

INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO NO COEFICIENTE DE DESCARGA EM ORIFÍCIOS

Haroldo Marcio Avelino Bezerra¹, Roberto Vieira Pordeus², Valéria Ingrith Almeida Lima³, Silvanete Severino da Silva⁴, José de Anchieta Lima⁵

¹Prof. Ms. Associado I do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia. Mossoró-RN, Brasil

²Prof. Dr. Adjunto III da Universidade Federal Rural do Semiárido, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Mossoró-RN, Brasil

³Graduanda em Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural do Semiárido, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Mossoró-RN, Brasil (valeria_ialima@hotmail.com)

⁴Graduanda em Bacharelado de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semiárido, Campus Angicos, Departamento de Ciências Ambientais, Mossoró-RN, Brasil

⁵Prof. Dr. Adjunto III do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia. Natal-RN, Brasil

Data de recebimento: 07/10/2011 - Data de aprovação: 14/11/2011

RESUMO

O coeficiente de descarga é um fator de ajuste utilizado nos instrumentos de medição de vazão tendo em vista que as medidas nesses instrumentos não retratam a vazão real escoada. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do cloreto de sódio no coeficiente de descarga em placa de orifício. Os ensaios foram realizados no laboratório de instrumentação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – IFRN. Foram estudadas oito soluções de diferentes concentrações com cinco repetições para cada vazão indicada no rotâmetro. Os coeficientes de descargas foram determinados pela relação entre a vazão teórica determinado por método analítico e a vazão real obtida através de instrumentos de medição – rotâmetro e hidrômetro. Estes coeficientes obtidos experimentalmente para cada solução foram comparados entre si como também com os obtidos para água destilada. Verificou-se que o coeficiente de descarga não apresentou variação considerável com a concentração de sódio, o valor máximo de variação do coeficiente de descarga tomando como parâmetro a água destilada foi de aproximadamente 4,20%. Em contradição à vazão, onde a variação foi considerável, tomando como referência a vazão mínima foi de 26,56 %.

PALAVRAS-CHAVE: placa de orifício, escoamento, coeficiente de descarga.

THE INFLUENCE OF SODIUM CHLORIDE CONCENTRATION ON THE DISCHARGE COEFFICIENT IN ORIFICES

ABSTRACT

The discharge coefficient is one the adjusting factors which presents wide application in fluid measurement process resulting from the fact that the orifice plate is a kind of equipment widely used for flow measurement. The aim of this study is to evaluate the

effects of the presence of sodium chloride on the discharge coefficient. The tests were carried out at the *Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia – IFRN*. Eight different solution concentrations were tested with five different repetitions for each flow indicated in the rotameter. The discharge coefficients were determined by the relation between the theoretical flow determined by analytical method and the real flow obtained by the use of measuring instruments – rotameter and water meter. These coefficients obtained through experiment for each solution were compared one to another as well as to the solutions obtained from distilled water. It was observed that the discharge coefficient did not present expressive variation with sodium concentration. However, the flow presented considerable variation. For the analyzed concentration, the maximum value for discharge coefficient variation using water as reference was of approximately 4,20% . In contradiction to the flow, where the variation was considerable, taking with reference the minimum flow was of 26,56%.

KEYWORDS: orifice plate, flow, discharge coefficient.

INTRODUÇÃO

O coeficiente de descarga é um dos fatores de ajuste com larga empregabilidade, aplicado em processos de quantificação de fluidos, sendo utilizados em diversas áreas, devido os fenômenos de quantificação do consumo de água serem encontrados em um vasto campo de atuação tais como: consumo humano e animal, indústria, irrigação, e combate a sinistros. Existem por partes das associações técnicas trabalhos de padronizações deste coeficiente de descarga, estes geralmente tomam por base equações empíricas obtidas a partir de uma base de dados e os coeficientes de descarga são expressos em função da relação entre o diâmetro do orifício e da tubulação, razão especificada pelo símbolo β , e do número de Reynolds.

Um dos medidores de vazão mais utilizados no cálculo do volume de água escoada em reservatórios tem sido a placa de orifício. Essa medição está fundamentada em equações teóricas, o valor obtido por estas equações diferem do valor real. De acordo com DELMÉE (2003), é necessário corrigir esse valor teórico, e esta correção tem sido feita através de um fator denominado de coeficiente de descarga.

O coeficiente de descarga representa um valor numérico que ao ser multiplicado pela vazão teórica obtém-se a vazão real. Nos manuais de hidráulicas este tema em geral tem sido tratado nas questões envolvendo vazões de reservatórios, canais, barragens, comportas e bueiros. Portanto, o estudo dos coeficientes de descargas deve partir das investigações sobre orifícios em parede de reservatório até chegar às placas de orifícios.

Para abordagem do coeficiente de descarga é necessário que, previamente, seja mencionado os orifícios, e mais especificamente o escoamento por orifícios, descarregadores, placa de orifício. Segundo NEVES, (1989) o coeficiente de descarga C_d é igual ao produto do coeficiente de velocidade C_v pelo coeficiente de contração C_c e pode ser obtido pela relação entre a vazão real e a vazão teórica. AZEVEDO NETO et al., (1998) comentam que este coeficiente depende da forma e das condições do orifício, da posição e situação em relação à superfície da água, segundo estes autores para borda delgada este coeficiente pode variar de 0,57 a 0,70; para borda aguda, o coeficiente de descarga vale 0,61 ou 0,62. Mas o valor

mais recomendado por esses autores para o coeficiente de descarga é igual 0,61. Para comportas com contração incompleta os autores recomendam valores de 0,65 a 0,70 e para adufas um valor ligeiramente superior a 0,70.

Diante do exposto este trabalho tem como objetivo estudar a influência da concentração do cloreto de sódio no coeficiente de descarga em orifícios.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no laboratório de instrumentação do Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia do Rio Grande do Norte IFRN, situado na Av. Sen. Salgado Filho, nº 1559, bairro Tirol, Natal-RN. O experimento foi realizado em uma bancada que dispõe dos seguintes equipamentos: um motor elétrico com potência nominal de 0,45 KW acoplado a uma bomba centrífuga com vazão mínima de 0,4 m³/h e máxima de 3 m³/h, altura manométrica máxima de 44 m e mínima de 8 m, este conjunto forneceu a energia necessária para o escoamento do fluido (água e NaCl); um registro de gaveta e um rotâmetro que possibilitaram controlar a vazão da solução testada nos valores especificados; uma placa de orifício com diâmetro maior 50 cm e menor de 14,58 cm; um hidrômetro em que foi computado o volume de fluido que escoava; um manômetro tipo U devidamente calibrado para medir a diferença de pressão em dois pontos localizados antes e após a placa de orifício; um flange para possibilitar a montagem da placa de orifício entre as tubulações por onde o fluido escoava e um reservatório com capacidade de 80 litros. O tempo de escoamento do fluido foi registrado em um cronômetro digital de precisão.

Neste estudo utilizou-se uma bancada de teste de circuito hidráulico fechado. A solução retorna para o mesmo depósito, para medir o volume escoado de acordo com método citado acima teríamos de efetuar alterações no esquema hidráulico para possibilitar a coleta do volume escoado, optou-se por conservar o esquema e utilizaram-se os medidores instalados na bancada, rotâmetro e hidrômetro, para medir a vazão escoada. Abaixo Figura ilustrativa da bancada de teste.

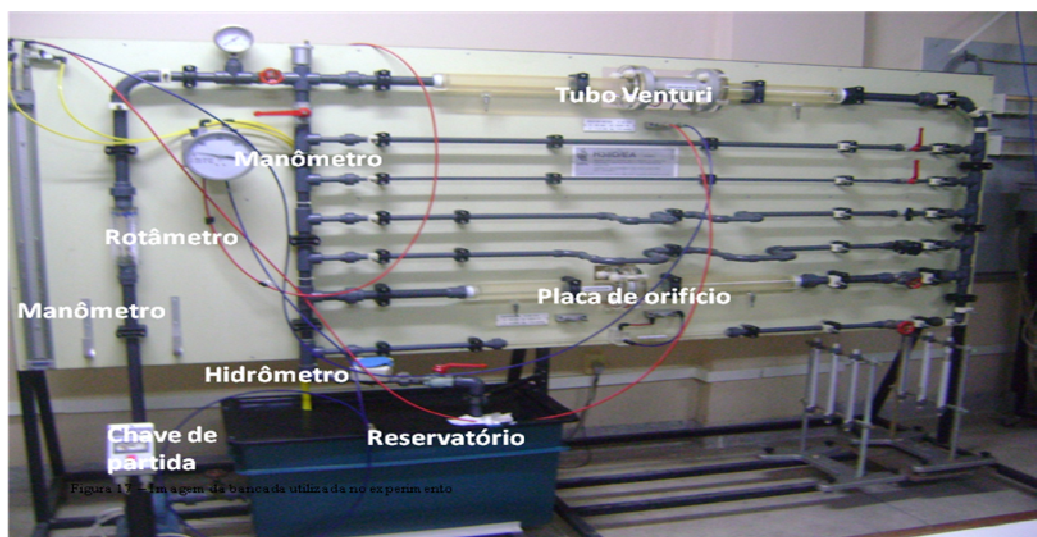


FIGURA 1. Bancada de teste de circuito hidráulico fechado do laboratório de instrumentação do IFRN/Natal. Fonte: Haroldo Marcio.

As soluções foram obtidas adicionando-se gradualmente cloreto de sódio a água destilada, definindo-se oito concentrações através de suas condutividades elétricas. Para medir as concentrações das soluções utilizou-se um condutivímetro

com as seguintes características: escala: 0 a 200 μS ; 0,2 a 2 mS; 2 a 20 mS; e 20 a 200 mS, precisão $\pm 1\% + 2$ dígitos, resolução: 0,1 μS ; 0,001 mS; e 0,01 mS, compensação de temperatura automático (0 a 50°C).

Tomado como referência a água destilada foram analisadas sete concentrações de cloreto de sódio dissolvido em água destilada, totalizando oito amostras com as seguintes concentrações: $C_0 = 9,72 \mu\text{S/cm}$, $C_1 = 187,4 \mu\text{S/cm}$, $C_2 = 870 \mu\text{S/cm}$, $C_3 = 1270 \mu\text{S/cm}$, $C_4 = 1791 \mu\text{S/cm}$, $C_5 = 2620 \mu\text{S/cm}$, $C_6 = 3310 \mu\text{S/cm}$, $C_7 = 4210 \mu\text{S/cm}$. Para cada concentração analisaram-se seis diferentes vazões medidas no rotâmetro, adotadas previamente como 0,5 m³/h; 0,7 m³/h; 0,9 m³/h; 1,1 m³/h; 1,3 m³/h; 1,5 m³/h. Analisaram-se cinco repetições para cada vazão indicada no rotâmetro, cronometrando o tempo de escoamento para um volume de 0.01 m³ previamente definido e medido no hidrômetro.

Na determinação das vazões teóricas, foram utilizadas as equações recomendadas por FOX, (2006) e FIALHO, (2007). A vazão real foi calculada pela média das vazões obtidas no rotâmetro e no hidrômetro da bancada de teste. No cálculo das vazões teóricas foi utilizada a média de cinco medidas de variação de pressão do fluido entre a entrada e saída da placa de orifício, para cada nível de concentração e vazão estudada. O coeficiente de descarga foi obtido determinando-se o coeficiente angular da reta do gráfico vazão real versus vazão teórica.

De acordo com as equações recomendadas por FOX (2006) e FIALHO (2007) para determinação da vazão teórica, se faz necessário determinar a densidade da solução. Para tal determinação se fez necessário a utilização de um picnômetro, com capacidade de 25 mL e massa de 27,873 g, para determinação do volume da solução, e uma balança digital de sensibilidade 0.001 g para determinação da massa da solução. Dividindo-se a massa obtida pelo volume ocupado pela solução obteve-se a densidade para as soluções analisadas (Quadro 1).

QUADRO 1. Densidade das soluções testadas para diferentes níveis de cloreto de sódio.

Solução ($\mu\text{S/cm}$)	Volume (mL)	Massa total (g)	Massa de água (g)	Densidade (g/ml)
9,72	25	53,027	5,154	1,006
187,4	25	53,084	25,211	1,008
870	25	53,090	25,217	1,009
1270	25	53,128	25,255	1,010
1971	25	53,131	25,258	1,010
2620	25	53,145	25,272	1,011
3310	25	53,156	25,283	1,011
4230	25	53,163	25,290	1,012

Os tempos de escoamento das vazões 0,5 m³/h; 0,7 m³/h; 0,9 m³/h; 1,1 m³/h; 1,3 m³/h; e 1,5 m³/h foram obtidos para um volume de 0,01 m³ após ajustar as referidas vazões no rotâmetro, iniciando-se tal procedimento a partir da menor vazão até a maior, repetindo-se o processo de forma inversa até completar dois ciclos e meio para todas as concentrações estudadas, sendo este determinado pela média de cinco leituras de cada vazão estudada. Estes ciclos alternativos foram realizados no intuito de computar o erro de histerese. Não foram utilizados os extremos da faixa de medição do rotâmetro 0,2 e 3,0 m³/h devido ocorrer nesta faixa maior erro de leitura.

A variação de pressão na placa de orifício para as concentrações estudadas foi determinada através de leituras no manômetro tipo U da bancada de teste, utilizando o mesmo procedimento mencionado no parágrafo anterior.

A vazão teórica foi determinada através das equações recomendadas por FOX, (2006) e FIALHO (2007). Estas equações expressam a vazão teórica em função da variação de pressão, da densidade e da razão entre o diâmetro do orifício e o da tubulação. A vazão real foi obtida pela média aritmética entre a vazão indicada no rotâmetro e a vazão medida no hidrômetro, expressa em unidade mássica.

A vazão volumétrica real média Q_{RVM} , em m^3/s , foi obtida pela média aritmética da vazão medida no rotâmetro Q_R , em m^3/h , e Q_H a vazão obtida pela leitura do volume medido no hidrômetro em m^3 e o tempo de escoamento em h.

$$Q_{RVM} = \frac{\left(\frac{Q_R}{3600}\right) + Q_H}{2} \quad \text{Equação (1)}$$

A vazão real mássica Q_{RM} , em kg/s, foi obtida pelo produto da vazão volumétrica real, em m^3/h , pela densidade ρ , expressa em kg/m^3 .

$$Q_{RM} = \frac{\left(\frac{Q_R}{3600}\right) + Q_H}{2} \cdot \rho \quad \text{Equação (2)}$$

O tempo médio de escoamento e a média da variação da pressão foram obtidos utilizando as seguintes equações:

$$t_{médio} = \frac{\sum_1^n t_i}{n} \quad \text{Equação (3)}$$

$$\Delta p_{médio} = \frac{\sum_1^n \Delta p_i}{n} \quad \text{Equação (4)}$$

em que: $t_i = t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ é o tempo medido no cronômetro para um volume de escoamento de $0,01 m^3$; $\Delta p_i = \Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3, \Delta p_4, \Delta p_5$ é a diferença de pressão; $t_{médio}$ o tempo médio, $\Delta p_{médio}$ a média da variação de pressão; n a quantidade de medidas efetuada.

A dispersão do tempo e da variação da pressão foi determinada pelas equações,

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum (t_i - t_{médio})^2}{n - 1}} \quad \text{Equação (5)}$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (\Delta p_i - \Delta p_{médio})^2}{n - 1}} \quad \text{Equação (6)}$$

em que σ é o desvio padrão.

A vazão mássica teórica foi obtida pelas equações recomendadas por FOX, (2006) e FIALHO (2007), na dedução destas equações foi utilizada a equação de Bernoulli e a equação da continuidade. No caso específico da equação de FIALHO, (2007) utilizou-se também a equação manométrica. Abaixo as equações:

$$Q_{tfox} = A_2 \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^4)}} \sqrt{\rho} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad \text{Equação (7)}$$

$$Q_{\text{fialho}} = A_2 \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)} \cdot \sqrt{\rho}. \quad \text{Equação (8)}$$

em que: O ρ_0 é a massa específica do fluido manométrico em kg m^{-3} ; o ρ é a massa específica da solução circulante na tubulação em kg m^{-3} ; o Δh é a altura manométrica em m; o g é a aceleração da gravidade $9,81 \text{ m s}^{-2}$; o A_2 é a área do orifício da placa em m^2 ; o d é o diâmetro do orifício em m. O valor da massa específica do fluido manométrico, no caso mercúrio, adotado foi de 13620 kg m^{-3} .

Na determinação da variação percentual do coeficiente de descarga $\Delta C_{\%dFOQm}$ de cada solução estudada foi tomado como referência a vazão mínima, sendo esta variação expressa por:

$$\Delta C_{\%Qm} = \frac{C_{dFOQs} - C_{dFOQm}}{C_{dFOQm}} \cdot 100\% \quad \text{Equação (9)}$$

em que: C_{dFOQC} é o coeficiente de descarga na vazão a ser comparada, C_{dFOQm} o coeficiente de descarga na vazão mínima, $\Delta C_{\%FOQm}$ variação percentual do coeficiente de descarga adotou-se como referência a vazão mínima.

E na variação percentual do coeficiente de descarga $\Delta C_{\%ad}$ de cada solução estudada adotou-se como referência água destilada, sendo esta variação expressa por:

$$\Delta C_{\%H_2O} = \frac{C_{dFOS} - C_{FOdad}}{C_{FOdad}} \cdot 100\% \quad \text{Equação (10)}$$

em que: C_{dFOS} é o coeficiente de descarga da solução a ser comparada; C_{dFOad} é o coeficiente de descarga da água destilada, $\Delta C_{\%FOad}$ variação percentual do coeficiente de descarga tomando com referência a água destilada.

O coeficiente de descarga foi gerado pela inclinação da reta do gráfico vazão teórica versus vazão real, e vazão teórica versus vazão média. As vazões reais foram determinadas por medições diretas num rotâmetro e num hidrômetro, enquanto as vazões teóricas foram calculadas, segundo as equações recomendadas por FOX (2006) e FIALHO (2007). O índice de correlação foi utilizado para indicar se a equação da curva definida estava bem ajustada aos pontos. A análise foi realizada comparando o valor do coeficiente de cada solução com o da água destilada e com valores recomendados pela literatura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A vazão é definida como a quantidade de fluido que passa pela seção reta de um duto, por unidade de tempo. Geralmente, a medição é feita aproveitando-se uma interação entre o fluido e o medidor, DELMÉE (2003). Um instrumento muito utilizado na medição de vazão são as placas de orifício. A vazão em orifício varia de acordo com o tipo de fluido, com a temperatura e a com a presença de solutos dissolvidos ou em suspensão no fluido. No entanto, os valores obtidos nesses instrumentos durante a medição de vazão não retratam o verdadeiro valor, necessitando de ajustes ou correções. Sendo isso possível através de um fator denominado coeficiente de descarga, podendo ser obtido através de equações analíticas ou de forma experimental.

O coeficiente de descarga representa um valor numérico que ao ser multiplicado pela vazão teórica obtém-se a vazão real. Neste trabalho avaliou-se a resposta do coeficiente de descarga e da vazão em função da variação da concentração de soluto, cloreto de sódio no fluido água.

Observa-se na Tabela 2 que para uma mesma vazão, medida no rotâmetro, a variação de pressão, e a vazão real e teórica sofrem pouca influência com o aumento da concentração de sódio. No entanto quando se varia a vazão no rotâmetro verificaram-se mudanças consideráveis tanto na variação de pressão, como nas vazões real e teórica, proporcionalmente a vazão medida no rotâmetro. Para uma vazão de $0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, ocorreu uma variação de pressão, de aproximadamente 11% entre a concentração máxima e mínima, e para a vazão de $0,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ocorreu uma variação de 3%, enquanto para a vazão de $1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, ocorreu uma variação de 1,7%, o que comprova que o crescimento da variação de pressão é reduzido com o aumento da vazão. Para a variação de vazão de $0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ para $1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, a variação de pressão foi de 487% para a menor concentração, $9,76 \mu\text{S cm}^{-1}$, enquanto para a máxima concentração, $4230 \mu\text{S cm}^{-1}$, esta variação foi de 437%, e para a concentração de $1791 \mu\text{S cm}^{-1}$, a variação ocorrida foi de aproximadamente 423%. Vê-se que ocorreu uma diferença de variação de pressão entre a máxima e a mínima concentração de 50%, verifica-se que com o aumento da concentração ocorreu também uma tendência de redução no crescimento da variação de pressão. Observa-se que a variação de pressão é influenciada pela solução do fluxo. Quando se analisa a vazão teórica com o crescimento da concentração de cloreto de sódio, observa-se que para a vazão de $0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ houve um crescimento desta vazão de 5,8%, enquanto, para a vazão de $0,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ este crescimento foi reduzido para 1,85%, já para a máxima vazão no rotâmetro, $1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, o crescimento da vazão teórica foi de 1,15%. Observa-se, portanto, que com o crescimento da vazão medida no rotâmetro, a diferença de vazão teórica entre a concentração máxima e mínima é reduzida em 4,65%.

Avaliando-se a variação da vazão teórica, entre a vazão máxima e mínima medida no rotâmetro, verifica-se que para a concentração correspondente a $\text{CE}=9,76 \mu\text{S cm}^{-1}$, o crescimento foi de 142,4%, enquanto que para a máxima, correspondente a $\text{CE} = 4230 \mu\text{S cm}^{-1}$ foi de 131,7%. Pode-se observar na Tabela 2 que o crescimento da vazão teórica com o aumento da concentração é reduzido com o crescimento da vazão no rotâmetro. De acordo com PORTO (2004), a queda de pressão em estreitamento é diretamente proporcional a velocidade ao quadrado, e de acordo com ALBUQUERQUE & THOMAZINI (2005) a vazão é diretamente proporcional a raiz quadrada da queda de pressão. Vê-se na Tabela 2 que o comportamento da vazão real com a concentração de cloreto de sódio, para a vazão de $0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ houve um crescimento de 5,0%, enquanto, para a vazão de $0,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ este crescimento foi reduzido para 1,3%, já para a máxima vazão medida no rotâmetro, $1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, o crescimento da vazão teórica foi de 5,3%. Neste caso, observou-se comportamento diferente ocorrido na variação de pressão e na vazão teórica, isto provavelmente deve-se a erro ocorrido durante a leitura no instrumento. Observa-se, portanto, que quando se considera a variação de vazão para uma mesma concentração verificou-se um aumento de 173,3% para a menor concentração, enquanto para a maior concentração, este aumento foi de 174%, já para a concentração equivalente a $\text{CE} = 1791 \mu\text{S cm}^{-1}$, o aumento foi de 171%. Isto demonstra uma pequena influência da concentração, quando se aumenta a vazão. Segundo MERTINS (1998) é muito comum que as condições reais sejam diferentes das condições de projeto. Este autor ressalta que a medição de vazão real depende

muito das condições de operação, e que para qualquer mudança destas é necessário, a rigor, que a vazão seja recalculada ou corrigida.

A Tabela 3 apresenta os resultados da avaliação da variação da vazão média e variação percentual do coeficiente de descarga ($\Delta C_{\%Q_m}$). Verificou-se que para uma vazão de $0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, ocorreu uma variação na vazão média, de 5% entre a concentração máxima e mínima, e para a vazão de $0,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ocorreu uma variação de aproximadamente 1,5%, enquanto para a máxima vazão ($1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), ocorreu uma variação de 5,3%, apresentando comportamento semelhante ao ocorrido para a menor vazão. Quando se estuda o comportamento da vazão média com o crescimento da vazão do rotâmetro, observa-se que para a variação de vazão de $0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ para $1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, a variação na vazão média foi de aproximadamente 174% para a menor concentração, $9,76 \mu\text{S cm}^{-1}$, enquanto para a máxima concentração, $4230 \mu\text{S cm}^{-1}$, esta variação foi de 174,5%, a mesma variação, de 175,8 %, ocorreu para a concentração de $1791 \mu\text{S cm}^{-1}$. Observa-se que a vazão média é pouco influenciada pela concentração de soluto, cloreto de sódio, enquanto a mesma é mais afetada com o aumento das vazões. Quando se analisa o coeficiente de descarga em função do crescimento da concentração de cloreto de sódio, observa-se que para a vazão de $0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ houve uma variação de 0,9%, enquanto, para a vazão de $0,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a variação foi de 0,6%, já para a máxima vazão no rotâmetro, $1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, o crescimento da vazão teórica foi de 4,0%. Quando se analisa a relação do coeficiente de descarga com o crescimento da vazão, verifica-se que a variação ocorrida entre a máxima e a mínima vazão foi de 12,7% para a menor concentração e de 18,2% para a máxima. Constata-se um comportamento do coeficiente de descarga com relação à concentração semelhante às variáveis estudadas anteriormente.

TABELA 2. Variação da pressão, e da vazão real e teórica* de acordo com a variação da vazão do rotâmetro para um volume constante de 0.01 m³ e diferentes concentrações de cloreto de sódio.

Vazão Rotâmetro (m ³ h ⁻¹)	CE = 9,76 µS cm ⁻¹			CE = 870 µS cm ⁻¹			CE = 1791 µS cm ⁻¹			CE = 4230 µS cm ⁻¹		
	ΔP _m (mmHg)	Q _{teórico} (kg h ⁻¹)	Q _{real} (kg h ⁻¹)	ΔP _{médio} (mmHg)	Q _{teórico} (kg h ⁻¹)	Q _{real} (kg h ⁻¹)	ΔP _{médio} (mmHg)	Q _{teórico} (kg h ⁻¹)	Q _{real} (kg h ⁻¹)	ΔP _{médio} (mmHg)	Q _{teórico} (kg h ⁻¹)	Q _{real} (kg h ⁻¹)
0,5	16,0	0,345	0,160	18,0	0,367	0,161	17,6	0,363	0,159	17,8	0,365	0,168
0,7	24,4	0,426	0,214	26,8	0,447	0,213	26,0	0,441	0,210	26,4	0,445	0,224
0,9	38,4	0,535	0,275	39,2	0,541	0,269	38,0	0,533	0,263	39,6	0,545	0,279
1,1	53,6	0,632	0,331	55,6	0,644	0,325	54,0	0,635	0,325	55,2	0,643	0,327
1.3	69,6	0,720	0,378	74,8	0,747	0,387	70,8	0,727	0,374	74,0	0,745	0,397
1,5	94,0	0,837	0,438	98,8	0,859	0,444	92,0	0,831	0,432	95,6	0,846	0,461

*Calculada de acordo com a equação recomendada por Fox, 2006.

TABELA 3. Variação da vazão média e coeficiente de descarga de acordo com a vazão do rotâmetro para um volume constante de 0,01 m³ e diferentes concentrações de cloreto de sódio.

Vazão Rotâmetro (m ³ h ⁻¹)	CE = 9,76 µS cm ⁻¹			CE = 870 µS cm ⁻¹			CE = 1791 µS cm ⁻¹			CE = 4230 µS cm ⁻¹		
	*Médias das Vazões (kg ³ s ⁻¹)	C _{dDM}	ΔC _{%Qm}	Médias das Vazões (kg ³ s ⁻¹)	C _{dDM}	ΔC _{%Qm}	Médias das Vazões (kg ³ s ⁻¹)	C _{dDM}	ΔC _{%Qm}	Médias das Vazões (kg ³ s ⁻¹)	C _{dDM}	ΔC _{%Qm}
0,5	0,160	0,465	-	0,161	0,439	-	0,159	0,440	-	0,168	0,461	-
0,7	0,214	0,503	8,17	0,213	0,477	8,67	0,210	0,478	8,64	0,224	0,503	6,38
0,9	0,275	0,515	10,75	0,270	0,499	13,67	0,266	0,499	13,41	0,279	0,512	11,85
1,1	0,331	0,524	12,67	0,325	0,504	14,81	0,325	0,512	16,36	0,327	0,508	14,12
1,3	0,378	0,525	12,90	0,388	0,519	18,22	0,374	0,514	16,82	0,397	0,533	17,08
1,5	0,438	0,524	12,67	0,444	0,517	17,77	0,432	0,520	18,19	0,461	0,545	18,45

*Vazão determinada pela média aritmética da vazão mássica calculada no rotâmetro e hidrômetro

Quando se analisa o coeficiente de descarga obtido pelo gráfico da vazão média real, determinado pela média da vazão medida no rotâmetro e a vazão obtida pela leitura do volume do hidrômetro e do tempo de escoamento no hidrômetro, versus vazão teórica, determinada pelas equações de FOX (2006) e FIALHO (2007), observa-se na Tabela 4 que os valores dos coeficientes de descarga obtidos pelas duas equações recomendadas por FOX (2006) e FIALHO (2007), variaram de 0,503 a 0,523, e apresentaram valores semelhantes para as condutividades elétricas estudadas, com valor crescente de acordo com a concentração de soluto, no caso presente, cloreto de sódio, esta semelhança no coeficiente de descarga pode ser comprovado pelos coeficientes de determinação, desta forma, diante dos dados verifica-se que o coeficiente de descarga pode ser obtido por qualquer das duas equações. Segundo NEVES (1981), o coeficiente de descarga varia no intervalo de 0,57 a 0,70; para o orifício de bordos agudo, afastando da superfície e das paredes e do fundo, o coeficiente de descarga vale 0,61 ou 0,62. De acordo com AZEVEDO NETO et al., (1998) para orifício circulares inseridos em paredes delgadas em função da carga H e das dimensões do orifício o intervalo de variação está compreendidos na seguinte faixa de 0,607 a 0,653.

TABELA 4. Variação do coeficiente de descarga em função da concentração de cloreto de sódio, medida pela condutividade elétrica. Mossoró-RN, 2010.

Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	Coeficiente de descarga ^{*1}	Coeficiente de determinação R^2	Coeficiente de descarga ^{*2}	Coeficiente de determinação ^{*2} R^2
9,72	0,518	0,991	0,516	0,991
870	0,504	0,983	0,503	0,983
1791	0,505	0,982	0,505	0,982
4230	0,523	0,980	0,523	0,980

¹ vazão teórica obtida pela equação recomendada por FOX (2006); ² vazão teórica obtida pela equação recomendada por FIALHO (2007); * Na confecção do gráfico foi imposta a restrição da curva cortar o eixos Q_t e Q_R no ponto (0,0).

Quando analisou-se a variação do coeficiente de descarga de acordo com a variação da concentração de sais, pode-se observar, na Tabela 5, que o coeficiente de descarga foi afetado e que para o caso do fluido água o máximo valor obtido foi de 0,523 para a água com condutividade elétrica de 4230 e o menor valor do coeficiente de descarga foi de 0,496 para a água com condutividade elétrica de 2620. Para as demais condutividades elétricas a água apresentou pequena variação no coeficiente de descarga, com valores aproximadamente iguais a 0,500. AZEVEDO NETO et al, (1998) na demonstração da fórmula da vazão para orifício de grande dimensões através do processo de integração considerou que o coeficientes de descarga é constante, verificou-se nesse trabalho, como os valores citados anteriormente, mesmo para concentrações diferentes, as variações sofridas não foram representativas, podendo considerar um valor médio constante dentro da faixa de variação.

Observa-se também que a massa específica varia com a concentração de sais, apresentando valores crescentes com o aumento da concentração.

Segundo VIANNA (2001) o valor da massa específica da água do mar varia de 1020 a 1030 kg m⁻³. De certa forma, pode-se afirmar que a variação do tempo de escoamento e a variação da queda de pressão influenciaram no coeficiente de descarga, e que, quanto a concentração de sais ocorreu pequena variação no coeficiente de descarga. Segundo os valores apresentados na tabela, pode-se considerar para o água coeficiente de descarga igual a 0,500. Segundo LENCASTRE (1983) o coeficiente de descarga varia com a carga hidráulica, e que o valor aproximado do coeficiente de descarga independe da forma do orifício e do líquido, recomendando um valor igual a 0,60, ressaltando que em situações extremas pode-se utilizar 0,63 e 0,59. Para o caso de carga muito baixa sugere o valor de 0,7. No entanto, quando se utilizou o mesmo líquido, no caso a água, com concentração de sais diferentes, observou-se pequena variação no coeficiente de descarga, podendo de certa forma, afirmar que o líquido influencia no coeficiente de descarga. Para DELMÉE (2003) o coeficiente de descarga para placa de orifício de canto reto tem valor em torno de 0,61. Este valor é superior ao encontrado neste experimento que foi em torno de 0,500.

TABELA 5. Relação entre condutividade elétrica e variação percentual do coeficiente de descarga tomado com parâmetro a água destilada.

Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	C_{dDS}	Variação Percentual
9,72	0,518	-
187,4	0,506	2,32
870	0,504	2,70
1270	0,500	3,74
1791	0,505	2,51
2620	0,496	4,20
3310	0,502	3,09
4230	0,523	-0,96

*Vazão real (média) e vazão teórica obtida pela equação recomendada por FOX (2006). Na confecção do gráfico foi imposta a seguinte restrição a curva cortar os eixos x e y no ponto (0,0).

Analisando a relação condutividade elétrica e variação percentual do coeficiente de descarga tomado com parâmetro a água destilada, verificou-se de acordo com o exposto na Tabela 6, que o coeficiente de descarga oscila entre os valores de 0,563 a 0,648. Estes valores se aproximam mais dos valores citados na literatura. Observa-se também que o valor do coeficiente de determinação R^2 nesta situação mostrou uma correlação maior entre a vazão real e teórica do que nos outros casos. No entanto as curvas obtidas não passa pela origem com deveria ocorrer conforme equação (11). O valor do coeficiente linear oscila entre os valores de -0,283 a - 0,865. Por outro lado a equação experimental apresentada por MILLER (1989), também não corta os eixos x e y na origem.

TABELA 6. Relação condutividade elétrica e variação percentual do coeficiente de descarga tomado com parâmetro a água destilada. Mossoró-RN, 2010.

Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	C_{dDS}^*	Variação Percentual
9,72	0,563	-
187,4	0,648	15,08
870	0,573	-1,78
1270	0,578	-2,67
1791	0,578	-2,67
2600	0,573	-1,78
3310	0,581	-1,80
4230	0,597	-3,44

*Vazão real (media) e vazão teórica obtida pela equação recomendada por FOX (2006). Na confecção do gráfico foi imposta a restrição a curva cortar os eixos x e y no ponto (0,0).

CONCLUSÃO

Tendo em vista os resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que: a metodologia adotada para a determinação do coeficiente de descarga mostrou-se, a grosso modo, satisfatória se tomamos como referência os valores médio de coeficientes indicado na literatura. O coeficiente de descarga sofre uma pequena influencia da concentração do soluto, e sendo mais afetado pela variação de vazão. Não há uma tendência do coeficiente de descarga aumentar em função da concentração de soluto. O valor do coeficiente de descarga independe da equação teórica utilizada, no entanto depende do método utilizado para medição da vazão real como também das restrições impostas na construção do gráfico.

Visando aprimorar o experimento e a metodologia utilizada na determinação de coeficiente de descarga, sugere-se para trabalhos futuros, que a solução seja obtida a partir de água de poços tubulares, para que os outros solutos sejam também considerados nas análises. Como também os intervalos de variações na condutividade devem ser menores, além de um estudo da influência da variação do diâmetro no coeficiente de descarga.

Os resultados obtidos e analisados foram estabelecidos tendo por base o ensaio realizado em bancada cujas dimensões são reduzidas, o que poderá condicionar a aplicabilidade desses resultados a situações reais de maiores dimensões.

Estes resultados, apesar de terem sido obtidos com base em ensaios efetuados numa instalação experimental de dimensões reduzidas, como anteriormente referidas, que influenciam o coeficiente de descarga a resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, P. U. B. de; THOMAZINI, D., **Sensores industriais: Fundamento e Aplicações**, São Paulo: Érica, 2005. p 220.

AZEVEDO NETO, J. M., Fernandez, M. F., ARAUJO, R., ITO, A. E., **Manual de Hidráulica**. 8 ed. São Paulo : Edgard Blucher, 1998. p.650.

DELMÉE, GÉRARD, J., **Manual de Medição de vazão**, 2. ed., São Paulo: 2003. p344.

FIALHO, A. B., **Instrumentação industrial: conceitos, aplicação e Análises**. 5. Ed. São Paulo: Érica, 2007.

FOX, R. W., MCDOLNARD, A. T., PRITCHARD, O. J; **Introduction of Fluid Mechanics**. 4. Ed . New lork : Jonn Wiley e Sons, 2006.

LENCASTRE, A. **Hidraulica Geral**. Gráfica Coimbr. 2 ed Lisboa: Edição Luso-Brasileira. 1983. 654p.

MARTINS. N., **Manual de vazão: através de placa de orifício, bocais e Venturi**. Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras, 1998. p.297.

MILLER, R.W., **Flow Measurement Engineering Handbook**, 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1989.

NEVES, C.F. **Curso de hidráulica geral**. Rio de Janeiro. Ed. Guanabara. 4. ed. 1981. 482 p.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica** 3 ed. São Carlos: EESC-USP. 2004.

VIANNA, M. R. **Mecânica dos fluidos para engenheiros**. 4 ed. Belo Horizonte: Imprimatur, 2001. 582p.