EXPERIÊNCIAS REALIZADAS EM MECÂNICA DE FLUIDOS BÁSICA

1. Reynolds

O número de Reynolds classifica os escoamentos incompressíveis e em regime permanente em relação ao deslocamento transversal de massa, e isso resulta:

- escoamento laminar onde o deslocamento transversal de massa é desprezível, o que implica que existe a predominância das forças viscosas, neste caso o $\mathrm{Re} \leq 2000$;
- escoamento turbulento onde o deslocamento transversal de massa é intenso e ocorre a predominância das forças de inércia, neste caso $\mathrm{Re} \geq 4000$;
- escoamento de transição que é a passagem do laminar para o turbulento e vice-versa.

Portanto nesta experiência calcula-se o número de Reynolds que permitirá a comparação do escoamento visualizado com o classificado pelo número de Reynolds.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \times v_{\text{média}} \times D_H}{\mu} = \frac{v_{\text{média}} \times D_H}{\nu}$$

$$D_H = 4 \times \frac{A}{\sigma} \begin{cases} A = \text{área da seção formada pelo fluido} \\ \sigma = \text{perímetro molhado, ou seja, aquele} \\ \text{formado pelo contato do fluido com parede sólida} \end{cases}$$

Escoamento laminar visualizado	
Escoamento turbulento visualizado	

A determinação da vazão foi de forma direta, ou seja,

$$Q = \frac{Volume}{Tempo} = \frac{V}{T}$$

Conhecida a vazão determina-se a velocidade média do escoamento: $v = \frac{Q}{A}$

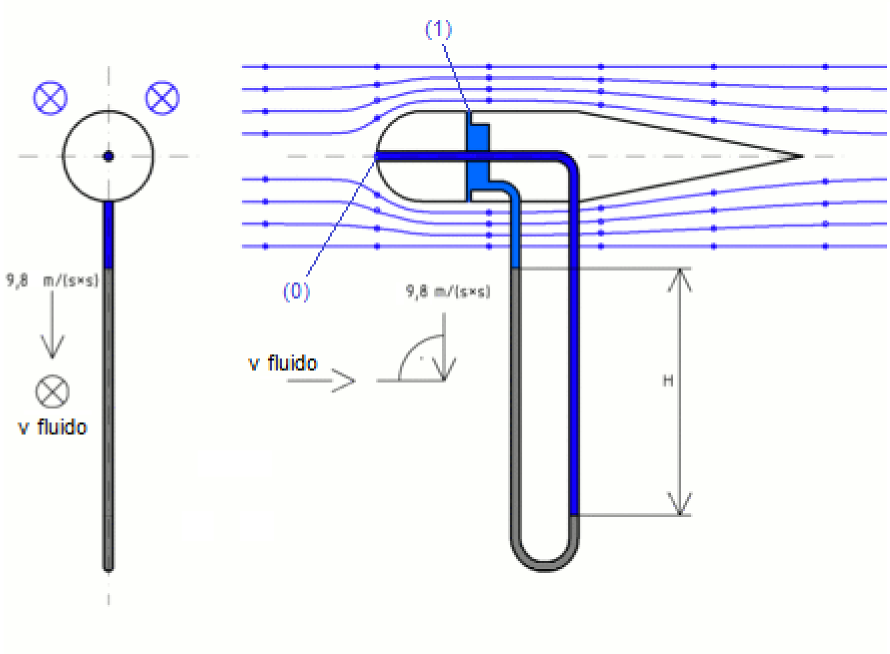
E aí se calcula o número de Reynolds para se comparar o visualizado com a classificação estabelecida por Reynolds, porém a reconhecida pela ABNT, ou seja:

- $Re \leq 2000 \rightarrow \text{laminar}$
- $Re \geq 4000 \rightarrow \text{turbulento}$
- $2000 < Re < 4000 \rightarrow \text{transição}$

Importante: nesta experiência também se visualizou a condição de regime permanente, já que o nível do reservatório de alimentação permaneceu praticamente constante, porém isto só ocorreu porque o tempo de realização da experiência foi muito pequeno e isto permitiu calcular a variação do volume no reservatório de alimentação e mostrar que a mesma foi desprezível.

2. Tubo de pitot

Possibilita a determinação da velocidade real do escoamento do fluido, já que as suas seções de determinação, tanto da pressão total como da pressão total como da pressão estática são de diâmetros muito pequenos o que possibilita considera-los como praticamente um ponto fluido.



$$P_d = p_0 - p_1 = h \times (\gamma_m - \gamma)$$

Equação da energia entre (0) e (1): $H_0 = H_1 + H_{P_{0-1}}$

A perda **REALMENTE** desprezível, portanto:

$$H_0 = H_1$$

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

$$(0) \rightarrow \text{ponto de estagnação} \therefore v_0 = 0$$

$$z_0 = z_1$$

$$v_{pitot} = v_1 = v_{real} = \sqrt{2g \times \left(\frac{p_0 - p_1}{\gamma}\right)} = \sqrt{2g \times h \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right)}$$

O tubo de pitot pode ser utilizado também para se determinar a vazão do escoamento e para tal existem duas possibilidades.

<u>1ª POSSIBILIDADE</u>

O tubo de pitot é instalado no eixo do conduto, ou seja, r = 0.

Neste caso tem-se: $v_{pitot} = v_{máx}$.

Admite-se escoamento turbulento e como o conduto é de secção circular e forçado tem-se: $v_{média} = \frac{49}{60} \times v_{máx}$

Com a velocidade média calculada, calcula-se o número de Reynolds e se este for maior ou igual a 4000, tem-se: $Q = v_{média} \times A_{tubo}$.

Caso Reynolds seja menor ou igual a 2000: $v_{média} = \frac{v_{máx}}{2}$ e $Q = v_{média} \times A_{tubo}$

<u>2ª POSSIBILIDADE</u>

O tubo de pitot não está no eixo, portanto, $r \neq 0 \Rightarrow v_{pitot} = v_{real}$ e admitindo-se o tipo de escoamento, por exemplo, turbulento, como conduto é de secção transversal circular e forçado pode-se determinar a $v_{máx}$, já que: $v_{real} = v_{máx} \times \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{7}}$ e aí repete-se o procedimento descrito na 1ª possibilidade.

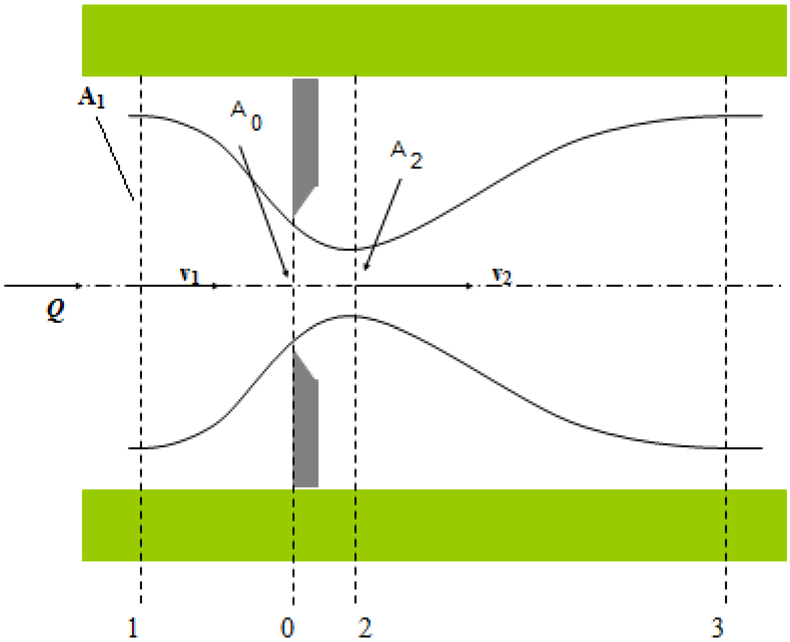
No caso de ser um escoamento laminar, deve-se lembrar que:

$v_{real} = v_{máx} \times \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]$ e depois de determinar a v_{max} e só repetir o procedimento descrito na 1ª possibilidade.

3. Medidor de Vazão

Objetiva-se determinar as curvas: $h = f(Q_R)$ que é a curva de calibração on h é o desnível do fluido manométrico utilizado no manômetro diferencial em U instalado entre a secção de aproximação (igual à secção do tubo) e a secção mínima do aparelho e $C_D = f(Re_1)$ ou $K = f(Re_1)$ que é a curva característica do medidor, onde $C_D = \frac{Q_{real}}{Q_{teórico}}$ (coeficiente de vazão) e $K = \frac{C_D}{\sqrt{1 - C_c^2 \times \left(\frac{D_o}{D_1}\right)^4}}$ (adimensional utilizado na placa de orifício) e Re_1 é o número de Reynolds de aproximação que é calculado com a vazão real.

Através das equações de Bernoulli e manométricas aplicadas nas secção demarcadas abaixo temos:



$$H_1 = H_2$$

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

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g \times h \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right) \rightarrow (1)$$

Pela equação da continuidade: $v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2$

O problema inicial é que A_2 pode não coincidir com a área mínima do medidor de vazão, já que:

$$C_c = \frac{A_2}{A_{mín}} \Rightarrow A_2 = C_c \times A_{mín}$$

$$C_c = \text{coeficiente de contração}$$

$$v_1 \times A_1 = v_2 \times C_c \times A_{mín} \therefore v_1 = v_2 \times C_c \times \frac{A_{mín}}{A_1}$$

$$v_1^2 = v_2^2 \times C_c^2 \times \left(\frac{A_{mín}}{A_1}\right)^2 \rightarrow (2)$$

De (2) em (1) resulta: $v_2^2 \times \left[1 - C_c^2 \times \left(\frac{A_{mín}}{A_1}\right)^2\right] = 2g \times h \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right)$

Portanto: $v_2 = \sqrt{\dfrac{2g \times h \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right)}{1 - C_c^2 \times \left(\frac{A_{mín}}{A_1}\right)^2}} \rightarrow (3)$

A velocidade na seção (2) calculada pela (3) é teórica, pois ao se utilizar a equação de Bernoulli não se considera a perda de carga entre as (1) e (2). Para obtermos a velocidade real evocamos o conceito de coeficiente de velocidade:

$$C_v = \frac{v_{real}}{v_{teórica}} \therefore v_{2_{real}} = C_v \times \sqrt{\frac{2g \times h \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right)}{1 - C_c^2 \times \left(\frac{A_{mín}}{A_1}\right)^2}}$$

$$Q_{real} = Cv \times C_c \times A_{mín} \times \sqrt{\frac{2g \times h \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right)}{1 - C_c^2 \times \left(\frac{A_{mín}}{A_1}\right)^2}}$$

Como $C_D = Cv \times C_c \therefore Q_{real} = C_D \times A_{mín} \times \sqrt{\dfrac{2g \times h \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right)}{1 - C_c^2 \times \left(\frac{A_{mín}}{A_1}\right)^2}}$

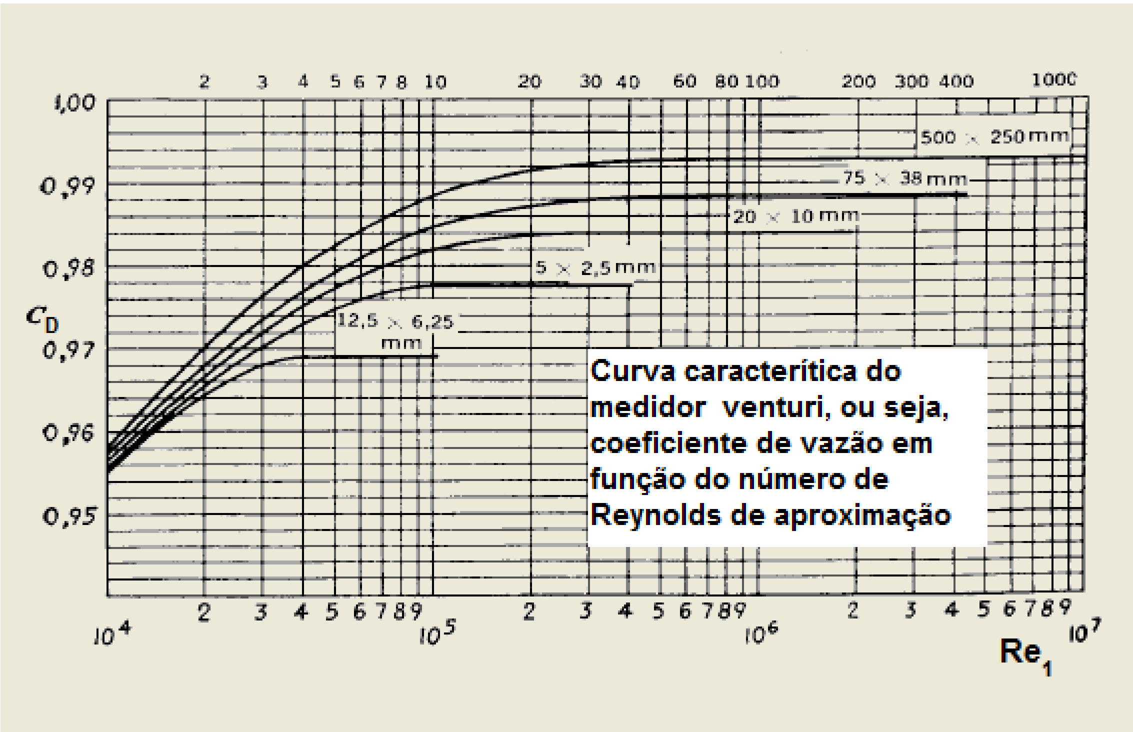
Lembrando que: $\left(\frac{A_{mín}}{A_1}\right) = \left(\frac{D_{mín}}{D_1}\right)^4 \therefore Q_{real} = C_D \times A_{mín} \times \sqrt{\frac{2g \times h \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right)}{1 - C_c^2 \times \left(\frac{D_{mín}}{D_1}\right)^4}}$

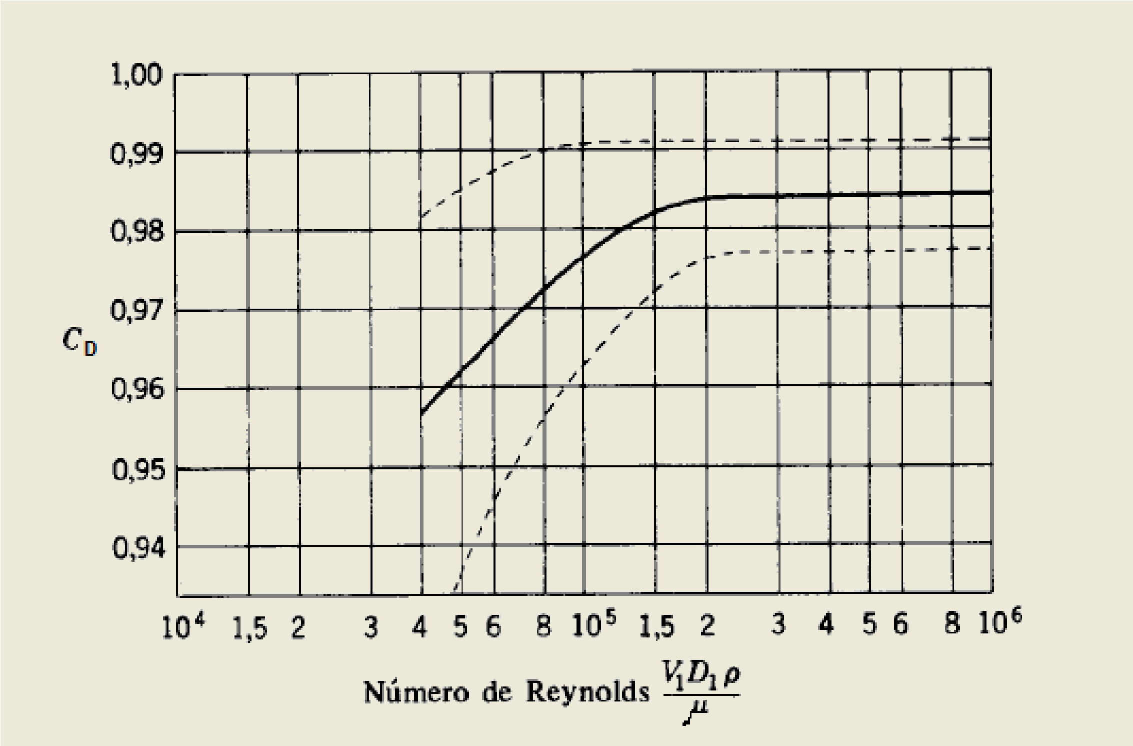
<u>Outras informações importantes</u>:

a) O venturi normalizado apresenta sempre $C_c = 1{,}0$, portanto:

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

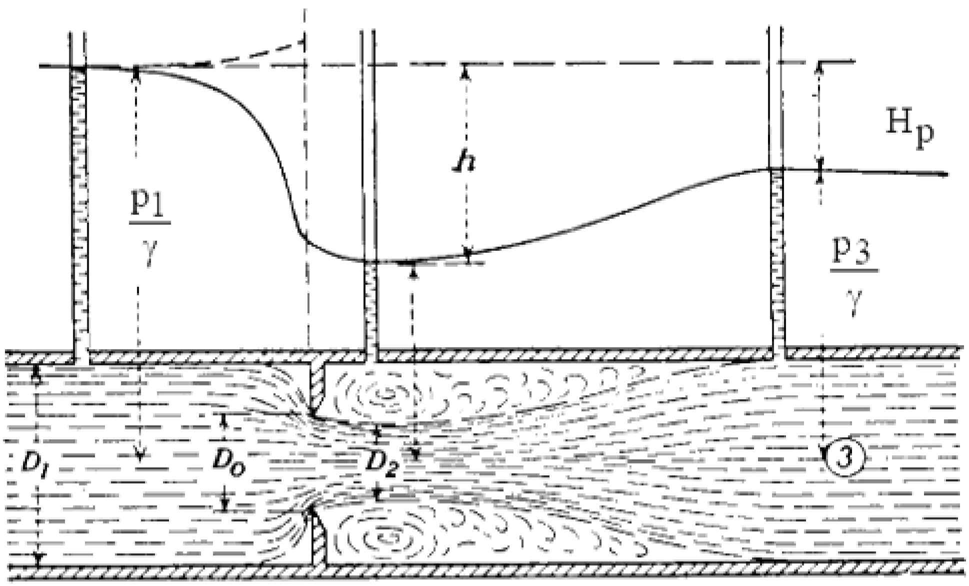
Para o venturi a curva característica geralmente é análoga ao uma das figuras a seguir:



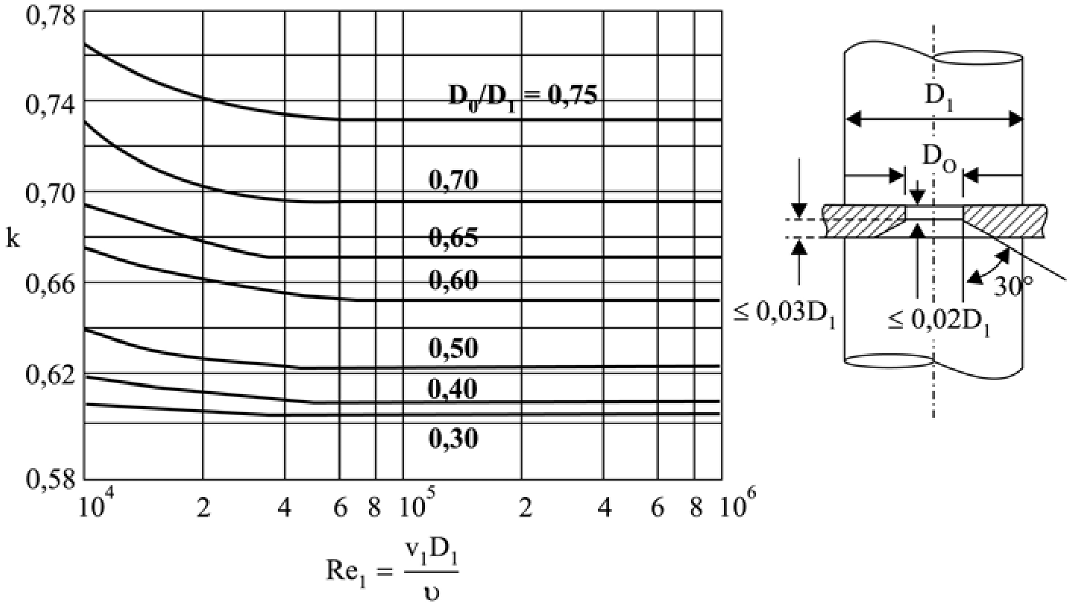


b) A placa de orifício apresenta $C_c \neq 1$ e como o mesmo não é conhecido considera-se:

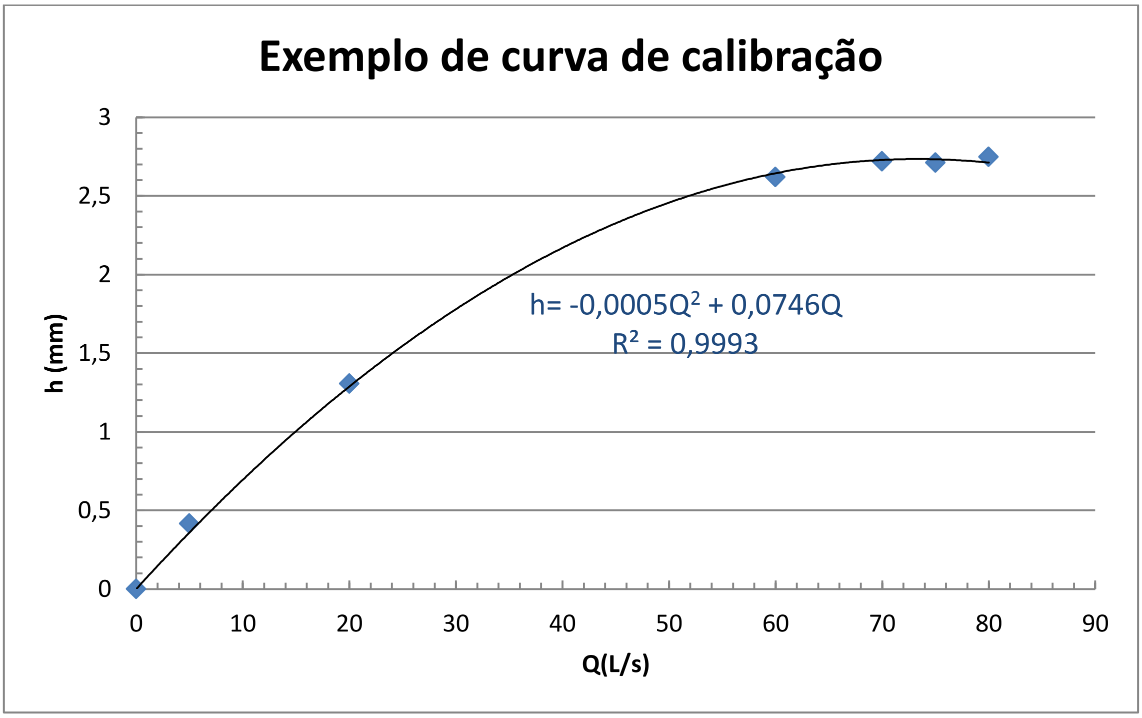
$$K = \frac{C_D}{\sqrt{1 - C_c^2 \times \left(\frac{A_o}{A_1}\right)^2}} = \frac{C_D}{\sqrt{1 - C_c^2 \times \left(\frac{D_o}{D_1}\right)^4}}$$



Aí a curva característica da placa de orifício seria $K = f(R)_1$



Outro aspecto que deve ser ressaltado é que a curva de calibração $h = f(Q_{real})$ pode ser utilizada por um não especialista sendo esta a sua vantagem, porém a mesma só vale nas condições que foi obtida.



.

4. Perda localizada ou singular (h_S)

A perda de carga singular ou localizada ocorre em um comprimento considerado desprezível em relação ao comprimento da instalação e é devido à presença de um acessório hidráulico (ou singularidade) que origina a perturbação no escoamento do fluido.

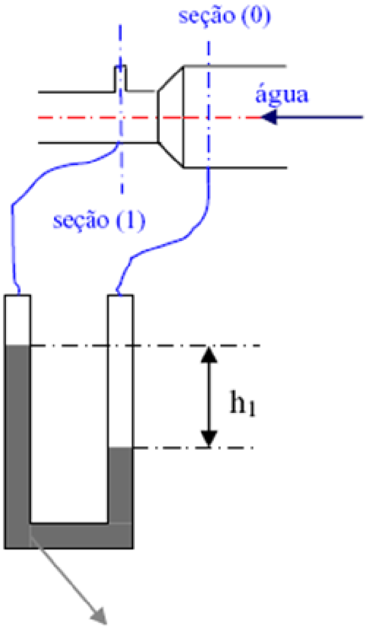
A perda de carga singular ou localizada é calculada pela expressão:

$$h_S = K_S \times \frac{v^2}{2g} = K_S \times \frac{Q^2}{2g \times A^2}, \text{onde:}$$

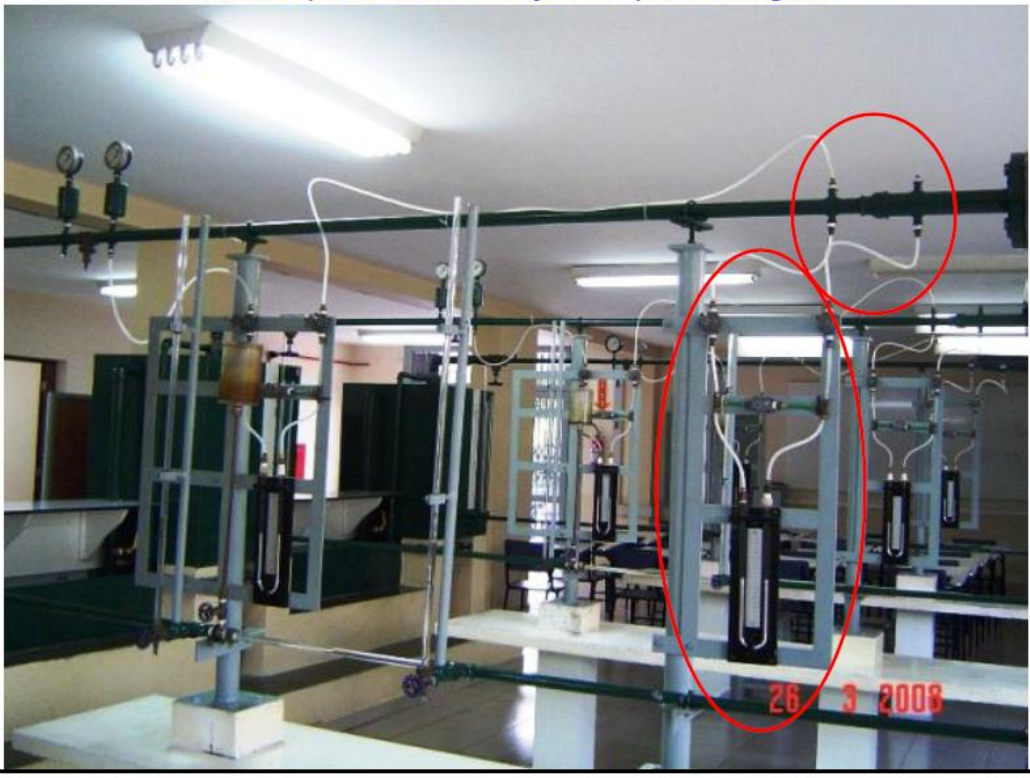
K_S = coeficiente de perda de carga singular ou localizada

v = velocidade média do escoamento, que existindo uma redução ou ampliação geralmente é considerada em relação a área menor.

Na experiência procurou-se determinar o K_S e o L_{eq} experimental da redução de 1,5” para 1” .



Trecho para determinação da perda singular

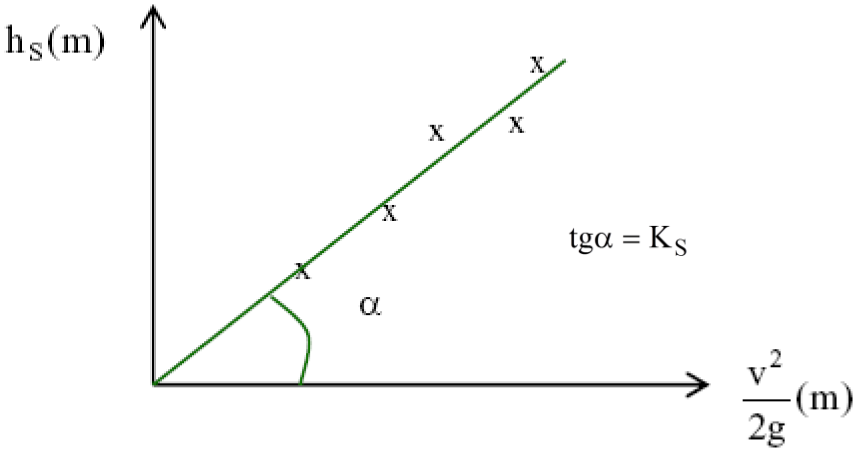


$$H_0 = H_1 + h_{S_{0-1}}$$

$$h_{S_{0-1}} = \frac{p_0 - p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_0 \times v_0^2 - \alpha_1 \times v_1^2}{2g} = h_1 \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right) + \frac{\alpha_0 \times v_0^2 - \alpha_1 \times v_1^2}{2g}$$

Obtida a perda, pode-se determinar o coeficiente de perda de carga experimental:

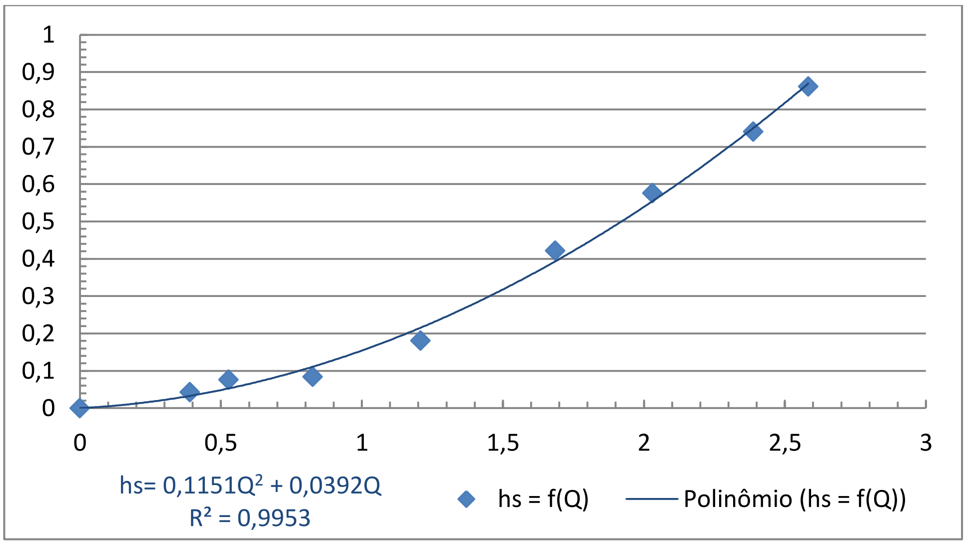
$$K_S = \frac{h_{S_{0-1}} \times 2g}{v_1^2} = \frac{\left[h_1 \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right) + \frac{\alpha_0 \times v_0^2 - \alpha_1 \times v_1^2}{2g}\right] \times 2g}{v_1^2}$$



Nesta experiência procurou também a determinação do comprimento equivalente da redução, onde o diâmetro hidráulico considerado é o diâmetro interno de 1”com espessura 40 $(D_{int} = 26{,}6mm)$ e o coeficiente de perda de carga distribuída é a média dos obtidos experimentalmente na experiência de perda de carga distribuída.

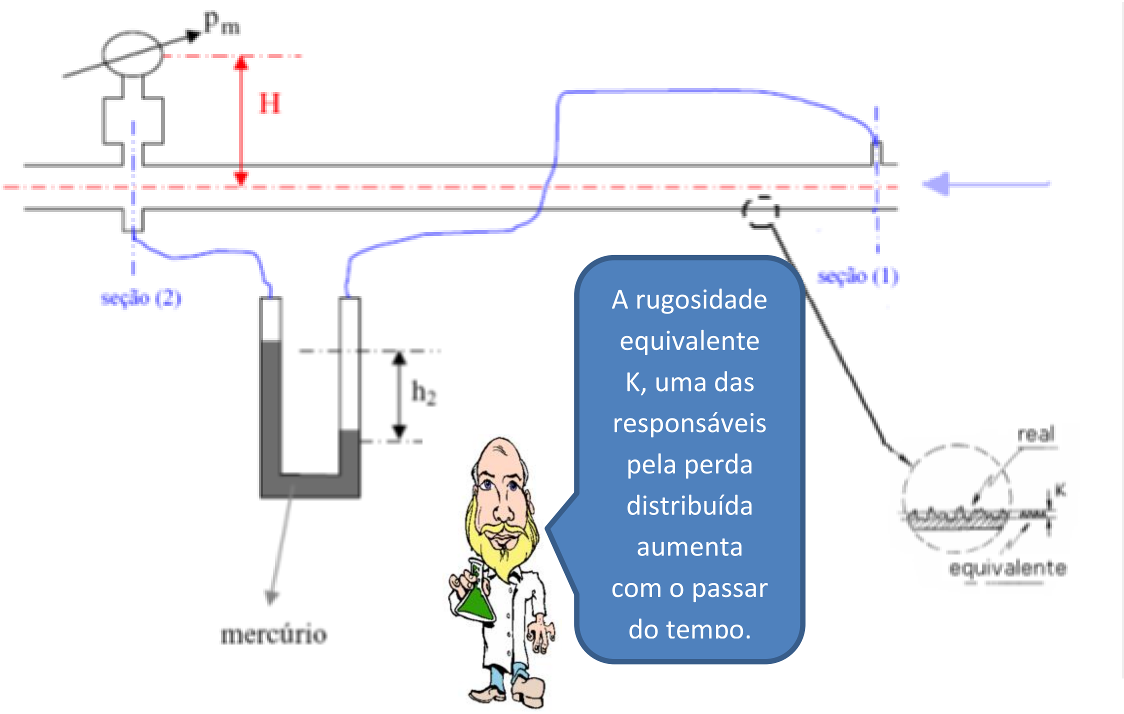
$$L_{eq} = \frac{K_S \times D_H}{f}$$

Também é objetivo desta experiência obter a representação gráfica de perda de carga localizada em função da vazão $[h_S = f(Q)]$.



5. Perda de Carga Distribuida (h_f)

A perda de carga distribuída ocorre em um trecho de área constante, onde não existe nenhum acessório hidráulico e onde o comprimento do tubo não é desprezível.



Geralmente a h_f é calculada pela fórmula universal:

$$h_f = f \times \frac{L}{D_H} \times \frac{v^2}{2g} = f \times \frac{L}{D_H} \times \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

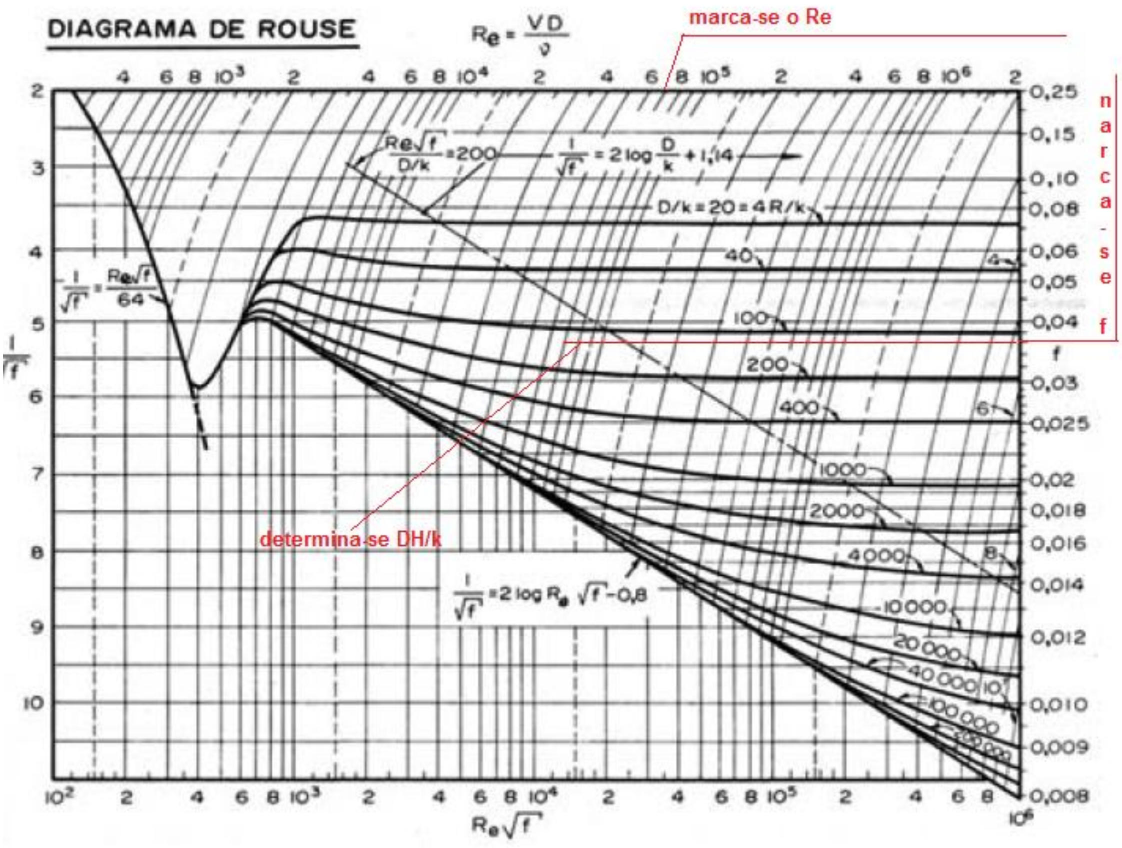
Através da experiência objetiva-se obter a representação gráfica da $h_f = f(Q)$ que tem a representação similar a da $h_S = f(Q)$; a obter o coeficiente de perda de carga distribuida de forma experimental e estimar a rugosidade equivalente k.

Para viabilizar os objetivos anteriores deve-se determinar a perda de carga distribuida através da equação da energia aplicada entre as secções (1) e (2):

$$H_1 = H_2 + h_{f_{1-2}}$$

$$h_{f_{1-2}} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = h_2 \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right) \therefore f = \frac{h_{f_{1-2}} \times D_H \times 2g}{L \times v^2}$$

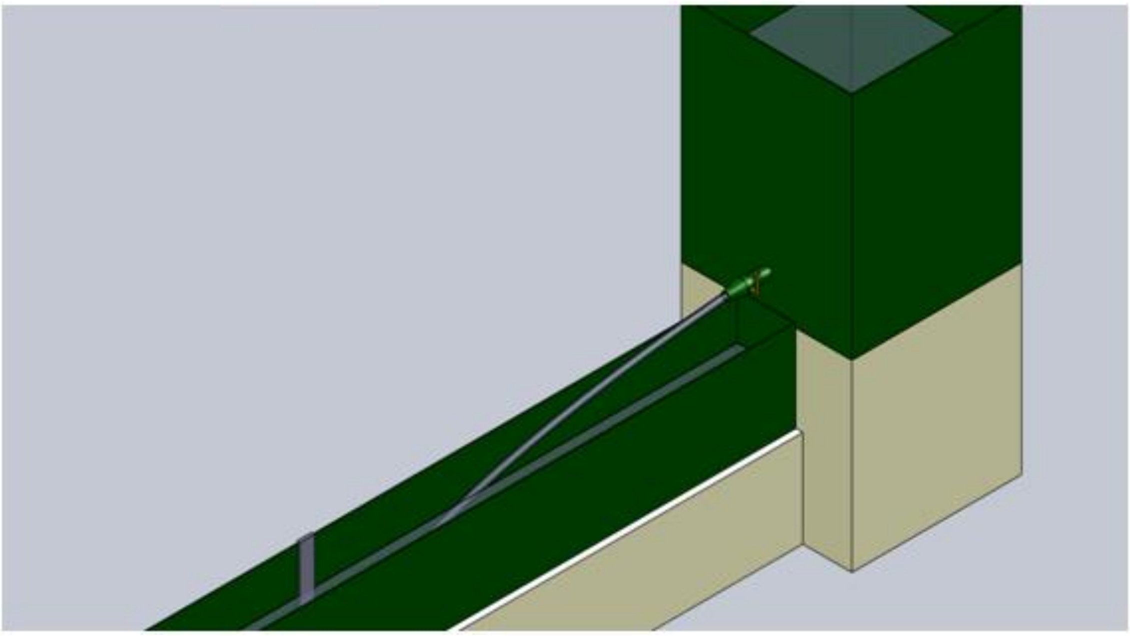
Para a estimativa de k, marca-se o número de Reynolds e o coeficiente de perda de carga distribuída e aí se determina o $\frac{D_H}{k} = a \therefore k = a \times D_H$

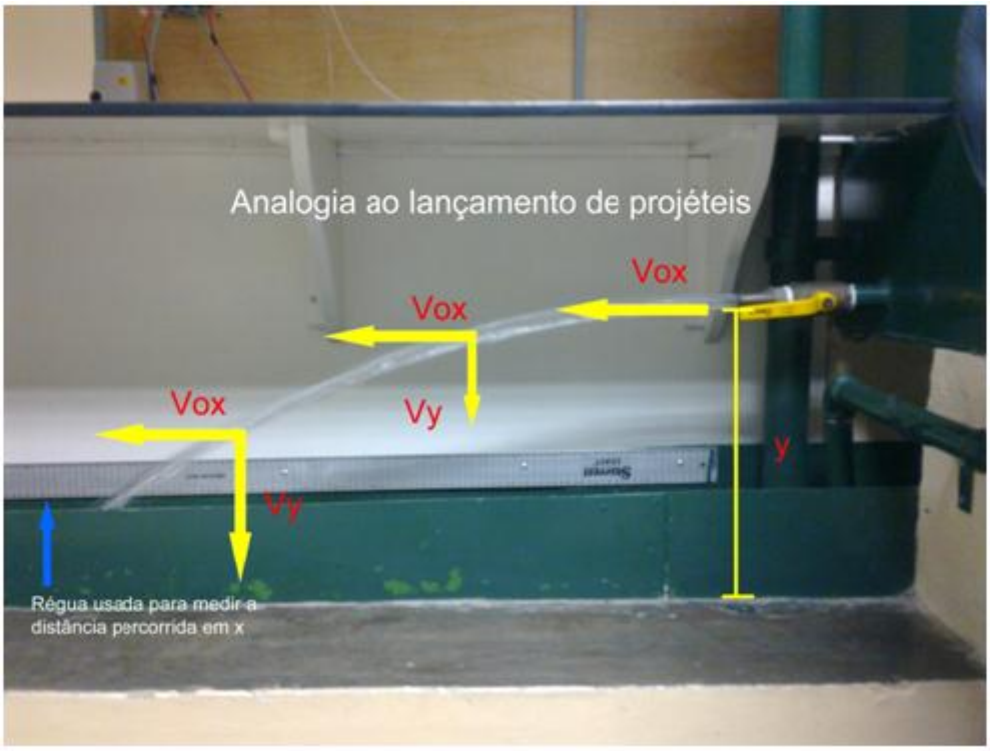


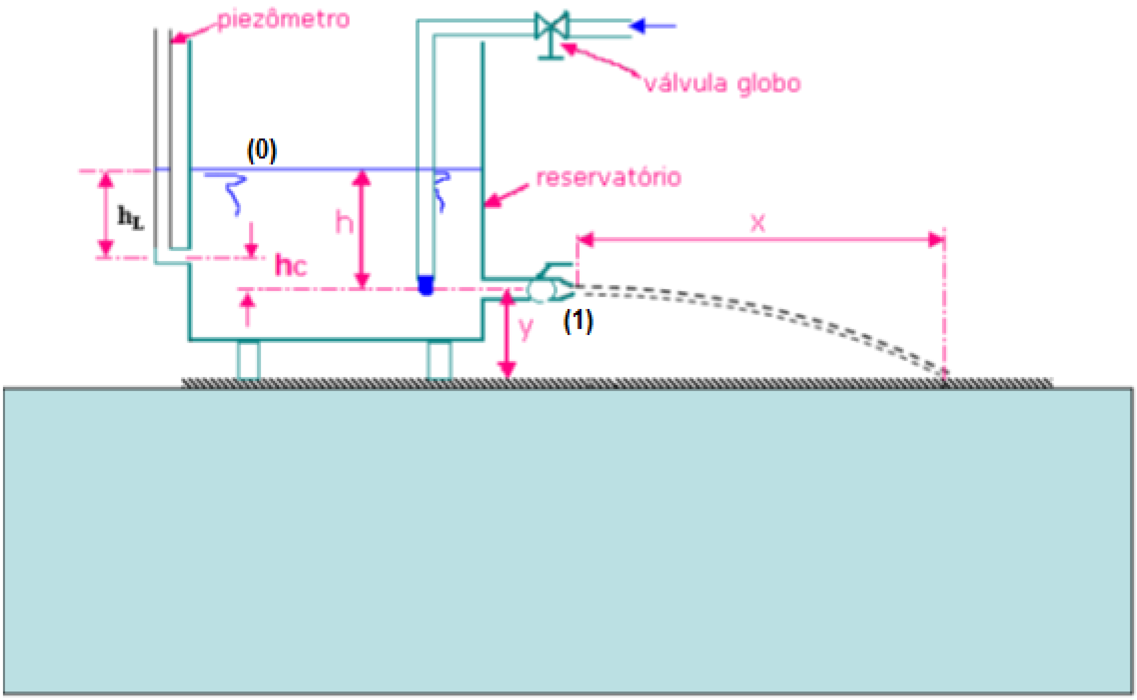
6. Experimento do bocal convergente

O experimento de bocal convergente também pode ser utilizado para medir a vazão.

Através desta experiência, que só pode ser realizada na condição de **REGIME PERMANENTE**, objetiva-se determinar o C_v (coeficiente de velocidade); C_D (coeficiente de vazão ou descarga); C_c (coeficiente de contração) e a $H_{ptotal} = H_{psaída\_res} + H_{pvalv\_esfera} + H_{pbocal}$ (perda de carga total).







Aplicando-se a equação de Bernoulli de (0) a (1) possibilita a determinação da velocidade teórica:

$$H_0 = H_1$$
$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}$$

Adotando-se o PHR no eixo do bocal, temos:

$$h = \frac{v_1^2}{2g} \rightarrow v_1 = v_{teórica} \therefore v_{teórica} = \sqrt{2g \times h}$$

Já a velocidade real é obtida pelos conceitos estudados no lançamento inclinado, onde deve-se lembrar que o tempo para percorrer y em queda livre é igual ao tempo para se percorrer x em movimento uniforme com a velocidade v_{real} :

$$y = \frac{1}{2} \times g \times t^2 \therefore t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$$
$$x = v_r \times t = v_r \times \sqrt{\frac{2y}{g}} \therefore v_r = x \times \sqrt{\frac{g}{2y}}$$

Conhecidas as velocidades teórica e real determina-se o coeficiente de velocidade:

$$C_v = \frac{v_r}{v_t} = \frac{x \times \sqrt{\frac{g}{2y}}}{\sqrt{2g \times h}}$$

Pode-se também determinar a vazão teórica do escoamento:

$$Q_{teórica} = v_{teórica} \times A_{bocal} = A_{bocal} \times \sqrt{2g \times h}$$

Após o nível estar constante e ter-se lido x, fecha-se o bocal e determina-se a vazão real:

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

Conhecidas as vazões teórica e real determina-se o coeficiente de vazão ou descarga:

$$C_D = \frac{Q_{real}}{Q_{teórica}}$$

Com C_D e C_v determina-se o coeficiente de contração, já que:

Parta se determinar as perdas aplica-se a equação da energia de (0) e (1):

$$H_0 = H_1 + H_{p_{0-1}}$$

$$h = \frac{v_r^2}{2g} + H_{p_{0-1}}$$

$$H_{p_{0-1}} = h - x^2 \times \frac{g}{2y} \times \frac{1}{2g}$$

$$\therefore H_{p_{0-1}} = h - \frac{x^2}{4y}$$