

I-005 - AVALIAÇÃO DO DIÂMETRO ESTÁVEL E DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULAS (DTP) NA FLOCULAÇÃO E NO RECREScimento DE PARTÍCULAS FLOCULENTAS

Pedro Augusto Grava da Silva

Engenheiro Ambiental pelo IGCE/UNESP Campus Rio Claro. Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, área de concentração Saneamento, pela FEB/UNESP Campus Bauru.

Rodrigo Braga Moruzzi⁽¹⁾

Engenheiro Civil. Professor Adjunto III, UNESP, Campus de Rio Claro.

Juliana Carvalhinho Bull

Graduanda em Engenharia Ambiental pelo IGCE/UNESP Campus Rio Claro. Bolsista em Iniciação Científica.

André Luiz de Oliveira

Engenheiro Civil – Universidade Federal de Viçosa, 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⁾: DEPLAN/IGCE/UNESP Rio Claro. Av. 24-A, nº1515, CEP: 13506-900, Rio Claro – SP. Brasil. Tel: +55 19 3526 9339. E-mail: rmoruzzi@rc.unesp.br

RESUMO

Neste artigo foi avaliado o efeito da quebra induzida sobre o tamanho do floco para duas águas de estudo utilizando o diâmetro estável (d) e a distribuição de tamanho de agregados (DTP), este último expresso por meio do parâmetro β . Secundariamente, o recrescimento dos flocos foi avaliado por meio da razão de recuperação. Para atingir tais objetivos, foi utilizada técnica não intrusiva de análise de imagem. As águas de estudo foram preparadas a partir de solução de ácido húmico *Aldrich Chemical* (tipo 1) e suspensão de caulinita *Fluka* (tipo 2), e coaguladas na região do mecanismo de varredura utilizando sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$). A floculação ocorreu em gradientes de velocidades médios (G) entre 20 e 120 s^{-1} , seguida da quebra induzida dos agregados com G_{quebra} de 800 s^{-1} por 10 segundos. Posteriormente, o G inicial foi restaurado. Os agregados apresentaram menor tamanho após a quebra e recrescimento, ou seja, o diâmetro estável do floco da fase de floculação (d_1) foi sempre maior comparado à fase de recrescimento (d_2). Os valores de d_1 variaram de 337 a 146 μm para água tipo 1 e de 407 a 154 μm para água tipo 2, enquanto os valores de d_2 variaram de 157 a 132 μm para água tipo 1 e de 233 a 123 μm para água tipo 2, para G de 20 e 120 s^{-1} , respectivamente. O parâmetro da DTP depois da quebra (β_2), foi sempre maior que seu correspondente (β_1) sendo que valores maiores de β representam agregados deslocados para as menores faixas da distribuição de tamanho. Os valores de β_2 variaram (em módulo) de 1,2 a 4,6 para a água tipo 1 e de 0,6 a 7,7 para a água tipo 2. Foi observada uma maior recuperação do tamanho em gradientes de floculação elevados para as duas águas estudadas, sendo que para água tipo 1 a relação d_2/d_1 variou de cerca de 0,5 para G de 20 s^{-1} até cerca de 0,9 para G de 120 s^{-1} .

PALAVRAS-CHAVE: Floculação, Recrescimento, Diâmetro Estável, Distribuição Do Tamanho de Partículas (DTP).

INTRODUÇÃO

Muitos processos de separação sólido-líquido pressupõem o aumento de tamanho das partículas, conduzindo a agregados ou flocos, que podem ser removidos em processos de separação sólido-líquido. A coagulação é um processo bem estabelecido dentro do tema tratamento de água e consiste na desestabilização química de impurezas resultante da alteração de características da água (Di Bernardo e Dantas, 2005). Na floculação por sua vez, deseja-se promover o transporte e o choque das partículas desestabilizadas na etapa de coagulação, objetivando, a transformação de partículas discretas de pequenas dimensões em agregados maiores facilitando, por exemplo, a sedimentação ou flotação.

Em água, coagulantes como o Sulfato de Alumínio, utilizado neste estudo, hidrolisam-se rapidamente tornando-se espécies catiônicas, que se adsorvem sobre partículas carregadas negativamente, reduzindo ou

invertendo a sua carga. A dosagem de coagulante e o pH de coagulação são essenciais para o bom desempenho da coagulação. Em baixas dosagens de coagulante, a neutralização de carga é um possível mecanismo de desestabilização de partículas, mas o excesso de coagulante pode levar à reversão de carga e reestabilização de partículas (Yukselen e Gregory, 2004). Em dosagens mais elevadas, a precipitação de hidróxido de metal amorfo pode desempenhar um papel muito importante (Snodgrass *et al.*, 1984), conduzindo à chamada floculação de varredura, em que as partículas ficam enredadas no precipitado. O mecanismo de varredura é intensivamente utilizado nas estações de tratamento de água em que se têm a floculação e a sedimentação antecedendo a filtração rápida (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Os flocos crescem inicialmente a uma taxa que é determinada pelas condições de mistura do sistema, pela concentração de partículas e pela eficiência de colisão. Normalmente, o gradiente de velocidade médio (G) é usado para avaliar a intensidade da mistura em um sistema. À medida que os flocos se tornam maiores, o crescimento subsequente é restringido essencialmente por duas razões. Os flocos existentes podem ser quebrados como resultado de forças destrutivas (Matsuo e Unno, 1981) e a eficiência de colisão de partículas num campo de cisalhamento torna-se mais baixa à medida que o tamanho de partícula aumenta e sua concentração diminui (Brakalov, 1987). O equilíbrio dinâmico entre agregação e ruptura pode levar a uma distribuição de tamanho de flocos em estado estacionário, onde o tamanho limite é dependente da taxa de cisalhamento aplicada (Mühle, 1993). Assim, o estado estacionário de floculação pode ser entendido como o equilíbrio entre as forças induzidas pelo cisalhamento e a força interna dos agregados. Esse equilíbrio leva os agregados a terem uma característica específica, como um tamanho representativo estável (diâmetro) e uma distribuição de tamanho determinada conforme relatado por Li *et al.* (2007), Yu *et al.* (2010) e Yu *et al.* (2015).

Quando se aumenta a taxa de cisalhamento sobre os flocos pré-formados, pode ocorrer sua quebra em fragmentos menores de tamanho aproximadamente igual ou ainda a erosão de pequenas partículas da superfície de flocos. No fluxo turbulento, em que as forças inerciais são significativamente maiores que as viscosas, o modo de ruptura depende do tamanho do floco em relação à microescala de turbulência (Mühle, 1993). A ruptura é dependente da intensidade do cisalhamento e da resistência do floco. A resistência do floco à quebra, por sua vez, depende da natureza da interação entre as partículas e do número médio de ligações por partícula. Sabe-se que a floculação em ponte, por polímeros de cadeia longa, pode gerar flocos muito resistentes, enquanto a formação de agregados por sais inorgânicos resulta em flocos mais frágeis.

A quebra dos agregados após a formação por aumento do cisalhamento pode ser danosa, alterando suas características e afetando todo o processo de separação. Em instalações de tratamento de água, a quebra de agregados pode ocorrer na própria câmara de floculação, devido à inadequação da mistura, ou nas passagens e entradas, isto é, canais, comportas, aberturas e orifícios. O aumento abrupto do cisalhamento causa uma ruptura de agregados para tamanhos menores em poucos segundos (Yukselen e Gregory, 2004) e sua consequência direta é a perda da condição adequada requerida para determinada eficiência de separação sólido/líquido.

A ruptura deve ser prevenida tanto quanto possível, mas é inevitável em alguns casos. A capacidade de recuperação do tamanho após quebra é chamada de refloculação, e depende do tipo de coagulante, intensidade de mistura e tempo de residência. A reversibilidade total da quebra pode não ocorrer, uma vez que nesta fase um novo estado estacionário é esperado. Li *et al.* (2007) relataram a natureza irreversível da quebra no caso de coagulantes hidrolisantes e Yu *et al.* (2010) descreveram o uso de doses adicionais após a ruptura como alternativa à reformação de agregados. No entanto, Yukselen e Gregory (2004) relataram que a formação de agregados, quebra e recrescimento pode ocorrer várias vezes, mas o tamanho estável do agregado é menor após cada quebra.

O desempenho da remoção de partículas é dependente, portanto, da formação de agregados com características adequadas, compatíveis com a tecnologia de separação utilizada (Chakraborti, 2003; Yukselen e Gregory, 2004; Di Bernardo e Dantas, 2005). A distribuição de tamanho de partículas (DTP), arranjo em que os agregados são classificados em classes de tamanho, e o diâmetro estável (d), fornecem resultados diretos de desempenho da floculação, omitidos quando utilizados medidas indiretas, tal como a medida de turbidez. As medidas diretas de desempenho da floculação 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 de regiões de alto

cisalhamento nas unidades de tratamento e o alcance do patamar de estabilidade, para uma determinada configuração pré-estabelecida, podem ser monitorados pelo acompanhamento destas características.

Neste estudo foi avaliado o efeito da quebra induzida sobre o tamanho do floco, utilizando o parâmetro diâmetro estável (d) e o parâmetro β coeficiente de potência que indica sensivelmente tendências e alterações da Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP).

OBJETIVO

Avaliar a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP) para duas águas de estudo no processo floculação e no recrescimento dos agregados.

METODOLOGIA

Águas de estudo

Foi produzida água com cor verdadeira igual a 50 uC, dissolvendo-se Ácido Húmico *Aldrich Chemical*, com concentração de 30 mg/L, em água deionizada, adaptado de Constantino (2008) a qual foi denominada neste estudo de água tipo 1. Foi também utilizada Suspensão de Caulinita *Fluka* para obtenção de uma segunda água, com turbidez igual a 25 NTU, seguindo a metodologia descrita por Pádua (1994) e Yukselen e Gregory (2004) a qual foi denominada de água tipo 2.

Ensaio de floculação e recrescimento

Ambas as águas foram floculadas em *Jar Test*, em região onde atua o mecanismo de varredura conforme mostram os diagramas de coagulação apresentados por Oliveira et al. (2015). O agente coagulante para todo o ensaio foi o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) e o pH ajustado por solução de hidróxido de sódio a 1 M. A solução de ácido húmico foi coagulada com 15 mg Al^{+3}/l e pH igual a 5,0. A suspensão de caulinita coagulada com 2 mg Al^{+3}/l e pH igual a 7,0. Para todos os ensaios, o gradiente de mistura rápida foi igual a 800 s^{-1} durante os primeiros 10 segundos. Foram estudados valores de gradiente de floculação médios (G) de 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 s^{-1} . Durante a floculação, G foi mantido constante durante os primeiros 25 min de cada ensaio. No instante 25 min, a agitação foi elevada a G_{quebra} de 800 s^{-1} por 10 segundos, promovendo a quebra dos agregados. Após esta etapa retornou-se ao patamar inicial de G que foi mantido até 40 min de cada ensaio.

Monitoramento

Foram utilizadas captura e análise de imagem digital baseadas em Gregory e Chung (1995), Moruzzi e Reali (2007) e Silva (2016). As águas foram iluminadas por um plano de laser de comprimento de onda de 520 nm e potência de 20.000 mW para delimitação do campo amostral e aumento do contraste. As imagens foram capturadas por meio da câmera fotográfica *Phantom Miro eX4*, com resolução de 800 por 600 pixel e tamanho do pixel igual a 10 μm . Foi registrada a situação do sistema de partículas floculentas nos ensaios de bancada em *Jar Test* nos instantes 20 min (floculação) e 40 min (recrescimento), em que foram capturadas 100 imagens para cada amostra, à taxa de 10 fps. A Figura 1 apresenta de maneira simplificada a montagem experimental.

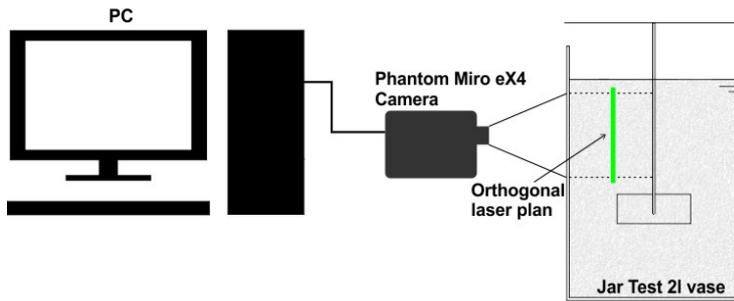


Figura 1. Esquema simplificado para a montagem experimental.

Tratamento e Análise de imagem

O tratamento das imagens obtidas consistiu nas fases de adoção do limiar de contraste, binarização, contagem e medição dos flocos, seguindo Silva (2016). A Figura 2 apresenta um exemplo do processo de tratamento feito através do software *Image Pro plus 7.0*. Para a análise dos dados excluiu-se de todo o conjunto amostrado as partículas menores que 100 μm , por apresentar imprecisão elevada conforme Chakraborti (2003) e Moruzzi e Reali (2010).

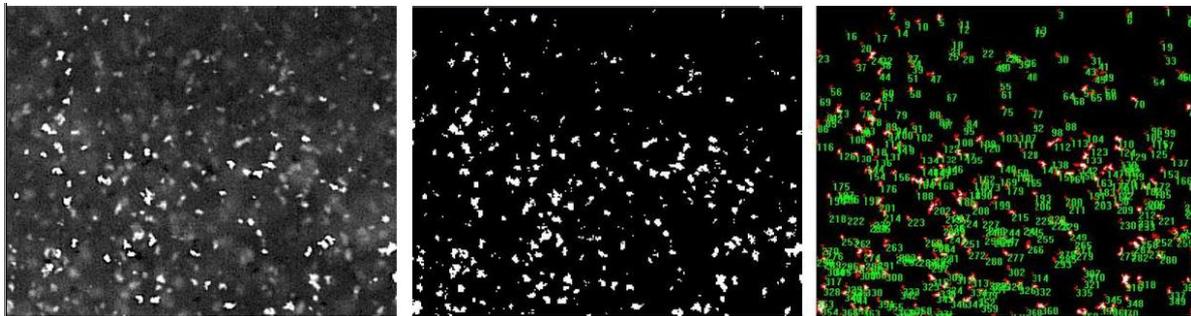


Figura 2. (a) Imagem dos flocos em escala de cinza. (b) Matriz binarizada (c) Matriz em processo de contagem e medição (Silva, 2016).

A partir da análise das imagens foi obtida a dimensão característica individual d_{max} . Este parâmetro refere-se ao comprimento da maior reta que une dois pontos da borda do floco e que passa pelo centroide do mesmo seguindo recomendações de Li et al. (2007) e Moruzzi et al. (2015). Um esquema simplificado da adoção de d_{max} é apresentado na Figura 3.

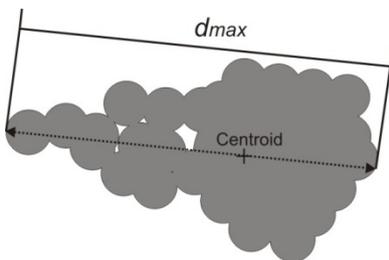


Figura 3. Dimensão característica (d_{max}) calculada para um agregado hipotético.

Obtenção dos Parâmetros

O diâmetro estável do floco (d), parâmetro que caracteriza a dimensão média do conjunto dos agregados no estado estacionário da floculação, foi calculado para os patamares de estabilidade da curva de evolução temporal de d_{max} . Assim, o valor de d é a média aritmética da dimensão característica d_{max} durante o período estacionário da floculação. A Equação 1 descreve o diâmetro estável do floco.

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{max} \quad (1)$$

Em que: d é o diâmetro estável do floco e d_{max} é a dimensão característica individual do floco.

Para comparação das características dos agregados formados na floculação e no recrescimento, d foi calculado a cada amostra (para cada G adotado) nos instantes 20 (Na metodologia consta 25 minutos) min (d_1) e 40 min (d_2). Posteriormente, foi calculada a razão de recuperação da forma descrita pela Equação 2. Uma razão de valor igual à unidade ($d_2/d_1 = 1$) significa que a ruptura é totalmente reversível enquanto valores próximos à zero ($d_2/d_1 = 0$) significam um processo irreversível.

$$\text{Razão de Recuperação} = \frac{d_2}{d_1} \quad (2)$$

Em um segundo momento, a dimensão característica individual d_{max} foi organizada em classes de [100 - 1.420 μm] em incrementos de 30 μm , obtendo-se assim a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP). A DTP é o histograma da frequência relativa de ocorrência dos agregados contra as classes de tamanho. Após esta etapa, as DTP classificadas foram ajustadas à forma contínua da Equação 3 por meio de regressão não-linear (Neste caso o modelo de regressão é linear, não?) usando os parâmetros A e β , conforme apresentado por Crittenden (2005).

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

Em que: dN é o número de partículas por unidade de volume do fluido na faixa correspondente a dp até $dp + d(dp)$, A é o coeficiente relacionado à concentração total de partículas e β é o coeficiente que caracteriza a distribuição de tamanho.

O expoente β da Equação 3 representa, portanto, a inclinação da distribuição de tamanho agregado para o formato de gráfico log-log da Equação 3. Quanto maior a inclinação, maior a ocorrência de agregados para as faixas de classificação de pequenos tamanhos e vice-versa.

De forma semelhante a d_1 , os valores de β_1 foram calculados para o estado estacionário de floculação, isto é, utilizando a média de valores de β a partir do patamar de estabilidade da fase de floculação. Em contraste, o valor dado por β_2 é o valor conjugado de β_1 , isto é, representa a média dos valores de β a partir do patamar após a quebra.

RESULTADOS

Após cessada a mistura rápida foi observado que para uma agitação constante, o diâmetro estável do floco tendeu à 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. Após a ruptura o novo patamar de estabilização foi para valores sempre menores que os iniciais, como percebido por Yukselen e Gregory (2004) e por Li *et al.* (2007).

As figuras 4 e 5 apresentam o ajuste linear para a Equação 3, em que o parâmetro β é o coeficiente angular da equação. O parâmetro β , como explicado anteriormente, caracteriza a distribuição de tamanho das partículas, sendo que, quanto mais inclinada estiver a reta de ajuste, ou seja, quanto maior valor em módulo do coeficiente de inclinação da equação de reta, maior a ocorrência dos agregados pequenos. A figura 4 exemplifica o que acontece com β para os agregados da água tipo 1. O valor maior de β_2 , em comparação com β_1 , demonstra que a distribuição após a quebra induzida dos agregados foi deslocada para a região de menores tamanhos. A figura 5 exemplifica o mesmo comportamento para a água tipo 2.

Desta forma, fica claro que a distribuição de tamanhos das partículas (*DTP*) é influenciada pela quebra induzida dos agregados, e que na fase de recrescimento a distribuição tem maior ocorrência nas faixas de pequenos diâmetros. Este fato pode ser extrapolado para ambas as águas em todos os *G* investigados, conforme mostram as tabelas 1 e 2.

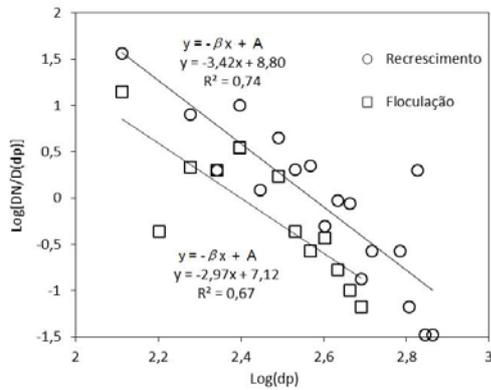


Figura 5. Ajuste linear do parâmetro β para água tipo 1 para G de 40 s^{-1}

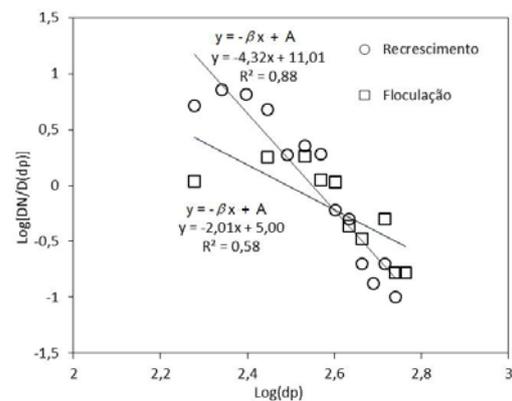


Figura 5. Ajuste linear do parâmetro β para água tipo 2 para G de 40 s^{-1}

Os resultados também mostraram que o patamar de estabilização da floculação, dado pelo estado estacionário, é menor quanto maior é a agitação. Isto fica evidenciado nas Tabelas 1 e 2, em que a coluna d_1 apresenta-se inversamente proporcional à G . Foi menos evidente, porém existiu a mesma tendência decrescente para d_2 em resposta ao aumento dos valores de G . Ainda nas Tabelas 1 e 2, é visível maiores valores (em módulo) de β_1 e β_2 em resposta a maiores valores de G . Isso representa que gradientes maiores produziram uma distribuição do tamanho de partículas com maior concentração nas faixas de pequenos tamanhos.

Em comparação, para as águas tipo 1 e 2, é visível que a água tipo 2 apresentou uma amplitude maior na variação de todos os parâmetros analisados, indicando uma sensibilidade maior dos agregados de caulinita frente à variação de G .

Tabela 1. Parâmetros da DTP para água tipo 1

$G(\text{s}^{-1})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	β_1	β_2
20	337	157	-1,61	-1,24
30	287	148	-1,23	-4,60
40	200	154	-2,97	-3,42
50	244	149	-3,19	-4,81
60	217	161	-3,01	-5,11
80	173	133	-4,58	-5,94
100	156	141	-4,18	-5,07
120	146	132	-4,34	-4,67

Tabela 2. Parâmetros da DTP para água tipo 2

$G(\text{s}^{-1})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	β_1	β_2
20	407	233	-0,37	-0,56
30	236	138	-1,27	-3,83
40	298	222	-2,01	-4,32
50	197	124	-2,80	-4,37
60	227	222	-3,58	-4,56
80	216	241	-4,32	-5,20
100	166	123	-4,68	-6,60
120	154	123	-5,91	-7,66

A partir da Equação 2 construiu-se o gráfico da Figura 6, em que são apresentados os valores da Razão de Recuperação para as duas águas de estudo contra os G adotados. Como explicado anteriormente valores altos de d_2/d_1 apontam para uma maior recuperação do tamanho inicial dos agregados. É evidente na Figura 6 uma maior recuperação para gradientes elevados. No entanto, este resultado deve ser analisado com cautela, visto que agregados formados em altos G , apesar de recuperar melhor seu tamanho após a quebra, não necessariamente tem originalmente tamanho e propriedades vantajosas para a separação sólido-líquido.

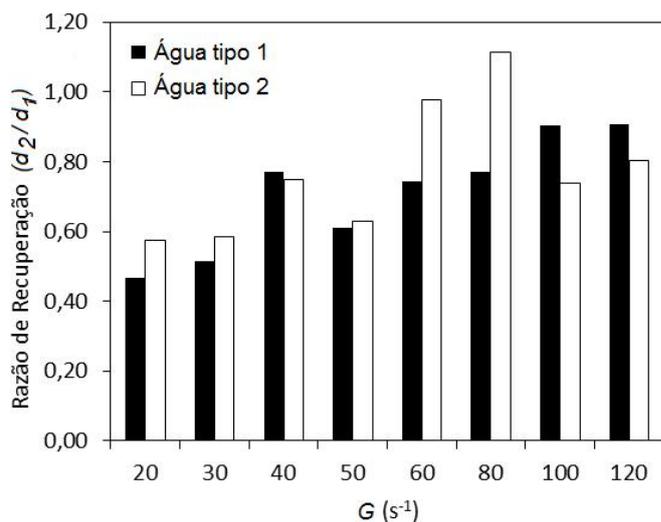


Figura 6. Valores da Razão de Recuperação (d_2/d_1) analisados em relação ao gradiente de velocidades médio (G) para as duas águas de estudo.

CONCLUSÕES

Conclui-se que as águas de estudo para as condições investigadas apresentam o comportamento esperado e descrito por diversos autores para a floculação, em que são atingidos patamares de estabilidade dependentes da taxa de cisalhamento. Cessado o distúrbio causado pelo aumento abrupto de G , os agregados alcançam patamares de estabilização inferiores, comparados aos precedentes à quebra.

A quebra induzida dos agregados promove fundamental alteração no tamanho dos agregados, produzindo flocos, no recrescimento, de menor diâmetro estável (d).

O parâmetro β apontou para um deslocamento da distribuição na Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) em direção às faixas de menores tamanhos de agregados.

Por fim os resultados apontam para uma maior recuperação do tamanho em gradientes de floculação elevados para as duas águas estudadas. Este resultado deve ser analisado, porém, com cautela, visto que, apesar de ter melhor recuperação, agregados nestas condições não necessariamente têm tamanhos e propriedades vantajosas para a separação sólido-líquido, principalmente quando utilizadas unidades de sedimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C.R. (1999). Coagulation Processes: Destabilization, Mixing, and Flocculation. In: AWWA. Water quality and treatment – A handbook of community water supplies. (Chapter 6). McGraw-Hill, Inc., 5th ed. USA, 1233p, 1999.
2. ARAGAMAN, Y. (1971) Pilot-Plant Studies of flocculation. Journal AWWA, 63 (12), 775-777.
3. ARGAMAN Y. and KAUFMAN W. J. (1970). Turbulence and flocculation. J. Sanitary Eng. Div. ASCE 96, 223-241.
4. BRAKALOV, L.B. A connection between orthokinetic coagulation capture efficiency of aggregates and their maximum size. Chem. Eng. Sci. 42, 2373– 2383 (1987).
5. BRATBY, J. R. (1981) Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing and flocculation systems. Jour. AWWA, 73 (6), 318-325.
6. CHAKRABORTI, R.K., GARDNER, K.H., ATKINSON J.F., and BENSCHOTEN, J.E. (2003). Changes in fractal dimension during aggregation. Water Res. 37, 873.
7. CONSTANTINO, L. T. Ruptura e recrescimento de flocos em água com substâncias húmicas aquáticas coagulada com sulfato de alumínio e cloreto férrico. (2008). 164 p. Tese (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos - SP.

8. DI BERNARDO, L.;DANTAS, A.D.B. Métodos e técnicas de tratamento de água. Segunda Edição. São Carlos. RiMa, 2005. 792p.
9. GREGORY, J.; CHUNG, H. Continuous monitoring of floc properties in stirred suspensions. (1995). J. Water SRT – Aqua, Blackwell Science Ltd, v.44, n.3, p.125-131.
10. HE, W.; NAN, J.; LI, H. and LI, S. (2012) Characteristic analysis on temporal evolution of floc size and structure in low-shear flow. *Water Research*, 46, 509-520.
11. LI, T. ZHU, Z. DONGSHENG, W. YAO, C. HONGXIAO, T. The strength and fractal dimension characteristics of alum-kaolin flocs (2007). *Int. J. Miner. Process.* 82, 23-29.
12. Matsuo, T., Unno, H., Forces acting on floc and strength of floc. *J. Environ. Eng. ASCE* 107, 527– 545 (1981).
13. MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. (2007). Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas de flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, 12, (3), p. 273-283.
14. MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. (2010). Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by anon-intrusive image analysis system and tracer tests. *IWA Publishing, Water Science & Technology*, 61, (1), p.253-262.
15. MÜHLE, K., Floc stability in laminar and turbulent flow. In: Dobias, B. (Ed.), *Coagulation and Flocculation*. Dekker, New York, pp. 355–390 (1993).
16. OLIVEIRA, A.L.de, MORENO, P., SILVA, P.A.G. da, JULIO, M.D., MORUZZI, R.B. The effect of form and particle size distribution (PSD) on the removal of particulate matter. *Desalination and Water Treatment* ., 2015, Vol. 57 (36). 1-12.
17. PÁDUA, V.L. Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de flocação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de reatores estáticos. (1994) 165 p. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
18. SILVA, P. A. G.. Força e dimensão fractal para floco de caulinita coagulado com sal de alumínio aplicado ao tratamento de água para abastecimento. 22 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio claro (2016).
19. SNODGRASS, W.J., Clark, M.M., O’MELIA, C.R. Particle formation and growth in dilute aluminum (III) solutions. *Water Res.* 18, 479– 488 (1984).
20. THOMAS, D. N.; JUDDA, S. J. and FAUCETT, N. (1999) Flocculation modelling: a review. *Water Research*, 33 (7), 1579-1592.
21. YU, W., GREGORY, J. and CAMPOS, L., Breakage and Regrowth of al Humic Flocs – Effect of additional Coagulant Dosage. *Environ. Sci. Technol.* no. 44 (2010).
22. YU, W., GREGORY, J., CAMPOS, L., Graham, N., Dependence of floc properties on coagulant type, dosing mode and nature of particles. *Revista WaterResearch* 68, p 119-126 (2015).
23. YUKSELEN, M. A., GREGORY, J. The reversibility of flocs breakage. *Internacional Journal of Mineral Processing*, v. 73, n. 2-4, p. 251-259, 2004.