



Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento

doi: 10.4136/ambi-agua.1239

Received: 06 Nov 2013; Accepted: 21 Oct. 2014

Daniel Bartiko* ; Marcelo De Julio

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brasil

* Autor correspondente: e-mail: danielbartiko@hotmail.com, dejulio@ita.br

RESUMO

Neste trabalho foram construídos diagramas de coagulação a partir de ensaios em bancada com auxílio de um equipamento *jartest* para a avaliação da turbidez remanescente de uma água de estudo preparada com a adição de suspensão de caulinita (até atingir turbidez de 25 ± 2 uT) submetida à coagulação, floculação e sedimentação. Foi utilizado sulfato de alumínio isento de ferro como coagulante, sendo variada sua dosagem (5 mg L^{-1} a 100 mg L^{-1}) e o pH de coagulação (3 a 9). Foram estudadas três velocidades de sedimentação (3,0; 1,5 e $0,5 \text{ cm min}^{-1}$). Com o auxílio dos diagramas de coagulação, observou-se resultados satisfatórios para a remoção de turbidez com valores de pH de coagulação entre 6,5 e 7,5 e dosagem de coagulante a partir de 15 mg L^{-1} ; dosagens elevadas de coagulante não levaram, necessariamente, aos menores valores de turbidez remanescente. A eficiência de remoção da turbidez foi maior para velocidades de sedimentação mais baixas, chegando a valores menores que 1 uT na menor velocidade de sedimentação estudada. A construção de diagramas de coagulação com base em ensaios em equipamento *jartest* demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a otimização das etapas de coagulação, floculação e sedimentação do tratamento da água, possibilitando produzir flocos com elevado potencial para terem suas características analisadas por meio de técnicas de monitoramento contínuo da floculação.

Palavras-chave: estudos de tratabilidade, *jar test*, sedimentação, sulfato de alumínio, tratamento de água.

Construction and use of coagulation diagrams as a tool for continuous monitoring of flocculation in water supply

ABSTRACT

In this work coagulation diagrams were constructed from bench tests with the aid of *jartest* equipment in order to evaluate the remaining turbidity of water prepared by adding kaolin suspension (until reaching a turbidity of 25 ± 2 uT). The water was then subjected to coagulation, flocculation and sedimentation. Iron-free aluminum sulfate was used as a coagulant in dosages varying from 5 mg L^{-1} to 100 mg L^{-1} and coagulation pH varying from 3 to 9. Three different rates of sedimentation velocities were investigated (3.0; 1.5; and

0.5 cm min⁻¹). Based upon the coagulation diagrams, satisfactory results for turbidity removal were observed with coagulation pH values between 6.5 and 7.5 and coagulant dosages greater than 15 mg L⁻¹; high dosages of coagulant did not necessarily lead to lower remaining turbidity values. Turbidity removal efficiency was higher in lower rates of sedimentation velocities, reaching values less than 1 uT at the lowest sedimentation rate studied. The construction of coagulation diagrams using *jar test* equipment proved to be an effective tool for the optimization of the coagulation phases, flocculation and sedimentation in water treatment, producing flocs whose characteristics were more easily analyzed using techniques of continuous monitoring flocculation.

Keywords: aluminum sulfate, *jar test*, treatability studies, sedimentation, water treatment.

1. INTRODUÇÃO

Estações de Tratamento de Água (ETA's) que empregam o tratamento em ciclo completo (que usa os processos e operações de coagulação, floculação, decantação e filtração para a clarificação da água, seguida da desinfecção, fluoração e estabilização final) estão presentes em 63,3% dos municípios brasileiros. Este índice sobe para 80,7% naqueles com população superior a 100 mil habitantes, segundo a última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2008). Logo, considerando que grande parte da população brasileira reside em capitais, regiões metropolitanas e cidades de maior porte, é de se esperar que o índice da população abastecida por água tratada em ETA's de ciclo completo seja elevado.

Estes dados mostram a importância do controle e otimização dos processos e operações de coagulação, floculação, decantação e filtração nas ETA's para a produção de água com qualidade adequada ao consumo e atividades humanas.

A coagulação consiste na desestabilização de partículas em suspensão presentes na água (que possuem sua superfície carregada com cargas elétricas negativas), pela adição, na maioria dos casos, de sais de ferro ou alumínio, os quais em contato com a água formam espécies hidrolisadas que, por sua vez, adsorvem nas partículas coloidais presentes na água e as desestabilizam (Kim et al., 2001). Di Bernardo e Dantas (2005) citam que a etapa de coagulação depende basicamente das características da água como pH, alcalinidade, cor verdadeira, turbidez, temperatura, mobilidade eletroforética, força iônica, concentração de sólidos totais dissolvidos, tamanho e distribuição de tamanhos das partículas em estado coloidal e em suspensão, entre outros.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) o processo de coagulação pode ser considerado como a atuação individual ou conjunta de quatro mecanismos diferentes: compressão da dupla camada elétrica; adsorção e neutralização de cargas; varredura (recomendada para ETA's de ciclo completo) e adsorção e formação de pontes. No mecanismo de varredura, maiores dosagens de coagulante são adicionadas à água em relação ao mecanismo de adsorção e neutralização de cargas, o que leva à formação de precipitados do tipo Al(OH)₃ ou Fe(OH)₃. Segundo Pavanelli (2001) o mecanismo de varredura vem sendo bastante empregado em estações de tratamento em ciclo completo devido aos flocos formados serem maiores do que aqueles formados pelo mecanismo de adsorção e neutralização de cargas; conseqüentemente suas velocidades de sedimentação são maiores.

A floculação, por sua vez, ocorre em tanques denominados floculadores, onde as partículas previamente desestabilizadas (na etapa de coagulação) recebem agitação lenta controlada por um tempo relativamente longo para que se aumente a probabilidade de ocorrência dos choques entre as mesmas. O desempenho da etapa da floculação depende diretamente da eficiência do processo de coagulação acrescida de alguns parâmetros inerentes a esta fase: gradiente de velocidade médio e tempo de floculação e o tipo e geometria do equipamento utilizado. A fenomenologia da floculação baseia-se em dois mecanismos

complementares: adesão e transporte. O primeiro está relacionado às cargas superficiais das partículas, que devem ser alteradas durante a coagulação para que os choques sejam efetivos. O segundo mecanismo refere-se à agitação introduzida ao meio e pode ser dividido em outros três: movimento Browniano (floculação pericinetica), movimento do fluido (floculação ortocinetica) e sedimentação diferencial (Santos et al., 2004).

Uma maneira simples de se obter os parâmetros para projeto e operação de ETA's que empregam as etapas de coagulação, floculação, sedimentação e filtração são ensaios de tratabilidade da água em equipamento *jar test*. A otimização das etapas descritas anteriormente, com auxílio de ensaios em equipamento *jar test*, além de resultar em maior eficiência global da ETA, pode levar a minimização da dosagem de coagulante aplicada à água bruta, fato que, segundo Nam et al. (2013) é valioso, pois resíduos químicos de coagulantes a base de alumínio podem ter efeitos maléficos sobre a saúde humana, principalmente ao sistema nervoso, como o surgimento da Doença de Alzheimer. Os mesmos autores ainda citam que o *jar test* é comumente usado na determinação da dosagem de coagulante que deve ser aplicado à água bruta por meio de ensaios laboratoriais.

As informações obtidas através dos ensaios em *jar test* podem ser dispostas em diagramas de coagulação (Kim et al., 2001; Lin et al., 2008; Bongiovani et al., 2010; Selhorst Filho et al., 2011; Ferrari et al., 2012), no qual os valores da dosagem de coagulante, pH de coagulação e turbidez remanescente podem ser facilmente visualizados graficamente e então identificados o par de valores “dosagem de coagulante x pH de coagulação” que conduziram aos melhores resultados na remoção da turbidez ou outro parâmetro de interesse da massa líquida. Amirtharajah e Mills (1982) foram os primeiros a propor o uso de diagramas de coagulação na avaliação da eficiência de remoção de turbidez em amostras de água submetidas à coagulação, floculação e decantação.

O objetivo deste trabalho foi construir diagramas de coagulação para avaliar a turbidez remanescente de uma água de estudo preparada a partir de uma suspensão de caulinita, variando-se a dosagem do coagulante e o pH de coagulação para três diferentes velocidades de sedimentação. Os dados encontrados neste trabalho serviram de base para ensaios em bancada com o auxílio de um equipamento de monitoramento contínuo da floculação (EMCF), desenvolvido recentemente por pesquisadores vinculados ao Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do ITA.

Basicamente, estudos com o EMCF são realizados de forma acoplada a ensaios em *jar test* modificado (Yu et al., 2009; Yukselen e Gregory, 2004); no EMCF é possível avaliar o crescimento dos flocos formados na etapa de floculação do tratamento de águas de abastecimento, sua resistência ao cisalhamento e a capacidade do floco cisalhado (quebrado) de retornar ao seu tamanho original. Estas informações podem resultar na otimização da dosagem de coagulante, bem como o tempo e gradiente de floculação médio, parâmetros fundamentais para o bom desempenho das ETA's que empregam o tratamento em ciclo completo na potabilização de águas distribuídas à população. O princípio de funcionamento do EMCF pode ser detalhadamente consultado no trabalho de Gregory (1984).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Suspensão de caulinita

A metodologia adotada para a preparação da suspensão-mãe de caulinita foi semelhante à adotada por Yukselen e Gregory (2004). Duzentos gramas de caulinita (Synth[®]) foram adicionadas em 500 mL de água ultrapura com condutividade de $1,5 \mu\text{S cm}^{-1}$ (obtida através de um equipamento Gehaka Master System pelo sistema Millipore) e, então, a solução resultante foi agitada por 10 min a 1200 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 a 1200 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 12h00.

Com o auxílio de uma bomba de baixa vazão e um tubo plástico de pequeno diâmetro 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^{-1} , muito próximo do valor 135 g L^{-1} , reportado na literatura (Yukselen e Gregory, 2002; 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^{-1} , determinada gravimetricamente e então armazenada em recipientes de plástico sobre refrigeração até seu posterior uso.

2.2. Coagulante

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 – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 14,3 \text{ H}_2\text{O}$; com teor de Al_2O_3 de 8,35%. Como se trata do tratamento de água 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.

2.3. Caracterização da água do poço

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 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 Condutímetro Marconi, respectivamente. 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 (APHA et al., 2012). Todas as demais análises de turbidez e pH realizadas neste trabalho também seguiram a metodologia descrita nesta subseção.

2.4. Procedimento de ensaio

Para os ensaios em equipamento *jar test* (Nova Ética, modelo LDB especial), a suspensão mãe de caulinita foi diluída diariamente em água proveniente do poço artesiano até obter valor de turbidez de $25 \pm 2 \text{ uT}$, configurando a água de estudo. Devido a pequenas mudanças nas características da água, como também na sensibilidade do turbidímetro usado na quantificação da turbidez, avaliada em cada batelada de ensaios, admitiu-se trabalhar com o valor de turbidez entre 23 e 27 uT.

Usando o procedimento tradicional de ensaio em equipamento *jar test*, os jarros foram preenchidos com 2 L da água de estudo preparada a partir da suspensão-mãe de caulinita ($25 \pm 2 \text{ uT}$) e então variou-se o par de valores “dosagem de coagulante x pH de coagulação”, sendo que o objetivo foi variar o valor do pH de coagulação de 3 até 9 (valores próximos). Já a dosagem do coagulante foi variada de 5 mg L^{-1} a 100 mg L^{-1} .

Foram empregados os seguintes parâmetros de mistura rápida e floculação: gradiente de velocidade médio de mistura rápida (G_{mr}) de 1000 s^{-1} e tempo de mistura rápida (T_{mr}) de 10 s; gradiente de velocidade médio de floculação (G_{fl}) de 20 s^{-1} e tempo de floculação (T_{fl}) de 20 min. Após isso, a água floculada foi mantida em repouso para que os flocos

sedimentassem, sendo que foram empregadas velocidades de sedimentação de 3,0; 1,5 e 0,5 cm min⁻¹, após os quais foram coletadas amostras dos sobrenadantes para as medidas de turbidez e cor aparente. A metodologia para a execução dos ensaios em *jar test* é descrita em Di Bernardo et al. (2011).

Para se variar o pH foi empregado agente alcalinizante (hidróxido de sódio 0,1 N) ou acidificante (ácido clorídrico 0,1 N). Depois de dosado o alcalinizante ou acidificante à solução, foi aguardado aproximadamente 30 s para a estabilização do pH. A temperatura da água de estudo foi ajustada a 20 ± 1 °C.

Para as diferentes velocidades de sedimentação foi avaliada a turbidez e cor aparente remanescentes da amostra e, de posse destes dados, foram construídos os diagramas de coagulação. As curvas foram construídas como conjuntos, onde as linhas delimitam a região dos pares de dosagem de coagulante x pH de coagulação que possuem turbidez menor ou igual a indicada pela curva, conforme metodologia adotada no trabalho de De Julio et al. (2009). Também foram construídos diagramas de coagulação para a cor aparente, no entanto, os dados não foram apresentados neste trabalho para não torná-lo muito extenso.

2.5. Monitoramento contínuo da floculação

Com o par de valores “dosagem de coagulante x pH de coagulação” definidos anteriormente, foram realizados ensaios de monitoramento contínuo da floculação com o auxílio do EMCF, nesta etapa foi adotado gradiente de velocidade e tempos de quebra de 913 s⁻¹ e 5, 60 e 300 s, respectivamente, gradiente de velocidade de mistura rápida e de floculação de 1000 e 25 s⁻¹, respectivamente. O procedimento de ensaio, resumidamente, consistiu em coagular a água nas condições operacionais definidas anteriormente (6 mg/L de hidróxido de sódio como agente alcalinizante e 30 mg/L de sulfato de alumínio como coagulante - 1,32 mg/L de Al³⁺), efetuou-se a mistura rápida por 10 s e se iniciou a etapa da floculação (gradiente de velocidade de floculação de 25 s⁻¹). Durante a etapa de mistura rápida, houve a coleta de amostra da água para leitura do pH de coagulação.

Passados 25 minutos de floculação, o valor do gradiente de velocidade foi automaticamente aumentado para 913 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, novamente, o gradiente de velocidade foi reduzido a 25 s⁻¹ durante 25 minutos a fim de permitir a refloculação. Passado esta etapa, mais uma vez, o gradiente de velocidade foi aumentado para 913 s⁻¹, promovendo desta forma, o segundo evento de quebra dos flocos por tempo previamente determinado e igual ao da quebra anterior, seguida pela refloculação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização da água do poço

Na Tabela 1 são apresentados os valores obtidos na caracterização da água do poço artesiano do DCTA utilizada na diluição da suspensão-mãe de caulinita. Como a coleta da água do poço para a realização dos ensaios foi feita diariamente, são apresentados os valores médios e seus respectivos desvio padrão, valores máximo e mínimo obtidos para os parâmetros medidos, aqueles que apresentam apenas um valor não sofreram mudanças ao longo das coletas.

Pode-se verificar na Tabela 1 o caráter levemente ácido da água do poço utilizada para a preparação da água de estudo a partir da suspensão-mãe da caulinita. Como era esperado, os valores de turbidez, cor aparente e cor verdadeira foram baixos devido à origem da água. Não houve variação expressiva na maioria dos parâmetros analisados, com exceção de cor

aparente e verdadeira, porém sem mudança da magnitude dos valores; já a alcalinidade e dureza total não sofreram variações ao longo das coletas, apresentando baixos valores.

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

Parâmetro	Valor médio	Desvio padrão	Min. – Máx.
pH	6,33	± 0,04	6,30 – 6,41
Condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	35,77	± 0,59	35,05 – 36,63
Turbidez (uT)	1,13	± 0,09	1,01 – 1,27
Cor aparente (uH)	8,25	± 3,3	3 – 12
Cor verdadeira (uH)	3,75	± 2,4	1 – 7
Alcalinidade total ($\text{mgCaCO}_3\text{L}^{-1}$)	12,8	-	-
Dureza total ($\text{mgCaCO}_3\text{L}^{-1}$)	3,5	-	-

3.2. Diagramas de coagulação

Nas Figuras 1, 2 e 3 são apresentados os diagramas de coagulação construídos para a avaliação da remoção de turbidez da água de estudo em três diferentes velocidades de sedimentação, sendo elas 3,0; 1,5 e 0,5 cm min^{-1} , (taxas de aplicação superficial de 43,2; 21,6 e 7,2 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), respectivamente.

O valor médio e respectivo desvio padrão da turbidez da água de estudo utilizada nos ensaios foi de $25,5 \pm 1,1$ uT, quantificada em cada batelada de ensaios.

Analisando as Figuras 1, 2 e 3 observa-se, conforme esperado, que houve melhoria significativa no valor da turbidez remanescente ao passo em que a velocidade de sedimentação diminuiu. No entanto, na prática, velocidades de sedimentação muito baixas resultam em decantadores com dimensões elevadas devido à necessidade de maior tempo de detenção hidráulica da água a ser decantada, o que pode tornar o projeto de uma ETA inviável economicamente.

Para o sulfato de alumínio líquido isento de ferro foram obtidos resultados satisfatórios nos valores de turbidez remanescenteda água decantada, em alguns casos, abaixo de 1 uT, sendo que inúmeros valores apresentaram turbidez remanescente menor que 3 uT, valor máximo recomendado para água decantada visando aumentar a duração das carreiras de filtração (Ferrari et al., 2012). Pode-se observar também que alguns valores de turbidez remanescente (0,71 e 0,8 uT) obtidos para a água decantada chegaram a valores próximos do exigido pelo Padrão de Potabilidade Brasileiro (Portaria MS N° 2914/2011) para a água após passar por polimento final em filtros rápidos de areia utilizados nas ETA's (Brasil, 2011).

Os melhores resultados encontraram-se na faixa de pH de coagulação entre 6,5 e 7,5 com dosagem do produto comercial de coagulante acima de 15 mg L^{-1} (0,66 mg L^{-1} de Al^{3+}), caracterizando o mecanismo de coagulação da varredura. Embora bons resultados tenham sido obtidos também para elevadas dosagens de coagulante, esta não é a alternativa mais viável para a rotina operacional de uma ETA devido aos custos com o coagulante e agente alcalinizante requerido no tratamento, além da maior geração de lodo a ser tratado e disposto. Exemplificando, para a velocidade de sedimentação de 1,5 cm min^{-1} foram obtidos valores de turbidez remanescente de 1,57 uT com a adição de 30 mg L^{-1} de coagulante e de 5 mg L^{-1} de NaOH. Enquanto que a turbidez remanescente com valor pouco menor, 1,41 uT, foi obtida com a adição de 50 mg L^{-1} de coagulante e 20 mg L^{-1} do agente alcalinizante. Neste caso não justifica usar uma dosagem 2/3 maior de coagulante e quatro vezes maior de agente alcalinizante para obter-se resultados ligeiramente melhores para a turbidez remanescente.

Para a maior dosagem de coagulante, 100 mg L^{-1} , foi necessário 28 mg L^{-1} de NaOH para chegar-se ao pH que levou aos melhores resultados (turbidez remanescente de 7,61; 2,44 e 1,57 uT para as velocidades de 3,0; 1,5 e 0,5 cm min^{-1} , respectivamente). Pode ser constatado

neste caso, que, apesar de serem obtidos bons resultados de remoção de turbidez, os diagramas de coagulação demonstram eficiência inferior aos exemplos citados anteriormente, onde se obteve valores de turbidez mais satisfatórios com menores dosagens de coagulante e de agente alcalinizante. Logo, elevadas dosagens de coagulante não se traduzem, necessariamente, em melhores resultados. Esta mesma conclusão foi obtida por Pavanelli (2001), que em seu trabalho avaliou a eficiência de remoção de turbidez e cor aparente de uma água que apresentava estes parâmetros com valor elevado, com o uso de sulfato de alumínio, cloreto férrico, hidroxiclreto de alumínio e sulfato férrico.

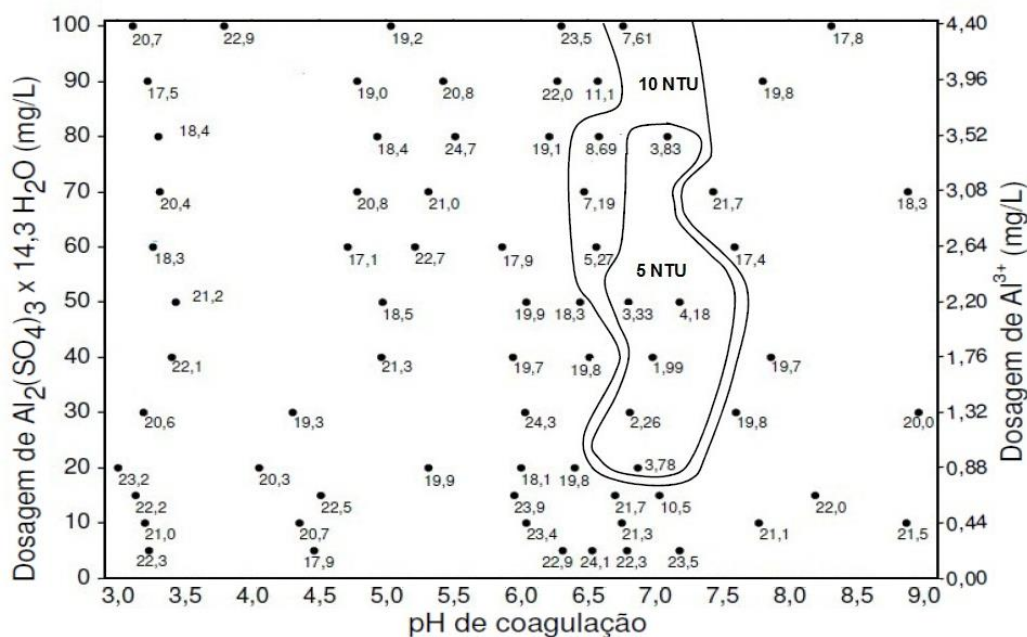


Figura 1. Diagrama de coagulação contendo as curvas de mesma turbidez remanescente (uT) em função da dosagem de coagulante x pH de coagulação para a água decantada com velocidade de 3,0 cm min⁻¹.

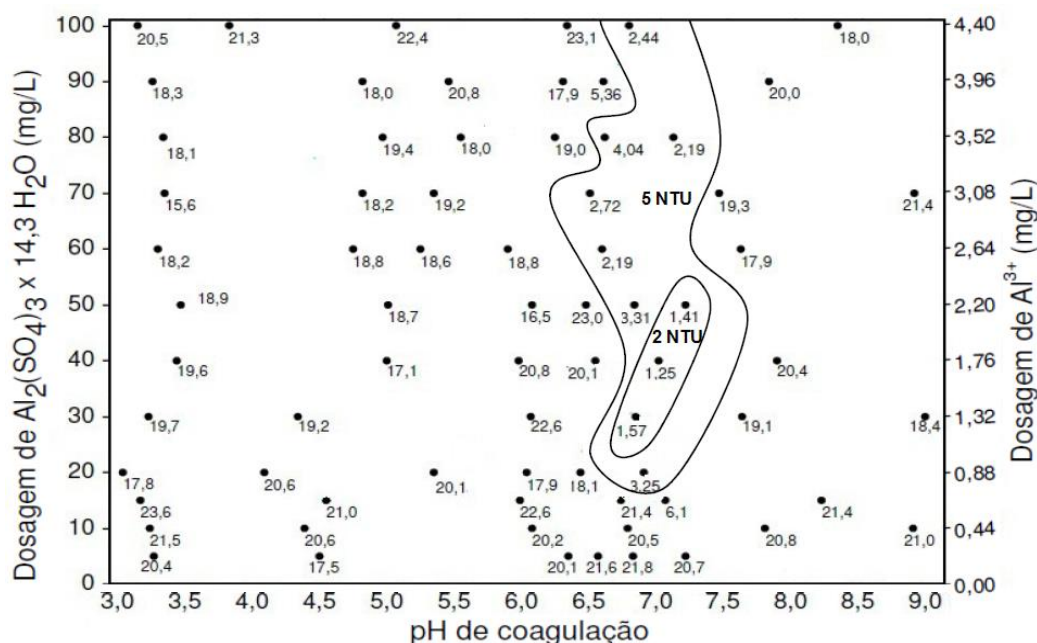


Figura 2. Diagrama de coagulação contendo as curvas de mesma turbidez remanescente (uT) em função da dosagem de coagulante x pH de coagulação para a água decantada com velocidade de 1,5 cm min⁻¹.

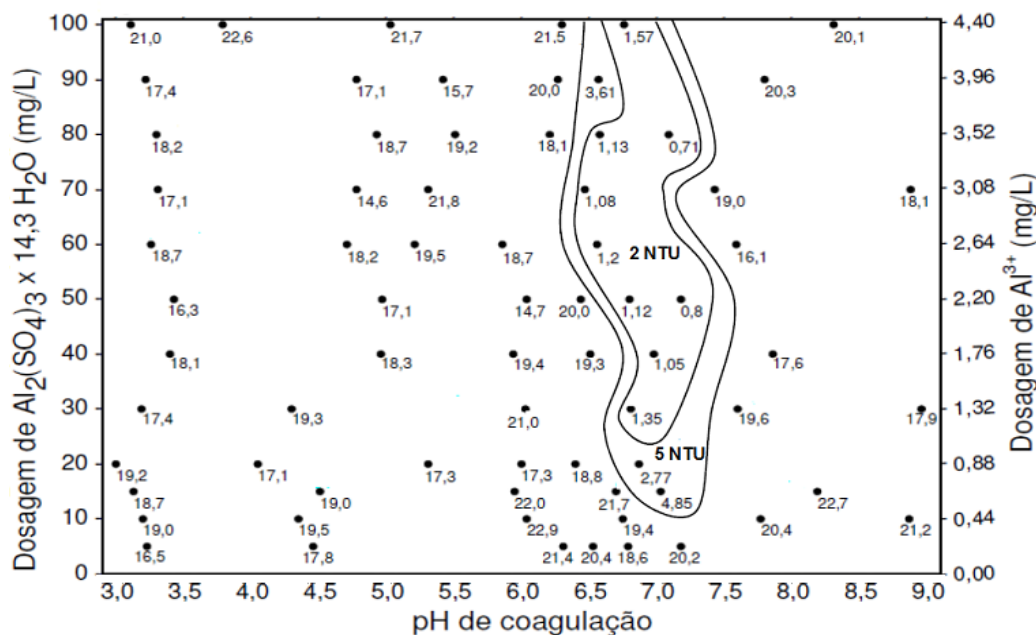


Figura 3. Diagrama de coagulação contendo as curvas de mesma turbidez remanescente (uT) em função da dosagem de coagulante x pH de coagulação para a água decantada com velocidade de $0,5 \text{ cm min}^{-1}$.

Para os estudos posteriores, no EMCF, objeto de prosseguimento desta pesquisa, foi avaliado o crescimento dos flocos formados na etapa de floculação, sua resistência ao cisalhamento e a capacidade do floco cisalhado (quebrado) de retornar ao seu tamanho original (reversibilidade) para o par de valores “dosagem de coagulante x pH de coagulação” que apresentou valores de turbidez remanescente de 2,26; 1,57 e 1,35 uT para as velocidades de sedimentação de $3,0$; $1,5$ e $0,5 \text{ cm min}^{-1}$, respectivamente.

Chegou-se aos resultados mencionados acima para turbidez remanescente por meio da aplicação de 30 mg L^{-1} de sulfato de alumínio líquido isento de ferro ($1,32 \text{ mg L}^{-1}$ de Al^{3+}) e pH de coagulação igual a 6,81, alcançado através da adição de 6 mg L^{-1} de NaOH à água de estudo. Esta configuração permitiu a obtenção de turbidez remanescente menor que 3 uT nas três velocidades de sedimentação estudadas, além da adição de dosagens de coagulante e agente alcalinizante à água de estudo relativamente baixas quando comparadas aos demais dados apresentados nas Figuras 1, 2 e 3.

3.3. Ensaios de monitoramento contínuo da floculação

Na Figura 4, está representada a variação do Índice de Floculação (IF) em função do tempo (min) durante as etapas de floculação e refloculação, destaque para os valores de IF quando aumentado o gradiente de velocidade para 913 s^{-1} durante os tempos de 5, 60 e 300 s (gradiente de velocidade e tempos de quebra). Resumidamente, o valor de IF presente na Figura 4, 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 e Chung, 1995).

Fica evidente ao analisar a Figura 4, 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 913 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). Este fato já foi descrito na literatura por Yukselen e Gregory (2002; 2004), que também obtiveram estes resultados por meio de ensaios de monitoramento contínuo da floculação.

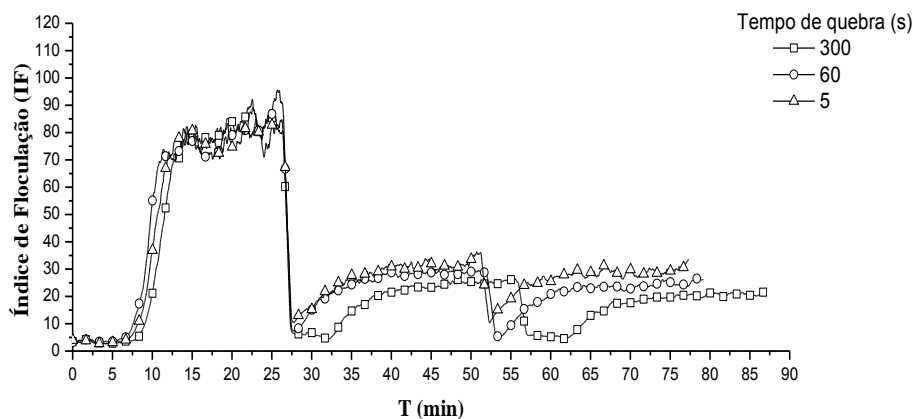


Figura 4. Variação do valor do Índice de Floculação (IF) em função do tempo (min) para o gradiente de velocidade de quebra de 913 s^{-1} e tempos de quebra de 5, 60 e 300 s. Dosagem de coagulante e alcalinizante aplicada: 30 mg L^{-1} e 6 mg L^{-1} , respectivamente. Gradiente de velocidade de floculação: 25 s^{-1} . Gradiente de velocidade e tempo de mistura rápida: 1000 s^{-1} e 10 s, respectivamente.

4. CONCLUSÕES

Os diagramas obtidos e apresentados neste trabalho demonstraram valores satisfatórios para turbidez remanescente de uma água de estudo preparada a partir de uma suspensão-mãe de caulinita submetida à coagulação, floculação e sedimentação em escala laboratorial com auxílio de um equipamento *jar test*. Estes dados indicam que ocorreu formação de flocos com tamanho suficiente para serem removidos com eficiência pelo mecanismo de sedimentação.

O crescimento dos flocos obtidos neste estudo tem potencialidade para ser avaliado através de técnica de monitoramento contínuo da floculação, com o auxílio da qual pode alcançar-se flocos com tamanhos otimizados e que são removidos da massa líquida com velocidades de sedimentação ajustadas às condições da água floculada resultando, na prática, em decantadores de menor área e maior eficiência.

Os resultados obtidos demonstram que a coagulação da água de estudo ocorreu pelo mecanismo de varredura, com resultados satisfatórios a partir da dosagem de 15 mg L^{-1} de coagulante e pH na faixa de 6,5 a 7,5.

Este trabalho foi de fundamental importância para a avaliação do comportamento da água de estudo em relação à coagulação e à formação dos flocos, bem como a capacidade dos mesmos sedimentar-se. Desta forma, houve informações suficientes para dar prosseguimento aos ensaios de monitoramento contínuo da floculação para as melhores configurações obtidas e descritas neste trabalho, ensaios em que ficou claro que 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 uT. Ficou claro, nos ensaios de monitoramento contínuo da floculação, que os flocos formados durante a etapa de floculação do tratamento de águas de abastecimento, uma vez quebrados, possuem capacidade limitada de alcançar tamanho semelhante ao original, comprometendo significativamente a remoção deles durante a etapa seguinte, decantação.

5. AGRADECIMENTOS

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

Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), empresa parceira e financiadora deste projeto.

6. REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington, 2005.
- AMIRTHARAJH, A.; MILLS, K. M. Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation. **Journal of the American Water Works Association**, v. 74. n. 4, p. 210-216, 1982. <http://www.jstor.org/stable/41271001>
- BONGIOVANI, M. C.; KONRADT-MORAES, L. C.; BERGAMASCO, R.; LOURENÇO, B. S. S.; TAVARES, C. R. G. Os benefícios da utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável. **Acta Scientiarum Technology**, v. 32, n. 2, p. 167 – 170, 2010. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v32i2.8238>
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Nº 2914/2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial [da] União**, 12 dez. 2011.
- DE JULIO, M.; FIOVARANTE, D. A.; SELHORST FILHO, O.; De JULIO, T. S.; OROSKI, F. I. Avaliação da Remoção de Cianobactérias e Saxitoxinas da água bruta afluenta a ETA Pitanguí de Ponta Grossa/PR, utilizando os diagramas de coagulação para o cloreto férrico e o reagente de Fenton. **Holos Environment**, v. 9, n. 2, p. 254 – 273, 2009.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. Ed. São Carlos: RiMA, 2005. 1565p.
- DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; VOLTAN, P. L. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. [S.l.]: LdiBe, 2011. 454p.
- FERRARI, T. N.; DE JULIO, M.; DE JULIO, T. S.; SOUSA JÚNIOR, W. C. Estudos de Tratabilidade das Águas do Rio Paraíba do Sul que Abastecem o Município de São José dos Campos/SP. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 5, n. 2, p. 45 – 58, 2012.
- GREGORY, J. Turbidity fluctuations in flowing suspensions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 105, p. 357-371, 1984. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9797\(85\)90309-1](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9797(85)90309-1)
- GREGORY, J.; CHUNG, H. Continuous monitoring of floc properties in stirred suspensions. **Journal of Water Supply: Research and Technology**, v. 44, n. 3, p. 125-131, 1995.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Nacional de saneamento básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010. 219 p. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf> Acesso em: 14 set. 2012.
- KIM, S.; MOON, B.; LEE, H. Effects of pH and dosage on pollutant removal and floc structure during coagulation. **Microchemical Journal**, v. 68, p. 197 – 203, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0026-265X\(00\)00146-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0026-265X(00)00146-6)

- LIN, J.; HUANG, C.; PAN, J. R.; WANG, D. Effect of Al(III) speciation on coagulation of highly turbid water. **Chemosphere**, v. 72, p. 189 – 196, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.01.062>
- NAM, S.; JO, B.; KIM, M.; KIM, W.; ZOH, K. Streaming current titration for coagulation of high turbidity water. **Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 419, p. 133 – 139, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.11.051>
- PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. 216f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- 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. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 291 – 300, 2004.
- SELHORST FILHO, O.; WIECHETECK, G. K.; ANDRADE FILHO, A. G.; DÖLL, M. M. R. Otimização de parâmetros de classificação de água do sistema de tratamento de água de Ponta Grossa (PR). **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 3, n. 2, p. 35-46, 2011.
- 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>
- YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. Breakage and re-formation of alum flocs. **Environmental Engineering Science**, v. 19, n. 4, p. 229 – 236, 2002. <http://dx.doi.org/10.1089/109287502760271544>
- YUKSELEN, M. A.; GREGORY, J. The reversibility of floc breakage. **International Journal of Mineral Processing**, v. 73, p. 251-259, 2004. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00077-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00077-2)