perpendicularmente ao escoamento (figura 36)

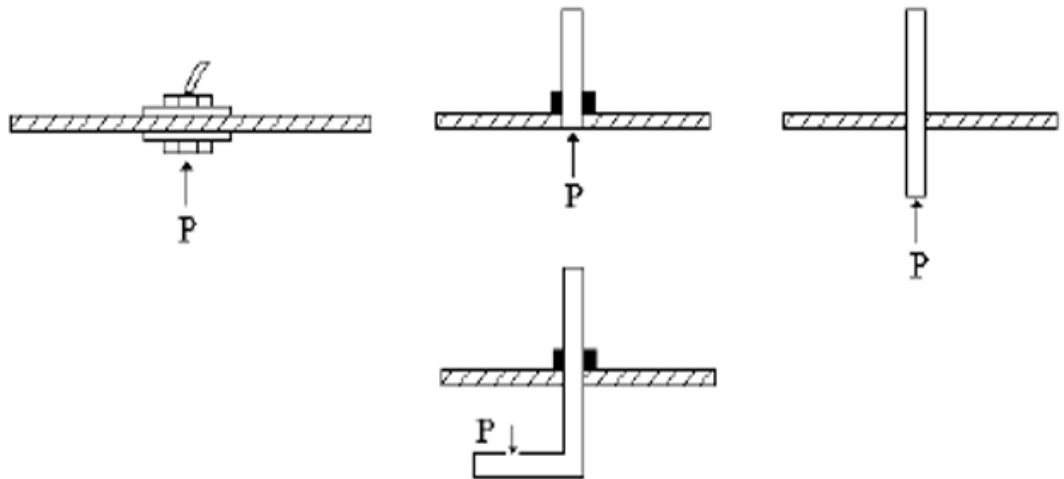


Figura 36

Pressão total é obtida somando-se a pressão estática com a pressão dinâmica (figura 37)

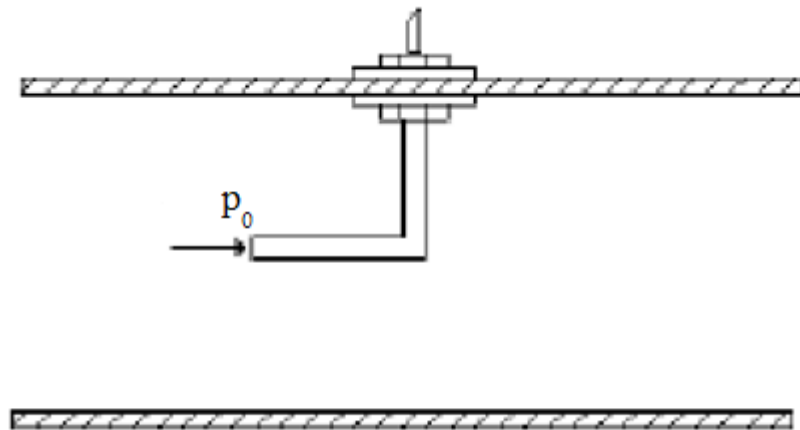


Figura 37

Para qualquer Pitot, como a distância entre as seções (0) e (1) é desprezível, podemos aplicar a equação da energia que se transforma na equação de Bernoulli já que para a situação a perda de carga é desprezível. Através da equação de Bernoulli é possível a determinação da velocidade real referente ao ponto (1) como mostra a equação 39.

$$H_0 = H_1$$

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}$$

Como $z_0 = z_1$ e no ponto (0) ocorre a transformação da energia cinética em energia de pressão, resulta $v_0 = 0$, resultando:

$$\frac{p_0}{\gamma} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \Rightarrow \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_0 - p_1}{\gamma}$$

Portanto:

$$v_1 = v_{\text{real}} = \sqrt{2g \times \frac{p_0 - p_1}{\gamma}} \quad \text{equação 39}$$

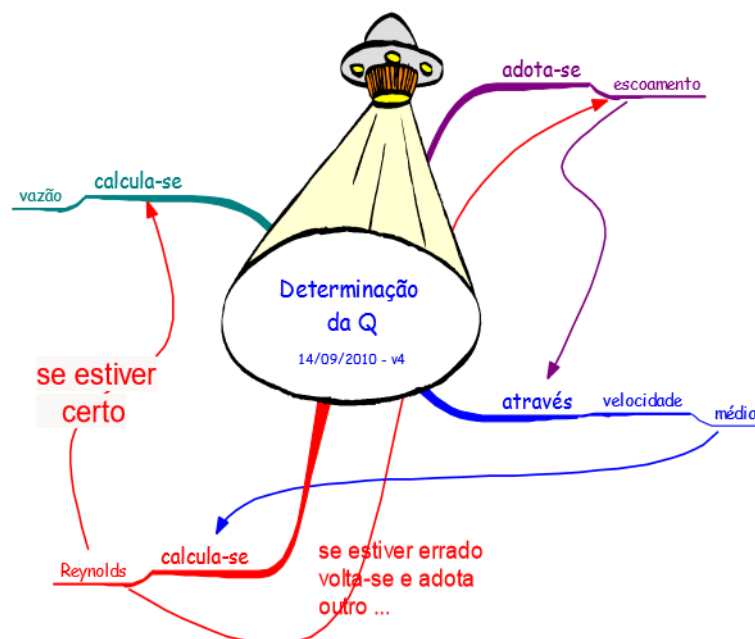
Importante observar que $p_0 - p_1$ representa a pressão dinâmica e que para a situação da figura 34, aplicando a equação manométrica temos a equação 40:

$$p_0 - p_1 = h \times (\gamma_m - \gamma) \quad \text{equação 40}$$

Considerando a equação 40 na equação 39, obtemos:

$$v_1 = v_{\text{real}} = \sqrt{2gh \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma} \right)} \quad \text{equação 41}$$

Tendo a velocidade real pelo tubo de Pitot, podemos determinar a vazão do escoamento.



Adotamos, por exemplo, o escoamento turbulento, onde sabemos que:

$$v_{\text{real}} = v_{\text{máx}} \times \left[1 - \frac{r}{R} \right]^{1/7}$$

Tendo a velocidade real, calculamos a velocidade máxima e com ela a velocidade média:

$$v = v_{\text{média}} = \frac{49}{60} \times v_{\text{máx}}$$

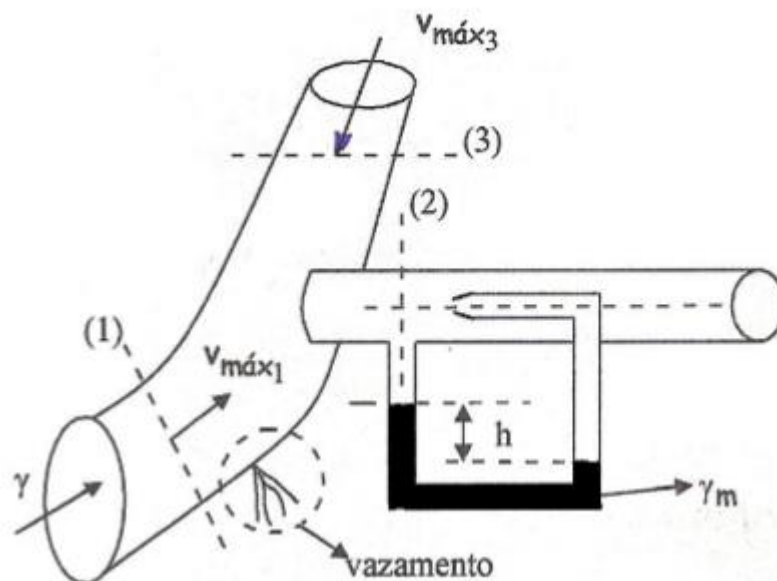
Tendo a velocidade média, determinamos a vazão do escoamento: $Q = v \times A$.

Se o escoamento fosse laminar, teríamos:

$$v_{\text{real}} = v_{\text{máx}} \times \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \rightarrow v_{\text{média}} = \frac{v_{\text{máx}}}{2}$$

Exercício 103: O engenheiro de manutenção constatou um vazamento em um trecho de uma dada instalação, como é esquematizado a seguir. Sabendo que o escoamento na seção (1) é laminar e que tem em (2) e (3) turbulento, pede-se determinar a vazão do vazamento.

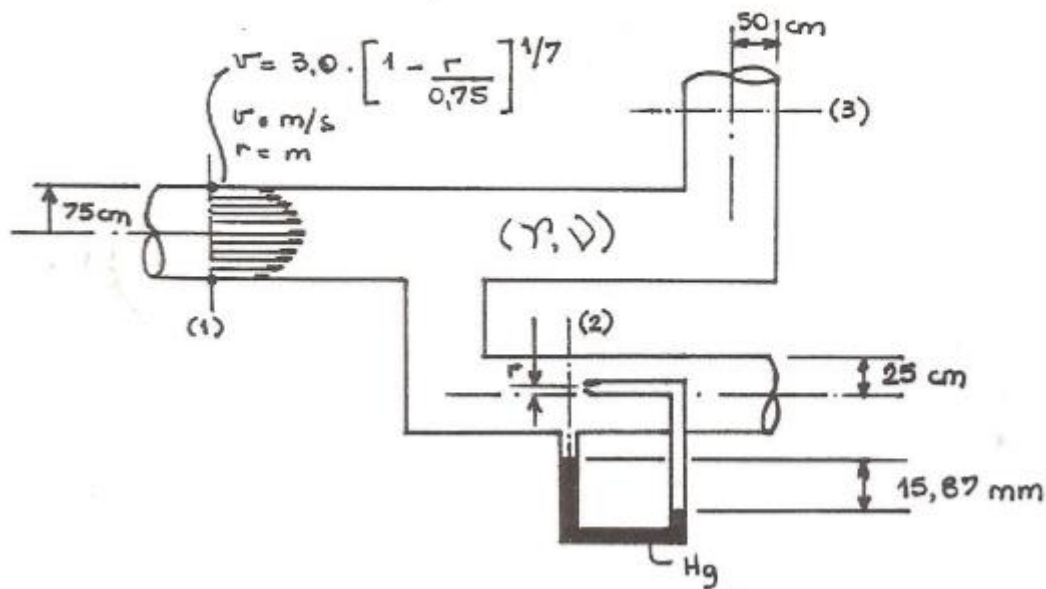
Dados: nas seções (1), (2) e (3) se considera conduto forçado de seção circular, onde se tem $D_1 = 38,1 \text{ mm}$; $D_2 = 15,6 \text{ mm}$; $D_3 = 26,6 \text{ mm}$; $v_{\text{máx}1} = 1 \text{ m/s}$; $v_{\text{máx}3} = 2 \text{ m/s}$; $h = 3,7 \text{ cm}$; $\nu = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; $\gamma = 8500 \text{ N/m}^3$; $\gamma_m = 136000 \text{ N/m}^3$; $g = 9,8 \text{ m/s}^2$



Exercício 104: O esquema a seguir representa um trecho de uma instalação hidráulica, onde todas as tubulações são forçadas e de seção transversal circular. Pede-se as vazões em volume nas seções (1), (2), (3), bem como a classificação do escoamento incompressível na seção (3).

Dados:

$$\rho_{\text{Hg}} = 13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \gamma = 9800 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}; \nu = 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}; r = \frac{25}{3} \text{ cm}; g = 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

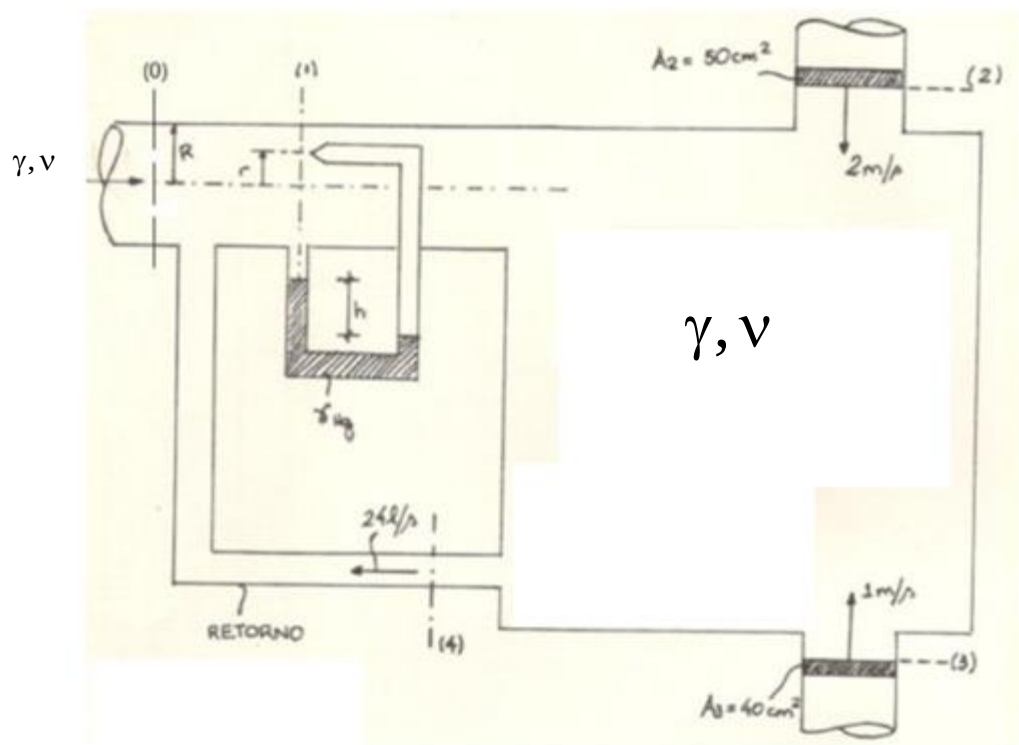


Exercício 105: Para o esquema a seguir, determine o desnível do fluido manométrico utilizado no manômetro acoplado ao tubo de Pitot e verifique se o sentido indicado para a seção (0) está correto.

Dados:

$R = 40 \text{ mm}; r = 20 \text{ mm};$ na seção (1) o escoamento é turbulento;

$$\rho_{\text{Hg}} = 13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \gamma = 9800 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}; \nu = 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}; r = \frac{25}{3} \text{ cm}; g = 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



O tempo do poeta é o futuro...

O tempo do político é o
mandato...

O tempo do burocrata é a
aposentadoria...

Então, qual será seu tempo?

