

I-174 - ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS E DO DIÂMETRO MÉDIO DAS PARTÍCULAS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE FLOCULAÇÃO

André Luiz de Oliveira⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa-MG. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

Pâmela Moreno

Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB/UNESP).

Pedro Augusto Grava da Silva

Graduando em Engenharia Ambiental. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP).

Marcelo De Julio

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de São Carlos-SP. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

Rodrigo Braga Moruzzi

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de São Carlos-SP. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

Endereço⁽¹⁾: Avenida João Naves de Ávila, 2121, Santa Mônica - Uberlândia - MG - CEP: 38408-100 - Brasil
- Tel: (34) 3239-4170 - e-mail: andreoliveira@feciv.ufu.br

RESUMO

O presente trabalho foi realizado em equipamento em escala de bancada Jarreste. Foram realizados experimentos de coagulação/floculação com água de turbidez igual a 25 uT preparada em laboratório a partir de solução mãe de caulinita. Durante o processo de floculação foram avaliadas as curvas de distribuição de tamanho de partículas (DTP) em função do tempo de floculação, além disso, foi avaliado o comportamento das médias dos diâmetros mínimos, médios e máximos dos flocos. As imagens dos flocos foram obtidas com câmera digital de alta velocidade de captura e tratadas por software específico de análise de imagens. A vantagem deste tipo de análise do processo de floculação refere-se à obtenção de informações em tempo real das características dos flocos. Neste sentido, este trabalho objetivou, avaliar as curvas de Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) e diâmetros médios das partículas em suspensão floculenta em função do tempo de floculação por meio de análise de imagens obtidas durante o processo de formação/quebra dos flocos. Foi possível observar, a partir da análise dos dados obtidos, que há uma tendência de estabilização da DTP e dos diâmetros médios das partículas a partir de 10 minutos de T_f , o que confirma algumas premissas das teorias tradicionais de floculação, como a estabilidade do sistema resultante do equilíbrio entre as forças de formação e ruptura dos flocos.

PALAVRAS-CHAVE: Floculação, Análise de imagem, Distribuição de Tamanho de Partículas.

INTRODUÇÃO

As partículas presentes na água são estruturas tridimensionais, em sua maioria irregulares, polidispersas e com diferentes propriedades físico-químicas. É importante quantificar e classificar, para uma determinada amostra de água, a concentração e forma das partículas, concentradas em faixas de tamanho, principalmente para entendimento dos efeitos desta distribuição e da previsão das técnicas de separação sólido/líquido mais adequadas.

Conforme Santos et al. (2004), os fenômenos como transferência de massa, adsorção, difusão e reações bioquímicas nos processo de tratamento de água de abastecimento e residuárias são todos influenciados pela distribuição de tamanho de partículas, cuja determinação da concentração de partículas presentes em uma suspensão é baseada, principalmente, em processos indiretos, como medida de turbidez, concentração de sólidos, DQO. Geralmente, conforme reporta Junker (2006) o tamanho das partículas é obtido com base em

medições diretas de diâmetro, área ou volume, ou por meio do cálculo de um diâmetro equivalente assumindo uma forma esférica. A forma esférica é a única que pode ser representada por um único número. Existem várias expressões utilizadas para descrever o tamanho representativo de uma partícula em relação ao tamanho de uma esfera equivalente.

No tratamento de água de abastecimento, o processo de floculação configura etapa primordial de tratamento em que partículas menores são desestabilizadas e condições adequadas para sua aglomeração são estabelecidas. É importante, neste processo, a obtenção de informações a respeito dos flocos formados uma vez que suas características regem o sucesso da operação. Ressalta-se, portanto, que a floculação é a principal etapa responsável por alterar a distribuição e a forma do material particulado, visando sua posterior remoção em unidades de separação sólido/líquido.

A floculação é o processo pelo qual as partículas desestabilizadas em suspensão são agregadas, baseada, convencionalmente, nas etapas de transporte e agregação. O transporte, que provoca o choque entre as partículas, é alcançado em virtude de variações locais de velocidade resultantes da floculação pericínética ou browniana, relativa à energia térmica do fluido, floculação ortocínética ou gradiente de velocidade, produzido pela massa do fluido em movimento e sedimentação diferencial, na qual são promovidos choques entre as partículas de diferentes velocidades individuais de sedimentação (BRATBY et al. 1977, THOMAS et al., 1999).

A agregação depende de uma série de forças de curto alcance pertencentes à natureza das superfícies das partículas; a floculação é, portanto, o processo de promoção do choque entre os colóides coagulados para formação de agregados maiores (JARVIS et al. 2005).

Medidas diretas da eficiência da floculação, como obtenção da distribuição de tamanho de partículas (DTP) e morfologia dos flocos (como diâmetros), podem fornecer importantes informações omitidas quando utilizadas as medidas indiretas (como turbidez) inclusive, possibilitando o acompanhamento do processo em tempo real, com mais precisão e velocidade de resposta. O crescimento dos flocos até um determinado limite e o alcance do estado estacionário para uma dada condição de cisalhamento podem ser acompanhados diretamente da câmara de floculação (JARVIS et al 2005).

As curvas de distribuição DTP e os diâmetros médios (D_{med}) podem ser aplicados diretamente no controle da coagulação/floculação, isoladamente ou em conjunto, como observado em Yao et al. (2014), dentre vários outros trabalhos. As medidas diretas de desempenho da floculação, em termos de parâmetros representativos da distribuição e morfologia dos flocos, são extremamente valiosas, uma vez que as características dos flocos são determinantes no correto emprego da tecnologia de separação de fases e governam a eficiência global de remoção de partículas em sistemas de tratamento de água. O surgimento dos flocos nas unidades de tratamento e o alcance do patamar de estabilidade, para uma determinada configuração pré-estabelecida, podem ser monitorados pelo acompanhamento destas características.

A estabilidade dos flocos em suspensão é dependente do quão fácil eles se rompem e está diretamente relacionada com a força e o número de ligações que mantêm os flocos unidos. Durante a rápida formação inicial dos microflocos, a agregação é dominante em relação à quebra, entretanto, a importância da quebra dos flocos aumenta quando a distribuição do tamanho dos flocos é deslocada para faixas de maior tamanho. Assim, o tamanho do floco no estado permanente é governado pelas condições de cisalhamento/tensão no meio líquido que após atingido o estado permanente, aumentando-se a taxa de cisalhamento os flocos irão romper e um novo estado permanente será alcançado. Segundo Brakalov (1987), o diâmetro do floco estável é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento no meio, ou gradiente médio de velocidade de floculação (G_f).

A literatura traz diferentes trabalhos que buscam avaliar as características das partículas durante sua formação/quebra no processo de floculação. Neste trabalho buscou-se avaliar o desenvolvimento dos flocos e verificar sua estabilidade temporal por meio de ensaio de floculação em Jarreste em um período elevado, necessário para verificação do alcance do patamar de estabilidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi avaliada a evolução da DTP e do diâmetro médio das partículas em função do tempo. O tempo total de floculação foi de 3 horas para avaliação do alcance do patamar de estabilização do processo. O processo de floculação foi simulado em equipamento de bancada Jarrest.

A água de estudo foi obtida conforme Pádua (1994) pela introdução de 40 g de caulinita em 1 L de água deionizada e a mistura foi conduzida por duas horas com gradiente médio de velocidade de 1000 s^{-1} . A água de estudo, produzida a partir da solução mãe, apresentou de $25 \pm 2 \text{ uT}$.

Dentre os diversos pares de valores ótimos observados nos estudos prévios de coagulação/floculação foi escolhido o par de valores $\text{pH} = 7,5$ e $\text{DA} = 2,0 \text{ mgAl/l}$ para condução dos experimentos principais, realizados com gradiente médio de velocidade na floculação (G_f) igual a 40 s^{-1} e tempo de floculação (T_f) total de 3 horas, cujas imagens dos flocos foram obtidas em tempos intermediários.

As imagens dos flocos (partículas) produzidos nos diversos tempos de floculação foram obtidas com câmera *Vision Research Miro EX4* e tratadas por software específico *Image-Pro Plus* para obtenção das características morfológicas. As imagens foram obtidas nos 10 segundos finais dos tempos de floculação avaliados, a uma taxa de aquisição de 10 Hz. Para cada tempo de floculação estudado foram avaliadas cerca de 20000 partículas.

A iluminação utilizada consistiu em plano de laser de 2000 mW de potência com comprimento de onda de 532 nm e com 2 mm de espessura. O plano de luz foi ajustado no foco do sistema de captura de imagens permitindo o controle da aquisição na posição de interesse. A maior vantagem do emprego de método não intrusivo é que as amostras podem ser avaliadas sem risco de deformação da amostragem por ruptura dos flocos.

O tratamento das imagens consistiu em transformar cada imagem obtida pela câmera, inicialmente similar a uma fotografia em tons de cinza, em uma matriz binária que tivesse somente pixels (representando os flocos) e pixels que não são considerados pelo *software*. Utilizando o *software Image-Pro Plus 7.0* (IPP 7.0) escolheu-se o limiar que melhor representava a situação real. Após a binarização a matriz era operada de forma a ter-se a contagem total de flocos e dados sobre o seu tamanho e forma.

A Figura 1 ilustra o aparato experimental composto por laser, câmera digital (software para aquisição das imagens) e jarro do equipamento Jarrest, além do software para tratamento das imagens (não ilustrado na Figura).

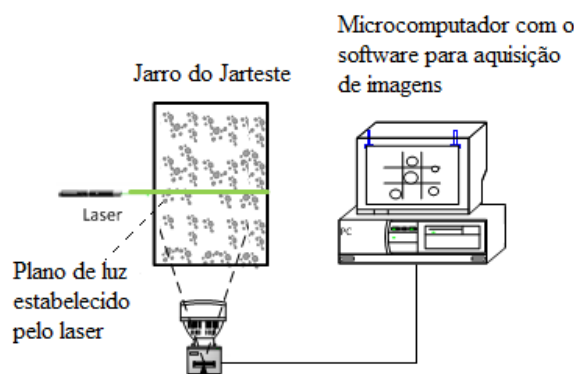


Figura 1 – Ilustração do aparato experimental

Para estabelecimento da DTP as partículas foram agrupadas por faixas de tamanho para cada tempo de floculação estudado, ou seja, foi elaborado um gráfico com a frequência relativa dos diâmetros médios das partículas x tempo de floculação.

Para análise morfológica das partículas foram identificados três diâmetros: mínimo, médio e máximo. O diâmetro mínimo, definido por D_{min} , foi obtido pelo comprimento da menor linha que une dois pontos do contorno do floco passando pelo centroide. O diâmetro médio (D_{med}) foi obtido pelo comprimento médio dos diâmetros medidos em intervalos de 0 a 360° com passo em 2°, com referência ao centroide. Já o diâmetro máximo (D_{max}) foi determinado pelo comprimento da maior linha que une dois pontos do contorno do floco passando pelo centroide.

RESULTADOS

Para elaboração das Figuras 2 e 3 foram adquiridas 100 imagens dos flocos da suspensão em cada um dos tempos de floculação estudados (os tempos de floculação avaliados podem ser verificados na legenda da Figura 2).

Os testes conduzidos indicaram uma tendência de estabilização da floculação a partir do T_f de 10 minutos. Há inicialmente surgimento de partículas de maior diâmetro e, posteriormente, decréscimo no desenrolar do experimento. O T_f total avaliado de 3 horas foi escolhido para verificação do efeito, a longo prazo, das tensões superficiais de cisalhamento. O objetivo principal da manutenção de períodos longos de floculação foi verificar se os flocos (partículas) se romperiam gradativamente, o que não aconteceu, ou seja, a estabilização do processo de floculação foi alcançada.

A Figura 2 ilustra o deslocamento da curva de DTP em função do T_f mantendo-se fixo o $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$.

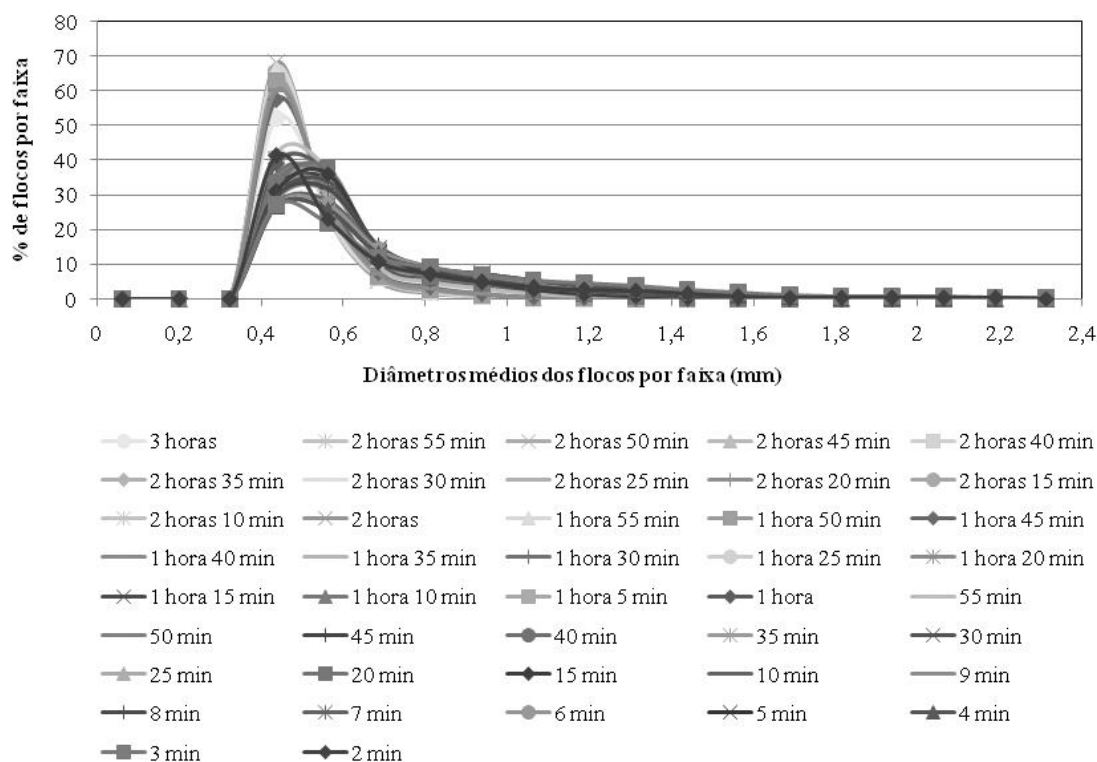


Figura 2 – Evolução das curvas de DTP em função do T_f

Analisando-se a Figura 2 é possível perceber que as curvas de DTP, a partir de certo tempo de experimento, são praticamente, coincidentes, ou seja, a Figura 2 comprova a existência de um patamar de estabilização dos flocos.

Considerando-se os primeiros 60 minutos de ensaio observa-se aproximadamente 40% das partículas com diâmetros entre 0,4 e 0,6 mm e para os minutos finais observa-se aproximadamente 60% de partículas com

diâmetro entre 0,4 e 0,6 mm. Não são observadas mudanças significativas nas curvas de DTP após o alcance deste patamar.

A Figura 3 ilustra melhor esta situação em que são representas as médias dos diâmetros mínimos, médios e máximos dos flocos, na qual foi utilizado o mesmo procedimento de obtenção das curvas de DTP, ou seja, obtenção dos diâmetros médios das partículas em função do tempo de floculação.

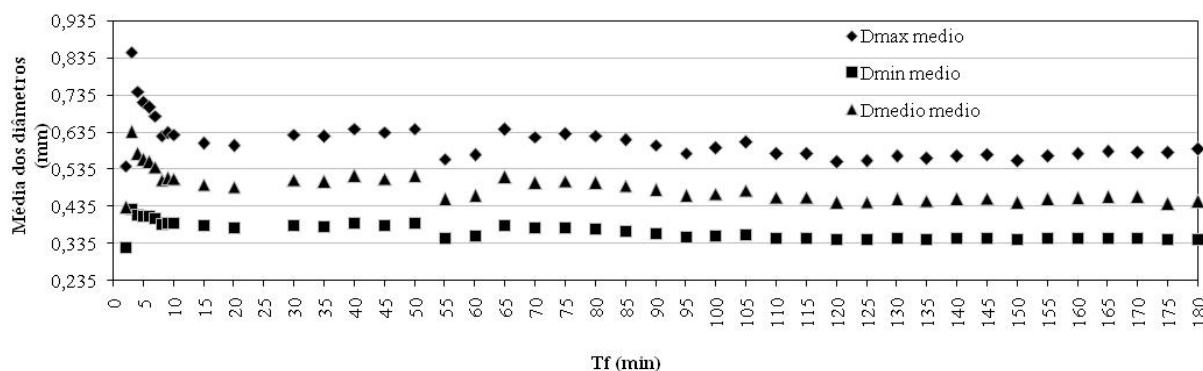


Figura 3 - Média dos diâmetros mínimos, médios e máximos dos flocos em função do tempo de floculação

A Figura 3 mostra que a partir de uma perturbação inicial das médias dos diâmetros dos flocos há uma tendência de estabilidade, conforme já verificado nos trabalhos de Argaman (1968), Argaman (1971), Argaman e Kaufman (1970), Bratby (1981), Thomas et al. (1999), He et al. (2012), entre outros.

Os dados obtidos neste trabalho permitem sugerir que há possibilidade de ampliação da discussão sobre o processo de floculação a partir da obtenção de parâmetros representativos, obtidos diretamente durante o processo de formação/quebra. Esta análise pode complementar a realizada com o parâmetro indireto turbidez, convencionalmente utilizado, como nos estudos conduzidos por Smoluchowski (1917), Argaman e Kaufman (1970), Bratby (1981), entretanto, mais estudos devem ser ainda conduzidos.

CONCLUSÕES

Percebe-se que há uma tendência de estabilização da DTP e dos diâmetros médios das partículas a partir de 10 minutos de T_f . Logo no início do processo de floculação (primeiros 10 minutos) houve um aumento considerável no tamanho dos flocos (partículas) evidenciado pelo deslocamento das curvas de DTP no sentido das partículas de maior diâmetro (fronteira direita da distribuição), em contrapartida, com o aumento do tempo de floculação, houve uma tendência de rearranjo das distribuições de partículas no sentido da fronteira esquerda. Este aspecto pode ser claramente observado na Figura 3, de acordo com a evolução das médias dos diâmetros das partículas.

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), ITA e UNESP-IGCE-Campus de Rio Claro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARGAMAN, Y. Turbulence in Orthokinetic Flocculation. Ph.D. Thesis presented to University of California, Berkely, 1968.
2. ARGAMAN, Y. Pilot-Plant Studies of flocculation. Journal AWWA, v. 63, n. 12, p. 775-777, 1971.

3. ARGAMAN Y. & KAUFMAN W. J. Turbulence and flocculation. J. Sanitary Eng. Div. ASCE v. 96, p. 223-241, 1970.
4. BRAKALOV, L.B. A connection between the orthokinetic coagulation capture efficiency of aggregates and their maximum size. Chem. Eng. Sci. v. 42, p. 2373-2383, 1987.
5. BRATBY, J. R.; MILLER, M. W. & MARAIS, G. V. R. Design of Flocculation Systems from Batch Test Data. Water S. A., v.3, n. 4, p. 173-182, 1977.
6. BRATBY, J. R. Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems. Jour. AWWA, v. 73, n. 6, p. 318-325, 1981.
7. CRITTENDEN, J. C; TRUSSELL, R. R; HAND, D. W, HOWE, K. J. & TCHOBANOGLOUS, G. Water Treatment: Principles and Design. 2nd ed., 2005
8. 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, p. 509-520, 2012.
9. JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; GREGORY, J. & PARSONS, S. A. A review of floc strength and breakage. Water Research, v. 39, p. 3121-3137, 2005.
10. JUNKER, B. Measurement of bubble and pellet size distributions: past and current image analysis technology. Bioprocess Biosyst Eng, v. 29, p. 185-206, 2006.
11. 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. 165 p. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.
12. SMOLUCHOWSKI, M. Versuch einer Mathematischen Theorie der Koagulations Kinetik Kolloid Losungen. Z. Physik Chem., v. 92 (155), 1917.
13. 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.
14. THOMAS, D. N.; JUDDA, S. J. & FAUCETT, N. Flocculation modelling: a review. Water Research, v. 33, n. 7, p. 1579-1592, 1999.
15. YAO, M.; NAN, J. & CHEN, T. Effect of particle size distribution on turbidity under various water quality levels during flocculation processes. Desalination, v. 354, p. 116-124, 2014.