

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

A INFLUÊNCIA DOS COEFICIENTES DE DESCARGA DE ORIFÍCIOS AFOGADOS NO DIMENSIONAMENTO DOS FLOCULADORES DE BANDEJAS PERFURADAS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

*Lucas Vassalle de Castro¹
Marcos Rocha Vianna²
Camila de Oliveira Ribeiro³
Lara Silva Altair³

THE INFLUENCE OF SUBMERGED ORIFICE DISCHARGE
COEFFICIENTS IN PROJECT OF PERFORATED TRAY-
TYPE HYDRAULIC FLOCCULATOR IN WATER
TREATMENT PLANTS

Recibido el 26 de septiembre de 2016; Aceptado el 15 de febrero de 2018

Abstract

In this study, we tested submerged orifices with diameters ranging from 8 to 22 mm in the laboratory, in order to determine their discharge coefficients to work with flow rates corresponding to Reynolds numbers not exceeding 16000. Justifies the choice of these diameters due to the fact being diameters commonly found in water treatment plants. It diameters and conditions applicable to tray-type hydraulic flocculator, used in prefab water treatment plants designed to treat small flows. At the same time, with the objective of comparing the values verified in the laboratory with the values that occur in real situations, data were obtained from a water treatment plant with nominal capacity of 5.0 L / s located in the metropolitan area of Belo Horizonte - MG. The data obtained in the laboratory and in the water treatment plant were compiled and compared with the value indicated in the literature - usually indicates the value of 0.61 for the discharge coefficients - and in other studies. The obtained results show that the value 0.61 does not apply to this range of diameters when operating under the conditions tested.

Keywords: discharge coefficients, flocculator, orifices, water treatment plants.

¹ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

² Bloom Engenharia e consultoria, Brasil

³ Departamento de Hidráulica, Universidade Fundação Mineira de Educação e Cultura.

*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos, 6627/Escola de engenharia, Bloco 1, 4º andar – Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP.:31270-901. Brasil.

Email: lvassalle@hotmail.com

Resumen

Neste trabalho, foram ensaiados orifícios afogados, com diâmetros variando entre 8 e 22 mm em laboratório, com o objetivo de determinar seus coeficientes de descarga ao trabalharem com vazões correspondentes a números de Reynolds não superiores a 16000. Justifica a escolha destes diâmetros devido o fato de serem diâmetros comumente encontrados em estações de tratamento de água. Trata-se de diâmetros e condições aplicáveis a floculadores do tipo hidráulico, de bandejas perfuradas, utilizados em estações de tratamento de água pré-fabricadas, destinadas a tratar pequenas vazões. Concomitantemente, com o intuito de comparar os valores verificados em laboratório com valores ocorridos em situações reais, foram aferidos dados de uma estação de tratamento de água com capacidade nominal de 5,0 L/s situada na região metropolitana de Belo Horizonte - MG. Os dados aferidos foram compilados e foi realizado um confronto das informações obtidas tanto em laboratório quanto em campo, com a literatura - que normalmente indica o valor de 0.61 para os coeficientes de descarga – e com outros estudos. Os resultados obtidos mostram que o valor 0.61 não se aplica a essa faixa de diâmetros, quando operando nas condições ensaiadas.

Palavras chave: coeficiente de descarga, estação de tratamento de água, floculador, orifícios.

Introdução

Inúmeras são as aplicações dos orifícios em projetos hidráulicos, principalmente no que tange projetos de estações de tratamento de água (cortinas de distribuição de água em decantadores, aplicação de produtos químicos na mistura rápida, floculadores hidráulicos). Um orifício hidráulico é uma abertura com forma geométrica definida, projetada na parede ou fundo de um reservatório, canal ou conduto em pressão, onde o líquido em repouso ou em fluxo escoar devido a energia cinética que possui (Porto, 2006).

Muitos são os critérios que podem ser utilizados para a classificação dos orifícios, sendo eles a forma geométrica, as dimensões, a natureza da parede, a orientação do plano do orifício, o escoamento do líquido pelo orifício, entre outros. De acordo com a forma geométrica, os orifícios podem ser classificados em: circulares, retangulares, triangulares, etc. Quanto à condição de escoamento, os orifícios são classificados como orifícios com descarga livre, aqueles que não encontram resistência do líquido e escoam em queda livre, ou orifícios com descarga afogada/submersos, aqueles que encontram resistência da massa líquida (Almeida, 2016).

Quando classificados quanto à natureza da parede, os orifícios podem ser de parede delgada ou fina e de parede grossa ou espessa. Orifícios de parede delgada são aqueles em que o líquido toca o perímetro da abertura apenas em uma linha. Já o orifício de parede espessa o líquido se adere à parede. Os orifícios em parede delgada são obtidos em chapas finas ou pelo corte bisel (Azevedo Netto 2015). Para esse trabalho serão estudados os orifícios submersos, circulares e de parede delgada.

Como já mencionado, os orifícios, em sua maior parte submersos (afogados), estão presentes em várias unidades de uma estação de tratamento de água (ETA). Para concepção deste trabalho, preconizou-se o caso dos orifícios presentes nas bandejas de floculadores hidráulicos do tipo de bandejas perfuradas superpostas. Os floculadores supracitados foram inicialmente utilizados pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) em suas ETAs pré-fabricadas na década de 90 (Vianna,1984). Atualmente, diversos fabricantes desse tipo de produto o utilizam em suas unidades. Desde sua concepção original apresentada na Figura 1-a, poucas modificações foram introduzidas. O modelo apresentado na Figura 1-b tem sido utilizado com maior frequência para a composição das estações de tratamento de água atuais (Vianna, 2009).

Contudo, a verificação do desempenho hidráulico, específicas para esse tipo de floculador nunca foi realizada experimentalmente, não sendo possível avaliar sequer se os coeficientes de descarga adotados em seus projetos correspondem à realidade, apesar dos excelentes resultados práticos verificados.

Desta forma, observando a lacuna exposta pelo tema, este trabalho propôs fazer uma avaliação experimental dos coeficientes de descarga de orifícios afogados, aplicados ao dimensionamento de floculadores hidráulicos de bandejas sobrepostas. Para realizar a verificação dos coeficientes de descarga (C_d) desses floculadores, foi proposto experimento, para simular o funcionamento de um floculador hidráulico do tipo bandejas perfuradas, ao qual embasou-se na lei dos orifícios, para ser desenvolvido. A referida lei é expressa pela Equação 1 a seguir (Azevedo Netto,1998):

$$Q = C_d A \sqrt{2gh} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

Q: Vazão

C_d : Coeficiente de descarga

A: Área do orifício

g: Gravidade

h: Perda de Carga

Para o orifício padrão, que é o orifício de bordas finas, afastados da superfície da água, das paredes e do fundo, os valores 0.61 ou 0.62 são utilizados como coeficiente de descarga, sendo relatados por Neves (1977), Porto (2006) e Azevedo Netto (2015).

Para o cálculo dos floculadores de bandejas perfurados o valor 0.61 para o coeficiente de descarga (C_d), tem sido o adotado. Entretanto, nessas unidades a água escoava através dos orifícios com baixas velocidades e, portanto, com números de Reynolds inferiores aos ocorridos nas aplicações comuns.

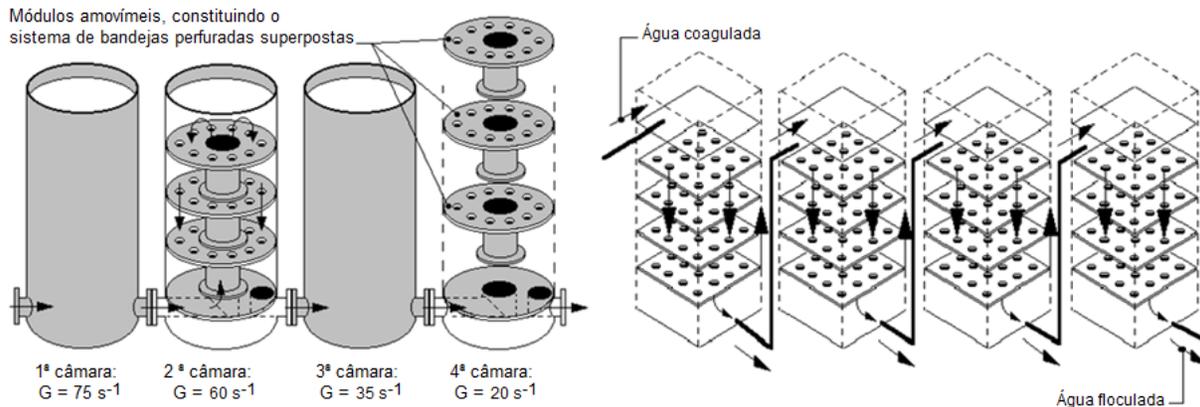


Figura 1. Floculador de bandejas perfuradas: (a) concepção original e (b) concepção atual (VIANNA, 2009).

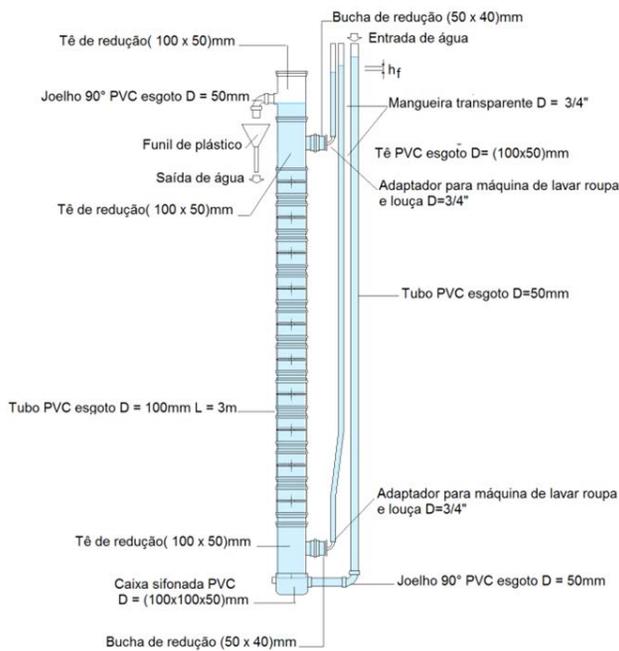
Di Bernardo e Giorgetti (1980) reportaram em estudo para coeficientes de descarga de orifícios valores entre 0.87 e 0.93. Entretanto os autores submetem esses orifícios a número de Reynolds entre 18000 e 35000, consideravelmente maiores que os que ocorrem em uma câmara de floculação. Para valores de número de Reynolds semelhantes aos que ocorrem em floculadores (abaixo de 16000) hidráulicos de bandeja, Almeida, 2016 apresentou valores entre 0.758 ± 0.019 , para os coeficientes de descargas dos orifícios submersos. Trabalhos que abordam especificamente a temática dos floculadores hidráulicos de bandeja perfurados, em especial a avaliação dos coeficientes de descarga são escassos. Tendo em vista a escassez de dados apresentados pela literatura em relação à avaliação dos coeficientes de descarga submetidos às condições hidráulicas em que operam os floculadores do tipo de bandejas perfuradas, decidiu-se avaliar tais coeficientes nestas condições, ou seja, com baixas velocidades médias e, conseqüentemente, com números de Reynolds inferiores aos ocorridos nas aplicações comuns. A avaliação foi realizada através de estudo experimental.

Os primeiros resultados experimentais obtidos em laboratório foram publicados por Vianna et al. 2015. No mesmo ano de 2015, Castro et al, publicou os primeiros resultados obtidos em campo, provenientes de medições efetuadas em uma estação de tratamento de água, com capacidade nominal de 5.0 L/s, atualmente em operação na região metropolitana de Belo Horizonte.

O objetivo deste trabalho foi confrontar dos os gerados em laboratório e por aferição em campo, com a literatura, avaliando, diretamente através da análise de projetos de ETAs existentes, qual a real influência dos coeficientes de descarga no dimensionamento dos floculadores de bandejas perfuradas em estações de tratamento de água, quando submetidos a números de Reynolds não superiores a 16000.

Metodologia

Para a realização do estudo experimental, desenvolveu-se a montagem hidráulica representada nas Figuras 2-a, 2-b, 3-a e 3-b. Tal estudo, conduzido no Laboratório de Sistemas Construtivos da Universidade FUMEC, simula os orifícios submersos de parede delgada existentes nas bandejas perforadas dos flocladores de diversas estações de tratamento de água utilizadas pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).



(a) Seção esquemática



b) Dispositivo Montado

Figura 2. Dispositivo utilizado nos ensaios.



(a) Orifício em bandeja



(b) Orifício dentro da tubulação

Figura 3. Dispositivo utilizado nos ensaios.

A montagem supracitada possui 10 bandejas perfuradas superpostas. Os diâmetros ensaiados foram gradualmente aumentados com o evoluir do estudo em questão. Foram avaliados diâmetros de 8, 10, 12, 13, 15, 18 e 22 milímetros.

Os ensaios foram realizados fazendo passar água através da montagem. Para cada vazão ensaiada foi determinada a perda de carga correspondente, medida através da leitura dos desníveis da água entre os piezômetros instalados a montante e a jusante das bandejas – ver Figura 2(a). As vazões foram determinadas volumetricamente, medindo o volume de água derivado para um recipiente medidor de volume durante 60 segundos.

De posse das perdas de carga aferidas no experimento, foi utilizada a Equação 2 para determinar o valor do coeficiente de descarga nos orifícios presentes nas bandejas ensaiadas. Observa-se que a Equação 2, apresentada a seguir, é um desenvolvimento da Equação 1.

$$C_d = \frac{Q}{A} \frac{1}{\sqrt{2gh}} = \frac{V}{\sqrt{2gh}} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

C_d : Coeficiente de descarga

Q: Vazão

A: Área do orifício

g: Gravidade

h: Perda de Carga

V: Velocidade

Além dos ensaios laboratoriais, foram aferidos os coeficientes de descarga dos orifícios existentes nos floculadores de bandejas perfuradas de uma estação de tratamento de água em operação, situada na região metropolitana de Belo Horizonte – MG -Brasil, com o intuito de comparar os dados coletados em laboratório com os dados de uma unidade semelhante de floculação em escala real.

A ETA estudada possui a capacidade nominal de tratamento de 5.0 L/s, ver Figura 4-a. Seu floculador, do tipo de bandejas perfuradas, possui quatro câmaras em série, ver Figura 4-b. Cada câmara contém cinco bandejas superpostas, com trinta e três orifícios cada uma. Os diâmetros dos orifícios dessas bandejas variam de uma câmara de floculação para outra. O cadastro dessas unidades indicou que na primeira câmara o diâmetro é igual a 25 mm, passando para 35 mm na segunda, 45 mm na terceira 50 mm na quarta câmara.

As vazões de operação nos momentos das medições foram de 7.8 L/s, 8.8 L/s e 10.3L/s. Instalou-se piezômetros entre as bandejas de cada câmara, Figura 5-a, para medir a perda de carga provocada pelos orifícios presentes nessas bandejas, Figura 5-b. De posse dos valores obtidos, utilizou-se a Equação 2 para calcular os coeficientes de descarga dos orifícios.



(a) Placa com informações da ETA



(b) Câmaras de floculação

Figura 4. Estação de Tratamento de Água estudada em escala real.



a) Piezômetros instalados



(b) Medição das perdas de carga

Figura 5. Medição das perdas de carga por orifício no floculador estudado.

Com conhecimento prévio dos dados obtidos em laboratório, e de posse dos dados obtidos na estação de tratamento de água, foi possível avaliar os coeficientes de descarga e compará-los com a literatura. Para fazer este tipo de comparação, aplicou-se os valores obtidos em laboratório e *in loco* em projetos de estações de tratamento de água pré-fabricada, que utilizaram o valor do C_d igual a 0.61 como recomendado na literatura. Desta forma pode-se avaliar qual a influência da utilização de diferentes coeficientes de descarga, no gradiente de velocidade das câmaras e nas perdas de carga nos orifícios.

Os projetos dos floculadores de bandejas perfuradas utilizados para comparação, foram dimensionados para as vazões de 2.0 m³/h, 5.0 m³/h e 10.0 m³/h e possuem orifícios variando de 8 a 15 mm, de acordo com as vazões introduzidas nas câmaras. A Figura 6,7 e 8 exemplificam os *layout* destes floculadores.

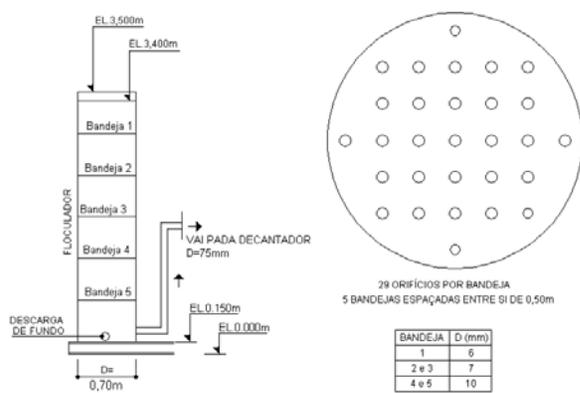


Figura 6 – Flocculador de 2m³/h

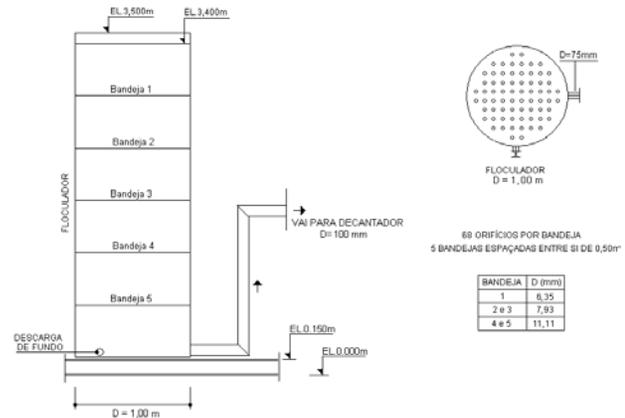


Figura 7 – Flocculador de 5m³/h

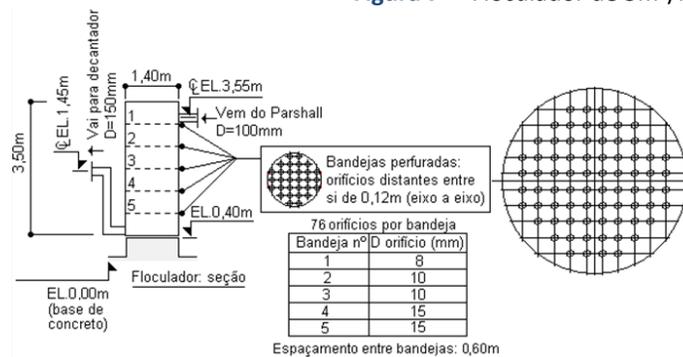


Figura 8. Flocculador de 10m³/h

Utilizou-se da Equação 3 para determinar o valor da perda de carga nos orifícios e da Equação 4 para verificar os gradientes de velocidade nas câmaras.

$$h_f = \left(\frac{Q}{C_d A} \right)^2 \frac{1}{2g}$$

Equação (3)

Onde:

H_f: Perda de Carga

Q: Vazão

C_d: Coeficiente de descarga

A: Área do orifício

g: Gravidade

$$G = \sqrt{\frac{gh}{vt}}$$

Equação (4)

Onde:

G: Gradiente de velocidade

g: Gravidade

h: Perda de Carga

v: Viscosidade cinemática

t: Tempo de detenção hidráulica

Resultados e discussão

Com relação às medições dos coeficientes de descarga, os resultados foram tabelados em função dos diâmetros ensaiados e dos números de Reynolds correspondentes. Buscou-se então ajustar a esses valores, com a intenção de minimizar o erro quadrático, uma expressão do tipo $C_d = a \cdot Re^b$, através da ferramenta *solver* do software Excel®.

Os resultados desse ajuste, bem como os valores obtidos para a e b , são apresentados na Tabela 1. Na Figura 12, que mostram aglutinadas todas as tendências verificadas para os valores de C_d em função do número de Reynolds para os diâmetros experimentados, inseriu-se uma linha vermelha representando o valor de C_d igual a 0.61, indicado pela literatura para coeficiente de descarga de orifícios padrão.

Observou-se que, tanto para o experimento laboratorial, quanto para os flocladores hidráulicos presentes na ETA estudada, o valor de 0.61 indicado pela literatura para o coeficiente de descarga diverge dos resultados obtidos. Entretanto, observa-se que os valores obtidos nessa pesquisa foram coerentes com os citados nos trabalhos de Almeida, 2016, que indicou valores para C_d de 0.758 ± 0.019 e Di Bernardo e Giorgetti, 1980 que reportaram valores entre 0.87 e 0.93. As Figuras 9, 10 e 11 mostram as tendências verificadas para os valores de C_d em função do número de Reynolds para os diâmetros experimentados.

Tabela 1. Coeficientes de descarga em orifícios submersos ajustados a equação $C_d = a \cdot Re^b$

Re	D (mm)											
	8	10	12	13	15	18	20	22	25	35	45	50
	Valores correspondentes à equação $C_d = a \cdot Re^b$											
	a =											
	0.475	0.342	0.380	0.133	0.193	0.331	0.224	0.551	0.368	0.112	0.334	0.074
	b =											
	0.059	0.089	0.072	0.203	0.160	0.103	0.147	0.034	0.096	0.206	0.082	0.242
1000	0.71	0.63	0.63	0.54	0.58	0.67	0.62	0.69	0.72	0.46	0.59	0.39
2000	0.74	0.67	0.66	0.62	0.65	0.72	0.68	0.71	0.76	0.53	0.62	0.46
3000	0.76	0.70	0.68	0.68	0.69	0.75	0.73	0.72	0.79	0.58	0.64	0.51
4000	0.78	0.71	0.69	0.72	0.73	0.78	0.76	0.73	0.82	0.62	0.66	0.55
5000	0.79	0.73	0.71	0.75	0.75	0.79	0.78	0.73	0.83	0.65	0.67	0.58
6000	0.79	0.74	0.71	0.78	0.77	0.81	0.80	0.74	0.85	0.67	0.68	0.61
7000	0.80	0.75	0.72	0.80	0.79	0.82	0.82	0.74	0.86	0.69	0.69	0.63
8000	0.81	0.76	0.73	0.82	0.81	0.83	0.84	0.74	0.87	0.71	0.70	0.65
9000	0.81	0.77	0.74	0.84	0.83	0.84	0.85	0.75	0.88	0.73	0.70	0.67
10000	0.82	0.77	0.74	0.86	0.84	0.85	0.87	0.75	0.89	0.75	0.71	0.69
11000	0.82	0.78	0.75	0.88	0.85	0.86	0.88	0.75	0.90	0.76	0.71	0.70
12000	0.83	0.79	0.75	0.90	0.87	0.87	0.89	0.76	0.91	0.77	0.72	0.72
13000	0.83	0.79	0.76	0.91	0.88	0.88	0.90	0.76	0.92	0.79	0.72	0.73
14000	0.84	0.80	0.76	0.92	0.89	0.88	0.91	0.76	0.92	0.80	0.73	0.74
15000	0.84	0.80	0.76	0.94	0.90	0.89	0.92	0.76	0.93	0.81	0.73	0.76
16000	0.84	0.81	0.77	0.95	0.91	0.89	0.93	0.76	0.93	0.82	0.74	0.77

Coefficiente de descarga x Nº de Reynolds

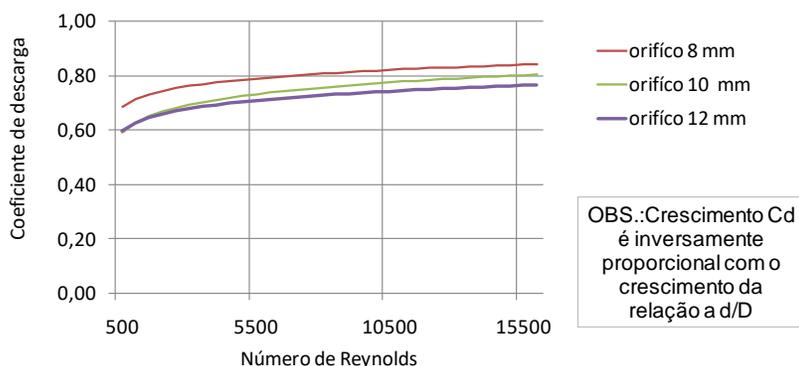


Figura 9. Resultados obtidos para o C_d em função de Re – 8 a 12 mm

Coefficiente de descarga x Nº de Reynolds

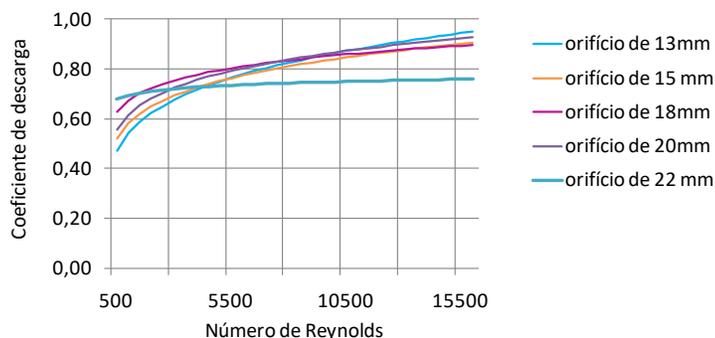


Figura 10. Resultados obtidos para o C_d em função de Re – 13 a 22 mm

Coefficiente de descarga x Nº de Reynolds

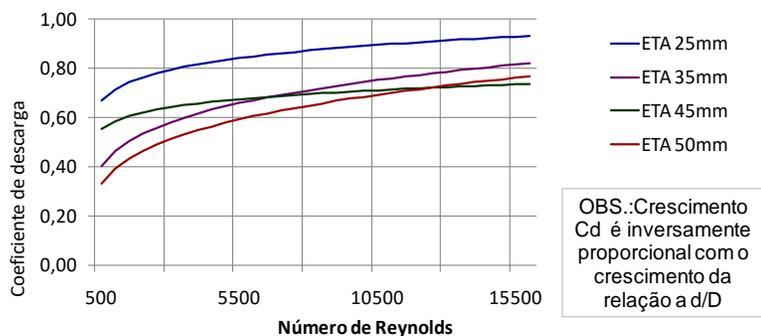


Figura 11. Resultados obtidos para o C_d em função de Re – ETA

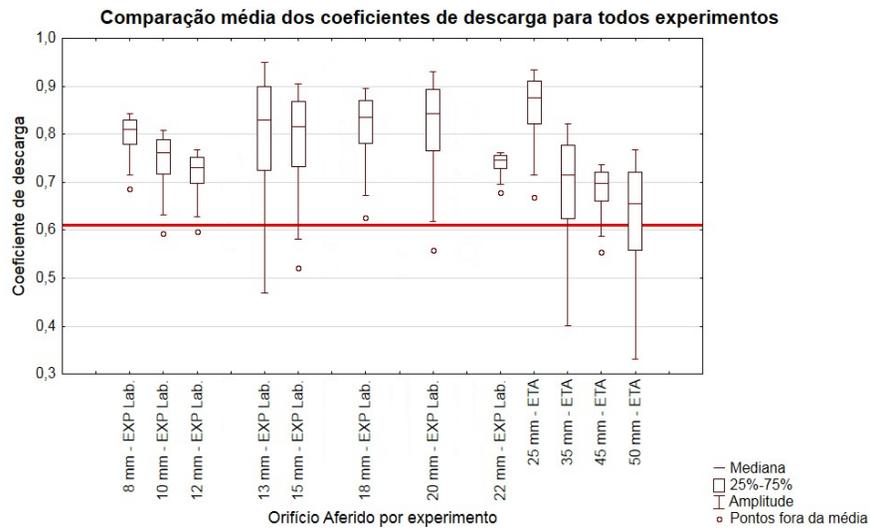


Figura 12. Resultados totais obtidos para o C_d em função de Re

Ao se comparar os resultados das perdas de carga e gradientes de velocidade dos flocladores de bandeja perfurada, percebe-se que quando utilizado C_d indicado pela literatura (0.61) e normalmente utilizado para projetos, o gradiente de velocidade é inferior ao calculado utilizando os coeficientes de descarga aferidos em laboratório e/ou campo, ou seja, pode-se perceber que quanto maior o coeficiente de descarga menor o gradiente de velocidade. A Tabela 2 mostra o comparativo do cálculo utilizando as recomendações da literatura (0.61) e o aferido em campo.

Tabela 2. Coeficientes de descarga em orifícios submersos, comparativo com a literatura

Vazão (m ³ /h)	Vazão (m ³ /s)	Diâmetro do orifício (mm)	Coeficiente de descarga (Cd)	Perda de carga por orifício	Gradiente de Velocidade L/s
2	0.00056	6	0.61	0.06389	43
		7		0.03449	31
		10		0.00828	15
		6	0.90	0.02935	29
		7	0.80	0.02005	24
		10	0.75	0.00548	13
5	0.00139	6.35	0.61	0.05698	44
		7.93		0.02343	29
		11.11		0.00608	15
		6.35	0.80	0.03313	34
		7.93	0.76	0.01509	23
		11.11	0.72	0.00436	12
10	0.00278	8	0.61	0.07242	46
		10		0.02966	30
		15		0.00586	13
		8	0.80	0.04211	35
		10	0.75	0.01962	24
		15	0.79	0.00349	10

Observa-se ao analisar a Tabela 2 que, para um mesmo diâmetro, quando se utiliza o coeficiente de descarga recomendado pela literatura (0.61), têm-se um valor do gradiente de velocidade mais elevado, o que não ocorre na prática. Os experimentos mostraram que dentro das estações de tratamento de água, os coeficientes de descargas são maiores que os indicados pela literatura. Desta forma têm-se os gradientes de velocidades menores dentro das câmaras

Conclusões

Embasado nos dados obtidos nesse trabalho e confrontando-os com outros estudos sobre coeficiente de descarga em orifícios submersos de parede delgada, pode-se concluir que a utilização do valor 0.61, normalmente indicado nos livros, para o coeficiente de descarga – C_d – não é adequada para o dimensionamento de flocladores hidráulicos de bandejas perfuradas de estações de tratamento de água, quando se destinam a unidades de pequena capacidade de tratamento. Seu valor varia muito, especialmente para pequenos orifícios com baixas velocidades médias e baixos números de Reynolds. A utilização inadequada do valor de C_d acarreta não apenas a obtenção do valor incorreto para a perda de carga h , mas também o valor inapropriado do gradiente de velocidade G , do que poderá resultar a floclação deficiente.

Recomendações

Recomenda-se a determinação da variação de C_d para diâmetros maiores, utilizados em flocladores de ETAs de maior porte. Recomenda-se também estender o estudo para orifícios de diferentes geometrias, utilizados em outros tipos de flocladores hidráulicos, além de fazer mais experimentos para aferir os coeficientes reais presentes nas estações de tratamento de água da COPASA com o intuito de compará-los com os dados obtidos em laboratório.

Agradecimentos

Os autores agradecem os apoios logísticos e financeiros prestados pela FAPEMIG. Agradecem também à COPASA, de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, pelo suporte dado para realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Almeida, A.S.O. (2016) *Modelagem Hidráulica de Floclador de Placas de Orifícios*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza.
- Azevedo Netto, J.M. (1998) *Manual de Hidráulica*, Edgard Blucher, São Paulo, 63-100 pp
- Azevedo Netto, J.M. (2015) *Manual de Hidráulica*, Edgard Blucher, São Paulo, 130-150 pp.

- Castro, L.V de., Vianna, M.R., Ribeiro, C.O. (2015) Orifícios dos flocladores de bandejas perfuradas de estações de tratamento de água: determinação dos coeficientes de descarga. *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Brasília, Brasil.
- Di Bernardo, L., Giorgetti, M.F.(1980) The use of perforated baffles at the inlet of settling basis. *Journal of the American Water Works Association*, **72**(9), 528-553.
- Porto, R. de M. (2006) Hidráulica Básica. 4° ed. In *EESC-USP São Carlos*, 25-100.
- Vianna, M.R. (2009) *Hidráulica para engenheiros sanitaristas e ambientais*: FUMEC, Belo Horizonte, 545pp.
- Vianna, M.R. (1984). Estações padrão de tratamento de água: evolução dos projetos da COPASA MG. *XIX Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária*, Santiago, Chile.
- Vianna, M.R., Castro, L.V. de. (2014). Estudo hidráulico dos orifícios dos flocladores de bandejas perfuradas superpostas de estações de tratamento de água. *Construindo*, **6**(2), 39-41.
- Vianna, M.R., Castro, L.V. de, Ribeiro, C.O. (2015). Perforated tray-type hydraulic flocculator for potable water treatment: Concept and state of the art in Brazil. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, **5**(3), 5-7.