

AFERIÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO POR OBSTRUÇÃO DE ÁREA

A experiência trata da aferição de medidores de vazão por obstrução de área. Estes medidores são aplicados em escoamentos de fluidos em tubulações. Na categoria dos medidores de vazão por obstrução de área estão os medidores Venturi, placa de orifício e bocal. Uma abordagem mais detalhada dos fenômenos do escoamento que ocorrem nestes medidores pode ser encontrada nas referências [1] e [2].

Em tais dispositivos a vazão é obtida medindo-se a diferença de pressão do escoamento do fluido através do medidor. Isto é, a diferença de pressão entre duas seções do escoamento no medidor é proporcional à vazão que escoar por ele. A diferença de pressão é produzida por efeitos inerciais, a aceleração do escoamento devido à obstrução do escoamento (por exemplo, a redução de área da garganta do venturi) e viscosos, a perda de carga.

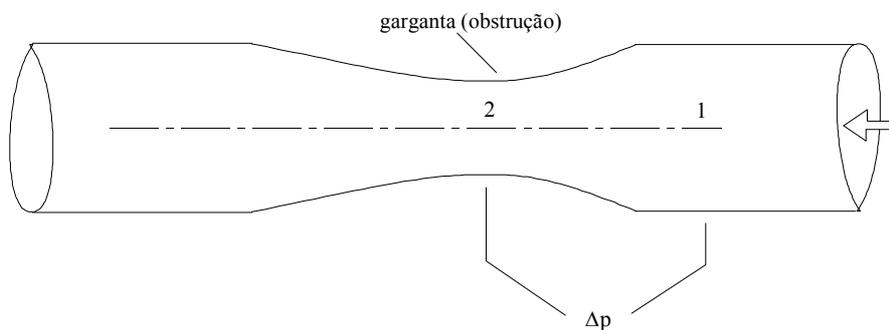


Figura 1. Representação esquemática de um venturi com identificação da obstrução e dos planos de medida da diferença de pressão

1.- Equação Geral dos Medidores de Vazão por Obstrução de Área

Assumindo que o escoamento no medidor por obstrução de área é unidimensional e não-viscoso, podemos aplicar a equação de Bernoulli entre as seções 1 e 2, onde se localizam as tomadas de pressão estática. Combinando a Equação de Bernoulli com a Equação de Conservação da Massa, obtemos a equação destes medidores para o escoamento idealizado,

$$\dot{m}_{teorica} = \frac{A_{obstrucao}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{2 \rho \Delta p} \quad (1)$$

onde:

- $\dot{m}_{teorica}$ ≡ vazão mássica teórica, [kg/s];
- $A_{obstrucao}$ ≡ área da seção transversal da obstrução, [m²];
- $\beta = (d/D)$ ≡ razão dos diâmetros das seções 1 e 2 [m/m]
- ρ ≡ densidade do fluido [kg/m³]
- $\Delta p = (p_1 - p_2)$ ≡ diferença de pressão entre as seções 1 e 2 (há seções de medida recomendadas para cada tipo de medidor).

A Equação (1) fornece um valor de vazão proporcional à diferença de pressão, a qual resulta da aceleração do escoamento entre as seções de medida. O valor efetivo da diferença de pressão, isto é, o valor medido, contempla também efeitos viscosos e efeitos inerciais adicionais. Assim, o valor da diferença de pressão medida é superior àquela resultante da aceleração do escoamento devido à redução de área entre 1 e 2. A diferença é proveniente de fenômenos tais como a perda de carga (efeito viscoso), a formação da *vena contracta* (efeitos inerciais) e mesmo o posicionamento das tomadas de pressão estática. A título de ilustração, as Figuras 2 e 3 mostram visualizações do escoamento em um bocal e em uma placa de orifício. No bocal, ressalta-se a diferença entre escoamentos lento e rápido. Note a formação marcante de vórtices estacionários no bocal da Fig. (2b), quando a velocidade do escoamento é elevada. O mesmo pode ser observado no escoamento

através do orifício da placa, na Fig. (3). Neste caso específico, note a formação da vena contracta no escoamento após o orifício.

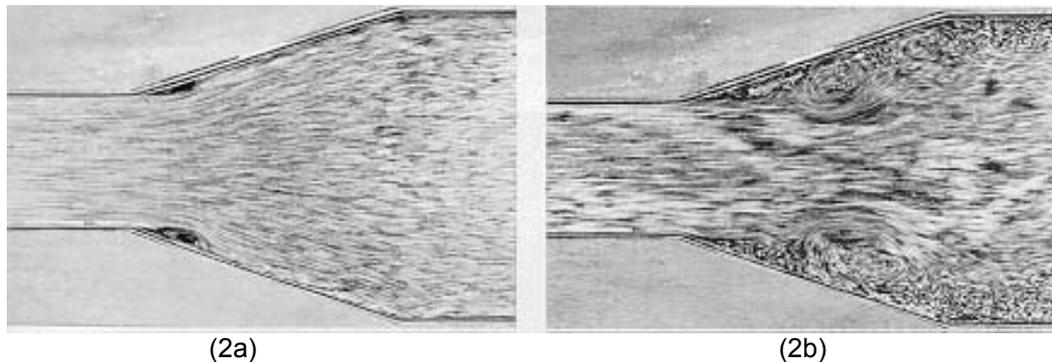


Figura 2. Escoamento em um bocal divergente; lento (à esquerda, velocidade 0,3 ~ 0,4 m/s) e rápido (à direita, 1,5 ~ 2,0 m/s); fluido: água; ângulo divergente: 20°; visualização: método dos traçadores. Reproduzido da Ref. [3].

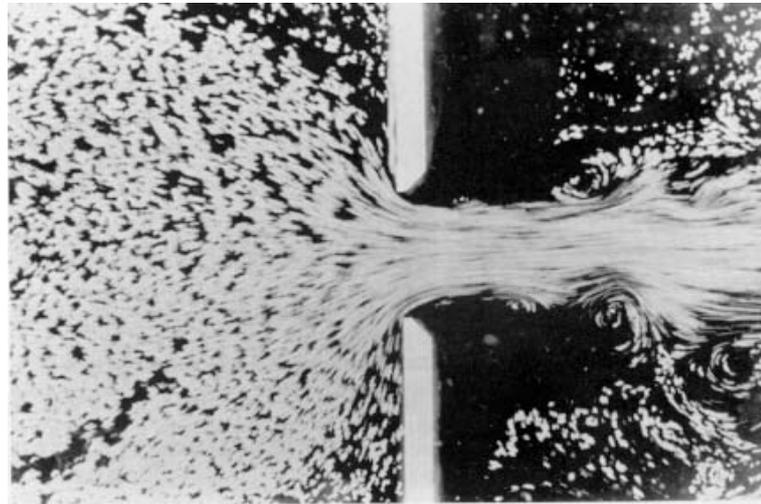


Figura 3: Escoamento através de uma placa - orifício. Fluido: água; velocidade: 1.4 m/s; $Re = 4.300$. Visualização através do método das bolhas de hidrogênio. Reproduzido da Ref. [3].

Se a vazão na Eq. (1) é calculada com o valor medido da diferença de pressão, diz-se que esta é a vazão teórica. Para incorporar na equação geral os fatores que aumentam a diferença de pressão maior em relação à resultante da aceleração entre 1 e 2, e calcular a vazão real que escoar através do medidor de obstrução de área, define-se um *coeficiente de descarga*, C_d :

$$C_d = \frac{\dot{m}_{\text{real}}}{\dot{m}_{\text{teórico}}} \quad (2)$$

Ou seja, o coeficiente de descarga C_d é um adimensional que corresponde à razão entre a vazão real que escoar através do medidor e a vazão teórica calculada com a Eq. (1), quando a diferença de pressão entre 1 e 2 é o valor medido. Conseqüentemente, a equação geral dos medidores de vazão por obstrução de área é escrita como:

$$\dot{m}_{\text{real}} = C_d \frac{A_{\text{obstrução}}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (3)$$



Pode-se mostrar, através de uma análise dimensional, que o coeficiente de descarga, C_d , é função da densidade e da viscosidade do fluido, da vazão e de um diâmetro característico. Ou seja, depende do número de Reynolds do escoamento. Para o caso de um medidor instalado em uma tubulação, o número de Reynolds calcula-se como indicado na Eq. (4), podendo estar relacionado ao diâmetro da obstrução (d) ou ao da tubulação (D):

$$Re_d = \frac{4 \dot{m}_{real}}{\pi d \mu} \quad \text{ou} \quad Re_D = \frac{4 \dot{m}_{real}}{\pi D \mu} \quad (4)$$

Na referência [2] são fornecidas equações detalhadas dos coeficientes de descarga de tipos diversos de medidores de obstrução de área, em função do número de Reynolds.

A aferição de um medidor de vazão por obstrução de área consiste justamente na determinação da sua curva de vazão (real) versus a diferença de pressão. Ou, em uma representação adimensional, que generaliza a aferição do medidor, na determinação da curva de C_d versus o número de Reynolds. **Este é o objetivo da presente experiência: aferir dois medidores de vazão, um venturi e uma placa de orifício.** Para aferir os medidores deve-se então medir e registrar a vazão em massa do escoamento e a respectiva diferença de pressão produzida pelo dispositivo. Para se obter uma **curva de aferição**, vários valores de vazão devem ser aplicados.

Para reforçar o conceito de diferença de pressão em obstruções, vamos medir também a perda de carga em um trecho do escoamento que contém o medidor por obstrução de área. A idéia é distinguir a diferença de pressão produzida por efeitos viscosos (a perda de carga por atrito) da diferença de pressão total no medidor, que superpõe efeitos viscosos e inerciais (a aceleração provocada pela redução de área).

2.- Montagem Experimental

A Figura 4 mostra um esquema da montagem experimental disponível no Laboratório, onde há um medidor Venturi e um de placa de orifício. Estes medidores estão conectados a tubulações, as quais são alimentadas por um tanque de água com nível constante. O nível constante no tanque garante um escoamento com vazão também constante através do medidor.

Os medidores foram instalados atendendo as condições da norma ASME, com mais de 40 diâmetros livres a montante e 10 diâmetros livres a jusante de qualquer singularidade (cotovelos, válvulas, etc) da tubulação. Os requisitos da norma visam minimizar efeitos indesejáveis no escoamento (deformação de linhas de fluxo, vorticidade, etc) induzidos por singularidades. Cada um dos medidores tem tomadas de pressão adequadamente posicionadas, segundo norma própria. As diferenças de pressão são medidas por manômetros apropriados (na montagem atual, manômetros tipo U e manômetro de poço, inclinado).

Na saída da seção de teste da tubulação existe um diversor de fluxo que permite desviar o fluxo de água para o reservatório de sucção da bomba ou para o tanque-coletor, instalado sobre uma balança. O desvio do fluxo para o tanque-coletor permite a determinação da vazão real que escoou através do medidor. Cronometra-se o tempo que uma certa massa de água é descarregada sobre o tanque-coletor, a qual é pesada pela balança. Assim, a vazão real em massa que escoou pelo medidor é:

$$\dot{m}_{real} = \frac{m}{\Delta t} \quad (5)$$

onde:

m = massa de fluido coletada no tanque [kg]

Δt = tempo da coleta [s]

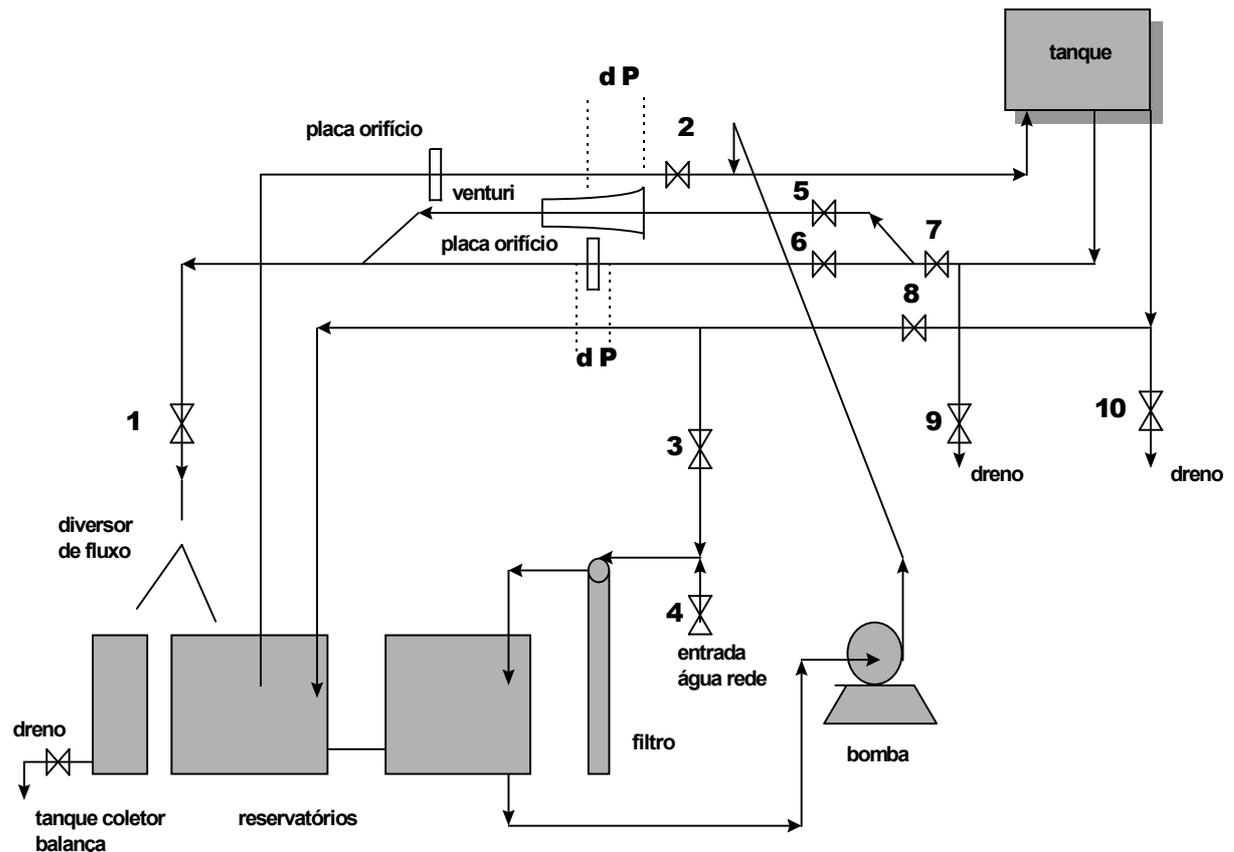


FIGURA 4: Diagrama do circuito de teste de aferição de medidores de vazão

3.- Características Físicas do Sistema:

Placa de orifício:

Material: aço inox 316
 Diâmetro interno da tubulação: 45,1 mm
 Diâmetro do orifício: 28,7 mm
 Características do orifício: "bordas retas",
 Posicionamento das tomadas de pressão: 1 D e $\frac{1}{2}$ D

Venturi:

Material: nylon
 Diâmetro interno da tubulação: 54,4 mm
 Diâmetro da garganta: 30,7 mm
 Características da garganta: seção convergente - divergente de $14^\circ - 7^\circ$
 Tomadas de pressão: à montante e na garganta, por anel piezométrico.

Manômetros:

Tipo: de tubo em "U" e de poço, inclinado
 Fluido manométrico: mercúrio ($\rho = 13.600 \text{ kg/m}^3$).

4.- Procedimento Operacional

Para sua segurança e preservação do equipamento, leia com cuidado este item. Em caso de dúvida, não hesite em perguntar ao professor ou técnico do laboratório.

1. – Antes de iniciar qualquer procedimento de teste, observe a montagem do experimento e procure entender a função dos vários dispositivos do conjunto;



2. - **Duas válvulas do conjunto devem ficar permanentemente abertas (a que permite a passagem da água da descarga da bomba para o tanque superior, e a do dreno do tanque, # 8 na Fig. 4). As manoplas destas válvulas foram retiradas para que não sejam operadas.** Certifique-se que todas as outras válvulas do sistema estejam fechadas;
3. – Ligue a bomba e certifique-se que há alimentação de água para o tanque superior (quando o tanque superior estiver cheio, haverá retorno para o tanque de sucção da bomba através da linha de retorno);
4. – Quando o tanque superior estiver cheio, abra as válvulas adequadas para alimentar o medidor que será ensaiado inicialmente (o venturi);
5. – Deixe que a água escoe por um pequeno intervalo de tempo através da tubulação e do medidor e verifique (teste) o funcionamento do divisor e da válvula na extremidade da tubulação.
6. – Verifique a operação da balança e do cronômetro fornecido e estabeleça um procedimento de medida do peso da água acumulada no tanque-coletor;
7. -. Agora é o momento de retirar as bolhas de ar das mangueiras dos manômetros (eventuais bolhas de ar irão provocar erros de medida da diferença de pressão!);
8. – O equipamento está pronto para a realização dos ensaios. Meça dez valores de vazão, igualmente espaçados entre a vazão máxima e uma vazão mínima que você vai estabelecer (em função da resolução do manômetro utilizado), e as respectivas pressões diferenciais. Estabeleça com os companheiros o tempo mínimo de armazenamento de água no tanque coletor (ou a massa de água coletada), com base em um critério racional (**incerteza da medição da vazão real?**);
9. -Meça a temperatura da água utilizada nos testes (esta é a temperatura de referência para a aferição dos medidores);
- 10.- Para ensaiar a placa de orifício, repita os procedimentos desde o item 5, sem esquecer de fechar a válvula que alimenta o venturi;
- 11.- Quando estiver aferindo a placa de orifício, meça também a diferença de pressão entre as duas seções do escoamento que contém a placa (há um manômetro U com mercúrio conectado às tomadas de pressão).

Procedimento de parada:

1. Certifique - se de que todas as válvulas estejam fechadas (a menos das duas válvulas sem manoplas);
2. Desligue a bomba.

5.- Relatório

1. Apresente numa planilha os valores medidos da diferença de pressão nos medidores e na seção que tem a placa de orifício, e os respectivos pesos de água coletada e tempos de medição, nas unidades de medição;
2. Apresente em novas planilhas: (a) os valores processados da diferença de pressão, de vazão teórica (calculada pela Eq. 1), da vazão real medida, do número de Reynolds relativo ao diâmetro do orifício e do coeficiente de descarga; (b) no caso da placa de orifício, apresente também a coluna de perda de carga através da placa; (c) apresente na planilha a incerteza das variáveis, medidas e calculadas (utilize o conceito de propagação de incerteza). As variáveis devem ter unidades do SI (não se esqueça de equacionar os manômetros);
3. Correlacione a vazão dos medidores com a diferença de pressão. Apresente a curva juntamente com os dados experimentais (inclua a incerteza da medida). Correlacione o coeficiente de descarga dos medidores com o número de Reynolds. Apresente a curva juntamente com os dados experimentais (inclua a incerteza da medida). Se não for possível obtê-la, informe um valor médio adequado, juntamente com a faixa de variação do número de Reynolds para a qual ele é válido;
4. Verifique a consistência entre as correlações obtidas e os fundamentos;



5. Procure na literatura valores do coeficiente de descarga de placas de orifício e compare com o obtido na experiência;
6. Faça uma análise geral do experimento realizado e dos resultados obtidos.

6.- Bibliografia

- [1]. Fox, Robert W. and McDonald, Alan T.; "Introdução à Mecânica dos Fluidos", Edit. Guanabara Dois, 1981.
- [2]. Benedict, R.P.; "Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements", Edit. John Wiley and Sons, 1977.
- [3]. Japan Society of Mechanical Engineers, "Visualized Flow", Edit. Pergamon Press, 1988.
- [4] Rosa, E. S. e Nebra, S. A. Apostila do curso de Instrumentação e Medidas