

Influência da ação combinada do transporte inercial e da sedimentação diferencial nos agregados após cessada a floculação mecanizada

Combined effect of inertial and differential transport on aggregates after ceased mechanized flocculation

Rodrigo Braga Moruzzi^{1*} , Joice Gonçalves² ,
Lais Galileu Speranza² , André Luiz de Oliveira³ 

RESUMO

Durante a floculação mecanizada, o gradiente médio de velocidade (G) pode ser controlado de modo a formar agregados compatíveis com as unidades de separação sólido/líquido nas estações de tratamento de água, conferindo flexibilidade operacional ao sistema. Os ensaios de bancada auxiliam na definição da melhor condição de coagulação e floculação, permitindo até mesmo o controle da agitação (floculação ortocinética) e do tempo de detenção hidráulica. Todavia, não são conhecidos todos os efeitos secundários da formação dos agregados decorrentes do transporte inercial nem da sedimentação diferencial, após cessada a agitação mecânica na floculação. O presente trabalho buscou monitorar a influência combinada desses dois efeitos na formação dos agregados, por meio de técnica não intrusiva de captura de imagem associada à técnica *particle image velocimetry*. Foi possível verificar que o transporte dos agregados formados após a etapa de floculação decorre da ação do movimento inercial do fluido e da sedimentação diferencial, em proporção que varia no tempo. O movimento inercial apresenta predominância na influência da formação dos agregados do momento em que é cessada a agitação mecânica (G , de 20 s⁻¹) até 5,5 ± 0,5 minutos, quando os agregados passam a ser modificados predominantemente pela sedimentação diferencial. Por meio da análise dos agregados, foram observados dois momentos de crescimento no comprimento deles. O primeiro ocorreu entre os dois primeiros minutos, e o segundo, durante os minutos 4 e 6 de sedimentação, quando se deu a provável transição entre os mecanismos investigados.

Palavras-chave: floculação; agregado; gradiente médio de velocidade; distribuição de tamanho de partículas; *particle image velocimetry*.

ABSTRACT

The velocity gradient can be controlled for aggregates formation during mechanized flocculation, so that aggregates can be subsequently removed in solid/liquid separation units, providing operational flexibility to the system. Batch assays help in finding the optimal coagulation and flocculation conditions, making possible to change gradient velocities and hydraulic detention time. Nevertheless, the secondary effects as result of inertial and differential sedimentation transport over aggregates after mechanized flocculation are not well known. Therefore, this paper aimed to present the combined effect of inertial and differential transport over aggregates, using nonintrusive image technique and particle image velocimetry (PIV). It was possible to verify that the transport of the aggregates formed after the flocculation step is due to the action of the inertial movement of the fluid and differentiated sedimentation, in a proportion that varies over time. The inertial movement is predominant in the influence of the formation of aggregates from the moment when mechanical agitation is stopped (G , of 20 s⁻¹) until 5.5 ± 0.5 minutes, when the aggregates are predominantly modified by differential sedimentation. Through the analysis of the aggregates, two moments of growth in their length were observed. The first occurred up to the two first minutes, and the other between four and six minutes, when the transition between mechanisms is likely to happen.

Keywords: flocculation; aggregate; gradient of velocity; particle size distribution; particle image velocimetry.

¹Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - São José dos Campos (SP), Brasil.

²Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Rio Claro (SP), Brasil.

³Universidade Federal de Uberlândia - Minas Gerais (MG), Brasil.

*Autor correspondente: rodrigo.moruzzi@unesp.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Processo nº 301210/2018-7.

Recebido: 19/08/2020 - **Aceito:** 17/12/2021 - **Reg. ABES:** 20200291

INTRODUÇÃO

Um sistema de tratamento de água convencional, ou em ciclo completo, é composto essencialmente das etapas de mistura rápida e coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção (BRATBY, 1980; DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A coagulação consiste na desestabilização das partículas presentes na água bruta por meio da adição do agente coagulante. A floculação visa à agregação de partículas menores (primárias ou microflocos) previamente desestabilizadas por espécies hidrolizadas, ou precipitados amorfos, por intermédio da dissipação de energia no meio. O agregado formado pode então ser removido por separação sólido/líquido, tal como pela sedimentação, flotação e/ou filtração (CRITTENDEN *et al.*, 2012). Logo, o tamanho dos flocos é um fator que influencia diretamente na *performance* das unidades de separação sólido/líquido.

O movimento induzido pela dissipação de energia na massa líquida é a principal força motriz que possibilita o encontro entre as partículas desestabilizadas (floculação ortocinética), predominante em sistemas com agitação mecânica e hidráulica. Os agregados formados são estruturas de geometria complexa também denominados flocos (LI; LOGAN, 1997; HE *et al.*, 2012) e sofrem efeito simultâneo da agregação e ruptura até alcançar o equilíbrio dinâmico, em que não há mais evolução no tamanho, embora a forma dos agregados esteja em constante mutação (MORUZZI *et al.*, 2017).

Todavia, a agitação controlada não é o único fator responsável pela formação dos agregados, havendo mecanismos de transporte não controlados ou indiretos, entre eles o movimento inercial do fluido e a sedimentação diferencial. Logan (1998) acrescenta ainda que as partículas suspensas em um fluido de volume infinito podem colidir mediante três mecanismos: movimento browniano (para partículas menores do que 1 μm), movimento do fluido e sedimentação diferencial, entretanto o movimento do fluido a que faz referência se deve à floculação ortocinética, e não ao movimento inercial do fluido, que ocorre após o desligamento do agitador do equipamento Jar test. Destarte, quando há o desligamento das pás do equipamento, o transporte pelo mecanismo de floculação ortocinética é substituído pelo movimento inercial do fluido e pela sedimentação diferencial, que ocorrem simultaneamente.

O movimento inercial que age sobre os agregados, como a força centrífuga e a de Coriolis, transporta os agregados por trajetórias horizontais em torno do eixo da pá do agitador. Quando a agitação é cessada, o sistema busca nova configuração de equilíbrio, transferindo a energia residual de movimento das pás até a completa dissipação por calor. A partir desse momento, prevalece no sistema a ação decorrente da força gravitacional, que age distintamente nos agregados de diferentes tamanhos. Da ação diferencial, resulta o mecanismo de transporte por sedimentação diferencial, responsável pelo encontro de flocos situados no mesmo campo de choque, o cilindro de colisão. Nessa região espacial, flocos com diferentes velocidades podem se encontrar, por causa das suas velocidades terminais distintas (LOGAN, 1998).

Segundo Crittenden *et al.* (2012), pela equação de Stokes a velocidade de sedimentação de partículas com densidades semelhantes é proporcional ao quadrado do seu tamanho. Assim, flocos maiores podem colidir com flocos menores (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; CRITTENDEN *et al.*, 2012).

Até onde é de conhecimento dos autores, não há nenhum trabalho que busca avaliar esses mecanismos indiretos e seus efeitos nos flocos formados após a etapa de floculação, ou seja, depois de cessada a agitação mecânica.

Nesse sentido, este trabalho buscou avaliar o efeito combinado do movimento inercial e da sedimentação diferencial no transporte dos agregados após cessada a agitação mecânica na floculação.

Acredita-se que o entendimento dos efeitos do movimento inercial e da sedimentação diferencial sobre os tamanhos dos flocos pode auxiliar no aprimoramento dos ensaios de bancada e na avaliação dos resultados, visando à adoção de parâmetros confiáveis para projeto e operação de unidades de sedimentação em estações de tratamento de água (ETA).

METODOLOGIA

Os ensaios de coagulação e floculação/sedimentação foram realizados em reator estático Jar Test com gradientes médios de velocidade de 760 s^{-1} por 10 segundos para a mistura rápida e 20 s^{-1} por 15 minutos para a floculação, conforme resultados de estudos anteriores apresentados por Oliveira *et al.* (2016). A água de estudo utilizada para a realização dos ensaios foi preparada em laboratório por meio de uma solução-mãe de caulinita diluída em água deionizada com base na metodologia proposta em Yukselen e Gregory (2004). Assim, a turbidez da água de estudo foi de $24,5 \pm 1,3$ UNT.

Como coagulante, foi utilizado o sulfato de alumínio comercial $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 16 \text{ H}_2\text{O}]$, e como alcalinizante, o hidróxido de sódio (NaOH). Com base em ensaios preliminares foi estabelecida a dosagem ótima de sulfato de alumínio (PA) de 120 mg/L e pH de coagulação de $7,0 \pm 0,2$.

Na Figura 1, apresentam-se o esquema simplificado da montagem experimental e o ponto de captura das imagens no jarro, local este fixo e localizado nas coordenadas x: 2,7 cm, y: 3,5 cm e z: 10 cm.

A aquisição e o tratamento de imagens foram adaptados de Moruzzi e Reali (2007), de Oliveira *et al.* (2016) e de Moruzzi *et al.* (2016; 2017; 2019; 2020). Para a captura das imagens foi utilizada câmera fotográfica High-Speed Phantom Miro eX4, acoplada a um conjunto de lentes, configurada com resolução de 800×600 pixels. Os tempos de amostragem utilizados foram de 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 minutos, após cessada a agitação mecânica, com captura de 1.000 imagens em cada tempo. Todos os ensaios foram realizados em triplicada.

Primeiramente, foram rastreadas as trajetórias dos agregados presentes nas imagens. Para isso, as imagens sequenciais foram sobrepostas, os centroides dos agregados foram marcados e os ângulos de deslocamento dos agregados com a horizontal determinados (Figura 2). Para a análise das trajetórias dos agregados foram realizadas 106 medidas no total, divididas entre os intervalos de amostragem, resultando em uma média de nove medidas para cada intervalo. A velocidade dos agregados foi medida para todos os intervalos de amostragem usando a velocimetria por imagem (PIV), descrita em Moruzzi *et al.* (2020).

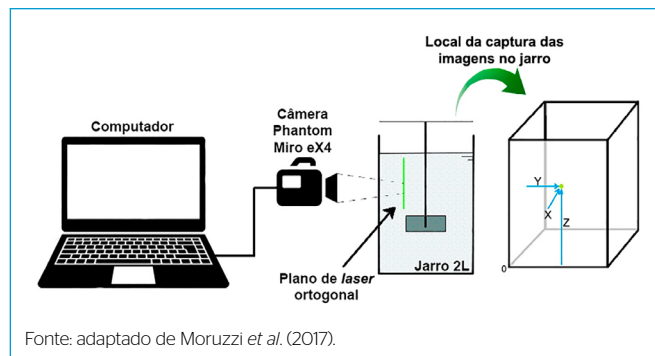


Figura 1 - Esquema simplificado da montagem do sistema experimental utilizado.

Após a análise das trajetórias dos agregados, foi feita a contagem de agregados para cada intervalo de tempo para determinação da distribuição de tamanho de partículas (DTP). Para a análise da DTP, os comprimentos máximos individuais dos agregados foram contabilizados e separados em 20 diferentes intervalos de tamanho (classes), para cada tempo de análise correspondente (Tabela 1).

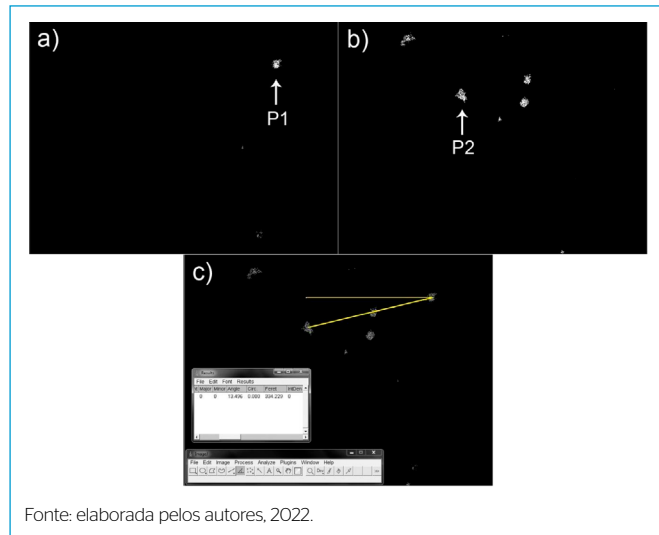


Figura 2 – Determinação do ângulo de deslocamento dos agregados, em que (A) P1 corresponde à primeira imagem captada do floco em uma sequência de imagens, e (B) P2 corresponde à última imagem captada do floco em uma sequência de imagens. (C) Sobreposição das imagens A e B e medição do ângulo de deslocamento.

Tabela 1 – Número de classes e diâmetros mínimos, máximos e médios de cada classe de tamanho.

Classe	Mínimo (µm)	Máximo (µm)	Média geométrica da classe (µm)
1	100	202	142
2	203	305	249
3	306	408	353
4	409	511	457
5	512	614	561
6	615	717	664
7	718	820	767
8	821	923	870
9	924	1.026	974
10	1.027	1.128	1.076
11	1.129	1.231	1.179
12	1.232	1.334	1.282
13	1.335	1.437	1.385
14	1.438	1.540	1.488
15	1.541	1.643	1.591
16	1.644	1.746	1.694
17	1.747	1.849	1.797
18	1.850	1.952	1.900
19	1.953	2.055	2.003
20	2.056	2.158	2.106

Fonte: elaborada pelos autores, 2022.

Conforme Moruzzi e Oliveira (2020), adaptado de Crittenden *et al.* (2012), a variação do número de partículas (dN) por faixa incremental no tamanho $d(d_p)$ pode ser descrita pela Equação 1.

$$\frac{dN}{d(d_p)} = A(d_p)^{-\beta} \sim \frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \tag{1}$$

Em que:

- dN = variação incremental no número de partículas;
- $d(d_p)$ = variação incremental no tamanho (diâmetro) das partículas;
- A = coeficiente de densidade da equação de potência;
- (d_p) = diâmetro da partícula;
- β = coeficiente de inclinação da equação de potência.

Os parâmetros A e β da Equação 1 definem a forma da curva de distribuição dos tamanhos das partículas, visto que A varia com o número de partículas, trasladando a curva na vertical, enquanto β varia conforme a frequência de partículas em cada faixa de tamanho da distribuição, alterando a inclinação da distribuição linearizada. Assim, o parâmetro (β) pode ser empregado como parâmetro característico, permitindo acompanhar a alteração da DTP durante a floculação (MORUZZI; OLIVEIRA, 2020).

Os agregados cujos comprimentos excederam 1,5 vez o valor da amplitude dos quartis e do quartil inferior foram caracterizados como *outliers*, conforme descrito em Bracarense (2012), e usados para calcular o valor de número de concentração (NC), dado pela Equação 2, que relaciona a quantidade de flocos de grande dimensão (N_{out}) por unidade de concentração de agregados ($\log A$).

$$NC = \frac{N_{out}}{\log \log A} \tag{2}$$

Em que:

- N_{out} = o número de *outliers*;
- $\log A$ = o log do coeficiente de densidade da Equação 1.

Com foco nas trajetórias dos agregados, foi avaliada a predominância entre as forças resultantes utilizando-se a Equação 3.

$$\frac{P}{F} = tg(\theta) \tag{3}$$

Em que:

- P = forças resultantes verticais (cateto oposto);
- F = forças resultantes horizontais (cateto adjacente);
- θ = ângulo de deslocamento do agregado com a horizontal medido durante os ensaios.

Para a mensuração indireta da dissipação da energia inserida no sistema, durante o tempo de sedimentação considerado foi utilizada a Equação 4:

$$De = \frac{v_t}{v_0} \tag{4}$$

Em que:

- De = coeficiente de dissipação de potência;
- v_t = velocidade média de deslocamento dos agregados para cada intervalo de tempo amostrado (m/s);
- v_0 = velocidade de deslocamento dos agregados no tempo 0 minuto (m/s).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 é possível observar a evolução do ângulo de deslocamento dos agregados presentes no sistema ao longo do tempo de amostragem, após cessada a floculação. As barras do gráfico da Figura 3 representam as medidas de ângulo realizadas, e a linha vermelha em destaque indica a média móvel para sete medidas de ângulos realizadas.

Nota-se que inicialmente os ângulos (considerando a horizontal) das trajetórias de deslocamento dos agregados são menores que 45° , o que confere aos agregados trajetórias predominantemente horizontais. Isso sugere que o transporte dos agregados é predominantemente decorrente da ação inercial do movimento residual do fluido, após desligamento das pás do equipamento Jar Test. Pode-se observar que os ângulos das trajetórias dos agregados passam a ser progressivamente maiores com o tempo de análise, e de 4 a 6 minutos, os ângulos ultrapassam os 45° (limite da predominância do movimento inercial sobre a sedimentação diferencial).

Na Figura 4, apresentam-se as medidas indiretas da evolução do transporte dos agregados e da dissipação indireta de energia, durante o tempo de sedimentação considerado. Na primeira, avaliou-se o efeito das forças resultantes da razão entre as forças verticais e horizontais remanescentes no sistema (Equação 3). Tal avaliação, medida indiretamente pela tangente do ângulo de deslocamento dos agregados, indica predominância de uma força sobre outra.

Quando a trajetória do agregado é de 45° , as forças resultantes horizontais (F) e verticais (P) são iguais. Portanto, define-se o limite pelo qual se inicia o predomínio da ação das forças resultantes verticais sobre o transporte do agregado. Esse fato indica que a partir desse momento o agregado é majoritariamente modificado pela ação da sedimentação diferencial. Observou-se que esse efeito ocorreu por volta do tempo $5,5 \pm 0,5$ minutos, para o gradiente médio de velocidade de floculação de 20 s^{-1} . Na segunda, por sua vez, foi avaliado o decaimento da velocidade horizontal (v_t) em relação à velocidade horizontal inicial (v_0), conforme Equação 4. Tal decaimento resulta da dissipação da energia introduzida residual no sistema e indica variação da potência na mesma proporção. Veem-se pequenas variações de D_c após 5 minutos do tempo de sedimentação.

Portanto, o transporte dos agregados formados após a etapa de floculação decorre da ação do movimento inercial do fluido e da sedimentação diferencial, em proporção que varia no tempo, de acordo com as relações apresentadas

na Figura 4. O efeito dessas forças sobre o tamanho dos agregados será apresentado a seguir.

Na Figura 5 é possível verificar a evolução do tamanho dos agregados nos diferentes tempos amostrais após iniciado o tempo de sedimentação. As caixas representam as variações dos tamanhos nos quartis, e os pontos em vermelho, os valores correspondentes aos *outliers*. Embora os valores da mediana oscilem entre 300 e 400 μm , pode-se observar que a distribuição quartílica varia nos tempos amostrados e que os agregados *outliers* tendem a se concentrar nos minutos iniciais. Tal constatação permite aferir sobre a variação do tamanho dos agregados após o término da floculação e durante o tempo de sedimentação, indicando que há alteração no tamanho médio dos agregados nesta etapa.

Considerando-se que os maiores flocos presentes no momento inicial da fase de separação foram removidos por sedimentação, sugere-se que a presença desse tipo de floco nos tempos finais de amostragem seja resultante da agregação ocorrida durante o tempo de sedimentação, pelo transporte inercial e pela sedimentação diferencial. Tais flocos, apesar de apresentarem tamanho compatível com aqueles removidos nos tempos anteriores, foram formados posteriormente, tendo, portanto, menos tempo de sedimentação.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados das variáveis de deslocamento e de tamanho dos agregados monitorados durante a sedimentação, que sustentam a ideia apresentada anteriormente.

Observando-se os dados da Figura 5 e da Tabela 2, é possível notar dois momentos em que há laivos de alteração na DTP dos agregados. No primeiro momento, logo após o início da etapa de sedimentação, até os dois primeiros minutos, pode-se verificar redução nos valores de β , ao mesmo tempo que houve crescimento nos valores de mediana. Assim, os resultados apontam que a DTP foi alterada para as maiores classes de tamanho, por causa, sobretudo, da ação inercial do movimento do fluido, conforme discutido anteriormente.

Com relação aos agregados de maior tamanho, denominados de agregados *outliers*, houve também crescimento no número desses agregados no primeiro minuto de sedimentação, que pode ser observado pelo crescimento nos valores de NC, que passou de 3,46 para 5,82, contudo esse valor caiu para 0,66 no segundo minuto de sedimentação, sugerindo que, apesar de esses agregados terem rápida evolução nos seus tamanhos, eles também possuem elevada velocidade de sedimentação.

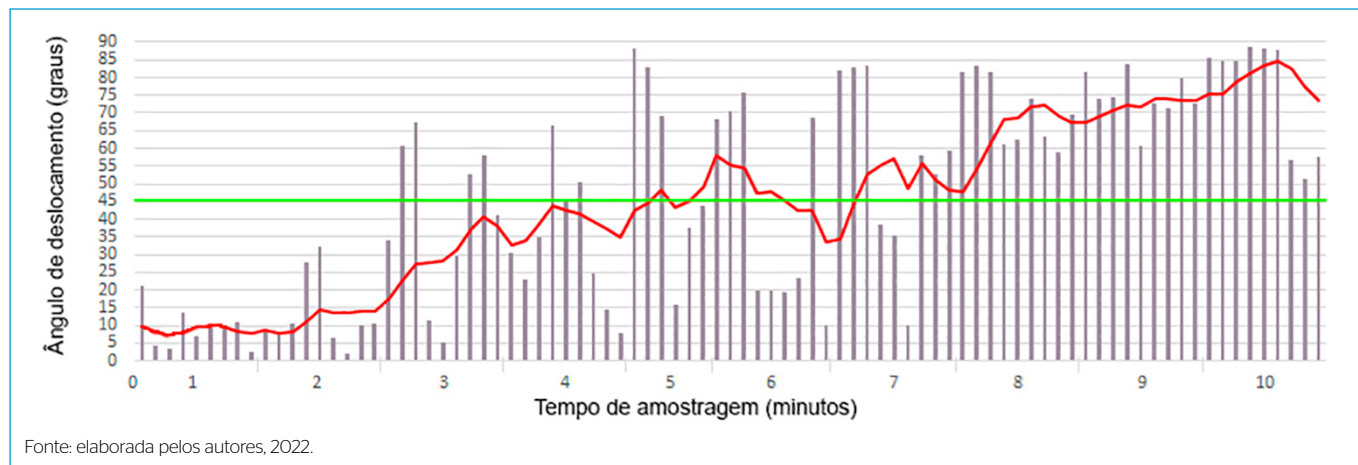


Figura 3 – Evolução do ângulo de deslocamento dos agregados com a horizontal para os diferentes tempos amostrados, em que as linhas no eixo y representam os ângulos em graus e a linha verde indica 45° , limite da predominância do movimento inercial sobre a sedimentação diferencial.

O segundo momento de alteração da DTP foi entre os tempos de amostragem de 4 a 6 minutos. Apesar de não haver nenhuma alteração significativa no número de agregados *outliers*, foi observada alteração nos valores de β , ao mesmo tempo que houve crescimento nos valores de mediana. Destaca-se que esse segundo momento marcou a mudança nas trajetórias predominantes dos agregados, conforme discutido e apresentado na Figura 4.

Portanto, foi possível identificar a alteração da DTP em dois momentos distintos, marcados predominantemente pelo movimento inercial do fluido, quando cessada a agitação, e pela ação da sedimentação diferencial, agindo

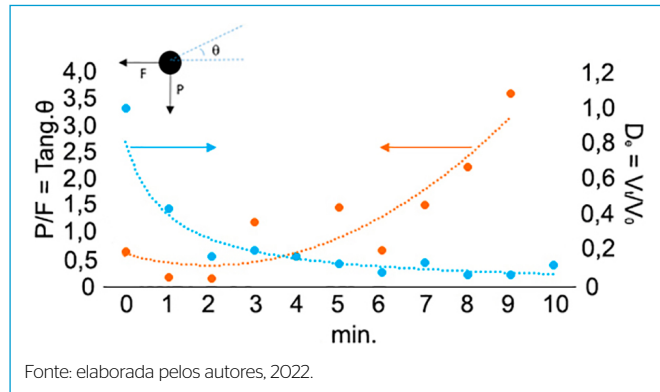


Figura 4 - Avaliação indireta da ação entre as forças resultantes verticais (P) e resultantes horizontais (F) (em laranja) e da dissipação de energia (em azul). Os pontos em laranja representam o valor médio da tangente dos ângulos de deslocamento dos agregados para cada minuto, e os pontos em azul indicam o valor do coeficiente de dissipação de potência (D_e) médio para cada minuto.

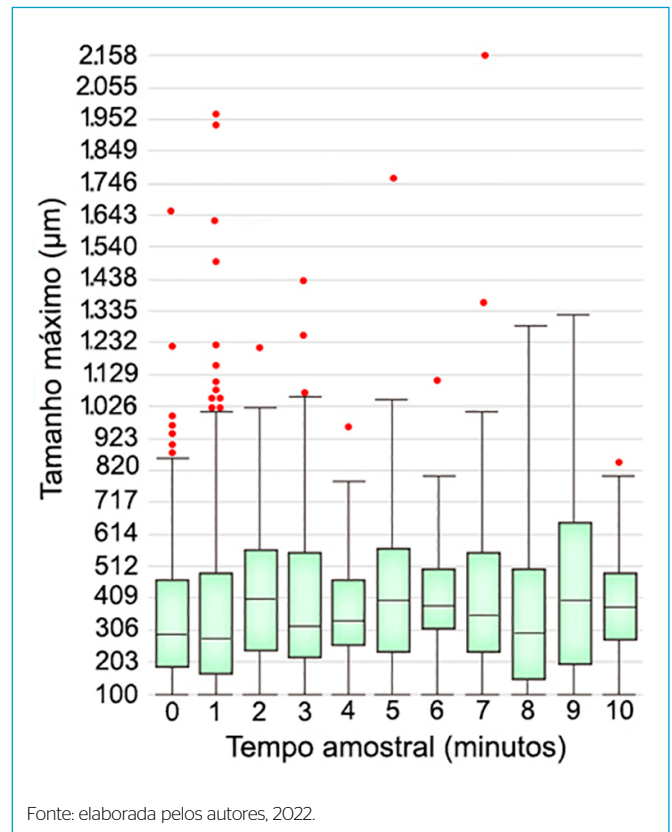


Figura 5 - Diagrama de caixa da variação dos comprimentos máximos dos agregados em função do tempo de amostragem após floculação.

Tabela 2 - Valores médios de θ (ângulo de deslocamento dos agregados com a horizontal). Vetores correspondentes à direção e ao sentido do deslocamento no intervalo de tempo correspondente às medições a $\text{tg}(\theta)$, D_e , mediana do tamanho máximo dos agregados, β e $\log A$ do número de concentração para os tempos de amostragem.

Tempo	Média θ (graus)	Vetor	$\text{tg}(\theta)$	D_e	Mediana dos tamanhos (μm)	β	$\log A$	Número de concentração
0	32,9		0,65	1	291	2,22	2,02	3,46
1	9,5		0,17	0,44	274	1,74	2,06	5,82
2	9		0,16	0,17	407	1,69	1,50	0,66
3	50,5		1,21	0,20	316	1,80	1,65	1,81
4	29,4		0,56	0,17	326	2,10	1,40	0,72
5	56,2		1,49	0,13	394	1,33	1,34	0,74
6	33,9		0,67	0,08	375	1,30	1,15	0,87
7	56,7		1,52	0,13	347	1,69	1,40	1,43
8	65,8		2,23	0,07	297	1,45	1,20	0
9	74,5		3,61	0,06	399	1,56	1,23	0
10	85		11,47	0,12	367	1,34	1,08	0,93

Fonte: elaborada pelos autores, 2022.

predominantemente no segundo momento, quando grande parte da energia introduzida no sistema por meio do G_f de 20 s^{-1} já tinha se dissipado.

Os resultados aqui apresentados devem ser confirmados por meio da investigação de diferentes valores de G_f e pela avaliação direta das escalas de turbulência associadas aos turbilhões no líquido. Todavia, os resultados apontam inequivocamente para alteração do tamanho dos agregados, após desligamento dos agitadores, durante as fases iniciais do que se convencionou como a etapa de sedimentação nos ensaios de Jar Test.

CONCLUSÕES

O movimento inercial e a sedimentação diferencial são mecanismos de transporte que agem simultaneamente sobre a formação dos agregados após o desligamento das pás, com influência variada no tempo. O efeito desses mecanismos sobre o tamanho dos agregados foi investigado.

Pôde-se constatar que o tamanho dos agregados continua a ser alterado após desligamento das pás do Jar Test com efeitos predominantemente distintos.

A presença de flocos grandes nos tempos finais de amostragem decorre majoritariamente da agregação ocorrida durante a separação, resultante do transporte inercial e da sedimentação diferencial.

Puderam-se notar dois momentos distintos em que houve alteração na distribuição de tamanho dos agregados: o primeiro momento no início da amostragem, até os dois primeiros minutos, em que foi possível observar que houve redução nos valores do parâmetro β , ao mesmo tempo que se constatou crescimento nos valores da mediana do tamanho dos flocos. Nessa fase, a distribuição de tamanho mostrou que houve transferência das menores para as

maiores classes de tamanho, por causa da ação predominantemente marcada pelo transporte inercial.

O segundo momento caracterizado pelas mudanças de tamanho dos agregados ficou compreendido entre os tempos de amostragem entre 4 e 6 minutos, marcado pela mudança nas trajetórias predominantes dos agregados, em que a sedimentação diferencial agiu predominantemente, quando grande parte da energia introduzida no sistema por meio do G_f de 20 s^{-1} já havia se dissipado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Tratamento e Reúso de Água e Efluentes da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", campus Rio Claro, a infraestrutura disponibilizada.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Moruzzi, R. B.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita — Primeira Redação, Obtenção de Financiamento, Administração do Projeto, Recursos, Supervisão, Software, Validação, Visualização, Escrita – Revisão e Edição. Gonçalves, J.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita — Primeira Redação. Speranza, L. G.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita — Primeira Redação. Oliveira, A. L.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita — Primeira Redação.

REFERÊNCIAS

- BRACARENSE, P. A. *Estatística aplicada às ciências sociais*. Curitiba: IESDE, 2012. 288 p.
- BRATBY, J. *Coagulation and flocculation with an emphasis on water and wastewater treatment*. Croydon: Uplands Press, 1980.
- CRITTENDEN, J. C.; TRUSSEL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G. *Water treatment principles and design*. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2. ed. São Carlos: RIMA, 2005. 71 p.
- HE, W. P.; NAN, J.; LI, H. Y.; LI, S. N. Characteristic analysis on temporal evolution of floc size and structure in low-shear flow. *Water Research*, v. 46, n. 2, p. 509-520, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.040>
- LI, X.; LOGAN, B. E. Collision frequencies between fractal aggregates and small particles in a turbulently sheared fluid, Tucson, Arizona. *Environmental Science & Technology*, v. 31, n. 4, p. 1237-1242, 1997. <https://doi.org/10.1021/es960772o>
- LOGAN, B. E. *Environmental transport processes*. Tucson: Wiley-Interscience, 1998.
- MORUZZI, R. B.; CAMPOS, L. C.; SHARIFI, S.; SILVA, P. G.; GREGORY, J. Nonintrusive investigation of large Al-kaolin fractal aggregates with slow settling velocities. *Water Research*, v. 185, 116287, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116287>
- MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L. Avaliação da sensibilidade da função de distribuição de tamanho de partícula durante a floculação. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 1, p. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020169648>
- MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L.; CONCEIÇÃO, F. T.; GREGORY, J.; CAMPOS, L. C. Fractal dimension of large aggregates under different flocculation conditions. *Science of the Total Environment*, v. 609, p. 807-814, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.194>
- 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. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016144959>
- 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*, v. 12, n. 3, p. 273-283, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000300007>

MORUZZI, R. B.; SILVA, P. G.; SHARIFI, S.; CAMPOS, L. C.; GREGORY, J. Strength assessment of al-humic and al-kaolin aggregates by intrusive and non-intrusive methods. *Separation and Purification Technology*, v. 217, p. 265-273, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.02.033>

OLIVEIRA, A. L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G.; JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the

removal of particulate matter. *Desalination and Water Treatment*, v. 57, n. 36, p. 16721-16732, 2016. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1081833>

YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. The reversibility of flocs breakage. *International Journal of Mineral Processing*, v. 73, n. 2-4, p. 251-259, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00077-2)

