

I-121 - DIMENSIONAMENTO RACIONAL DE UNIDADES DE FLOCULAÇÃO EM CHICANAS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Luiz Di Bernardo⁽¹⁾

Professor Titular aposentado do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Diretor da Hidrosan.

Angela Di Bernardo Dantas

Engenheira Civil com Mestrado, Doutorado e Pós-doutorado em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professora da Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP. Diretora da Hidrosan.

Paulo Eduardo Nogueira Voltan

Engenheiro Civil com Mestrado e Doutorado em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Gerente de Projetos da Hidrosan.

Endereço⁽¹⁾: Av. São Carlos, 2205 salas 106/107 - Centro - São Carlos - SP - CEP: 13560-900 - Brasil - Tel: (16) 3371-3466 - e-mail: luizdiber@hotmail.com

RESUMO

A energia necessária para promover a floculação em canais com chicanas depende basicamente da perda de carga nas voltas, pois o atrito nas paredes é pequeno. Conhecendo-se a perda de carga total em um trecho qualquer do canal, é possível estimar o gradiente de velocidade médio naquele trecho considerado, apesar das perdas de carga significativas serem localizadas nas voltas. Devido às diferenças de critérios de dimensionamento de unidades de floculação em chicanas e de cálculo da perda de carga propostos por autores tais como Fair et al. (1968), Schulz et al. (1984), Montgomery (1985), Kawamura (1991), Swamee (1996) e Haarhoff (1998), o presente trabalho analisa as recomendações da literatura, apresenta os dados de funcionamento de uma instalação de floculação com chicanas de escoamento vertical, fornece um exemplo de cálculo com ênfase na perda de carga nas voltas e os respectivos gradientes de velocidade, e discute as inconsistências observadas.

PALAVRAS-CHAVE: Floculação, floculação hidráulica em canais com chicanas, perda de carga nas voltas, coeficiente de perda de carga nas voltas, gradiente de velocidade médio

INTRODUÇÃO

No projeto de sistemas de floculação em chicanas com escoamento vertical com passagens inferiores e superiores ou horizontal com passagens laterais, a NBR 12216 (1992) recomenda: i) na ausência de estudos de laboratório, o tempo de floculação deve estar compreendido entre 20 e 30 min; ii) a velocidade de escoamento entre chicanas deve estar compreendida entre 0,07 e 0,30 m/s; iii) o espaçamento mínimo entre chicanas é de 0,75 m no sistema de escoamento vertical; iv) para atenuar efeitos de curtos circuitos, deve ser previsto um recobrimento mínimo entre as chicanas, principalmente no sistema de escoamento vertical. Embora não haja justificativa na literatura brasileira, a velocidade de escoamento nas passagens tem sido adotada igual a 1,5 vezes a velocidade média entre chicanas. A Figura 1 mostra esquema e fotos de duas unidades distintas de floculação com escoamento vertical ascendente e descendente.

Em um canal provido de chicanas, a perda de carga é devida à mudança de direção do escoamento, ao alargamento e à contração da seção de escoamento nas voltas, e ao atrito da água com as paredes. No primeiro e segundo casos, as perdas de carga podem ser agrupadas e, de acordo com Fair et al. (1968), resulta:

$$h_{p1} = \frac{n_c \times V_{e1}^2 + (n_c - 1) V_{e2}^2}{2 \times g} \quad \text{Eq. 1}$$

em que:

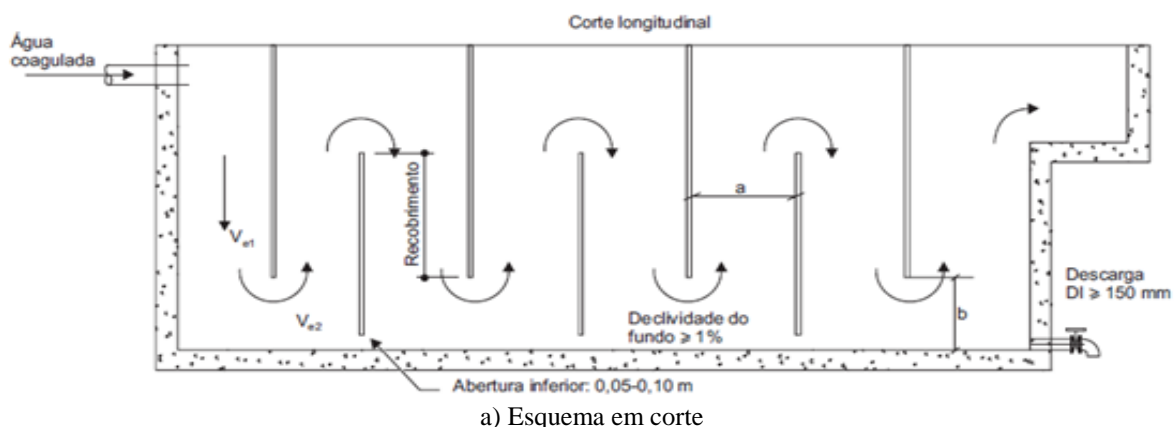
h_{p1} : perda de carga total nas voltas de 180° (m)

n_c : número de canais separados por chicanas (m)

V_{e1} : velocidade média de escoamento entre chicanas (m/s)

V_{e2} : velocidade média de escoamento nas voltas (m/s)

g : aceleração da gravidade (m/s²)



b) Fotos de dois sistemas de floculação

Figura1– Esquema e fotos de unidades de floculação com chicanas e escoamento vertical ascendente e descendente

Fair et al. (1968) não recomendam qualquer relação entre as velocidades V_{e1} e V_{e2} , e apresentam um exemplo considerando $V_{e1} = 0,152$ m/s e $V_{e2} = 0,608$ m/s. De acordo com Di Bernardo et al. (2005), o uso da Equação 1 com $V_{e1} = 1,5 V_{e2}$ é comum no Brasil sendo que os resultados podem resultar completamente diferentes daqueles obtidos com $V_{e2} \gg V_{e1}$ (no exemplo de Fair et al., 1968, a relação V_{e2}/V_{e1} é igual a 4, muito maior que a comumente usada no Brasil, igual a 0,67). Em geral, devido às velocidades relativamente baixas de V_{e1} e V_{e2} , a perda de carga total raramente excede 0,2 a 0,3 m, pois ainda que na prática o valor de perda de carga resulte maior, a borda livre normalmente adotada entre 0,2 e 0,4 m compensa as diferenças resultantes em cada canal da unidade de floculação. Entretanto, águas com turbidez elevada que requerem gradientes de velocidade altos e, conseqüentemente, valores relativamente altos da velocidade de escoamento nas voltas, a perda de carga total pode ser muito maior que a prevista com o uso da Equação 1 e $V_{e2}/V_{e1} = 0,67$ e causar o transbordamento mesmo com borda livre tendo valores iguais aos citados.

A perda de carga em uma curva 180° das chicanas pode ser calculada pela fórmula universal de perda de cargas em singularidades em função da velocidade de escoamento.

$$h_v = \frac{K \times V^2}{2 \times g} \quad \text{Eq. 2}$$

em que:

h_v : perda de carga em cada volta (m)

V : velocidade média de escoamento (m/s)

K = coeficiente de perda de carga

Se a velocidade utilizada na Equação 2 for igual à velocidade média de escoamento entre chicanas (V_{e1}) e considerando que esta velocidade seja menor ou igual à velocidade de escoamento nas passagens (V_{e2}), o valor de K varia de acordo com diferentes autores:

- Idel'chik (1961) → equações apresentadas com valor de K dependente das dimensões dos canais e das voltas;
- Schulz e Okun (1984) → K varia entre 2,5 e 4,0 (para $V_{e2} > V_{e1}$);
- Montgomery (1985) → $K = 3,2$ (para $V_{e2} > V_{e1}$);
- Kawamura (1991) → K varia entre 3,2 e 3,5 (para $V_{e2} > V_{e1}$);
- Swamee (1996) → K é igual a duas vezes o valor de uma curva de 90°, ou seja, $K = 2$ (para $V_{e1} = V_{e2}$);
- Haarhoff (1998) → discute as relações entre V_{e2} e V_{e1} e os valores de K e comenta que na América do Sul e Central é comum a relação V_{e2}/V_{e1} entre 0,67 e 3,0, enquanto na África do Sul essa relação varia de 1,0 a 1,5.

Kawamura (1991) sugere que quando $V_{e2} > V_{e1}$, a Equação 2 seja usada com $V = V_{e2}$ com o coeficiente $K = 1,5$ e apresenta um exemplo em que V_{e2}/V_{e1} é igual a 3. Haarhoff (1998) apresenta exemplos de dimensionamento de flocladores hidráulicos com escoamento horizontal com $V_{e2}/V_{e1} = 1,0$ e $K = 3,2$, e cita que o coeficiente K depende também da temperatura, da profundidade útil e do recobrimento entre chicanas.

A perda de carga total (h_{p1}) devido às curvas é obtida multiplicando-se o número de curvas de 180° pela perda de carga em cada uma delas. A perda de carga total, h_{pt} é dada pela soma de h_{p1} (nas voltas) e h_{p2} (por atrito). Em geral, a perda de carga h_{p2} é insignificante se comparada a h_{p1} , razão pela qual quase sempre é desprezada, a menos que o material da parede das chicanas seja muito rugoso. Conhecendo a perda de carga total, pode-se estimar o gradiente de velocidade médio em um canal qualquer, provido de chicanas igualmente espaçadas. É interessante ressaltar que se trata de uma estimativa grosseira, pois a dissipação de energia devido às passagens pode estar ocorrendo em um volume de difícil determinação à jusante das mesmas. Existe uma distribuição de velocidades na passagem da água pelas aberturas, o que também concorre para que resultem diferentes gradientes de velocidade em cada ponto da massa líquida. O dimensionamento inadequado (ou a sobrecarga) de unidades de floclação com chicanas pode contribuir para a ruptura de flocos nas passagens inferiores e superiores ou até impedir a sua formação.

O gradiente de velocidade médio em cada canal com chicanas igualmente espaçadas pode ser estimado utilizando-se a Equação 3. O tempo de detenção otimizado em jarreste (T_f), conforme metodologia recomendada por Di Bernardo et al. (2011) pode ser adotado para projeto, uma vez que a interação entre as partículas no reator estático é similar à que ocorre no escoamento tipo pistão, observado nos sistema de floclação de chicanas. Entretanto, é comum adotar T_f na Equação 3 igual à cerca de 1,10 a 1,15 vezes T_f .

$$G_{mf} = \sqrt{\frac{\gamma h_{pt}}{\mu T_f}} \quad \text{Eq. 3}$$

em que:

G_{mf} : gradiente de velocidade médio no canal com chicanas igualmente espaçadas (s^{-1})

H_{pt} : perda de carga total no canal (m)

γ : peso específico (kg/m^3)

μ : viscosidade absoluta da água ($N s/m^2$)

T_f : tempo médio de floclação no canal considerado (s)

O dimensionamento de cada canal da unidade de floclação com valor decrescente de G_{mf} pode ser feito por tentativas, assumindo-se previamente as dimensões de cada um deles e o tempo de floclação, calculando-se os gradientes de velocidade médios, os quais são comparados com aqueles otimizados em ensaios em jarreste; ou que sejam fixados os valores de G_{mf} e T_f e calculadas as perdas de carga h_{pt} para a temperatura prevista (Equação 3) e dar prosseguimento ao cálculo com o uso da Equação 2 com $V = V_{e1}$ e K entre 3,0 e 4,0 se a relação V_{e2}/V_{e1} for de 0,5 a 1,5. Para $V_{e2}/V_{e1} > 1,5$, é usada a Equação 2 com $V = V_{e2}$ e $K = 1,5$. O uso do equacionamento de Idel'chik (1961) pode conduzir a valores maiores do coeficiente K como mostrado no exemplo.

OBJETIVO

Como o valor correto da perda de carga nas voltas em unidades de floculação com chicanas é fundamental para o cálculo do gradiente de velocidade médio, geralmente otimizado em ensaios de jarreste, foi realizado o presente trabalho com o objetivo de obter experimentalmente o coeficiente K da Equação 2 e comparar os resultados obtidos com aqueles recomendados na literatura.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado um diagnóstico em uma estação de tratamento da água de lavagem de minério em unidade de floculação de chicanas com escoamento vertical, a qual foi dimensionada com a Equação 1 e $V_{e2}/V_{e1} = 0,67$ para gradientes de velocidade médios entre 110 e 50 s^{-1} , com velocidade de escoamento entre as chicanas, V_{e1} entre 0,35 e 0,21 m/s. No cálculo, utilizando-se a Equação 1, resultou a perda de carga total de 0,57 m para a vazão de $1300 \text{ m}^3/\text{h}$ e 0,34 m para a vazão de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$. Em campo, foi observado que as perdas de cargas totais eram bem maiores que as estimadas pela Equação 1: perda de carga total de 0,95 m para a vazão de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$, significativamente maior que a estimada anteriormente (0,34 m), causando o transbordamento da unidade, como mostram as fotos da Figura 2. Com o uso da Equação 2 para $V = V_{e1}$ e a perda de carga de 0,95 m, obteve-se um valor K entre 4,15 e 4,65, próximo dos valores calculados pelo método de Idel'chik (1961) para as geometrias deste projeto e um pouco maior que os recomendados por Schulz e Okun (1984), Montgomery (1985) e Kawamura (1991).



Figura 2 – Transbordamento da unidade de floculação de chicanas com escoamento vertical

Devida à diferença de perda de carga verificadas experimentalmente e os calculados pela Equação 1, foram realizados cálculos para a unidade de floculação, com os mesmos tempos de detenção, número de canais e gradientes de velocidade médios, considerando as relações de V_{e2}/V_{e1} iguais a 0,67; 1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 e Equação 1 (Fair et al., 1968) e Equação 2 para $K = 3,5$ com $V = V_{e1}$ quando $V_{e1} > V_{e2}$ e Equação 2 com $V = V_{e2}$ ($V_{e1} < V_{e2}$) para $K=1,5$ (Kawamura, 1991) e segundo a metodologia de Idel'chik (1960). Foram calculados os valores de K'' em relação à velocidade V_{e2} , utilizando-se a Equação 2 para as geometrias em questão, cujos valores são mostrados na Figura 3. Não foram calculados os valores para a metodologia de Idel'chik (1960) com $V_{e2}/V_{e1} > 2$, pois os valores de K não estão definidos para $V_{e2}/V_{e1} > 2$. Por exemplo, no canal 1 a perda de carga nas voltas obtidas pela equação de Fair et. al (1968) foi de 0,077 m ($V_{e2}/V_{e1} = 0,67$), resultando o seguinte valor de K'' :

$$\text{Eq. 2} \rightarrow h_{p1} = n \times h_v = \frac{n \times K'' \times V_{e2}^2}{2 \times g} \rightarrow K'' = \frac{h_{p1} \times 2 \times g}{n \times V_{e2}^2} = \frac{0,077 \times 2 \times 9,8}{15 \times (0,172)^2} = 3,4$$

A Figura 3 também mostra que os coeficientes K calculados pela metodologia proposta por Idel'chik (1960) e os valores recomendados por Kawamura (1991) foram próximos para $V_{e2}/V_{e1} < 1$ (relação geralmente utilizada no Brasil), porém, muito diferente do valor obtido pelo cálculo (K'') com a Equação 1 (Fair et. al, 1968) combinada com a Equação 2. As três curvas começam se aproximar para valores de V_{e2}/V_{e1} maior que 2. Destaca-se que, no exemplo do livro de Fair et. al.(1968) é utilizada $V_{e2}/V_{e1} = 4$ e no de Kawamura $V_{e2}/V_{e1} = 3$, região em que os resultados das fórmulas são bastante parecidos.

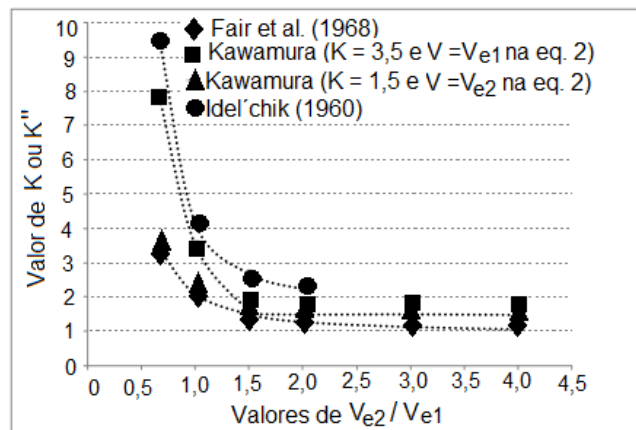
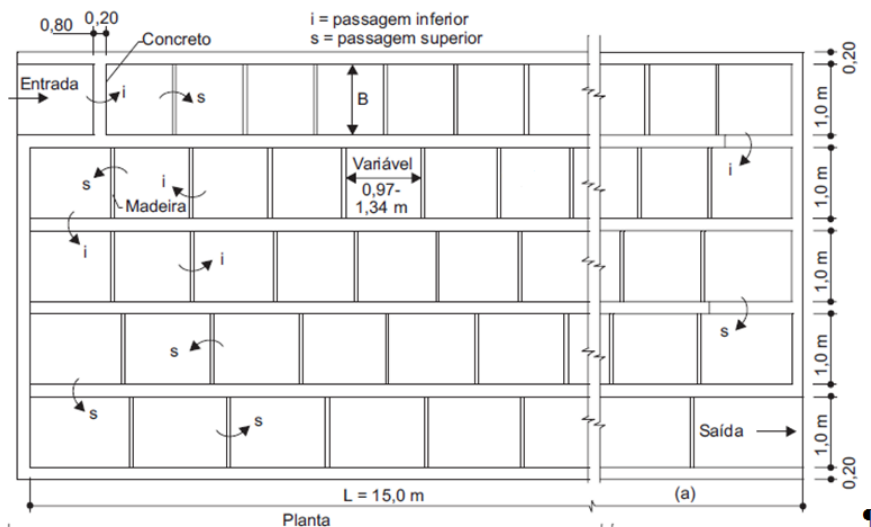


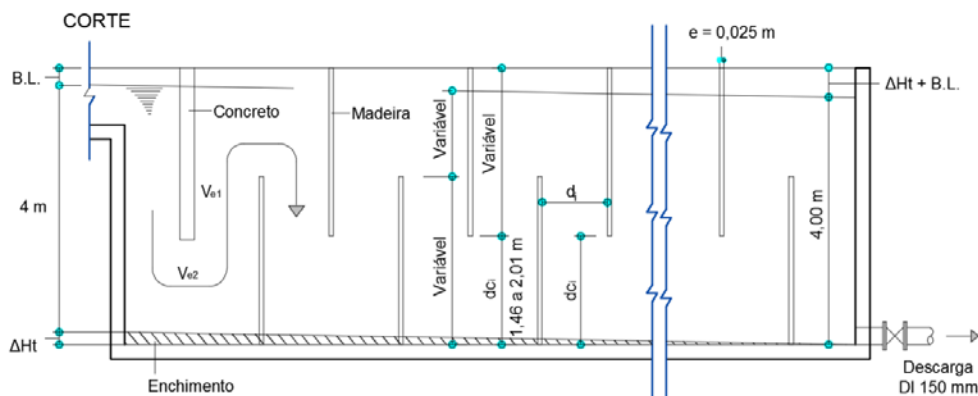
Figura 3 - Valores de K e K'' em função de V_{e2}/V_{e1}

EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO

Com o fim de mostrar as diferenças obtidas com uso da Equação 1 para $V_{e1} = 1,5 V_{e2}$, foi dimensionado o sistema de floculação em chicanas com escoamento vertical de uma estação de tratamento de água com vazão de 500 L/s com duas unidades em paralelo, cada uma para 250 L/s e 5 canais providos de chicanas (esquema da Figura 4). Em ensaios de jarteste, o tempo total de floculação otimizado foi de 20 minutos e o gradiente de velocidade médio variou entre 30 e 50 s^{-1} . As perdas de carga nas curvas (Δh_c) foram calculadas de três formas: Equação 1 (Fair et al. 1968), Equação 2 com $K = 3,5$ (Kawamura, 1991, Schulz e Okun, 1984, Montgomery, 1985 e Haarhoff, 1998), e método de Idel'chik (1961).



Esquema em planta da unidade de floculação



Corte longitudinal

Figura 4 – Esquemas da unidade do exemplo

a) Dimensões dos canais (cada unidade de floculação): foram fixadas em função do arranjo e profundidade das demais unidades da estação.

- altura da lâmina de água no canal: 4,0 m
- comprimento de cada canal = 15,0 m
- largura de cada canal: $B = 1,0$ m

b) Gradientes de velocidade médios e tempos médios de detenção (valores iniciais)

- canal 1: $G_{mf1} = 50 \text{ s}^{-1}$; $T_{f1} = 4$ min
- canal 2: $G_{mf2} = 45 \text{ s}^{-1}$; $T_{f1} = 4$ min
- canal 3: $G_{mf3} = 40 \text{ s}^{-1}$; $T_{f1} = 4$ min
- canal 4: $G_{mf4} = 30 \text{ s}^{-1}$; $T_{f1} = 4$ min
- canal 5: $G_{mf5} = 35 \text{ s}^{-1}$; $T_{f1} = 4$ min

c) Perdas de carga e gradientes de velocidade médios em cana canal com chicanas

A Tabela 1 mostra as características dos canais com chicanas e as velocidades resultantes nos trechos retilíneos e nas curvas. Foi adotado um número decrescente de chicanas por canal visando à redução do gradiente de velocidade médio ao longo da unidade de floculação e a abertura entre a chicana e a parede na curva (dc_i) igual 1,5 vezes o espaçamento entre as chicanas (d_i).

Tabela 1 - Número e espaçamento entre chicanas, abertura da chicana na curva e velocidades de escoamento

Canal	Número de chicanas - N _{ch}	Espaçamento entre chicanas - d _i (m)	Abertura da chicana na curva d _{c_i} (m)	Velocidade de escoamento (m/s)	
				$V_{eli} = \frac{Q}{B \times d_i}$	$V_{e2i} = \frac{2 \times V_{eli}}{3}$
1	15	0,97	1,46	0,258	0,172
2	14	1,05	1,58	0,238	0,159
3	13	1,13	1,70	0,221	0,147
4	12	1,23	1,85	0,203	0,135
5	11	1,34	2,01	0,187	0,125

d) Extensão média percorrida pela água, raio hidráulico dos canais, perda de carga por atrito (h_{p2} - Equação de Manning) e nas curvas e gradiente de velocidade médio em cada canal com chicanas

$$L_{pi} = 60 \times V_{eli} \times T_{fl} ; R_{Hi} = 2 \frac{d_i \times B}{(e_i + B)} ; D_{Hi} = 4 \times R_{Hi}$$

- canal 1: L_{p1} = 61,9 m; R_{h1} = 0,245 m; D_{H1} = 0,98 m
- canal 2: L_{p2} = 57,1 m; R_{h2} = 0,255 m; D_{H2} = 1,02 m
- canal 3: L_{p3} = 53,0 m; R_{h3} = 0,265 m; D_{H3} = 1,06 m
- canal 4: L_{p4} = 48,7 m; R_{h4} = 0,275 m; D_{H4} = 1,10 m
- canal 5: L_{p5} = 44,9 m; R_{h5} = 0,288 m; D_{H5} = 1,15 m

$$h_{p2} = L_t \times J = \frac{(V_{e1} \times n_m)^2 \times L_t}{R_h^{4/3}}$$

Em que:

h_{p2} : perda de carga por atrito (m)

L_t : comprimento total percorrido pela água (m)

J : gradiente hidráulico (m/m)

n_m : coeficiente de Manning (igual a 0,013 para concreto e 0,011 para madeira)

R_h : raio hidráulico (m)

- canal 1: h_{p21} = 0,004 m
- canal 2: h_{p22} = 0,003 m
- canal 3: h_{p23} = 0,002 m
- canal 4: h_{p24} = 0,002 m
- canal 5: h_{p25} = 0,001 m

e) Resultados para Fair et al. (1968) e Kawamura (1991)

Os resultados utilizando-se a equação de Fair et. al (1968) e os índices propostos por Kawamura (1991) estão mostrados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Perdas de carga e gradientes de velocidade médio nos canais com chicanas utilizando a equação de Fair et al.,1968)

Canal	h _{p1} (m)	h _{p2} (m)	h _{pt} (m)	G _{fm} (s ⁻¹) (Temp = 20°C)
1	0,077	0,004	0,081	57,3
2	0,061	0,003	0,064	51,0
3	0,049	0,002	0,051	45,5
4	0,038	0,002	0,040	40,3
5	0,030	0,001	0,031	35,5

Tabela 3 - Perdas de carga e gradientes de velocidade médios nos canais utilizando os índices propostos por Kawamura (1991) para $K = 3,5$ e $V = V_{e1}$ na Equação 2

Canal	hp_1 (m)	hp_2 (m)	h_{pt} (m)	G_{fm} (s^{-1}) (Temp = 20°C)
1	0,178	0,004	0,182	86,0
2	0,141	0,003	0,145	76,6
3	0,113	0,002	0,115	68,4
4	0,088	0,002	0,09	60,5
5	0,069	0,001	0,07	53,1

f) Resultados utilizando a metodologia de Idel'chik (1961)

O cálculo das perdas de cargas segundo Idel'chik (1961) foi realizado para obtenção do valor de K usado na Equação 2 com $V = V_{e1}$. Neste caso, o valor de a_1 é a largura do canal ($B = 1,0$ m), o espaçamento entre as chicanas (d_i) é o valor de b_{1i} (0,97 a 1,34 m, dependendo do canal), o valor de b_{2i} é o igual a abertura da passagem inferior (1,46 a 2,01 m, dependendo do canal) e L é a espessura da chicana (0,03 m). A Figura 5 precisa ser consultada para facilitar a compreensão do cálculo.

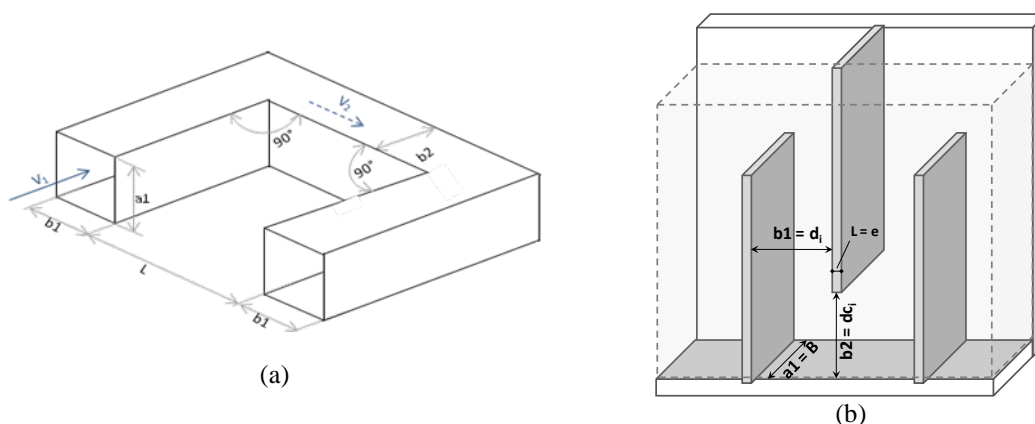


Figura 5 – Elementos para o cálculo do coeficiente K na curva 180° (a) aplicado para chicanas verticais (b) para cada canal com chicanas (adaptado de Idel'chik, 1961)

No caso do primeiro canal, $b_{11} = 0,97$ m, $b_{21} = 1,46$ m e $a_1 = 1,0$ m; $L = 0,03$ m (chicanas de madeira com 3 cm de espessura). Como as chicanas serão de madeira (rugosidade de 0,6 mm) e como as paredes do canal serão de concreto com acabamento em argamassa alisada (rugosidade de 0,2 mm), foi considerada a rugosidade média de $\Delta = 0,4$ mm. Considerando as paredes rugosas, o valor de k_Δ deve ser verificado em função do número de Reynolds (Re) e da rugosidade relativa (Δ_r)

- canal 1: $Re = 2,57 \times 10^5$; $\Delta_r = 0,00040$; $k_\Delta = 1 + 0,5 \times 10^3 \Delta_r = 1,20$
- canal 2: $Re = 2,47 \times 10^5$; $\Delta_r = 0,00038$; $k_\Delta = 1 + 0,5 \times 10^3 \Delta_r = 1,19$
- canal 3: $Re = 2,38 \times 10^5$; $\Delta_r = 0,00037$; $k_\Delta = 1 + 0,5 \times 10^3 \Delta_r = 1,19$
- canal 4: $Re = 2,27 \times 10^5$; $\Delta_r = 0,00036$; $k_\Delta = 1 + 0,5 \times 10^3 \Delta_r = 1,18$
- canal 5: $Re = 2,16 \times 10^5$; $\Delta_r = 0,00034$; $k_\Delta = 1 + 0,5 \times 10^3 \Delta_r = 1,17$

Os valores de C_1 e de k_m podem ser obtidos nas Figuras 6 e 7 por meio dos valores de a_1/b_1 , L/b_{1i} e b_{2i}/b_{1i} .

- canal 1: $a_1/b_1 = 1,03$; $L/b_{11} = 0,03$; $b_{21}/b_{11} = 1,5$; $C_1 = 1,01$; $k_m = 3,56$
- canal 2: $b_{12}/a_1 = 0,95$; $L/b_{12} = 0,02$; $b_{22}/b_{12} = 1,5$; $C_1 = 1,01$; $k_m = 3,62$
- canal 3: $b_{13}/a_1 = 0,88$; $L/b_{13} = 0,02$; $b_{23}/b_{13} = 1,5$; $C_1 = 1,02$; $k_m = 3,62$
- canal 4: $b_{14}/a_1 = 0,81$; $L/b_{14} = 0,02$; $b_{24}/b_{14} = 1,5$; $C_1 = 1,03$; $k_m = 3,62$
- canal 5: $b_{15}/a_1 = 0,75$; $L/b_{15} = 0,02$; $b_{25}/b_{15} = 1,5$; $C_1 = 1,03$; $k_m = 3,62$

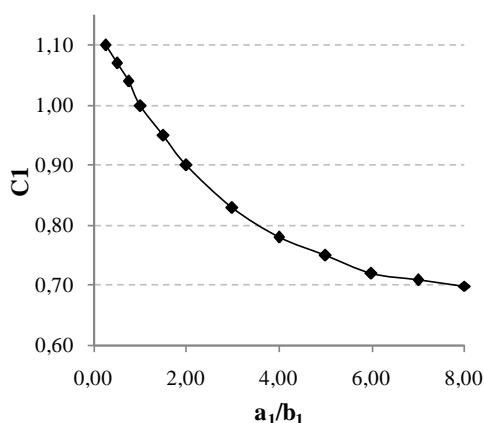


Figura 6 – Valores de C_1 em função de a_1/b_1 (adaptado de Idel'chik, 1961)

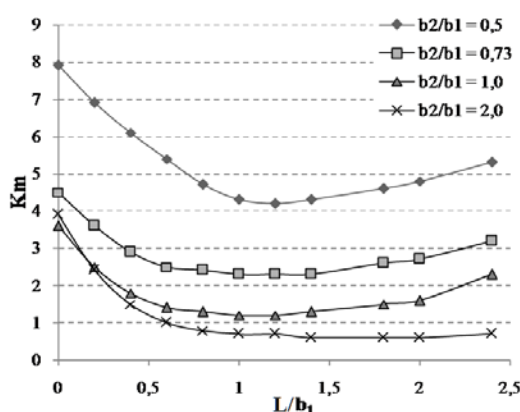


Figura 7 – Valores de K_m em função de L/b_1 e b_2/b_1 (adaptado de Idel'chik, 1961)

O coeficiente de perda de carga em cada curva 180° resulta igual $K = k_\Delta \times C_1 \times k_m$, e as perdas de carga são calculadas em função de V_{e1} , resultando:

- canal 1: $K = 4,31$; h_{v1} (1 curva) = 0,0146 m; h_{p1} (15 curvas) = 0,223 m
- canal 2: $K = 4,35$; h_{v2} (1 curva) = 0,0126 m; h_{p2} (14 curvas) = 0,179 m
- canal 3: $K = 4,39$; h_{v3} (1 curva) = 0,0109 m; h_{p3} (13 curvas) = 0,144 m
- canal 4: $K = 4,40$; h_{v4} (1 curva) = 0,0092 m; h_{p4} (12 curvas) = 0,112 m
- canal 5: $K = 4,36$; h_{v5} (1 curva) = 0,0078 m; h_{p5} (11 curvas) = 0,087 m

As perdas de carga nas curvas (h_{p1}) segundo Idel'chik (1961), as perdas de carga por atrito (h_{p2}) e os gradientes de velocidade médios (G_{mf}) foram calculados e os resultados dos gradientes de velocidade médios de são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Perdas de carga e gradiente médio de velocidade segundo Idel'chik (1961)

Canal	h_{p1} (m)	h_{p2} (m)	h_{pt} (m)	G_{fm} (s^{-1}) (Temp = $20^\circ C$)
1	0,2190	0,0038	0,2230	95,1
2	0,1764	0,0028	0,1790	85,2
3	0,1417	0,0021	0,1440	76,4
4	0,1104	0,0016	0,1120	67,4
5	0,0858	0,0012	0,0870	59,4

g) Comparação de resultados

Com base nos resultados obtidos nos itens e) e f), mostrados pelas Tabelas 2, 3 e 4, e utilizando-se a Equação 2, foram calculados os valores de K' em relação à velocidade de escoamento V_{e1} , de forma que, para o item f), utilizando a metodologia de Idel'chik (1961) os valores de K' variaram de 4,31 a 4,40, segundo o item e) para o

equacionamento proposto por Kawamura (1991) o valor de K' foi de 3,5 e a equação de Fair. et. al (1968) conduziu aos menores valores de K' , entre 1,51 e 1,53, resultando também nos menores valores de perda de carga e de gradientes de velocidade médios. Geralmente, tais diferenças não são visivelmente notadas devidas às baixas velocidades utilizadas para dimensionamento dos canais de floculação, pois os valores de gradiente de velocidade para floculadores com chicanas em ETAs comumente variam de 15 a 50 s^{-1} .

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no exemplo de cálculo e com o observado no caso real em chicanas verticais com escoamento ascendente e descendente, recomenda-se o uso da metodologia de Idel'chik (1960) ou de Kawamura (1991), em lugar da comumente usada Equação 1 de Fair et. al, (1968) para o dimensionamento de chicanas quando $Ve_2/Ve_1 \leq 2$. Nos casos em que $Ve_2/Ve_1 > 2$, os valores obtidos por qualquer metodologia são próximos, ficando a critério do projetista a escolha da equação, visando comparar os resultados obtidos e deixar a borda livre com folga. Em todos os casos, é prudente realizar a comparação entre os diferentes métodos de cálculo. Entretanto, aconselha-se a utilização da relação de Ve_2/Ve_1 maior que 2 em projetos de novas unidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 12216 - Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. ABNT, 18p., Rio de Janeiro, Brasil.
2. Di Bernardo, L., Dantas, A. D. B (2005). Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2a Ed., Editora RIMA, São Carlos, Brasil.
3. Di Bernardo, L., Dantas, A. D. B., Voltan, P. E. N. V. (2011). Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de águas. Ed. LDiBe, São Carlos, Brasil.
4. Fair, G. M., Geyer, J. C., Okun, D. A. (1968). Water and Wastewater Engineering – Vol. II: Water purification and wastewater treatment disposal. John Wiley and Sons, Inc., 1968, USA.
5. Haarhoff, J. (1998) Design of around-the-end hydraulics flocculators. J Water SRT, Aqua, v. 47, p: 142 - 152, London, U.K.
6. Idel'chik I.E.,(1960) Spravochnik po Gidravlicheskim Soprotivleniyam. Koeffitsienty Mestnykh Soprotivlenii i Soprotivleniya Treniya - 1 Edição - Gosudarstvennoe Energticheskoe Izdatel'stvo, Moskva-Leningrad, 1960 (versão em inglês).
7. Kawamura, S. (1991) Integrated design of water treatment facilities. John Wiley & Sons, New York, USA.
8. Swamee, P. K. (1996) Design of flocculating baffled channel. JEED - Proceedings ASCE, Vo. 122, n.1, p: 1046 - 1048, Nov. 1996 USA.
9. Schulz, C. R., Okun, D. A.(1984) Surface water treatment for communities in developing countries John Wiley & Sons, 297 p., USA.