

### Objetivos da terceira aula da unidade 5:

**Introduzir a determinação direta e indireta da vazão de escoamento de um fluido.**

**Definir a curva característica e a curva de calibração de um aparelho medidor de vazão.**

**Introduzir os conceitos de coeficiente de velocidade, coeficiente de contração e coeficiente de vazão e estabelecer a relação entre eles.**

**Estudar o equacionamento básico dos aparelhos medidores de vazão do tipo Venturi.**

**Propor os exercícios: 5.14.4 e 5.14.5**

## 5.6.2 Medidor de Vazão

### 5.6.2.1 Introdução

A melhor maneira de determinar vazão de escoamento de uma instalação, ainda é através de um reservatório de área transversal  $A$  conhecida e um cronômetro como mostra a figura 5.17 e a equação 5.13 (determinação da vazão de forma direta).

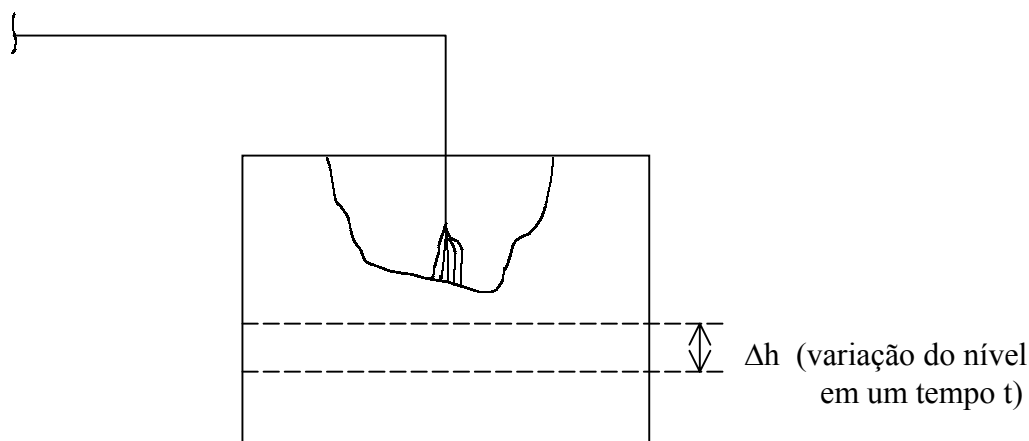


Figura 5.17

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\Delta h \cdot A}{t}$$

equação 5.13

Outra maneira seria com o reservatório representado pela figura 5.17 apoiada em uma balança, onde determinamos a vazão em massa, como mostra a equação 5.14.

$$Q_m = \frac{m_{VL} - m_V}{t} \quad \text{equação 5.14}$$

onde:  $m_V$  - massa do reservatório vazio.

$m_{VL}$  - massa lida na balança após um intervalo de tempo  $t$ .

Conhecendo-se a temperatura de escoamento do fluido, temos sua massa específica e em consequência sua vazão em volume, já que  $Q = \frac{Q_m}{\rho}$ .

Apesar da eficiência dos métodos descritos anteriormente, na prática geralmente não são viáveis, já que teríamos necessidade de desviar o fluxo da instalação toda vez que desejássemos determinar a vazão do escoamento, e isto nos leva a recorrer à aparelhos medidores de vazão (determinação da vazão de forma indireta), os quais devem ser ensaiados, tanto para determinação da sua *curva característica*, como para a determinação da sua *curva de calibração*.

A *curva característica* é uma *curva universal*, sendo esta sua grande vantagem, porém só pode ser usada por especialistas; já a *curva de calibração*, por apresentar, tanto na abscissa, como na ordenada, parâmetros dimensionais, trata-se de uma curva particular, sendo esta a sua grande desvantagem, porém apresenta a vantagem de poder ser usada por um leigo no assunto.

### 5.6.2.2 Coeficientes de Correção

Os coeficientes de correção usados nos medidores de vazão, são:

$$C_v - \text{coeficiente de velocidade} = \frac{V_{\text{REAL}}}{V_{\text{TEORICA}}}$$

$$C_c - \text{coeficiente de contração} = \frac{A_{\text{VEIA CONTRAIDA}}}{A_{\text{NORMAL}}}$$

$$C_d - \text{coeficiente de vazão ou coeficiente de descarga} = \frac{Q_{\text{REAL}}}{Q_{\text{TEORICA}}} = C_v \cdot C_c$$

Para que possamos compreender os coeficientes mencionados anteriormente, consideramos o exemplo representado pela figura 5.18, onde instalamos um orifício de bordas delgadas.

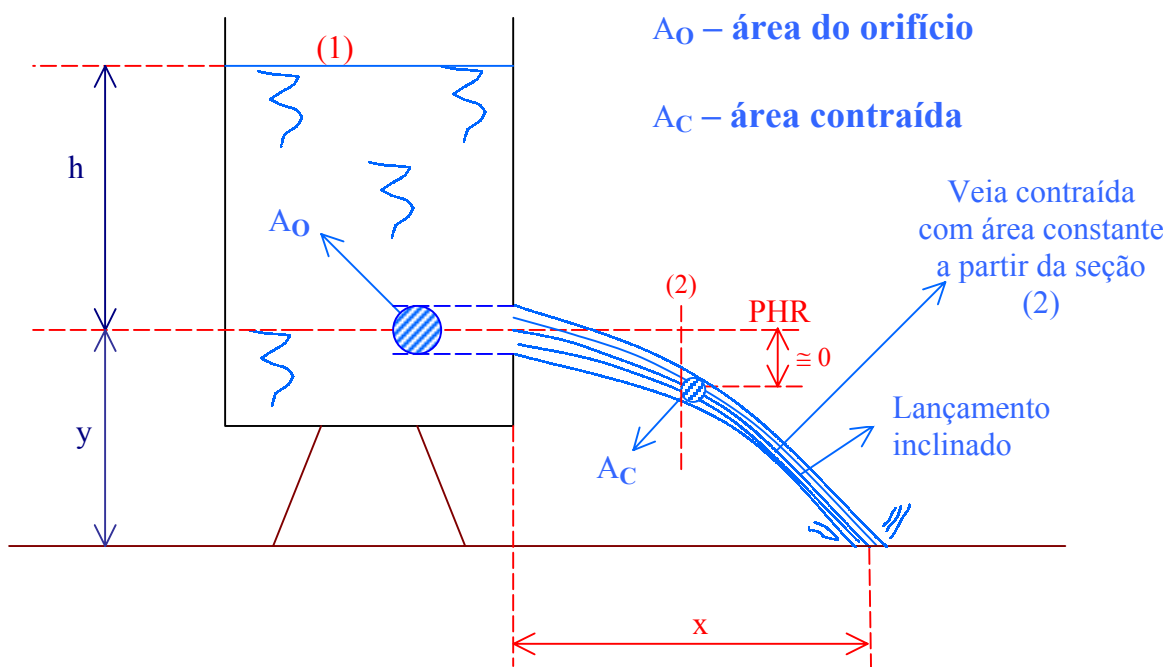


Figura 5.18

Através da equação de Bernoulli aplicada entre as seções (1) e (2), obtemos a velocidade teórica, equação 5.15 .

$$V_t = \sqrt{2gh} \quad \text{equação 5.15}$$

A velocidade real é obtida pelos conceitos abordados em um *lançamento inclinado* e é representada pela equação 5.16.

$$V_{\text{REAL}} = \sqrt{\frac{1}{2} g \frac{x^2}{y}} \quad \text{equação 5.16}$$

Evocando o conceito de vazão, podemos determiná-la como mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} Q_R &= V_R \cdot A_C \\ Q_R &= C_V \cdot V_t \cdot C_C \cdot A_O \\ Q_R &= C_V \cdot C_C \cdot V_t \cdot A_O \end{aligned}$$

$$Q_R = C_d \cdot V_t \cdot A_O$$

$$Q_R = C_d \cdot Q_t \quad e \quad C_d = C_v \cdot C_C$$

### 5.6.2.3 Equacionamento Básico

O equacionamento básico é válido para os aparelhos medidores de vazão, que propiciam um aumento de energia cinética em consequência da diminuição de pressão estática.

As variações são originadas por uma variação de área transversal, como observado no *tubo Venturi*, nos *bocais de fluxo* e nas *placas de orifício*.

Considerando como (1) a seção de área máxima e como (2) a seção de veia contraída e aplicando entre estas seções a EQUAÇÃO DE BERNOULLI, obtemos a equação 5.17.

$$V_2^2 - V_1^2 = 2g \left[ \left( Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left( Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) \right] \quad \text{equação 5.17}$$

Através da equação da continuidade, obtemos a equação 5.18.

$$V_1^2 = \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 V_2^2 \quad \text{equação 5.18}$$

Da equação 5.18 na equação 5.17, obtemos a velocidade teórica na seção (2), que é representada pela equação 5.19.

$$V_{2t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \cdot \sqrt{2g \cdot \left[ (Z_1 - Z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \right]} \quad \text{equação 5.19}$$

Evocando o conceito de coeficiente de contração, considerando  $Z_1 \neq Z_2$  e instalando um manômetro diferencial entre (1) e (2), podemos obter as equações 5.20 e 5.21.

$$A_2 = C_C \cdot A_{\min.} \quad \text{equação 5.20}$$

$$p_1 - p_2 = h \cdot (\gamma_m - \gamma) + (Z_2 - Z_1) \cdot \gamma \quad \text{equação 5.21}$$

Das equações 5.20 e 5.21 na equação 5.19 resulta a equação 5.22.

$$v_{2t} = \frac{1}{\sqrt{1 - C_C^2 \left( \frac{A_{\min}}{A_1} \right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2gh}{\gamma} (\gamma_m - \gamma)} \quad \text{equação 5.22}$$

Evocando o conceito de coeficiente de velocidade, obtemos a velocidade real na seção (2) como mostrado na equação 5.23.

$$v_{2R} = \frac{C_V}{\sqrt{1 - C_C^2 \cdot \left( \frac{A_{\min}}{A_1} \right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2gh}{\gamma} (\gamma_m - \gamma)} \quad \text{equação 5.23}$$

Já que calculamos a velocidade real na veia contraída, podemos determinar a vazão real, como mostrado a seguir:

$$Q_R = v_{2R} \cdot A_2 = C_C \cdot v_{2R} \cdot A_{\min}.$$

$$Q_R = \frac{C_V \cdot C_C}{\sqrt{1 - C_C^2 \cdot \left( \frac{A_{\min}}{A_1} \right)^2}} \cdot A_{\min} \cdot \sqrt{\frac{2gh}{\gamma} (\gamma_m - \gamma)} \quad \text{equação 5.24}$$

#### 5.6.2.4 Medidor Tipo Venturi

O tubo Venturi, foi idealizado pelo cientista italiano Venturi em 1791 e usado como medidor de vazão em 1886 por Clemens Herschel, sendo constituído por um bocal convergente - divergente (figura 5.19).

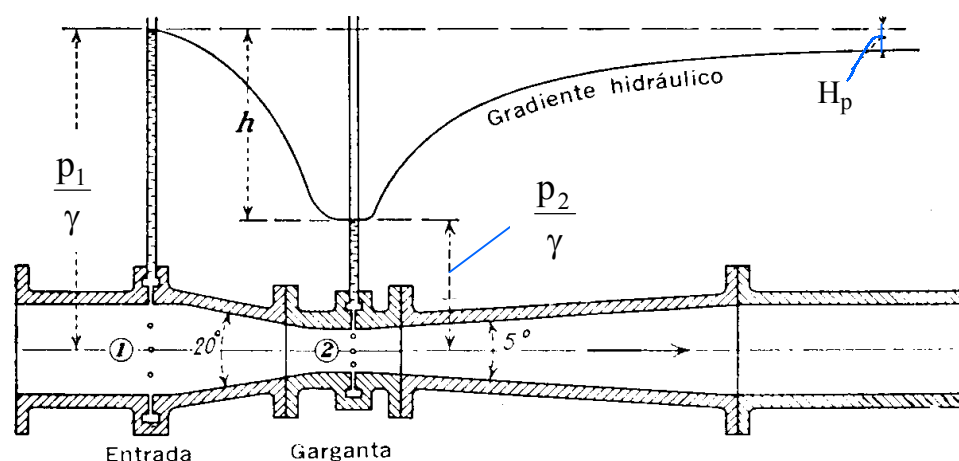


Figura 5.19

O medidor Venturi é constituído de uma seção a montante do mesmo diâmetro do conduto, que através de uma seção cônica convergente (ângulo geralmente de  $20$  a  $30^\circ$ ); o leva a uma seção mínima, ***garganta do Venturi***, e através de uma seção cônica divergente (ângulo geralmente de  $5$  a  $14^\circ$ ) gradualmente retorna ao diâmetro do conduto.

O difusor cônico divergente gradual à jusante da garganta fornece excelente recuperação da pressão; e isto garante uma pequena perda de carga neste tipo de aparelho, perda geralmente compreendida entre 10 a 15 por cento da carga de pressão entre as seções (1) e (2).

Deve-se salientar que este tipo de aparelho é relativamente caro em relação por exemplo, a um medidor tipo placa de orifício porém, por propiciar pequena perda de carga é recomendado para instalações onde se tem uma vazão de escoamento elevada e onde se deseja um controle contínuo. Para se diminuir o custo do medidor Venturi o mesmo é construído com ângulos maiores que chegam a  $30^\circ$  e  $14^\circ$ , respectivamente no convergente e divergente.

A especificação de um medidor Venturi é feita pelos diâmetros do conduto e da garganta, sendo que este último deve ser projetado para propiciar uma pressão (pressão mínima) maior que a pressão de vapor do fluido que escoar, evitando desta forma que o mesmo vaporize na temperatura do escoamento, o que caracterizaria o fenômeno denominado de ***cavitação***.

Os valores de  $D_2/D_1$  podem oscilar entre  $1/4$  e  $3/4$ , porém uma relação comum é  $1/2$ . Uma relação pequena oferece maior precisão, porém aumenta a possibilidade de ocorrer o fenômeno de cavitação, que danificaria estruturalmente o Venturi.

Para se obter resultados precisos, o medidor Venturi deve ser precedido por um tubo reto, isento de singularidades, com um comprimento mínimo de 10 vezes o seu diâmetro maior.

Outra característica importante do Venturi é que ele é construído de tal forma que o coeficiente de contração é igual a 1,0, portanto:

$$A_{\min} = A_2$$

$$C_d = C_v$$

A equação 5.24 reescrita para o Venturi origina a equação 5.25.

$$Q_R = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2gh}{\gamma}(\gamma_m - \gamma)} \quad \text{equação 5.25}$$

**Nota:** O termo  $\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}}$  é comumente denominado de *fator de “velocidade de aproximação”*.

O coeficiente de descarga ( $C_d$ ) do medidor Venturi a menos de informação específica, pode ser considerado aproximadamente igual a 0,99 para condutos grandes e 0,97 a 0,98 para condutos pequenos, isto sempre que o escoamento proporcionar um número de Reynolds de aproximação grande ( $Re_1 > 10^5$ ).

Para medidores Venturi, que estejam em funcionamento a muitos anos, se observa uma pequena redução de  $C_d$ .

**Importante:** Os coeficientes podem ser ligeiramente maiores que a unidade para medidores Venturi com paredes internas extremamente lisas. Isto não significa que não haja perdas, mas resulta do fato de se desprezar os coeficientes de energia cinética  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  na equação de Bernoulli. Geralmente  $\alpha_1$  é maior do que  $\alpha_2$  pois a redução da seção age no sentido de uniformizar a distribuição de velocidades através da seção 2. A equação a seguir, obtida através da figura 5.19, leva em consideração os coeficientes de energia cinética:

$$\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} = h - \left[ H_p - (\alpha_2 - 1) \frac{V_2^2}{2g} - (\alpha_1 - 1) \frac{V_1^2}{2g} \right]$$

Para o caso do fluido ideal, cada termo dentro do cochete é nulo, o que originaria um coeficiente de vazão igual a 1,0. Para o Venturi com perda muito pequena (paredes internas extramamente lisas) e quando a distribuição de velocidades é praticamente uniforme na seção 2<sup>1</sup>, podemos ter o termo dentro do cochete dando negativo, o que poderia resultar em um coeficiente de vazão ligeiramente superior a 1,0.

O gráfico, representado pela figura 5.20, foi obtido pelos professores R.L. DAUGHERTY e A.C. INGERSOLL, professores do instituto de tecnologia da Califórnia, para uma faixa bastante grande de viscosidade, desde a da água à uma série de óleos, onde trabalharam com medidor VENTURI com  $D_2/D_1 = 1/2$ .

O objetivo deste gráfico é mostrar, que para o medidor Venturi, pelo fato do coeficiente de contração ( $C_C$ ) ser igual a 1,0, portanto  $C_V = C_d$ , tanto o  $C_V$ , como o  $C_d$  aumentam até o número de Reynolds de aproximação igual a cerca de  $10^5$  e a partir daí permanecem praticamente constante.

O gráfico representado pela figura 5.20, tem como objetivo mostrar que mesmo para uma mesma relação  $D_2/D_1$  e um mesmo número de Reynolds,  $C_d$  ou  $C_V$ , variam com o tamanho do medidor VENTURI, sendo que para os maiores, devido a trabalharem com velocidades menores, a perda de carga é menor e portanto  $C_d = C_V$  se aproximam da unidade.

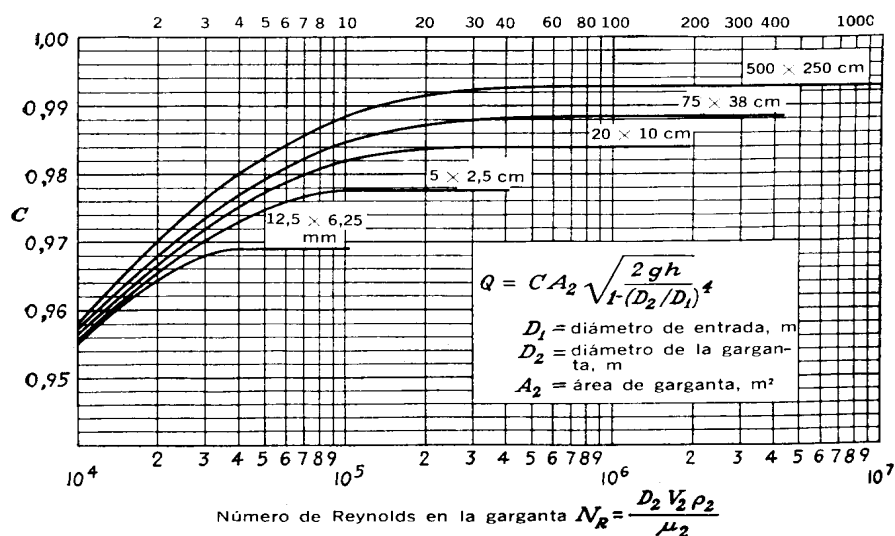


Figura 5.20

<sup>1</sup> Neste caso  $\alpha_2 \cong 1,0$



Já a figura 5.21 mostra os resultados experimentais apresentados por Victor L. Streeter<sup>2</sup> para as relações de diâmetro  $D_2/D_1$  de 0,25 a 0,75 entre as tolerâncias mostradas pelas linhas tracejadas.

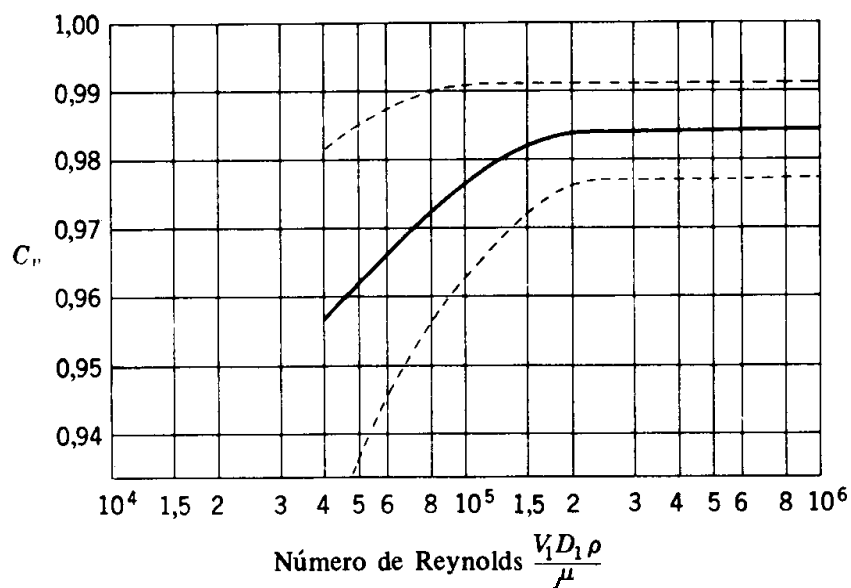


Figura 5.21

### **A LIÇÃO DA BORBOLETA**

Um dia, uma pequena abertura apareceu em um casulo, um homem sentou e observou a borboleta por várias horas conforme ela se esforçava para fazer com que seu corpo passasse através daquele pequeno buraco. Então pareceu que ela parou de fazer

<sup>2</sup> Streeter, Victor Lyle e Wylie, E. Benjamin – Mecânica dos Fluidos: tradução de: Celso da Silva Muniz e outros, McGraw – Hill do Brasil, São Paulo, 1980 – 7<sup>a</sup> edição

qualquer progresso. Parecia que ela tinha ido o mais longe que podia, não conseguia ir mais longe. Então o homem decidiu ajudar a borboleta, ele pegou uma tesoura e cortou o restante do casulo. A borboleta então saiu facilmente. Mas seu corpo estava murcho e era pequeno e tinha as asas amassadas. O homem continuou a observar a borboleta porque ele esperava que, qualquer momento, as asas dela se abrissem e esticassem para serem capazes de suportar o corpo, que iria se afirmar a tempo. Nada aconteceu. Na verdade, a borboleta passou o resto da sua vida rastejando com um corpo murcho e asas encolhidas. Ela nunca foi capaz de voar.

O que o homem, em sua gentileza e vontade de ajudar, não compreendia era que o casulo apertado e o esforço necessário à borboleta para passar através da pequena abertura era o modo com que Deus fazia com que o fluido do corpo da borboleta fosse para as suas asas de modo que ela estaria pronta para voar uma vez que estivesse livre do casulo.

Algumas vezes, o esforço é justamente o que precisamos em nossa vida. Se Deus nos permitisse passar através de nossas vidas sem quaisquer obstáculos, ele nos deixaria aleijados. Nós não iríamos ser tão fortes como poderíamos ter sido. Nós nunca poderíamos voar.

Eu pedi Força... e Deus me deu Dificuldades para me fazer forte.

Eu pedi Sabedoria... e Deus me deu Problemas para resolver.

Eu pedi Prosperidade... e Deus me deu Cérebro e Músculos para trabalhar.

Eu pedi Coragem... e Deus me deu Perigo para superar.

Eu pedi Amor... e Deus me deu pessoas com Problemas para ajudar.

Eu pedi Favores... e Deus me deu Oportunidades.

**Eu não recebi nada do que pedi... Mas eu recebi tudo de que precisava.**

*OBS.: Desconheço o autor, se alguém souber, gentileza informar-me.*  
[rferig@cci.fei.br](mailto:rferig@cci.fei.br)