

## ESTUDO DA QUEBRA E RECRESIMENTO DE FLOCOS EMPREGANDO UM EQUIPAMENTO DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DA FLOCULAÇÃO

### *STUDY OF FLOCS BREAKING AND REGROWTH EMPLOYING A CONTINUOUS MONITORING OF FLOCCULATION EQUIPMENT*

**Daniel Bartiko<sup>1</sup>, Marcelo de Julio<sup>2</sup>**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura  
Aeronáutica, São José dos Campos, SP

<sup>1</sup>E-mail: danielbartiko@hotmail.com

<sup>2</sup>E-mail: dejulio@ita.br

#### RESUMO

O conhecimento das características físicas dos sólidos presentes nos processos e operações de tratamento de água e efluentes apresenta-se como promissora ferramenta na concepção de projetos e no aprimoramento operacional de unidades de separação sólido/líquido. Assim, neste trabalho foi avaliado, com o auxílio de um equipamento de monitoramento contínuo da floculação (EMCF), o comportamento dos flocos (formação, quebra e recrescimento) produzidos durante as etapas de coagulação e floculação no tratamento de águas de abastecimento. Os flocos foram submetidos à quebra com gradiente de velocidade de  $543 \text{ s}^{-1}$  e tempos de 5, 60 e 300 s. A água de estudo foi preparada em laboratório a partir da adição de suspensão mãe de caulinita à água de um poço artesiano e apresentou turbidez de  $25 \pm 2 \text{ uT}$ . Como agente coagulante foi utilizado sulfato de alumínio líquido isento de ferro (30 mg/L do produto comercial com teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 8,42%) em conjunto ou não com um polímero aniônico (0,05 mg/L). Para o ajuste do pH de coagulação foi utilizado NaOH (6 mg/L). Pôde-se constatar que, os flocos, uma vez cisalhados sobre a influência de tempos de quebra distintos, apresentaram diferentes potencialidades de recrescimento, sendo que para o menor tempo de quebra avaliado, maior foi a capacidade dos flocos alcançarem tamanho semelhante ao observado antes do evento de quebra. A aplicação conjunta do polímero e do sulfato de alumínio como agente coagulante aumentou significativamente a potencialidade do floco quebrado retornar ao seu tamanho original.

**Palavras-chave:** tratamento de água, floculação, quebra, flutuações da turbidez, monitoramento contínuo.

#### ABSTRACT

The knowledge of the physical characteristics of the solids present in the processes and operations of the water and wastewater treatment is presented as a promising tool in designing projects and improvement operational of solid/liquid separation units. Within this context, in this work was evaluated, with the help of an equipment of continuous flocculation monitoring (EMCF), the behavior of flocs (formation, breakage and regrowth) produced during the stages of coagulation and flocculation of water-supply treatment. The flocs passed through speed gradient and breakage time of  $543 \text{ s}^{-1}$  and 5, 60 and 300 s, respectively. The water used in this test was prepared in a laboratory with the addition of kaolinite suspension in a well water and it presented a turbidity of  $25 \pm 2 \text{ uT}$ . It was used liquid aluminium sulphate iron-free as a coagulant agent (30 mg/L of the commercial product containing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  of 8.42%) together with or without an anionic polymer (0.05 mg/L); for the pH coagulation adjustment it was used NaOH (6mg/L). It was possible to determine that the flocs once broken over the influence of different breakage time, showed different potential of regrowth. This procedure indicates that the smaller the breakage time, the bigger was the capacity of flocs reach a size similar to the one observed before the breakage event. The application of the polymer and the aluminium sulphate as a coagulant agent increased markedly the potential of the broken flocs return to its own original size.

**Keywords:** water treatment, flocculation, breaking, turbidity fluctuations, continuous monitoring.

#### 1 – INTRODUÇÃO

Descrita por diversos autores como a “próxima fronteira” do conhecimento, a caracterização das partículas apresenta-se como promissora ferramenta no campo do tratamento de água e efluentes sanitários (MORUZZI, 2005). O conhecimento das características físicas dos sólidos presentes nos processos e operações de tratamento de água e efluentes surge como potencial ferramenta na concepção de projetos e no aprimoramento operacional de unidades de separação sólido líquido (SANTOS *et al.*, 2004).

A coagulação e a floculação são amplamente empregadas em processos de separação sólido/líquido, inclusive no tratamento de água e efluentes (YUKSELEN; GREGORY, 2002). No tratamento de água, a remoção de partículas suspensas na massa líquida é essencial e depende do bom desempenho da etapa da coagulação e da produção de flocos com propriedades adequadas para poderem ser removidos em etapas posteriores do tratamento, por meio da decantação/flotação e filtração (dependendo da tecnologia de tratamento adotada).

Partículas coloidais ou de menores dimensões presentes na água, em condições normais, são capazes de permanecer em estado disperso na solução devido

principalmente a cargas elétricas negativas presentes na superfície das mesmas, as quais fazem com que partículas próximas se repilam e não se agrupem (BRATBY, 2006). Neste contexto, a etapa da coagulação tem justamente a função de desestabilizar essas partículas e fazer com que as mesmas possam ser agrupadas (em forma de flocos) durante a etapa da floculação. Seguida à coagulação, a floculação ocorre em tanques denominados floculadores, onde as partículas previamente desestabilizadas recebem agitação lenta controlada por um tempo relativamente longo para que se aumente a probabilidade de ocorrência dos choques entre as mesmas e formem os flocos (SANTOS *et al.*, 2004). O desempenho da etapa da floculação depende diretamente da eficiência do processo de coagulação acrescida de alguns parâmetros inerentes a esta fase como o gradiente de velocidade médio, tempo de floculação e tipo/geometria do equipamento utilizado.

Segundo Yuxselen e Gregory (2004), nos tanques de floculação o crescimento do floco é inicialmente determinado pela força de cisalhamento aplicada, pela concentração de partículas e pela eficiência das colisões entre os mesmos. Quando os flocos tornam-se maiores, o crescimento adicional dos mesmos é restringido pela força de cisalhamento aplicada à massa líquida.

Inúmeros trabalhos (YUKSELEN; GREGORY, 2002, YUKSELEN; GREGORY, 2004; WANG *et al.*, 2009, LI *et al.*, 2007; YU *et al.*, 2009; entre outros) apontam que os flocos, uma vez quebrados, devido ao aumento do gradiente de velocidade médio de floculação e submetidos novamente às condições anteriores a quebra, geralmente não conseguem retornar ao seu tamanho original. Apenas em alguns casos, onde foi avaliada a influência da adição de polímeros como coagulante primário ou auxiliar de floculação (aplicado à amostra durante o momento da quebra dos flocos), os flocos retornaram a ter características semelhantes às encontradas antes do evento de quebra. Este fato representa a perda da capacidade dos flocos em sedimentar no decantador, visto que a eficiência da etapa da decantação está diretamente relacionada com o tamanho dos mesmos (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Além disso, a remoção inadequada dos sólidos na unidade de decantação tem seus efeitos negativos propagados às unidades a jusante da Estação de Tratamento de Água (ETA), como a rápida colmatação do meio granular do filtro, possível transpasse de materiais retidos e perda de eficiência da unidade, podendo culminar, inclusive, em considerável perda da qualidade do produto final da ETA.

Inúmeras pesquisas têm sido realizadas em países como Austrália, China e Inglaterra (FITZPATRICK; FRADIN; GREGORY, 2004; WANG *et al.*, 2009; SOLOMENTSEVA; BÁRÁNY; GREGORY, 2007; LI *et al.*, 2007; YU *et al.*, 2009; YU *et al.*, 2010) com o objetivo de avaliar as características dos flocos formados durante a floculação sobre diversas condições operacionais (como tipo e dosagem de coagulante, pH de coagulação, adição de polímeros, gradiente de velocidade médio de floculação, entre outros), bem como o comportamento dos mesmos uma vez quebrados, sobre a influência de diferentes tempos e gradientes de velocidade de quebra.

Tradicionalmente, esses estudos têm focado na avaliação do comportamento dos flocos com o auxílio de um equipamento comercialmente disponível denominado PDA 2000. O equipamento tem seu funcionamento baseado no princípio das “flutuações da turbidez” de uma amostra, desenvolvido por Gregory e Nelson (1984), o qual proporciona uma indicação muito sensível do estado de agregação das partículas presentes em determinada solução.

Basicamente, a técnica desenvolvida por Gregory e Nelson (1984) consiste em fazer incidir constantemente um feixe de luz infravermelha, produzida por um LED (Diodo Emissor de Luz), em um pequeno volume da amostra a ser analisada (da ordem de 1 mm<sup>3</sup>). Esta luz, por sua vez, atravessa perpendicularmente um tubo de pequeno diâmetro por onde flui a suspensão chegando até um fotodiodo do outro lado do tubo, que converte a intensidade de luz transmitida em sinal elétrico. A passagem de partículas na frente do feixe de luz altera a intensidade recebida pelo fotodiodo. O número de partículas sobre a influência do feixe de luz muda constantemente, devido a variações em sua composição, o que provoca flutuação na intensidade da luz transmitida ao fotodiodo que converte a variação de luz em variação de tensão.

O sinal de saída do fotodiodo possui duas componentes, uma *DC* (*direct current*) e outra *AC* (*alternate current*); a primeira corresponde à intensidade média de luz transmitida que está relacionada principalmente com a turbidez da amostra. A segunda, a componente *AC*, cuja amplitude de flutuação é muito menor que o observado no sinal *DC*, é devida a variações aleatórias no número de partículas em fluxo no tubo, que interceptam o feixe de luz. O valor eficaz do sinal *AC* é obtido pela raiz da média quadrática (*rms* – *root mean squared*) deste sinal. Este valor fornece uma sensível indicação do estado de agregação da suspensão. A aplicabilidade mais útil do valor *rms* é a indicação do crescimento de flocos (quanto maior os flocos, maior o valor de *rms*). Por outro lado, a desagregação de flocos provoca diminuição no valor *rms*, sendo esta informação de grande importância no controle de processos em uma ETA; a indicação do estado de agregação das partículas permite a otimização em curto espaço de tempo da dosagem de coagulante aplicada na água, por exemplo.

Na prática, é conveniente dividir o valor de *rms* pela componente estável (*DC*) para dar uma razão denominada Índice de Floculação, *IF* (*rms/DC*). Resumidamente, o valor de *IF* dá uma indicação do tamanho das partículas/flocos no decorrer dos ensaios, sendo que quanto maior o tamanho dos flocos presentes em determinada suspensão, maior é o valor de *IF* correspondente (GREGORY; CHUNG, 1995). Segundo Gregory (1984), o valor de *IF* depende da concentração e tamanho das partículas em suspensão, de forma que as menores partículas contribuem relativamente pouco para o valor deste, ao passo que, num sistema de agregação, os maiores agregados têm uma maior influência no valor de *IF*.

Gregory (1985) demonstrou que o *IF* depende da concentração e do tamanho das partículas em suspensão,

assim como do volume da amostra iluminada. Para o caso geral de uma suspensão heterodispersa, o valor da razão IF é calculado pela Equação (1).

$$IF \approx (L/A)^{1/2} \cdot (\sum N_i \cdot C_i^2)^{1/2} \quad (1)$$

Em que:  $L$  é o comprimento do caminho ótico (mm) e  $A$  é a área efetiva da seção transversal do feixe de luz ( $\text{mm}^2$ ). A soma leva em conta todos os tipos de partículas  $i$ , com concentração  $N_i$  ( $1/\text{mm}^3$ ) e seção transversal de dispersão da luz  $C_i$  ( $\text{mm}^2$ ), que depende do tamanho e forma das partículas.

A natureza da soma na Equação (1) é tal que as menores partículas contribuem relativamente pouco para o valor da razão e que, num sistema de agregação, os maiores agregados têm uma maior influência no valor de IF.

Yukselen e Gregory (2004) citam que embora não seja possível ter informações sobre o tamanho exato dos flocos por meio do valor de IF, este fornece uma simples e útil indicação do crescimento, quebra e recrescimento dos mesmos, permitindo, para uma mesma água de estudo, análises de eficiência entre diferentes condições operacionais que podem ser adotadas no tratamento desta (dosagem e tipo de coagulante, gradientes de velocidade, adição de polímero, por exemplo).

Neste contexto, o uso de técnicas de monitoramento contínuo da floculação, por meio de princípios como o desenvolvido por Gregory e Nelson (1984) – flutuações de turbidez – podem ser uma ferramenta útil de otimização da etapa da floculação, por meio da busca de condições operacionais durante a coagulação/floculação que levem a condição de formação de flocos com características físicas favoráveis para serem removidos em unidades posteriores do tratamento de águas de abastecimento.

O objetivo deste trabalho foi verificar, com o auxílio de um Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF), desenvolvido recentemente no âmbito do projeto de pesquisa ao qual este trabalho está vinculado e que tem princípio de funcionamento semelhante ao desenvolvido por Gregory e Nelson (1984), o comportamento dos flocos (formação, quebra e recrescimento) produzidos durante as etapas de coagulação e floculação do tratamento de águas de abastecimento, os flocos foram submetidos a distintos tempos de quebra e a um gradiente de velocidade de quebra semelhante ao avaliado por Yukselen e Gregory (2002) com o emprego de um monitor contínuo da floculação disponível comercialmente (PDA 2000).

## 2 – MATERIAL E MÉTODOS

Toda a parte experimental deste trabalho foi realizada no Laboratório de Saneamento do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e foi dividida em etapas, dependentes entre si. A pesquisa contemplou a preparação da água de estudo a partir de uma suspensão-mãe de caulinita previamente produzida, a otimização do par de valores ‘dosagem de coagulante versus pH de coagulação’ para a água de estudo; e os ensaios de monitoramento contínuo da

floculação sob a influência de diversas condições operacionais, inclusive aquelas otimizadas em etapas anteriores. Os materiais utilizados nesta pesquisa e a metodologia adotada em cada etapa da mesma são explicitadas nesta seção.

### 2.1 – Suspensão-mãe de Caulinita

A metodologia para a preparação da suspensão-mãe de caulinita, utilizada para o preparo da água de estudo, foi semelhante à adotada por Yukselen e Gregory (2004). Duzentos gramas de caulinita (Synth®) foram adicionados em 500 mL de água ultrapura com condutividade de 1,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (obtida por meio de um equipamento Gehaka Master System pelo sistema Millipore) e, então, a solução resultante foi agitada por 10 min a 1.200  $\text{s}^{-1}$  com o auxílio de um equipamento *jar test*. Para obter-se a dispersão total da solução foi necessário elevar o pH da suspensão ao valor 7,5; o qual foi alcançado pela adição de 5 mL de NaOH 0,1 N. Após agitar a solução por 10 min com um gradiente de velocidade médio de 1200  $\text{s}^{-1}$ , a suspensão de caulinita foi diluída em 1 L de água ultrapura, homogeneizada e transferida a um cilindro graduado no qual permaneceu em repouso durante 12 h.

Com o auxílio de uma bomba de baixa vazão e um tubo plástico (diâmetro de 4 mm) acondicionado dentro do cilindro, com uma de suas extremidades no fundo do mesmo, foi descartado parte do volume da solução contida no recipiente até se obter 800 mL do sobrenadante; este foi encaminhado para análise de concentração de sólidos totais. A concentração de sólidos totais foi determinada gravimetricamente e encontrou-se o valor de 132 g/L, muito próximo do valor 135 g/L, reportado na literatura (YUKSELEN; GREGORY, 2002; YUKSELEN; GREGORY, 2004) para o mesmo procedimento. Logo depois, a amostra foi diluída em água ultrapura até fornecer uma concentração de sólidos totais de 50 g/L, determinada gravimetricamente e então armazenada em recipientes de plástico sobre refrigeração até seu posterior uso.

### 2.2 – Coagulante e polímero

Foi utilizado o mesmo coagulante aplicado na ETA da cidade de São José dos Campos, operada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), sulfato de alumínio isento de ferro –  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3 \text{H}_2\text{O}$ , com teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 8,42% (Suall Indústria Química S.A.). Como neste experimento o tratamento de água ocorre em escala de bancada, o coagulante foi diluído, sendo preparada uma solução dosando-se 4 g do produto comercial em 1 L de água ultrapura. O polímero aniônico utilizado nesta pesquisa também é o mesmo empregado na ETA de São José dos Campos, sendo poliácridamida em pó (Flopam NA 913 PWG), com densidade de carga de 25% e peso molecular de  $3 \cdot 10^6$ , fornecido pela SNF do Brasil (FLOERGER) e foi preparado adicionando-se 0,5 g do produto em 1 L de água ultrapura, conforme metodologia adotada por Ferrari (2012).

### 2.3 – Caracterização da água do poço

A água de um poço artesiano localizado nas dependências do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) em São José dos Campos/SP foi usada para diluir a suspensão mãe de caulinita, sendo que o pH da mesma foi quantificado com o auxílio de um pHmetro QX 1500 Plus Qualxtron. Para a determinação do pH, as amostras foram agitadas com o auxílio de um agitador magnético FISATOM 752.

A turbidez e a condutividade da água do poço foram quantificadas com o auxílio de um turbidímetro de bancada HACH 2100Q e um condutivímetro Marconi, respectivamente. A cor aparente e cor verdadeira foram avaliadas com o emprego de um Espectrofotômetro UV-VIS HACH DR 6000. Já a dureza e alcalinidade total foram determinadas por titulometria, metodologia descrita no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2012). Todas as demais medidas de turbidez e pH realizadas neste trabalho também seguiram a metodologia descrita nesta subseção.

### 2.4 – Procedimento de ensaio

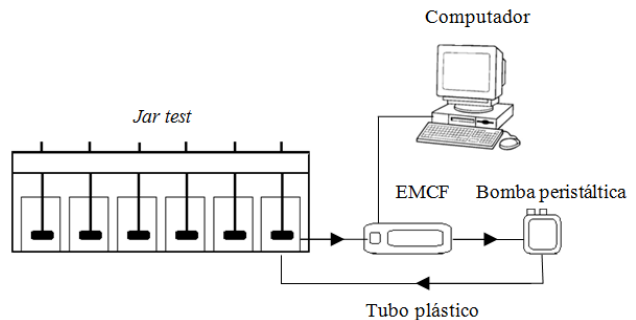
As condições adotadas nos ensaios de monitoramento contínuo da floculação deste trabalho foram semelhantes às utilizadas por Yukselen e Gregory (2002). Na pesquisa dos referidos autores, a água de estudo (turbidez de 75 uT) foi preparada a partir de suspensão mãe de caulinita e coagulada com sulfato de alumínio. A floculação ocorreu sob a influência de velocidade de agitação de 50 rpm (gradiente de velocidade de aproximadamente  $23 \text{ s}^{-1}$ ) e os flocos formados foram expostos aos gradientes de velocidade de  $180 \text{ s}^{-1}$  e  $520 \text{ s}^{-1}$  durante os tempos de 5, 30, 60 ou 300 s. No monitoramento contínuo da floculação, os autores do trabalho supracitado utilizaram o equipamento PDA 2000.

Para os ensaios deste trabalho, o EMCF (conectado a um computador para a transmissão dos dados) foi acoplado a um jarro do equipamento *jar test* (Nova Ética, modelo LDB especial), em que a suspensão-mãe de caulinita foi diluída no próprio jarro com água proveniente do poço artesiano até obter valor de turbidez de  $25 \pm 2 \text{ uT}$ , configurando a água de estudo. A temperatura da mesma foi ajustada a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , quantificada com o auxílio de um termômetro de mercúrio.

Depois de averiguar o valor de turbidez da água de estudo, as hastes do equipamento *jar test* foram acionadas e mantidas em agitação sob um gradiente de velocidade constante de  $55 \text{ s}^{-1}$ . Este gradiente de velocidade teve como objetivo manter a suspensão homogeneizada. No mesmo instante, era acionada a bomba peristáltica (Watson Marlow 120S), responsável por conduzir a amostra da solução do jarro até o EMCF e retorná-la ao mesmo recipiente do equipamento *jar test* por meio de um tubo plástico de diâmetro interno de 4 mm (Marterflex Tygon 06409-16). Como pode ser verificado na Figura 1, a bomba peristáltica esteve localizada após o EMCF, localização adotada por Yukselen e Gregory (2004) e que teve como objetivo evitar a quebra dos flocos por forças mecânicas da

bomba antes da análise dos mesmos pelo EMCF. A vazão adotada foi de 15 mL/min. Em outras pesquisas semelhantes, foram adotadas vazões de 10 mL/min (Gregory, 1988), 20 mL/min (KORNBOONRAKSA *et al.*, 2009), 25 mL/min (YUKSELEN; GREGORY, 2002) e 30 mL/min (GREGORY; CHUNG, 1995); sendo portanto o valor adotado (15 mL/min) condizente com o proposto na literatura.

Figura 1 – Esquema do aparato experimental utilizado nesta pesquisa. As flechas indicam o caminho percorrido pela amostra analisada no EMCF



Em seguida, iniciou-se a coleta de dados com o auxílio do EMCF. Após 60 s de operação do EMCF coletando dados referentes apenas à água de estudo, foi adicionado o agente alcalinizante (6 mg/L de hidróxido de sódio). Aguardou-se mais 60 s para a estabilização do pH da água de estudo e também para a estabilização das leituras do EMCF. Após isso, adicionou-se o coagulante (30 mg/L de sulfato de alumínio;  $1,32 \text{ mg/L}$  de  $\text{Al}^{3+}$ ) e efetuou-se a mistura rápida por 10 s, após o que se iniciou a etapa da floculação. Durante a etapa de mistura rápida, houve a coleta de amostra da água para leitura do pH de coagulação.

Durante 120 s (60 s antes de adicionar o agente alcalinizante e 60 s após adicionar o mesmo), houve a coleta de dados da amostra pelo EMCF sem a adição do agente coagulante. O objetivo deste procedimento foi estabilizar as leituras do EMCF, conforme adotado por Yukselen e Gregory (2004).

É importante destacar que as dosagens do agente alcalinizante e do coagulante foram definidas anteriormente em etapa de otimização do par de valores 'dosagem de coagulante versus pH de coagulação', com a construção de diagramas de coagulação. O procedimento experimental adotado nesta etapa, bem como os diagramas de coagulação obtidos e as discussões sobre os mesmos podem ser consultados em Bartiko e De Julio (2015).

Foram empregados os seguintes parâmetros de mistura rápida e floculação durante os ensaios de monitoramento contínuo da floculação: gradiente de velocidade médio de mistura rápida ( $G_{mr}$ ) de  $1000 \text{ s}^{-1}$  e tempo de mistura rápida ( $T_{mr}$ ) de 10 s; gradiente de velocidade médio de floculação ( $G_{fl}$ ) de  $25 \text{ s}^{-1}$  e tempo de floculação ( $T_{fl}$ ) de 25 min, os dois últimos definidos em etapa anterior, de otimização do tempo e gradiente de velocidade médio de floculação.

Passados 25 minutos de floculação, o valor do gradiente de velocidade foi automaticamente aumentado para  $543 \text{ s}^{-1}$  – próximo ao valor adotado por Yukselen e Gregory (2002) em sua pesquisa ( $520 \text{ s}^{-1}$ ) – durante os tempos de 5, 60 ou 300 s a fim de verificar a quebra dos flocos e sua potencialidade de recrescimento para cada situação. Após o tempo de quebra correspondente a cada ensaio o gradiente de velocidade foi, novamente, reduzido a  $25 \text{ s}^{-1}$  durante 25 minutos, a fim de permitir a refloculação. Passada essa etapa, mais uma vez, o gradiente de velocidade foi aumentado para  $543 \text{ s}^{-1}$ , desta forma, ocorreu o segundo evento de quebra dos flocos por tempo previamente determinado e igual ao da quebra anterior, seguindo novamente pela refloculação.

Embora o tempo de quebra simulado tenha sido elevado em alguns ensaios (300 s), destaca-se que os flocos podem estar submetidos a elevados gradientes de velocidades durante tempos iguais ou superiores à condição avaliada quando a tecnologia de tratamento de água é por filtração direta descendente, com pré-floculação, operada com taxa de filtração (vazão afluyente dividida pela área em planta do filtro –  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ) constante.

Neste trabalho foi também avaliada a influência da adição de um polímero aniônico como auxiliar de coagulação sobre a potencialidade de crescimento, quebra e recrescimento dos flocos. A solução de polímero foi adicionada juntamente com o coagulante na dosagem de  $0,05 \text{ mg/L}$ , valor fixado após a realização de ensaios preliminares. O valor do gradiente de velocidade médio da floculação, que nos ensaios com a adição apenas do coagulante era de  $25 \text{ s}^{-1}$  foi aumentado para  $30 \text{ s}^{-1}$  depois de constatado visualmente que para o menor gradiente de velocidade estava ocorrendo sedimentação dos flocos no fundo do jarro durante a floculação, tal fato ocorreu devido a formação de flocos de maior tamanho e que consequentemente apresentam maior velocidade de sedimentação (LI; CUI; YAN, 1989), propriedades comuns com a adição de polímero à água e que são conhecidas há muito tempo.

O gradiente de velocidade foi alterado apenas durante a floculação (antes das quebras dos flocos). Depois de quebrados os mesmos, o gradiente de velocidade de refloculação foi mantido em  $25 \text{ s}^{-1}$ , uma vez que os flocos apresentavam capacidade de recrescimento limitada, fato que não implicou a formação de flocos de grande tamanho e na sedimentação dos mesmos, como na fase anterior. Todo o restante do procedimento experimental adotado para os ensaios com a adição do polímero foi o mesmo quando utilizado apenas o coagulante.

### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa, bem como a discussão dos mesmos com base em trabalhos científicos semelhantes, encontrados na literatura.

#### 3.1 – Caracterização da água do poço

Na Tabela 1 são apresentados os valores de alguns parâmetros avaliados na caracterização da água do poço artesiano do DCTA utilizada na preparação da água de estudo por meio da diluição da suspensão-mãe de caulinita. Como foram realizadas várias coletas de água durante os ensaios de monitoramento contínuo da floculação, são apresentadas o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão dos parâmetros medidos.

Tabela 1 – Caracterização da água do poço artesiano utilizada nos ensaios

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Min Máx
pH	6,60	0,134	6,50 6,69
Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	34,41	0,007	34,40 34,41
Turbidez (uT)	1,62	0,077	1,56 1,67
Cor aparente (uH)	11,00	2,828	9 13
Cor verdadeira (uH)	2,00	0	2 2
Alcalinidade total ( $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$ )	12,50	0	12,5 12,5
Dureza total ( $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$ )	3,00	0	3 3

#### 3.2 – Ensaios de monitoramento contínuo da floculação com a aplicação de coagulante metálico.

Na Figura 2 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de monitoramento contínuo da floculação com a aplicação apenas do sulfato de alumínio líquido isento de ferro como agente coagulante.

Na Figura 2 são apresentadas três curvas, sendo que cada uma delas representa um diferente tempo de quebra dos flocos (5, 60 e 300 s). As setas presentes na Figura 2 indicam os momentos das quebras dos flocos.

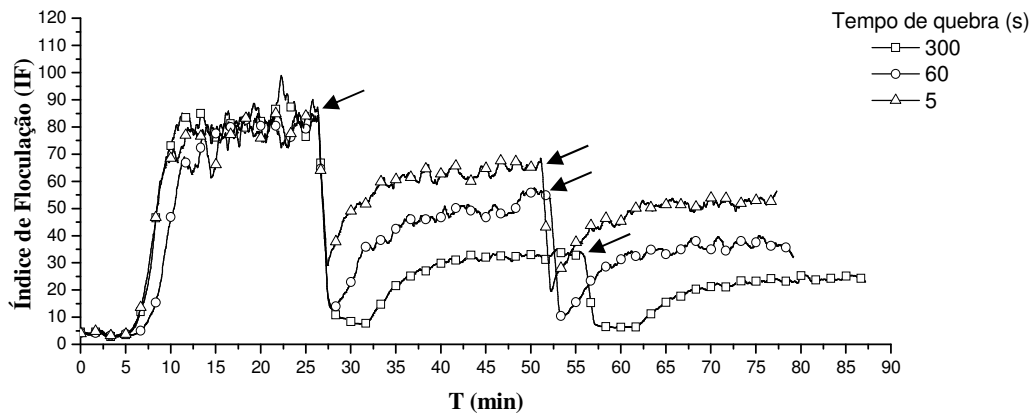
Pode ser observado na Figura 2, que para todos os tempos de quebra avaliados, houve redução no valor de IF (indicativo do tamanho dos flocos) após os dois eventos de cisalhamento dos flocos simulados. A redução foi mais significativa para os maiores tempos, sendo que quando os flocos foram quebrados sobre a influência do maior tempo de intensa agitação (300 s), a capacidade de recrescimento dos mesmos caiu significativamente. Este fato já foi constatado e descrito na literatura por Yukselen e Gregory (2002) e Yukselen e Gregory (2004). Pode ser observada, inclusive, grande semelhança entre as características dos gráficos obtidos neste trabalho e os presentes na pesquisa de Yukselen e Gregory (2002), mesmo com o emprego de água de estudo e dosagem de coagulante distintas.

Dessa forma, fica claro ao analisar a Figura 2, que os flocos formados a partir da adição de sulfato de alumínio como agente coagulante e submetidos a um gradiente de velocidade de quebra de  $543 \text{ s}^{-1}$ , durante três tempos distintos, não apresentaram capacidade de voltar ao tamanho observado antes da quebra, mesmo que dada a

condição favorável de tempo para tal fato ocorrer (tempo de refloculação de 25 min), a qual dificilmente será encontrada no floculador de uma ETA. Portanto, torna-se imprescindível durante o tratamento evitar qualquer

perturbação na água floculada que culmine na quebra dos flocos. Caso contrário, a eficiência do tratamento pode ser seriamente comprometida.

Figura 2 – Variação do valor do Índice de Floculação (IF) em função do tempo (min) para o gradiente de velocidade de quebra de  $543 \text{ s}^{-1}$  e tempos de quebra de 5, 60 e 300 s



3.3 – Ensaios de monitoramento contínuo da floculação com a aplicação de coagulante metálico em conjunto com polímero aniônico

Na Figura 3 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de monitoramento contínuo da floculação quando aplicado o polímero aniônico ( $0,05 \text{ mg/L}$ ) em conjunto com o sulfato de alumínio ( $30 \text{ mg/L}$  do produto comercial) durante a etapa de coagulação. O gradiente de velocidade de floculação adotado nestes ensaios ( $30 \text{ s}^{-1}$ ) foi diferente do adotado quando apenas o sulfato de alumínio foi utilizado como agente coagulante ( $25 \text{ s}^{-1}$ ), conforme mencionado no item material e métodos.

Nos gráficos da Figura 3 são apresentadas três curvas, em que cada uma delas representa um tempo de quebra diferente dos flocos (5, 60 e 300 s). As setas presentes na Figura 3 indicam os momentos das quebras dos flocos.

Pode ser observado na Figura 3 que, da mesma forma ao encontrado quando apenas o sulfato de alumínio foi adicionado à água de estudo como agente coagulante, os flocos produzidos a partir da adição de polímero juntamente com o sulfato de alumínio, também apresentaram comportamento de quebra e recrescimento diferenciado quando submetidos a distintos tempos de quebra. A perda da potencialidade de recrescimento dos flocos foi observada para elevado tempo de quebra (300 s).

Já para os tempos de quebra menores (5 e 60s), os flocos demonstraram ser capazes de voltar a ter tamanho próximo ao encontrado antes do evento de quebra. É importante destacar que nesta pesquisa foi simulado um tempo de refloculação de 25 minutos.

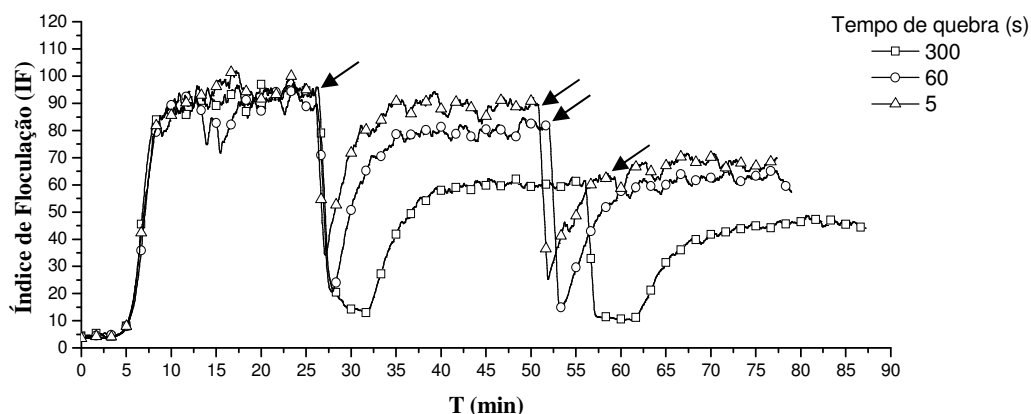
Na prática, em uma ETA, os flocos quebrados dificilmente teriam tempo para se reagrupar durante a etapa de floculação. Portanto, torna-se indispensável evitar a quebra dos flocos, fato que pode comprometer a eficiência de todos os processos e operações aplicados ao

tratamento de águas de abastecimento (mesmo com a aplicação de polímero).

É evidente também, ao analisar a Figura 3, que os flocos produzidos a partir dos ensaios em que foi combinado o sulfato de alumínio e o agente polimérico durante a coagulação, apresentam maior potencial de recrescimento quando quebrados, comparado aos dados obtidos quando apenas o sulfato de alumínio foi utilizado.

Foram encontrados, na literatura, trabalhos que estudaram o comportamento dos flocos quando submetidos à coagulação com coagulantes metálicos ou poliméricos, separadamente (GREGORY, 2004; YUKSELEN; GREGORY, 2004; YU *et al*, 2011), no entanto, não foi encontrada nenhuma pesquisa com adição dos mesmos em conjunto, tal como neste trabalho. Yukselen e Gregory (2004) descreveram em seu trabalho que os flocos formados a partir de uma água sintética (produzida a partir de caulinita) e coagulada com o auxílio de um polímero catiônico (polyDADMAC) alcançaram tamanho maior em comparação aos produzidos quando sulfato de alumínio foi utilizado como agente coagulante. No primeiro caso, o valor de IF (indicativo do tamanho dos flocos) ficou próximo de 3, já com a aplicação do sulfato de alumínio o valor de IF ficou próximo a 0,8. Esses dados representam diferentes potencialidades de crescimento dos flocos com a aplicação de distintos produtos químicos na etapa de coagulação.

Figura 3 – Variação do valor do Índice de Floculação (IF) em função do tempo (min) para o gradiente de velocidade de quebra de  $543 \text{ s}^{-1}$  e tempos de quebra de 5, 60 e 300 s



Observando as Figuras 2 e 3 fica claro que os flocos formados a partir da adição de coagulante metálico em conjunto com o polímero apresentaram potencialidade de recrescimento maior que nos casos em que apenas o sulfato de alumínio foi utilizado como agente coagulante. Esse fato ocorreu para todos os tempos de quebra avaliados.

Nesta pesquisa, onde foi aplicado um polímero aniônico, em conjunto com o sulfato de alumínio, não foi constatada grande diferença nos tamanhos dos flocos (indicados pelo valor de IF). No entanto, é necessário chamar a atenção para a dosagem de polímero aplicada à água de estudo, que foi baixa ( $0,05 \text{ mg/L}$ ). Além disso, observou-se que para o mesmo gradiente de velocidade da etapa da floculação, adotado nos ensaios em que apenas o coagulante metálico foi aplicado, ocorreu sedimentação dos flocos produzidos a partir da adição conjunta do polímero à água de estudo. Este fato levou à necessidade de aumento do gradiente de velocidade de floculação de  $25$  para  $30 \text{ s}^{-1}$  com a aplicação do polímero. Pode-se observar nas Figuras 2 e 3 que os flocos formados a partir da adição do polímero à água de estudo, mesmos sujeitos a maiores tensões de cisalhamento provocadas pelo aumento do gradiente de velocidade durante a etapa de floculação, produziram valores de IF ligeiramente maiores, indicando desta forma, maior potencialidade de crescimento dos flocos produzidos nesta configuração de coagulação.

### CONCLUSÕES

O EMCF foi capaz de fornecer informações contundentes sobre o crescimento, quebra e recrescimento dos flocos, formados a partir de água de estudo com turbidez de  $25 \text{ uT}$ .

Ficou claro, de acordo com estudos semelhantes, que uma vez ocorrida a quebra dos flocos devido ao aumento das forças de cisalhamento, geralmente estes não retornam ao seu tamanho original. A adição do polímero aniônico aumentou de forma significativa a reversibilidade dos flocos, quando quebrados.

O tempo de quebra dos flocos foi fator determinante sobre a potencialidade de recrescimento dos mesmos. Quando os flocos foram submetidos à elevada força de cisalhamento por longos períodos de tempo, sua

capacidade de recrescimento, quando voltado às condições de floculação ou refloculação originais, caíram significativamente.

A diferença entre os valores de IF (indicativo do tamanho dos flocos), obtidos anteriormente e após o aumento do gradiente de velocidade foi mais significativa no primeiro evento de quebra, indicando desta forma, menor potencialidade de recrescimento dos flocos quebrados neste evento.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), financiadoras deste projeto de pesquisa, por meio do edital FAPESP/SABESP (Processo 10/50694-0), e da bolsa de mestrado (Processo 11/22685-0).

### REFERÊNCIAS

- APHA, AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**, 22<sup>nd</sup> ed. Washington, 2012.
- BARTIKO, D.; DE JULIO, M. Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento. *Revista Ambiente & Água*, v. 10, n. 1, p. 71-81, 2015. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1239>.
- BRATBY, J. **Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment**. 2<sup>nd</sup> ed. IWA Publishing, London, 2006.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. RIMA, 2<sup>a</sup> ed., 2 v., 2005, 1.565 p.
- FERRARI, T. N. **Estudos de Tratabilidade das Águas do Rio Paraíba do Sul que Abastecem o Município de São José dos Campos, SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2012.
- FITZPATRICK, C. S. B.; FRADIN, E.; GREGORY, J. Temperature effects on flocculation, using different

- coagulants. **Water Science and Technology**, v. 50, p. 171-175, 2004.
- GREGORY, J.; NELSON, D. W. A new optical method for flocculation monitoring. **Solid-liquid Separation**, p. 172-182, 1984.
- GREGORY, J. Turbidity fluctuations in flowing suspensions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 105, n. 2, p. 357-371, 1985.  
[http://dx.doi.org/10.1016/0021-9797\(85\)90309-1](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9797(85)90309-1).
- GREGORY, J. Polymer adsorption and flocculation in sheared suspensions. **Colloids and surfaces**, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, v. 31, p. 231-253, 1988.
- GREGORY, J.; CHUNG, H. Continuous monitoring of flocs properties in stirred suspensions. **Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua**, Blackwell Science Ltd., v. 44(3), p.125-131, 1995.
- GREGORY, J. Monitoring floc formation and breakage. **Water Science and Technology**, v. 50 (12), p. 163-170, 2004.
- KORNBOONRAKSA, T.; LEE, S.; LEE, S.; LEE, H. On-line monitoring of floc formation in various flocculants for piggery wastewater treatment. **Desalination and Water Treatment**, v. 1, n. 1-3, p. 248-258, 2009.  
<http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2009.127>.
- LI, G.; CUI, F.; YAN, L. Optimum Gt value in mixing-flocculation for highly turbid water. **Flocculation and Dewatering**, p. 251-262. Engineering Foundation, New York, 1989.
- LI, T.; ZHU, Z.; WANG, D.; YAO, C.; TANG, H.; The strength and fractal dimension characteristics of alum-kaolin flocs. **International Journal of Mineral Processing**, v. 82, p. 23-29, 2007.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.012>.
- MORUZZI, R. B. **Avaliação da Influência da Distribuição de Tamanho de Partículas e do Binômio Velocidade/Tempo de Detenção na Zona de Reação no Desempenho da Flotação com Utilização de Sonda Ultrassônica e Técnica de Análise por Imagem**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2005.
- SANTOS, H. R.; PRADO, G. S. do; VIDAL, C. M. de 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. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 291-300, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522004000400005>.
- SOLOMENTSEVA, I.; BÁRÁNY, S.; GREGORY, J. The effect of mixing on stability and break-up of aggregates formed from aluminum sulfate hydrolysis products. **Colloids and Surfaces A**, v. 298, p. 34-41, 2007.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.12.016>.
- YU, W.; GUIBAI, L.; XU, Y.; YANG, X. Breakage and re-growth of flocs formed by alum and PACl. **Powder Technology**, n. 189, p. 439-443, 2009.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2008.07.008>.
- YU, W.; GREGORY, J.; YANG, Y.; SUN, M.; LIU, T.; LI, G. Effect of Coagulation and Applied Breakage Shear on the Regrowth of Kaolin Flocs. **Environmental Engineering Science**, v. 27, n. 6, p.483-492, 2010.  
<http://dx.doi.org/10.1089/ees.2009.0424>.
- YU, W.; GREGORY, J.; CAMPOS, L. C. Breakage and re-growth of flocs: Effect of additional doses of coagulant species. **Water Research**, v. 45, p. 6718-6724, 2011.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.016>.
- YUKSELEN, M.A.; GREGORY, J. Properties of flocs formed using different coagulants. **Water Science and Technology**, v. 2, n. 5-6, p. 95-101, 2002.
- YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. The reversibility of floc breakage. **International Journal of Mineral Processing**, Elsevier B. V., 73, p. 251-259, 2004.
- WANG, Y.; GAO, B.; XU, X.; XU, W.; XU, G. Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment. **Journal of Colloid and Interface Science**, China, v. 332, p. 354-359, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2009.01.002>.