

DESEMPENHO DE MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE VAZÃO UTILIZANDO PLACAS DE ORIFÍCIO

Nicolas Duarte Cano¹, Gustavo Lopes Muniz², Antonio Pires de Camargo³, Jonesmar de Oliveira⁴, José Antônio Frizzone⁵, André Luís Sotero Salustiano Martim⁶

RESUMO: Esse trabalho teve como objetivos: confrontar uma equação teórica cujo coeficiente de descarga foi obtido pela equação de Reader-Harris/Gallagher com uma equação potencial cujos coeficientes foram ajustados com base em dados experimentais; quantificar o erro nas determinações de vazão e sugerir a faixa de medição apropriada para cada uma das condições avaliadas. Foram avaliados dois modelos de placa de orifício, uma de 100 mm e outra de 150 mm, ambas com restrição na seção de escoamento de 50%. Foram avaliadas vazões entre 15 e 130 m³ h⁻¹, sendo conduzidos testes até se atingir a pressão diferencial de 100 kPa na placa de orifício. Para a placa de orifício de 100 mm, a faixa de medição recomendada para obtenção de erros inferiores a 5% foi de 30 a 65 m³h⁻¹ utilizando a equação teórica e de 20 a 65 m³h⁻¹ utilizando a equação empírica. Para a placa de orifício de 150 mm, a faixa de medição recomendada para obtenção de erros inferiores a 5% foi de 70 a 130 m³h⁻¹ utilizando a equação teórica e de 40 a 130 m³h⁻¹ utilizando a equação empírica. A equação de Reader-Harris/Gallagher estimou adequadamente o coeficiente de descarga dos modelos de placas de orifício avaliados, entretanto o uso de uma equação empírica proporcionou menores erros de medição e maior rangeabilidade dos medidores de vazão avaliados.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrometria; Diafragma; Hidráulica

PERFORMANCE OF MODELS TO DETERMINE FLOWRATE USING ORIFICE PLATES

¹ Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp/Feagri), (19) 99793-0415, n181139@dac.unicamp.br

² Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp/Feagri)

³ Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp/Feagri)

⁴ Graduando em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp/Feagri)

⁵ Professor Titular, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (USP/ESALQ)

⁶ Professor Associado Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp/Fec)

ABSTRACT: The objective of this work was to compare a theoretical equation whose discharge coefficient was obtained by the Reader-Harris/Gallagher equation against a potential equation whose coefficients were fitted based on experimental data; to quantify the error in the flow determinations and suggest the appropriate measurement range for each of the evaluated conditions. Two models of an orifice plate were evaluated, one of 100 mm and one of 150 mm, both with restriction in the flow section of 50%. Flow rates ranging from 15 to 130 m³h⁻¹ were evaluated, and tests were carried out until a differential pressure of 100 kPa was reached in the orifice plate. For the 100 mm orifice plate, the recommended measurement range with errors less than 5% was from 30 to 65 m³h⁻¹ using the theoretical equation and from 20 to 65 m³h⁻¹ using the empirical equation. For the 150 mm orifice plate, the recommended measurement range with errors less than 5% was 70 to 130 m³h⁻¹ using the theoretical equation and 40 to 130 m³h⁻¹ using the empirical equation. The Reader-Harris/Gallagher equation adequately estimated the discharge coefficient of the evaluated orifice plate models, however, the use of an empirical equation provided smaller measurement errors and greater rangeability of the rated flow meters.

KEYWORDS: Hydrometry; Diaphragm; Hydraulics

INTRODUÇÃO

A medição da vazão em condutos consiste na determinação da quantidade de massa ou volume que escoar por unidade de tempo e pode ser expressa como vazão mássica (M T⁻¹) ou volumétrica (L³ T⁻¹). A determinação de vazão a partir de medições de pressão diferencial resulta em instrumentos chamados de medidores deprimogênicos de vazão (Delméé, 2003). Uma placa de orifício é um medidor deprimogênico que consiste basicamente em uma placa circular perfurada que provoca restrição na seção de escoamento, causando uma pressão diferencial proporcional a vazão que escoar na canalização (Gutiérrez, 2012). O uso de placas de orifício ou diafragmas é bastante comum, sendo que esses instrumentos se destacam pelos seguintes aspectos: construção simples; sem partes móveis; fácil de instalar; apresentam o menor custo entre os medidores deprimogênicos; podem ser utilizados para diversos tipos de fluidos. Por outro lado, as principais desvantagens são: provocam considerável perda de carga continuamente; rangeabilidade menor do que outros tipos de medidores; sinal de saída não linear com a vazão; necessidade de longos trechos retos de tubulação à montante e à jusante do medidor; erros de medição superiores a medidores mais modernos (AWWA, 2006). A vazão

teórica de placas de orifício é deduzida a partir do Teorema de Bernoulli, sendo então multiplicada por um coeficiente de descarga. A estimativa do coeficiente de descarga pode ser efetuada a partir de dados experimentais coletados por procedimentos de calibração, ou a partir de equações dentre as quais se destaca a equação de Reader-Harris/Gallagher (ISO5167-2, 2003). Esse trabalho teve como objetivos: (1) confrontar uma equação teórica cujo coeficiente de descarga foi obtido pela equação de Reader-Harris/Gallagher com uma equação potencial cujos coeficientes foram ajustados com base em dados experimentais; (2) quantificar o erro nas determinações de vazão e sugerir a faixa de medição apropriada para cada uma das condições avaliadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da FEC/UNICAMP, sendo utilizada água potável à temperatura ambiente. Foram avaliados dois modelos de placas de orifício com tomadas de pressão classificadas como “corner tappings” (ISO5167-2, 2003). As tomadas de pressão se comunicam com câmaras piezométricas anelares usinadas nos flanges, que proporcionam medição de pressão junto às faces, a montante e a jusante da placa de orifício (Delmée, 2003) (Figura 1). O modelo de 100 mm apresenta diâmetro interno de 100 mm e orifício de 50 mm, enquanto o modelo de 150 mm apresenta diâmetro interno de 150 mm e orifício de 75 mm.

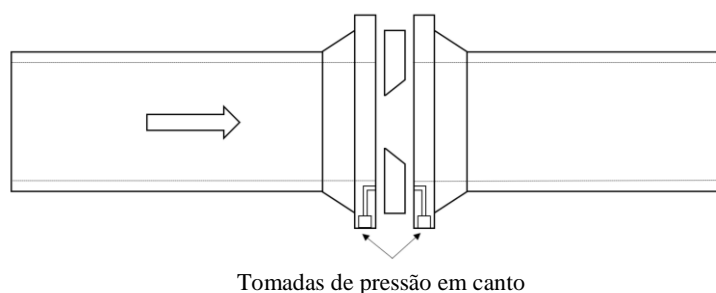


Figura 1. Placa de orifício com tomadas de pressão em canto (“corner tappings”)

A estrutura de ensaios caracteriza um circuito hidráulicamente fechado, no qual a vazão foi ajustada manualmente por válvula do tipo gaveta instalada à jusante dos instrumentos de medição de vazão. Os trechos retos foram maior que $18D$ a montante e maior que $10D$ a jusante das placas de orifício avaliadas (ISO5167-2, 2003). A vazão de referência foi determinada por medidor eletromagnético de vazão, com diâmetro nominal de 150 mm, configurado para a faixa

de medição de 5 a 150 m³ h⁻¹, caracterizando rangeabilidade de 30:1, típica desta categoria de instrumentos (AWWA, 2006). A pressão de ensaio e a temperatura da água foram monitoradas por transdutor de pressão e termoresistência PT100, respectivamente. A pressão diferencial provocada pelo fluxo através de cada modelo de placa de orifício foi monitorada por transdutor de pressão diferencial. As especificações dos instrumentos de medição são apresentadas na Tabela 1, sendo que todos eles apresentam sinal de resposta analógico de 4 a 20 mA que varia linearmente com a grandeza mensurada. A aquisição de dados de todos os instrumentos de medição foi realizada por um sistema eletrônico equipado com conversor analógico-digital de 16 bits para aquisição de sinais analógicos na faixa de 4 a 20 mA, com resolução de 625 nA. Para cada condição de ensaio foi coletada amostra de 100 registros de leituras dos sensores em intervalo de aquisição de 1 s.

A vazão através da placa de orifício foi incrementada até se atingir uma pressão diferencial próxima de 100 kPa, que corresponde ao fundo de escala do transdutor de pressão diferencial utilizado. Os ensaios foram conduzidos sob condições de vazão crescente e decrescente a fim de levar em conta eventuais efeitos de histerese dos instrumentos de medição.

Tabela 1. Especificações dos instrumentos de medição utilizados nos ensaios

Instrumento de medição	Fabricante/Modelo	Faixa de medição	Resolução	Incerteza de medição
Transdutor de pressão	Velki/VKP-011	0 a 400 kPa	0,1 kPa	0,25% F.E.
Transdutor de pressão diferencial	Pressgage/TR.DIF .03.1	0 a 100 kPa	0,1 kPa	0,25% F.E.
Termoresistência PT100	Velki/VKT-111	0 a 50 °C	0,1 °C	0,5 °C
Medidor eletromagnético de vazão	Khrone/Optiflux 2000	5 a 150 m ³ /h	0,1 m ³ /h	0,5% F.E.

Para placas de orifício na configuração “corner tapping”, o coeficiente de descarga pode ser estimado pela Equação de Reader-Harris/Gallagher (ISO5167-2, 2003):

$$C_d = 0,5961 + 0,0261 \beta^2 - 0,216 \beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{R_{eD}} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063 A) \beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{R_{eD}} \right)^{0,3} \quad (1)$$

$$A = \left(\frac{19000 \beta}{R_{eD}} \right)^{0,8} \quad (2)$$

Em que: D e d são os diâmetros característicos maior e menor da placa de orifício (m), respectivamente; C_d é o coeficiente de descarga (-); $\beta = d/D$; Re_D é o Número de Reynolds calculado na seção de diâmetro D (-). Pelo Teorema de Bernoulli, a vazão que escoava através de uma placa de orifício é obtida por:

$$Q = C_d \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 g \Delta h}{1 - \beta^4}} \quad (3)$$

Em que: g é a aceleração da gravidade ($=9,81 \text{ m s}^{-2}$); Δh é a carga diferencial de pressão obtida entre as tomadas de pressão instaladas à montante e à jusante da placa de orifício (m); Q é a vazão na canalização ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a placa de orifício com diâmetro nominal de 100 mm foram coletados dados nas vazões entre 15 e 65 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$, em incrementos de 5 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$, totalizando 1200 registros nesse conjunto de ensaios. O coeficiente de descarga correspondente a cada registro foi calculado pela equação de Reader-Harris/Gallagher (i.e., R-H/G), apresentando valor médio de 0,606. Como segunda aproximação, plotou-se um gráfico da vazão de referência em função da vazão teórica (Eq. 3), em que o coeficiente de descarga foi aproximado como o coeficiente angular da reta com intercepto igual a zero. Esta aproximação conduziu a um coeficiente de descarga de 0,616. Por fim, ajustou-se uma equação potencial de vazão em função de carga de pressão diferencial obtendo $Q=16,337 \Delta h^{0,611}$, em que a vazão é expressa em $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ e a carga de pressão diferencial em m.

O mesmo procedimento foi executado para a análise de dados da placa de orifício com diâmetro nominal de 150 mm, avaliada nas vazões entre 40 e 130 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$, em incrementos de 10 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$. O coeficiente de descarga obtido pela equação de R-H/G também foi de 0,606, enquanto que o valor obtido pelo coeficiente angular da reta foi de 0,613. A equação empírica obtida para todo o conjunto de dados foi $Q=37,903 \Delta h^{0,606}$.

A estimativa de C_d utilizando a equação de Reader-Harris/Gallagher é recomendada pela norma ISO 5167-2 (2003), havendo especificações em função das dimensões da placa de orifício, da posição das tomadas de pressão e do tipo de fluido. O uso dessa equação é

especialmente útil para fornecer uma aproximação de C_d em situações nas quais não se disponha de infra-estrutura para calibração de determinado modelo de placa de orifício. Uma vez que C_d praticamente não variou em função de Re_{ed} , não haveria dificuldades na definição do valor do coeficiente de descarga bem como a imprecisão na seleção do valor de C_d para a faixa de valores apresentada provocaria pouco impacto nas estimativas de vazão.

Limitando o erro em relação a valores medidos (V.M.) em 5%, a faixa de medição para a placa de orifício de 100 mm varia de 30 a 65 $m^3 h^{-1}$, utilizando as duas equações teóricas; e, de 20 a 65 $m^3 h^{-1}$ utilizando a equação empírica. De modo similar, a faixa de medição para a placa de orifício de 150 mm varia de 70 a 130 $m^3 h^{-1}$, utilizando as duas equações teóricas; e, de 50 a 130 $m^3 h^{-1}$ utilizando a equação empírica. A partir das faixas de medição recomendadas, recalculou-se os coeficientes de descarga e reajustou-se os coeficientes das equações para ambos os modelos de placa de orifício, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 2.

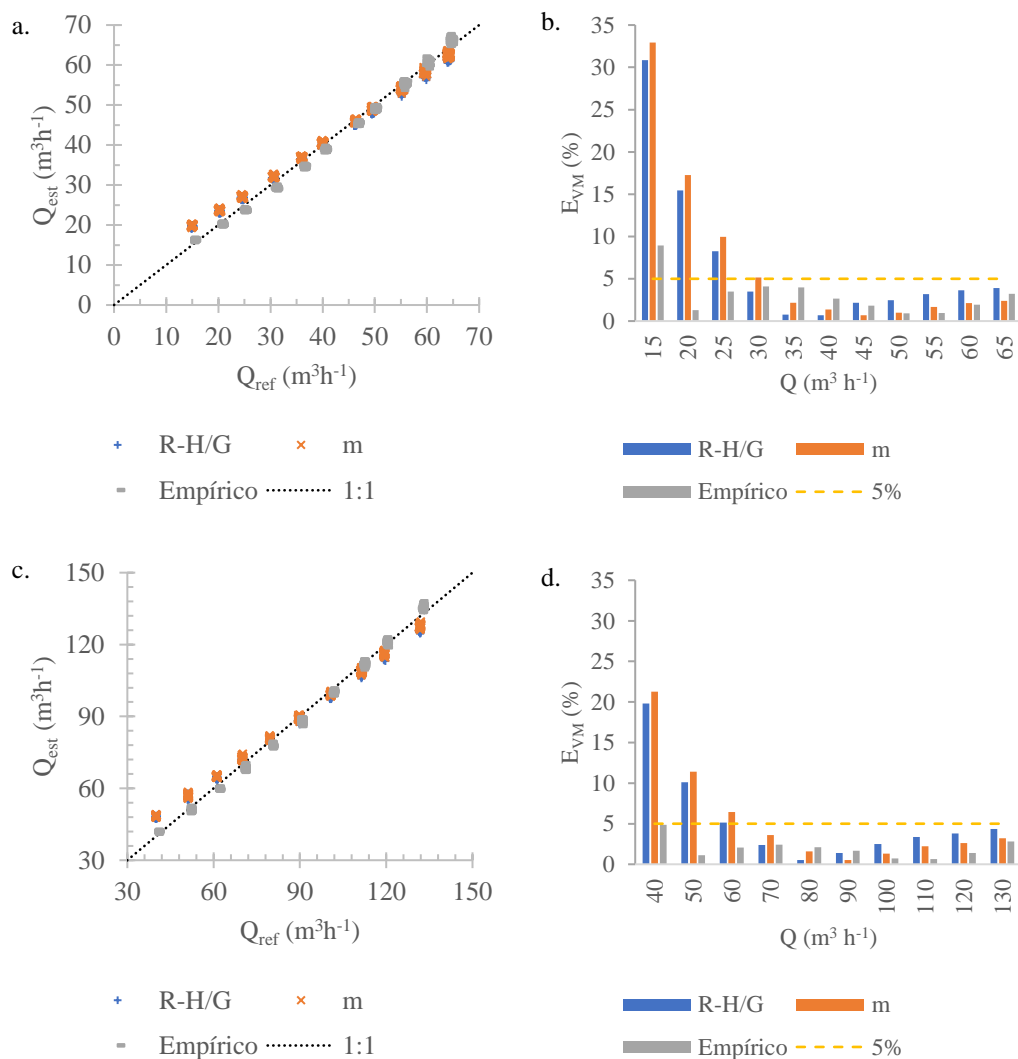


Figura 2. Valores de referência x valores estimados de vazão e erros em relação aos valores de referência (Erro V.M.) utilizando as duas equações teóricas e a equação empírica. (a) e (b): placa de orifício de 100 mm; (c) e (d): placa de orifício de 150 mm.

Observa-se que o coeficiente de descarga obtido pela equação de Reader-Harris/Gallagher é pouco influenciado pelo Número de Reynolds e se mantém praticamente constante em toda a faixa de medição avaliada, fato que permite o uso de um valor médio para as estimativas de vazão. A estimativa do C_d pela equação de Reader-Harris/Gallagher conduziu a erros inferiores aqueles obtidos pelo C_d estimado a partir do coeficiente angular da reta, sendo este, o procedimento mais típico. Para ambos os modelos de placa de orifício, a equação empírica proporcionou os menores erros de medição e também ampliação da faixa de medição, ou seja, maior rangeabilidade. De modo geral, placas de orifício apresentam erros em relação ao fundo de escala (Erro F.E.) de até 2% e rangeabilidade de até 4:1 (AWWA, 2006). Nas avaliações realizadas, somente a equação empírica conduziu a erros condizentes com a literatura, sendo que as equações teóricas proporcionaram erros de medição superiores àqueles relatados.

Tabela 2. Faixa de medição recomendada, características operacionais e estimativas de erro de medição para cada condição avaliada

Mod.	Equação	Faixa de medição / Rangeabilidade	C_d	Equação reduzida	Erro máximo V.M. (%)	Erro máximo F.E. (%)
100 mm	Teórica: R-H/G	30 a 65 m ³ h ⁻¹ / 2,17:1	0,606	$Q=19,591\Delta h^{0,5}$	4,0	3,9
	Teórica: coef. angular	30 a 65 m ³ h ⁻¹ / 2,17:1	0,623	$Q=20,146\Delta h^{0,5}$	6,3	3,0
	Empírica	20 a 65 m ³ h ⁻¹ / 3,25:1	---	$Q=17,206\Delta h^{0,582}$	4,2	1,7
150 mm	Teórica: R-H/G	70 a 130 m ³ h ⁻¹ / 1,86:1	0,605	$Q=44,044\Delta h^{0,5}$	4,4	4,5
	Teórica: coef. angular	70 a 130 m ³ h ⁻¹ / 1,86:1	0,622	$Q=45,255\Delta h^{0,5}$	5,1	2,8
	Empírica	40 a 130 m ³ h ⁻¹ / 3,25:1	---	$Q=37,903\Delta h^{0,606}$	4,9	2,8

CONCLUSÕES

A estimativa do coeficiente de descarga pela equação de Reader-Harris/Gallagher proporcionou menores erros de medição do que a aproximação utilizando um valor de coeficiente angular da reta e, portanto, recomenda-se o uso da equação de Reader-Harris/Gallagher. Entretanto, equações do tipo potência com coeficientes ajustados empiricamente proporcionaram os menores erros de medição e permitiram maior rangeabilidade. A placa de orifício de 100 mm operada nas vazões de 20 a 65 m³ h⁻¹ apresentou erro máximo de 1,7% F.E., enquanto o modelo de 150 mm proporcionou erro máximo de 2,8% F.E. na faixa de medição de 50 a 130 m³ h⁻¹.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWWA. Flowmeters in water supply - AWWM Manual M33 [Internet]. 2nd ed. Denver: American Water Works Association; 2006.

DELMÉE GJ. Manual de medição de vazão. 3 ed. São Paulo: Edgard Blucher; 2003.

GUTIÉRREZ LG. Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado. Madrid; 2012.

ISO5167-2. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full - Part 2: Orifice plates. 2003. p. 47.