



I-386 - EMPREGO DA OTIMIZAÇÃO MULTIVARIADA NA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE COAGULANTES METÁLICOS E DE AUXILIAR DE FLOCULAÇÃO

Solange Mucha⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO). Mestranda em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Helio Rodrigues dos Santos⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO).

Jeanette Beber de Souza⁽³⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto. Mestre e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO).

Endereço⁽¹⁾: Rua São Paulo, 1498, Ap. 301 - Centro – São Carlos - SP - CEP: 13560-340 - Brasil - Tel: (16) 3371 - 2415 - e-mail: smucka@sc.usp.br

RESUMO

Muitas estações de tratamento de água (ETAs) existentes no Brasil produzem água com qualidade inferior ao desejável. Outras ainda, encontram-se trabalhando acima da sua capacidade nominal. Devido a isso, estudos que visem investigar as condições de tratamento mais adequadas para cada tipo de água são de extrema importância, pois através destes estudos é possível proporcionar uma maior eficiência e redução de custos com o tratamento. Sendo assim, a proposta deste trabalho foi avaliar, através de ensaios em *jar-test* o desempenho do cloreto férrico e do sulfato de alumínio como coagulantes e o emprego do amido de batata como auxiliar de floculação no tratamento de água com turbidez intermediária (aproximadamente 30 a 75 NTU), utilizando otimização multivariada para o planejamento dos ensaios e análise de resultados. A pesquisa experimental foi dividida em duas fases. Primeiramente foi realizada uma etapa de ensaios com o intuito de verificar qual dos coagulantes empregados se mostraria mais eficiente, e também selecionar as variáveis operacionais mais importantes na remoção da turbidez. Posteriormente, com as condições operacionais “ótimas” selecionadas foi avaliado o emprego do coagulante mais eficiente combinado ao amido de batata. Os resultados obtidos durante a fase experimental indicaram o cloreto férrico como o melhor coagulante para a água em questão. Além disso, a utilização deste coagulante aliado ao amido de batata como auxiliar de floculação forneceu excelentes resultados, principalmente pelo fato da aplicação do amido de batata ter proporcionado uma significativa melhora na qualidade da água decantada para taxas de aplicação superficial mais elevadas, o que é bastante importante para ETAs que trabalham com capacidade acima do limite. Quanto à aplicação da otimização multivariada, constatou-se que esta se apresenta como uma ferramenta eficiente na definição das melhores condições operacionais, pois possibilitou o ajuste dos parâmetros que conduziram a resultados satisfatórios (turbidez em torno de 2 NTU), com reduzido número de ensaios.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização Multivariada, Planejamento Experimental, Amido de Batata, Coagulantes Metálicos, Tratamento de Água.

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que ainda enfrenta grandes dificuldades no que se refere ao atendimento da população com os serviços de saneamento básico, dentre os quais se inclui o tratamento de água. Muitas regiões do país não têm acesso ao abastecimento de água potável, fato que torna de fundamental importância a realização de investimentos na construção e ampliação de estações de tratamento de água (ETAs), de maneira que o fornecimento de água com qualidade seja assegurado. Além disso, nos últimos tempos tem se constatado o aumento na demanda por água tratada, que aliado à sensível piora da qualidade das águas de muitos mananciais, conduz à necessidade do funcionamento eficaz das estações, tanto do ponto de vista técnico, quanto econômico.



De acordo com Parsekian (1998), o tratamento mais utilizado nas estações brasileiras é o de ciclo completo ou convencional, que se constitui basicamente de cinco etapas: coagulação, floculação, sedimentação ou flotação, filtração e desinfecção. O *jar-test* simula três destas unidades: a coagulação, floculação e sedimentação. Sendo assim, através destes ensaios torna-se possível determinar diversos parâmetros importantes relacionados com estas etapas do tratamento, como o tipo de coagulante mais adequado e suas dosagens ótimas, o pH de coagulação, as dosagens de auxiliares de floculação, tempo de agitação e gradiente médio de velocidade na floculação, dentre outros parâmetros operacionais, de maneira que as informações obtidas possam ser aplicadas na ETA (AZEVEDO NETTO et al. 1987). Entretanto, do modo como são realizadas na maioria das vezes, estas investigações experimentais são bastante trabalhosas e requerem a realização de um número elevado de ensaios em *jar-test*, até que as condições operacionais mais apropriadas possam ser identificadas, sendo que, em muitos casos, os dados obtidos podem não corresponder às condições que levam ao ótimo verdadeiro.

Para Zamora et al. (2005) uma das etapas mais críticas de um trabalho de pesquisa científica está na otimização dos parâmetros experimentais que sejam realmente relevantes, uma vez que o pesquisador se depara com questões difíceis de serem definidas inicialmente, tais como: a escolha das variáveis relevantes, quais os valores destas que devem ser ensaiados, qual a melhor resposta a ser analisada e principalmente, como desenvolver um trabalho de otimização com o mínimo de trabalho experimental. Na maioria dos casos, os estudos são desenvolvidos com base em dados obtidos em pesquisas anteriores. No entanto, para o caso específico de ensaios em *jar-test*, nos quais se buscam os parâmetros que proporcionem a melhor remoção possível de turbidez, dados anteriores relativos a estudos de uma determinada água podem não conduzir a bons resultados em outra situação, devido às particularidades de cada tipo de água. Sendo assim, com o intuito de facilitar e principalmente aprimorar o desenvolvimento das pesquisas em laboratório, a otimização multivariada aplicada para o planejamento de ensaios, pode ser utilizada como uma importante ferramenta que poderá auxiliar na definição das melhores respostas de maneira mais prática, rápida e principalmente mais eficiente.

Os sistemas multivariados de otimização têm sido cada vez mais usados em diversas áreas de pesquisa/aplicação, pois através dos procedimentos multivariados de otimização torna-se possível realizar planejamentos experimentais em que todas as variáveis ou fatores variam ao mesmo tempo, de maneira que se torna possível extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, a partir de um número mínimo de experimentos (BARROS NETO et al. 2003).

Utilização de sistemas de planejamento fatorial em ensaios em *jar-test*

Um dos principais objetivos dos ensaios de jarros (*jar-test*) é o de encontrar, através de simulações em laboratório, as melhores condições de coagulação, floculação e sedimentação, que proporcionem a melhor remoção de turbidez ou cor da água bruta de estudo. Ou seja, o resultado (resposta) de maior interesse é a menor turbidez ou cor possível (BARROS NETO et al. 2003).

Para identificar a melhor resposta possível, o que se faz na maioria dos casos é fixar um dos fatores num certo nível, enquanto o outro é variado até se descobrir o nível desse outro fator que produz o melhor rendimento. Depois, mantendo esse fator no nível ótimo encontrado, o nível do primeiro fator, que tinha sido anteriormente fixado, é variado novamente, até descobrir o valor dele que também produz um rendimento máximo. Este tipo de experimento é denominado univariado (BARROS NETO et al. 2003).

No entanto, segundo Barros Neto et al. (2003) este não é o melhor método para conseguir a melhor resposta, mas sim variando-se todos os fatores ao mesmo tempo. A razão para isso é que as variáveis podem se influenciar mutuamente, e o valor ideal para uma delas pode depender do valor da outra. Esse comportamento é chamado de interação entre os fatores e é um fenômeno que ocorre com muita frequência, pois raras são as situações em que dois fatores atuam de forma realmente independente.

A Figura 1 ilustra a situação ocorrida em um ensaio em *jar-test*, na qual certo número de fatores atua sobre o sistema em estudo, produzindo a resposta. O sistema atua como uma função desconhecida, que opera sobre as variáveis de entrada (os fatores) e produz como saída a resposta observada (por exemplo, turbidez). Por meio da realização de experimentos busca-se descobrir esta função, ou pelo menos obter uma aproximação



satisfatória para ela. Com esse conhecimento é possível entender melhor a natureza do sistema em estudo, e assim definir as melhores condições de operação deste sistema. (BARROS NETO et al. 2003).

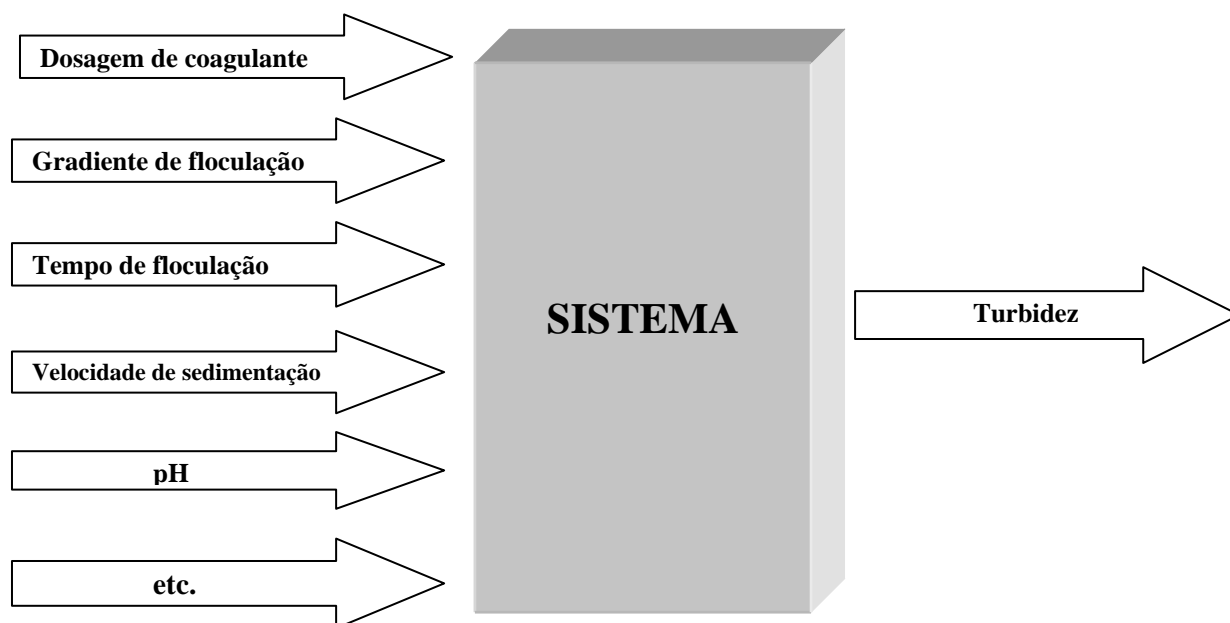


Figura 1 - Representação de um sistema por uma função (em princípio desconhecida) ligando os fatores (variáveis de entrada) à resposta (variável de saída).

Fonte: Adaptado de Barros Neto et al. (2003).

OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho do sulfato de alumínio e do cloreto férrico como coagulantes e do amido de batata como auxiliar de floculação no tratamento (coagulação, floculação e decantação) de água com turbidez intermediária (30 a 75 NTU, aprox.), com o uso de otimização multivariada no planejamento experimental e na avaliação dos resultados.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho experimental consistiu de duas etapas experimentais. Na primeira etapa, foram realizados o planejamento e execução de ensaios de coagulação-floculação-sedimentação em equipamento de bancada (*jar-test*), com vistas à determinação das variáveis operacionais (fatores) mais importantes na remoção de turbidez. Na segunda etapa, foram realizados ensaios complementares para determinar os níveis (valores) mais adequados para os parâmetros operacionais mais importantes (obtidos na etapa anterior). Adicionalmente, também na segunda etapa, foram realizados ainda ensaios para determinar a influência do uso do amido de batata como auxiliar de floculação. O planejamento experimental e a análise dos dados foram feitos com o auxílio do programa *The Unscrambler*®.

As duas etapas de ensaios são detalhadas a seguir.

PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS

Nessa etapa, os ensaios foram realizados com o objetivo de determinar os fatores mais importantes e seus níveis (valores) mais adequados para a remoção de turbidez. Para isso, foi utilizado um planejamento fatorial fracionário de dois níveis com 6 fatores (fatorial 6^2) com uma repetição, nos quais todas as condições operacionais (fatores) são variadas ao mesmo tempo e as condições “ótimas” podem ser obtidas com número



de ensaios bem menor do que em planejamentos univariados convencionais (em que se varia um fator por vez, fixando-se os demais) (Barros Neto et al., 2003).

O planejamento experimental resultou em 10 diferentes condições operacionais, com uma duplicata por ensaio, totalizando 20 ensaios. Os níveis dos parâmetros adotados inicialmente foram: tipo de coagulante: cloreto férrico (nível 1) e sulfato de alumínio (nível 2); dosagem de coagulante (DC): 10 e 30 mg.L⁻¹; pH inicial: 6,0 e 8,0 (antes da adição do coagulante); gradiente de floculação (Gf): 20 e 40 s⁻¹; tempo de floculação (Tf): 10 e 30 min; dosagem de amido de batata: 0 e 0,5 mg.L⁻¹. Os parâmetros operacionais gradiente de velocidade médio de mistura rápida (Gm) e tempo de mistura rápida (Tm) tiveram os valores fixados em 500 s⁻¹ e 60 s, respectivamente, para todos os ensaios. Foram adotadas duas velocidades de sedimentação: $V_{s0,74} = 0,74 \text{ cm.min}^{-1}$ e $V_{s3,12} = 3,12 \text{ cm.min}^{-1}$, que correspondem, no equipamento de *jar-test* usado, às taxas de aplicação superficial (TAS) de 10 e 45 m³.m⁻².dia⁻¹, respectivamente.

A determinação dos fatores mais importantes para a remoção de turbidez e dos níveis mais adequados dos fatores (tipo e dosagem de coagulante, pH, gradiente e tempo de floculação e aplicabilidade do amido de batata como auxiliar de floculação) foi realizada a partir do cálculo dos efeitos, para ambas as velocidades de sedimentação estudadas.

SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS

Os ensaios da segunda etapa buscaram otimizar os valores (níveis) dos parâmetros operacionais (fatores) mais importantes, obtidos na série anterior. Para tal, foi utilizado um novo planejamento fatorial fracionário, sendo que foram variados os níveis dos fatores considerados mais importantes nos ensaios anteriores (Tf, DC, pH), considerando-se, desta vez, também a velocidade de sedimentação (Vs). Assim, o planejamento utilizado foi um fatorial fracionário 4², com um ponto médio e duas repetições.

Foram realizados inicialmente dez ensaios somente com a aplicação do cloreto férrico (coagulante que forneceu melhores resultados na primeira etapa), sendo que em dois desses ensaios os níveis dos fatores correspondiam aos pontos médios dos níveis adotados nos demais ensaios (os quais coincidem com os melhores níveis desses fatores na etapa anterior). Os oito ensaios restantes foram realizados adotando-se os seguintes valores para os parâmetros operacionais (fatores): tempo de floculação (Tf): 5 e 15 min (ponto médio: 10 min); dosagem de cloreto férrico (DC): 20 e 40 mg.L⁻¹ (ponto médio: 30 mg.L⁻¹); e dosagem de NaOH: 0 e 8,0 mg.L⁻¹ (ponto médio: 4,0 mg.L⁻¹). Os ensaios foram realizados para as velocidades de sedimentação de 0,74, e 3,12 cm.min⁻¹ (ponto médio: 1,93 cm.min⁻¹). Além de buscar os níveis mais adequados (“ótimos”) dos fatores principais, uma nova análise dos efeitos destes fatores também foi realizada.

Adicionalmente, ainda na segunda etapa de ensaios, foram realizados quatro ensaios complementares, para verificar a dosagem mais adequada de amido de batata como auxiliar de floculação, com a adição de dosagens de amido de batata de: 0,1; 0,3; 1,0 e 3,0 mg.L⁻¹. Nesses ensaios foram adotadas as condições operacionais que conduziram ao melhor resultado para $V_{s3,12}$ nos ensaios anteriores. Foram investigadas as velocidades de sedimentação de Vs: 0,74; 1,93; e 3,12 cm.min⁻¹ (TAS de 10; 28,8 e 45 m³/m².dia, respectivamente).

Nos ensaios realizados nesta etapa, a preparação da solução de amido de batata foi feita com o uso de hidróxido de sódio, conforme descrito por Campos (1980). Em todos os ensaios realizados as análises de turbidez foram realizadas em turbidímetro de bancada, conforme as recomendações de APHA/AWWA/WEF (1998).

RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS

A caracterização físico-química da água bruta utilizada na primeira etapa de ensaios forneceu os seguintes resultados: alcalinidade total: 38 mg.L⁻¹ CaCO₃; temperatura: 19 °C; turbidez: 42,6 uT e pH: 7,2.

Os resultados do cálculo dos efeitos de cada fator investigado, calculado pelo programa *The Unscrambler*® a partir das respostas obtidas para $V_{s3,12}$, são apresentados no gráfico da Figura 1. No eixo das abscissas estão dispostos os parâmetros e no eixo das ordenadas os valores dos efeitos correspondentes a cada um dos parâmetros.



Para o programa, os valores mais elevados de turbidez foram interpretados como a melhor resposta, de maneira que os efeitos positivos são aqueles que influenciaram para que o valor de turbidez fosse mais elevado e os efeitos negativos foram os que contribuíram para a obtenção de menor turbidez remanescente.

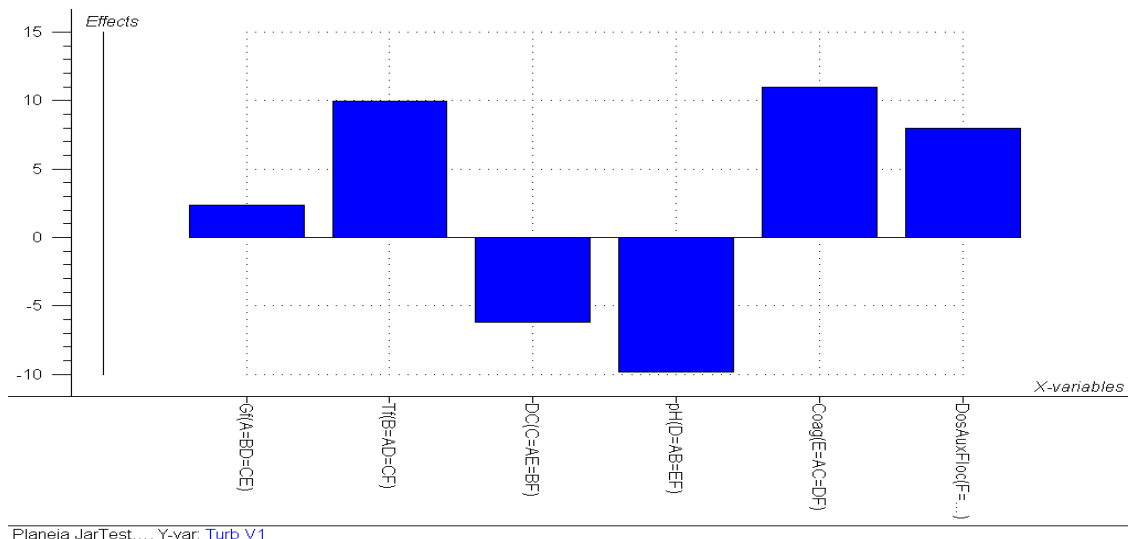


Figura 1 - Análise de efeitos da primeira etapa de ensaios, para $V_{s,12}$.

De acordo com o gráfico da Figura 1, a variável pH foi a que apresentou o maior efeito negativo, cerca de -9,8. Fato semelhante ocorreu com a dosagem de coagulante, que teve efeito resultante de -6,1. Estes valores indicam que o aumento dos níveis do pH inicial (de 6 para 8) e da dosagem de coagulante (de 10 para 30 mg/L) foram ambos benéficos para a redução da turbidez no efluente, i.e., colaboraram para maior eficiência de remoção de turbidez. Além disso, tiveram efeito significativo também o tipo de coagulante (no gráfico, Coag, que apresentou o maior efeito relativo: +11), o tempo de floculação (Tf) e dosagem de auxiliar de floculação, todos com efeitos positivos, o que significa que os níveis mais “elevados” destes fatores contribuíram para elevação da turbidez no efluente. O nível mais “elevado” adotado inicialmente para o tipo de coagulante era o sulfato de alumínio (no caso de parâmetros qualitativos, o nível adotado inicialmente é arbitrário), que, portanto, forneceu piores respostas que o cloreto férrico.

A mesma análise de efeitos foi realizada para $V_{s,74}$ (dados não apresentados). Nessa condição, a variável mais importante foi a dosagem de coagulante, com efeito de -10,7, e o tempo de floculação foi a segunda mais importante (efeito: +10,5). Entretanto, de modo geral, os resultados para $V_{s,74}$ concordaram com os obtidos para $V_{s,12}$, a saber: as variáveis mais importantes foram: dosagem de coagulante e pH, com níveis mais adequados em valores elevados (i.e., DC: 30 mg/L e pH: 8); tipo de coagulante, tempo de floculação e dosagem de amido, com níveis mais adequados em valores baixos (i.e., cloreto férrico, 10 min e 0 mg.L⁻¹, respectivamente).

RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DE ENSAIOS

A caracterização da água bruta utilizada na segunda etapa de ensaios forneceu os seguintes resultados: alcalinidade: 28,8 mg.L⁻¹ CaCO₃; temperatura: 20 °C; turbidez: 73,6 uT e pH: 7,09.

Com base nos dados obtidos na primeira etapa, foram investigados os níveis “ótimos” das variáveis mais importantes, a saber: tempo de floculação (Tf), dosagem de cloreto férrico (nesta etapa, usou-se apenas o cloreto férrico como coagulante) e pH (associada à dosagem de hidróxido de sódio: Dos.NaOH), além da velocidades de sedimentação. Na Figura 2 são apresentados os resultados da análise de efeitos na segunda etapa.

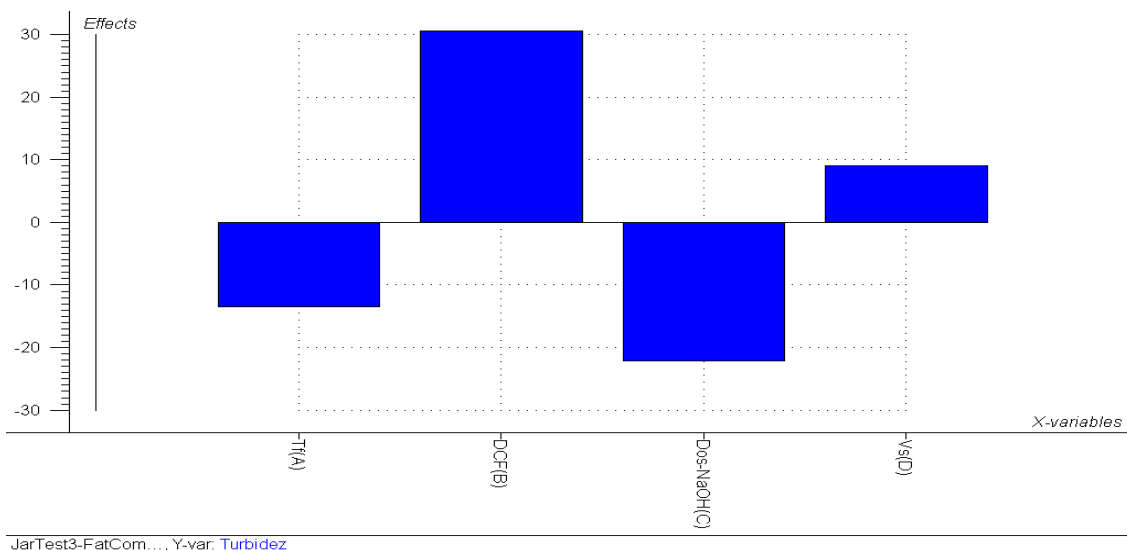


Figura 2 - Análise de efeitos para a segunda etapa de ensaios.

De acordo com a Figura 2, as variáveis dosagem de cloreto férrico (efeito: +30,6) e pH inicial (Dosagem de NaOH) (efeito: -22,1), foram as variáveis com efeitos mais significativos na remoção de turbidez, seguidas pelo tempo de floculação (-12) e pela velocidade de sedimentação (+9). Esse resultado ratifica a importância do par pH x Dosagem de coagulante na coagulação com cloreto férrico, sobrepondo-se em importância inclusive à velocidade de sedimentação das partículas (na faixa de valores considerada). Com base nesses resultados, as condições operacionais mais adequadas (menor turbidez remanescente) seriam: Tf: 15 min; DCF: 20 mg/L; pH: 8,0; e Vs: 0,74 cm/min. Contudo, como o ponto médio forneceu menor turbidez remanescente (dados não apresentados) que nas condições citadas, as condições “ótimas” consideradas foram: Tf: 10 min; DC: 30 mg/L; pH de coagulação: 5,8 (dosagem de 4 mg.L⁻¹ de NaOH).

As condições operacionais mais adequadas obtidas nos ensaios anteriores foram adotadas para realização dos ensaios complementares da Etapa 2. Na Figura 3, é apresentado o gráfico da turbidez remanescente, em função da velocidade de sedimentação das partículas, para diferentes dosagens de amido de batata. Observa-se nesse gráfico que, de modo geral, o uso do amido proporcionou a obtenção de menor turbidez remanescente, principalmente em velocidades de sedimentação mais elevadas.

Verifica-se ainda que a dosagem de 1 mg.L⁻¹ de amido de batata foi suficiente para obtenção de turbidez remanescente da ordem de 4,3 uT para Vs: 3,12 cm/min (TAS: 45 m³.m⁻².dia⁻¹), sendo que no ensaio sem amido, nas mesmas condições operacionais, a turbidez remanescente foi de 16,6 uT. Sem a adição do amido, a turbidez remanescente só foi da mesma ordem de grandeza da obtida no ensaio com 1,0 mg.L⁻¹ de amido e TAS: 45 m³.m⁻².dia⁻¹ para velocidade de sedimentação muito menor, de 0,74 cm.min⁻¹ (TAS: 10 m³.m⁻².dia⁻¹). Além disso, mesmo para menor velocidade de sedimentação (Vs: 0,74 cm/min), o amido de batata possibilitou a redução da turbidez remanescente de cerca de 4,0 uT para pouco acima de 2,0 uT.

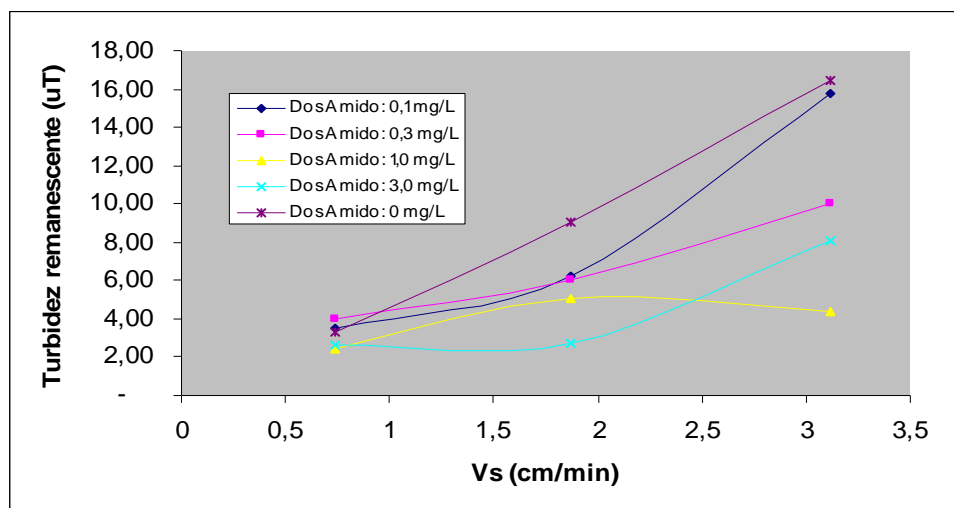


Figura 3 - Turbidez remanescente em função da velocidade de sedimentação (Condições operacionais: Gm: 500 s⁻¹; Tm: 60s; Gf: 30 s⁻¹; Tf: 10 min; DC: 30 mg.L⁻¹; pH de coagulação: 5,8).

CONCLUSÕES

Com a realização dos experimentos foi possível chegar às seguintes conclusões:

- O cloreto férrico se mostrou mais adequado que o sulfato de alumínio para a coagulação da água de estudo (turbidez de 30 a 75 NTU);
- O uso do amido de batata como auxiliar de floculação se mostrou uma excelente opção, em associação com o cloreto férrico, já que o emprego de dosagens pequenas (p.ex., 1,0 mg.L⁻¹) foi capaz de elevar significativamente a eficiência de remoção de turbidez, principalmente para velocidades de sedimentação mais elevadas. Desse modo, o emprego do amido de batata deve ser especialmente benéfico em ETAs que operam acima de sua capacidade de projeto, possibilitando o adiamento da ampliação da capacidade das mesmas;
- A aplicação da otimização multivariada, realizada a partir do planejamento experimental dos ensaios, se mostrou uma ferramenta eficaz na definição de condições operacionais adequadas. Assim, foi possível otimizar os parâmetros operacionais investigados, com reduzido número de ensaios, de maneira que o ajuste destes conduziu à obtenção de água decantada com baixa turbidez (em torno de 2 uT).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA/AWWA/WEF (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., Washington, D.C., USA.
2. AZEVEDO NETTO, J. M. et al. Técnica de abastecimento e tratamento de água. 3. ed. São Paulo, SP: CETESB-ASCETESB, 1987. 317 p. v.2.
3. BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. R. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. São Paulo, SP: UNICAMP, 2003.
4. CAMPOS, J.R. Emprego do amido de batata como auxiliar de floculação de águas de abastecimento. 179 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1980.
5. DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P.L. Ensaios de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos, SP: Rima, 2002. 231 p.
6. PARSEKIAN, M. P. S. Análise e proposta de formas de gerenciamento de estações de tratamento de águas de abastecimento completo em cidades de porte médio do Estado de Pão Paulo. 194 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de são Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
7. ZAMORA, P. P.; DE MORAES, J. L.; NAGATA, N. Por que otimização multivariada? Revista Engenharia Sanitária e ambiental, São Paulo, v.10 – n.2, p. 106 – 110, abr – jun, 2005.