

I-244 – AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS OBTIDAS EM ENSAIOS DE BANCADA PARA DIFERENTES TEMPOS DE FLOCULAÇÃO PARA ÁGUA DE BAIXA TURBIDEZ

Ricardo Henrique de Andrade Dutra⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestrando em Engenharia Civil com ênfase em Recursos Hídricos e Saneamento pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

André Luiz de Oliveira

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Mestre em Engenharia Civil com ênfase em Hidráulica e Saneamento – EESC-USP, Doutor em Engenharia Civil com ênfase em Hidráulica e Saneamento EESC-USP.

Rodrigo Braga Moruzzi

Engenheiro Civil – Universidade Federal de São Carlos - SP, Mestre em Engenharia Civil com ênfase em Hidráulica e Saneamento – EESC-USP, Doutor em Engenharia Civil com ênfase em Hidráulica e Saneamento EESC-USP.

Endereço⁽¹⁾: Av. João Naves de Ávila, 2121 – Santa Mônica, Campus Santa Mônica – Uberlândia-MG – CEP: 38400-902 - Brasil - Tel: (31) 9-9992-9171 - e-mail: ricardoandradedutra@gmail.com

RESUMO

Este trabalho teve como propósito investigar o processo de floculação lenta, para água de baixa turbidez, utilizando-se o sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3 \times 16.H_2O$) como coagulante. Os resultados experimentais foram obtidos em ensaios de bancada. O artigo apresenta considerações acerca da distribuição do tamanho de partículas e da análise clássica de floculação. Os resultados obtidos foram avaliados baseados na cinética de agregação e ruptura e na distribuição dos tamanhos de partículas tendo como parâmetro o diâmetro médio dos flocos. Verificou-se que a técnica de análise de imagem foi apropriada para tal estudo, que constatou uma distribuição uniforme das partículas quando deslocadas para direita nos gráficos de DTP, no sentido dos diâmetros maiores, enquanto que a concentração de partículas menores foi maior nos tempos iniciais de floculação. Constatou-se que o estado estacionário para o gradiente médio de velocidade adotado ocorreu 10 minutos após o alcance da eficiência máxima de floculação.

PALAVRAS-CHAVE: Floculação, distribuição do tamanho de partículas, agregação e ruptura, análise de imagem, água de baixa turbidez.

INTRODUÇÃO

A coagulação e a floculação são os processos mais comuns em sistemas de separação de fases cujo objetivo é a remoção de partículas e colóides no tratamento de água. São nessas unidades que ocorrem mudanças significativas na distribuição do tamanho de partículas (DTP) para melhorar a eficiência das técnicas de remoção dos processos subsequentes do tratamento. A falta de conhecimento dos fatores que influenciam no processo de coagulação, como dosagens de coagulante e pH, tempo e velocidade de sedimentação, compromete, o desempenho das estações de tratamento de água (ETAs) (DI BERNARDO et al., 2003; JARVIS et al., 2005; ZHANG et al., 2011; REN et al., 2016).

Thomas et al. (1999), Santos et al. (2004) e Gregory (2009), afirmam que o processo de floculação envolve, basicamente, dois mecanismos: adesão, que corresponde a desestabilização de partículas pela adição de coagulantes/floculantes que ajustam as condições químicas e transporte, que refere-se à agitação introduzida ao meio provocando colisões das partículas desestabilizadas para formação de agregados. Estes podem ocorrer através da difusão browniana (floculação pericínética), pelo movimento induzido do fluido (floculação ortocinética) ou pela sedimentação diferencial, onde há encontro das partículas com diferentes velocidades de sedimentação. O processo de tratamento de água para abastecimento geralmente apresenta partículas maiores, onde a interação pericínética é dificultada, o que a torna insignificante quando comparada à interação ortocinética e à sedimentação diferencial.

De acordo com Thomas et al. (1999), a tentativa de descrever a variação do tamanho das partículas, em meio aquoso, iniciou-se com Smoluchowski (1917) através de um modelo baseado nas hipóteses de que a eficiência das colisões entre as partículas é de 100%, o escoamento é laminar, as partículas estão monodispersas, não ocorre ruptura dos flocos formados, todas as partículas são esféricas e permanecem assim após as colisões, e as colisões ocorrem somente entre duas partículas.

Seguindo as premissas de Smoluchowski (1917), Camp & Stein (1943) empregaram o número de Camp (GT), adimensional e que representa a probabilidade do número de colisões entre partículas floculentas. Entretanto, de acordo com Thomas et al. (1999), apenas o número de Camp não era suficiente para descrever o processo de floculação, visto que não considerava o efeito da quebra dos flocos.

Dessa forma, Argaman e Kaufman (1970) consideraram o efeito da erosão dos flocos, devido as tensões cisalhantes resultantes das colisões entre partículas, representados pelas constantes de agregação e ruptura. De acordo com os autores, a ruptura dos flocos pode ocorrer através de dois fatores: erosão superficial de partículas primárias presentes nos flocos e fragmentação dos mesmos em flocos de tamanho similar.

De acordo com Bache et al. (1997) e Jarvis et al. (2005) a força do floco está diretamente relacionada à estrutura do floco e, portanto, dependente do processo de formação dos mesmos. Os flocos não crescem infinitamente. O crescimento atinge um estado estacionário para uma dada condição de cisalhamento. Geralmente o crescimento dos flocos está relacionado com a quebra, de modo que a taxa de agregação é o equilíbrio entre a formação e ruptura dos agregados.

Segundo Jarvis et al. (2005), a capacidade de recrescimento dos flocos pode acarretar em uma melhor eficiência no processo subsequente, que é a remoção dos flocos. Os flocos desagregados, por apresentarem maior contato entre si, facilitam a etapa de recrescimento.

Nota-se, portanto, que a DTP é fundamental para uma melhor compreensão acerca do processo de tratamento da água destinada ao consumo humano devido ser um parâmetro representativo da caracterização dos flocos.

Dessa maneira, este trabalho buscou avaliar a floculação lenta, para uma água de baixa turbidez, por meio da distribuição do tamanho de partículas, em paralelo a análise da eficiência do processo de sedimentação, estabelecida como parâmetro secundário, utilizando-se de técnica de análise de imagens.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na preparação da água de estudo utilizou-se água deionizada, na qual foi empregada uma suspensão de caulinita para conferir a turbidez desejada, conforme metodologia sugerida por Pádua (1994). Fez-se a diluição da caulinita em 2L de água deionizada e em seguida a deixou no agitador magnético por um período de 8h. Após 12 horas de repouso, efetuou-se a coleta do material sobrenadante da solução mãe. A turbidez da solução mãe foi de 5000 ± 200 uT sendo que para água de estudo foram necessários 8 mL para produção de 1L de água com turbidez de $6,5 \pm 2$ uT.

Foi elaborado o diagrama de coagulação a partir de curvas de isoeficiências de turbidez para ensaios com sulfato de alumínio comercial ($Al_2(SO_4)_3 \times 16.H_2O$) com faixa de pH de coagulação entre 4 e 9. Foram avaliadas as condições de sedimentabilidade dos flocos para gradiente de velocidade médio (G) de $20 s^{-1}$ 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 . Foi considerada a condição de equilíbrio dinâmico dos flocos, determinada conforme modelo proposto por Bratby, Miller e Marais (1977) (Equação 1).

$$\frac{N_D}{N} = \left[\frac{K_B}{K_A} G + \left(1 - \frac{K_B}{K_A} G \right) e^{-K_A GT} \right]^{-1} \quad \text{Equação (1)}$$

Na qual:

N_0 – número inicial de partículas primárias antes da floculação após longo período de sedimentação (medido em termos de turbidez inicial da água – uT);
 N - número de partículas primárias após o tempo T de floculação e após longo período tempo de sedimentação (medido em termos de turbidez inicial 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 floculação (s).

Em seguida, utilizou-se o software *Origin 8.1*, método de convergência não linear, para obter as constantes cinéticas K_A e K_B convergindo para os valores de eficiência de floculação anteriormente definidos.

O tratamento e análise das imagens tiveram como base os procedimentos determinados por Moruzzi (2005). Na execução do ensaio foi utilizado equipamento de bancada *Jartest* com câmera *Nikon*, modelo D5500RM, de resolução máxima de 6000 x 4000 *pixels* com tamanho de pixel de 0,012 mm. O arranjo experimental é ilustrado na Figura 1. O tratamento das imagens foi realizado através do *software freeware Image Tool 3.0*. A iluminação utilizada consistiu em plano de *laser* com potência de 35000 mW ajustada ao foco do sistema de captura de imagens. Para possibilitar a análise da evolução da distribuição de tamanho de partículas as imagens foram adquiridas durante cada minuto durante os dez primeiros minutos e depois efetuada nos tempos de 15, 20, 30, 40, 50 e 60 min. Cabe ressaltar que as imagens foram obtidas a uma taxa de aquisição de 4 fotos por segundo.

Para determinação das curvas de DTP foram analisadas 78584 partículas para o gradiente médio de velocidade de 20 s^{-1} . Adotou-se, como parâmetro base, o diâmetro médio dos flocos, representado no *software Image Tool 3.0* pelo diâmetro de *Feret*, correspondente à média da distância entre duas linhas paralelas tangentes à projeção da partícula, equivalente ao diâmetro de um círculo com a mesma área da partícula. A Equação (2) apresenta a fórmula utilizada, pelo software em questão, para o cálculo do referido diâmetro.

$$D_{feret} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad \text{Equação (2)}$$

Na qual:

D_{feret} - diâmetro de *Feret* ou diâmetro equivalente do floco (mm);
 A - Área do floco representada na imagem (mm^2).

Os dados foram classificados em 16 classes de tamanho com variação de 0,08 mm com menor faixa de 0,0134 a 0,095 mm e a maior de 1,157 a 1,238 mm.

No presente trabalho foi utilizado o programa Microsoft Excel® com auxílio da ferramenta *Solver*, de regressão não linear, para análise dos dados experimentais obtidos.

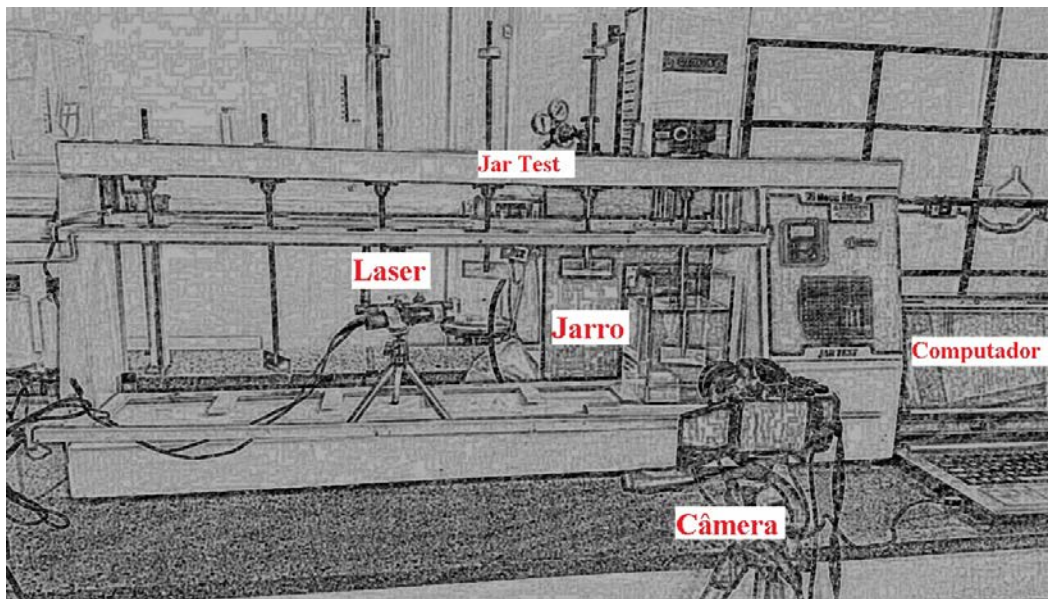


Figura 1: Esquema representativo da aquisição, análise e tratamento das imagens obtidas.

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Por meio da construção do diagrama de coagulação foi adotado o par de valores dados por pH de 6,5 e dosagem de sulfato de alumínio de $2,5 \text{ mg Al}^{3+}\cdot\text{L}^{-1}$, que retrataram a melhor eficiência de remoção de turbidez.

A Figura 2 ilustra as partículas produzidas utilizando-se $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$ para diferentes tempos de floculação. Percebe-se as diferentes distribuições de tamanho, as quais na Figura 2 (a) são observadas partículas menores e em maior número e nas demais Figuras 2(b), 2(c), 2(d), 2(e) e 2(f) são observadas partículas maiores e em menor número, apresentando uma distribuição semelhante.

A Figura 3 apresenta a DTP para tempos de floculação de 2, 5, 10, 20, 40 e 60 minutos após a realização do tratamento das imagens. Repara-se que há predominância de uma concentração de partículas de diâmetros menores para o tempo de floculação de 2 minutos, enquanto que para os demais tempos observa-se uma distribuição mais uniforme apresentando diâmetros maiores de partículas. Analisando a quantidade de partículas pertencentes a classe 1 de tamanho (0,0134 a 0,095 mm), observa-se que para o tempo de 2 minutos tem-se uma concentração de 71,23%, enquanto que para os tempos subsequentes, as concentrações de partículas observadas foram de 70,38%, 65,19%, 66,71%, 67,52% e 67,63%, respectivamente. Nota-se que a partir do tempo de floculação de 20 minutos não houve uma redução significativa da concentração de partículas como observado no intervalo de tempo inferior a este e nem aumento do tamanho dos flocos formados desde então. Dessa maneira, pode-se concluir que houve um equilíbrio entre as taxas de agregação e ruptura, evidenciando, assim, o alcance do estado estacionário para o gradiente médio de velocidade em estudo.

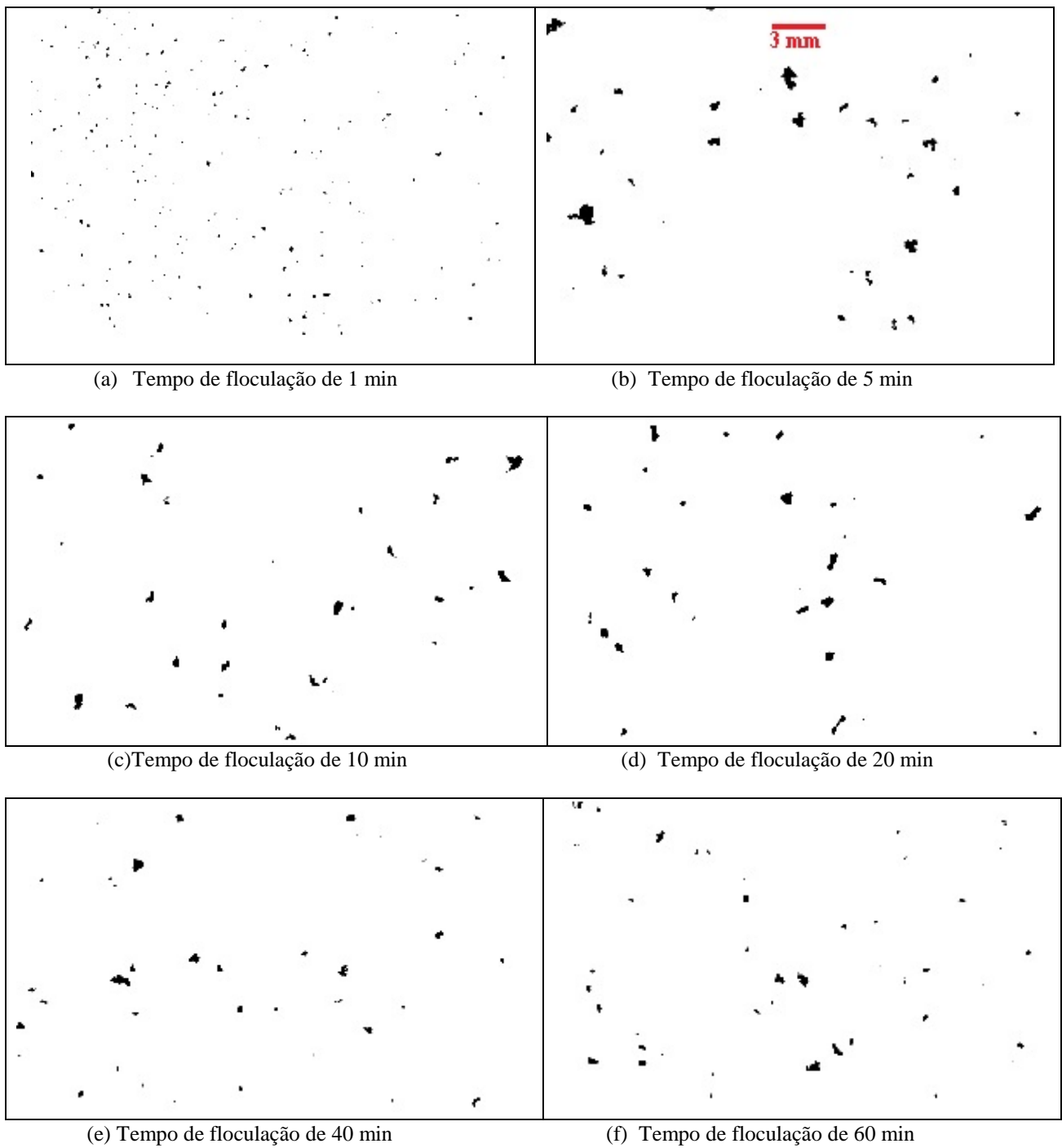


Figura 2: Imagens binarizadas para diferentes tempos de floculação para o $G 20s^{-1}$

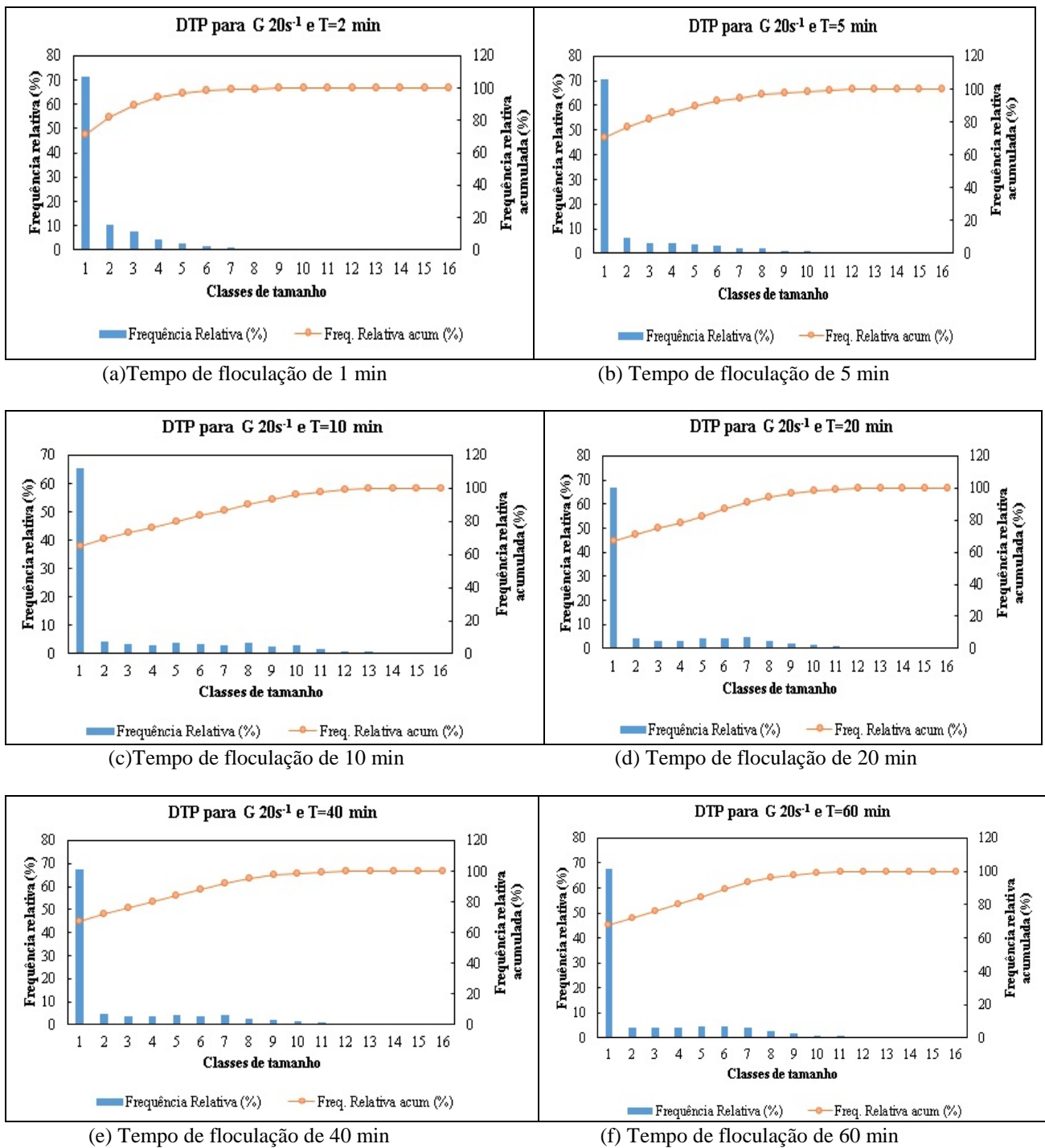


Figura 3: Distribuição do tamanho de partículas para diferentes tempos de floculação do $G\ 20s^{-1}$

Outro ponto de interesse no processo de floculação é a verificação do impacto do tempo de floculação na formação dos flocos.

Para o desenvolvimento do estudo da cinética de floculação foi necessário analisar a relação entre a quantidade de partículas da primeira classe de tamanho e os tempos de floculação, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Quantidade de Partículas Primárias em função do tempo de floculação para $G=20s^{-1}$

TEMPO (s)	NÚMERO DE PARTÍCULAS PRIMÁRIAS
120	8792
600	1890
1200	2858
1800	2923
2400	2862
3000	3745
3600	3572

A Figura 4 retrata a obtenção dos parâmetros cinéticos da floculação tomando como primárias as partículas da primeira classe referentes ao $G = 20s^{-1}$ no desempenho do processo de floculação. As constantes cinéticas de agregação (K_A) e ruptura (K_B), foram obtidas aplicando-se a Equação (1). Salienta-se que o ideal é que sejam utilizados dados de mais de um gradiente médio de floculação para obtenção das constantes cinéticas, entretanto, o objetivo principal desta investigação foi a observação do estabelecimento do patamar de estabilização.

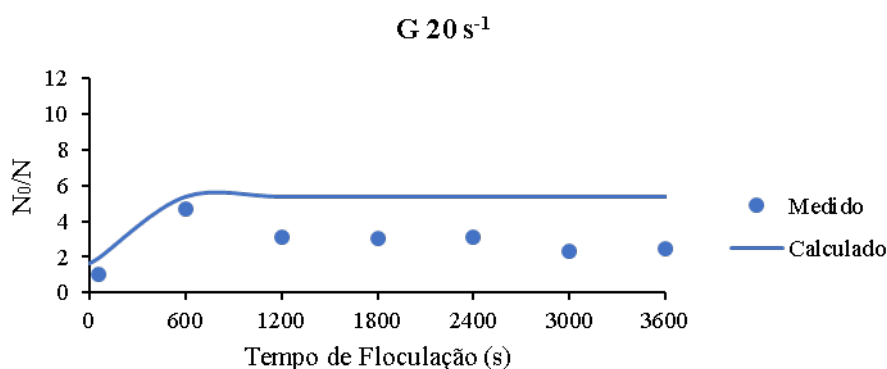


Figura 4: Aplicação da Equação 1 para os dados obtidos a $G = 20 s^{-1}$

Pela análise da Figura 4, observa-se que para $G = 20 s^{-1}$ a eficiência máxima de floculação foi obtida no tempo de 10 minutos, sendo obtidos, utilizando-se a Equação 1 as constantes cinéticas de agregação $K_A = 7,53 \times 10^{-4} \pm 2,32 \times 10^{-4}$ e $K_B = 7,03 \times 10^{-6} \pm 2,32 \times 10^{-6}$ para intervalo de confiança de 95%. Como condição inicial o valor de N_0 foi estabelecido como a quantidade de partículas pertencentes à primeira classe de tamanho obtido no tempo de floculação de 2 minutos. É notória a tendência de equilíbrio das forças de agregação e ruptura dos flocos logo após o alcance do desempenho máximo de floculação. Nos 10 minutos subsequentes, o equilíbrio dos parâmetros cinéticos em estudo é atingido pelo estabelecimento do patamar de estabilização dos diâmetros médios dos flocos, da eficiência do processo, condizente com o que fora observado na DTP ilustrada na Figura 3. Como supracitado, ressalta-se que a obtenção dos parâmetros cinéticos deve ser conduzida de forma mais satisfatória utilizando-se um conjunto de dados obtidos para diversos gradientes de velocidade na floculação, entretanto, foi possível observar o estabelecimento do patamar de estabilização, objetivo principal desta investigação.

CONCLUSÕES

A Distribuição do Tamanho de Partículas por meio do fracionamento e da análise do parâmetro do diâmetro médio dos flocos, se mostrou de fácil aplicabilidade e relevante para avaliação da floculação lenta para água de baixa turbidez, além de contribuir para obtenção dos parâmetros cinéticos tão importantes para análise da eficiência de floculação.

Verificou-se, que para o $G = 20 s^{-1}$, adotado no estudo, houve um rápido aparecimento de partículas concentradas nas faixas de menor diâmetro. Observa-se que a partir de $T_f = 10$ minutos houve um pequeno decréscimo na concentração destas partículas na primeira faixa e estabilização ao longo do experimento.

Constatou-se que o estado estacionário obtido para o gradiente médio de velocidade de 20 s^{-1} está de acordo com o observado em trabalhos recentes sobre o tema e que a eficiência máxima de floculação se deu logo nos minutos iniciais do processo.

Verificou-se, também, que a análise de imagens é um processo não intrusivo e de fácil aplicabilidade para futuros trabalhos que envolvam estudo da cinética de floculação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento do projeto de pesquisa e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio na publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARGAMAN, Y. and KAUFMAN, W. J. (1970) *Turbulence and Flocculation*. *J. Sanit. Eng. Div. ASCE* 96, 223.
2. BACHE, D. H.; JOHNSON, C.; MCGILLIGAN, J. F.; RASOOL, E. *A conceptual view of floc structure in the sweep floc domain*. *Water Science and Technology*. v.36, p. 49-56, 1997.
3. 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.
4. CAMP, T.R. & STEIN, P.C. *Velocity gradients and internal work in fluid motion*. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*. v. 85, p. 219-237, 1943.
5. DI BERNARDO, L. et al. *Tratamento de água para abastecimento por filtração direta*. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 1º Ed. v. 1, p. 498. Rio de Janeiro: Projeto PROSAB, RIMA, 2003.
6. GREGORY, J. *Optical monitoring of particle aggregates*. *Journal Environmental Sciences*. v.21, p.2-7, 2009.
7. JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; GREGORY, J. and PARSONS, S.A. *A Review of floc strength and breakage*. *Water Research*. v.39, p.3121-3137, 2005.
8. 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 de doutorado. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. v.1, p.240, 2005.
9. PÁDUA, V.L. *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*. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994, 165 p.
10. REN, P et al. *Analysis of floc morphology in a continuous-flow flocculation and sedimentation reactor*. *Journal of Environmental Sciences*. JES-00760, p. 1-8, 2016.
11. SANTOS, H. R. et al. *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, out/dez 2004.
12. THOMAS, D. N.; JUDD, S. J.; FAWCETT, N. *Flocculation modelling: a review*. *Water Research*, v.33, n. 07, p. 1579-1592, 1999.
13. Z. YANG et al. *A new method for calculation of flocculation kinetics combining Smoluchowski model with fractal theory*. *Colloid and Surface A: Physicochem. Eng. Aspects*. v. 423, p. 11-19, 2013.