

I-082 - INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DO NÚMERO DE CAMP (NC) NA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS (DTP)

Pamela Moreno⁽¹⁾

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).

André Luiz de Oliveira

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

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⁾: Rua Doutor Hortêncio Mendonça Ribeiro, 1864, apt.22 – Ribeirão Preto – São Paulo -SP - CEP: 14026-090 - Brasil - Tel: (16) 98137-9370 - e-mail: pmoreno.unesp@gmail.com.

RESUMO

A floculação é etapa fundamental no tratamento de água para abastecimento público sendo essencial para remoção de material particulado. O conhecimento da distribuição do tamanho das partículas floculentas torna-se de grande valia para a compreensão dos processos que envolvem a remoção desses flocos bem como a tecnologia de tratamento a ser adotada. Neste trabalho, foi avaliado o produto do gradiente médio de velocidade de floculação (Gf) pelo tempo de floculação (Tf) GT , também definido como Número de Camp (NC), sob a ótica da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP). Para tal, foi empregada técnica dedicada de captura e de tratamento de imagens visando obtenção da DTP e de seus parâmetros representativos. Foram investigados diferentes valores de NC (18000, 24000, 36000, 54000 e 72000) para a avaliação da distribuição de tamanho de partícula floculenta. Em relação à DTP observou-se, por meio da análise de seu parâmetro característico β , que este é sensível a variação do produto GT , sendo mais sensível às alterações dos valores de G para determinados valores de T . Em linhas gerais, o trabalho mostrou que o aumento da energia fornecida durante a floculação implica em menor alteração da dinâmica da distribuição de tamanho de partículas, estabelecendo uma relação inversa de proporção entre energia e a variação do parâmetro característico de distribuição de tamanho de partícula β . Isto ocorre devido à ação de ruptura dos flocos que contribui para o alcance do estado de equilíbrio das partículas floculentas em menor tempo de floculação. Desta maneira, para maiores valores de Gf e NC, maior foi o valor em módulo de β com maior translação do eixo para a faixa de tamanho de partículas menores.

PALAVRAS-CHAVE: Floculação, análise de imagem, Distribuição de Tamanho de Partículas, Número de Camp.

INTRODUÇÃO

O tema água tem cada vez mais chamado a atenção da sociedade. Recurso natural essencial para a vida do homem vem se tornando escasso em decorrência, dentre outras razões, da atividade antrópica, da desigualdade social e da falta de manejo e uso sustentável dos recursos naturais.

O acesso à água tratada e aos serviços adequados de saneamento básico está longe de cobrir as necessidades básicas da população mundial, sendo, na maioria das vezes, privilégio de países e regiões mais desenvolvidas. Este quadro evidencia as inúmeras ocorrências de morte em virtude de doenças intestinais transmitidas por meio deste recurso.

No Brasil, o tema água tem estampado os noticiários com a crise do sistema Cantareira, reservatório de grande importância para a região de São Paulo, em que seus baixos níveis no ano de 2014 e 2015 são preocupantes para suprir o abastecimento público.

Dessa maneira, diante da problemática água, se faz necessário o aperfeiçoamento contínuo das técnicas de tratamento de água e esgoto com o objetivo de proporcionar qualidade e segurança ao meio ambiente e à saúde da população.

Sob o ponto de vista dos processos e operações de uma estação de tratamento de água, a floculação constitui etapa fundamental no tratamento da água para abastecimento público. A característica dos flocos formados durante a floculação tem relação direta com as características da água bruta, dos produtos químicos e da tecnologia empregada, sendo determinantes na eficiência dos processos e na qualidade da água tratada para abastecimento (MORUZZI, 2010).

A coagulação e a floculação promovem mudanças na distribuição de tamanho de partícula (DTP), que traduz os efeitos dos choques, agregação e ruptura dos flocos (ZHANG, 2011). A DTP depende do gradiente médio de floculação e do tempo de exposição das partículas floculentas a este gradiente. Ela pode ser determinada em função de uma série de parâmetros, entre os quais: diâmetro, volume e área. Assim, a compreensão do comportamento da DTP e das características físicas de seus flocos, para distintas condições cinéticas, surge como ferramenta para o aperfeiçoamento de projetos de unidades de separação sólido/líquido no tratamento de água.

Assim, para a obtenção da DTP, distintas metodologias de medição de tamanho de partícula vêm sendo utilizadas, como por exemplo: espalhamento de luz por meio de laser, ultrassom, análise óptica de imagem e análise digital de imagens. A análise digital de imagem permite uma melhor informação visual para a análise e interpretação humana ou para a percepção automática por meio do uso de máquinas (JUNKER, 2006).

A cinética dos encontros entre partículas durante a floculação leva em consideração os efeitos de agregação e ruptura. A agregação é decorrente dos encontros das partículas desestabilizadas, sendo que a agitação promove uma maior taxa de encontros e favorece a formação de aglomerados ou flocos. Já na ruptura, devido a forças de cisalhamento, tem-se a erosão dos flocos que é mais acentuada quando se tem agitação intensa ou tempo de floculação longo (THOMAS, 1999).

Segundo Argaman (1971) a eficiência da floculação é dependente do produto adimensional GT (NC), da distribuição do tempo de residência, do volume dos flocos (partículas) e da distribuição do tamanho dos flocos.

Portanto, a avaliação da distribuição de tamanho de partículas floculentas em diferentes condições cinéticas, por meio de análise digital de imagens é de suma importância para uma maior compreensão dos processos de tratamento de água a fim de otimizá-los e alcançar a qualidade desejada do tratamento.

O trabalho teve como objetivo investigar o efeito do Número de Camp (NC) na Distribuição de Tamanho de Partícula (DTP) floculenta, por meio do emprego de técnica dedicada de análise digital de imagem.

Seu desenvolvimento contou com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo: 2013/01634-3 pertencente ao Processo: 2010/50694-0.

MATERIAIS E MÉTODOS

Diagrama de coagulação

Para início dos trabalhos foi construído um diagrama de coagulação/floculação para o Sulfato de Alumínio utilizando-se o equipamento de bancada Jarteste. Variou-se então a dosagem do coagulante (sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$)) e a faixa de pH. Os gradientes médios de velocidade na mistura rápida e na floculação (G_{mr} e G_f) e tempos de mistura rápida e floculação (T_{mr} e T_f) foram fixos com base na literatura, sendo $G_{mr} = 1200 \text{ s}^{-1}$ e $T_{mr} = 10 \text{ s}$; $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ e $T_f = 20 \text{ min}$. O par de valores ótimos obtidos de pH de coagulação x dosagem de alumínio foi 7,5 x 2,0 mgAl/l.

Água de estudo

A água de estudo foi preparada em laboratório a partir de solução de caulinita. Esta foi preparada tendo com base o trabalho de Pádua (1994) e adaptada do trabalho de Gregory e Yukselen (2004). Assim, 40 g de caulinita da marca Fluka foram misturadas em 2 L de água deionizada durante duas horas no equipamento Jarteste com gradiente médio de velocidade de 1200 s^{-1} . Após a agitação a solução foi deixada em repouso durante 12 horas e o sobrenadante, aproximadamente 800 mL da solução, foi utilizado para constituir a solução mãe. A turbidez da água bruta (solução mãe) foi de $5000 \pm 200 \text{ uT}$. A água utilizada nos ensaios (água de estudo) foi preparada com a adição de 10 mL da solução de caulinita em 2L de água deionizada para obtenção de turbidez de $25 \pm 2 \text{ uT}$.

Análise de imagem

Para a análise e estudo da cinética da floculação, em termos do NC, foi adotado sistema de captação de imagens, não intrusivo, contribuindo para a não ocorrência de deformações nas características das partículas (flocos) estudadas. Para tanto, foi utilizada câmera *High-Speed Vision Research Miro EX 4*.

Para o processamento e estudo das imagens, a câmera *Phantom Miro EX4* foi conectada a um computador em que foi instalado o *Software Phantom PCC 2.2*. Por meio deste Software foram feitos os ajustes de resolução da imagem, velocidade de captura e frequência, necessários para a aquisição das imagens dos flocos gerados durante a etapa de floculação. Além deste, foi instalado o *Software Image Pro-Plus 7.0* utilizado para o tratamento das imagens digitais adquiridas.

Para estabelecimento do plano de captura de imagens, foi utilizado *laser* (luz fria) com potência nominal de 2000 mW e comprimento de onda verde de 532 nm . O feixe de luz colimado foi alterado por meio de lente cilíndrica buscando a projeção do plano de luz com espessura de 2 mm.

Ensaio de coagulação/floculação

Para os ensaios de coagulação/floculação foi utilizado o equipamento Jarteste. Este foi empregado para obtenção do par de valores dosagem ótima de coagulante x pH de coagulação e determinação dos gradientes médios de velocidade e tempos de mistura rápida e floculação e para o estudo da cinética da floculação.

Estudo da cinética da floculação

Foram adotados como fator colisional, para o estudo da cinética da floculação, cinco números de Camp. Segundo Argaman (1971) a eficiência da floculação depende do produto adimensional GT (NC), sendo G o gradiente médio de velocidade e T o tempo de residência médio. Assim, foram fixos, além do melhor par de valores pH de coagulação x dosagem de Al , os seguintes NC: $\text{NC}_1=18000$; $\text{NC}_2=24000$; $\text{NC}_3=36000$; $\text{NC}_4=54000$; $\text{NC}_5=72000$. Para cada NC, cinco gradientes médios de floculação foram estabelecidos: $Gf_1= 60 \text{ s}^{-1}$; $Gf_2= 50 \text{ s}^{-1}$; $Gf_3= 40 \text{ s}^{-1}$; $Gf_4= 30 \text{ s}^{-1}$; $Gf_5= 20 \text{ s}^{-1}$ com seus correspondentes tempos de floculação em segundos. Portanto, foram realizados 25 ensaios em que as imagens dos flocos foram capturadas nos 10 segundos finais para cada T_f a uma taxa de 10 Hz, obtendo-se, assim, 100 imagens por ensaio.

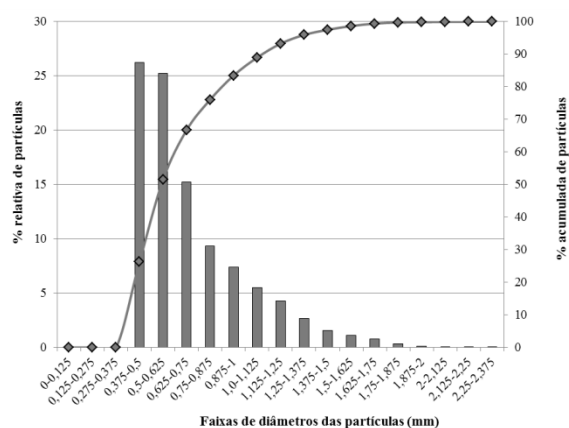
A distribuição de tamanho de partícula foi analisada por meio do parâmetro β , representativo de DTP. Esse coeficiente foi obtido a partir da linearização dos dados obtidos do tratamento das imagens por meio da Equação 1:

$$\text{Log} \left[\frac{\Delta N}{\Delta(d_p)} \right] = \text{Log} A - \beta \text{Log}(d_p) \quad \text{Equação (1)}$$

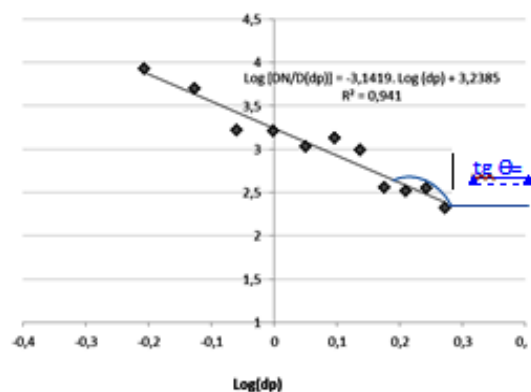
Foi avaliada também a relação do NC com β , tendo como variável independente o valor de Gf , e a relação de β com o valor de Gf , tendo o NC como variável independente.

RESULTADOS

Na Figura 1 é apresentado um exemplo de curva de distribuição de tamanho de partícula (DTP) (relativa e acumulada) obtida experimentalmente e de uma função contínua da DTP, expressa pela Equação 1, ajustada aos dados experimentais. O valor de β corresponde, na forma linearizada, ao coeficiente angular da reta ajustada. No caso específico, o valor obtido em módulo foi de 3,14, que, conforme Crittenden et al. (2005), indica domínio de partículas de menor diâmetro (maior inclinação da reta descendente).



a)



b)

Figura 1: a) Exemplo de curva de DTP obtida experimentalmente. b) Exemplo da função contínua linearizada e ajustada aos dados experimentais.

A relação do Número de Camp (NC) com o parâmetro representativo de distribuição de tamanho de partícula β , para distintos gradientes médios de velocidade de floculação fixos (Gf), evidenciou que com o aumento de Gf houve uma tendência de queda e estabilização do coeficiente angular β , indicando sua menor dependência em relação ao NC para maiores valores de Gf (Figura 2).

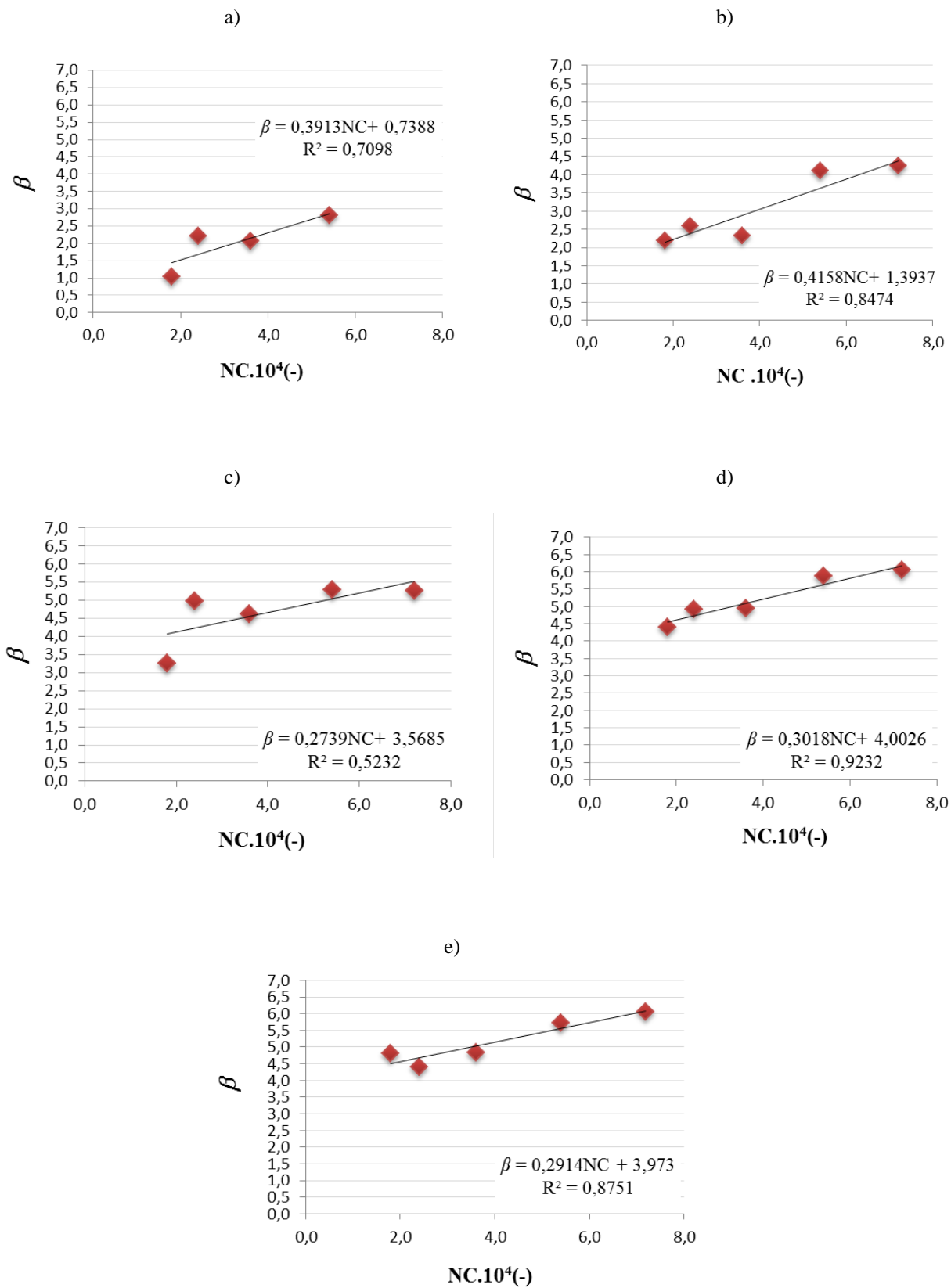


Figura 1: Figura comparativa da interferência do número de Camp em β com o aumento do gradiente médio de velocidade de floculação. a) $Gf = 20 \text{ s}^{-1}$, b) $Gf = 30 \text{ s}^{-1}$, c) $Gf = 40 \text{ s}^{-1}$, d) $Gf = 50 \text{ s}^{-1}$, e) $Gf = 60 \text{ s}^{-1}$.

A energia fornecida ao sistema, expressa por meio do gradiente médio de velocidade de floculação, interfere na dinâmica da distribuição de tamanho das partículas. Sendo assim, há uma relação inversa de proporção em que o aumento do gradiente médio de velocidade de floculação resulta em uma menor alteração da dinâmica de β .

Quanto menor o valor de β , em módulo, maior o número de partícula em faixas de tamanhos maiores, ao passo que β com valores maiores significa maior número de partículas concentradas em faixas de tamanhos menores.

Partindo da hipótese de que a distribuição de tamanho de partícula, antes da floculação, concentra-se nas menores faixas de tamanho, menor interferência no parâmetro β significa dizer que não há modificação dessa condição inicial. Assim, tem-se o predomínio de partículas de menores tamanhos, pois o aumento do gradiente médio de velocidade de floculação provoca o aumento do efeito de ruptura.

A relação do gradiente médio de velocidade de floculação (Gf) com o parâmetro representativo de distribuição de tamanho de partícula (β) para distintos Números de Camp (NC) fixos seguiu o mesmo comportamento, em que o aumento de NC provocou uma tendência de queda da dependência de β em relação ao Gf , sendo que quanto maior o NC menor a interferência no parâmetro β . (Figura 3).

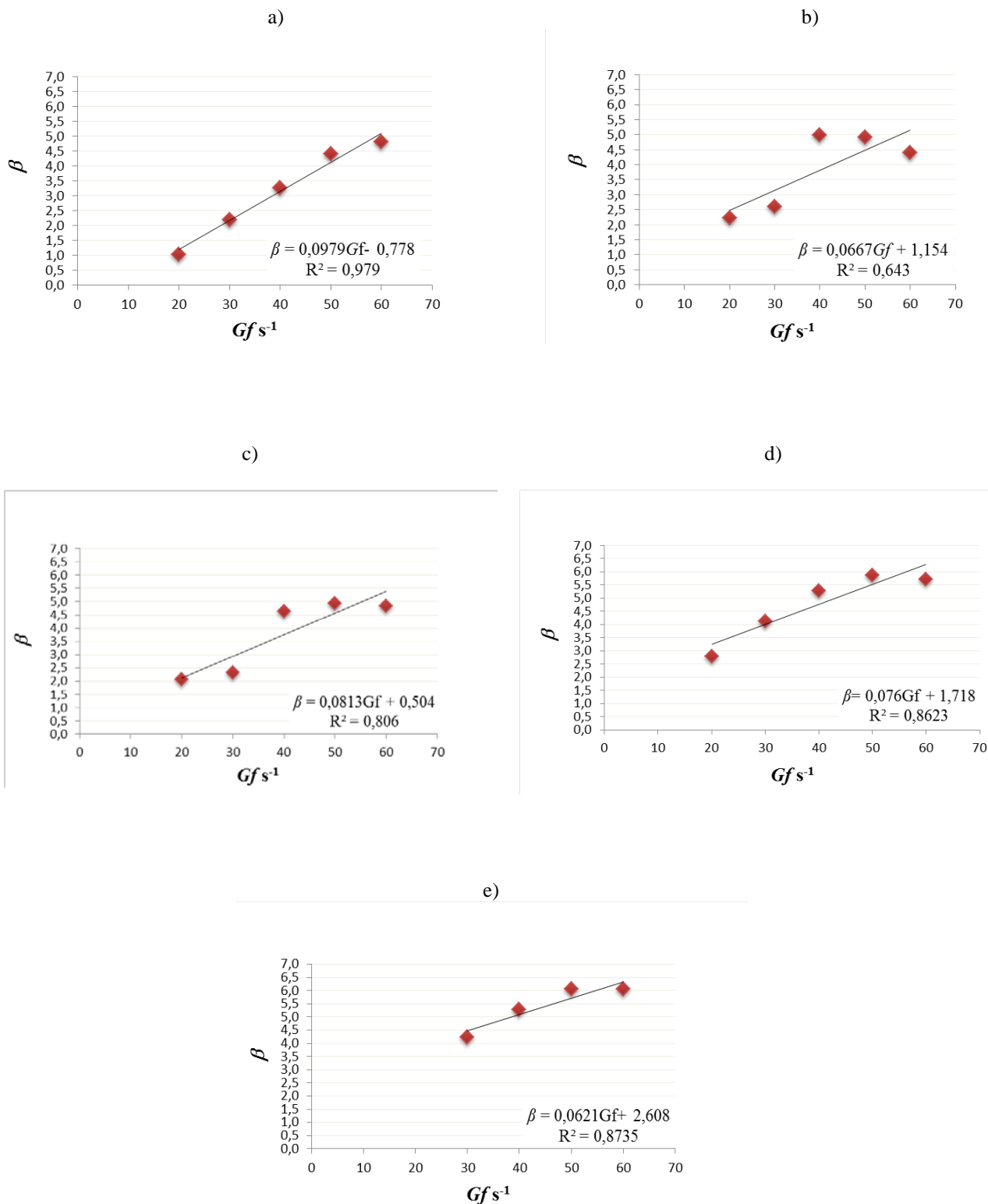


Figura 3: Figura comparativa da interferência do Gf em β com o aumento do número de Camp. a) NC=18000 (-), b) NC=24000 (-), c) NC=36000 (-), d) NC=54000 (-), e) NC=72000 (-).

Generalizando os dados obtidos, foram definidos dois coeficientes de sensibilidade (C.S), sendo um o C.S de β por Gf , obtido da relação β x NC, e o outro C.S de β por NC, obtido da relação β x Gf . Dessa maneira, relacionou-se para cada Gf e NC seu correspondente C.S. de β (Figura 4).

O aumento do Gf ou do NC implicaram em menores coeficientes de sensibilidade de β , consequentemente menos sensível e menos modificado levando a uma DTP com maior concentração de partículas de tamanhos menores.

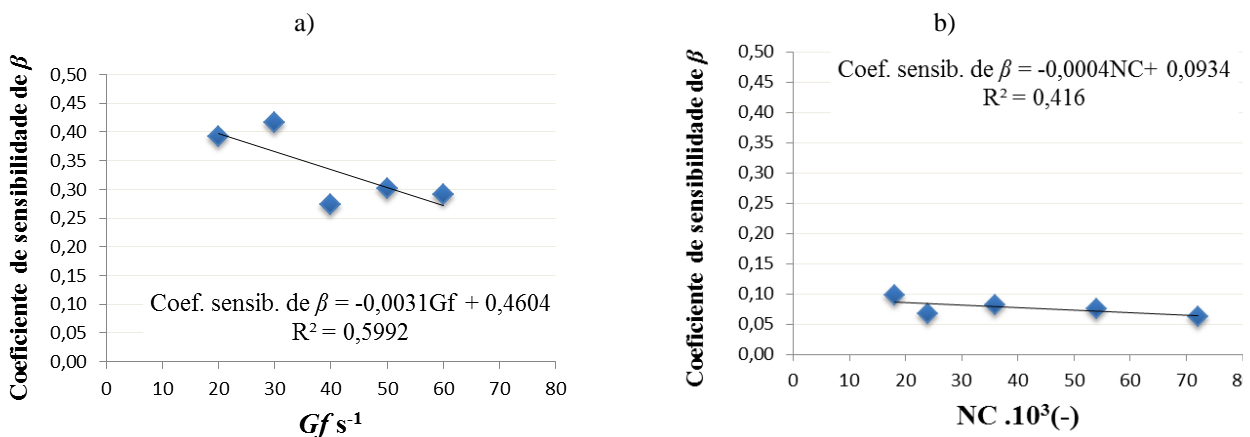


Figura 4: Coeficientes de sensibilidade de β . a) Avaliação com base nos valores de Gf ; b) Avaliação com base nos valores de NC.

Bratby (1981) estudou a cinética da floculação em reator estático e afirmou que após determinado tempo de floculação o estado estacionário é atingido, ou seja, há um equilíbrio entre as taxas de agregação e de ruptura dos flocos, como observado neste trabalho ao se analisar os coeficientes angulares obtidos das relações de β com NC e de β com Gf . O autor ainda concluiu que com o aumento do gradiente médio de velocidade de floculação (Gf), o estado estacionário é mais rapidamente atingido, determinando um desempenho inferior à alcançada por gradientes médios de velocidade com valores menores.

Portanto, o estado de equilíbrio é atingido em menor tempo, devido ao aumento da ruptura das partículas causado pelo aumento dos valores de Gf ou de NC. Desta maneira, há uma menor interferência na distribuição de tamanho de partícula (DTP) determinando uma DTP mais deslocada para o eixo da esquerda, ou seja, concentrada na faixa de partículas de menor tamanho.

Por outro lado, menor valor de Gf implica em maior tempo para o alcance da estabilidade da floculação, com maior desempenho e maior interferência na DTP, resultando em menor número de partículas com distribuição mais deslocada para o eixo da direita em direção as partículas de tamanhos maiores.

Spicer e Pratsinis (1996) estudaram o efeito da aplicação de distintas taxas de cisalhamento durante a coagulação e também afirmaram que os agregados originados alcançam estado de equilíbrio de sua estrutura e distribuição de tamanho de partícula em menor tempo quando expostos a maiores energias. Os autores concluíram, dessa maneira, que a quebra dos flocos foi responsável por manter o tamanho da partícula estável e limitar seu posterior crescimento.

A análise da influência da DTP na eficiência de processos de separação sólido-líquido carece de estudos dedicados sendo importante determinar a relação entre a eficiência de separação/remoção de partículas com a tecnologia adotada. O emprego de medidas diretas, tais como a DTP no controle do desempenho da floculação possibilita o aprimoramento de projetos e operação de sistemas de tratamento de água para abastecimento público.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que o aumento do gradiente médio de velocidade de floculação ou o aumento do número de Camp, mantendo-se fixa o produto GT (NC), implicou em menor alteração da dinâmica da distribuição de tamanho de partícula (DTP). Portanto, as partículas concentraram-se nas faixas de diâmetro de menor tamanho com maiores valores, em módulo, de β . Valores de coeficiente angular da relação de $Gf \times \beta$ da ordem de 0,0979Gf a 0,0621Gf foram obtidos para NC de 18000 a 72000, respectivamente.

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. Pilot-Plant Studies of flocculation. *Journal AWWA*, 63 (12), 775-777. (1971).
2. BRATBY, J.R. Interpreting laboratory results for the design of rapid mix and flocculation systems. *Journal of the American Water Works Association*, v. 73, n.6, p.318-325, Jun, 1981.
3. CRITTENDEN, J. C; TRUSSELL, R. R; HAND, D. W, HOWE, K. J. and TCHOBANOGLOUS, G. *Water Treatment: Principles and Design*. 2nd ed. (2005).
4. GREGORY, J.; YUKSELEN, M.A. The reversibility of floc breakage. Elsevier, p. 251-259, 2004.
5. JUNKER, B. Measurement of bubble and pellet size distributions: past and current image analysis technology. *Bioprocess Byosist Eng*, 29:185-206, 2006.
6. MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by anon-intrusive image analysis system and tracer tests. *IWA Publishing 2010 WaterScience & Technology*, WST, 61, (1), p.253-262, 2010.
7. 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).
8. 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 Res.*; 30 (5) : 1049–56, 1996.
9. THOMAS, D. N.; JUDD, S. J.; FAWCETT, N. Flocculation modeling: a review. *Wat. Res.* v. 33, n. 7, p. 1579-1592, 1999.
10. ZHANG, X.H.; ZHONG, R.S.; LI, X.Y.; LAM, K.M.; XIAO, F. *PIV characterisation of flocculation dynamics and floc structure in water treatment*. Elsevier. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 379, 27–35, 2011.