



I-097 - A INFLUÊNCIA DOS COEFICIENTES DE DESCARGA NO DIMENSIONAMENTO DOS FLOCULADORES DE BANDEJAS PERFURADAS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs)

Lucas Vassalle de Castro⁽¹⁾

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

Marcos Rocha Vianna⁽²⁾

Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos Mestre em Hidráulica e Saneamento. Engenheiro civil. Professor da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Camila de Oliveira Ribeiro⁽³⁾

Graduanda em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC. Engenheira ambiental pela Universidade FUMEC, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Lara Silva Altair⁽⁴⁾

Graduanda em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC.

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 ensaiados orifícios afogados, com diâmetros variando entre 8 e 18 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 comparação dos valores verificados em laboratório com valores práticos colhidos 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. Foram compilados os dados aferidos nas medições e realizou-se um confronto das informações obtidas tanto em laboratório quanto em campo, 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, floculadores de bandejas, orifícios afogados.

INTRODUÇÃO

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 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 desses floculadores nunca foi realizada experimentalmente. Não se tem conhecimento 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. Para realizar a verificação dos coeficientes de descarga (C_d) desses flocladores, foi proposto em experimento, para simular o funcionamento de um floclador 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):

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

Em relação ao coeficiente de descarga (C_d), o valor 0,61 tem sido o adotado para o cálculo das ETA's em questão. Entretanto, nas unidades de floclação a água escoava através desses orifícios com baixas velocidades e, portanto, com números de Reynolds inferiores aos ocorridos nas aplicações comuns.

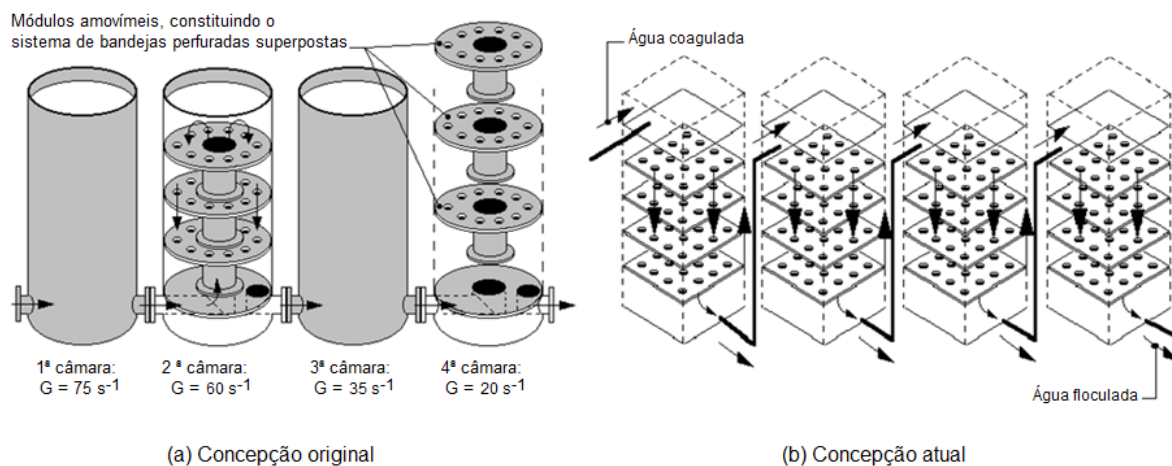


Figura 1 – Floclador de bandejas perfuradas: (a) concepção original e (b) concepção atual(VIANNA, 2009).

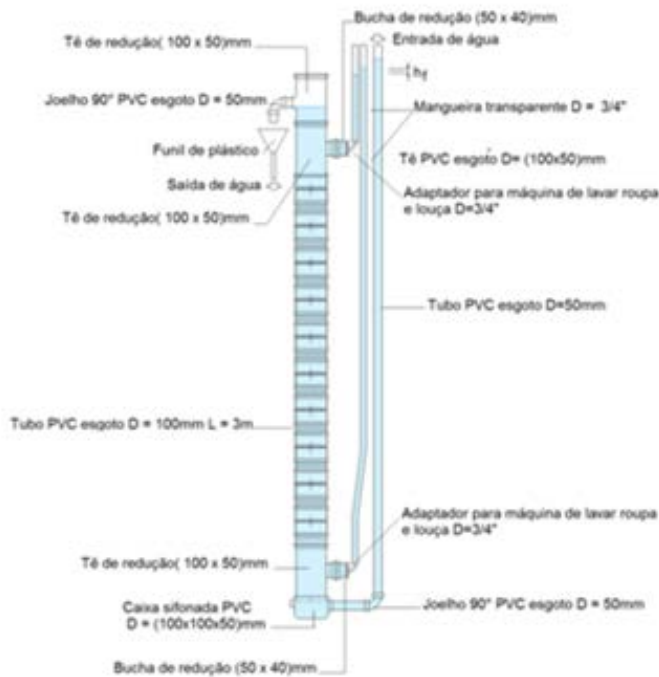
Tendo em vista a escassez de dados apresentados pela literatura em relação à avaliação dos coeficientes de descarga submetidos às condições hidráulicas em que operam os flocladores do tipo de bandejas perfuradas, decidiu-se avaliar tais coeficientes nestas condições, ou seja, com baixas velocidades médias 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.

Neste trabalho é apresentado um confronto dos dados gerados em laboratório e por aferição em campo, com a literatura, avaliando diretamente através da análise de projetos de ETA's existentes qual a real influência dos coeficientes de descarga no dimensionamento dos flocladores de bandejas perfuradas em estações de tratamento de água, quando submetidos a números de Reynolds não superiores a 16000.

MATERIAIS E MÉTODOS

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 perfuradas dos floculadores de diversas estações de tratamento de água utilizadas pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

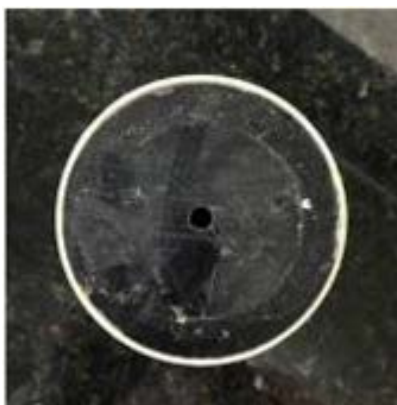


(a)- Seção esquemática



(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. Até o dado momento, foram avaliados diâmetros de 8, 10, 12, 13, 15 e 18 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.

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

Além desses 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, 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.



(a) Placa com informações da ETA

(b) Câmaras de floculação

Figura 4 – 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 10,3l/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) 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 agora 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 6 a 15 mm, de acordo com as vazões introduzidas nas câmaras. A figura 5, 6 e 7 exemplificam os *layout* destes floculadores.

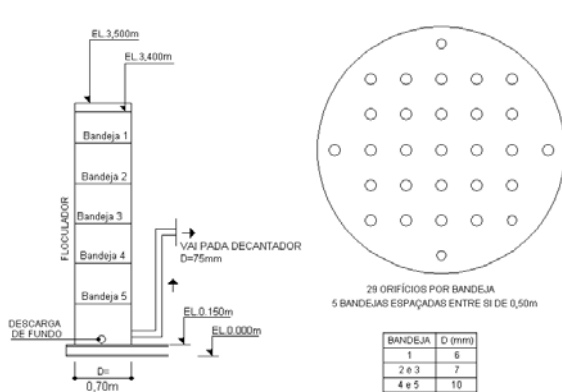


Figura 5 – Floculador de 2m³/h

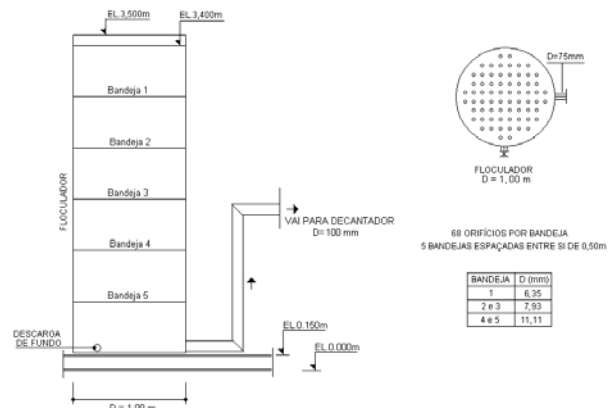


Figura 6 – Floculador de 5m³/h

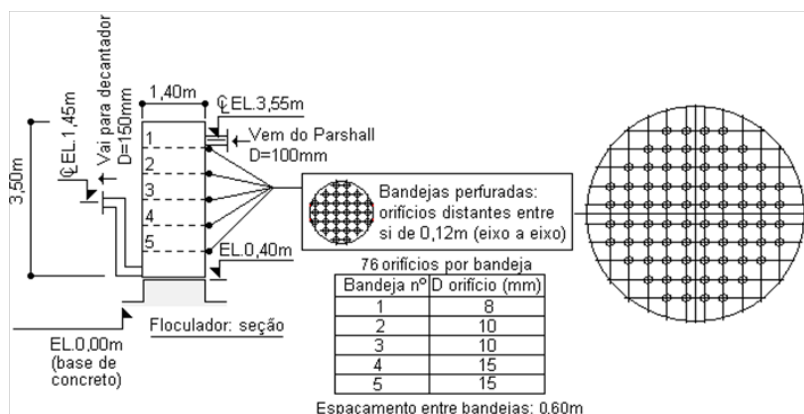


Figura 7 – Floculador de 10m³/h

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.

$$h_f = \left(\frac{Q}{C_d \times A} \right)^2 \times \frac{1}{2g} \quad (3)$$

$$G = \sqrt{\frac{gh}{vt}} \quad (4)$$

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®.

Os resultados desse ajuste, bem como os valores obtidos para a e b, são apresentados na Tabela 1. Na figura 11, 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, 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. Em análise às condições em que foram feitos os ensaios, pode-se evidenciar que o coeficiente de descarga no valor de 0,61, não se aplica às situações em que as velocidades médias e o número de Reynolds são baixos (menores que 16000). As Figuras 8, 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
500	0,69	0,59	0,60	0,47	0,52	0,63	0,56	0,68	0,67	0,40	0,55	0,33
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
1500	0,73	0,65	0,65	0,59	0,62	0,70	0,66	0,70	0,74	0,50	0,61	0,43
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
2500	0,75	0,68	0,67	0,65	0,67	0,74	0,71	0,72	0,78	0,56	0,63	0,49
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
3500	0,77	0,71	0,69	0,70	0,71	0,77	0,74	0,72	0,81	0,60	0,65	0,53
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
4500	0,78	0,72	0,70	0,73	0,74	0,79	0,77	0,73	0,83	0,63	0,66	0,57
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
5500	0,79	0,73	0,71	0,76	0,76	0,80	0,79	0,74	0,84	0,66	0,67	0,59
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
6500	0,80	0,75	0,72	0,79	0,78	0,82	0,81	0,74	0,86	0,68	0,68	0,62
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
7500	0,81	0,76	0,73	0,81	0,80	0,83	0,83	0,74	0,87	0,70	0,69	0,64
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
8500	0,81	0,76	0,73	0,84	0,82	0,84	0,85	0,75	0,88	0,72	0,70	0,66
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
9500	0,82	0,77	0,74	0,85	0,83	0,85	0,86	0,75	0,89	0,74	0,71	0,68
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
10500	0,82	0,78	0,74	0,87	0,85	0,86	0,87	0,75	0,90	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
11500	0,83	0,78	0,75	0,89	0,86	0,86	0,89	0,75	0,90	0,77	0,72	0,71
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
12500	0,83	0,79	0,75	0,90	0,87	0,87	0,90	0,76	0,91	0,78	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
13500	0,83	0,80	0,76	0,92	0,88	0,88	0,91	0,76	0,92	0,79	0,73	0,74
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
14500	0,84	0,80	0,76	0,93	0,89	0,89	0,92	0,76	0,93	0,80	0,73	0,75
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
15500	0,84	0,81	0,77	0,94	0,90	0,89	0,93	0,76	0,93	0,82	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

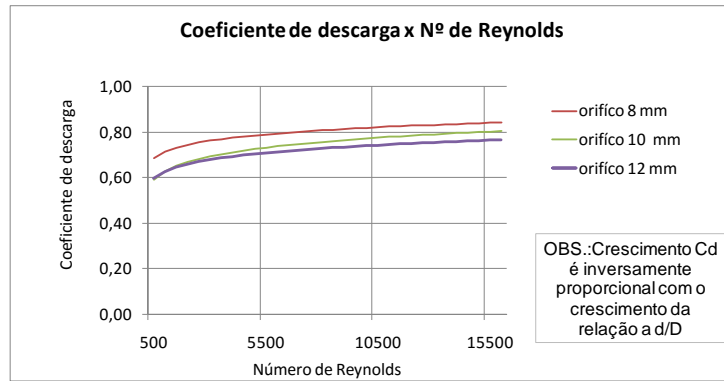


Figura 8 – Resultados obtido para o C_d em função de Re – 8 a 12 mm

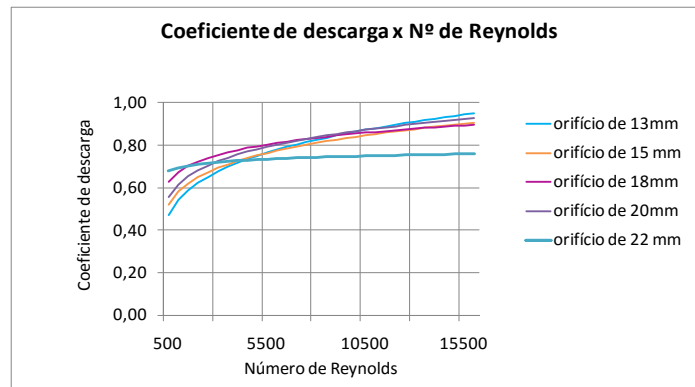


Figura 9 – Resultados obtido para o C_d em função de Re – 13 a 22 mm

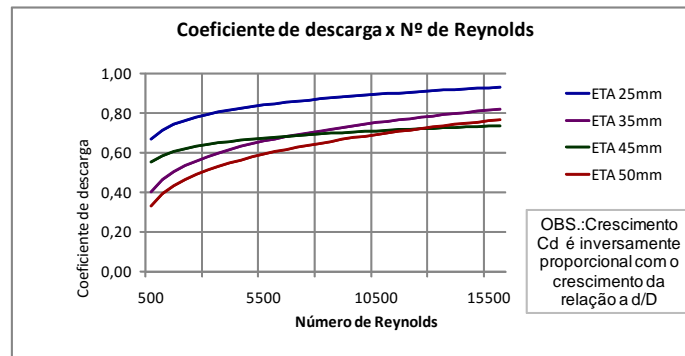


Figura 10 – Resultados obtido para o C_d em função de Re – ETA

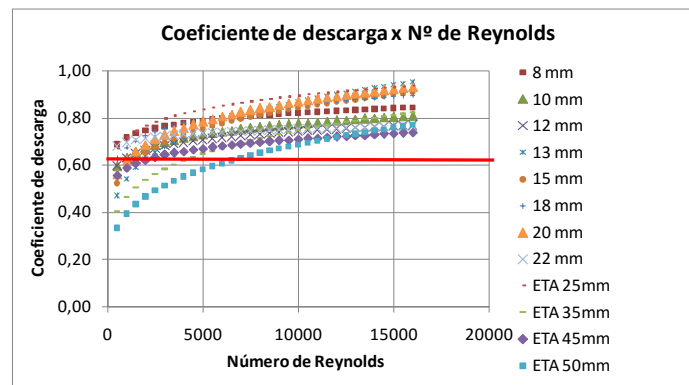


Figura 11 – Resultados totais obtidos para o C_d em função de Re

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) 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 (C_d)	Perda de carga por orifício	Gradiente de Velocidade 1/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	0,8	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	0,8	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, 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 E RECOMENDAÇÕES

Embasado no trabalho desenvolvido, pode-se concluir que a utilização do valor 0,61 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.

Este estudo ainda encontra-se em andamento, visando à determinação da variação de C_d para diâmetros maiores, utilizados em flocladores de ETA's de maior porte. Recomenda-se 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.

Para aperfeiçoar a aferição dos dados e podermos trabalhar com vazões próximas às das estações de tratamento de água, será instalado neste experimento um medidor de vazão eletromagnético como ilustrado na figura 12. Este medidor possibilitará a instalação do experimento dentro de um canal de alvenaria, ampliando as possibilidades de análises e variações de condições, para medição dos coeficientes de descarga.

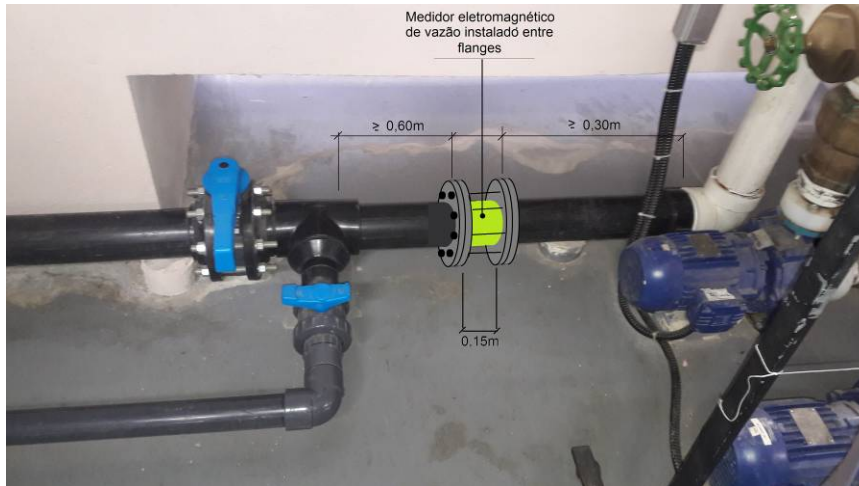


Figura 12 – Medidor eletromagnético a ser instalado no aparato experimental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios logísticos e financeiros prestados pela FAPEMIG e pela Faculdade de Engenharia e Arquitetura – FEA – da Universidade FUMEC. Agradecem também à COPASA, de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, pelo suporte dado para realização deste trabalho.

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 flocladores 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. 2014. Estudo hidráulico dos orifícios dos flocladores de bandejas perfuradas superpostas de estações de tratamento de água. Construindo. Belo Horizonte, 6 (mar 2014), 39-41.
6. VIANNA, M. R., Castro, L. V. de, Ribeiro, C. O. 2014. Estudo hidráulico dos orifícios dos flocladores de bandejas perfuradas superpostas de estações de tratamento de água. Anais do Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (Mai 2014).
7. 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.