



You are free: to copy, distribute and transmit the work; to adapt the work.
You must attribute the work in the manner specified by the author or licensor

EMPREGO DO SULFATO DE ALUMÍNIO E DO CLORETO DE POLIALUMÍNIO EM ESTUDOS DE TRATABILIDADE DA ÁGUA QUE ABASTECE O MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS-SP

Talita Natália Ferrari¹, Marcelo De Julio², Tatiane Sakamoto De Julio³

RESUMO

No desenvolvimento deste trabalho foram realizados estudos de tratabilidade com a água que abastece o Município de São José dos Campos/SP, com o objetivo de analisar seu comportamento com o uso de dois coagulantes, o sulfato de alumínio e o cloreto de polialumínio (PAC). Inicialmente foram variadas as dosagens de coagulante em função do pH de coagulação para a elaboração de diagramas de coagulação para a remoção de turbidez. Em seguida, foram selecionadas dosagens de coagulante com bons desempenhos de remoção de turbidez, adicionado hipoclorito de sódio como agente pré-oxidante e testadas diferentes dosagens do polímero catiônico. Por fim, foram realizados ensaios simulando o tratamento da água em ciclo completo. O sulfato de alumínio, desde os ensaios para a elaboração dos diagramas de coagulação, mostrou-se mais eficiente na remoção de turbidez se comparado ao uso do PAC, nas condições em que o estudo foi realizado. Porém, o PAC, na etapa final gerou os menores valores de turbidez na água filtrada, sendo estes os únicos abaixo do limite máximo permitido para água de abastecimento de acordo com a Portaria nº518/2004. A concentração de THM medida para os dois coagulantes mostrou-se bem abaixo do permitido.

Palavras-Chave: Estudos de tratabilidade; diagramas de coagulação; sulfato de alumínio; cloreto de polialumínio (PAC); THM.

EMPLOYMENT OF ALUMINIUM SULFATE AND POLYALUMINIUM CHLORIDE IN TREATABILITY STUDIES OF THE WATER THAT SUPPLIES SÃO JOSÉ DOS CAMPOS-SP CITY

ABSTRACT

In this work treatability studies were performed with the water that supplies Sao Jose dos Campos/SP city, in order to analyze their behavior for turbidity removal, with the use of two coagulants, aluminium sulfate and chloride polyaluminium (PACl). Initially, it was varied the coagulant dosage as a function coagulation pH for the construction of the coagulation diagrams. In the sequence, coagulant dosages were selected which have presented good performance on turbidity removal. After this, it was added sodium hypochlorite as oxidizing agent and tested different cationic polymer dosages. Finally, some essays were performed to simulate traditional treatment. Aluminium sulfate since the essays for the construction of the coagulation diagrams was more efficient in turbidity removal compared to PACl, in the conditions that the study was performed. But, in the final step, with PACl it was reached the lowest turbidity value in filtered water, which was the only one below the maximum value allowed in accordance with Brazilian drinking water standard. THM concentration measured for both coagulants was well below the standard.

Keywords: Treatability studies; coagulation diagrams; aluminium sulfate; polyaluminium chloride (PAC); THM.

Trabalho recebido em 04/05/2011 e aceito para publicação em 26/12/2011.

¹ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). e-mail: tferrari@ita.br

² Professor Adjunto, Coordenador da Área de Infraestrutura Aeroportuária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica e Chefe do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Divisão de Engenharia Civil do Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

³ Acadêmica do Curso de Engenharia Civil pela Universidade de Taubaté (UNITAU)

1. INTRODUÇÃO

A água destinada ao abastecimento humano, em grande parte dos municípios brasileiros (56,4%), segundo Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB 2008, é proveniente de mananciais superficiais e passam por tratamentos específicos, para que se enquadrem no padrão de potabilidade atualmente vigente no país (Portaria nº 518/2004). As etapas, produtos químicos e tecnologias adotadas no tratamento de água dependem diretamente da qualidade da água bruta captada, sendo que esta qualidade varia de acordo com a região em que o município e o manancial estão inseridos e também com o período do ano.

A tecnologia de tratamento de água mais empregada no Brasil atualmente é a de tratamento em ciclo completo, sendo a coagulação química, uma das primeiras etapas pelas quais a água passa durante o tratamento. O bom funcionamento da coagulação química está diretamente relacionado ao sucesso das etapas posteriores do tratamento de água, sendo, portanto, etapa de extrema importância para o tratamento (ARBOLEDA VALENCIA, 2000; DI BERNARDO; DANTAS, 2005; EDZWALD, 2011). Para que se atinja o desempenho esperado na etapa de coagulação, é necessária a correta seleção do coagulante a ser utilizado,

devendo este ser o mais adequado ao tratamento da água em questão, bem como é também de fundamental importância a seleção da dosagem e pH apropriados para sua utilização.

Assim, visando auxiliar a escolha dos produtos químicos e suas dosagens (além da obtenção de parâmetros de projeto e de outras valiosas informações) são realizados estudos de tratabilidade em laboratório, nos quais se utiliza a água bruta que se pretende tratar, diferentes tipos e dosagens de coagulantes, alcalinizantes, acidificantes, polímeros, pré-oxidantes, dentre outros.

Nestes estudos também podem ser variados os parâmetros físicos, como por exemplo, os gradientes de velocidade médios e os tempos de agitação, para que sejam simuladas as diferentes etapas do tratamento, como mistura rápida, floculação, decantação e filtração (QASIM *et al.*, 2000; DI BERNARDO *et al.*, 2002).

Os resultados da variação das dosagens de coagulante em ampla faixa de pH, podem ser utilizados na elaboração de diagramas de coagulação, onde diferentes curvas de isoefficiência são geradas, de acordo com o parâmetro de controle que se pretende estudar, como por exemplo, a turbidez remanescente. Assim, os diagramas auxiliam na escolha do mais apropriado coagulante, bem como nas suas

dosagens, para a água em estudo e para o período em que foi coletada.

Desta forma, foram realizados estudos de tratabilidade com a água que abastece o município de São José dos Campos (SJC), e buscou-se simular o tratamento de água em bancada, sendo adotadas as etapas de tratamento atualmente utilizadas na estação de tratamento de água (ETA) de SJC, ou seja, o tratamento em ciclo completo, com pré-oxidação com cloro, coagulação com sulfato de alumínio, floculação, adição de polímero catiônico como auxiliar de floculação, decantação, filtração e desinfecção com cloro (além da fluoretação e estabilização final da água).

A pré-oxidação com cloro tem como função oxidar alguns compostos presentes na água a fim de removê-los e facilitar a ocorrência das etapas de coagulação e floculação. Entretanto, na presença de matéria orgânica, pode promover a formação de subprodutos organoclorados, como por exemplo, os trihalometanos (THMs). A presença de THM na água de abastecimento pode estar relacionada à incidência de alguns tipos de câncer na população abastecida (KASIM et al., 2005; VILLANUEVA *et al.*, 2006; BENHAMIMED; MOULESSEHOUL, 2009) e, por isto, deve ser limitada a 0,1

mg/L, de acordo com a Portaria nº 518/2004.

A adição de polímeros como auxiliares de floculação no tratamento de água traz vantagens (DI BERNARDO; DANTAS, 2005), pois com suas longas cadeias poliméricas formam flocos maiores e mais densos, facilitando a remoção nas etapas posteriores de tratamento.

Portanto, este trabalho teve como objetivo geral realizar estudos de tratabilidade com a água bruta afluenta à ETA de SJC, empregando dois coagulantes, o sulfato de alumínio e o cloreto de polialumínio (PAC). Por meio da variação das dosagens dos coagulantes e seus respectivos valores de pH de coagulação, foram elaborados diagramas de coagulação para três velocidades de sedimentação (3,0; 1,5 e 0,5 cm/min). Por meio destes diagramas, selecionaram-se pares de valores nos quais foram verificados os resultados mais satisfatórios para a remoção de turbidez da água e que, posteriormente, foram utilizados em ensaios para selecionar as dosagens mais apropriadas de hipoclorito de sódio (pré-oxidante) e polímero catiônico. Por fim, para simular o tratamento em ciclo completo, foram acrescentadas as etapas de filtração e desinfecção, para avaliar a formação de trihalometanos (THMs) na água final.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A água de estudo empregada nos ensaios foi proveniente do Rio Paraíba do Sul, coletada no dia 01 de fevereiro de 2011, nas dependências da ETA do município de SJC, operada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Esta coleta foi realizada nas dependências da ETA de SJC, antes da adição dos produtos químicos específicos para o tratamento da água, sendo armazenada, durante todo o período de realização dos ensaios, em um reservatório de 2000 L em PVC com tampa, em edificação coberta e ventilada. Os ensaios encerraram-se em 24 de fevereiro de 2011.

Os ensaios experimentais foram realizados no equipamento Jar Test (Nova Ética, modelo LDB especial), no qual são realizados os processos e operações de mistura rápida, floculação, decantação e filtração, sendo a metodologia para a execução dos ensaios descrita em Di Bernardo et al. (2002).

Neste trabalho foram empregados dois sais de alumínio como coagulantes, o sulfato de alumínio isento de ferro (líquido, o mesmo utilizado na ETA de SJC – marca Cimil, teor de Al_2O_3 de 8,84%) e o cloreto de polialumínio (PAC), fornecido na forma líquida pela Indústria Bauminas – Grupo Química Cataguases, com 11,86% de óxido de alumínio (Al_2O_3). Para a

realização dos ensaios foram preparadas soluções empregando-se os produtos comerciais com concentrações de 4g/L em água deionizada.

Para a variação do pH de coagulação foram empregadas soluções 0,1 N de ácido sulfúrico (FMaia Gold 96%) e hidróxido de sódio em escamas (marca IQBC Produtos Químicos).

A realização das leituras dos valores de pH foram feitas com agitação (agitador magnético Quimis Q221-1) em um pHmetro Orion 410A. Para as medidas de turbidez utilizou-se um Turbidímetro HACH 2100P.

Em todos os ensaios realizados fixou-se a temperatura da água em $25 \pm 1^\circ C$.

A água de estudo foi caracterizada nos laboratórios da SABESP de SJC de acordo com Eaton et al. (2005).

Os parâmetros físicos utilizados nos ensaios para a elaboração dos diagramas de coagulação encontram-se descritos na Tabela 1.

Os diagramas de coagulação, inicialmente propostos por Amirtharajah e Mills (1982) e intensamente empregados por Di Bernardo e Dantas (2005), foram construídos para as três velocidades de sedimentação apresentadas na Tabela 1 e para os dois coagulantes em estudo.

Tabela 1. Parâmetros físicos adotados para a construção dos diagramas de coagulação.

Parâmetro	Valor
Tempo de mistura rápida (T_{mr})	10 s
Gradiente de velocidade médio de mistura rápida (G_{mr})	1000 s^{-1}
Tempo de floculação (T_{fl})	20 min
Gradiente de velocidade médio de floculação (G_{fl})	30 s^{-1}
Velocidades de sedimentação (V_s)	$V_{s1} = 3,0 \text{ cm/min}$
	$V_{s2} = 1,5 \text{ cm/min}$
	$V_{s3} = 0,5 \text{ cm/min}$

As curvas nos diagramas foram construídas como conjuntos, onde as linhas delimitam a região dos pares de dosagem de coagulante x pH de coagulação que possuem turbidez remanescente menor ou igual a indicada pela curva. De posse dos diagramas de coagulação, foram selecionados dois pontos nos diagramas de cada coagulante, correspondendo cada um, a uma dosagem do respectivo coagulante e seu pH de coagulação.

Os diagramas foram construídos apenas para a turbidez por ser este um parâmetro de rápida medição. A turbidez é uma característica da água devida à presença de partículas sólidas em suspensão (silte, argila, sílica, colóides), matéria orgânica e inorgânica finamente divididas, organismos microscópicos e algas. A turbidez é uma medida indireta destas impurezas (EDZWALD, 2011).

Nos diagramas de coagulação a notação PS significa ponto selecionado.

Após isso foram realizados ensaios por tentativa para selecionar a dosagem

inicial de hipoclorito de sódio (marca Carbocloro, 12% de NaClO), com a intenção de realizar uma etapa pré-oxidativa e se obter uma concentração de 0,8 mg/L de cloro residual total (livre e combinado) na água decantada, valor este praticado na ETA de SJC. Para se medir a concentração de cloro residual na água decantada e, posteriormente, na água final foi utilizada a titulometria volumétrica. O hipoclorito de sódio, preparado com 6 g NaClO/L , foi dosado para os dois coagulantes em estudo e submetido ao gradiente de velocidade médio de 125 s^{-1} , sendo mantido por 15 s antes do início da mistura rápida.

Para ambos os coagulantes estudados foram testadas dosagens (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; e 1,0 mg/L) do mesmo polímero catiônico empregado na ETA de SJC (poliacrilamida em pó, fornecida pela SNF do Brasil Ltda - FLOERGER) como auxiliar de floculação, preparado com concentração de 0,5 mg/L. A adição de polímero catiônico como auxiliar de

floculação foi feita depois de decorrido 1/3 do tempo de flocculação, também da mesma forma como realizado na ETA de SJC. Estes ensaios com polímero foram feitos já com a dosagem de hipoclorito de sódio antes da etapa de mistura rápida.

Depois de encerradas as determinações das dosagens de coagulantes, acidificante, alcalinizante, hipoclorito de sódio e polímero, foi selecionada uma combinação de dosagens de produtos químicos para cada coagulante (sulfato de alumínio e PAC) e realizados os ensaios para otimizações dos gradientes de velocidade médios e tempos de mistura rápida e flocculação, além de testadas diferentes velocidades de sedimentação. Os resultados das otimizações encontram-se na publicação de Ferrari et al. (2011). Com os parâmetros selecionados na etapa de otimização foram feitos ensaios simulando o tratamento em ciclo completo, onde a água decantada foi filtrada em areia (escala de bancada) e amostras da água filtrada foram analisadas medindo-se cor aparente, turbidez, concentrações de alumínio total (espectrofotômetro de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente/ICP OES, modelo Optima 5300DV, do fabricante PerkinElmer, SMEWW-3120 B) e trihalometanos - THM (Extração Líquido/Líquido, cromatografia gasosa com captura de elétrons/CG ECD,

SMEWW-6232 B; modelo GC - 14B, marca Shimadzu).

Para as análises de THM foi adicionando hipoclorito de sódio na água filtrada para obtenção de cloro residual igual a 1,8 mg/L, seguindo-se exatamente a rotina operacional da ETA de SJC. A água clorada foi armazenada em frascos plásticos de 1 L e mantida em local fechado sem a presença de luz. Para a realização das análises de THM, após 30 min de armazenamento da água clorada, foram coletadas amostras de água, sendo estas armazenadas em local refrigerado em frascos de vidro (10 mL) contendo ácido ascórbico. O mesmo procedimento foi repetido passadas 8 h da adição do hipoclorito, por ser este o tempo médio de distribuição da água tratada nos pontos mais distantes da rede de distribuição em SJC. Também foi feita análise de THM na água bruta (branco sem a adição de qualquer produto químico).

Para os ensaios de filtração empregou-se um kit de FLA (Filtro de Laboratório de Areia) acoplado ao jar test, filtro este que possui diâmetro interno de 19 mm e meio filtrante constituído de areia, com 15 cm de espessura. A areia empregada é a mesma dos filtros da ETA de SJC, com tamanho efetivo da areia de 0,45 mm e coeficiente de uniformidade de 1,60. A vazão média de filtração foi de 16 mL/min (correspondente a uma taxa média

de filtração de 80 m³/m².d) e a coleta se deu para o tempo médio de filtração de 20 min, contado depois de decorrido o tempo de decantação correspondente à velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min. A filtração durante 20 min se faz necessária para que ocorra a renovação da água dentro

dos filtros, pois a água de lavagem (retrolavagem) se faz com água de torneira.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A água de estudo foi caracterizada logo após sua coleta, sendo obtidos os valores apresentados na Tabela 2, como parâmetros de interesse deste estudo.

Tabela 2. Caracterização da água bruta.

Parâmetro	Valor
Turbidez (NTU)	102
Cor aparente (uH)	846
Temperatura (°C)	25,8
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	18,62
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	13
Alumínio total (mg/L)	0,11
Cloreto (mg/L)	4,95
Sólidos suspensos totais (mg/L)	59
Sólidos suspensos fixos (mg/L)	44
Sólidos suspensos voláteis (mg/L)	15
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	106
Sólidos dissolvidos fixos (mg/L)	13
Sólidos dissolvidos voláteis (mg/L)	93
Sólidos totais (mg/L)	165

Esta pode ser considerada uma água típica do período chuvoso de acordo com série histórica da SABESP de SJ, pois em seus registros a turbidez média da água bruta neste período é de aproximadamente 100 NTU, com picos de cerca de 400 NTU.

Nas Figuras 1, 2 e 3, encontram-se os diagramas de coagulação, elaborados com o uso do sulfato de alumínio como coagulante, para análise da remoção de turbidez da água decantada (NTU), nas

velocidades de sedimentação de 3,0 cm/min, 1,5 cm/min e 0,5 cm/min, respectivamente. Nos diagramas de coagulação o eixo das abscissas apresenta os valores do pH de coagulação, enquanto o das ordenadas apresenta à esquerda a dosagem do coagulante (produto comercial) e à direita sua respectiva dosagem de Al⁺³.

Nota-se na Figura 1, com o sulfato de alumínio como coagulante, duas regiões com eficiência de remoção de turbidez

superior a 60%. A primeira região encontra-se em valores de pH de coagulação abaixo de 5 e dosagem de coagulante a partir de 30 mg/L (corresponde à dosagem de Al^{+3} de 1,4 mg/L), enquanto a segunda região encontra-se em uma faixa mais alta de pH de coagulação, compreendida entre 6,75 e 7,3 e dosagem de coagulante a partir de 50 mg/L (2,34 mg Al^{+3} /L).

A formação destas duas regiões pode ser explicada por meio de clássicas interpretações científicas, que mencionam a existência de dois mecanismos de coagulação predominantes envolvendo íons metálicos, o de ‘adsorção e neutralização de cargas’ e o da ‘varredura’.

O primeiro mecanismo ocorre em valores de pH mais baixos com o coagulante apresentando-se em sua forma catiônica, e o segundo mecanismo em valores de pH mais elevados e maiores dosagens de coagulante, o qual precipita como hidróxido metálico (DUAN e GREGORY, 2003). Dependendo da natureza da água e das propriedades dos colóides, o desempenho da coagulação poderá variar consideravelmente.

Portanto, assume-se que na primeira região formada neste estudo o mecanismo de coagulação de adsorção e neutralização de cargas foi predominante, ao passo que na segunda região o mecanismo da varredura predominou.

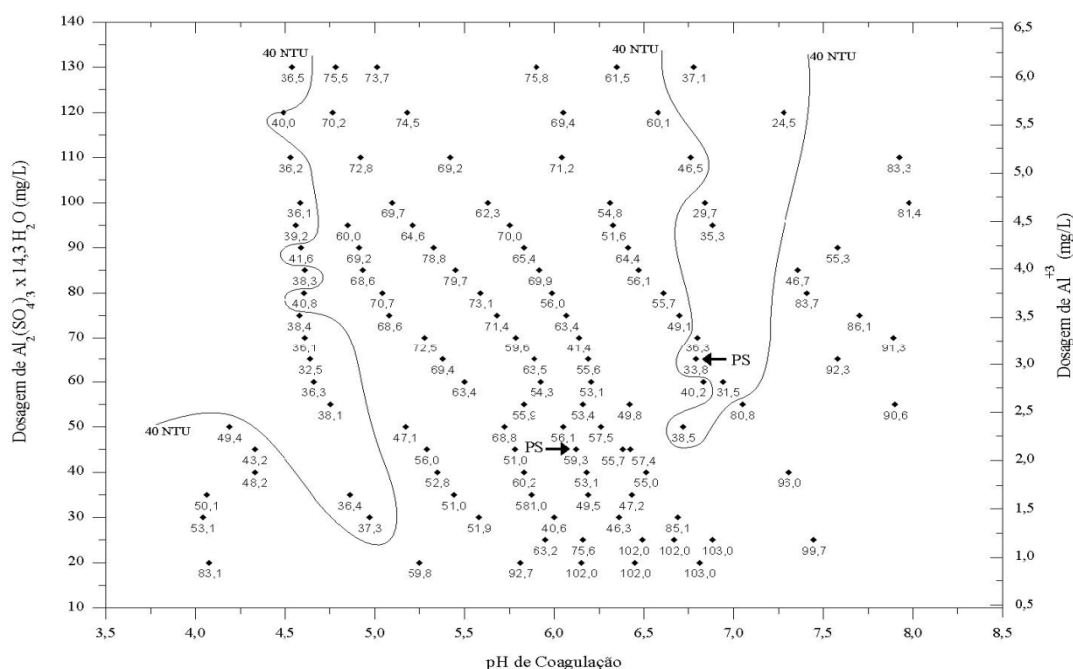


Figura 1. Diagrama de coagulação contendo as curvas de mesma turbidez remanescente (NTU) em função da dosagem de Sulfato de Alumínio x pH de coagulação ($V_s = 3,0$ cm/min). Nota: PS = Ponto Selecionado.

Na Figura 2, observa-se valores de turbidez remanescente abaixo de 15 NTU para a velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min, sendo o menor resultado (7,7 NTU) atribuído ao par de valores 'dosagem de coagulante 130 mg/L (correspondente a 6,09 mg Al³⁺/L) e pH de coagulação de 6,78', com adição de 24 mg/L de alcalinizante. Pode-se dizer que esta alta dosagem de coagulante é impraticável na rotina operacional de uma ETA, tanto pelo alto custo de produção, devido à elevada dosagem de coagulante requerida no tratamento e consequentemente à elevada produção de lodo, quanto ao espaço físico necessário para o armazenamento dos produtos químicos. Porém não se pode afirmar que exista um limite operacional, pois se somente esta dosagem de coagulante levar a resultados satisfatórios e não houver tecnologia e produto químico que faça com que esta dosagem seja diminuída, a ETA terá que se adequar a nova realidade de tratamento.

O par de valores em que se atingiu o menor valor de turbidez remanescente, mas sem a adição de qualquer agente alcalinizante ou acidificante (Figura 2) foi para dosagem de 45 mg/L (2,1 mg Al³⁺/L) de sulfato de alumínio e pH de 6,12, atingindo valor de 16,2 NTU.

Observa-se na Figura 3 que para o uso do sulfato de alumínio como coagulante, somente na velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min é que se obtiveram valores de turbidez remanescente abaixo de 5,0 NTU, valor máximo recomendado por Di Bernardo; Dantas (2005) para a água decantada, com o objetivo de prolongar a duração das carreiras de filtração. Assim, para a adoção do sulfato de alumínio como coagulante, para a água em estudo e nas condições em que os ensaios foram realizados, é imprescindível a adição de polímero como auxiliar de floculação, caso contrário, seriam necessários decantadores de maior dimensão, o que muitas vezes inviabiliza a instalação de novas ETAs em grandes centros urbanos.

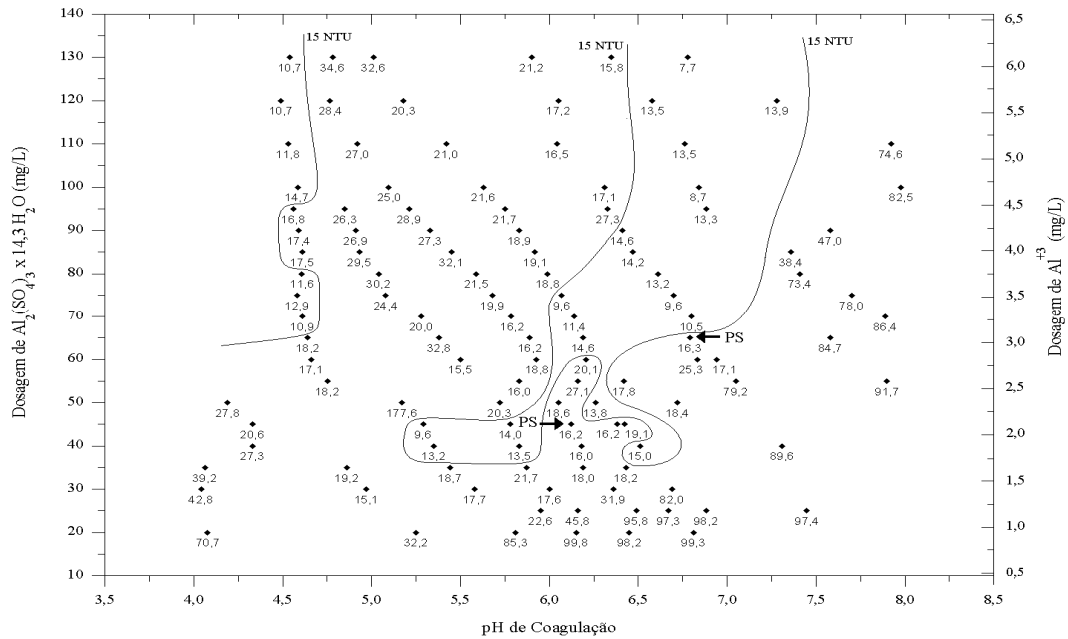


Figura 2. Diagrama de coagulação contendo as curvas de mesma turbidez remanescente (NTU) em função da dosagem de Sulfato de Alumínio x pH de coagulação ($V_s = 1,5$ cm/min).

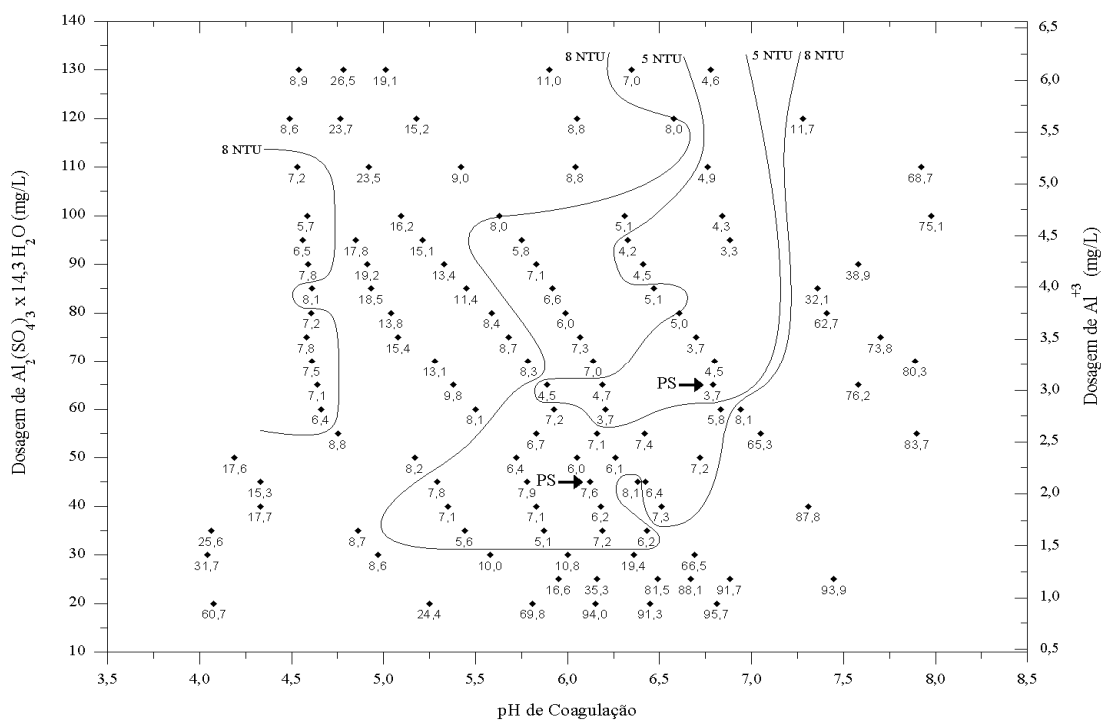


Figura 3. Diagrama de coagulação contendo as curvas de mesma turbidez remanescente (NTU) em função da dosagem de Sulfato de Alumínio x pH de coagulação ($V_s = 0,5$ cm/min).

A região em que se observa diversos valores de turbidez remanescente abaixo de 5 NTU (Figura 3) encontra-se com dosagens de coagulante a partir de 60 mg/L

(correspondente à dosagem de Al^{+3} de 2,81 mg/L) e valores do pH de coagulação entre 5,89 e 6,88. O menor valor de turbidez remanescente (3,3 NTU) está atribuído ao

par de valores dosagem do produto comercial de 95 mg/L (4,45 mg Al^{+3} /L) e pH de coagulação 6,88, com adição de 18 mg/L de alcalinizante.

Após a análise das Figuras 1, 2 e 3, foi selecionado dois pares de valores 'dosagem de coagulante versus pH de coagulação', para dar continuidade aos estudos. O primeiro par de valores selecionado corresponde à dosagem de 45 mg/L de coagulante (2,1 mg Al^{+3} /L) e pH de coagulação de 6,12. Este ponto está relacionado à menor dosagem de coagulante na qual se obteve o menor valor de turbidez remanescente para a velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min (Figura 2), sem a adição de alcalinizante ou acidificante. Foi escolhida a velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min (correspondente a uma taxa de escoamento superficial, TES, de 21,6 $m^3/m^2.d$), por ser esta, na prática, uma velocidade de sedimentação comumente adotada e que resulta em decantadores de dimensões plausíveis.

O segundo par de valores selecionado corresponde à menor dosagem de coagulante (sulfato de alumínio) em que se obteve turbidez remanescente abaixo de 4 NTU, em pH semelhante ao da água bruta (6,8). Isto foi obtido com dosagem de produto comercial de 65 mg/L (3,04 mg Al^{+3} /L) em pH de 6,79, com adição de 12

mg/L de alcalinizante, resultando em turbidez de 3,7 NTU.

As Figuras 4, 5 e 6 trazem os diagramas de coagulação para o PAC, para as velocidades de sedimentação de 3,0 cm/min, 1,5 cm/min e 0,5 cm/min, respectivamente. Observa-se nos diagramas elaborados com o uso do PAC como coagulante, a nítida formação de duas regiões distintas com valores de turbidez remanescente abaixo de 50 NTU, regiões estas já observadas nas Figuras 1, 2 e 3 para o sulfato de alumínio. Contudo, para o PAC observa-se eficiências de remoção que podem ser consideradas satisfatórias para valores de pH de coagulação próximos a 9,8, o que pode ser interessante na remoção de contaminantes específicos, favorecendo, por exemplo, a precipitação de metais.

No diagrama elaborado com velocidade de sedimentação de 3,0 cm/min (Figura 4), o menor valor de turbidez remanescente obtido foi de 37,1 NTU (contra 24,5 NTU para o sulfato de alumínio), com a adição de 65 mg/L de PAC (produto comercial), 4,08 mg Al^{+3} /L, 12 mg/L de alcalinizante, resultando em pH de coagulação de 8,35.

Ao observar a Figura 5, nota-se que para a velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min, a menor turbidez remanescente obtida com o uso do PAC foi de 8,27 NTU,

com dosagem do produto comercial de 65 mg/L (4,08 mg Al³⁺/L) e 12 mg/L de alcalinizante. Assim como para o sulfato de alumínio (Figura 2), para o PAC com velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min

não se obteve turbidez remanescente abaixo de 5 NTU (para a água em estudo, nas condições em que os experimentos foram realizados).

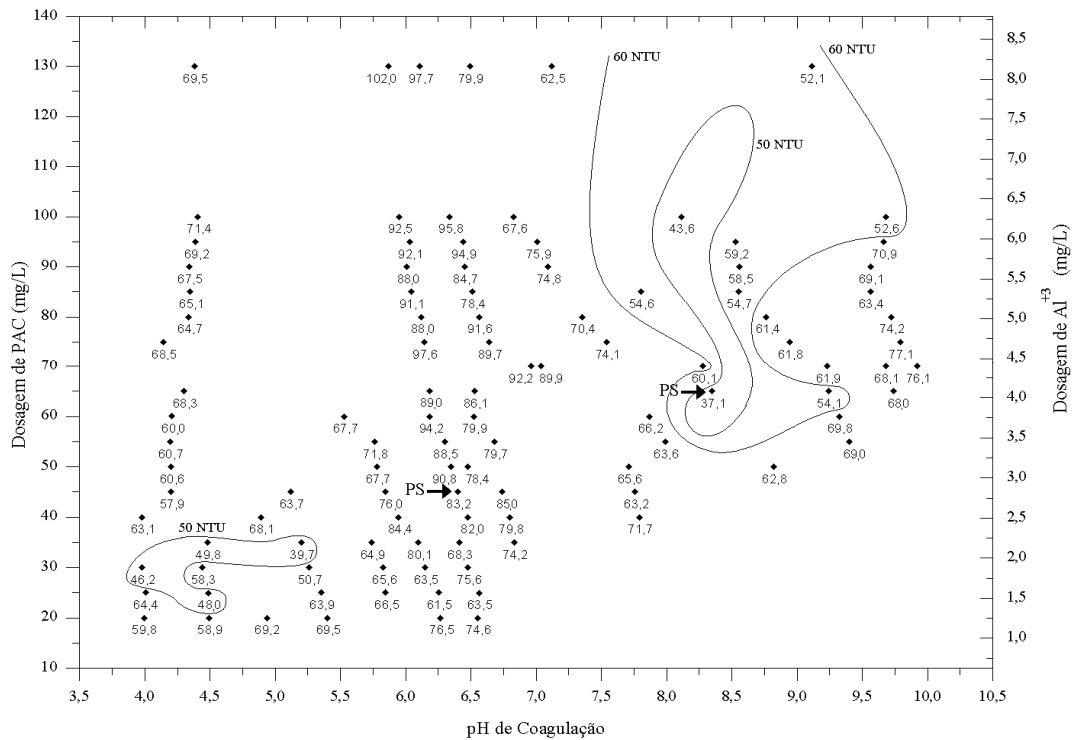


Figura 4. Diagrama de coagulação contendo as curvas de mesma turbidez remanescente (NTU) em função da dosagem de PAC x pH de coagulação ($V_s = 3,0$ cm/min).

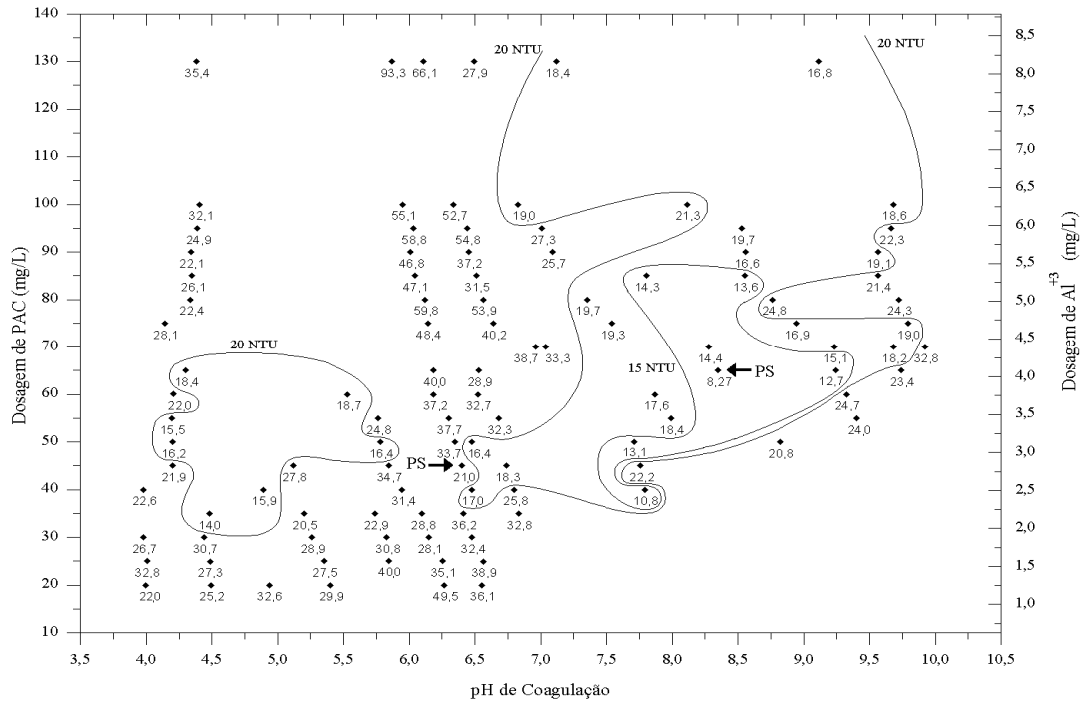


Figura 5. Diagrama de coagulação contendo as curvas de mesma turbidez remanescente (NTU) em função da dosagem de PAC x pH de coagulação ($V_s = 1,5$ cm/min).

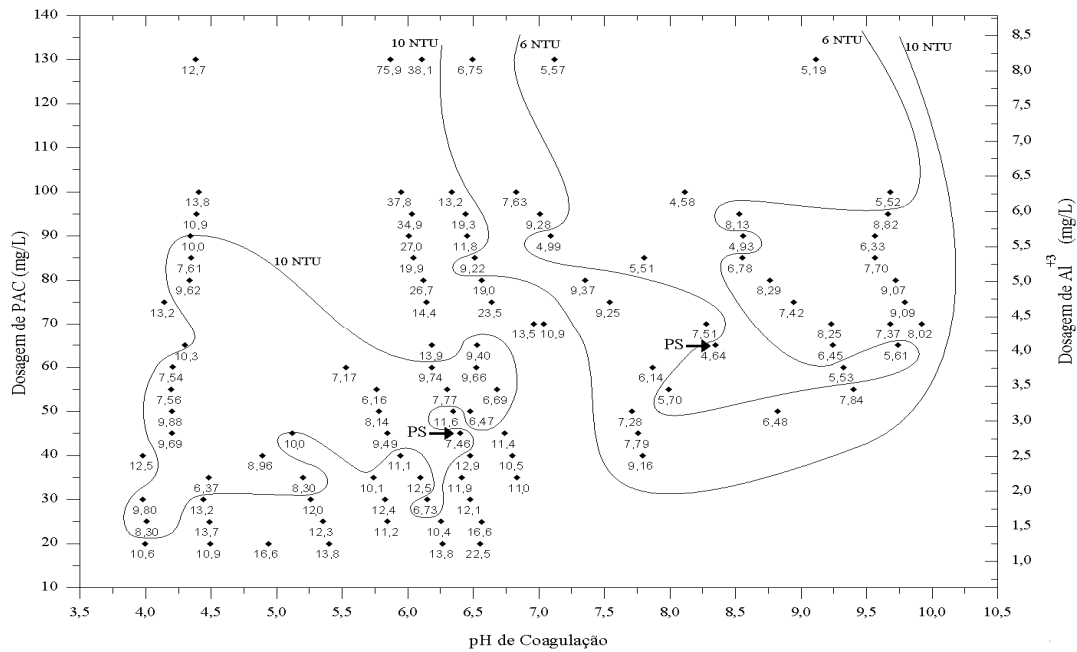


Figura 6. Diagrama de coagulação contendo as curvas de mesma turbidez remanescente (NTU) em função da dosagem de PAC x pH de coagulação ($V_s = 0,5$ cm/min).

Observa-se no diagrama elaborado para o PAC com velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min (Figura 6), que foram obtidos apenas quatro pares de

valores que resultaram em turbidez remanescente abaixo de 5 NTU, conforme recomenda Di Bernardo e Dantas (2005), diferentemente do observado no diagrama

elaborado com o sulfato de alumínio como coagulante, para a mesma velocidade de sedimentação (Figura 3). Pode-se assumir que nessas condições o sulfato de alumínio se mostrou mais eficiente na remoção de turbidez da água.

Nos diagramas apresentados nas Figuras 4, 5 e 6 foram selecionados dois pares de valores 'dosagem de coagulante versus pH de coagulação'. O primeiro par selecionado corresponde à menor dosagem de PAC em que se obteve turbidez abaixo de 10 NTU, sem a adição de qualquer produto químico para a correção do pH (alcalinizante e acidificante) (Figura 6). Isto foi obtido com dosagem do produto comercial de 45 mg/L (2,82 mg Al^{+3} /L) em pH de 6,4.

O segundo par de valores selecionado possui dosagem de 65 mg/L de coagulante (que corresponde a 4,08 mg Al^{+3} /L), 12 mg/L de alcalinizante e pH de coagulação de 8,35. Este ponto está relacionado ao menor valor de turbidez medido para a velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min (Figura 5).

Após detalhada análise das Figuras 1 a 6, nota-se que o sulfato de alumínio, na remoção de turbidez para a água em estudo e nas condições nas quais os ensaios foram realizados, apresentou os menores valores de turbidez remanescente para as três velocidades de sedimentação (3,0 cm/min,

1,5 cm/min e 0,5 cm/min) estudadas. Assim, visando exclusivamente à remoção de turbidez (principal parâmetro operacional de ETAs), o sulfato de alumínio mostrou-se mais eficiente que o PAC.

Caso seja utilizado o sulfato de alumínio, nas condições estudadas, ele conduziria a menores custos de produção, haja vista que iria requerer dosagem de coagulante menor em comparação à dosagem requerida pelo PAC para se atingir os mesmos valores de turbidez remanescente na água decantada, conforme pode ser visto nos pontos selecionados (PS) para a velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min (Figuras 3 e 6). Tanto para a menor como para a maior dosagem selecionada para ambos os coagulantes (menor dosagem: 2,1 mg Al^{+3} /L para o sulfato de alumínio e 2,82 mg Al^{+3} /L para o PAC; ambos sem adição de alcalinizante e acidificante) e (maior dosagem: 3,04 mg Al^{+3} /L para o sulfato de alumínio e 4,08 mg Al^{+3} /L para o PAC; ambos com 12 mg NaOH/L), o PAC requereu uma dosagem de alumínio aproximadamente 34% maior (em massa). Além do custo do produto químico, isto impactaria significativamente na geração de lodo e, conseqüentemente, acarretaria maiores custos para tratamento e disposição final dos resíduos gerados.

A vantagem do uso do sulfato de alumínio como coagulante pode ser confirmada pelo preço comercial dos coagulantes, que segundo valores fornecidos pela SABESP SJC (referentes aos meses de janeiro a julho de 2011), o kg do sulfato de alumínio custou em média R\$ 0,364, enquanto o do PAC chegou a R\$ 0,70, ou seja, quase o dobro do valor.

Nos ensaios realizados, acredita-se que o mecanismo de coagulação predominante foi o da varredura, conduzindo a flocos de determinado tamanho e massa específica, capazes de sedimentar relativamente rápido.

A sedimentabilidade dos flocos, conforme pode ser visto nos diagramas apresentados (Figuras de 1 a 6), dependeu diretamente do tempo programado para a coleta das amostras, tempo este relacionado à velocidade de sedimentação adotada. Para os dois coagulantes testados (sulfato de alumínio e PAC), à medida que se diminuiu a velocidade de sedimentação, a turbidez remanescente também diminuiu (conforme esperado). Apesar da menor velocidade de sedimentação empregada neste estudo, 0,5 cm/min (taxa de aplicação superficial de 7,2 m³/m².d), proporcionar os menores valores de turbidez remanescentes medidos, ela não representa um valor usual de projeto, pois iria requerer grandes áreas para construção

dos decantadores, tornando-se um dos fatores limitantes para o projeto de ETAs, principalmente em áreas extremamente urbanizadas, como ocorre em SJC. Assim, as dosagens selecionadas para os dois coagulantes estudados, e que foram utilizadas nas etapas seguintes deste trabalho, encontram-se preferencialmente nos diagramas de coagulação com velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min (21,6 m³/m².d).

Depois de selecionados os dois pares de valores 'dosagem de coagulante versus pH de coagulação', para cada um dos coagulantes (sulfato de alumínio e PAC), dosou-se 4,68 mg/L de hipoclorito de sódio, 15 s antes da adição do coagulante, com a finalidade de se promover uma etapa pré-oxidativa, buscando-se um residual de cloro na água decantada de 0,8 mg/L, conforme ocorre na ETA de SJC.

Em seguida, já com a adição do hipoclorito de sódio na água, avaliou-se a influência da dosagem de polímero catiônico, como auxiliar de floculação, na remoção de turbidez para ambos os coagulantes (sulfato de alumínio e PAC). Os resultados destes ensaios estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Após observações durante a realização dos ensaios com a adição de polímero catiônico (mesmo empregado na ETA de SJC) e detalhada análise dos

resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, foi selecionada uma dosagem de polímero para cada coagulante.

O critério de seleção das dosagens de polímero, primeiramente, foi a utilização das menores dosagens de coagulante, ou seja, tanto para o sulfato de alumínio, como para o PAC, foi levado em consideração os valores de turbidez obtidos para a dosagem de 45 mg/L de coagulante.

O segundo critério de seleção foi adotar a menor dosagem de polímero, que resultasse em valores satisfatórios de remoção de turbidez, sem, contudo, que houvesse deposição de flocos durante a realização da etapa de floculação. Portanto, as dosagens selecionadas de polímero, para os dois coagulantes (sulfato de alumínio e PAC; ambos com 45 mg/L) foi de 0,6 mg/L. Embora outras dosagens tenham conduzido a eficiências de remoção ainda

maiores, optou-se por este critério por apresentar a melhor relação benefício/custo.

Com as dosagens selecionadas de coagulante, hipoclorito de sódio e polímero foi realizada a otimização dos parâmetros físicos de mistura rápida, floculação e decantação (FERRARI, *et al.*, 2011).

Para a utilização de ambos os coagulantes, sulfato de alumínio e PAC, as três dosagens selecionadas de produtos químicos são iguais: 45 mg/L de coagulante (produto comercial); 4,68 mg/L de hipoclorito de sódio; 0,6 mg/L de polímero (poliacrilamida); sem a necessidade de alcalinizante e acidificante (o que facilita sobremaneira a rotina operacional).

Tabela 3. Resultados dos ensaios com o sulfato de alumínio como coagulante empregando 4,68 mg/L de hipoclorito de sódio e diferentes dosagens de polímero para V_s de 1,5 cm/min.

Coagulante	Polímero (mg/L)	pH coagulação	Turbidez (NTU)
Sulfato de Alumínio 45 mg/L	0	6,54	9,31
	0,2	6,55	4,69
	0,4	6,53	4,39
	0,6	6,54	3,88
	0,8	6,57	3,32
	1,0	6,56	2,94
Sulfato de Alumínio 65 mg/L	0	7,01	6,57
	0,2	7,02	6,16
	0,4	7,02	4,02
	0,6	7,02	4,42
	0,8	7,0	2,98
	1,0	7,04	2,67

Tabela 4. Resultados dos ensaios com o PAC como coagulante empregando 4,68 mg/L de hipoclorito de sódio e diferentes dosagens de polímero para V_s de 1,5 cm/min.

Coagulante	Polímero (mg/L)	pH coagulação	Turbidez (NTU)
PAC 45 mg/L	0	6,87	34,9
	0,2	6,86	9,52
	0,4	6,8	9,8
	0,6	6,76	7,94
	0,8	6,76	4,86
	1,0	6,8	7,48
PAC 65 mg/L	0	8,54	24,2
	0,2	8,55	10,7
	0,4	8,62	9,37
	0,6	8,6	3,32
	0,8	8,66	3,21
	1,0	8,67	2,56

Finalizada a otimização dos parâmetros físicos, foram realizados novos ensaios simulando o tratamento da água em ciclo completo, sendo apresentados em réplica na Tabela 5, os valores obtidos de turbidez remanescente para a água decantada ($V_s = 1,5$ cm/min) e filtrada.

Observa-se na Tabela 5, que o sulfato de alumínio apresentou os menores valores de turbidez remanescente para a água decantada com velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min. Já para a água filtrada, os melhores resultados se deram com a utilização do PAC como coagulante (0,96 e 0,97 NTU), atendendo assim à Portaria n° 518/2004, que estabelece valor máximo de turbidez de 1,0 NTU para a água filtrada. Os valores de turbidez na água filtrada podem ser considerados elevados, pois embora o

padrão de potabilidade brasileiro estabeleça como valor máximo 1,0 NTU, recomenda que seja de até 0,5 NTU. Este fato chamou a atenção dos autores, pois a ETA de SJC (escala real), que emprega o mesmo sulfato de alumínio empregado nesta pesquisa, obtêm como valor de turbidez da água filtrada, consistentemente, valores em torno de 0,3 NTU. Como a areia cedida para a realização destes ensaios (supostamente a mesma empregada nos filtros da ETA) estava armazenada há muito tempo, suspeita-se que pode ter ocorrido algum problema de armazenagem, mistura com outro tipo de areia (de construção, por exemplo), dentre outros. Desta forma, para a continuidade dos trabalhos (coleta de água bruta no período de seca) a areia será trocada e ensaiada (caracterizada) nos laboratórios do ITA.

Tabela 5. Resultados dos ensaios simulando o tratamento da água em ciclo completo para a velocidade de sedimentação de 1,5 cm/min.

Coagulante	Dosagem (mg/L)	NaClO (mg/L)	Polímero (mg/L)	pH coag	Turbidez (NTU)	
					Decantada	Filtrada
Sulfato de Alumínio	45	4,68	0,6	6,54	2,54	1,46
	45	4,68	0,6	6,54	3,35	1,44
PAC	45	4,68	0,6	6,82	4,83	0,96
	45	4,68	0,6	6,81	7,74	0,97

Após a simulação das etapas de mistura rápida, floculação, decantação e filtração, foi adicionado, novamente o hipoclorito de sódio, mas agora com a função de desinfetante, com a finalidade de gerar um residual de cloro na água filtrada de 1,8 mg/L (da mesma forma que é feito na ETA de SJC).

Na água final (filtrada e desinfetada) foi medida a cor aparente para os dois coagulantes estudados, sulfato de alumínio e PAC, apresentando os respectivos resultados: 11 uH; e 16 uH. Somente a água em que se utilizou o sulfato de alumínio como coagulante, encontra-se com cor abaixo do valor máximo permitido (15 uH), de acordo com o padrão de potabilidade (Portaria nº 518/2004) atualmente vigente.

Na água final também foi medida a concentração de alumínio total para o sulfato de alumínio e para o PAC, sendo encontrada a mesma concentração final de alumínio (0,05 mg/L) para os dois coagulantes. De acordo com a Portaria nº 518/2004, a concentração de alumínio encontrada nas amostras (0,05 mg/L), encontra-se abaixo do valor máximo permitido (0,2 mg/L) para água de abastecimento.

Outra análise realizada na água final foi concentração de THM. A primeira amostra em que foi realizada a análise de THM foi coletada 30 min após a adição de hipoclorito de sódio como desinfetante, obtendo concentração de 0,015 mg/L para o sulfato de alumínio e 0,018 mg/L para o PAC. A segunda amostra em que se realizou a análise de THM foi coletada 8 h após a adição de hipoclorito, pois a formação de THM é lenta e o tempo médio de distribuição da água após o tratamento em SJC é de aproximadamente 8 h. A concentração de THM encontrada para o sulfato de alumínio foi de 0,026 e para o PAC foi de 0,029 mg/L. Foi medida também a concentração de THM na água bruta, sendo encontrada concentração menor que o limite de detecção do método (0,001 mg/L). Portanto, todas as amostras encontram-se com concentrações abaixo do valor máximo permitido de THM para a água de abastecimento (0,1 mg/L), apresentando o sulfato de alumínio pequena vantagem (menores concentrações) em relação ao PAC.

4. CONCLUSÕES

Após análise dos diagramas de coagulação elaborados para os dois coagulantes

a base alumínio, concluiu-se que o sulfato de alumínio foi mais eficiente que o PAC na remoção de turbidez da água decantada para as três velocidades de sedimentação estudadas (3,0; 1,5; e 0,5 cm/min). Apesar das dosagens selecionadas do produto comercial para os dois coagulantes serem a mesma (45 mg/L), o PAC (2,82 mg Al^{+3}/L) requereu dosagem de alumínio 34% maior (em massa) do que o sulfato de alumínio (2,1 mg Al^{+3}/L). Além do custo do produto químico (coagulante), isto impactaria significativamente na geração de lodo e, conseqüentemente, acarretaria maiores custos para tratamento e disposição final dos resíduos gerados.

Nos ensaios realizados com a adição do polímero catiônico, o uso do sulfato de alumínio também merece destaque, pois para todas as dosagens de polímero estudadas, a água decantada apresentou turbidez menor que 5,0 NTU e, em alguns casos, menor que 3,0 NTU, o que proporcionaria uma maior duração das carreiras de filtração e maior produção efetiva de água na ETA.

Após tratamento em ciclo completo, os valores de turbidez na água filtrada utilizando-se o PAC como coagulante foram menores e atingiu valores abaixo do máximo estabelecido (1,0 NTU) para turbidez na água filtrada, conforme estabelece a Portaria nº 518/2004.

Para as análises de THM e cor aparente na água filtrada, novamente o sulfato de

alumínio se destaca, conduzindo a menores valores em relação aos obtidos com o uso PAC.

Pode-se concluir que o uso do sulfato de alumínio durante o decorrer do estudo, nas condições em que foi realizado, apresentou, em geral, melhor desempenho de remoção de turbidez da água decantada, se comparado com os resultados apresentados pelo PAC. Diz-se em geral, pois em todas as etapas que antecedem o tratamento em ciclo completo, mais especificamente a etapa de filtração, o sulfato de alumínio apresentou melhores resultados, além de menores custos de produção.

Porém depois de submetida à água ao tratamento em ciclo completo, somente o PAC apresentou valores de turbidez um pouco abaixo do valor máximo permitido (1,0 NTU). No entanto, devido aos resultados incoerentes apresentados após a água ser submetida à filtração, ou seja, elevados valores de turbidez (com o PAC apresentando valores muito próximos ao máximo permitido), a areia utilizada nos filtros foi substituída para a realização de ensaios subseqüentes.

5. AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado. Os autores agradecem à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e seus funcionários pelo apoio, pelos

equipamentos, pelos produtos químicos fornecidos e pelas análises realizadas. Os autores também agradecem à empresa Nova Ética, por ter cedido o equipamento Jar Test e o kit de filtros.

6. REFERÊNCIAS

- AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K.M. Rapid-Mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation. **Journal AWWA**, v. 74, n. 4, p.200-216, 1982.
- ARBOLEDA VALENCIA, J. **Teoría y práctica de la purificación del agua**. 3ª ed. Colômbia: ACODAL, McGraw-Hill, 2000. p.793.
- BENHAMIMED, E. A.; MOULESSEHOUL, S. L'hyperchloration de l'eau de robinet et cancer de la vessie dans la region de Mostaganem (Ouest algérien). **J. Afr. Cancer**, v. 2, n. 1, p.20-24, 2009.
- DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P.L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: RiMA, 2002. p.237.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2ª ed. São Carlos: RiMA, 2v, 2005. p.1565.
- DUAN, J.; GREGORY, J. Coagulation by hydrolysing metal salts. **Adv. Colloid Interface Sci.**, 100-102, p.475-502, 2003.
- EATON, A.D.; CLESCERI, L.S.; RICE, E.W.; GREENBERG, A.E. (ed.). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21ª ed. USA: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, 2005. p.1368.
- EDZWALD, J.K. (ed.) **Water quality & treatment – A handbook on drinking water**. 6ª ed. USA: American Water Works Association and McGraw-Hill, 2011. p.1429.
- FERRARI, T.N.; DE JULIO, T.S.; DE JULIO, M. **Avaliação da influência dos parâmetros de mistura rápida, floculação e decantação no tratamento da água bruta afluyente à ETA do município de São José dos Campos/SP**. In: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011, Porto Alegre. Anais...Porto Alegre: CBESA, 2011.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB 2008**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>.
- Acesso em: 7 de mar. de 2011.
- KASIM, K.; LEVALLOIS, P.; JOHNSON, K.C.; ABDOUS, B.; AUGER, P. Chlorination disinfection by-products in drinking water and the risk of adult leukemia in Canada. **American Journal of Epidemiology**, v.163, n.2, p.116-126, 2005.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria nº 518 de 25 de Março de 2004.
- QASIM, S.R.; MOTLEY, E.M.; ZHU, G. **Water works engineering: planning, design & operation**. Prentice Hall PTR, 2000. p.844.
- VILLANUEVA, C.M.; CANTOR, K.P.; GRIMALT, J.O.; MALATS, N.; SILVERMAN, D.; TARDON, A.; GARCIA-CLOSAS, R.; SERRA, C.; CARRATO, A.; CASTAÑO-VINYALS, G.; MARCOS, R.; ROTHMAN, N.; REAL, F.X.; DOSEMECI, M.; KOGEVINAS, M. Bladder câncer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing, showering, and swimming in pools. **American Journal of Epidemiology**, v.165, n.2, p.148-156, 2006.