

# REMOÇÃO DE METAIS COMPLEXADOS COM MATÉRIA ORGÂNICA NO TRATAMENTO DE ÁGUA DESTINADA AO ABASTECIMENTO COM ÊNFASE NO PROCESSO DE SEPARAÇÃO SÓLIDO/LÍQUIDO EMPREGANDO A FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD): A INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE FLOCULAÇÃO EM ESCALA DE BATELADA E INSTALAÇÃO PILOTO DE FAD DE ALTA TAXA

**Leila J. Patrizzi**  
**Marco A. Penalvi Reali**

Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC-USP, Av. Dr. Carlos Botelho, 1465,  
CEP 13560-250, São Carlos, SP, Brasil, e-mails: leilajp@uol.com.br, mapreali@sc.usp.br

**Rodrigo B. Moruzzi**

Departamento de Planejamento Territorial, Curso de Engenharia Ambiental, Instituto de  
Geociências e Ciências Exatas (IGCE), UNESP, Campus de Rio Claro,  
Rua 10, 2527, Rio Claro, SP, Brasil, e-mail: rmoruzzi@rc.unesp.br

## Resumo

O objetivo deste artigo é apresentar a flotação por ar dissolvido (FAD) associada à oxidação química como potencial alternativa para remoção de formas complexadas de ferro e manganês em águas destinadas ao abastecimento. O foco da estratégia consistiu no processo de separação sólido/líquido, diferentemente da estratégia comumente adotada na qual o foco consiste no processo de oxidação química. Dessa forma, a influência das condições de coagulação e floculação foi testada em instalações de FAD em escala de laboratório e em escala piloto. Visando fixar as condições de entrada, a água foi preparada por meio da dosagem de ácido húmico ( $5 \text{ mg.L}^{-1}$ ), ferro ( $3,5 \text{ mgFe}^{+3}.\text{L}^{-1}$ ) e manganês ( $0,25 \text{ mgMn}^{+2}.\text{L}^{-1}$ ). A formação de complexos orgânicos metálicos de ferro e manganês foi verificada. Os ensaios em escala de laboratório foram conduzidos variando: (i) gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_F$ ) de  $40$  a  $80 \text{ s}^{-1}$ ; (ii) tempo de floculação ( $t_F$ ) de  $5$  a  $30$  minutos; e (iii) velocidade de flotação ( $V_F$ ) de  $6$  a  $30 \text{ cm.min}^{-1}$ . Os ensaios em escala piloto foram realizados variando tempo de floculação ( $t_F$ ) de  $10$  a  $20$  minutos e velocidade de flotação ( $V_F$ ) de  $16$  a  $64 \text{ cm.min}^{-1}$ . As condições de coagulação, floculação e oxidação foram adotadas a partir dos melhores resultados obtidos em escala de laboratório. Em escala piloto, os melhores resultados foram verificados nas seguintes condições:  $V_F$  de  $16 \text{ cm.min}^{-1}$ ;  $G_F$  de  $60 \text{ s}^{-1}$ ; e  $t_F$  de  $20$  minutos. Nessas condições, os valores de eficiência obtidos foram:  $97,9\%$  para turbidez (residual de  $0,38$  NTU), maior que  $98,9\%$  para cor aparente (residuais menores que  $2 \text{ uC}$ ),  $94,3\%$  para ferro (residual de  $0,20 \text{ mg/L}$ ) e  $65\%$  para manganês (residual de  $0,07 \text{ mg/L}$  residual). Dessa forma, os resultados indicaram que a estratégia de remoção de metais complexados por meio da adequação das condições de separação sólido/líquido constituiu uma alternativa à estratégia convencional na remoção de ferro complexado.

*Palavras-chave:* flotação por ar dissolvido, tratamento de água para abastecimento, tempo de floculação, manganês, complexos de ferro orgânico.

## Introdução

As águas que contêm ferro e manganês em elevadas concentrações causam problemas relacionados à cor e ao sabor de águas, manchas em aparelhos sanitários e tecidos, favorecem o crescimento de bactérias (que utilizam o ferro como fonte energética) e, ainda, podem obstruir canalizações. Na presença de matéria orgânica, há a formação de complexos orgânicos difíceis de serem removidos por

oxidação com subsequente precipitação, conforme relata Knoche *et al.* (1991).

No Brasil, vários municípios apresentam problemas relacionados à presença de ferro e manganês em águas superficiais, contendo matéria orgânica na forma de substâncias húmicas. A prática usual para o tratamento, em sistemas de tratamento de ciclo completo, consiste na aplicação de pré-oxidação química com cloro em valores

elevados de pH (na faixa de 8,5 a 9,0) com aplicação, subsequente, de altas dosagens de cloreto férrico. Isto se deve fundamentalmente às baixas velocidades de sedimentação associadas aos flocos formados por matéria orgânica coloidal, bem como à alta estabilidade dos complexos metálicos de ferro e manganês. Esta prática, que foca a remoção dos metais através do processo de oxidação química, tem levado ao excessivo consumo de insumos, em virtude da coagulação em valores inadequados de pH, e a baixas eficiências de remoção dos complexos presentes. Como consequência, tem-se observado diminuição expressiva nas carreiras das unidades de filtração subsequentes às unidades de sedimentação, implicando menor produção efetiva de água tratada e, adicionalmente, maior produção de lodo e maior risco de formação de compostos organoclorados.

Em contraposição, a sedimentação, a flotação por ar dissolvido (FAD), constitui, comprovadamente, alternativa eficaz para o tratamento de água com altas concentrações de substâncias húmicas utilizando menor quantidade de insumos (Edzwald *et al.*, 1992, 1995; Reali & Campos, 1995; Heinanen *et al.*, 1995; Van Puffelen *et al.*, 1995; DOMBROSKI *et al.*, 1996; SANTOS *et al.*, 1997; entre outros).

Mais recentemente, as novas concepções de FAD de alta taxa demonstraram a possibilidade de operação de unidades em valores elevados de taxa de aplicação superficial (TAS) constituindo sistemas mais compactos de tratamento.

Tendo em vista as potencialidades da FAD para remoção de matéria orgânica e seus recentes avanços com as unidades de FAD de alta taxa, o objetivo do presente artigo foi investigar a remoção de metais complexados por meio da adequação do processo de separação sólido-líquido por FAD. Para isso, a oxidação foi realizada em valores de pH mais apropriados à coagulação de matéria orgânica e, portanto, inferiores aos valores usualmente recomendados quando da ênfase no processo de oxidação (na faixa de 8,5 a 9,0).

## Material e Métodos

### Descrição das unidades experimentais

Para a realização dos ensaios foi utilizada unidade de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório denominada flotateste (Figura 1), desenvolvida por Reali (1991). Para a realização dos ensaios de floculação, cada coluna possui agitador independente com eixo vertical e pás paralelas ao eixo. O agitador é acionado por um motor ligado a um regulador de voltagem para controle da energia fornecida ao sistema. Para a realização dos ensaios de flotação, cada coluna é interligada à câmara de saturação, a qual fornece as condições necessárias para a dissolução da massa de ar na massa líquida, suprimindo o sistema com água saturada de ar atmosférico. A entrada de água saturada nas colunas é feita por meio de um registro

de agulha, o qual possibilita a introdução da vazão desejada e é responsável pela despressurização e cavitação das microbolhas. As colunas possuem pontos de amostragem independentes distribuídos ao longo da altura, permitindo a construção de curvas de flotação conforme preconizado por Reali (1991).

Adicionalmente aos ensaios em escala de laboratório, foi utilizada uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa com escoamento horizontal FADEH, que é constituída por: i) um misturador em linha, onde o cloreto férrico e o hipoclorito de sódio foram aplicados; ii) três câmaras de floculação com 0,35 m x 0,35 m em planta e 1,0 m de profundidade; iii) misturador vertical com pás paralelas ao eixo conectados a motores independentes e controlados por sistema com variador de tensão; iv) câmara de contato; e v) câmara de clarificação retangular com 1,0 m de comprimento, 0,5 m de largura e 1,3 m de profundidade. No interior da câmara de clarificação foi instalado um módulo contendo placas com 0,7 m de largura, 0,5 m de profundidade e 0,5 m de comprimento com espaçamento entre placas de 3,5 cm, capaz de fornecer escoamento horizontal associado a baixos números de Reynolds (Rey entre 214 e 883).

A câmara de saturação cilíndrica com dimensões de 0,1 m de raio e 1,4 m de altura foi concebida para trabalhar a pressões superiores a  $450 \pm 10$  kPa, valor mais usualmente empregado durante os experimentos. O projeto da câmara de saturação seguiu as recomendações apresentadas por Reali & Campos (1992). As vazões de entrada e saída do sistema foram monitoradas por medidores eletromagnéticos de vazão. A Figura 2 apresenta um esquema da instalação em escala piloto de FAD utilizada nos experimentos.

### Preparação da água de estudo e análises

Foi utilizada água sintética para permitir restrito controle das condições experimentais e garantir a mesma concentração de metais presentes na água durante todo o período de investigação. Essa água foi preparada com adição de  $5 \text{ mg.L}^{-1}$  de ácido húmico comercial (Aldrich) e ferro ( $\text{Fe}^{+3}$  Synth) para obter cor aparente em torno de 180 uC, concentração de ferro em torno de  $3,5 \text{ mg.L}^{-1}$ , além da adição de Kaolin (Fluka) para obter turbidez em torno de 18 NTU e solução de manganês  $1.000 \text{ mg/g}$  ( $\text{Mn}^{+2}$  Synth) para obter concentração de manganês em torno de  $0,20 \text{ mg.L}^{-1}$ . Em todos os ensaios, a alcalinidade esteve em torno de  $21 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$  associada a pH em torno de 7,1 e temperatura em torno de  $21^\circ\text{C}$ .

Todas as determinações de ferro e manganês foram realizadas em amostras digeridas e não-digeridas. As determinações das concentrações residuais dos metais foram obtidas por meio de espectrofotômetro de absorção atômica conforme protocolo 3111 descrito no Standard Methods 21<sup>th</sup>. A digestão química das amostras seguiu o protocolo 3030F da mesma referência.

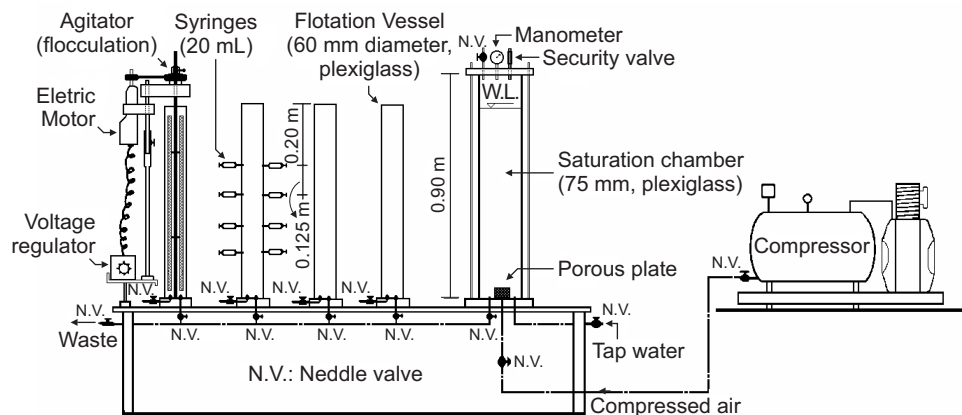


Figura 1 Esquema do flotatete.

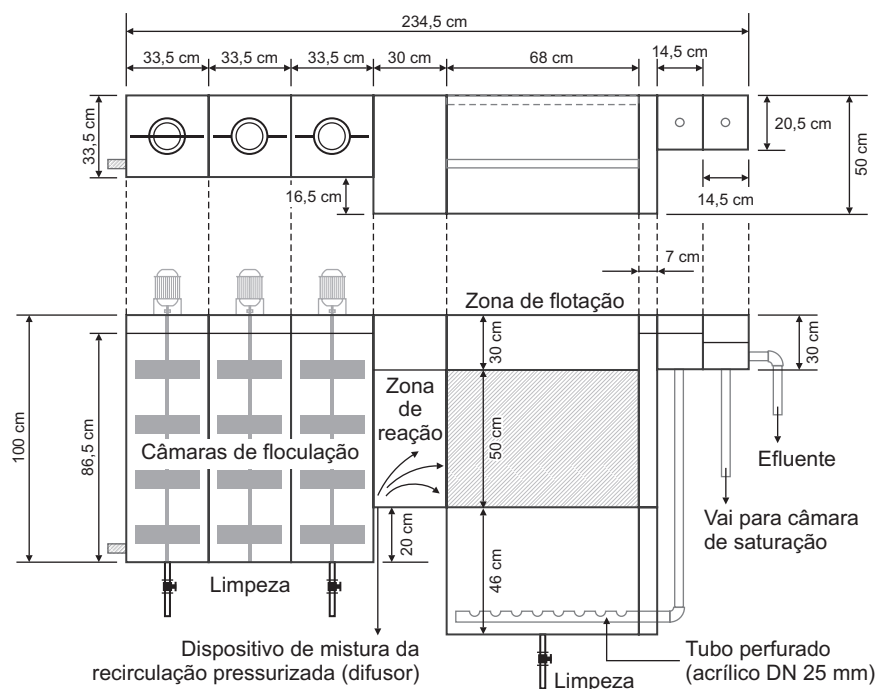


Figura 2 Esquema da unidade piloto FADEH associada a baixos números de Reynolds.

### Estratégias adotadas nos experimentos em escala de laboratório

Primeiramente, com o objetivo de estudar as condições de oxidação separadamente (dosagem de oxidante) e de coagulação (pH e dosagem de coagulante), foram analisadas várias dosagens de oxidante (cloro), através de ensaios de filtração em membrana (0,45  $\mu\text{m}$ ), e de coagulante (cloreto férrico) em diversos valores de pH. Tais resultados subsidiaram a adoção das dosagens de produtos químicos e estão disponíveis em Moruzzi *et al.* (2004), sendo apenas citados neste artigo.

Na sequência, com o objetivo de verificar a influência das condições de mistura na eficiência do processo foram

variados quatro valores de gradiente médio de velocidade na floculação ( $G_F = 40, 60, 70$  e  $80 \text{ s}^{-1}$ ) e, para cada valor de  $G_F$ , foram variados seis valores de  $t_F$  (5, 10, 15, 20, 25 e 30 min).

Durante todos os ensaios foram mantidas fixas as seguintes condições: 30 mg  $\text{FeCl}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ , 2,7 mg  $\text{Cl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  na forma de hipoclorito de sódio; pH de coagulação de 6,3; recirculação de água saturada (R) de 10%; pressão de saturação ( $P_s$ ) de  $450 \pm 10 \text{ kPa}$ ; e temperatura (T) mantida a  $25^\circ\text{C}$  por meio de sistema de aquecimento. Os resultados foram monitorados por meio de medidas de turbidez e cor aparente e por meio de análises de ferro e manganês totais residuais.

### **Estratégias adotadas nos experimentos em escala piloto**

Na instalação de FAD de alta taxa em escoamento contínuo entre placas (FADEH) foram avaliadas as seguintes condições: 30 mg FeCl<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup> e 2,6 mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>, aplicados juntos na mistura rápida; pH de coagulação de 6,3; G<sub>F</sub> de 60 s<sup>-1</sup>; recirculação (R) de 8%; pressão de saturação (P<sub>s</sub>) de 450 ± 10 kPa; taxa de aplicação superficial (TAS) de 13 e 39 m/h; temperatura (T) mantida a 25°C; e tempo de floculação (t<sub>F</sub>) variando de 10 a 20 minutos.

Cabe mencionar que, na unidade FADEH, foi inserido módulo na zona de clarificação, o qual a denomina como unidade com escoamento horizontal associado a baixos números de Reynolds (Rey = 301 para TAS = 13 m/h e Rey = 941 para TAS = 39 m/h). A TAS foi calculada utilizando a área superficial localizada acima do módulo inserido na zona de clarificação, excluindo a área da zona contato.

O desempenho da unidade diante das condições investigadas foi avaliado por meio de medidas de turbidez, cor aparente e análises de ferro e manganês residuais.

A duração de cada ensaio foi de aproximadamente 1 hora, e a cada 15 minutos eram coletadas amostras pontuais. Nessas amostras pontuais foram analisados pH, cor aparente, turbidez e temperatura. Os resultados apresentados são frutos de amostras compostas constituídas das 4 amostras pontuais e nestas, além das medidas de cor aparente, turbidez e sólidos suspensos totais, foram realizadas análises de ferro total e manganês total, após digestão química.

### **Resultados e Discussão**

Os resultados referentes aos estudos de oxidação e da adequação da coagulação para essa água de estudo estão disponíveis em Moruzzi *et al.* (2004). No presente artigo, são apenas resgatados alguns com a finalidade de justificar a estratégia adotada nos ensaios apresentados neste artigo.

Inicialmente, foi considerada a possibilidade de supressão do oxidante. Para verificar essa possibilidade, foram realizados ensaios de filtração em membrana (0,45 µm) sem aplicação de oxidante e, na sequência, diversos valores de cloro foram testados (2,7; 5,3; 16,0; e 32,0 mg.L<sup>-1</sup>). Alguns destes foram compilados no gráfico da Figura 3.

Verificou-se que o ferro residual foi reduzido a 55% da sua concentração inicial, mesmo sem a aplicação de oxidante. Porém, para a remoção do manganês foi necessária aplicação de cloro. Com 2,6 mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>, obteve-se 44% de remoção do manganês, 77% de remoção do ferro e 87% de remoção de cor aparente. Portanto, para os demais ensaios, foi adotada a dosagem de 2,6 mg.L<sup>-1</sup> de cloro.

Com a dosagem de oxidante adotada (2,6 mgCl<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>), foram realizados ensaios para adequação da coagulação com vistas à floculação/FAD. Para isso, oxidante e coagulante foram aplicados juntos, no momento da mistura rápida, e os estudos que subsidiaram essa estratégia de aplicação (oxidante aplicado na mistura rápida) encontram-

se em Patrizzi (2002). Para o estudo da adequação das condições de coagulação foram analisadas dosagens de 15, 20, 25, 30 e 35 mg.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico em diversos valores de pH. Os resultados estão apresentados nos gráficos das Figuras 4 e 5.

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 4 e 5, verifica-se claramente que a dosagem de 30 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante apresentou o melhor conjunto de resultados, sendo assim adotada para os ensaios subsequentes. Nos ensaios verificou-se que, além de apresentar os melhores resultados de remoção dos parâmetros investigados, a dosagem de 30 mg.L<sup>-1</sup> demonstrou maior estabilidade de coagulação, ou seja, foi efetiva em uma faixa mais ampla de valor de pH.

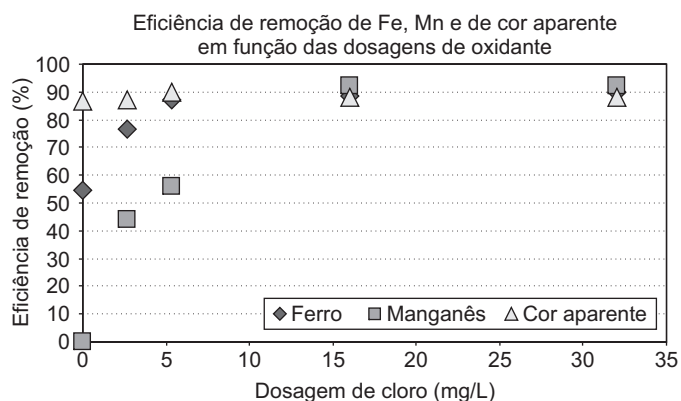
Fixadas as condições de oxidação e de coagulação mais adequadas, procedeu-se ao estudo das condições de mistura, necessárias à etapa de floculação. Os resultados desses ensaios são apresentados nos gráficos das Figuras 6, 7 e 8.

Verificou-se na Figura 6 que todos os valores de tempo de floculação estudados associados a valores de G<sub>F</sub> iguais ou superiores 60 s<sup>-1</sup> forneceram resultados com residuais de turbidez menores que 1,3 uT (remoção > 94%).

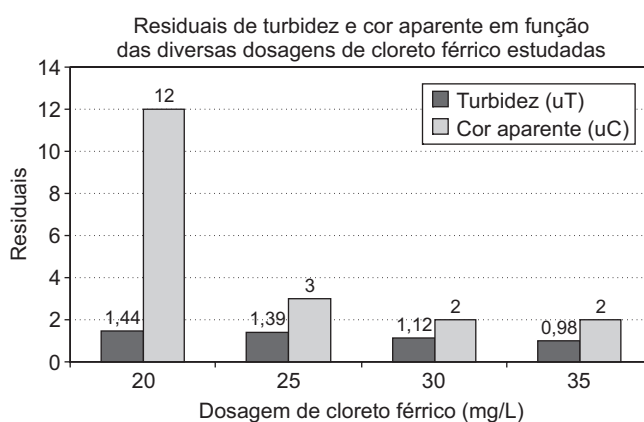
Para tempo de floculação (t<sub>F</sub>) superior a 10 minutos verificou-se uma tendência de estabilização na eficiência do processo no que se refere à turbidez. O tempo de floculação de 25 minutos apresentou o menor valor residual de turbidez (0,5 uT). Entretanto, para G<sub>F</sub> = 80 s<sup>-1</sup>, notou-se que o tempo de floculação não influenciou marcadamente a eficiência do processo, indicando que t<sub>F</sub> de 5 ou 10 minutos foi suficiente para obter o menor residual (0,7 uT). Esses resultados atestam as observações de trabalhos como os de Edzwald *et al.* (1999) e Amato *et al.* (2000), que apresentam o tempo de floculação de 6 ou 7 como suficientes para alcançar a estabilidade na eficiência do processo de FAD.

Ao contrário, observou-se influência significativa de maiores valores de t<sub>F</sub> e do gradiente médio de velocidade de floculação (G<sub>F</sub>) para a remoção de ferro e manganês. Para G<sub>F</sub> = 40 s<sup>-1</sup>, o ferro total residual ficou entre 0,50 e 0,59 mg/L até 25 minutos de floculação, reduzindo para concentração residual de 0,39 mg/L somente com 30 minutos de floculação. Analisando-se G<sub>F</sub> = 60 s<sup>-1</sup>, observou-se que a concentração de ferro total residual ficou entre 0,54 e 0,57 mg/L para 5 e 10 minutos de floculação, caindo para 0,38 mg/L quando utilizados 15 minutos e para 0,29 mg/L com 20 minutos de floculação.

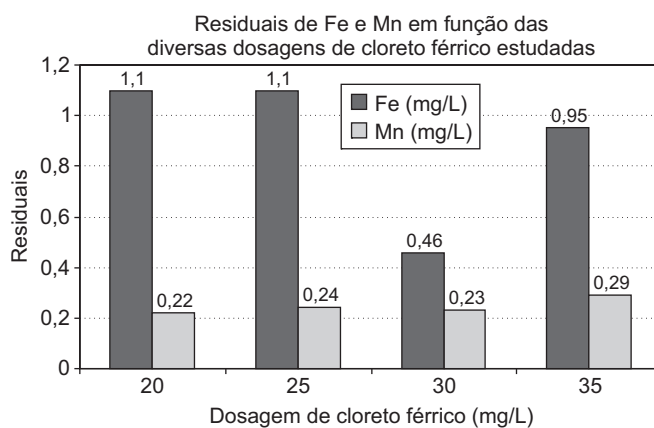
Para os valores de gradiente médio de velocidade G<sub>F</sub> de 60, 70 e 80 s<sup>-1</sup> verifica-se novamente que as concentrações residuais de ferro e de manganês sofreram ligeira queda quando foram utilizados 15 minutos de floculação e queda acentuada quando se utilizaram 20 minutos de floculação (concentrações de ferro entre 0,25 e 0,27 mg/L e de manganês entre 0,10 e 0,15 mg/L). Portanto, observou-se que a remoção das concentrações de ferro e manganês exigiu valores de G<sub>F</sub> > 40 s<sup>-1</sup> e valores de t<sub>F</sub> > 15 min.



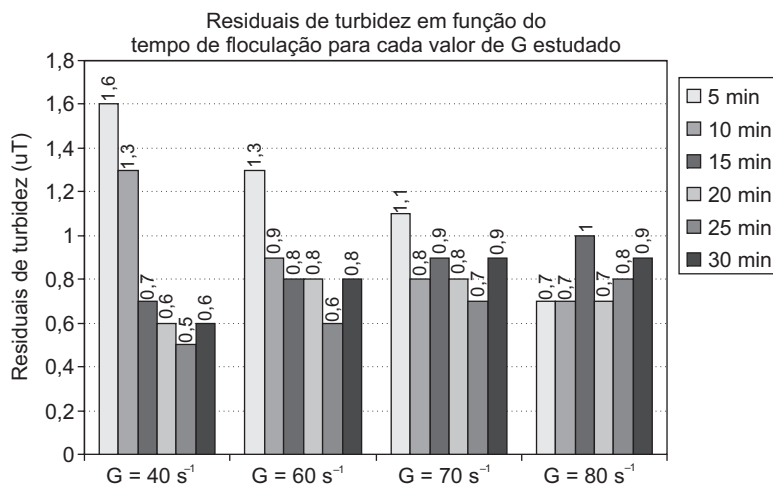
**Figura 3** Resultados dos ensaios de oxidação realizados com filtração em membrana (0,45 mm), sem aplicação de coagulante, pH em torno de 8,1.



**Figura 4** Residuais de turbidez e cor aparente nos ensaios de coagulação/floculação/FAD com variação da dosagem de coagulante. Condições dos ensaios:  $2,6 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  na forma de hipoclorito de sódio, pH na faixa de 6,0 a 7,0, mistura rápida:  $G_{MR}: 800 \text{ s}^{-1}$ ,  $t_{MR}: 20 \text{ s}$ ; floculação:  $G_F: 80 \text{ s}^{-1}$ ,  $t_F: 20 \text{ min}$ ; FAD: recirculação: 10%, pressão de saturação:  $450 \pm 10 \text{ kPa}$ , velocidade de flotação:  $12 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  e temperatura =  $25^\circ\text{C}$ .



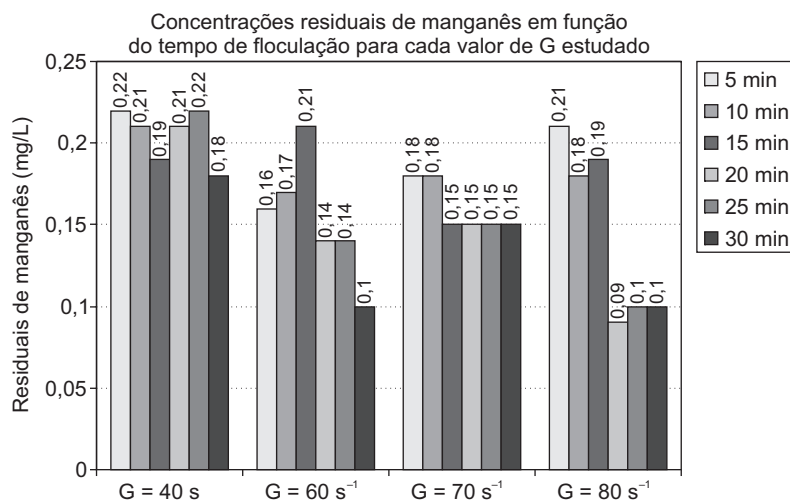
**Figura 5** Residuais de Fe e Mn (digeridos) nos ensaios de coagulação/floculação/FAD com variação da dosagem de coagulante. Condições dos ensaios:  $2,6 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  na forma de hipoclorito de sódio, na faixa de 6,0 a 7,0, mistura rápida:  $G_{MR}: 800 \text{ s}^{-1}$ ,  $t_{MR}: 20 \text{ s}$ ; floculação:  $G_F: 80 \text{ s}^{-1}$ ,  $t_F: 20 \text{ min}$ ; FAD: recirculação: 10%, pressão de saturação:  $450 \pm 10 \text{ kPa}$ , velocidade de flotação:  $12 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  e temperatura =  $25^\circ\text{C}$ .



**Figura 6** Residuais de turbidez em função do tempo de floculação. Condições dos ensaios:  $30 \text{ mgFeCl}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $2,7 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{pH} = 6,3$ ,  $P_s = 450 \pm 10 \text{ kPa}$ ,  $R = 10\%$ ,  $V_F = 12 \text{ cm/min}$ .

**Figura 7** Residuais de ferro (digerido) em função do tempo de floculação.

Condições dos ensaios:  $30 \text{ mgFeCl}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $2,7 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{pH} = 6,3$ ,  $P_s = 450 \pm 10 \text{ kPa}$ ,  $R = 10\%$ ,  $V_F = 12 \text{ cm/min}$ .



**Figura 8** Residuais de manganês (digeridos) em função do tempo de floculação. Condições dos ensaios:  $30 \text{ mgFeCl}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $2,7 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{pH} = 6,3$ ,  $P_s = 450 \pm 10 \text{ kPa}$ ,  $R = 10\%$ ,  $V_F = 12 \text{ cm/min}$ .



Os valores de  $G_F$  de 60, 70 e 80  $s^{-1}$  combinados com valores de  $t_F$  de 20, 25 e 30 min, apresentaram os melhores resultados de remoção de concentrações de ferro e manganês, apresentando residuais inferiores aos limites estabelecidos pela Portaria 518/04 (0,3 mg/L para concentrações de ferro e 0,1 mg/L para concentrações de manganês). Assim, ressaltou-se a importância das condições de mistura na eficiência do processo.

Os ensaios em escala de laboratório demonstraram que a otimização da separação sólido-líquido através das condições de floculação é determinante na remoção de metais complexados e se constitui em alternativa aos processos que enfatizam a oxidação química.

Com o objetivo de verificar a importância das condições de mistura na eficiência do processo em instalação em escoamento contínuo, foram realizados ensaios com a unidade piloto FADEH. Para tal, foram fixadas as demais condições operacionais:  $P = 450$  kPa;  $R = 10\%$ ; TAS de 13 ou 39 m/h;  $G_f$  de 60  $s^{-1}$ ; DCF de 30  $mg \cdot L^{-1}$ ; Dcloro de 2,7  $mg \cdot L^{-1}$ ; e pH de 6,3; e variou-se o tempo de floculação (10, 15 e 20 min). Ressalta-se que foi fixado  $G_F = 60$   $s^{-1}$  em virtude das condições operacionais da unidade piloto FADEH, além de ser o valor mínimo requerido para a remoção dos metais em ensaios de laboratório.

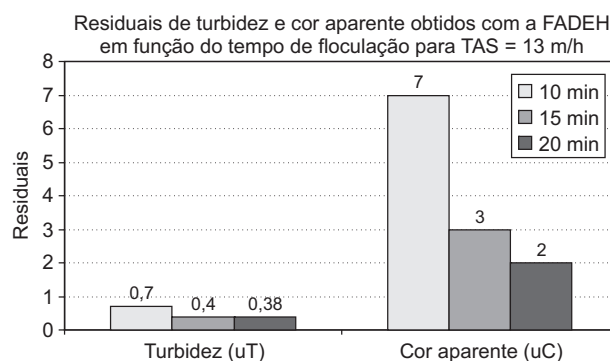
Através dos gráficos das Figuras 9 e 10 é possível verificar o efeito do tempo de floculação, principalmente, na remoção de cor aparente e de ferro, confirmando a importância do  $t_F$  observado em escala de laboratório.

Com o gráfico da Figura 7 verifica-se que, quando foi utilizado 10 min de tempo de floculação, o residual de cor aparente foi de 7 uC, decaindo para 3 uC quando se aumentou o tempo para 15 minutos e para 2 uC quando se aumentou o tempo para 20 minutos de floculação.

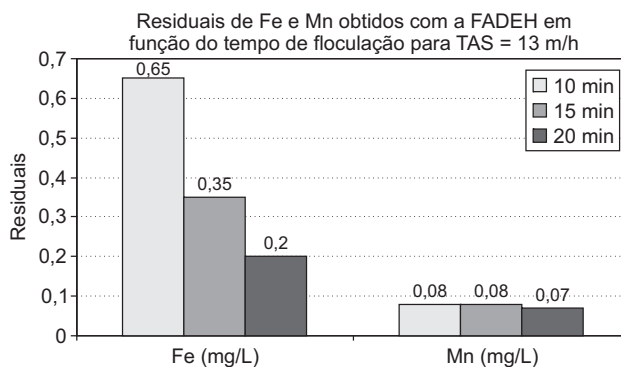
O gráfico da Figura 10 mostra que o aumento de  $t_F$  de 10 para 15 minutos reduziu a concentração de ferro de 0,65 para 0,35 mg/L. Para  $t_F$  de 20 minutos a concentração de ferro foi reduzida para 0,20 mg/L.

É importante ressaltar a correlação entre a remoção da cor aparente e a das concentrações de ferro. Tal fato se deve à forte ligação do ferro com a matéria orgânica presente na forma de substância húmica, responsável por conferir cor à água.

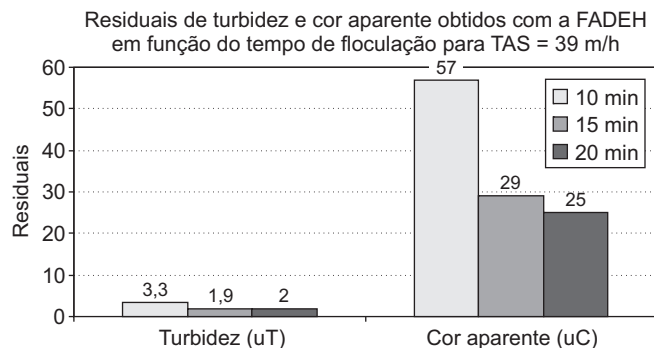
Com relação ao manganês, as condições de flotabilidade dos flocos inorgânicos de dióxido de manganês não foram boas, e o  $t_F$  pareceu não influenciar de maneira significativa a eficiência de remoção do manganês, muito provavelmente por não estar tão fortemente ligado à matéria orgânica como no caso do ferro, conforme observado por Moruzzi (2000).



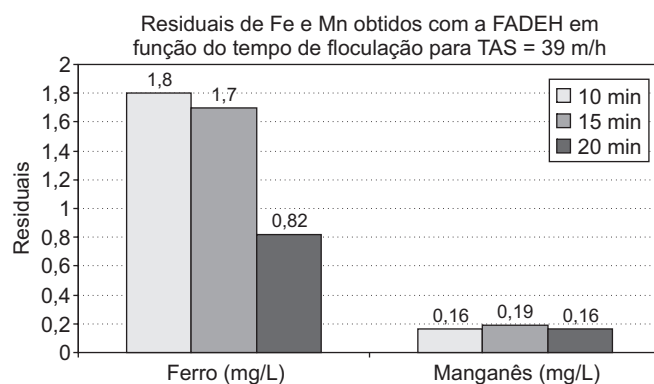
**Figura 9** Residuais de turbidez e cor aparente obtidos com a FADEH. Condições dos ensaios: 30  $mgFeCl_3 \cdot L^{-1}$ , 2,7  $mgCl_2 \cdot L^{-1}$ , pH = 6,3,  $G_F = 60$   $s^{-1}$ ,  $P_S = 450 \pm 10$  kPa,  $R = 10\%$ , TAS = 13 m/h.



**Figura 10** Residuais de Fe digerido e Mn digerido obtidos com a FADEH. Condições dos ensaios: 30  $mgFeCl_3 \cdot L^{-1}$ , 2,7  $mgCl_2 \cdot L^{-1}$ , pH = 6,3,  $G_F = 60$   $s^{-1}$ ,  $P_S = 450 \pm 10$  kPa,  $R = 10\%$ , TAS = 13 m/h.



**Figura 11** Residuais de turbidez e cor aparente obtidos com a FADEH. Condições dos ensaios:  $30 \text{ mgFeCl}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $2,7 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{pH} = 6,3$ ,  $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$ ,  $P_S = 450 \pm 10 \text{ kPa}$ ,  $R = 10\%$ ,  $\text{TAS} = 39 \text{ m/h}$ .



**Figura 12** Residuais de Fe digerido e Mn digerido obtidos com a FADEH. Condições dos ensaios:  $30 \text{ mgFeCl}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $2,7 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{pH} = 6,3$ ,  $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$ ,  $P_S = 450 \pm 10 \text{ kPa}$ ,  $R = 10\%$ ,  $\text{TAS} = 39 \text{ m/h}$ .

Os resultados permitiram verificar que o tempo de floculação influenciou de maneira significativa, principalmente, a remoção de cor aparente e de ferro, confirmando a forte ligação desse metal com a matéria orgânica. Com 10 minutos de floculação, a cor residual foi de 57 uC, enquanto o Fe residual foi de 1,8 mg/L; o aumento do  $t_F$  para 20 minutos provocou queda significativa nos residuais, resultando em 25 uC no caso da cor e 0,82 mg/L no caso do ferro.

Ressalta-se que, quando se aplicou  $\text{TAS} = 39 \text{ m/h}$ , foi necessária a aplicação de 20 minutos de floculação para atingir turbidez residual de 2 uT, 25 uC de cor aparente, 0,82 mgFe/L e 0,16 mgMn/L.

Provavelmente, o  $t_F$  de 20 minutos proporcionou condições para a formação de flocos com características de tamanho e/ou superfície (hidrofobicidade, por exemplo) que resultaram em maiores velocidades ascensionais quando comparados aos flocos formados com a aplicação de  $t_F$  de 10 e 15 minutos.

Os ensaios em escala piloto confirmaram a importância do efeito do  $t_F$  na remoção de ferro complexado e demonstraram que a  $\text{TAS}$  de 39 m/h pode ser aplicada para o tratamento da água de estudo. Entretanto, consi-

derando a importância do  $t_F$  e da  $\text{TAS}$  como parâmetros de projeto de unidades de FAD e seus efeitos nas dimensões das unidades, recomenda-se a confirmação desses valores para cada caso em particular.

À luz dos resultados apresentados pode-se pensar em uma nova estratégia para a remoção de metais complexados em estações de tratamento de água para abastecimento (ETA) onde o foco passa da oxidação química para a adequação das condições de mistura visando às unidades de separação sólido-líquido com ênfase na FAD.

## Conclusões

- A otimização da separação sólido-líquido através das condições de floculação são determinantes na remoção de metais complexados e se apresentam como alternativa aos processos que enfatizam a oxidação química.
- O tempo de floculação foi importante parâmetro na remoção de ferro na presença de matéria orgânica e foram necessários 20 minutos para o tratamento dessa água de estudo em escala de batelada (turbidez = 18 uT, cor aparente = 180 uC, Fe = 3,5 mg/L e Mn = 0,20 mg/L).



- Os ensaios com a unidade piloto FADEH comprovaram a necessidade de 20 minutos de floculação para a remoção de ferro tanto para TAS = 13 m/h quanto para 39 m/h.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), pelo suporte na concessão de bolsas e auxílios.

### Referências Bibliográficas

AMATO, T.; EDZWALD, J. K.; TOBIASON, J. E.; DAHLQUIST, J. & HEDBERG, T. DAF<sup>®</sup>Rapide: the integrated approach to dissolved air flotation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE: FLOTATION IN WATER AND WASTEWATER TREATMENT, 4., 2000, Helsinki, Finland. *Proceedings...* Helsinki, Finland: International Water Association – IWA, 2000.

DOMBROSKI, S. A. G.; REALI, M. A. P.; MARCHETTO, M. Método eficiente para o tratamento de água com cor elevada e baixa turbidez. In: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 3., 1996, Gramado-RS. *Anais Eletrônicos...* Gramado: ABES, 1996. v.1, disco.

EDZWALD, J. K.; WALSH, J. P.; KAMINSKY, G. S.; DUNN, H. J. Flocculation and air requirements for dissolved air flotation. *Journal AWWA – Research and Technology*, p. 92-100, Mar. 1992.

EDZWALD, J. K. Principles and applications of dissolved air flotation. *Water Science & Technology*, v. 31, n. 3-4, p. 1, 1995.

EDZWALD, J. K.; TOBIASON, J. E.; AMATO, T.; MAGGI, L. J. Integrating high-rate DAF technology into plant design. *Journal AWWA*, v. 91, n. 12, Dec 1999.

HEINANEN, J.; JOKELA, P.; ALA-PEIJARI, T. Use of dissolved air flotation in potable water treatment in Finland. In: IVES, K. J.; BERNHARDT, H. J. (Eds.). Flotation processes in water and sludge treatment. *Water Science & Technology*, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 225-238, 1995.

KNOCHE, W. R.; BENSCHOTEN; KEARNEY; SOBORSKI; RECKHOW. Kinetics of manganese and iron oxidation by potassium permanganate and chlorine dioxide. *Journal AWWA*, v. 83, n. 6, p. 80-87, Jun. 1991.

PATRIZZI, L. J.; REALI, M. A. P.; MORUZZI, R. B. Water color and iron removal: comparison of flotation and sedimentation techniques. In: MOHAN, R. M. (Ed.). *Research Advances in Water Research 5*. Kerala: Global Research Network Publ., 2004.

REALI, M. A. P. *Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante*. 1991. 373 f, 2 v. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

REALI, M. A. P.; CAMPOS, J. R. Proposição e avaliação de um sistema compacto para tratamento de água utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES, 27., 1992, Natal. *Anais...* Natal-RN: ABES, 1993. v. 2, p. 243-264. REALI, M. A. P.; CAMPOS, J. R. Optimization of colour removal using a batch flotation test. In: WORLD WIDE SYMPOSIUM: POLLUTION IN LARGE CITIES-SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR PLANNING ENVIRONMENTAL QUALITY, 2., 1995, Pádua. *Proceedings...* Venice-Pádua, Itália: ABES/ANDES, 1995. v.1, p. 199-210.

SANTOS, S. P.; REALI, M. A. P. Emprego de uma unidade de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório para remoção de algas em águas de abastecimento. In: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 3., 1996, Gramado-RS. *Anais Magnéticos...* Gramado-RS: ABES, 1997. v. 1, disco.

VAN PUFFELEN, J.; BUIJS, P. J.; NUHN, P. N. A. M.; HIJNEN, W. A. M. Dissolved air flotation in potable water treatment: the Dutch experience. In: IVES, K. J.; BERNHARDT, H. J., (Eds.). Flotation processes in water and sludge treatment. *Water Science & Technology*, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 149-157, 1995.

