

I-293 - COMPARAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DESCARGA DE ORIFÍCIOS DE PAREDE DELGADA, DE SEÇÃO CIRCULAR E AFOGADOS EM FLOCULADORES DE BANDEJAS PERFURADAS ATRAVÉS DE METODOLOGIAS DISTINTAS

Lucas Vassalle de Castro⁽¹⁾

Engenheiro ambiental. Doutorando em Engenharia Sanitária, Ambiental e Recursos Hídricos pela UFMG. Mestre em Engenharia Sanitária, Ambiental e Recursos Hídricos pela UFMG. Especialista em engenharia sanitária pela Universidade FUMEC, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Camila de Oliveira Ribeiro⁽²⁾

Engenheira Civil e Ambiental pela Universidade FUMEC, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Lara Silva Altair⁽³⁾

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade FUMEC, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Juliana Ribeiro Ferreira⁽⁴⁾

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade FUMEC, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Marcos Rocha Vianna⁽⁵⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da UFMG. Professor (aposentado) da Universidade Federal de Minas Gerais.

Endereço⁽¹⁾: Rua Cônego Rocha Franco, 235 - Gutierrez - Belo Horizonte - MG - CEP: 30441-045 - Brasil - Tel: (31) 99187-5731 - e-mail: lvassalle@hotmail.com

RESUMO

Neste trabalho, foram comparadas metodologias de ensaios para aferição dos coeficientes de descarga de orifícios afogados, com diâmetros variando entre 8 a 50 mm em três diferentes experimentos. O primeiro em escala piloto montado em laboratório, o segundo em uma estação de tratamento de água em escala real e por fim o terceiro em canal de alvenaria com placas de orifício de aço. Os experimentos foram realizados 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. Foram compilados os dados aferidos nas medições e realizou-se um confronto das informações obtidas para os três cenários, com a literatura. Os resultados obtidos mostram que o valor 0,61 – normalmente adotado para o coeficiente de descarga de orifícios - não se aplica a essa faixa de diâmetros, quando operando nas condições ensaiadas.

PALAVRAS-CHAVE: Coeficiente de descarga, Estação de tratamento de água, Floculadores Hidráulicos e Orifícios Afogados .

INTRODUÇÃO

Orifícios afogados estão presentes nas estações de tratamento de água (ETA's), em praticamente todas as suas unidades: floculadores, decantadores e filtros. São utilizados, entre outros locais, nas passagens que interligam os compartimentos responsáveis pela mistura lenta nos floculadores hidráulicos. Seu dimensionamento é feito a partir de parâmetros estabelecidos na literatura. Tem sido observado que os coeficientes de descarga sugeridos pela literatura técnica muitas vezes não se aplicam ao que de fato ocorre nas unidades citadas, ocasionando uma discrepância entre os valores adotados pela literatura e os valores que ocorrem de fato nas unidades de tratamento. Isto porque as velocidades médias de escoamento da água através desses orifícios são pequenas, quando comparadas com as velocidades ocorridas nas situações práticas contempladas pela literatura.

É importante destacar que uma nova concepção para os floculadores hidráulicos, nomeada de floculadores de bandejas perfuradas, foi concebida no início da década de 1980 (VIANNA 1984), e tem sido utilizada em todo

o país sem levar em conta essas discrepâncias. Essa primeira concepção serviu de base para que muitos fabricantes de estações pré-fabricadas projetassem e fabricassem seus produtos. Recentemente, a concepção original foi alterada, fazendo com que novos fabricantes a utilizassem em suas ETA's pré-fabricadas, os floculadores de bandejas estão apresentados na Figura 1-a e b.

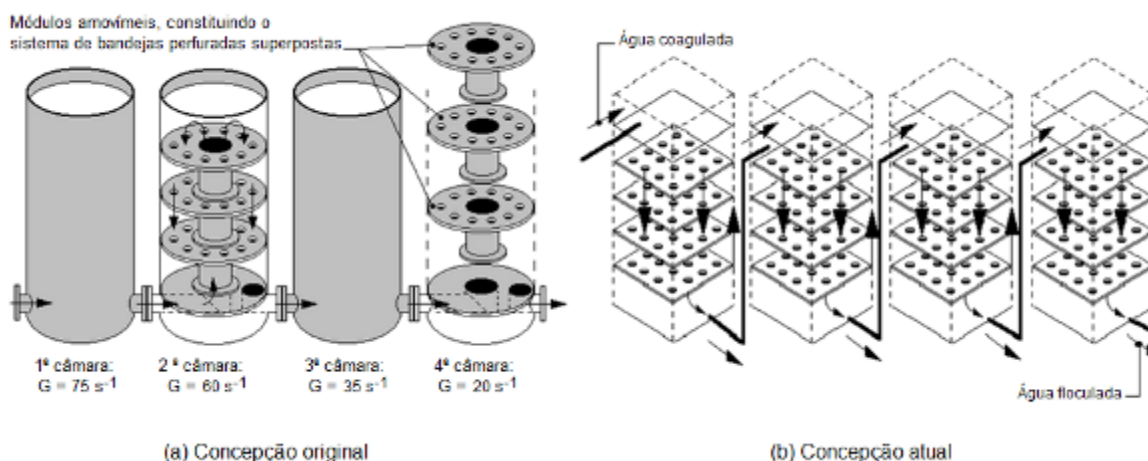


Figura 1 – Floculador de bandejas perfuradas: (a) concepção original e (b) atual (VIANNA, 2009).

O estudo hidráulico dos orifícios afogados que trabalham com baixas velocidades médias surge, portanto, como importante trabalho experimental para que o projeto e a operação das ETA's possam ser feitos com correção. Este estudo hidráulico foi iniciado no Laboratório de Ensaios de Sistemas Construtivos (LESC) da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC. Os primeiros resultados obtidos mostraram que o coeficiente 0,61, não se aplica a orifícios afogados, quando submetidos a velocidades abaixo de 0,60m/s (CASTRO *et. al.*, 2015).

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, consequentemente, com números de Reynolds inferiores (VIANNA *et al.*, 2014).

OBJETIVO

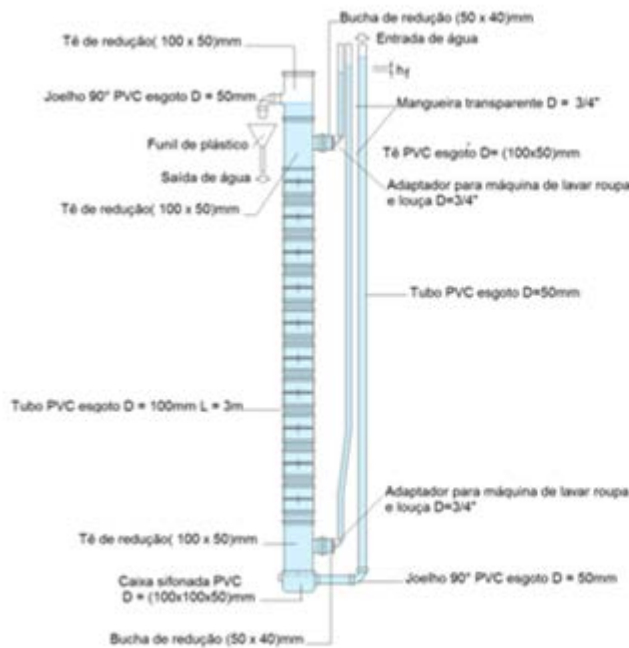
Este trabalho tem como objetivo comparar diferentes metodologias para verificação dos coeficientes de descarga em orifícios de parede delgada, de seção circular e afogados quando submetidos à velocidades iguais ou inferiores à 0,60 m/s. Além disto é objetivo também deste trabalho, comparar os valores aferidos com os valores recomendado pela literatura de 0,61.

METODOLOGIA UTILIZADA

Para aferir os valores dos coeficientes de descarga (C_d) em orifícios afogados, utilizou três formas de aferição distintas, que serão descritas posteriormente. Para as três, os valores de C_d foram calculados com base na lei dos orifícios, expressa pela Equação 1 a seguir (AZEVEDO NETTO, 1998):

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

Para realizar uma das formas de aferição dos C_d , desenvolveu-se a montagem hidráulica representada nas Figuras 2-a e 2-b. Tal estudo simula os orifícios submersos de parede delgada existentes nas bandejas perfuradas dos floculadores de diversas estações de tratamento de água.



(a)- Seção esquemática



(b)- Dispositivo montado

Figura 2 – 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 6, 8, 10, 12, 13, 15, 18 e 22 milímetros. Os ensaios foram realizados fazendo-se passar água através da montagem. Para cada vazão ensaiada determinou-se 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-se o volume de água derivado para um recipiente medidor de volume durante 60 segundos.

De posse das perdas de carga aferidas no experimento, utilizou-se da 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.

$$C_d = \frac{Q}{A} \cdot \frac{l}{\sqrt{2gh}} = \frac{U}{\sqrt{2gh}} \quad (2)$$

A segunda forma de aferição dos coeficientes de descarga foi a verificação em escala real. 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, com o intuito de comparar os dados coletados em laboratório com os dados de uma unidade semelhante de floculação em escala real (CASTRO *et al*, 2015).

A ETA estudada possui a capacidade nominal de tratamento de 5,0 L/s, ver figura 3-a. Seu floculador, do tipo de bandejas perfuradas, possui quatro câmaras em série, ver figura 3-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.



(a) Capacidade nominal de tratamento da ETA



(b) câmaras que compõem a ETA

Figura 3 – Estação de Tratamento de Água estudada em escala real.

As vazões de operação nos momentos das medições foram de 7,8 L/s, 8,8 L /s e 10,3 L l/s. Instalou-se piezômetros entre as bandejas de cada câmara, figura 4-a, para medir a perda de carga provocada pelos orifícios presentes nessas bandejas, figura 4-b. De posse dos valores obtidos, utilizou-se a equação 2 para calcular os coeficientes de descarga dos orifícios.



(a) Piezômetros instalados na ETA estudada



(b) Medição entre as badejas perfuradas

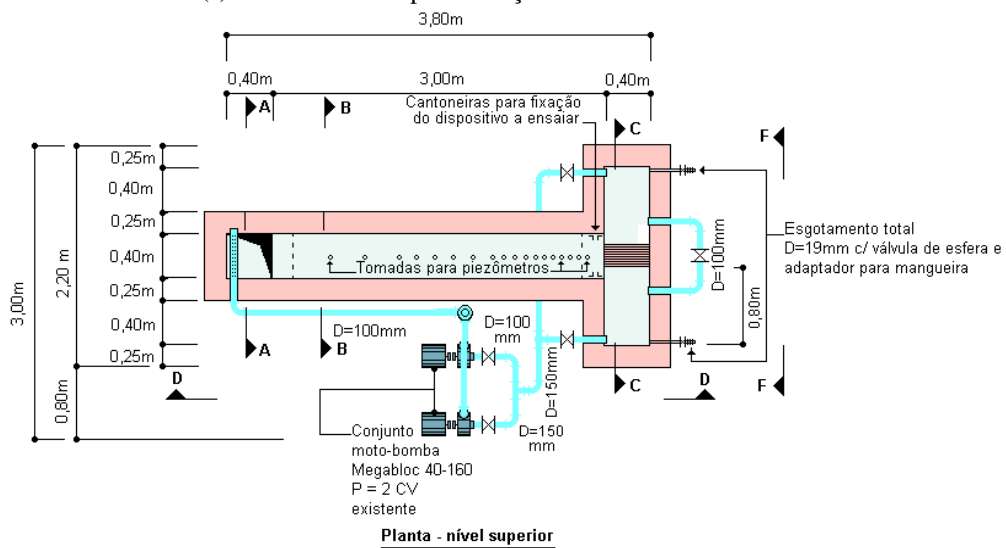
Figura 4 – Medição das perdas de carga por orifício no floculador estudado.

A terceira forma de aferição dos coeficientes de descarga foi a verificação em canal de alvenaria, montado no LESC. Esta etapa está ainda em desenvolvimento. Foram aferidos os coeficientes de descarga dos orifícios feitos em placas metálicas instaladas ao longo do canal. Para medição da vazão utilizou-se de medidor eletromagnético, instalado antes da entrada de água no canal. As Figuras 5-a, 5-b, 5-c e 5-d mostram as placas utilizadas, o projeto com esquema de interligação do canal de alvenaria, o canal utilizado para o experimento e o medidor instalado, respectivamente. Instalaram-se piezômetros entre as chapas metálicas ao longo do canal, para medir a perda de carga provocada pelos orifícios. De posse dos valores obtidos, utilizou-se a equação 2 para calcular os coeficientes de descarga.

Posterior a essa aferição dos coeficientes de descarga foi possível avaliar e comparar as metodologias de medição, com a literatura, gerando um universo de dados confiáveis para tecer algumas conclusões sobre a influência da utilização do 0,61 como coeficiente de descarga nas unidades de floculadores de bandejas perfuradas.



(a) Placa utilizada para aferição dos C_d em canal de alvenaria



(b) – Esquema de interligação do canal de alvenaria



(c) – Canal de alvenaria utilizado nos experimentos



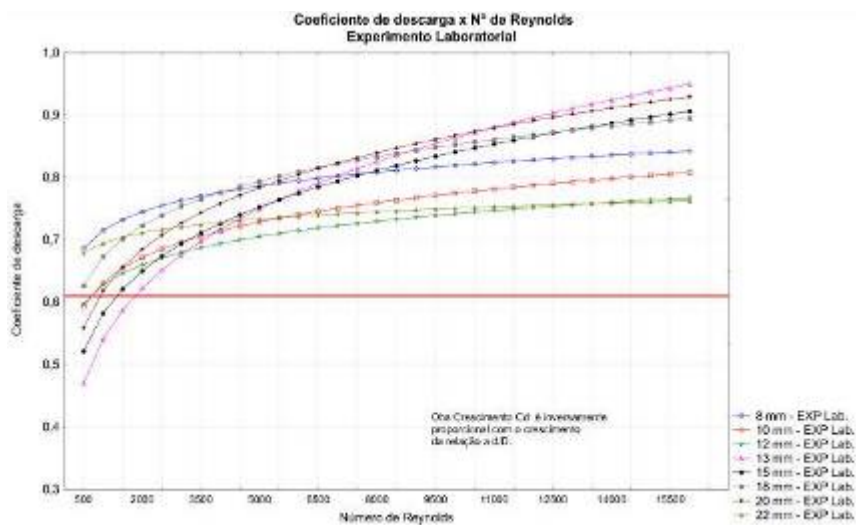
(d) – Medidor eletromagnético instalado no canal de alvenaria

Figura 5 – Layout do experimento utilizado no estudo.

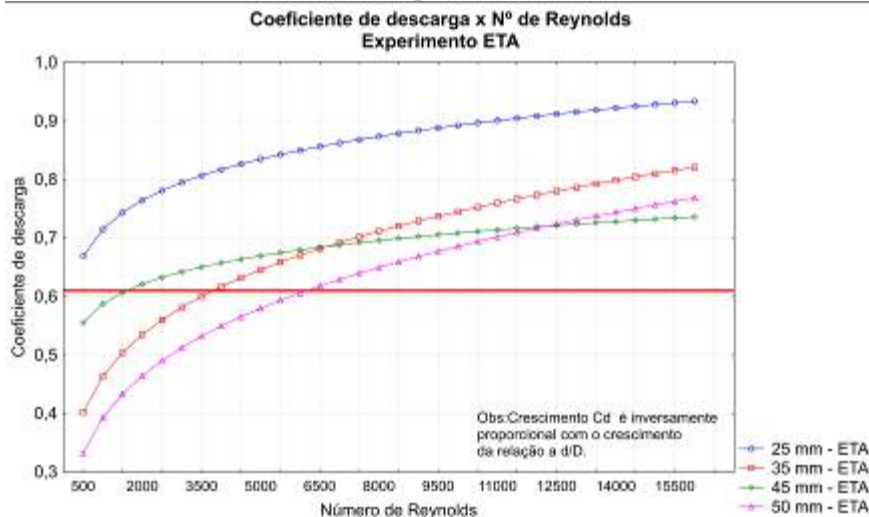
RESULTADOS OBTIDOS

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® e do programa Statística 10.0. Os resultados desse ajuste, bem como os valores obtidos para a e b , são apresentados na Tabela 1. Na figura 6d, 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.

Observou-se que para o experimento laboratorial, para os flocladores hidráulicos presentes na ETA estudada e para o canal de alvenaria, o valor de 0,61 indicado pela literatura para o coeficiente de descarga diverge dos resultados obtidos. Em análise às condições em que foram feitos os ensaios, pode-se evidenciar que o coeficiente de descarga no valor de 0,61, indicado na literatura, não se aplica às situações em que as velocidades médias e o número de Reynolds são baixos (menores que 16000). As Figuras 6-a.6-b e 6-c, mostram as tendências verificadas para os valores de C_d em função do número de Reynolds para cada uma das fases desse trabalho, apresentando os diâmetros experimentados. Observa-se que todos os gráficos apresentam tendências parecidas, afirmando o fato de que o valor de 0,61 não é aplicável para os orifícios afogados de parede delgada. É importante ressaltar que a quantidade de dados gerados é contundente e aumenta a confiabilidade dos testes.

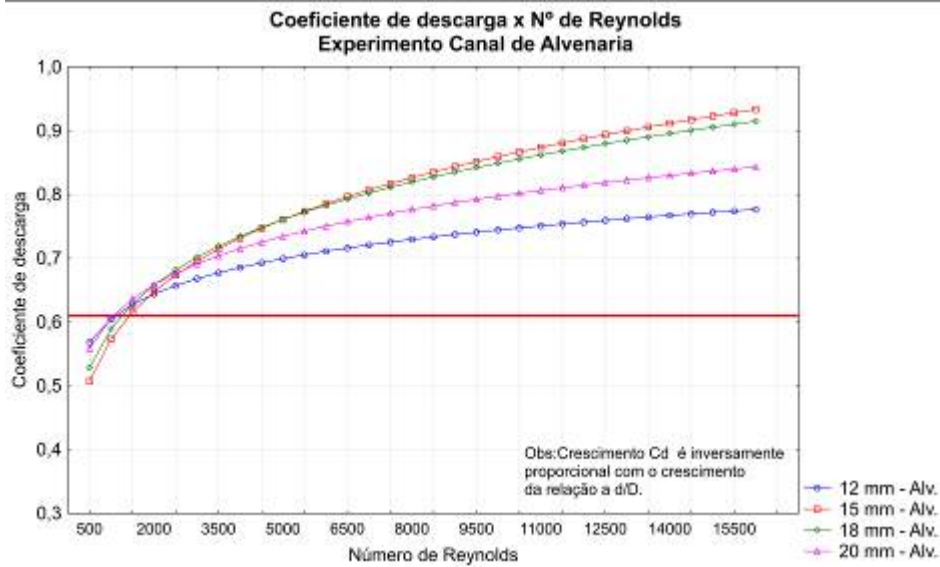


(a)- Cd x Re – Experimento Laboratorial

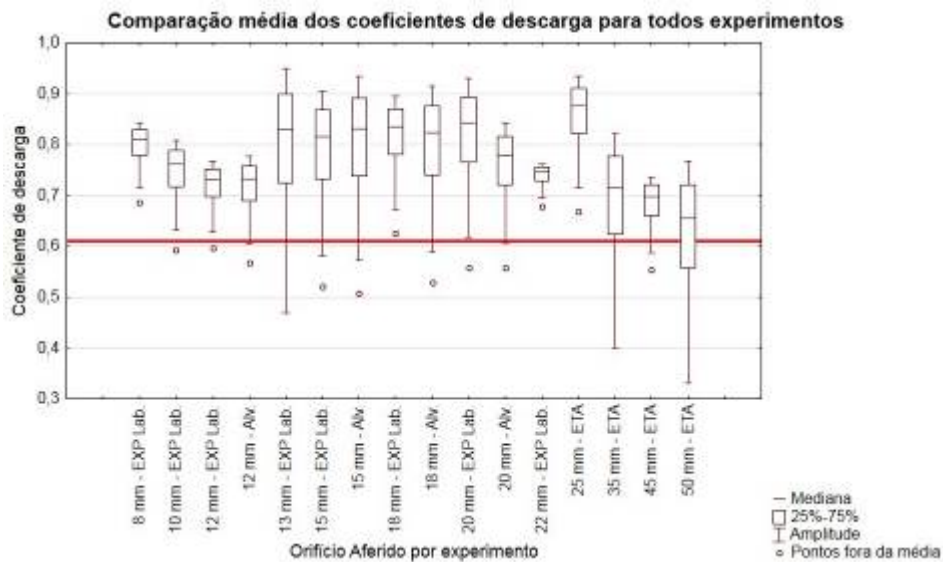


(b)- Cd x Re – Experimento ETA

Figura 6 – Resultados obtido para o Cd em função de Re



(c)- Cd x Re – Experimento Alvenaria



(d)- Comparativo dos Cd em todos experimentos

Figura 6 – Resultados obtido para o Cd em função de Re

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

Re	D (mm)															
	8 - EXP	10 - EXP	12 - EXP	12 - Alv	13 - EXP	15 - EXP	15 - Alv	18 - EXP	18 - Alv	20 - EXP	20 - Alv	22 - EXP	25 - ETA	35-ETA	45 - ETA	50 - ETA
	Valores correspondentes à equação $C_d = a \cdot Re^b$															
	a =															
b =																
	0,475	0,342	0,380	0,325	0,133	0,193	0,170	0,331	0,197	0,224	0,267	0,551	0,368	0,112	0,334	0,074
500	0,69	0,59	0,60	0,57	0,47	0,52	0,51	0,63	0,53	0,56	0,56	0,68	0,67	0,40	0,55	0,33
1000	0,71	0,63	0,63	0,61	0,54	0,58	0,57	0,67	0,59	0,62	0,61	0,69	0,72	0,46	0,59	0,39
1500	0,73	0,65	0,65	0,63	0,59	0,62	0,62	0,70	0,63	0,66	0,64	0,70	0,74	0,50	0,61	0,43
2000	0,74	0,67	0,66	0,64	0,62	0,65	0,65	0,72	0,66	0,68	0,66	0,71	0,76	0,53	0,62	0,46
2500	0,75	0,68	0,67	0,66	0,65	0,67	0,67	0,74	0,68	0,71	0,68	0,72	0,78	0,56	0,63	0,49
3000	0,76	0,70	0,68	0,67	0,68	0,69	0,70	0,75	0,70	0,73	0,69	0,72	0,79	0,58	0,64	0,51
3500	0,77	0,71	0,69	0,68	0,70	0,71	0,71	0,77	0,72	0,74	0,70	0,72	0,81	0,60	0,65	0,53
4000	0,78	0,71	0,69	0,69	0,72	0,73	0,73	0,78	0,73	0,76	0,72	0,73	0,82	0,62	0,66	0,55
4500	0,78	0,72	0,70	0,69	0,73	0,74	0,75	0,79	0,75	0,77	0,73	0,73	0,83	0,63	0,66	0,57
5000	0,79	0,73	0,71	0,70	0,75	0,75	0,76	0,79	0,76	0,78	0,73	0,73	0,83	0,65	0,67	0,58
5500	0,79	0,73	0,71	0,71	0,76	0,76	0,77	0,80	0,77	0,79	0,74	0,74	0,84	0,66	0,67	0,59
6000	0,79	0,74	0,71	0,71	0,78	0,77	0,79	0,81	0,78	0,80	0,75	0,74	0,85	0,67	0,68	0,61
6500	0,80	0,75	0,72	0,72	0,79	0,78	0,80	0,82	0,79	0,81	0,76	0,74	0,86	0,68	0,68	0,62
7000	0,80	0,75	0,72	0,72	0,80	0,79	0,81	0,82	0,80	0,82	0,76	0,74	0,86	0,69	0,69	0,63
7500	0,81	0,76	0,73	0,73	0,81	0,80	0,82	0,83	0,81	0,83	0,77	0,74	0,87	0,70	0,69	0,64
8000	0,81	0,76	0,73	0,73	0,82	0,81	0,83	0,83	0,82	0,84	0,78	0,74	0,87	0,71	0,70	0,65
8500	0,81	0,76	0,73	0,73	0,84	0,82	0,84	0,84	0,83	0,85	0,78	0,75	0,88	0,72	0,70	0,66
9000	0,81	0,77	0,74	0,74	0,84	0,83	0,84	0,84	0,84	0,85	0,79	0,75	0,88	0,73	0,70	0,67
9500	0,82	0,77	0,74	0,74	0,85	0,83	0,85	0,85	0,84	0,86	0,79	0,75	0,89	0,74	0,71	0,68
10000	0,82	0,77	0,74	0,74	0,86	0,84	0,86	0,85	0,85	0,87	0,80	0,75	0,89	0,75	0,71	0,69
10500	0,82	0,78	0,74	0,75	0,87	0,85	0,87	0,86	0,86	0,87	0,80	0,75	0,90	0,75	0,71	0,69
11000	0,82	0,78	0,75	0,75	0,88	0,85	0,87	0,86	0,86	0,88	0,81	0,75	0,90	0,76	0,71	0,70
11500	0,83	0,78	0,75	0,75	0,89	0,86	0,88	0,86	0,87	0,89	0,81	0,75	0,90	0,77	0,72	0,71
12000	0,83	0,79	0,75	0,76	0,90	0,87	0,89	0,87	0,87	0,89	0,81	0,76	0,91	0,77	0,72	0,72
12500	0,83	0,79	0,75	0,76	0,90	0,87	0,89	0,87	0,88	0,90	0,82	0,76	0,91	0,78	0,72	0,72
13000	0,83	0,79	0,76	0,76	0,91	0,88	0,90	0,88	0,89	0,90	0,82	0,76	0,92	0,79	0,72	0,73
13500	0,83	0,80	0,76	0,76	0,92	0,88	0,91	0,88	0,89	0,91	0,83	0,76	0,92	0,79	0,73	0,74
14000	0,84	0,80	0,76	0,77	0,92	0,89	0,91	0,88	0,90	0,91	0,83	0,76	0,92	0,80	0,73	0,74
14500	0,84	0,80	0,76	0,77	0,93	0,89	0,92	0,89	0,90	0,92	0,83	0,76	0,93	0,80	0,73	0,75
15000	0,84	0,80	0,76	0,77	0,94	0,90	0,92	0,89	0,91	0,92	0,84	0,76	0,93	0,81	0,73	0,76
15500	0,84	0,81	0,77	0,77	0,94	0,90	0,93	0,89	0,91	0,93	0,84	0,76	0,93	0,82	0,73	0,76
16000	0,84	0,81	0,77	0,78	0,95	0,91	0,93	0,89	0,91	0,93	0,84	0,76	0,93	0,82	0,74	0,77

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização do valor 0,61 para o coeficiente de descarga – C_d – não é adequada para o dimensionamento de floculadores 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 floculação deficiente.

Este estudo ainda encontra-se em andamento, visando à determinação da variação de C_d para diâmetros maiores, utilizados em floculadores de ETA's de maior porte. Recomenda-se estender o estudo para orifícios de diferentes geometrias, utilizados em outros tipos de floculadores 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

1. AZEVEDO NETTO, J.M. et al. Manual de Hidráulica. 8 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 680 p
2. CASTRO, L. V de., Vianna, M. R., Ribeiro, C. O. 2015. Orifícios dos floculadores de bandejas perfuradas de estações de tratamento de água: determinação dos coeficientes de descarga. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Nov 2015).
3. VIANNA, M. R. Hidráulica para engenheiros sanitaristas e ambientais - volume 4: sistemas de tratamento de água. 1. ed. Belo Horizonte: FUMEC, 2009. 545p.
4. VIANNA, M. R. Estações padrão de tratamento de água: evolução dos projetos da COPASA MG. In: XIX Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária, 1984, Santiago. Anais do XIX Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária, 1984.
5. 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. Volume 5, Issue 3, pp.5-7.