

## I-083 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEDIMENTAÇÃO E SUA RELAÇÃO COM DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS E COM AGREGADOS DE FRACTA

**Rodrigo Moruzzi<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil (UFSCar), Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor Adjunto III da Univ. Estadual Paulista, UNESP, Campus de Rio Claro, SP.

**Thaís de Almeida**

Engenheira Ambiental pela Univ. Estadual Paulista, UNESP, Campus de Rio Claro, SP.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. 24, 1515 – Bela Vista – Rio Claro - SP - CEP: 13506-900 - Brasil - Tel: (19) 3526-9339 - e-mail: [rmoruzzi@rc.unesp.br](mailto:rmoruzzi@rc.unesp.br)

### RESUMO

O presente artigo teve como objetivo investigar o desempenho da sedimentação e sua relação com as características físicas das partículas floculentas, nomeadamente tamanho e forma. Para tal, foi investigada em escala de laboratório uma água preparada com ácido húmico e coagulada com Sulfato de Alumínio. O processo de floculação foi monitorado por análise de imagem digital visando determinar a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP), e seu parâmetro representativo  $\beta$ , bem como a morfologia dos flocos, medidos pela dimensão de Fractal. A correlação foi investigada usando o coeficiente de correlação Pearson ( $r$ ). Os resultados demonstraram que quanto maior o parâmetro  $\beta$ , maior o residual remanescente ( $r \geq 0,84$ ), e que quanto maior a média dos diâmetros da partícula, menor o residual remanescente ( $r \leq -0,98$ ). O diâmetro de fractal não apresentou correlação com a separação por sedimentação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Distribuição do Tamanho de Partículas, Sedimentação, fractal, tratamento de água de abastecimento.

### INTRODUÇÃO

A água destinada ao consumo humano deve preencher condições mínimas estabelecidas pela portaria atualmente vigente (Portaria 2914/11) de modo que a água possa ser consumida com segurança pela população. Para tal, a água bruta deve ser transformada por processos e operações de tratamento. Grande parte das tecnologias de tratamento empregam a coagulação seguida da floculação, como etapas que antecedem as unidades de separação sólido-líquido.

O conhecimento de características dos flocos tais como sua estrutura morfológica, tamanho, diâmetro e resistência a forças de cisalhamento é uma ferramenta útil para o entendimento da formação dos flocos e pode auxiliar no aprimoramento dos projetos de dimensionamento de unidades de tratamento de água (TCHOBANOGLOUS, 1995). Segundo Santos *et al.* (2004) a análise de tamanho de partículas pode auxiliar na decisão e na melhoria de tecnologias de tratamento, e na adoção de técnicas operacionais apropriadas a cada situação de tratamento de água.

A coagulação química consiste na desestabilização de impurezas, presentes como dispersão coloidal. (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Após esse processo, é realizada a floculação, que promove a agregação das partículas desestabilizadas na coagulação por meio dissipação controlada de energia na massa líquida, permitindo que partículas discretas desestabilizadas colidam e permaneçam aderidas formando agregados maiores, cuja morfologia pode ser representada por meio da geometria de fractal (GREGORY, 2009).

Após as etapas de coagulação e floculação, as partículas podem ser separadas, sendo a sedimentação seguida da filtração as técnicas mais empregadas na modalidade de tratamento de ciclo completo. É comum o emprego de parâmetros indiretos para avaliação e monitoramento da eficiência das unidades de separação. Todavia, a medição direta de material particulado, em substituição as medidas indiretas de cor e turbidez, abre novo campo de análise de eficiência e desempenho dos processos de tratamento (SANTOS *et al.*, 2004). Em especial,

as medidas de distribuição de tamanho de agregados floculentos e sua dimensão não Euclidiana, podem trazer contribuições ao entendimento das variáveis significativas na separação sólido-líquido (GREGORY, 2009).

Nesse contexto, o presente artigo objetivou avaliar a correlação entre atributos dos agregados formados durante a floculação e a separação por sedimentação, buscando no futuro auxiliar o melhor entendimento dos fenômenos determinantes para separação de material particulado no meio líquido.

## OBJETIVO

Avaliar a eficiência da sedimentação e sua relação com características morfológicas de agregados.

## METODOLOGIA

Foram investigadas diferentes dosagens de coagulante ( $Al^{+3}$ ) em valores de pH de coagulação de 5,5, combinados com diferentes valores de gradiente médio de floculação ( $G_f$ ) e tempos de floculação ( $T_f$ ), com registros de Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) e de Dimensão de Fractal ( $D_f$ ).

As melhores condições definidas nas etapas anteriores foram aplicadas para separação sólido/líquido em diferentes velocidades de sedimentação ( $V_s$ ). O desempenho desse processo foi avaliado por meio da construção das curvas de sedimentação, que relacionam fração residual remanescente ( $Frr$ ) com velocidade de sedimentação ( $V_s$ ), conforme Di Bernado e Dantas (2005).

A água utilizada foi preparada a partir de água destilada e solução de ácido húmico comercial (*Aldrich*), na concentração de 0,62 g/L. Posteriormente, a solução foi diluída na proporção 1:20 e filtrada em membrana de 0,45  $\mu m$ , de modo a resultar em  $50 \pm 5$  uC.

Para a coagulação foi utilizada solução de Sulfato de Alumínio com dosagem de 28 mg  $Al^{+3}$ /L e pH igual a 5,5. Para o controle de pH foi utilizada solução de hidróxido de sódio (NaOH) de 0,1 M.

A água de estudo foi levada ao equipamento *Jar Test* onde os processos de coagulação/floculação foram realizados sob condições controladas de mistura e tempo, medidos por meio do gradiente de velocidade médio ( $G_f$ ) e do tempo de floculação ( $T_f$ ).

Para a coagulação, a mistura composta pela água de estudo, agente coagulante e agente alcalinizante foi agitada ao Gradiente Médio de Velocidade de Mistura Rápida ( $G_{mr}$ ) de  $800 s^{-1}$  por 10 segundos.

**Tabela 1. Relação de  $G_f$  e  $T_f$ , e  $V_s$  em que as amostras de cor aparente foram coletadas.**

Gradiente de Floculação	Tempo de Floculação	Velocidade de Sedimentação
( $G_f$ ) de 20, 40, 60 e $80 s^{-1}$	( $T_f$ ) de 5, 10, 15, 20 e 25 min	( $V_s$ ) de 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min.

O desempenho da sedimentação foi avaliado por meio das medidas de fração residual remanescente de cor aparente ( $Frr$ ) e eficiência ( $E$ ), conforme Equações 1 e 2.

$$Frr = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

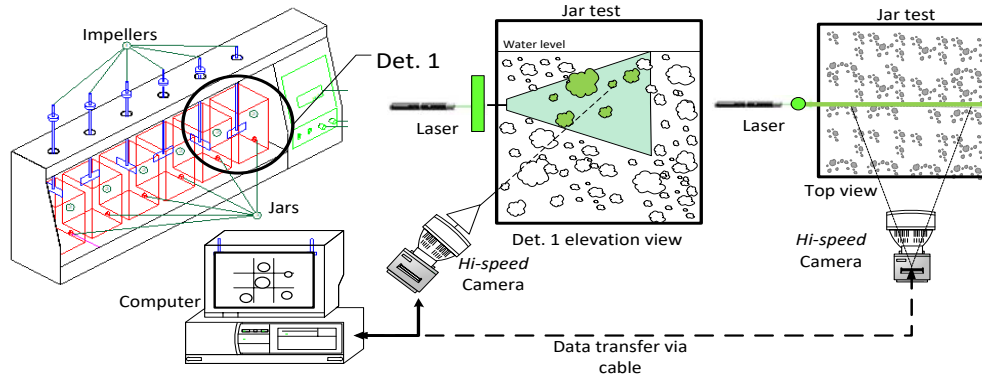
$$E = (1 - Frr) \quad (2)$$

Onde:  $C$  = cor aparente residual da amostra após sedimentação na velocidade estudada (uC);  $C_0$  = cor verdadeira da água bruta (uC);  $E$  = eficiência de remoção;  $Frr$  = Fração Residual Remanescente.

A aquisição e tratamento de imagens foram usadas para determinação da distribuição de tamanho de agregados e da Dimensão de Fractal. Para aquisição das imagens foi utilizada 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, conforme métodos descritos em Moruzzi e Reali (2007) e Oliveira *et al.* (2015).

Na Figura 1 apresenta-se um esquema do aparato experimental: equipamento de bancada *Jar Test* acoplado a um sistema não intrusivo de captura de imagens.



**Figura 1. Esquema do arranjo experimental utilizado nos ensaios (*Jar Test*, Microcomputador, Câmera digital e Laser). Extraído de Oliveira *et al.* (2015).**

O tratamento das imagens foi realizado com auxílio do software *Image-Pro Plus*®. A iluminação foi baseada nos métodos de Gregory e Chung (1995), Moruzzi e Reali (2007).

Os métodos empregados nesse projeto são os mesmos aplicados em Moruzzi (2005) e apresentados em Moruzzi e Reali (2007) e Moruzzi e Reali (2010). Em termos gerais, os passos necessários consistem em: aquisição das imagens; tratamento digital; calibração; determinação das feições de interesse (diâmetro e área) e dos tamanhos das partículas. Posteriormente são obtidas as funções discretas de Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP), Dimensão do Fractal ( $D_f$ ).

Para cada condição investigada nessa pesquisa foram gerados gráficos de DTP em intervalos discretos, a partir dos quais foi ajustada a curva contínua de distribuição para determinação do parâmetro representativo ( $\beta$ ). O parâmetro  $\beta$  (conforme Equação 3) foi utilizado para avaliar como ocorre a distribuição do tamanho de agregados.

$$\frac{dN}{d(d_p)} = n^o(d_p) = A_o(d_p)^{-\beta} \quad (3)$$

Onde:  $dN$  = numero de partículas por unidade de volume do fluido na faixa correspondente a  $d_p$  até  $d_p + d(d_p)$ ;  $d_p$  = diâmetro da partícula;  $n^o(d_p)$  = função de Distribuição de Tamanho de Partículas;  $A_o$  = coeficiente relacionado a concentração total de partículas;  $\beta$  = coeficiente que caracteriza a distribuição de tamanho.

Os flocos formados no processo de floculação não seguem geometria euclidiana. Por esse motivo, para estudar a Dimensão de Fractal dos flocos, foram obtidos os diâmetros dos flocos em todas as condições de velocidade e agitação analisadas, conforme Equação 4.

A Dimensão Fractal foi calculada para toda a população de flocos de cada condição estipulada no estudo.

$$A = k \cdot d^{D_f} \quad (4)$$

Onde:  $A$  = correspondente a soma das áreas de todas as partículas primárias contidas dentro da dimensão  $d$ ;  $k$  = constante de ajuste;  $D_f$  = Dimensão de Fractal (seu valor varia de 1 a 2);  $d$  = diâmetro do floco.

A partir da avaliação de desempenho e das características dos agregados formados (dimensões de fractal e distribuição de tamanho) foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre pares de todos atributos medidos, ou seja, os atributos obtidos a partir da DTP, da morfologia e do desempenho ( $Frr(Vs)$ ),  $\beta$ ,  $Df$ , diâmetro médio, mediana e assimetria de todo conjunto de dados de agregados).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

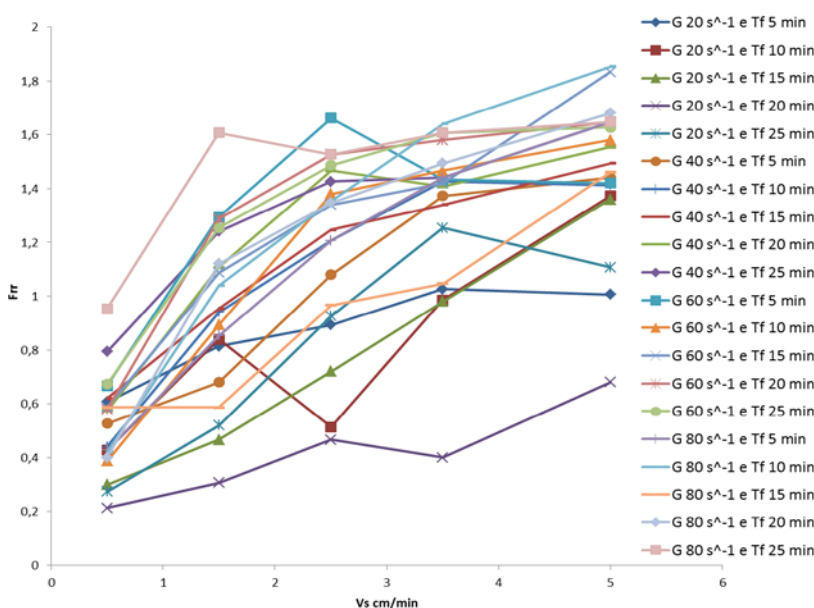
Subsequentemente, apresentam-se um subconjunto dos resultados usados para construção dos coeficientes de correlação, compilados na última tabela desse artigo. Na Figura 2 fica evidente a influência de  $Gf$  e  $Tf$  no desempenho da sedimentação, onde a posição das curvas determinam diferentes desempenhos de separação por sedimentação. É importante salientar que, em alguns casos, o valor de  $Frr$  excedeu a unidade (1), devido à adição de coagulante na fase de coagulação e floculação ter excedido a referência de cor verdadeira da água bruta.

A partir da Figura 2 é possível observar que o menor residual remanescente foi para o  $Gf$  de  $20\text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  de 20 min, e que nesse valor de gradiente médio de velocidade as curvas de  $Frr$  apresentaram os menores valores de residual remanescente em todos os tempos de floculação ( $Tf$ ) investigados.

Para o gradiente de  $20\text{ s}^{-1}$  obteve-se menor residual remanescente em um tempo de floculação mais longo (20 minutos). Para o  $Gf$  de  $40\text{ s}^{-1}$ , a menor fração residual remanescente ocorreu em um tempo de floculação menor (5 minutos). Já para os gradientes de  $60\text{ s}^{-1}$  e  $80\text{ s}^{-1}$ , a fração residual remanescente foi obtida no tempo de floculação intermediário (10 e 15 minutos respectivamente).

Esses resultados demonstram que o gradiente de  $20\text{ s}^{-1}$  demanda tempo de floculação maior para obter melhor desempenho de sedimentação, e que as agitações mais rápidas (gradientes de  $60\text{ s}^{-1}$  e  $80\text{ s}^{-1}$ ) necessitam de menos tempo para obter melhor desempenho de sedimentação.

Entretanto, os menores valores de residual remanescente observados entre todos os gradientes analisados, ou seja, a melhor condição de qualidade da água, após a floculação e sedimentação, foi observada para o gradiente de  $20\text{ s}^{-1}$ .

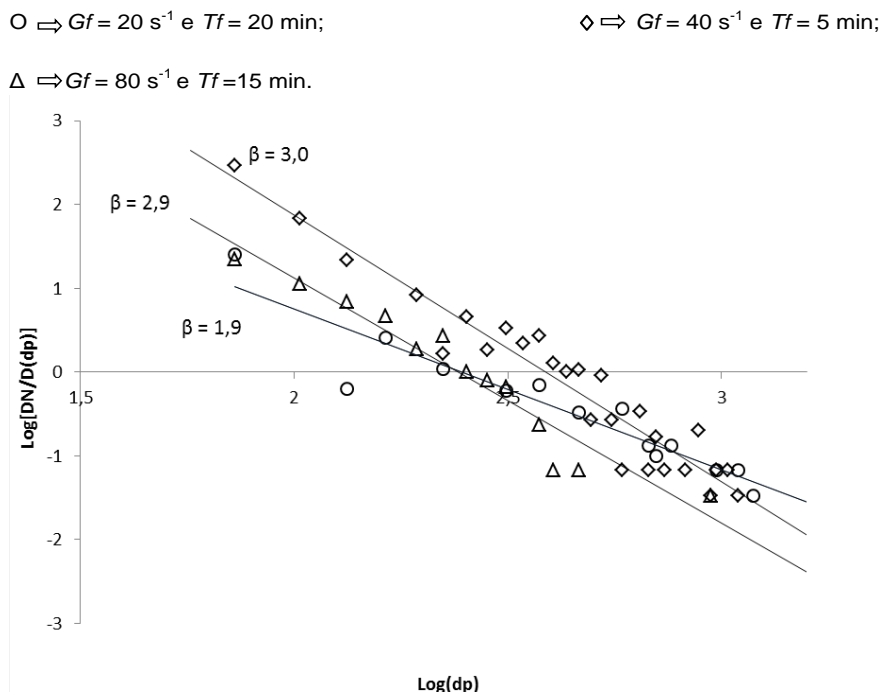


**Figura 2.** Gráfico de Fração Residual Remanescente de todos os gradientes estudados ( $Gf$  20, 40, 60 e  $80\text{ s}^{-1}$ ) e tempos ( $Tf$  5, 10, 15, 20 e 25 min).

Na Figura 3 foram selecionados, a título de exemplo, três resultados da Figura 2, referentes a distribuição de agregados ajustados por meio da função contínua de distribuição, ou seja, as condições que refletem a

distribuição de tamanho de partículas (DTP) para valores de  $Gf$  de  $20 \text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  de 20 min.;  $Gf$  de  $40 \text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  de 5 min. e  $Gf$  de  $80 \text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  de 15 min.

Verifica-se claramente que diferentes condições de mistura resultam em diferentes coeficientes angulares da Equação 3 na sua forma linearizada. Tais coeficientes representam o expoente da função contínua de distribuição ( $\beta$ ). Os valores indicam que quanto maior o valor em módulo de  $\beta$ , maior é o número de pequenos agregados na amostra. Os valores de 2,9 e 3,0 representam as maiores taxas de tensões empregadas, 40 e  $80 \text{ s}^{-1}$ , enquanto o valor de 1,9 aponta para o valor de  $Gf$  de  $20 \text{ s}^{-1}$ .



**Figura 3.** A inclinação da reta de ajuste aos pontos representantes dos valores do gradiente  $20 \text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  de 20 minutos possui valor  $\beta$  em módulo igual a 1,9; O ajuste aos pontos representantes dos valores do gradiente  $40 \text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  de 5 minutos possui valor  $\beta$  em módulo igual a 3,0; E o ajuste aos pontos representantes dos valores do gradiente  $80 \text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  de 15 minutos possui valor  $\beta$  em módulo igual a 2,9.

Na Tabela 2 verificam-se alguns dos resultados obtidos de  $\beta$ , os quais mostram claramente que diferentes condições de mistura resultam em diferentes coeficientes angulares da reta ajustada. Os valores de 2,9 e 3,0 representam as maiores taxas de tensões empregadas, 40 e  $80 \text{ s}^{-1}$ , enquanto o valor de 1,9 aponta para o valor de  $Gf$  de  $20 \text{ s}^{-1}$ .

**Tabela 2.** Valores de  $\beta$  para as condições de  $Gf$   $20 \text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  20 min,  $Gf$   $40 \text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  5 min,  $Gf$   $60 \text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  10 min,  $Gf$   $80 \text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  15 min.

$Gf$ $Tf$				
Parâmetro	$20 \text{ s}^{-1}$ e 20 min	$40 \text{ s}^{-1}$ e 5 min	$60 \text{ s}^{-1}$ e 5 min	$80 \text{ s}^{-1}$ e 15 min
$\beta$	1,9	2,9	1,4	3

Por meio dos resultados da Tabela 2 e Figura 2, pode-se verificar que os melhores resultados de  $Frr$  apresentaram valores de  $\beta$  variando de 1,4 a 3. Para a condição de  $Gf$   $20 \text{ s}^{-1}$  e  $Tf$  20 min, a maior eficiência de remoção ocorreu nas velocidades de sedimentação menores ( $0,5 \text{ cm/min}$  e  $1,5 \text{ cm/min}$ ). Tais resultados reforçam que a remoção por sedimentação gravitacional é mais eficiente na condição em que a distribuição de tamanho dos flocos de flocos são deslocadas para as maiores faixas (menor valor de  $\beta$ ).

Na Tabela 3 são apresentados os valores da dimensão de fractal ( $D_f$ ) nas melhores condições de remoção para cada gradiente acima mencionado. Os resultados demonstram que as melhores condições de remoção foram obtidas para valores de  $D_f$  variando de 1,7 a 1,9.

Tabela 3. Valores de  $D_f$  para as condições de  $G_f$  20 s<sup>-1</sup> e  $T_f$  20 min,  $G_f$  40 s<sup>-1</sup> e  $T_f$  5 min,  $G_f$  60 s<sup>-1</sup> e  $T_f$  10 min,  $G_f$  80 s<sup>-1</sup> e  $T_f$  15 min.

$G_f$ $T_f$				
Parâmetro	20 s <sup>-1</sup> e 20 min	40 s <sup>-1</sup> e 5 min	60 s <sup>-1</sup> e 5 min	80 s <sup>-1</sup> e 15 min
$D_f$	1,8	1,9	1,8	1,7

Na Tabela 4 são apresentados os resultados de todos o conjunto de dados referente ao coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), considerando todos os atributos medidos durante a floculação bem como para os ensaios de separação por sedimentação, em todas as velocidades investigadas. Correlações fortes positivas são marcadas em verde, e correlações fortes negativas em vermelho.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de correlação de Pearson ( $r$ ) para todas as condições investigadas nesse estudo.

	$b$	$dF$	$dmed.$	$dmediana$	$S$	V1	V2	V3	V4	V5
$b$	1,00									
$dF$	-0,44	1,00								
$dmed.$	-0,91	0,26	1,00							
$dmediana$	-0,94	0,12	0,94	1,00						
$S$	0,97	-0,30	-0,82	-0,94	1,00					
V1	0,33	0,04	-0,70	-0,48	0,17	1,00				
V2	0,13	0,40	-0,53	-0,37	0,03	0,93	1,00			
V3	0,03	0,34	-0,45	-0,25	-0,09	0,94	0,99	1,00		
V4	0,03	0,57	-0,43	-0,31	-0,03	0,84	0,98	0,96	1,00	
V5	0,85	-0,35	-0,98	-0,86	0,72	0,78	0,57	0,52	0,44	1,00

Por meio dos resultados da Tabela 4 pode-se verificar que os parâmetros analisados foram sensíveis para a menor velocidade testada (0,5 cm/min), correspondente a V5 na Tabela 4. A  $Frr$  apresentou uma forte e negativa correlação com o diâmetro médio ( $r \geq 0,98$ ) e mediana dos diâmetros ( $r \geq 0,86$ ), indicando que quanto maior a média dos diâmetros dos agregados formados, menor é o residual remanescente de cor na amostra após sedimentação.

A  $Frr$  apresentou uma forte e positiva correlação ( $r \geq 0,72$ ) com a função estatística assimetria, aplicada aos diâmetros dos flocos, indicando que quanto maior o residual remanescente, maior o numero de flocos de pequeno diâmetro.

O parâmetro  $\beta$  mostrou uma forte e positiva correlação ( $r \geq 0,97$ ) com a função estatística assimetria, aplicada aos diâmetros dos flocos, indicando que a maioria dos agregados da amostra, encontravam-se em tamanho pequeno. Portanto, quanto maior o valor em módulo de  $\beta$ , maior a Fração Residual Remanescente, reforçando que o tamanho dos agregados tem papel fundamental na remoção por sedimentação.

O parâmetro  $\beta$  mostrou uma alta e positiva correlação ( $r \geq 0,84$ ) com o residual remanescente de cor da amostra com menor velocidade de sedimentação (0,5 cm/min), indicando que um alto valor de  $\beta$  (grande número de pequenos agregados) resulta em um maior residual remanescente na água.

O parâmetro  $\beta$  mostrou forte e negativa correlação ( $r \geq 0,94$ ) com o diâmetro médio das partículas e a mediana dos diâmetros, indicando que quanto maior o valor em módulo de  $\beta$  (maior número de agregados pequenos contidos na amostra), menor é o diâmetro médio e mediana dos diâmetros dos flocos da amostra.

A dimensão de fractal ( $d_f$ ) não apresentou correlação com as variáveis analisadas.



## CONCLUSÕES

Como esperado, a distribuição de tamanho de partículas foi determinante na separação gravitacional, mostrando que quanto maior a energia de agitação aplicada no sistema, menor será o número de flocos grandes formados, dificultando a remoção. Os diâmetros médio e mediana da DTP indicaram coeficiente de correlação  $r \leq -0,86$  com a fração residual remanescente, sendo também potenciais medidas de monitoramento direto de agregados para a avaliação de separação de partículas por sedimentação.

Em termos gerais, os valores de Dimensão de Fractal não mostraram correlação significativa com os parâmetros ou velocidades de sedimentação estudados, implicando que o  $D_f$  não exerceu influência nas velocidades de sedimentação, ou diâmetro dos agregados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SANTOS, H.R. dos; PRADO, G.S do; 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. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 9, n. 4, p. 291-300, 2004.
2. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. Métodos e técnicas de tratamento de água. Segunda Edição. São Carlos. RiMa, 2005. 792p.
3. OLIVEIRA, A.L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G. da; JULIO, M.D; MORUZZI, R.B. Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the removal of particulate matter, Desalination and Water Treatment, 2015.
4. GREGORY, J.; CHUNG, H. Continuous monitoring of floc properties in stirred suspensions. J. Water SRT – Aqua, Blackwell Science Ltd, v.44, n.3, p.125-131. 1995.
5. 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. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 12, n. 3, p. 273-283, 2007.
6. MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. Characterization of microbubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests, Water Sci. Technol. 61(1). 253-262, 2010.
7. MORUZZI, R. B. Avaliação da Influência da Distribuição de Tamanho de Partículas e do Binômio Velocidade/Tempo de Detenção na Zona de Reação no Desempenho da Flotação com Utilização de Sonda Ultrasônica e Técnica de Análise por Imagem. Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 240p, 2005.
8. TCHOBANOGLOUS, G. Particle size characterization: the next frontier. Journal of Environmental Engineering, ASCE. v. 121, n. 12, p. 844-845, 1995.
9. GREGORY, J., 2009. Monitoring particle aggregation processes. Adv. Colloid Interf. Sci. 147–148:109–123.<http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.003>.