

# Análise da floculação por meio da distribuição do tamanho de partículas

• **Data de entrada:**  
12/09/2017


• **Data de aprovação:**  
17/05/2018

*Analysis of flocculation by means of the particle size distribution*

Yuri Cardoso Mendes<sup>1</sup> | Luan Serafim Mendes Gonçalves<sup>1</sup> | Ricardo Henrique de Andrade Dutra<sup>1</sup> | DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.002>  
Rodrigo Braga Moruzzi<sup>2</sup> | André Luiz de Oliveira<sup>\*1</sup>

## ORCID ID

Mendes Y.C.  <https://orcid.org/0000-0001-6563-8767>

Gonçalves, L.S.M.  <https://orcid.org/0000-0003-4549-7869>

Dutra R.H.A.  <https://orcid.org/0000-0001-6143-0416>

Moruzzi R. B.  <https://orcid.org/0000-0002-1573-3747>

Oliveira A.L.  <https://orcid.org/0000-0002-6661-7308>

## Resumo

Neste trabalho foi investigada a evolução da distribuição de tamanho de partículas no processo de floculação por meio de duas funções de distribuição contínuas distintas. A coagulação e a floculação foram estudadas em escala de bancada usando como coagulantes o sulfato de alumínio, cloreto férrico e cloreto de polialumínio, sob diferentes gradientes de velocidade médios e tempos de floculação. O acompanhamento do processo foi feito por meio de aquisição e análise de imagens dos flocos obtidos para cada coagulante em cada gradiente médio de floculação nos tempos de floculação de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos. Os resultados apresentados permitem concluir que o parâmetro ajustável da função Gama pode ser usado no acompanhamento da evolução da distribuição de tamanho de partícula e, a exemplo do parâmetro  $\beta$ , pode ser empregado em futuros estudos de modelagem do processo de floculação.

**Palavras-chave:** Tratamento de água. Floculação. Análise de imagem.

## Abstract

*The evolution of the particle size distribution in flocculation process was performed by two different distribution functions. Coagulation and flocculation studies were developed in bath essays using aluminum sulfate, ferric chloride and polyaluminium chloride under different velocity gradients and flocculation times. Image analysis was applied to monitoring the process in each one of the velocity gradient at the flocculation times of 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 30, 40, 50 and 60 minutes. The results presented showed that the adjustable parameter of the Gamma function can be used to follow the evolution of the particle size distribution and, like the parameter  $\beta$ , can be used in future modeling studies of the flocculation process.*

**Keywords:** Drinking water treatment. Flocculation. Image analysis.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Civil. Uberlândia (MG), Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Campus de Rio Claro - Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE). Rio Claro (SP), Brasil.

\*Autor correspondente: [andreoliveirafeciv@ufu.br](mailto:andreoliveirafeciv@ufu.br).

## 1 INTRODUÇÃO

Grande parte das Estações de Tratamento de Água (ETA) utilizam os processos de coagulação e floculação visando preparar o material primário para a separação sólido-líquido subsequente.

A coagulação desestabiliza o material coloidal, possibilitando sua agregação durante a floculação. Assim, a floculação altera o tamanho das partículas primárias com a promoção de choques controlados, sendo possível avaliar seu desempenho por meio da análise da distribuição do tamanho de partículas (DTP).

A turbidez é em geral empregada para avaliação da floculação. Todavia, seu uso traz limitações diversas na avaliação e no desempenho dedicado da floculação (MORUZZI, 2014). Diversos trabalhos têm mostrado o potencial do uso da DTP para acompanhamento direto do processo de floculação e seus efeitos na separação sólido-líquido, tais como Lawler (1997), Santos et al. (2004), Moruzzi (2005), Crittenden et al. (2005), Gregory (2009), Jarvis, Gregory e Parsons (2005), Moruzzi e Reali (2007, 2010 e 2014), Moruzzi e Oliveira (2013), Moruzzi, Oliveira e De Julio (2015), Moruzzi et al. (2016) e Moruzzi, Manetta e Oliveira (2017).

A distribuição discreta de agregados pode ser usada para obtenção dos parâmetros ajustáveis de funções contínuas, sendo a função de distribuição de tamanho importante para a modelagem do comportamento do material particulado frente às perturbações do sistema.

Nesse sentido, 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,  $d(dp)$ . Essa relação é expressa pela Eq. (1), conforme Crittenden et al. (2005).

$$F(dp) = \frac{dN}{d(dp)} \quad (1)$$

Em que:  $F(dp)$  é a função que define a frequência de distribuição de partículas,  $dN$  é a concentração do número de partículas em termos da variação incremental dos diâmetros das partículas e  $d(dp)$  é a variação incremental dos diâmetros das partículas.

A frequência da distribuição de partículas diminui à medida que aumenta o diâmetro da partícula, tal como expressa a Eq. (2).

$$\frac{dN}{d(dp)} = A(dp)^{-\beta} \approx \frac{\Delta N}{\Delta dp} \quad (2)$$

Em que:  $A$  é o coeficiente da equação de potência,  $dp$ , o diâmetro da partícula, e  $\beta$ , o coeficiente de inclinação da equação de potência.

A forma linearizada da Eq. (2) pode ser usada para ajustar os parâmetros de interesse, conforme explícito na Eq. (3).

$$\log \left[ \frac{\Delta N}{\Delta(dp)} \right] = -\beta \log(dp) + \log A \quad (3)$$

Segundo Moruzzi (2014) e Oliveira et al. (2015), é possível utilizar o parâmetro  $\beta$  para acompanhamento da floculação, sendo que valores menores, em módulo, indicam uma distribuição mais homogênea de flocos de diferentes tamanhos e sugere uma melhor eficiência no processo de floculação.

De acordo com Tse et al. (2011), métodos de análise se tornam mais robustos quando os dados experimentais se adequam a um tipo de distribuição conhecido, e a distribuição Gama se torna uma opção interessante neste sentido, por ser flexível e se adequar a muitos tipos de distribuição com um número pequeno de parâmetros ajustáveis. A função de densidade de probabili-

dade Gama pode ser expressa pela Eq. (4), sendo que as variáveis  $\chi$ ,  $\alpha$ ,  $\beta_1$  devem ser maiores que 0.

$$f(\chi, \alpha, \beta_1) = \frac{1}{\beta_1^\alpha \Gamma(\alpha)} \chi^{\alpha-1} e^{-\frac{\chi}{\beta_1}} \quad (4)$$

Em que:  $\chi$  é a variável de interesse,  $\alpha$ , o parâmetro de forma,  $\beta_1$ , o parâmetro de escala, e  $\Gamma(\alpha)$ , a função Gama, que é definida pela Eq. (5).

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (5)$$

Neste artigo, foi verificada a aplicabilidade do uso dos parâmetros das funções descritas para acompanhamento da evolução da floculação.

## 2 METODOLOGIA

A água de estudo foi obtida em laboratório a partir de solução de caulinita, preparada conforme procedimentos adotados por Pádua (1994) e Yukselen e Gregory (2004). A solução de caulinita foi adicionada à água deionizada até alcance da turbidez de  $6,0 \pm 2$  uT.

Foram utilizados três diferentes coagulantes: sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ), cloreto férrico ( $FeCl_3$ ) e cloreto de polialumínio (PAC). Para determinar o par de valores de pH e dosagem de coagulante, foram elaborados diagramas de coagulação para cada um deles, utilizando-se o equipamento de bancada *jar test*. Os valores ótimos alcançados foram pH de 6,5, 6,15 e 6,2, para concentrações de 2,5 mg de  $Al^{3+}/L$ , 5,2 mg de  $Fe/L$  e 3,36 mg de  $Al/L$  para o sulfato de alumínio, cloreto férrico e PAC, respectivamente.

A avaliação da DTP foi feita realizando-se experimentos de floculação com os diferentes coagulantes. A mistura rápida foi promovida com gradiente de velocidade (G) de  $1000 s^{-1}$  e os gradientes de velocidade médios de mistura lenta foram de 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e  $120 s^{-1}$ .

A técnica de análise de imagens foi usada para avaliação dos flocos, conforme descrito em Moruzzi (2005), Moruzzi e Reali (2007), Oliveira et al. (2015) e Moruzzi et al. (2017). Para obtenção das imagens dos flocos foi utilizada câmera Nikon, modelo D5500RM, de resolução máxima de  $6000 \times 4000$  pixels com tamanho de pixel de 0,012 mm. A iluminação utilizada consistiu em plano de luz laser com potência de 35000 mW, ajustada ao foco do sistema de captura de imagens.

Para o acompanhamento da evolução da DTP ao longo do tempo, foram obtidas 40 imagens ao longo de cada um dos dez primeiros minutos de floculação e aos 15, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos de floculação.

O tratamento e a análise das imagens obtidas foram realizados por meio do software Image Tool 3.0, tendo como base os procedimentos descritos em Moruzzi (2005). O parâmetro dimensional utilizado neste estudo foi o diâmetro de Feret, que equivale ao diâmetro de um círculo com a mesma área da partícula, calculado, pelo software, conforme a Eq. (6).

$$D_f = \sqrt{\frac{4A_f}{\pi}} \quad (6)$$

Sendo  $D_f$  o diâmetro de Feret e  $A_f$  a área do floco.

Os flocos foram classificados em 16 classes de tamanho, com amplitude entre as classes de 0,0817 mm. Posteriormente, foi possível determinar os parâmetros das funções contínuas das Eq. 3, 4 e 5.

### 3 RESULTADOS

Os resultados indicam a predominância da formação de flocos nos primeiros minutos, em comparação à ruptura, seguida de estabilização. Após os 10 minutos de floculação houve redução da quantidade de flocos de maiores tamanhos, sugerindo que boa parte desses flocos de grandes dimensões passa por processos de ruptura, distribuindo-se por classes de tamanho menores, indicando tendência à estabilização da DTP. Nesse sentido, o estudo mostra que durante a floculação as partículas passam por etapas de crescimento, ruptura, reformação e estabilização, como sugerem diversos autores como Spicer e Pratsinis (1996), He et al. (2011), Gregory (2009), Moruzzi et al. (2016) e Moruzzi et al. (2017).

A avaliação do parâmetro  $\beta$  da Eq. 3 para acompanhamento direto do desempenho da floculação foi proposta e validada em Moruzzi (2014). Neste artigo, o parâmetro  $\beta$  também foi usado como referência para análise da evolução do parâmetro  $\alpha$  da Eq. 5, permitindo avaliar a evolução da sensibilidade de  $\alpha$  por analogia.

O parâmetro  $\beta$  representativo da DTP evoluiu com a média dos diâmetros dos flocos ao longo do tempo de floculação. Na Fig. 1 verifica-se a evolução do diâmetro de Feret médio e do parâmetro  $\beta$  com predominância da agregação nos primeiros 10 minutos, seguida de estabilização, como supracitado. Resultados semelhantes foram observados para os três coagulantes avaliados com etapas razoavelmente bem definidas de crescimento, ruptura e estabilização dos flocos. Observou-se que, para valores de  $G$  mais eleva-

dos, os patamares de estabilização foram alcançados mais rapidamente.

A Fig. 2 mostra os valores de  $\beta$  calculados a partir da média aritmética dos valores obtidos nos tempos de floculação de 30, 40, 50 e 60 minutos, considerando-se o alcance do patamar de estabilização a partir de 30 minutos.

A avaliação do  $\beta$  mostra que, para os flocos formados com sulfato de alumínio, gradientes mais elevados conduzem, com comportamento bem definido, a valores maiores de  $\beta$ , ou seja, a maior concentração de flocos nas primeiras classes, o que sugere que o impacto da ruptura de flocos no processo de floculação com sulfato de alumínio é mais significativa à medida que aumenta a intensidade da mistura. Por outro lado, para os flocos formados com cloreto férrico e PAC, os menores valores de  $\beta$  foram observados em gradientes intermediários, sugerindo que o aumento do gradiente, até determinado limite, favoreceu a agregação em detrimento da ruptura. Entretanto, a partir do gradiente de  $80 \text{ s}^{-1}$ , os valores de  $\beta$  decrescem, o que sugere a prevalência das tensões de ruptura, com deslocamento da curva de DTP para o sentido das partículas de menores dimensões. Nan e He (2012) também investigaram o processo de floculação utilizando o PAC como coagulante e chegaram a resultados semelhantes, com os maiores diâmetros médios dos flocos sendo observados em gradientes médios de floculação próximos de  $60 \text{ s}^{-1}$ . Lembra-se que o parâmetro  $\beta$  é utilizado com mais êxito na representação de distribuições de frequência unimodais e monotônicas, conforme descrito em Moruzzi et al. (2017).

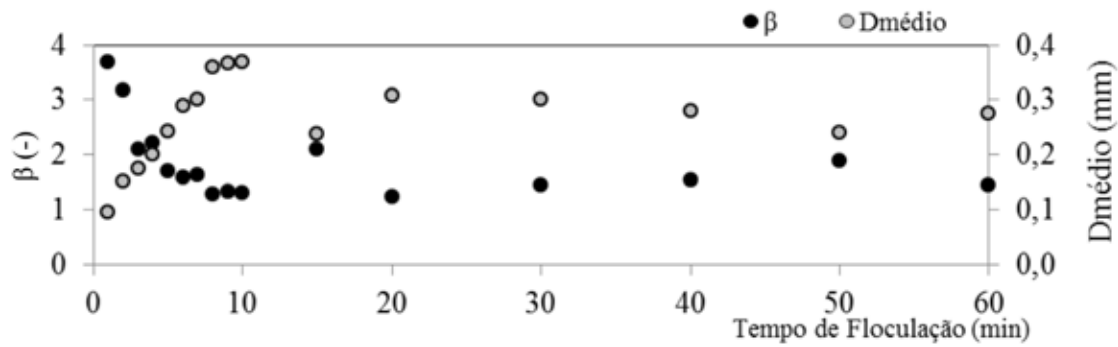


Figura 1: Evolução do diâmetro médio e  $\beta$  para o sulfato de alumínio com  $G = 20 \text{ s}^{-1}$

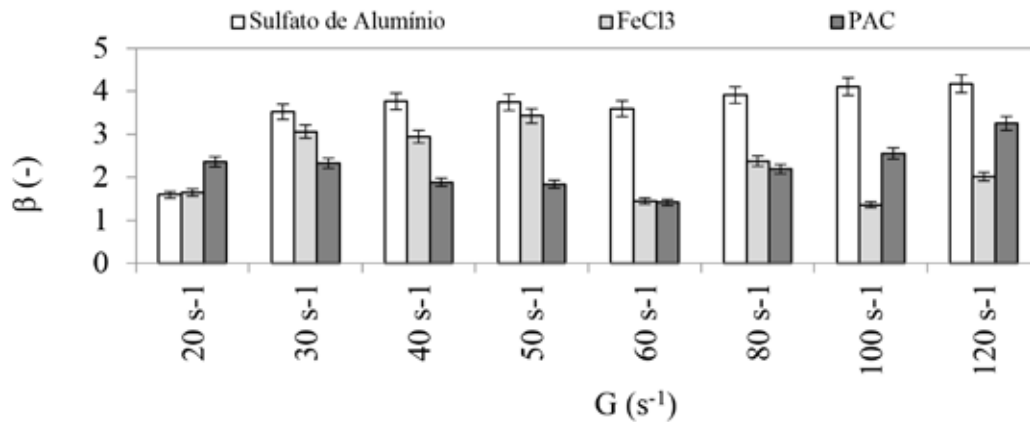
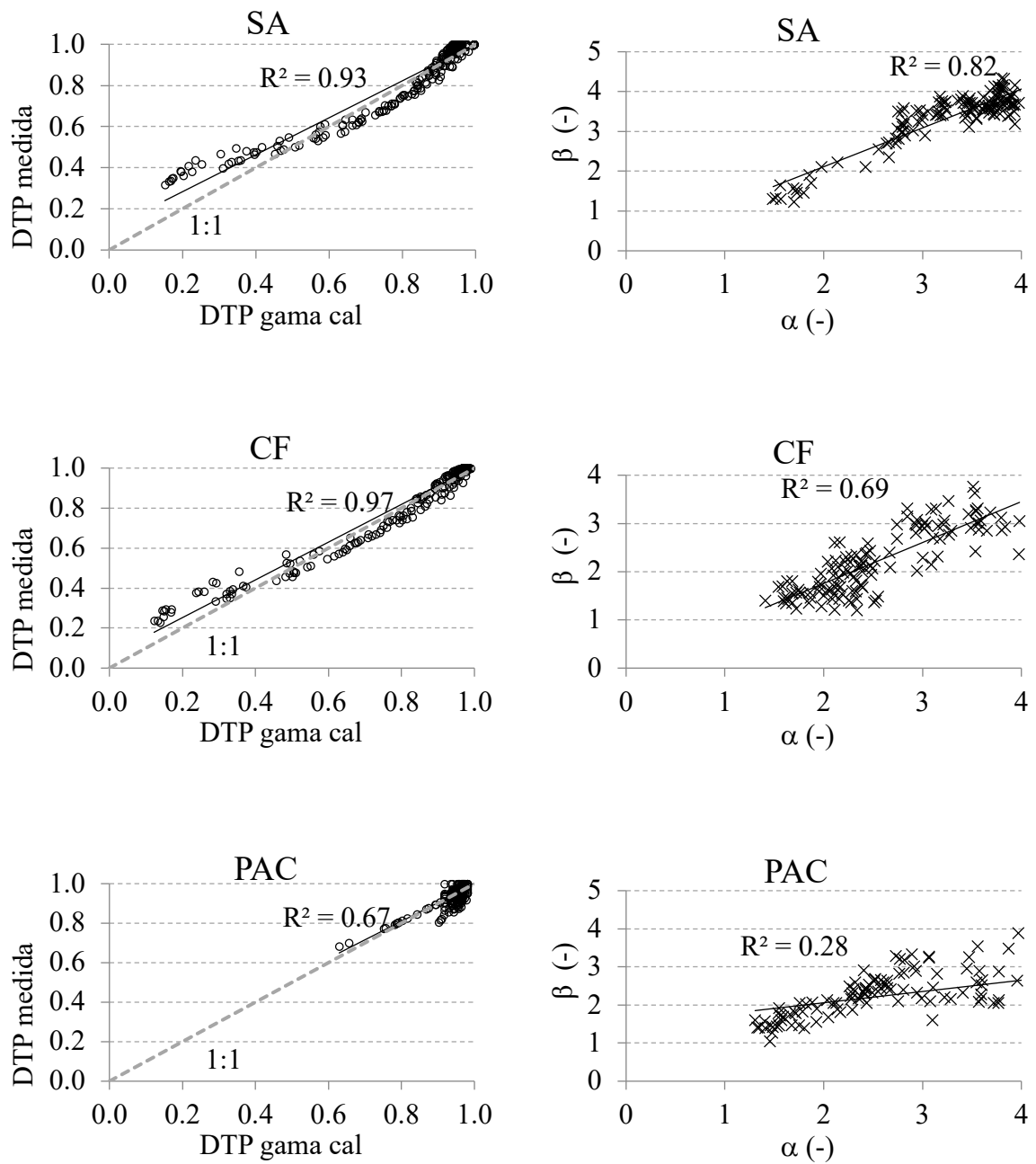


Figura 2: Valores de  $\beta$  obtidos em diferentes gradientes de velocidade.

Na Fig. 3 são apresentados os resultados da DTP medida em relação a DTP calculada por meio da função Gama, considerando-se as classes de tamanho já descritas, para os coagulantes Sulfato de Alumínio (SA), Cloreto Férrico (CF) e Cloreto de Polialumínio (PAC). Além disso, a Fig. 3 ilustra a relação entre  $\beta$  e  $\alpha$ , parâmetros representativos da função linearizada e da função Gama da DTP, respectivamente.

Observa-se que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre os valores medidos e calculados da DTP são muito próximos de 1, o que ilustra a ótima representatividade da função Gama frente às variações experimentais da DTP. Apesar do menor valor do  $R^2$  verificado para o PAC (0,67), considerando-se todo o conjunto de dados, para situações isoladas, diversos valores de  $R^2$  também se aproximaram de 1.



**Figura 3:** Valores medidos da DTP e calculados a partir do ajuste da função Gama e parâmetros  $\beta$  e  $\alpha$  representativos da função linearizada e da função Gama da DTP, respectivamente. SA – Sulfato de Alumínio; CF – Cloreto Férrico; PAC – Cloreto de Polialumínio.

As características dos flocos de PAC apresentaram diferenças importantes em relação aos outros coagulantes. Como a DTP obtida foi mais deslocada para o sentido de maiores tamanhos, menor foi o número de flocos por imagem; além disso, sua representação, talvez em função da limitação do plano de luz, que dificulta o efeito de profundidade, pode não ter sido satisfatória por não permitir capturar todo o contorno das partículas maiores. Os valores mais baixos de  $R^2$  entre os parâmetros  $\beta$  e  $\alpha$  também foram verificados para o PAC, o que dá suporte à ideia anterior. Nessa comparação, apesar do maior  $R^2$  encontrado para o SA ainda não ser tão alto, 0,82,

ressalta-se que esses parâmetros apresentam comportamentos muito semelhantes, conforme pode ser visto na Fig. 4, cujos dados foram obtidos para o PAC com  $G = 20 \text{ s}^{-1}$ . O mesmo pode ser observado para qualquer coagulante em qualquer gradiente de floculação médio, o que indica que ambos os parâmetros representativos da DTP respondem às variações da DTP. Dessa forma, pode-se sugerir o uso do parâmetro  $\alpha$  da Eq. 5 para acompanhamento da evolução da DTP, considerando a análise do comportamento deste parâmetro análoga ao parâmetro  $\beta$  da Eq. 3, validado por Moruzzi (2014).

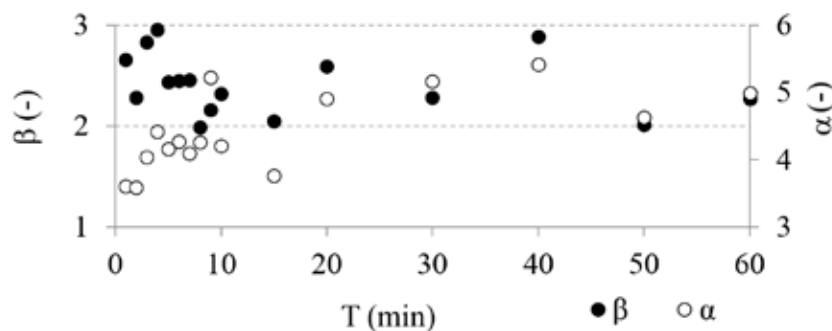


Figura 4: Evolução dos parâmetros  $\beta$  e  $\alpha$  das Equações 3 e 5.

Dessa forma, os resultados apontam que os parâmetros da função Gama podem auxiliar no acompanhamento do comportamento da evolução da DTP. Além disso, conforme verificado por Moruzzi, Oliveira e De Julio (2015), o parâmetro representativo da DTP pode ser utilizado para dar significado físico prático ao Índice de Floculação (IF) emitido por equipamento de monitoramento contínuo da floculação, traduzindo o sinal do equipamento em termos de diâmetros médios dos agregados, situação desejada em sistemas

de tratamento que empregam os processos de separação sólido-líquido.

#### 4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste artigo permitem sugerir que o parâmetro ajustável da função Gama pode ser usado no acompanhamento da evolução da distribuição de tamanho de partícula e, a exemplo do parâmetro  $\beta$ , pode ser empregado em futuros estudos de modelagem do processo de floculação.

## 5 REFERÊNCIAS

- CRITTENDEN, J.C. **Water Treatment: principles and design**. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: Jon Wiley & Sons, Inc., 2005, 1948 p.
- GREGORY, J. Optical monitoring of particle aggregates. **Journal Of Environmental Sciences**, London, v. 21, n. 1, p.2-7, 2009.
- HE, W.; NAN, J.; LI, H.; LI, S. Characteristic analysis on temporal evolution of floc size and structure in low-shear flow. **Water Research**, v. 46, n. 2, p.509-520, 2011.
- JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; GREGORY, J.; PARSONS, S. A. A review of floc strength and breakage. **Water Research**, v. 39, n.14, p.3121-3137, 2005.
- LAWLER, D.F. Particle size distribution in treatment processes: theory and practice. **Wat. Sci. Tech.** 1997, v. 36, n. 4, p. 15-23.
- MORUZZI, R. B. **Avaliação da influência da distribuição do tamanho de partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação do desempenho da flotação com utilização de sonda ultrassônica e técnica de análise por imagem**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. v.1, p.240, 2005.
- MORUZZI, R. B. **Avaliação do desempenho do processo de floculação usando parâmetro característico da função distribuição de tamanho de partículas: experimentação, modelagem e simulação**. Tese de Livre docência, Unesp – Rio Claro/SP, 2015.
- MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L.; JULIO, M.; DUTRA, R. H. A.; SILVA, P. A. G. Floculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição de tamanho de partículas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p.817-824, 2016.
- MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L.; De JULIO, M. Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração. **Revista DAE**, v. 200, p. 25-36, 2015.
- MORUZZI, R.B et al. Flocculation considerations from the classical analysis and from direct evaluation of particle size distribution. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.21, p.1-8, August, 2016.
- MORUZZI, R.B. **Avaliação da influência da distribuição do tamanho de partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação do desempenho da flotação com utilização de sonda ultrassônica e técnica de análise por imagem**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. v.1, p.240, 2005.
- MORUZZI, R.B. **Avaliação do desempenho do processo de floculação usando parâmetro característico da função distribuição de tamanho de partículas: experimentação, modelagem e simulação**. Tese (Livre-docência). Universidade Estadual Paulista - Unesp. (2014).
- MORUZZI, R. B.; MANETTA, L. S.; OLIVEIRA, S. C. Flocculation model applied to adjust operating conditions as flow changes. **Desalination and Water Treatment**, p. 55-62, 2017.
- MORUZZI, R.B., OLIVEIRA, A.L., CONCEIÇÃO, F.T., GREGORY, J., CAMPOS, L.C. Fractal dimension of large aggregates under diferente flocculation conditions. **Science of the Total Environment**. v. 609, pp-807-814, 2017.
- MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests. **Water Science and Technology**, v. 61, n. 1, p. 253-262, 2010.
- MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 273-283, 2007.
- MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. The influence of floc size and hydraulic detention time on the performance of a dissolved air flotation (DAF) pilot unit in the light of a mathematical model. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 37, n. 12, p. 2445-2452, 2014.
- NAN, J; HE, W. Characteristic analysis on morphological evolution of suspended particles in water during dynamic flocculation process. **Desalination And Water Treatment**, v. 41, n. 1-3, p.35-44, 2012.
- OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; DUTRA, R. H. A.; JÚLIO, M.; MORUZZI, R. B. Avaliação de Parâmetros Representativos da Distribuição de Tamanho de Partículas Presentes em Coleções Hídricas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p.1084-1092, 2015.
- 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. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 291 – 300, 2004.
- SPICER, P. T.; PRATSINIS, S. E. Shear-induced flocculation: The evolution of floc structure and the shape of the size distribution at steady state. **Water Research**, v. 30, n. 5, p.1049-1056, 1996.
- TSE, Ian C. et al. Method for quantitative analysis of flocculation performance. **Water Research**, [s.l.], v. 45, n. 10, p.3075-3084, maio 2011.
- YUKSELEN, M.A. & GREGORY, J. (2004) The reversibility of floc breakage. **International Journal of Mineral Processing**, v. 73, n.2-4, p. 251-259.