



ERROS EM MEDIÇÕES DE VAZÃO COM PLACAS DE ORIFÍCIO INSTALADAS EM POSIÇÃO INVERTIDA

Geraldo Augusto Campolina França

Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG
Av. Antonio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte
31270-901
franca@demec.ufmg.br

Sinthya Conçalves Tavares

Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG
Av. Antonio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte
31270-901

Resumo. *Do ponto de vista prático, o entendimento do comportamento de um fluido em medidores de orifício é necessário para melhorar a exatidão da medição de vazão. Estima-se que o valor referente à quantidades de gás não contabilizadas devido a erros de medição é da ordem de 250 milhões de dólares nos Estados Unidos. Neste trabalho, erros de medição de vazão devidos a uma montagem incorreta de duas placas de orifício concêntrico diferentes foram determinados experimentalmente. As razões de diâmetro, β , das placas usadas nos experimentos são 0,687 e 0,573. Números de Reynolds entre 3,3 e $8,9 \times 10^4$ foram alcançados nos testes com escoamento de ar em uma tubulação de ferro galvanizado com diâmetro interno de 0,0685 m. Os resultados mostram que os erros na vazão calculada em relação à vazão real aumentam com a diminuição de β . Para a placa com $\beta = 0,687$, os erros variaram de 12,1 a 13,1% contra 12,4 a 13,4 para a placa com $\beta = 0,573$. Na bibliografia consultada, erros de 9 a 20% são relatados.*

Os experimentos foram realizados no laboratório de mecânica dos fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.

Palavras-chave: *medidor de orifício, placa de orifício, medição de vazão, erro, incerteza, montagem incorreta*

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que cerca de 80% dos elementos primários de medição de vazão empregados na indústria ainda sejam de orifício ou de pressão diferencial, mais especificamente, dos tipos venturi, bocal e placa de orifício. Apesar do avanço tecnológico, que tem disponibilizado medidores de vazão cada vez mais sofisticados, não se espera que a participação desses dispositivos no mercado caia abaixo de 40% num futuro próximo (Martins, 1998).

As placas de orifício, pela simplicidade construtiva e amplo espectro operacional, são extensivamente utilizadas na medição de vazão em indústrias do mundo inteiro. A utilização adequada desses elementos primários deve ser, no entanto, assegurada pela constante identificação e redução de possíveis erros de medição. Aceitava-se, inicialmente, que, se a instalação respeitasse os requisitos das normas, as incertezas nas medições seriam praticamente nulas. Porém, estudos têm demonstrado que incertezas significativas ocorrem mesmo em instalações corretas, o que colocou a exatidão desses medidores sob minuciosa observação (Morrison et al., 1995). Essa atitude justificava-se pelas cifras milionárias que as incertezas nas medições de vazão podem representar para as indústrias envolvidas. Sheikholeslami et al. (1988) chamaram a atenção para esse problema e

apresentaram uma estimativa onde o valor médio dos prejuízos atribuídos a incertezas aleatórias na medição de gás natural é de cerca de 250 milhões de dólares por ano. Miller (1983) estima ainda que somente nas indústrias de gás natural nos Estados Unidos a perda anual devida a montagens e medições incorretas é da ordem de 7 milhões de dólares.

Uma falha grave, que ocorre com frequência bem maior do que seria esperado na montagem de placas de orifício em indústrias, motivou este trabalho. Trata-se da instalação da placa em posição invertida. Nesta situação de instalação, o escoamento do fluido é facilitado, reduzindo assim o diferencial de pressão medido para uma dada vazão de fluido através da placa. O resultado final disto é a leitura ou o registro de uma vazão de fluido bem menor do que a real.

Estudos recentes têm procurado quantificar os erros na medição de vazão devidos à instalação de uma placa de orifício em posição invertida. Segundo Bower (1995), eles podem variar de 15 a 17%, valores que estão em acordo com aqueles obtidos por Ting (1993), que aponta erros na faixa de 12 a 17%. Witte (1999), aponta um intervalo ainda maior. Segundo ele, os erros iriam de 9 a 20%. Porém, todos estão de acordo em afirmar que há uma forte dependência dos erros em relação ao número de Reynolds do escoamento e à razão de diâmetros da placa.

O presente trabalho objetiva dar uma contribuição para esses estudos, com a determinação experimental da faixa de erros na medição de vazão de fluidos, decorrentes das montagens incorretas de duas placas de orifício concêntrico com diferentes relações de diâmetros.

2. AVALIAÇÃO DA VAZÃO ATRAVÉS DE PLACAS DE ORIFÍCIO

A aplicação da equação de Bernoulli e da equação da continuidade entre uma seção A_1 a montante e uma seção A_2 a jusante de uma placa de orifício, conforme indicado na Fig. (1), fornece a vazão mássica teórica, \dot{m}_t , através desse elemento primário. Considerando escoamento uniforme, fluido incompressível, e desprezando as perdas por atrito entre as tomadas de pressão, vem:

$$\dot{m}_t = \frac{A_t \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_t}{A}\right)^2}} \quad A_t = \frac{A_t}{\sqrt{1 - (\beta)^4}} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \quad (1)$$

onde P_1 é a pressão a montante da placa de orifício, P_2 a pressão a jusante da placa de orifício, ρ a massa específica do fluido, A a área da seção transversal do tubo, A_t a área da seção da vena-contracta e β é a razão entre o diâmetro do orifício, d , e o diâmetro do tubo, D .

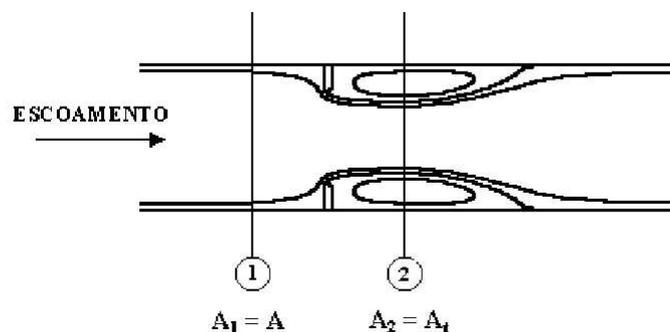


Figura 1. Escoamento através de uma placa de orifício identificando as seções usadas na análise

Para levar em conta as irreversibilidades do escoamento, a equação para a vazão teórica é corrigida pelo coeficiente de descarga, C_d . O coeficiente de descarga é definido pela razão entre a vazão real, \dot{m}_{real} , e a vazão teórica, \dot{m}_t , ou seja:

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

A vazão real através de uma placa de orifício, para escoamento incompressível, é dada então por:

$$\dot{m}_{\text{real}} = C_d \cdot \frac{A_t}{\sqrt{1 - (\beta)^4}} [2\rho(P_1 - P_2)]^{1/2} \quad (3)$$

onde C_d é uma função do número de Reynolds, Re_D ou Re_d , da razão de diâmetros, β , e do tipo e localização das tomadas de pressão.

O fator de correção C_d é fornecido pelas normas que tratam da medição de vazão através de dispositivos do tipo orifício, como a ISO 5167 (1991) ou sua versão brasileira NBR ISO 5167 e a ANSI/API 2530 (1985). Mais recentemente, Reader-Harris e Gallagher desenvolveram uma equação para o coeficiente de descarga, denominada Equação RG. As pesquisas que levaram ao desenvolvimento da Equação RG constituem o mais recente e completo trabalho sobre o assunto. Essa equação já foi adotada nas normas AGA, API, GPA e ANSI para a medição de gás natural através de placas de orifício concêntrico de cantos vivos com tomadas nos flanges. A ISO 5167 (1991) encontra-se atualmente em processo de revisão, visando implementar também o uso dessa equação em sua metodologia de cálculo. Martins (1998) apresenta uma descrição detalhada da metodologia de cálculo do coeficiente de descarga com as duas normas referenciadas acima e com a Equação RG.

2.1. Medição de Vazão na Indústria

A Figura (2) apresenta um esquema típico de uma malha de medição contínua de vazão na indústria, usando uma placa de orifício como elemento primário. Neste caso, na programação do controlador lógico programável, PLC, são introduzidas as metodologias de cálculo do coeficiente de descarga por norma e da massa específica do fluido a partir dos sinais de temperatura e de pressão enviados pelos respectivos transmissores. Existem instalações, onde não são realizadas medições instantâneas de temperatura e de pressão, em que um valor de referência para a massa específica do fluido é armazenado no PLC e considerado como valor real. Uma incerteza de medição está evidentemente associada a esse procedimento. Completando a malha, o sinal do diferencial de pressão é transmitido ao PLC que, através da aplicação da Eq. (3), fornece uma saída visual ou impressa do valor da vazão instantânea do fluido. Tanto as normas quanto a programação do PLC pressupõem a instalação correta da placa de orifício.

O orifício da placa, perfeitamente circular, possui uma borda reta e uma borda chanfrada que deve estar, numa montagem correta, voltada para o escoamento a jusante da placa (Fig. 3). A montagem incorreta, como na Fig. 4, ou seja, com a borda chanfrada em posição invertida invalida a aplicação da Eq. (3) para o cálculo da vazão através da placa. Supõe-se que uma instalação inadvertida como esta seja decorrente da idéia errônea de que a seção chanfrada do orifício tem a finalidade de facilitar a passagem do fluido através da placa. Isto só é correto em casos muito especiais, mais especificamente, no escoamento laminar em tubos de pequeno diâmetro.

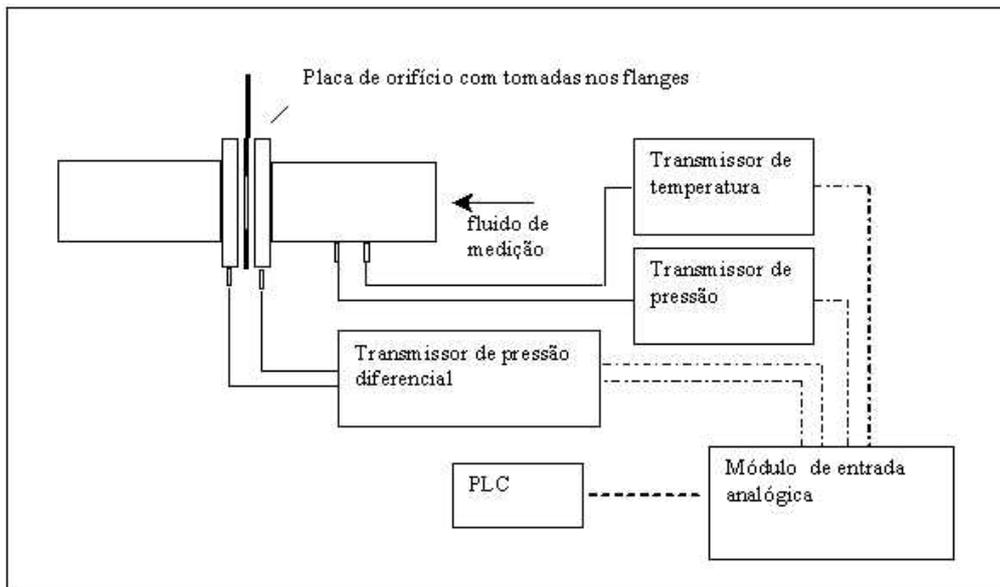


Figura 2. Esquema de um malha típica de medição contínua de vazão na indústria, usando placa de orifício

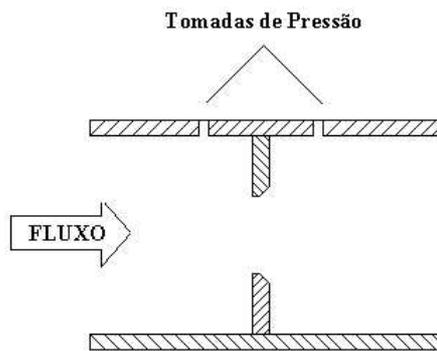


Figura 3. Esquema de placa de orifício instalada em posição correta

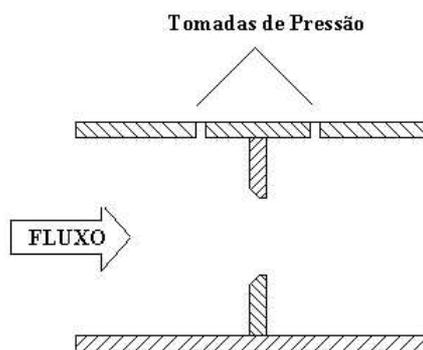


Figura 4. Esquema de placa de orifício instalada em posição invertida

Para uma massa específica do fluido e um coeficiente de descarga constantes, a Eq. (3) pode ser escrita na seguinte forma reduzida:

$$\dot{m} = C\sqrt{\Delta P} \quad (4)$$

onde C é um coeficiente de vazão que engloba todos os valores constantes da Eq. (3) e $\Delta P = P_1 - P_2$ é o diferencial de pressão medido entre as tomadas a montante e a jusante da placa. Aplicando-se, na Eq. (4), os valores dos diferenciais de pressão obtidos para a placa na posição correta, ΔP_{PC} , e para a placa na posição invertida, ΔP_{PI} , obtém-se as vazões para cada um dos casos. O erro cometido na medição de vazão, devido à instalação da placa na posição invertida pode ser quantificado então pela Eq. (5):

$$\% \text{ Erro } \dot{m} = \left(1 - \frac{\sqrt{\Delta P_{PC}}}{\sqrt{\Delta P_{PI}}} \right) \times 100 \quad (5)$$

O direcionamento do lado cônico para montante, na montagem incorreta, facilita o escoamento do fluido através da placa, com uma conseqüente diminuição da recirculação do fluido na face de entrada e da queda de pressão medida, em relação aos valores para a placa na posição correta. Deste modo, para uma mesma vazão mássica através da placa, o diferencial de pressão transmitido para o PLC é menor para a placa invertida do que para a placa na posição correta. Como, na programação do PLC, a vazão é calculada com uma equação semelhante à Eq. (3), onde a principal variável de entrada é o diferencial de pressão ΔP , o valor registrado ou lido será falso, incorreto. O valor da vazão real que seria calculada no PLC com a placa na posição correta seria certamente maior.

Quando a instalação da placa na posição invertida decorre de uma manutenção na malha de medição, é relativamente fácil detectar o fato. Haverá uma queda brusca no valor da vazão fornecido pelo PLC, em relação aos valores típicos anteriores à manutenção, sem que nenhuma alteração operacional tenha sido identificada. No entanto, quando a inversão da placa é feita na montagem inicial da malha de medição, a falha provavelmente só será detectada numa manutenção futura, se houver.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A bancada de testes utilizada neste estudo está instalada no laboratório de mecânica dos fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais e pode ser vista, esquematicamente, na Fig. (5), onde as cotas estão expressas em metros.

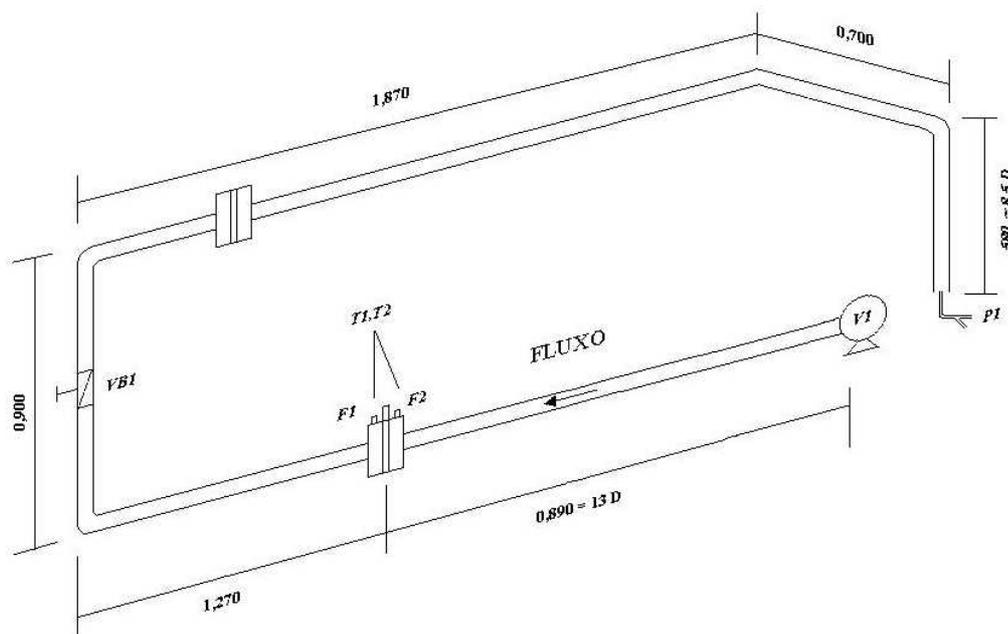


Figura 5. Esquema da bancada de testes

A bancada consiste em uma tubulação de aço galvanizado de 2 ½” de diâmetro onde, entre os flanges **F1** e **F2**, são instaladas as placas de orifício concêntrico de cantos vivos utilizadas no estudo. Os valores dos parâmetros geométricos dessas placas, à 25 °C, estão na Tab. (1).

Tabela 1. Parâmetros geométricos das placas de orifício utilizadas no estudo

	Placa 1	Placa 2
Diâmetro do Orifício, d, mm	47,05	39,25
Diâmetro Externo da Placa, D _E , mm	123,55	123,55
Espessura da Parte Cilíndrica da Placa, e, mm	1,90	1,90
Espessura da Placa, E, mm	2,70	2,20
Comprimento do Cabo-Guia, S, mm	81,00	100,40
Largura do Cabo-Guia, P, mm	25,25	26,75
Ângulo do Chanfro, α	45°	45°
β = d/D, onde D é o diâmetro interno do tubo de ferro galvanizado = 0,06850 m	0.686861	0,572993

O ar é insuflado na tubulação através do ventilador, **V1**, instalado em uma das extremidades do sistema, possuindo características de acordo com a Tab. (2).

Tabela 2. Características do ventilados utilizado no estudo

Fabricante	Brasil
Vazão de Ar	300 m ³ /h
Pressão Estática (man.)	300 mmH ₂ O
Potência	2 CV

As modificações nas condições do escoamento são obtidas pela variação na abertura da válvula borboleta, **VB1**. A bancada permite a obtenção de números de Reynolds em um intervalo relativamente pequeno, variando de, aproximadamente, 3 x 10⁴ a 9 x 10⁴. As propriedades do ar são determinadas, após o estabelecimento do regime permanente, com o valor da pressão barométrica média local e da temperatura medida com um termopar tipo K, instalado na seção da tubulação de saída do ar.

As tomadas de pressão **T1** e **T2** estão localizadas, respectivamente, sobre os flanges **F1** e **F2**, a uma distância de 0,0254 m a montante e a jusante das faces da placa de orifício, conforme previsto na ISO 5167 (1991) para tomadas nos flanges. A diferença de pressão entre as tomadas **T1** e **T2** foi medida com um manômetro de tubo em U, com escala em mm, tendo como fluido manométrico a água.

A vazão considerada como referência foi obtida a partir de leituras de pressões dinâmicas com um pitot, **P1**. Foram definidos, pelo método da igualdade de áreas, oito pontos de medição numa seção transversal do tubo próximo da saída de ar. A pressão dinâmica utilizada no cálculo da velocidade é a média de cinco medições locais. A velocidade média em cada ponto, u_i, pôde então ser calculada com a Eq. (6).

$$u_i = \sqrt{\frac{2P_{d,i}}{\rho}} \quad (6)$$

onde P_{d,i} é a pressão dinâmica média do fluido no ponto de medição. A velocidade média do escoamento foi então obtida como:

$$\bar{u} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \sqrt{\frac{2P_{d,i}}{\rho}} \quad (7)$$

onde n é o número de pontos de medição das pressões dinâmicas. Com as propriedades do ar, a velocidade média do escoamento dada pela Eq. (7), e o diâmetro interno do tubo, foram determinados o número de Reynolds experimental do escoamento e a vazão mássica de referência. As vazões mássicas obtidas com o pitot foram então comparadas com as obtidas com a Eq. (3), aplicando-se os diferenciais de pressão medidos nas duas placas, tanto para a posição correta quanto para a posição invertida.

4. RESULTADOS

A Tabela (3) fornece, para alguns valores do número de Reynolds experimental, os resultados das medições do diferencial de pressão para a placa 1, instalada na posição correta e na posição invertida, e os erros no cálculo da vazão, dados pela Eq. (5), para a placa instalada na posição invertida em relação à placa instalada corretamente. Apesar do regime de escoamento não ser, em nenhuma das situações analisadas, completamente turbulento, o número de Reynolds ficou numa faixa em que os desvios no coeficiente de descarga são inferiores a 5% em relação ao coeficiente de descarga para o escoamento totalmente turbulento.

Tabela 3. Diferencial de pressão e erros no cálculo da vazão para a placa 1

$Re_{exp} (10^4)$	8,91	8,73	8,58	8,47	8,29	7,89	6,81	6,29	5,56	4,87	4,43	3,79
$\Delta P_{PC} (Pa)$	2645	2623	2601	2474	2305	2045	1559	1283	1037	805	601	447
$\Delta P_{PI} (Pa)$	2105	2072	2037	1965	1824	1607	1219	1010	822	638	474	354
Erro \dot{m} (%)	-12,1	-12,5	-13,0	-12,2	-12,4	-12,8	-13,1	-12,7	-12,3	-12,3	-12,6	-12,3

A Tabela (4) apresenta resultados semelhantes aos da Tab. (3), para a placa 2.

Tabela 4. Diferencial de pressão e erros no cálculo da vazão para placa 2

$Re_{exp} (10^4)$	6,92	6,86	6,67	6,27	5,91	5,66	5,44	5,27	5,09	4,70	4,19	3,32
$\Delta P_{PC} (Pa)$	3702	3743	3562	3215	2830	2776	2304	2349	2068	1946	1351	889
$\Delta P_{PI} (Pa)$	2915	2916	2770	2536	2232	2186	3030	1846	2719	1527	1069	701
Erro \dot{m} (%)	-12,7	-13,3	-13,4	-12,6	-12,6	-12,7	12,8	-12,8	12,8	-12,9	-12,4	-12,6

A Tabela (5) apresenta, para a placa 1 na posição correta e para diversos Reynolds, uma comparação dos resultados de vazão obtidos com o pitot e com a aplicação da Eq. (3), para os diferenciais de pressão medidos.

Tabela 5. Comparação das vazões obtidas com o pitot e com a metodologia de placa de orifício para a placa 1

$Re_{exp} (10^4)$	8,91	8,73	8,58	8,47	8,29	7,89	6,81	6,29	5,56	4,87	4,43	3,79
$\dot{m}_{pitot} (Kg/s)$	0,897	0,878	0,862	0,850	0,835	0,795	0,685	0,634	0,565	0,490	0,450	0,384
$\dot{m}_{\Delta P} (Kg/s)$	0,904	0,901	0,898	0,876	0,845	0,795	0,696	0,632	0,566	0,503	0,432	0,374
Erro \dot{m} (%)	0,77	2,55	4,01	2,97	1,18	0,00	1,58	-0,32	0,18	2,58	-4,17	-2,67

Os desvios nas vazões foram calculados por:

$$\% \text{ Erro } \dot{m} = \left(1 - \frac{\dot{m}_{\Delta P}}{\dot{m}_{\text{pitot}}} \right) \times 100 \quad (8)$$

A Tabela (6) apresenta resultados semelhantes aos da Tab. (5), para a placa 2. Os erros foram também calculados com a Eq. (8):

Tabela 6. Comparação das vazões obtidas com o pitot e com a metodologia de placa de orifício para a placa 2

$Re_{\text{exp}} (10^4)$	6,92	6,86	6,67	6,27	5,91	5,66	5,44	5,27	5,09	4,70	4,19	3,32
$\dot{m}_{\text{pitot}} (\text{Kg/s})$	0,687	0,697	0,674	0,641	0,601	0,593	0,543	0,547	0,516	0,498	0,415	0,341
$\dot{m}_{\Delta P} (\text{Kg/s})$	0,700	0,686	0,676	0,635	0,599	0,577	0,549	0,537	0,513	0,478	0,427	0,333
Erro \dot{m} (%)	1,85	-1,55	0,23	-0,92	-0,25	-2,81	1,23	-1,82	-0,60	-4,07	2,77	-2,15

Observa-se, nas Tabs. (5) e (6), que o desvio máximo nas vazões obtidas com as duas metodologias é inferior a 5%. Este desvio está de acordo com o desvio no coeficiente de descarga e é perfeitamente aceitável para medições com pitot e com placa de orifício.

5. CONCLUSÃO

A montagem incorreta de placas de orifício para medição de vazão pode trazer sérios prejuízos para a indústria. Uma diminuição considerável no diferencial de pressão nas tomadas de uma placa instalada na posição invertida é verificada, em relação àquele que seria obtido com a placa na posição correta. Essa diminuição no diferencial de pressão resulta num valor calculado de vazão menor do que o valor real. Os erros na medição de vazão decorrentes da montagem de uma placa de orifício na posição invertida aumentam com a diminuição da razão de diâmetros β da placa. Os resultados experimentais apresentados neste trabalho mostram que os erros na vazão calculada, em relação à vazão real medida com um pitot, estão compreendidos entre 12,1 e 13,1% para $\beta = 0,687$ e entre 12,4 e 13,4% para $\beta = 0,573$, com números de Reynolds de 3,3 a $8,9 \times 10^4$. Esses valores estão dentro da faixa de erros relatada na literatura, de 9 a 20%.

A montagem utilizada para os experimentos não permitiu a obtenção de escoamentos de ar totalmente turbulentos, como seria desejável para este tipo de estudo experimental. No entanto, para a faixa de Reynolds obtida, uma incerteza inferior a 5% é prevista para os coeficientes de descarga fornecidos pelas normas para o cálculo da vazão através de uma placa de orifício. Desvios inferiores a 5% podem ser considerados compatíveis com as incertezas inerentes às medições de vazão com pitot e com placa de orifício.

6. REFERÊNCIAS

- ANSI/API 2530, “Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fluids”, 1985, 2nd Edition, American Gas Association and American Petroleum Institute, Washington, DC.
- Bower, J., “Backward Orifice Plate Causes Major Gas Flow Measurement Error”, 1995, Oil & Gas Journal.
- ISO 5167-1, “Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices, Part 1: Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross Section Conduits Running Full”, 1991, First Edition.
- Martins, Nelson, “Manual de Medição de Vazão Através de Placas de Orifício, Bocais e Venturis”, 1998, Rio de Janeiro, Interciência, Petrobrás.

- Miller, R. W., "Flow Measurement Engineering Handbook", 1983, New York, McGraw-Hill Book Company.
- Morrison, G. L., Hauglie, J, DeOtte, R. E. Jr., "Beta Ratio, Axisymmetric Flow Distortion and Swirl Effects upon Orifice Flow Meters", 1995, Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 6, No.3, pp. 207-216.
- Sheikholeslami, M. Z., Patel, B. R., Kothari, K., "Numerical Modeling of Turbulent Flow Through Orifice Meters – a Parametric Study", 1988, International Conference on Flow Measurement, London, UK, PAPER B2.
- Ting, V. C., "Effects on Nonstandard Operating Conditions on the Accuracy of Orifice Meters", 1993, SPE - Productions and Facilities, Vol. 8, pp. 58-62.
- Witte, J. N., "Proper Orifice Meter Test Must Include Plate, Tube Inspection – Error-Producing Conditions Can Be Overlooked by Routine Focus on Secondary Instrument Calibration ", 1999 Pipe Line & Gas Industry, Vol. 82, No. 12.

TITLE: ERRORS IN FLOW MEASUREMENTS WITH ORIFICE PLATES ASSEMBLED IN INVERTED POSITION.

Geraldo Augusto Campolina França

Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG
Av. Antonio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte
31270-901
franca@demec.ufmg.br

Sinthya Conçalves Tavares

Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG
Av. Antonio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte
31270-901

Abstract: *From a practical point of view, the fundamental understanding of fluid behavior in orifice meters is necessary for improvement in flow measurement accuracy. It is estimated that the average value of the unaccounted for gas due to metering errors is on the order of 250 million dollars per year in the United States. In this work, flow measurement errors due to an uncorrected installation of two different concentric orifice plates were experimentally found. The diameter ratios (β) of the orifice plates used in the tests are 0,687 and 0,573. A Reynolds number ranging from 3,3 to $8,9 \times 10^4$ were attained in the experiments with air flow inside a 0,0685 m i.d. galvanized iron piping. The results show that the errors in the calculated rate flow relative to the real flow rate increase as the ratio diameter decreases. For the plate with $\beta = 0,687$ the errors varied from 12,1 to 13,1% against 12,4 to 13,4% for the plate with $\beta = 0,573$. In the consulted bibliography, errors from 9% to 20% are related.*

The experiments were carried out in the fluid mechanics facilities of the Mechanical Engineering Department of UFMG.

Key-words: *orifice meter, orifice plate, flow measurement, error, uncertainty, incorrect installation*