

I-139 - REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO EMPREGANDO FILTRAÇÃO ADSORTIVA POR CARVÃO ATIVADO E ZEÓLITA

Clara Gabrieli Peres Marques⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO). Pós-Graduada em Gestão Ambiental na Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Jeanette Beber de Souza⁽²⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto. Mestre e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC/USP). Atualmente é professora associada e chefe do Departamento de Engenharia Ambiental da UNICENTRO. Docente nos programas de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA, UNICENTRO/UEPG) e Ciências Florestais (UNICENTRO).

Henrique Azevedo Silveira⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA, UNICENTRO/UEPG).

Carlos Magno de Souza Vidal⁽⁴⁾

Graduado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de São Carlos. Mestre e Doutor em Engenharia Civil pela EESC/USP. Atualmente é professor adjunto do Departamento de Engenharia Ambiental da UNICENTRO e dos Programas de Mestrado PPGESA e em Ciências Florestais (UNICENTRO).

Giovana Katie Wiecheteck⁽⁵⁾

Engenheira Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Mestre e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Pós-doutorado pela University of North Texas. Atualmente é professora associada na UEPG e docente no PPGESA.

Endereço⁽¹⁾: Rua André Vizinoni, 116 - Jardim Virgínia - Irati - PR - CEP: 84500-000 - Brasil - Tel: +55 (42) 99948-6485 - e-mail: claragpm@hotmail.com

RESUMO

A problemática associada à presença de ferro (Fe) e manganês (Mn) em águas de abastecimento exige atenção voltada à tecnologias mais eficientes na remoção destes metais. A Portaria nº 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde estabelece como valor máximo permitido 0,3 mg.L⁻¹ para Fe e 0,1 mg.L⁻¹ para Mn em águas de abastecimento público. A filtração adsortiva é um método alternativo que emprega materiais adsorventes em leitos filtrantes fixos, como carvão ativado e zeólitas. O objetivo da presente pesquisa foi comparar o desempenho destes materiais na remoção de Fe e Mn de água de abastecimento a partir de unidade de filtração adsortiva de bancada de laboratório, após procedimento de coagulação otimizada com Cloreto de Polialumínio (PAC) e sedimentação. Constatou-se que dentre as condições operacionais testadas a única que contemplou o atendimento aos limites estabelecidos pela Portaria 2.914/11, no que tange ao conjunto de parâmetros cor, turbidez, Fe e Mn, foi o carvão ativado associado à condição de coagulação 24 mg.L⁻¹ de PAC e pH=7,7. Quanto ao emprego das zeólitas cabe mencionar a aplicação do cloro como oxidante do adsorvente previamente à filtração, o que possivelmente provocou a precipitação dos compostos metálicos e alerta sobre a possibilidade de formação de subprodutos como trihalometanos.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de água, Metais, Filtração, Adsorção.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento de água constituem uma das prioridades do saneamento ambiental, tendo em vista a importância da água em quantidade e qualidade adequadas, para o atendimento às necessidades relacionadas ao desenvolvimento social, urbano e industrial das populações. A qualidade das águas destinadas ao abastecimento público e industrial acabam tendo suas propriedades deterioradas, dentre outros fatores, pela presença de metais como o ferro e o manganês, exigindo assim tecnologias adequadas para o tratamento.

Em meio aquoso o ferro aparece em sua forma iônica ou associado a bicarbonatos e cloretos,¹ íon ferroso (Fe^{2+}) em condições de anaerobiose e íon férrico (Fe^{3+}) em pH abaixo de 3, ou na forma de hidróxidos insolúveis em meio aerado.^{2, 3} O manganês, segundo Hem e Maciel, é comum como íon divalente (Mn^{2+}) em pH até próximo a 9, ou como óxidos e hidróxidos em pH superior e na presença de oxidantes, apresentando solubilidade reduzida.^{4, 5} Ainda, ambos os metais podem aparecer complexados à matéria orgânica natural de acordo com o tamanho molecular aparente,⁶ o que aumenta a estabilidade dos metais e consequentemente dificulta a remoção.⁷

A presença destes metais em águas de abastecimento público, seja em função de causas naturais ou antropogênicas, propicia aspectos indesejáveis como alteração de cor, odor, sabor amargo adstringente e aumento de turbidez, levando a rejeição por parte dos consumidores. Pode também ocorrer o desenvolvimento de bactérias ferruginosas, que conferem coloração marrom-amarelada à água e podem levar à ocorrência de obstrução e incrustação em canalizações pelo acúmulo de sedimentos ou lodo. Além desses inconvenientes, provocam o surgimento de manchas em roupas e instalações sanitárias, repercutindo em danos à indústrias.^{8, 9, 10}

O padrão brasileiro de potabilidade da água, a Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde, dispõe como valores máximos permitidos para os parâmetros ferro e manganês, $0,3 \text{ mg.L}^{-1}$ e $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente.¹¹

Visando o atendimento ao padrão brasileiro de potabilidade quanto à remoção desses metais, as companhias de saneamento comumente utilizam o procedimento de precipitação, formando compostos insolúveis, por meio da elevação do pH e aeração, seguido de sedimentação, flotação e/ou filtração. Sobre essa alternativa, Jimenez *et al* afirmam que esse procedimento apresenta alguns inconvenientes como a elevada produção de lodo, alto consumo de alcalinizantes e a necessidade de correção do pH da água previamente à distribuição.¹² Quando a precipitação é proporcionada pelo emprego de agentes oxidantes destacam-se as seguintes desvantagens: custo elevado do ozônio; potencialidade de formação de trihalometanos com o uso do cloro; e geração de outros subprodutos quando do uso do permanganato de potássio, além do fato deste oxidante ser utilizado em geral para baixas concentrações de ferro e manganês.^{5, 6, 13}

Como proposta de tecnologia alternativa recebe destaque a filtração adsortiva, que consiste na modificação ou adaptação do leito filtrante associando material adsorvente ao mesmo. Em relação aos procedimentos convencionais, a filtração adsortiva apresenta vantagens como a menor produção de lodo tóxico, atuação relativamente independente de variações na concentração dos poluentes, possibilidade de regeneração do adsorvente, economia em termos operacionais e apresenta maior eficiência, por permitir a remoção de cátions metálicos ainda que complexados e em baixas concentrações.^{14, 15, 16}

Dentre a diversidade de materiais adsorventes disponíveis no mercado, o carvão ativado e a zeólita recebem destaque na adsorção de ferro e manganês. O carvão ativado é confeccionado a partir de matéria-prima carbonácea submetida ao processo térmico de carbonização, o que leva à formação de um material com área superficial interna bastante desenvolvida, com elevada porosidade.⁹ Zeólitas são aluminossilicatos hidratados sintéticos ou naturais, constituídos por estruturas cristalinas tetraédricas que conferem grande superfície interna ao material, apresentando alta capacidade de troca iônica, catálise e peneira molecular.^{17, 18}

OBJETIVO

Avaliar e comparar a eficiência de carvão ativado granular e zeólitas naturais, como alternativas de meios filtrantes para o emprego da filtração adsortiva em unidade de bancada de laboratório, visando a remoção de ferro e manganês de águas destinadas ao abastecimento público.

MATERIAIS E MÉTODOS

A água utilizada nos ensaios de filtração adsortiva foi preparada a partir de água bruta captada na entrada de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) municipal e adição de solução de Fe(II) e Mn , a concentrações de aproximadamente $3,1 \text{ mg.L}^{-1}$ e $0,6 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente.

A caracterização físico-química das amostras de água foi efetuada segundo metodologia estabelecida pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.³ O pH foi determinado em pHmetro HANNA HI2221, a turbidez em turbidímetro HACH 2100Q, a cor verdadeira e aparente foram determinadas em Espectrofotômetro UV-Vis HACH DR 6000. As concentrações de ferro e manganês foram avaliadas em Espectrômetro de Absorção Atômica (FAAS) (*Varian*, modelo *SpectraAA-220*) em chama ar-acetileno equipado com lâmpadas de cátodo oco como fonte de radiação e lâmpada de deutério para correção de fundo. O comprimento de onda e corrente utilizados foram 248,3 nm e 5 mA para Fe e 279,5 nm e 5 mA para Mn, respectivamente. Para a realização das análises, todas efetuadas em triplicata, foram utilizadas curvas analíticas contendo os padrões dos metais de interesse. O procedimento metodológico experimental a partir da caracterização da água seguiu a sequência esquemática representada na figura 1.



Figura 1: Sequencial de atividades desenvolvidas no decorrer da pesquisa de filtração adsorviva empregando carvão ativado e zeólitas para remoção de Fe e Mn.

Os materiais adsorventes utilizados foram o carvão ativado granular (2,4 a 2,9 mm) de origem mineral betuminosa e a zeólita natural do tipo Clinoptilolita com granulometria compreendida entre 0,4 e 1,0 mm. Na etapa de preparação os adsorventes foram submetidos à lavagem com a finalidade de remover potenciais impurezas provenientes dos processos de fabricação e ativação dos mesmos.

ENSAIOS DE FILTRAÇÃO ADSORTIVA

Previamente à filtração adsorviva a água do estudo foi submetida às etapas de coagulação, floculação e sedimentação em equipamento *Jartest PoliControl FlocControl III* (10 a 600 rpm). Neste contexto, visando otimizar a remoção de cor verdadeira e turbidez, parâmetros estes relacionados à presença de Fe e Mn, foram desenvolvidos 10 ensaios para construção de diagramas de coagulação. Para isto adotou-se diferentes dosagens de coagulante (Cloro de Polialumínio (PAC) entre 3 e 30 mg.L⁻¹), velocidades de sedimentação 0,5; 1,5 e 3,0 cm.min⁻¹) e pH de coagulação (6-10).¹

Com base nos resultados de otimização de turbidez fornecidos pelos diagramas de coagulação, as três melhores condições combinadas de pH de coagulação e dosagem de coagulante foram reproduzidas em triplicata e submetidas à filtração em cada um dos adsorventes após o término da sedimentação. A filtração ocorreu em leito filtrante de camada única com altura de 15 cm e taxa de filtração em fluxo descendente (entre 60 e 100 m³.m⁻².d⁻¹), durante 20 min.¹

As zeólitas foram submetidas à oxidação previamente ao seu uso, procedimento requerido para oxidar o manganês adsorvido na camada de óxido de manganês que compunha o material comercial utilizado. Assim, foi adicionada solução de hipoclorito de sódio às amostras de água após a sedimentação a fim de se obter concentrações entre 1 a 2 mg.L⁻¹ de cloro residual livre. Além disto, de forma que a concentração de cloro residual livre após a filtração permanecesse com valor mínimo de 0,1 mg.L⁻¹. A concentração de cloro residual foi determinada empregando o *Kit CHEMetrics Vacu-vials CLORO K-2513*.

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Com o propósito de se determinar o material adsorvente com melhor desempenho para adsorção de Fe e Mn da água de estudo, complementarmente à análise gráfica, os dados de eficiência obtidos para todas as condições

de tratamento foram submetidos à verificação de homogeneidade de variância pelo teste de *Bartlett*, seguido da análise de variância (ANOVA, $\alpha = 0,05$) e teste de *Tukey* para visualizar e discriminar possíveis diferenças estatísticas entre os tratamentos adotados. Aqueles que não atenderam à premissa tiveram a variância verificada pelo teste de *Kruskal-Wallis* ($p \leq 0,05$), já que este não enquadra-se como paramétrico.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores ótimos de turbidez remanescentes obtidos a partir dos diagramas de coagulação, correspondentes à velocidade de sedimentação de $0,5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Relação dos valores de turbidez remanescentes obtidos sob as condições operacionais ótimas adotadas para coagulação, floculação e sedimentação.

Condição	Dosagem coagulante ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH de Coagulação	Turbidez remanescente (UNT)
I	15	7,2	1,4
II	21	7,2	0,9
III	24	7,7	1,1

A seleção se deu em função das condições que apresentaram-se apropriadas para obtenção de água com turbidez inferior a 3 UNT, valor usualmente adotado como limite máximo para que a água decantada seja submetida à etapa da filtração, comparação entre demais condições que não apresentaram diferenças representativas para a variável turbidez remanescente e que concomitantemente possibilitariam, no contexto de possível operação em escala plena, gerar menor demanda de produtos químicos no tratamento e a subsequente menor produção de lodo na unidade de decantação.

A figura 2 apresenta os resultados de eficiência média de remoção de parâmetros de qualidade da água após filtração adsorptiva empregando carvão ativado, com taxa e tempo de filtração constantes.

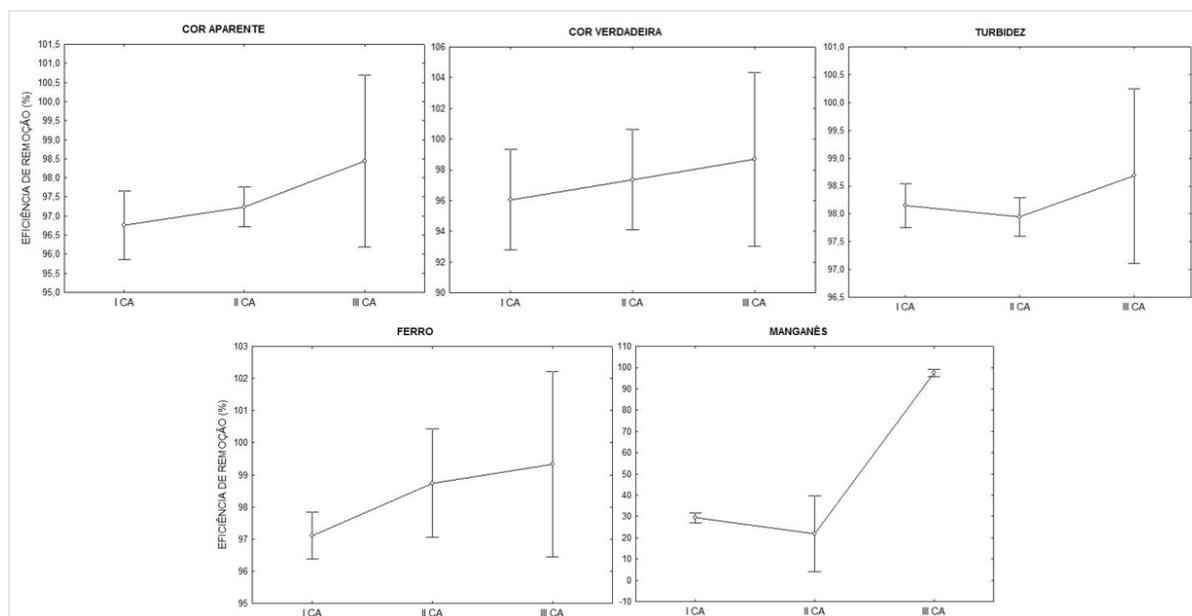


Figura 2: Eficiência média na remoção de parâmetros de qualidade da água por meio de filtração adsorptiva com carvão ativado após coagulação floculação e decantação e respectivos erros padrão.

Verificou-se pequena variação em termos de eficiência média de remoção dos parâmetros cor, Fe e turbidez. O erro padrão relativo à média das triplicatas sugere ausência de diferença estatística quando comparados os três tratamentos empregados (I CA, II CA e III CA), o que indicaria a pequena contribuição de maiores dosagens de coagulante na remoção destes parâmetros. No entanto, quanto a remoção do metal Mn, notou-se aparentemente que a terceira condição de coagulação seguida da filtração em carvão (III CA: $24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PAC e

pH=7,7) foi a que propiciou melhor desempenho. A variação observada em termos de remoção deste metal para as diferentes condições, aparentemente não está relacionada a fatores intervenientes diretamente no processo de adsorção, como temperatura, pH, velocidade de agitação, tamanho das partículas, afinidade química entre adsorbato e adsorvente, área superficial do sólido e concentração inicial do adsorbato,^{15, 19, 20} que encontravam-se padronizados, porém, justamente às condições de coagulação. Assim cabe ressaltar a influência dos procedimentos de coagulação, floculação e sedimentação na remoção dos metais, o que recomenda o desenvolvimento de pesquisas voltadas à análise o desempenho particular destes.

Na figura 3 são apresentados os resultados de eficiência média de remoção de parâmetros de qualidade da água após filtração adsortiva empregando zeólitas.

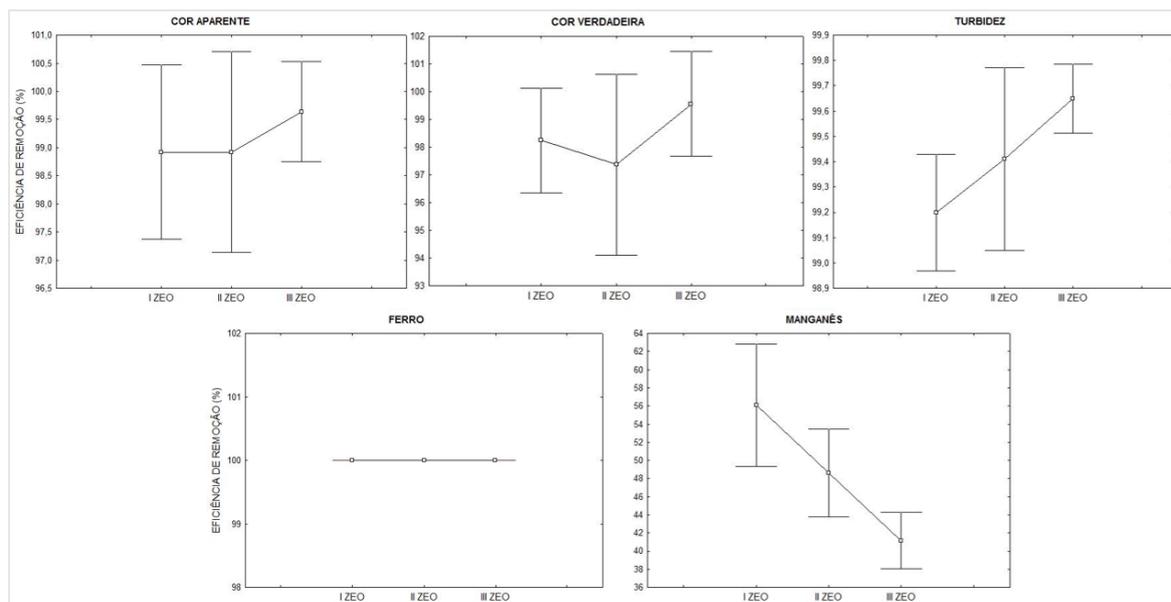


Figura 3: Eficiência média na remoção de parâmetros de qualidade da água por meio de filtração adsortiva com zeólitas após coagulação floculação e decantação e respectivos erros padrão.

Em relação à eficácia resultante do emprego de zeólitas na remoção de cor, tanto aparente como verdadeira, e de turbidez, assim como no caso do carvão, destacaram-se as médias para a condição III (24 mg.L⁻¹ de PAC e pH=7,7), no entanto o erro padrão indica ausência de diferença estatística quando comparados os três tratamentos empregados. O mesmo ocorre com o Fe, para o qual as médias foram as mesmas, mostrando remoção total desse metal. No caso do manganês houve maior influência no tratamento quando do uso da condição I (15 mg.L⁻¹ de PAC e pH=7,2), porém, o erro padrão evidenciou igualdade estatística para as três condições.

Torna-se importante ressaltar o procedimento de adição de cloro à água decantada antes da entrada no filtro com zeólitas, que provavelmente, provocou a precipitação de partículas oxidadas de ferro e manganês, permitindo a remoção desses metais também na forma precipitada no leito filtrante e não apenas por adsorção como cabe às frações solúveis. Além disso, o emprego do cloro leva à possibilidade de formação de subprodutos como trihalometanos, como verificado por Dantas *et al.* que avaliaram a técnica da pré-oxidação⁶ e por Silva *et al.* que empregaram interoxidação com cloro seguida de adsorção em carvão ativado granular em águas de reservatório.²¹

Paralelamente, Taffarel e Rubio destacaram a importância da submissão das zeólitas naturais ao processo de precipitação de óxido de manganês como camada de revestimento depositada sobre o material, o que lhes confere maior capacidade adsortiva. Nesta pesquisa, desenvolvida para remoção de Mn²⁺ a oxidação do material zeolítico foi efetuada com solução sintética aquosa de ácido clorídrico, o que pode ser uma proposta alternativa para a solução da problemática destacada em relação à formação de subprodutos.²²

Tendo como referência a legislação vigente, Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde, todas as condições de tratamento atenderam às exigências quanto aos parâmetros cor aparente remanescente (VMP: 15 uC) e

concentração de ferro (VMP: 0,3 mg.L⁻¹), independentemente do material adsorvente empregado. Sobre a turbidez desejável (VMP: 0,5 UNT), dentre as condições testadas para carvão ativado, apenas a terceira (24 mg.L⁻¹ de PAC e pH=7,7) se fez satisfatória, enquanto para a zeólita todas atenderam ao disposto na referida legislação. Em relação à concentração final de manganês apenas a terceira condição com carvão atendeu ao exigido (VMP: 0,1 mg.L⁻¹).

Cabe ressaltar o adsorvente zeólita pela total remoção de ferro, desempenho similar ao encontrado por Alves ao adicionar zeólitas em filtros de areia (proporção de 1:3) obtendo eficiência média de 98% de remoção de ferro bivalente de águas de irrigação.²³ Todavia, para o conjunto de parâmetros de qualidade da água avaliados, destacou-se o carvão ativado associado à terceira condição de coagulação. Tal desempenho corrobora com evidências de pesquisa efetuada por Barros ao compará-lo à argila e ao carvão mineral oxidado na remoção de íons metálicos em água.²⁴ Ainda Dantas *et al* encontraram maior eficiência na remoção de Fe e Mn, ainda que complexados com material orgânico, com aplicação da filtração em carvão ativado granular após os procedimentos de coagulação e filtração em areia, quando comparado à ensaios isolados de pré-oxidação; ensaios de coagulação e filtração em areia; e associando ambos.⁶

No entanto, o destaque do carvão ativado sobre a zeólita nesta pesquisa contrasta resultado obtido por Vistuba na remoção dos metais em questão, que verificou melhor desempenho de material zeolítico (99% de remoção de Fe e 83% de Mn) perante adsorvente carbonáceo.¹⁰

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Por meio do teste de *Bartlett* foi verificado que as variáveis Mn e turbidez não atenderam à premissa de homogeneidade de variância. Desta forma a análise de variância ($p \leq 0,05$), realizada para os demais fatores de interesse, indicou que a remoção de Fe ($F_{5, 12} = 12,3$) e de cor aparente ($F_{5, 12} = 10,8$) foram estatisticamente influenciadas pelos tratamentos adotados, o que não havia sido evidenciado nas interpretações gráficas. O teste de *Tukey* possibilitou afirmar as condições de coagulação associadas à zeólita como mais influentes na remoção de cor aparente, por apresentarem as maiores médias e não haver diferença estatística significativa entre elas. Para remoção de Fe todas as condições de tratamento com exceção da primeira condição de coagulação em conjunto com o carvão ativado (I CA: 15 mg.L⁻¹ PAC e pH=7,2), se mostraram eficazes em termos estatísticos.

O teste de *Kruskal-Wallis* ($p \leq 0,05$) determinou influência significativa das diferentes condições de tratamento sobre a remoção de Mn ($p < 0,01$), fato este de acordo com o verificado em termos de eficiência média em análise gráfica efetuada anteriormente para o carvão ativado. O teste ainda verificou significância sobre a remoção de turbidez ($p = 0,01$), o que, no entanto não havia sido evidenciado em análise gráfica.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

Nesta pesquisa verificou-se eficácia de ambos os adsorventes na remoção de ferro, cor e turbidez. O carvão ativado associado à maior dosagem de coagulante utilizado (24 mg.L⁻¹) resultou no melhor desempenho na remoção de manganês, conferindo inclusive, a conformidade dos parâmetros físico-químicos avaliados aos limites estabelecidos pela Portaria Padrão de Potabilidade do Ministério da Saúde nº 2.914/2011. O emprego da zeólita não permitiu o atendimento à referida legislação em termos de concentração residual de manganês.

Sugerem-se, em trabalhos futuros, avaliações voltadas à possível complexação dos metais ferro e manganês com a matéria orgânica e seria válida a verificação do efetivo mecanismo de adsorção em ambos os adsorventes, em função da predominância do procedimento de filtração dos metais estudados, passíveis de precipitação. Recomendam-se ainda ensaios em escala piloto visando a aplicação da técnica em escala plena.

Tendo conhecido e relatado tais questionamentos não cabe indicar o melhor material adsorvente para a remoção de ferro e manganês.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária e Sanepar pelo auxílio financeiro à pesquisa por meio da Chamada 09/2014, Programa Paranaense de Pesquisas em Saneamento Ambiental (PPPSA). À Fundação Araucária pelo apoio financeiro para participação no evento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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: RIMA, 2002. 237 p.
2. O'NEIL, P. *Major elements in the earth's crust - Iron. Environmental chemistry*. 2. ed. New York: Chapman e Hall, 1994. p. 151-168.
3. APHA/AWWA/WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20. ed. Washington, 1998.
4. HEM, J. D. *Chemical Factors that Influence the Availability of Iron and Manganese in Aqueous Systems. Geological Society of America Bulletin*, v. 83, p. 443-450, 1972.
5. MACIEL, S. E. L. Avaliação da adsorção de manganês na zeólita sintética ZSM-5 antes e após o seu uso como catalisador de craqueamento de petróleo. 2012. Dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental - Universidade Federal de Ouro Preto, 2012.
6. DANTAS, A. D. B. *et al.* Remoção de cor, de ferro e de manganês em água com matéria orgânica dissolvida por meio da pré-oxidação, coagulação, filtração e adsorção em carvão ativado granular. *Revista DAE*, n. 186, p. 46-55, 2011.
7. MORUZZI, R. B., REALI, M. A. P. Oxidação e remoção de ferro e manganês em águas para fins de abastecimento público ou industrial – uma abordagem geral. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 4, n. 1, p. 29-43, 2012.
8. DEZUANE, J. *Handbook of drinking water quality*. 2. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1997.
9. DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D. B. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 2. ed. São Carlos: RIMA, 2005. 1600 p.
10. VISTUBA, J. P. Remoção de ferro e manganês de água de abastecimento por meio de filtração adsorviva. 2010. Dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
11. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, Seção 1, 04 de janeiro de 2012, p. 43-49.
12. JIMENEZ, R. S., DAL BOSCO, S. M., CARVALHO, W. A. Remoção de metais pesados de efluentes aquosos pela zeólita natural escolecita: Influência da temperatura e do pH na adsorção em sistemas monoelementares. *Química Nova*, v. 27, p. 734-738, 2004.
13. SILVA, A. M. Remoção do manganês de efluentes industriais utilizando calcário. 2007. Dissertação de mestrado em Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.
14. COSTA, C. A., “Sorção de Íons Cobre, Níquel e Zinco com o Rejeito do beneficiamento de Carvões e outros Matérias Alternativos”. 1998. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.
15. KATSOYIANNIS, I. A., ZOUBOULIS, A. I. *Removal of Arsenic from Contaminated Water Sources by Sorption onto Iron-oxide-coated Polymeric Materials. Water Research*, v.36, p. 5141-5155, 2002.
16. MADEIRA, V.S. Utilização de carvão adsorvente para a remoção de íons ferro em águas naturais. 2003,. Dissertação de mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
17. LUZ, A. B. “Zeólitas: Propriedades e Usos Industriais”. *Série Tecnologia Mineral*, n. 55, Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1995.
18. MELO, C. R. Síntese de zeólita tipo 5a a partir de caulim para adsorção de metais pesados de soluções aquosas. 2009. Dissertação de mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
19. MELLAH, A., CHEGROUCHE, S. *The Removal of Zinc from aqueous solutions by natural bentonite. Water Research*, v. 31, n. 3, p. 621-629, 1997.
20. MURANAKA, C. T. Combinação de adsorção por carvão ativado com processo oxidativo avançado (POA) para tratamento de efluentes contendo fenol. 2010. Tese de doutorado em Engenharia Química - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
21. SILVA, G. G. *et al.* Tratamento de água de reservatórios por dupla filtração, oxidação e adsorção em carvão ativado granular. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 71-80, 2012.

22. TAFFAREL, S. R.; RUBIO, J. *Removal of Mn²⁺ from aqueous solution by manganese oxide coated zeolite. Minerals engineering*, v. 23, p. 1131-1138, 2010.
23. ALVES, D. N. B. Remoção de ferro em água de irrigação através de filtragem em areia e zeólita. 2008. Tese de doutorado em Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Lavras, 2008.
24. BARROS, A. R. B. Remoção de íons metálicos utilizando diversos adsorventes. 2001. Dissertação de mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.