

Floculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição de tamanho de partículas

Flocculation: considerations from the classical analysis and from direct evaluation of particle size distribution

Rodrigo Braga Moruzzi¹, André Luiz de Oliveira², Marcelo De Julio (*in memoriam*)³, Ricardo Henrique de Andrade Dutra⁴, Pedro Augusto Grava da Silva⁵

RESUMO

Este artigo apresenta algumas considerações sobre a floculação a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição de tamanho de partículas. Para tal, foram realizados experimentos em escala de bancada. Os resultados foram avaliados à luz da abordagem clássica, dada pelo adimensional número de Camp (GT) e pela cinética de agregação e ruptura, e da distribuição de tamanhos de partículas. Verificou-se que o emprego isolado do produto GT não é adequado para representar as variações de desempenho na floculação e que o modelo clássico de agregação e ruptura pode ser influenciado pela medida indireta de turbidez, bem como pelo uso da sedimentação como etapa intermediária. Por outro lado, a avaliação direta de desempenho por meio da distribuição de tamanhos de partículas, representada pela função contínua linearizada, pode constituir ferramenta promissora na avaliação dedicada da floculação.

Palavras-chave: floculação; número de Camp; agregação e ruptura; distribuição de tamanho de partículas.

ABSTRACT

This article presents some considerations on the flocculation from the classical analysis and direct evaluation of the particle size distribution. For this purpose, essays in bench scale were performed. The results were evaluated in the light of classical approach, given by the dimensionless number Camp (GT) and the kinetics of aggregation and breakage, as well as particle size distribution. It has been found that the use of GT isolated product is not suitable to represent the variations in flocculation performance and the classical model of aggregation and break-up can be biased by an indirect measurement of turbidity and sedimentation as an intermediate step. On the other hand, the direct evaluation of performance by particle size distribution, represented by linear continuous function, can be a promising tool for the evaluation of flocculation.

Keywords: flocculation; Camp number; aggregation and breakage; particle size distribution.

INTRODUÇÃO

A coagulação e a floculação em uma Estação de Tratamento de Água (ETA) configuram etapas que regem o sucesso das etapas seguintes. Enquanto na coagulação são desestabilizadas as partículas presentes no meio, após introdução de coagulante e agitação intensa (geralmente acima de 800 s^{-1}), na floculação são promovidos encontros entre as partículas desestabilizadas por meio de agitação lenta (geralmente abaixo de 80 s^{-1}). As interações entre partículas ocorrem em função de seu

movimento errático — devido à energia térmica (interações pericínéticas), do gradiente de velocidade no meio (interações ortocinéticas) e de suas diferentes velocidades de sedimentação (sedimentação diferencial). No tratamento de água de abastecimento, as dispersões coloidais apresentam partículas relativamente grandes, dificultando a interação pericínética, sendo, nesse caso, insignificante se comparada às interações ortocinética e por sedimentação diferencial. Segundo Thomas, Judd e Fawcett (1999), as primeiras teorias sobre a cinética da floculação foram

¹Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (USP). Professor do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" (UNESP) - Rio Claro (SP), Brasil.

²Doutor em Engenharia Civil pela (USP). Professor do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - Uberlândia (MG), Brasil.

³Doutor em Engenharia Civil pela (USP). Professor do Curso de Engenharia Civil do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) - São José dos Campos (SP), Brasil.

⁴Mestrando em Engenharia Civil pela UFU - Uberlândia (MG), Brasil.

⁵Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental pela UNESP - Rio Claro (SP), Brasil.

Endereço para correspondência: Rodrigo Braga Moruzzi - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro, Departamento de Planejamento Regional - Avenida 24 A, 1515 - Bela Vista - 13506-900 - Rio Claro (SP), Brasil - E-mail: rrmoruzzi@rc.unesp.br

Fonte de financiamento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp).

Recebido: 17/01/15 - **Aceito:** 13/08/15 - **Reg. ABES:** 144959

estabelecidas por Smoluchowski (1917), a partir da qual derivam as expressões clássicas de colisão em campo turbulento e, posteriormente, a cinética de agregação e ruptura. Entretanto, Smoluchowski faz uma série de simplificações para o equacionamento, a saber:

- a eficiência de colisão é única para todas as partículas;
- o regime de escoamento é laminar;
- as partículas são monodispersas;
- não ocorre ruptura de flocos previamente formados;
- todas as partículas têm forma esférica e permanecem assim após a colisão;
- as colisões envolvem apenas duas partículas.

Camp & Stein (1943) estenderam a proposta de Smoluchowski (1917) para interações ortocinéticas, introduzindo o conceito da raiz quadrada do gradiente médio de velocidade (G), a partir da taxa de dissipação de energia em campo turbulento, conforme Equação 1. O adimensional GT , dado pelo gradiente médio de velocidade (G) e pelo tempo de floculação (T), também conhecido como número de Camp, foi um parâmetro preliminar de projeto de unidades de floculação.

$$H(i,j) = \frac{1}{6} G (d_i + d_j)^3 \quad (1)$$

Em que:

i = partículas discretas de tamanho i ;

j = partículas discretas de tamanho j ;

$H(i, j)$ = taxa de colisão entre as partículas i e j (L^3T^{-1});

G = gradiente médio de velocidade no fluido (s^{-1}).

Na Equação 1 são contemplados somente os efeitos colisionais, negligenciando os aspectos cinéticos, tais como a erosão dos flocos devido às tensões de cisalhamento existentes. Argaman (1968) e Argaman e Kaufman (1970) *apud* Argaman (1971) desenvolveram uma expressão para avaliar o desempenho da floculação em fluxo contínuo, considerando os aspectos cinéticos, representados pelas constantes de agregação e de ruptura. Os autores descrevem que na unidade de floculação os dois mecanismos ocorrem simultaneamente. Por um lado as partículas primárias (partículas presentes na suspensão no tempo zero) são removidas por meio de sua incorporação aos flocos e por outro são desprendidas na suspensão pela quebra destes flocos.

A obtenção das constantes cinéticas para finalidade de projeto de floculadores a partir de ensaios em escoamento é onerosa e demorada. Assim sendo, Bratby, Miller e Marais (1977) apresentam metodologia para determinação das constantes a partir de reatores estáticos (Equação 2). Como controle, os autores assumem que o número de partículas primárias n pode ser representado pela turbidez remanescente do sobrenadante após longo período de sedimentação (N).

$$\frac{n_0}{n} = \left[\frac{K_B}{K_A} G + \left(1 - \frac{K_B}{K_A} G \right) e^{-K_A GT} \right]^{-1} \quad (2)$$

Em que:

n_0 = número inicial de partículas primárias antes da floculação após tempo longo de sedimentação (medido em termos de turbidez inicial da água – uT);

n = número de partículas primárias após tempo T de floculação e após longo período de sedimentação (medido como turbidez da água – uT);

K_A = constante cinética de agregação;

K_B = constante cinética de ruptura (s);

G = gradiente de velocidade médio (s^{-1});

T = tempo de mistura no reator (tempo de floculação) (s).

Assim, a análise clássica da floculação é constituída pelo emprego do produto GT e do modelo de agregação e ruptura, medido por meio da turbidez após sedimentação. Não foram abordados aspectos da teoria curvilínea, que considera os efeitos hidrodinâmicos e suas interferências nas forças de aproximação (teoria *DLVO*), pois de fato essas são pouco empregadas em projetos de sistemas.

Embora as abordagens clássicas tenham sido satisfatoriamente empregadas, a hipótese de sistema monodisperso de partículas esféricas tem sido questionada. Nesse sentido, o conhecimento das características físicas dos sólidos presentes no meio líquido surge como ferramenta potencial para o aprimoramento da etapa de concepção e de projeto de unidades de separação sólido-líquido (SANTOS *et al.*, 2004). Sabe-se que existe uma estreita relação entre tecnologia de tratamento, concentração e tamanho de partículas, tal como discutido em Wiesner, O'Melia e Cohon (1987), que apresentam as relações de diâmetros médios volumétricos, concentração de partículas e suas relações com tecnologias de tratamento que empregam coagulação. Descrita por Tchobanoglous (1995) como a próxima fronteira do conhecimento, a caracterização física das partículas, tal como a distribuição de tamanho (*DTP*), apresenta-se como promissora ferramenta para projeto e operação de sistemas de tratamento.

Segundo Crittenden (2005), a distribuição da frequência do número de partículas $F(d)$ pode ser expressa como a concentração do número de partículas, dN , no que diz respeito à fração incremental no tamanho, $d(dp)$, representada pela Equação 3.

$$F(d_p) = \frac{dN}{d(d_p)} \quad (3)$$

Em que:

$F(d_p)$ = função que define a frequência de distribuição de partículas (d_1, d_2, d_3, \dots);

dN = concentração do número de partículas em termos da variação incremental dos diâmetros das partículas ($d(d_p)$);

$d(d_p)$ = variação incremental dos diâmetros das partículas.

Os autores relatam que a frequência de distribuição de partículas em águas naturais aumenta com a diminuição do diâmetro da partícula e que normalmente segue a equação de distribuição em forma de potência (Equação 4).

$$\frac{dN}{d(d_p)} = A(d_p)^\beta \approx \frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \quad (4)$$

Em que:

A = coeficiente de densidade da equação de potência;

(d_p) = diâmetro da partícula;

β = coeficiente de inclinação da equação de potência.

Para determinação dos coeficientes A e β , os quais representam a forma da distribuição dos tamanhos das partículas, foi utilizada a forma linearizada da Equação 4.

Neste sentido, este trabalho buscou analisar a floculação por meio do emprego da *DTP* como medida de desempenho da floculação, em paralelo a análise do número de Camp (*GT*) e do desempenho da floculação/sedimentação, estabelecidos como parâmetros secundários de controle.

METODOLOGIA

A água de estudo foi preparada em laboratório a partir de solução de caulinita com base na metodologia proposta em Pádua (1994) e Yukselen e Gregory (2004). A turbidez da solução mãe foi de 5000 ± 200 uT, sendo que para água de estudo eram necessários 10 mL para produção de 2 L de água com turbidez de 25 ± 2 uT. Foi construído o diagrama de coagulação a partir de curvas de isoefficiência de turbidez para ensaios com o sulfato de alumínio comercial ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$) em ampla faixa de pH de coagulação (5 ≤ pH ≤ 9). Foram avaliadas as condições de sedimentabilidade dos flocos para valores de *GT* fixo em 72.000, alterando-se os valores individuais de suas variáveis G_f e T_f , em função da *DTP* e da relação entre a turbidez inicial da água (N_0) e a turbidez remanescente da água tratada (N). Assim sendo, a eficiência de tratamento após sedimentação foi estabelecida em termos de N_0/N . Os pares de valores de G_f e T_f foram adotados na condição de equilíbrio dinâmico dos flocos, determinada conforme modelo proposto por Bratby, Miller e Marais (1977). Para análise da eficiência de remoção de turbidez foram avaliadas as velocidades sedimentação: 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm.min⁻¹. Para emprego da Equação 2 foram utilizados os valores de turbidez da água considerando-se a velocidade de sedimentação de

0,5 cm.min⁻¹, visando minimizar a interferência de partículas floculentas na avaliação da cinética de partículas primárias. As constantes cinéticas de agregação e ruptura foram obtidas conforme descrito em Di Bernardo, Botari e Sabogal-Paz (2005).

A metodologia de aquisição e tratamento de imagens foi adaptada de Moruzzi e Reali (2007) e de Oliveira *et al.* (2015a). Na realização deste trabalho foi utilizado equipamento de bancada Jarteste conjugado à câmera *Vision Research Miro EX4* acoplada a um conjunto de lentes permitindo resolução de 840 x 680 com tamanho de pixel de 0,119 mm (Figura 1). O tratamento das imagens foi realizado com auxílio do software *Image-Pro Plus*. A iluminação utilizada consistiu em plano de laser de 2.000 mW de potência com comprimento de onda de 532 nm e com 2 mm de espessura, ajustado ao foco do sistema de captura de imagens.

Para análise da distribuição de tamanho de partículas (*DTP*) as imagens foram adquiridas nos 10 segundos finais dos tempos de floculação correspondentes, a uma taxa de aquisição de 10 Hz. Análises preliminares indicaram desvio amostral da ordem de 0,1 mm, permitindo inferir sobre o erro amostral a partir da hipótese de população infinita. Assim, para os 138.305 flocos analisados pode-se estimar o erro amostral na faixa de 0,3 para 95% de confiança.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da construção do diagrama de coagulação foi adotado o par de valores dados por pH de 7,5 e dosagem de sulfato de alumínio em base seca (*DA*) de 2,0 mgAl³⁺.L⁻¹. As mesmas condições de coagulação foram aplicadas em todos os ensaios subsequentes de floculação apresentados nesse item.

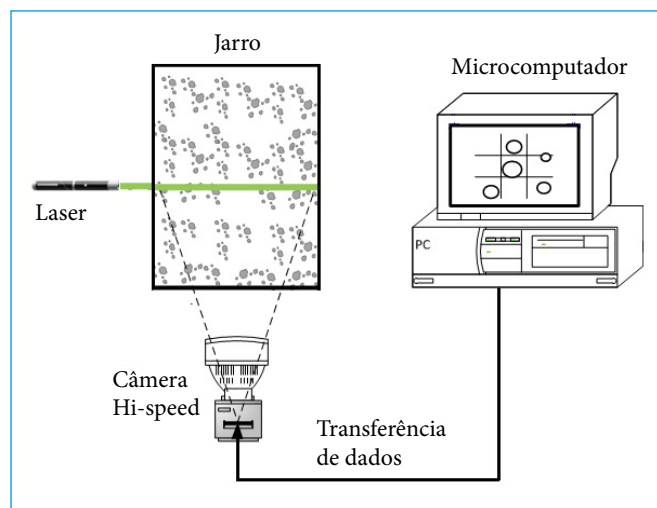


Figura 1 – Esquema do aparato experimental (Jarteste, Microcomputador, Câmera digital, Laser).

Os resultados buscaram verificar a ocorrência do equilíbrio dinâmico, pressuposto da Equação 2, as curvas de eficiência de floculação/sedimentação e o desempenho da floculação, por meio da avaliação da *DTP* e do parâmetro β .

A Figura 2 ilustra a tendência de estabilização da floculação para cada um dos valores de G_f investigados. O equilíbrio dinâmico, representado pelas forças promotoras da agregação e da ruptura dos flocos, foi bem definido pelos experimentos e os valores das constantes cinéticas correspondentes (K_A e K_B) puderam ser determinadas. Os valores obtidos para os parâmetros cinéticos podem ser considerados estatisticamente iguais para 95% de confiança, pois estes se referem ao estudo de uma mesma água (preparada em condições controladas) e submetida

à mesma condição de coagulação química. Merece ser destacado que foram avaliados os valores de eficiência, traduzidos em termos de N_0/N , apenas para os dados obtidos à V_s de $0,5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, região de eficiência de floculação/sedimentação para turbidez demarcada na Figura 3.

Ressalta-se que o modelo proposto por Bratby (1981) deve ser aplicado ao balanço de massa de partículas primárias, situação não observada considerando-se partículas remanescentes na água para V_s de $0,5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, devido à presença de partículas floculentas. Entretanto, mesmo utilizando-se o parâmetro turbidez, que não é parâmetro específico, e não eliminando o ruído causado pelo mecanismo de sedimentação diferencial, o modelo pode ser ajustado. Além disso, percebe-se nitidamente a tendência de equilíbrio dinâmico a partir dos primeiros minutos de floculação, em que o desempenho

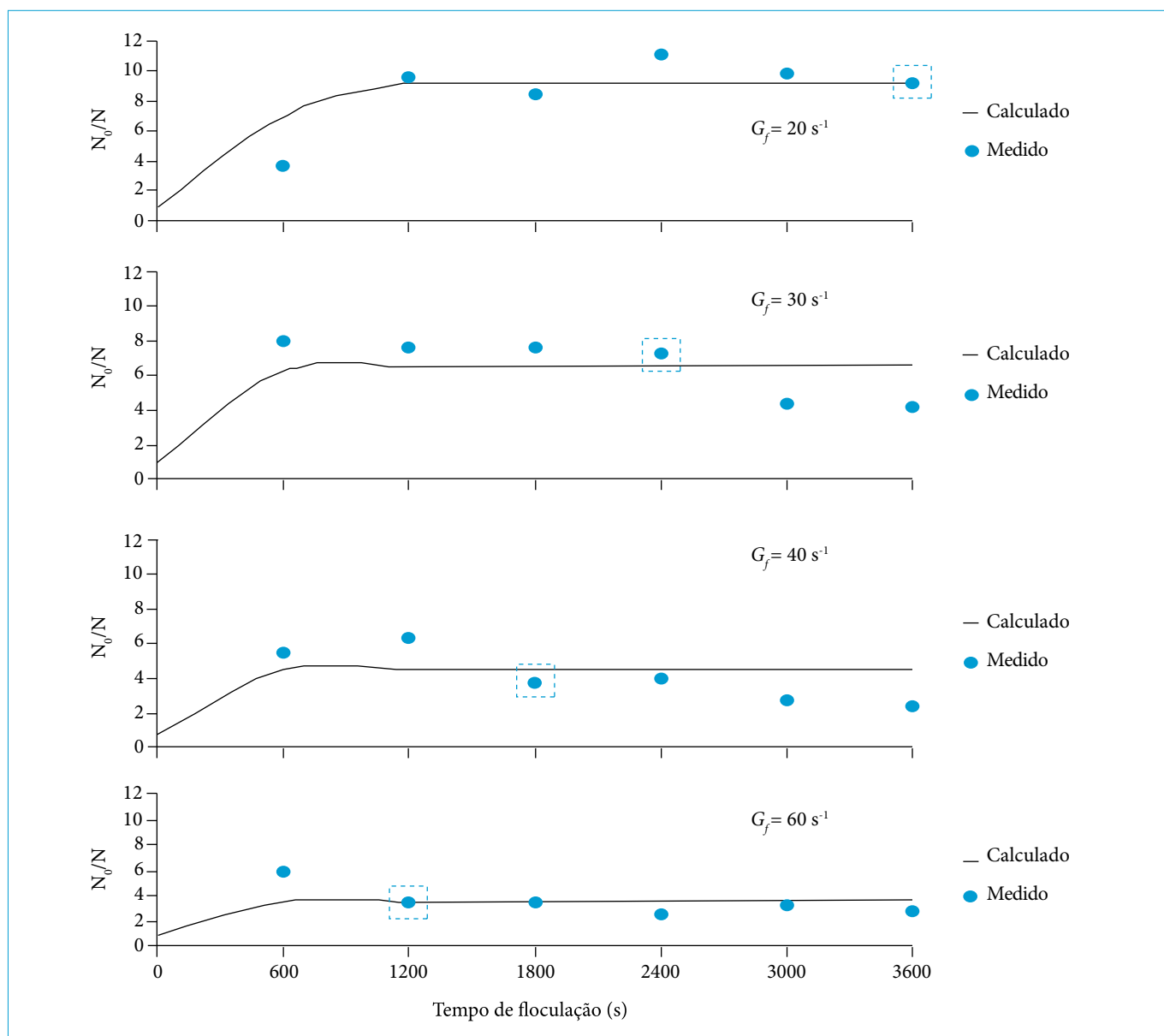


Figura 2 - Aplicação da Equação 2 para os dados obtidos à V_s de $0,5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, $K_A = 2,74 \times 10^{-4} \pm 2,02 \times 10^{-6}$ e $K_B = 1,41 \times 10^{-6} \pm 8,76 \times 10^{-8}$ para intervalo de confiança de 95%. Os pontos em destaque correspondem aos valores de GT de 72.000, utilizados nas avaliações subsequentes.

da floculação seguida da sedimentação, traduzido em termos de remoção de turbidez, torna-se dependente apenas do valor de G_f .

Nota-se na Figura 3 que para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ e $T_f = 3.600 \text{ s}$, a eficiência de remoção de turbidez foi superior àquelas obtidas para os demais pares de valores. Como já relatado por Argaman (1971), a quebra dos flocos devido ao aumento do G_f altera suas características, tornando o parâmetro de controle GT insuficiente para descrever adequadamente os efeitos da energia e do tempo de floculação.

Dessa forma, verifica-se que GT , V_s e a medida de turbidez influenciam no desempenho e na análise da floculação/sedimentação. De fato, os parâmetros de projeto da floculação (G_f e T_f) são determinantes no desempenho da floculação e devem ser empregados para controle do processo. Todavia, a análise do processo deve ser realizada por meio de medida direta e independente, tal como a DTP .

A Figura 4 apresenta exemplos de imagens adquiridas dos flocos formados nas diferentes condições investigadas, nas quais ficam

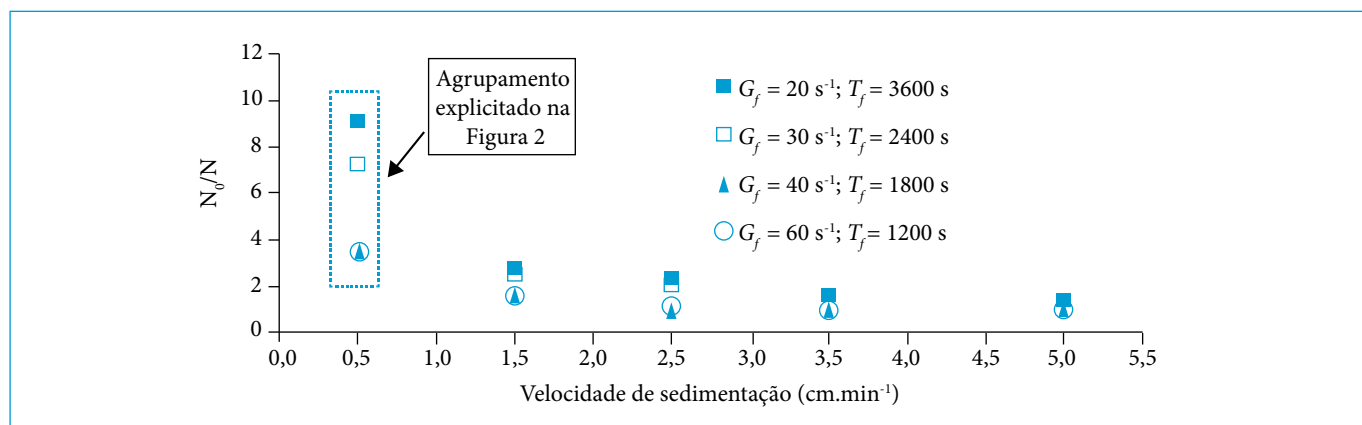


Figura 3 - N_0/N para diferentes produtos GT .

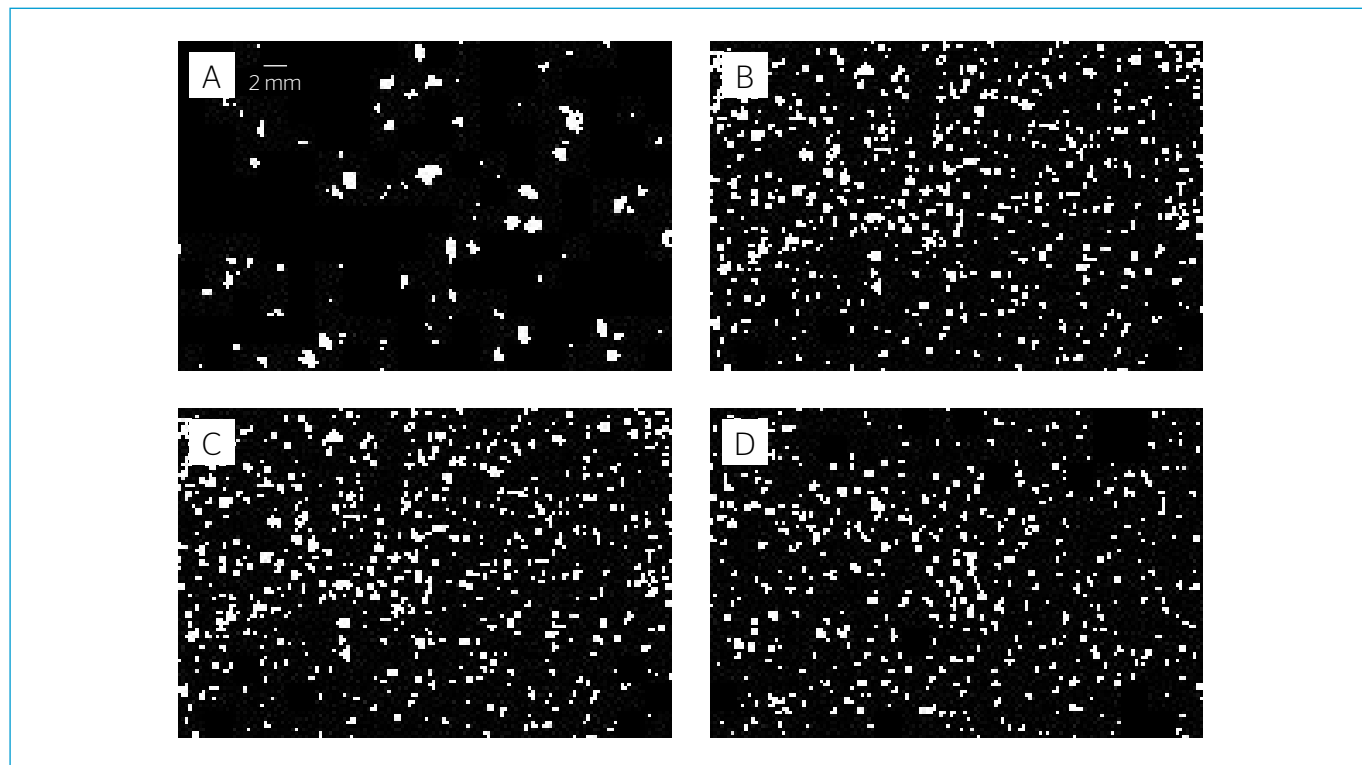


Figura 4 - Imagens binarizadas dos flocos formados em diferentes pares de valores de G_f e T_f (A) $T_f = 3.600 \text{ s}$ e $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$; (B) $T_f = 2.400 \text{ s}$ e $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$; (C) $T_f = 1.800 \text{ s}$ e $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$; (D) $T_f = 1.200 \text{ s}$ e $G_f = 60 \text{ s}^{-1}$.

evidentes os efeitos da alteração do gradiente de velocidade para um valor fixo do GT . A Figura 4A ilustra os flocos obtidos com maior tempo de floculação e menor gradiente de velocidade (maiores e em menor número) e a Figura 4D ilustra os flocos formados com menor tempo de floculação e maior gradiente de velocidade (menores e em maior número).

As curvas de DTP , obtidas a partir do tratamento do grupo de 100 imagens para cada uma das situações exemplificadas na Figura 4, são ilustradas na Figura 5. Pode-se verificar diferentes DTP sendo que, para o valor de G_f de 20 s^{-1} , houve ocorrência de partículas de maior diâmetro. A Figura 6 apresenta as funções contínuas de DTP em sua forma linearizada e seus parâmetros A e β descritos na Tabela 1 para cada um dos G_f estudados. O parâmetro β representa o coeficiente angular da função contínua linearizada e pode ser extraído diretamente das equações ilustradas na Figura 6, constituindo o parâmetro multiplicativo de $\text{Log}(dp)$.

Já o parâmetro A representa o intercepto da função contínua com o eixo das ordenadas, representado por $\text{Log}dN/d(d_p)$. O valor do parâmetro A representa o número de flocos avaliados. Já a inclinação da reta, representada por β , é uma medida da quantidade relativa de partículas em cada faixa de tamanho. Não faz parte do escopo desse artigo a avaliação do ajuste dos dados discretos à função contínua de distribuição. Para essa avaliação, sugere-se o trabalho de Oliveira *et al.* (2015b).

Tabela 1 - Parâmetros da equação da distribuição de tamanho de partículas linearizada.

$G_f(\text{s}^{-1})$	$ \beta $	$\text{Log}(A)$	R^2
20	1,7	2,8	0,56
30	3,5	3,3	0,87
40	3,8	3,4	0,91
60	4,3	3,5	0,84

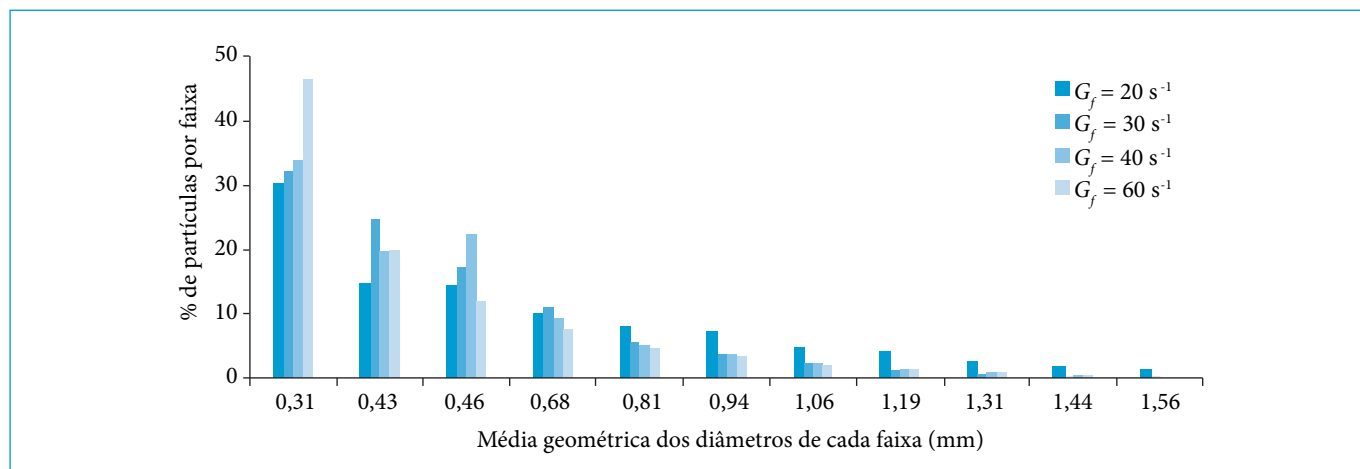


Figura 5 - Distribuição do tamanho de partículas para $G_f = 20\text{ s}^{-1}$; $G_f = 30\text{ s}^{-1}$; $G_f = 40\text{ s}^{-1}$ e $G_f = 60\text{ s}^{-1}$.

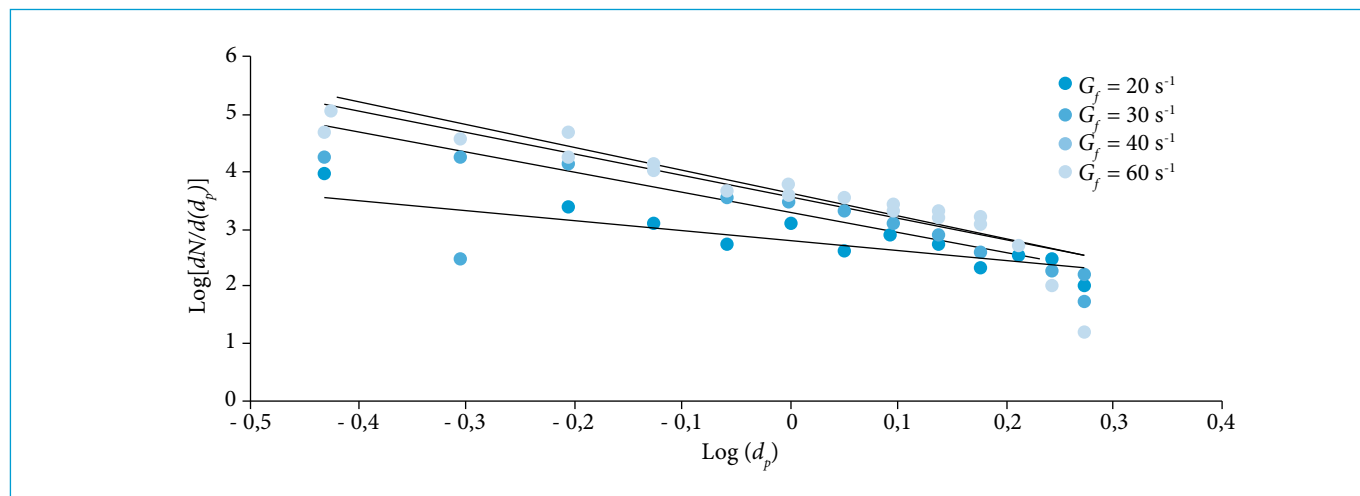


Figura 6 - Dados linearizados dos ensaios sob $G_f = 20\text{ s}^{-1}$; $G_f = 30\text{ s}^{-1}$; $G_f = 40\text{ s}^{-1}$ e $G_f = 60\text{ s}^{-1}$ para obtenção dos coeficientes A e β .

Conforme Crittenden (2005), valores negativos de β representam o domínio de partículas menores, que é o caso representado na Figura 5. De fato, observando a Figura 4 pode-se perceber uma tendência mais acentuada de domínio das partículas de maior diâmetro para $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, quando comparado às demais. O valor de $\beta_{20} (1,7)$, apresentado na Tabela 1, é inferior em módulo se comparado com os obtidos para os demais gradientes, crescentes, com o aumento do G_f . Nesse último há uma concentração de partículas de menor diâmetro bem superior à obtida para G_f de 20 s^{-1} , fato que pode explicar a diferença de desempenho identificada nos ensaios de sedimentação. Observa-se também o aumento do número de partículas, representado por $\log(A)$, com o aumento do G_f , resposta coerente, pois o número inicial de partículas primárias para todos os experimentos foi o mesmo.

A partir da análise clássica e da avaliação direta de distribuição de tamanho de partículas pode-se sugerir que o emprego de parâmetro direto de desempenho de floculação, sem interferência de medidas e etapas intermediárias, poderá minimizar os ruídos na avaliação de desempenho da floculação, bem como aprimorar o entendimento dos fenômenos a ela associados, permitindo o aperfeiçoamento de projetos de sistemas de tratamento que empregam a floculação. Com isso, equipamentos de monitoramento contínuo de floculação, tal como apresentado em Moruzzi, Oliveira e Julio (2015), podem ser instalados nos floculadores, abrindo uma janela para monitoramento e controle minucioso do processo.

CONCLUSÕES

Neste artigo o desempenho da floculação foi avaliado por meio de ferramental clássico, quais sejam: número de Camp (GT) e modelo clássico de agregação e ruptura para medidas de turbidez após sedimentação. Adicionalmente, foi avaliada a distribuição de tamanho de partículas (DTP) e seus parâmetros representativos (A e β).

Verificou-se que o emprego isolado do produto GT não é adequado para representar as variações de desempenho e que o modelo clássico de agregação e ruptura pode ser influenciado pela medida indireta de turbidez, bem como pelo uso da sedimentação como etapa intermediária.

Por outro lado, a avaliação direta de desempenho por meio da DTP , representada pela função contínua linearizada, pode constituir ferramenta promissora na avaliação dedicada da floculação.

Trabalhos futuros devem ser realizados visando confirmar a extensão da aplicação desse ferramental, bem como visando avaliar o efeito temporal da DTP frente à diferentes condições de mistura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) pelo apoio financeiro (Processos FAPESP 2010/50694-0, 2013/21355-1, 2013/01634-3 e 2013/25641-9), ao ITA e à Unesp, Campus de Rio Claro, pela infraestrutura disponibilizada. Dedicam o trabalho em memória ao Prof. Dr. Marcelo De Julio.

REFERÊNCIAS

- ARGAMAN, Y. & KAUFMAN, W.J. (1970) Turbulence and flocculation. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v. 96, n. 2, p. 223-241.
- ARGAMAN, Y. (1971) Pilot-plant studies of flocculation. *Journal American Water Works Association*, v. 63, n. 12, p. 775-777.
- ARGAMAN, Y. (1968) *Turbulence in Orthokinetic Flocculation*. Tese (Doutorado) - University of California, Berkeley.
- BRATBY, J.; MILLER, M.W.; MARAIS, G.V.R. (1977) Design of flocculation systems from batch test data. *Water SA*, v. 3, n. 4, p. 173-182.
- BRATBY, J.R. (1981) Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems. *Journal American Water Works Association*, v. 73, n. 6, p. 318-325.
- CAMP, T.R. & STEIN, P.C. (1943) Velocity gradients and internal work in fluid motion. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, v. 85, p. 219-237.
- CRITTENDEN, J.C. (2005) *Water Treatment: principles and design*. 2nd ed. New Jersey: Jon Wiley & Sons, Inc., 1948 p.
- DI BERNARDO, L.; BOTARI, A.; SABOGAL-PAZ, L.P.S. (2005) Uso de modelação matemática para projeto de câmaras mecanizadas de floculação em série em estações de tratamento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, n. 1, p. 82-90.
- MORUZZI, R.B. & REALI, M.A.P. (2007) Método para determinação de distribuição de tamanho de micropólulas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, n. 3, p. 273-283.
- MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, A.L.; JULIO, M. de. (2015). Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração. *Revista DAE*, v. 63, p. 30-41.
- OLIVEIRA, A.L.; MORENO, P.; SILVA, P.A.G.; JULIO, M. de; MORUZZI, R.B. (2015a) Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the removal of particulate matter. *Desalination and Water Treatment* (Print), v. 2015, p. 112.
- OLIVEIRA, A.L.; MORENO, P.; JULIO, M. de; MORUZZI, R.B. (2015b). Avaliação de Parâmetros Representativos da Distribuição de Tamanho de Partículas Presentes em Coleções Hídricas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, p. 2084-1092.

PÁDUA, V.L. (1994) *Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de floculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de reatores estáticos*. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos.

SANTOS, H.R.; PRADO, G.S.; VIDAL, C.M.S.; MORUZZI, R.B.; CAMPOS, J.R. (2004) Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 9, n. 4, p. 291-300.

SMOLUCHOWSKI, M. (1917) Versuch einer mathematischen Theorie der Koagulationskinetik kolloid Lösungen. *Zeitschrift Fuer Physikalische Chemie*, v. 92, p. 129-168.

TCHOBANOUGLOUS, G. (1995) Particle size characterization: the next frontier. *Journal of Environmental Engineering*, v. 121, n. 12, p. 844-845.

THOMAS, D.N.; JUDD, S.J.; FAWCETT, N. (1999) Flocculation modelling: a review. *Water Research*, v. 33, n. 7, p. 1579-1592.

WIESNER, M.; O'MELIA, C.; COHON, J. (1987) Optimal water treatment plant design. *Journal of Environmental Engineering*, v. 113, n. 3 p. 567-584.

YUKSELEN, M.A. & GREGORY, J. (2004) The reversibility of floc breakage. *International Journal of Mineral Processing*, v. 73, n.2-4, p. 251-259.