

I-253 – EFEITO DA OXIDAÇÃO QUÍMICA E SUA INTERFERÊNCIA NO PROCESSO DE ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO EM PÓ

Tássia Brito Andrade⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Sergipe (UFS). Mestranda em Hidráulica e Saneamento pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).

Sidney Seckler Ferreira Filho⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela EPUSP. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EPUSP.

Endereço⁽¹⁾: Av. Prof. Almeida Prado, 83, trav. 2 - Cidade Universitária - São Paulo - SP - CEP 05508-900 – Brasil – Tel: (11) 94952-4461 – email: tassia.brito@usp.br

RESUMO

Gosto e odor em águas de abastecimento são motivos de reclamações dos consumidores, que muitas vezes duvidam da sua potabilidade. Entretanto, as origens e a sazonalidade da ocorrência dessa problemática dificultam o seu controle. Gosto e odor de terra e/ou mofo são os mais frequentes, sendo causados pelos compostos orgânicos 2-metil-isoborneol (MIB) e Geosmina produzidos por microrganismos presentes na água bruta. Processos de adsorção com carvão ativado em pó (CAP) apenas ou associado à aplicação de um agente oxidante são os mais comumente utilizados para contornar esse problema. Sabe-se que o uso do cloro provoca prejuízos na adsorção com CAP, o que motiva estudos a respeito da aplicação de outros agentes oxidantes, como o permanganato de potássio (KMnO_4). Com os objetivos de avaliar a remoção de gosto e odor em águas de abastecimento com aplicação de KMnO_4 conjuntamente ao carvão ativado e compreender como ocorre a interação entre o oxidante e o CAP, foram realizados ensaios de laboratório variando-se as dosagens desses dois compostos para o tratamento. Verificou-se que o permanganato de potássio causou prejuízos menores na adsorção do que os gerados pela adição do cloro. Constatou-se também que, apesar de o KMnO_4 não exercer grande influência na remoção dos compostos MIB e Geosmina, ele é consumido (cerca de 40 a 60% para concentrações elevadas de CAP) durante o tratamento e, inclusive, seu consumo segue a mesma tendência que a remoção dos poluentes. Ou seja, quanto maior a dosagem de carvão ativado em pó, maior é o consumo do oxidante e a remoção dos poluentes, principalmente a Geosmina. Os ensaios cinéticos indicaram que a oxidação do permanganato obedece uma cinética de primeira ordem com constantes proporcionais às dosagens de CAP aplicadas e que tal consumo de KMnO_4 se dá em sua maioria em torno dos primeiros 30 minutos de tempo de contato, demonstrando que não há necessidade de períodos de contato longos.

PALAVRAS-CHAVE: Permanganato de potássio, carvão ativado em pó, oxidação química, adsorção, gosto e odor.

INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios no tratamento de águas de abastecimento é a minimização de problemas de gosto e odor. Uma vez que estes tendem a apresentar elevada sazonalidade e diferentes origens, a adoção das suas técnicas de controle tem sido muito mais encarada como uma arte do que ciência (Lalezary et al., 1988, Zamyadi et al., 2015). Dentre os problemas de gosto e odor mais observados pelos consumidores, os de maior dificuldade de remoção estão normalmente associados a compostos orgânicos originários a partir de fontes biogênicas (Smith, 2011; Zamyadi et al., 2015). É sabido que inúmeros microrganismos, notadamente certas algas, especialmente as cianobactérias (algas azuis), bem como os actinomicetos são responsáveis pela produção de certos compostos orgânicos resultantes do seu metabolismo que, sob certas condições ainda não totalmente conhecidas, são liberados para a fase líquida (Juttner e Watson, 2007; Watson et al., 2008; Zamyadi et al., 2015). Dentre os compostos orgânicos produzidos por microrganismos, os mais comumente identificados em águas de abastecimento como sendo responsáveis por problemas de odor e sabor são os compostos 2-metil-isoborneol (MIB) e Geosmina, que conferem um gosto de terra, gramíneo ou mofo à água. (Edzwald, 2011; Crittenden et al., 2012; Zamyadi et al., 2015; Su et. al 2015).

Atualmente, as tecnologias de tratamento mais comumente empregadas para a solução de problemas de gosto e odor em águas de abastecimento tem sido a utilização de processos de adsorção em carvão ativado em pó

(CAP) (Srinivasan e Sorail, 2011; Matsui et al. 2015) e eventualmente combinado com diferentes agentes oxidantes, podendo-se citar o uso do cloro, dióxido de cloro, permanganato de potássio e ozônio (Newcombe e Cook, 2002; Srinivasan e Sorail, 2011). A dosagem de CAP em estações de tratamento de água pode ser efetuada em diferentes pontos, conforme apresentado na Figura 1.

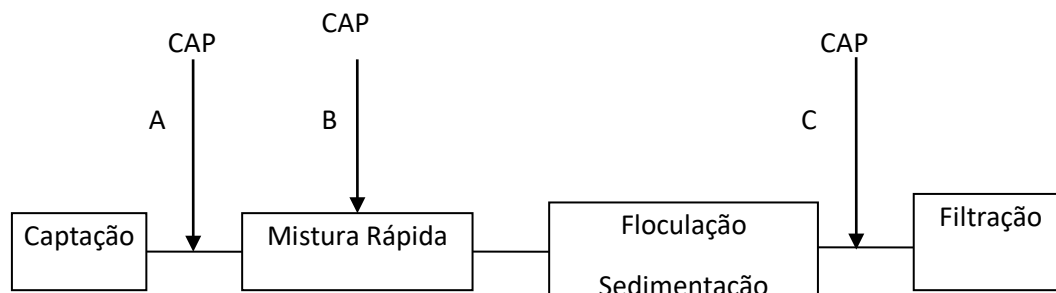


Figura 1: Pontos de aplicação de carvão ativado em pó no tratamento de águas de abastecimento.

Existem, evidentemente, vantagens e desvantagens entre cada um deles e a sua definição para uma ETA específica é função da sua concepção, associada à cinética do processo de adsorção. Enquanto, do ponto de vista cinético do processo de adsorção, o melhor local de aplicação do CAP possa ser na captação (ponto A), é possível que, dependendo das características da água bruta, outros compostos orgânicos, além daqueles causadores de odor e sabor, sejam adsorvidos pelo CAP reduzindo, desta forma, a sua capacidade de adsorção. Por outro lado, caso a captação seja muito próxima da ETA, a vantagem de sua aplicação neste ponto pode ficar comprometida. A aplicação do CAP imediatamente antes da adição do coagulante (ponto B) pode reduzir a cinética do processo de adsorção pela provável precipitação do hidróxido metálico em sua superfície externa (Edzwald, 2011).

De acordo com Sontheimer et al., (1988), o melhor ponto de aplicação do CAP seria após os decantadores e antes do processo de filtração (ponto C). Isto porque a competição de prováveis compostos orgânicos de origem natural que pudessem ser adsorvidos no CAP seria minimizada através de sua remoção no processo de coagulação por mecanismos de coprecipitação e, também, porque não haveria a interferência dos flocos do hidróxido metálico incorporados às partículas de CAP no processo de adsorção. No entanto, esta concepção de sistema de dosagem de CAP é viável apenas quando do projeto de novas ETA's uma vez que as já existentes dificilmente teriam condições de garantir um tempo de contato adequado entre o CAP e a fase líquida, bem como em muitas delas seria inexecutável a construção de um sistema de dosagem de CAP em um ponto de aplicação que é, muitas vezes, de difícil acesso a novas tubulações, acessórios e instalações.

Como o ponto mais comum para a adição de CAP em estações de tratamento de água é na chegada da água bruta, e considerando ser muito comum a aplicação de diferentes agentes oxidantes na forma de pré-oxidação, existe a possibilidade de que o processo de adsorção em CAP possa ser influenciado por eventuais concentrações residuais do agente oxidante na fase líquida (Srinivasan e Sorail, 2011; Zhang et al., 2013). Embora os efeitos do cloro livre e sua interferência no processo de adsorção sejam bem conhecidos, ainda não foram devidamente avaliados o efeito da adição do permanganato de potássio no processo de adsorção em CAP.

OBJETIVO

Uma vez que o controle de gosto e odor em águas de abastecimento pode envolver a necessidade de adição de CAP e diferentes agentes oxidantes na forma de pré-oxidação, este trabalho teve por objetivo:

- Avaliar a interferência do permanganato de potássio aplicado na forma de pré-oxidação no processo de adsorção em CAP, mais especificamente, na remoção de MIB e Geosmin.
- Efetuar uma comparação entre o cloro livre e o permanganato de potássio e seus efeitos na remoção de MIB e Geosmin por processos de adsorção em CAP.

METODOLOGIA UTILIZADA

Água bruta empregada nos ensaios experimentais da fase 1

A água bruta utilizada na investigação experimental é proveniente do reservatório do Guarapiranga e abastece integralmente a Estação de Tratamento de Água José Rodolfo Costa e Silva (ETA JRCS), a qual é operada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e está localizada na região metropolitana de São Paulo (RMSP).

A escolha do Reservatório do Guarapiranga se justifica pelos seguintes fatos:

- Trata-se de um manancial com alto grau de eutrofização e sujeito a problemas sazonais de gosto e odor.
- É o segundo maior manancial da RMSP, respondendo por 40% da água potável que abastece a RMSP. A vazão do sistema produtor é de cerca de 15 m³/s.
- Dispõe de um sistema de aplicação de CAP e permanganato de potássio instalado junto à tomada de água bruta objetivando a remoção de ferro e manganês.

Água sintética empregada nos ensaios experimentais das fases 2 e 3

A água utilizada nos ensaios das fases 2 e 3 foi produzida em laboratório com água ultrapura (milli-Q), cloreto de sódio (NaCl), cloreto de cálcio (CaCl₂) e bicarbonato de sódio (NaHCO₃) encontrados no laboratório de saneamento da Escola Politécnica da USP. A adição de tais sais foi a suficiente para se atingir uma água sintética de pH entre 7.0 e 8.0, alcalinidade em torno de 100 mg/L CaCO₃ e dureza entre 30 e 40mg/l CaCO₃, características que se assemelham a águas brutas utilizadas nas estações de tratamento.

Carvão ativado em pó, permanganato de potássio e padrões de MIB e Geosmina

Foram utilizados carvões ativados em pó de três marcas apresentadas na Tabela 1. Para a etapa de oxidação, utilizou-se permanganato de potássio encontrado no laboratório de saneamento da EPUSP. Já os padrões de MIB e Geosmin (CRM47525) foram fornecidos pela Sabesp com concentração de aproximadamente 100 µg/mL, assim como a microsseringa utilizada para adição dos micropoluentes na água.

Tabela 1: Fabricante, marcas comerciais e matéria prima dos carvões ativado em pó utilizados nos ensaios cinéticos de adsorção combinados com agentes oxidantes.

| FABRICANTE | MARCA COMERCIAL | PROCEDÊNCIA | MATÉRIA PRIMA |
|------------|-----------------|-------------|-----------------------|
| CALGON | WPH | Importado | Mineral (Betuminoso) |
| CARBOMAFRA | CAG 118-90 | Nacional | Vegetal (Nó de pinho) |
| PAIOL | EB-10 | Nacional | Vegetal (Nó de pinho) |

Ensaio - Fase 1: Comparação entre aplicação de cloro e de permanganato de potássio como oxidantes conjuntamente ao CAP, de marcas diferentes, para remoção de MIB e GEOSMINA.

Os ensaios foram conduzidos em escala de jar-test tendo-se avaliado a ação do cloro e do permanganato de potássio, separadamente. Em função das características da captação da água bruta foram definidos os pontos de aplicação dos agentes oxidantes e dos CAPs, bem como os respectivos tempos de contato exigidos a fim de que o comportamento hidráulico dos ensaios de “jar-test” representasse o mais fielmente possível o comportamento hidráulico na adutora de água bruta. Os ensaios cinéticos foram conduzidos com três marcas comerciais de CAP, sendo que a sua dosagem foi mantida fixa em todos os ensaios (20 mg/l), e variando a dosagem de agente oxidante aplicado.

Inicialmente, a rotação do sistema de agitação foi acertada para um valor entre 120 e 125 rpm, de modo que fosse mantida a similaridade entre o comportamento hidráulico do escoamento no jarro de “jar-test” e na adutora de água bruta. O parâmetro de equivalência escolhido foi o gradiente de velocidade. Uma vez acertada a rotação do sistema de agitação do equipamento de “jar-test”, era efetuada a adição simultânea dos volumes de solução do agente oxidante empregado e acionava-se o cronômetro. Após oito (8) minutos de tempo de contato, efetuava-se a coleta de uma amostra de água bruta para a determinação da concentração residual do agente oxidante na fase líquida. No tempo igual a nove (9) minutos, efetuava-se a aplicação da suspensão de

CAP. As coletas de água bruta foram efetuadas nos tempos de contato iguais a 15 e 40 minutos ou 30 e 60 minutos, sendo esta também simultânea em todos os jarros. O volume coletado era da ordem de 100 ml. Imediatamente após a coleta das amostras de água bruta em um tempo pré-determinado, procedia-se a sua filtração em membrana com abertura dos poros de 0,45 μm . O filtrado proveniente de cada amostra coletada simultaneamente em todos os jarros em um tempo pré definido era disposto em duplicata em frascos de cromatografia para posterior análise das concentrações de MIB e Geosmina na fase líquida.

Após 60 minutos de tempo de contato, efetuava-se a coleta da última amostra de água bruta mais o CAP, desligava-se o sistema de agitação.

Ensaio – Fase 2: Aplicação de KMnO_4 e CAP para diferentes doses de CAP na remoção de MIB e GEOSMIN

Semelhantemente à fase 1, os ensaios foram realizados no aparelho de “jar-test”. Nesta etapa, no entanto, não foi utilizada a água bruta, que foi substituída pela água sintética. Outra diferença consiste no fato de que nesse momento não se fez necessário permitir um tempo de nove (9) minutos de oxidação com KMnO_4 antes da adição do CAP, pois o objetivo agora era verificar a interação entre o oxidante e o carvão ativado em pó, agora em diferentes dosagens, e que conseqüências isso traria para a remoção dos poluentes causadores de gosto e odor. Vale ressaltar que para essa fase foi adotado apenas o CAP da marca CALGON.

Dessa forma, uma vez acertada a rotação do sistema de agitação do equipamento de “jar-test”, eram efetuadas as adições simultâneas dos volumes de solução do agente oxidante empregado e da suspensão de CAP, seguidas do acionamento do cronômetro. A dosagens de KMnO_4 aplicadas foram de 0, 1, 2 e 4 mg/L combinadas com dosagens de CAP que variaram de 0, 5, 10, 20, 30 e 40 mg/L.

Ao final de 30 min, era coletada uma amostra da ordem de 200 mL de cada jarro, volume do qual se utilizava 100 mL para o ensaio de DPD, a fim de se obter o residual do oxidante. Ao volume de amostra restante, cerca de 100 mL, imediatamente após sua coleta, adicionava-se uma solução de tiosulfato de sódio para precipitar o KMnO_4 em excesso e em seguida, procedia-se a sua filtração em membrana com abertura dos poros de 0,45 μm . O filtrado proveniente de cada amostra era disposto em duplicata em frascos de cromatografia para posterior análise das concentrações de MIB e Geosmina na fase líquida. Tal análise era realizada pela Sabesp. Também eram enviadas para Sabesp amostras da água sintética antes da adição dos poluentes, como controle.

Ensaio – Fase 3: Ensaio cinéticos em água sem poluentes

Assim como na fase 2, para os ensaios cinéticos, a água utilizada foi a sintética, o CAP da marca CALGON e as dosagens de oxidante aplicadas foram as mesmas (1, 2 e 4 mg/L). Para cada dose de permanganato, aplicou-se uma dosagem de carvão, que variou entre 10, 20 e 40 mg/L. Sendo realizados, portanto, nove (9) ensaios com duração de duas horas cada. Para cada ensaio utilizou-se um volume de água de 1,5 L em um béquer de 2L sob a agitação do agitador magnético. Desse volume, coletavam-se amostras de 100 mL para o ensaio de DPD nos tempos 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 min.

RESULTADOS OBTIDOS

Resultados da Fase 1

As Figuras 2 e 3 apresentam os valores de MIB na água bruta para os ensaios cinéticos de adsorção conduzidos com a aplicação de cloro em diferentes dosagens, antecedido de nove minutos da aplicação do CAP.

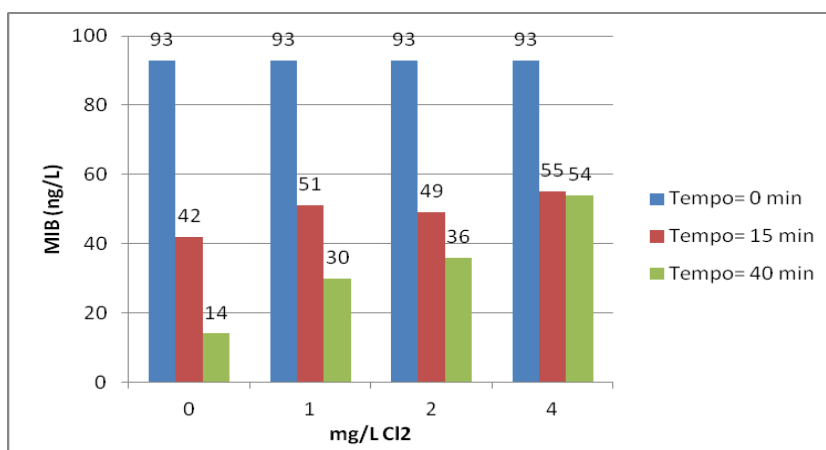


Figura 2: Concentração de MIB na água bruta com o CAP (20mg/L) da marca CALGON em função da dosagem de cloro aplicado para diferentes tempos de contato

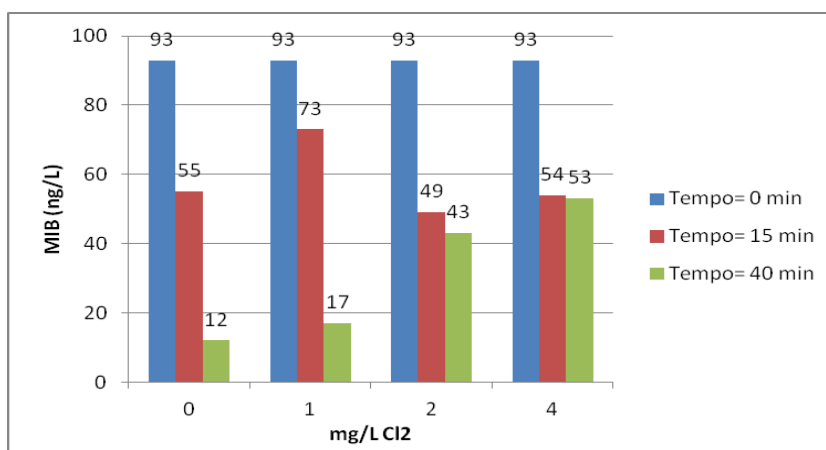


Figura 3: Concentração de MIB na água bruta com o CAP (20mg/L) da marca CARBOMAFRA em função da dosagem de cloro aplicado para diferentes tempos de contato

As Figuras 4 e 5 apresentam os valores das concentrações de MIB na água bruta para os ensaios cinéticos de adsorção conduzidos com a aplicação do permanganato de potássio em diferentes dosagens, antecedido de nove minutos da aplicação do CAP.

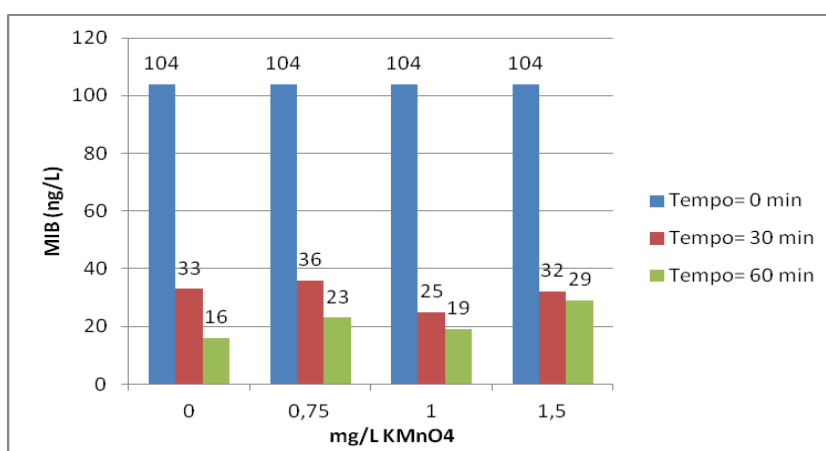


Figura 4: Concentração de MIB na água bruta com o CAP (20mg/L) da marca CALGON em função da dosagem de permanganato de potássio aplicado para diferentes tempos de contato

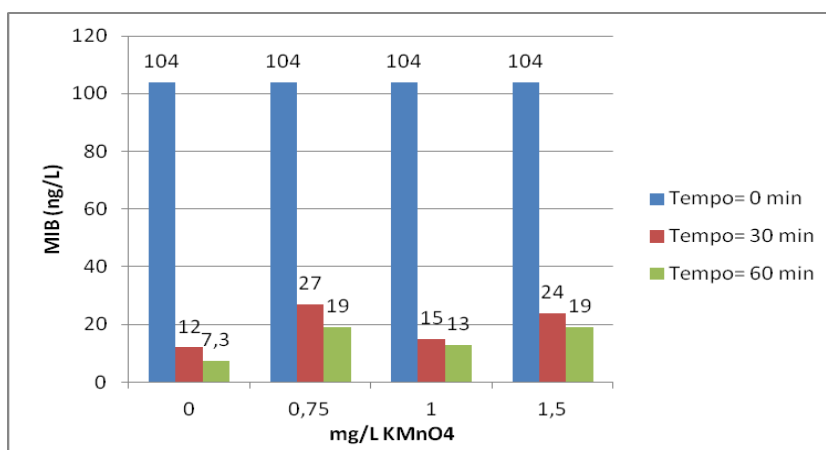


Figura 5: Concentração de MIB na água bruta com o CAP (20mg/L) da marca CARBOMAFRA em função da dosagem de permanganato de potássio aplicado para diferentes tempos de contato

Resultados da Fase 2

As Figuras 6, 7, 8 e 9 apresentam os valores das concentrações residuais, em porcentagem, do oxidante KMnO_4 , e dos poluentes, MIB e Geosmina, para cada dosagem de oxidante em função das dosagens aplicadas de carvão ativado em pó.

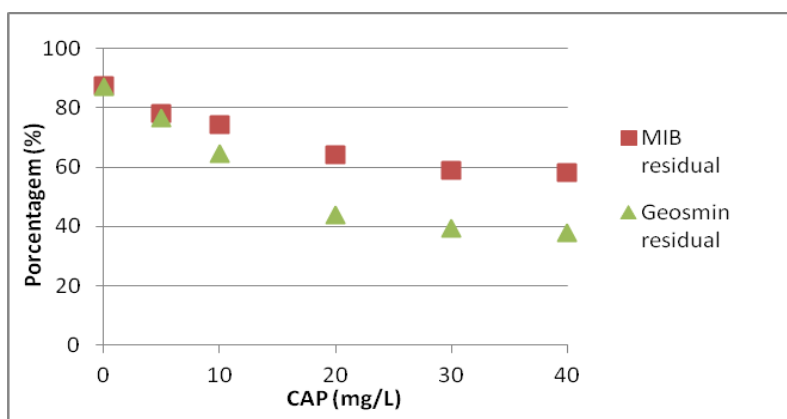


Figura 6: Porcentagens residuais de MIB e Geosmina na água sem aplicação de permanganato de potássio para diferentes dosagens de CAP.

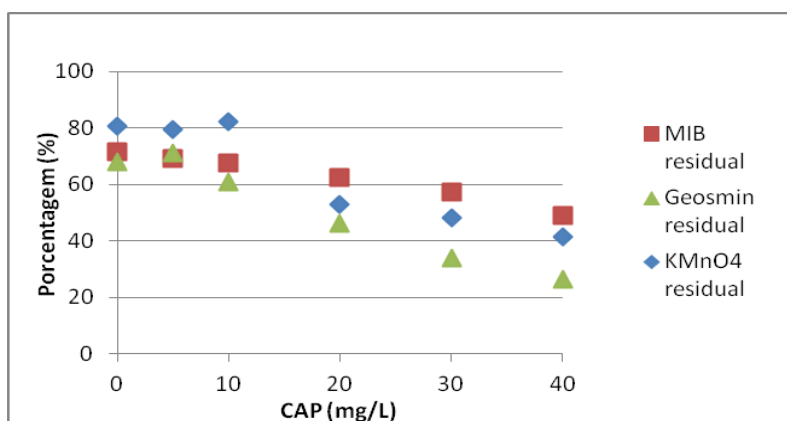


Figura 7: Porcentagens residuais de KMnO_4 , MIB e Geosmina na água com aplicação de 1mg/L de permanganato de potássio para diferentes dosagens de CAP.

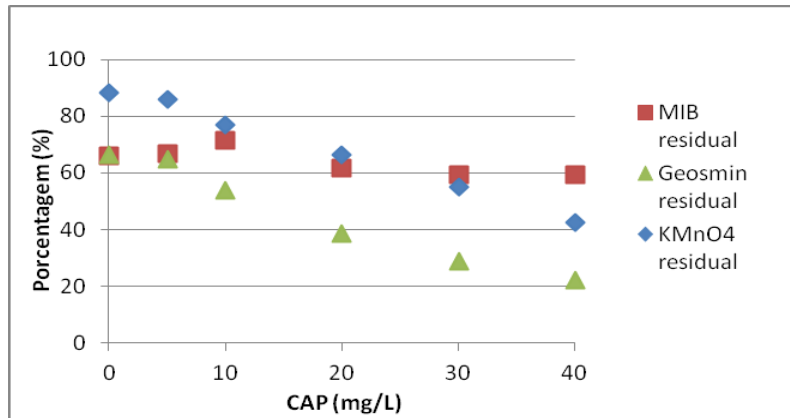


Figura 8: Porcentagens residuais de KMnO_4 , MIB e Geosmina na água com aplicação de 2mg/L de permanganato de potássio para diferentes dosagens de CAP.

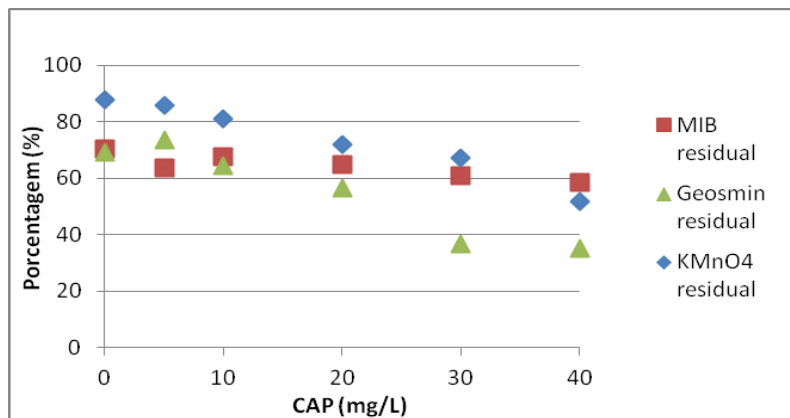


Figura 9: Porcentagens residuais de KMnO_4 , MIB e Geosmina na água com aplicação de 4mg/L de permanganato de potássio para diferentes dosagens de CAP.

Resultados da Fase 3

As Figuras 10, 11 e 12 apresentam os valores das concentrações residuais de KMnO_4 em ensaios cinéticos para cada dosagem do oxidante aplicada em função das dosagens de carvão ativado em pó.

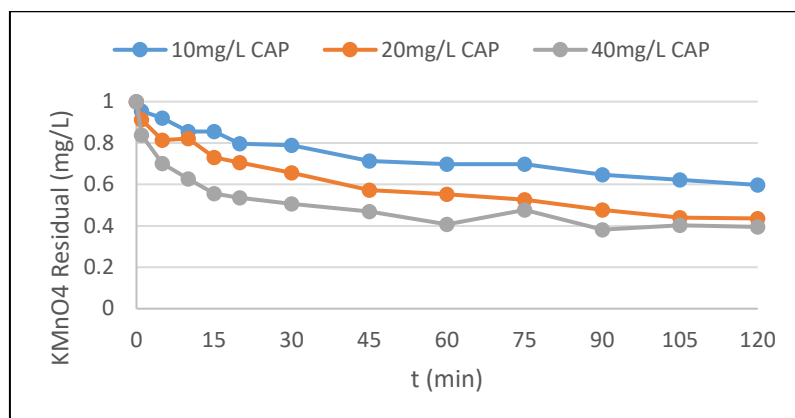


Figura 10: Comportamento cinético do permanganato de potássio, quando aplicada uma dosagem inicial de 1mg/L de KMnO_4 , para diferentes concentrações de carvão ativado em pó

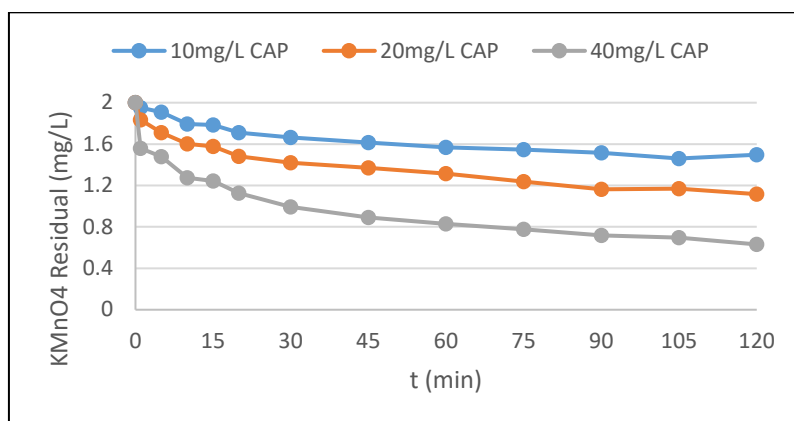


Figura 11: Comportamento cinético do permanganato de potássio, quando aplicada uma dosagem inicial de 2mg/L de KMnO_4 , para diferentes concentrações de carvão ativado em pó

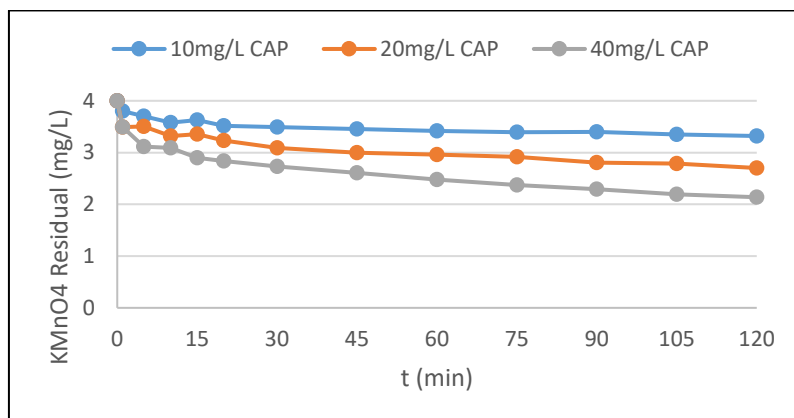


Figura 12: Comportamento cinético do permanganato de potássio, quando aplicada uma dosagem inicial de 4mg/L de KMnO_4 , para diferentes concentrações de carvão ativado em pó

Já a Tabela 2 contém os valores das constantes cinéticas K , para reações de primeira ordem, encontradas para cada cenário estudado.

Tabela 2: Coeficientes cinéticos encontrados para reações de primeira ordem de oxidação do KMnO_4 para cada dosagem de CAP aplicada

| KMnO_4 (mg/L) | CAP (mg/L) | K (min^{-1}) | R^2 |
|------------------------|------------|---------------------------|-------|
| 1 | 10 | 0,004 | 0,939 |
| | 20 | 0,006 | 0,947 |
| | 40 | - | - |
| 2 | 10 | 0,002 | 0,903 |
| | 20 | 0,004 | 0,925 |
| | 40 | 0,007 | 0,926 |
| 4 | 10 | 0,0006 | 0,946 |
| | 20 | 0,002 | 0,932 |
| | 40 | 0,004 | 0,928 |

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Fase 1: Comparação entre aplicação de cloro e de permanganato de potássio como oxidantes conjuntamente ao CAP, de marcas diferentes, para remoção de MIB e GEOSMINA.

Pode-se observar de modo bem nítido nas Figuras 2 e 3 que, para os CAPs fornecidos pela CALGON e CARBOMAFRA, quanto maior foi a dosagem de cloro aplicado, para o mesmo tempo de contato de 40 minutos, menores foram os residuais de MIB na água bruta. Para o CAP fornecido pela CALGON, com dosagem de 4,0 mg Cl₂/L, o valor de MIB na água bruta foi de 54 ng/L, valor este muito superior a 14 ng/L, que foi obtido no ensaio executado sem a dosagem de cloro livre. Observou-se que os mesmos efeitos com respeito à aplicação de cloro na remoção de MIB, também foram observados para a Geosmina, isto é, com o aumento da dosagem de cloro livre, ocorreu uma diminuição da eficiência de remoção de Geosmina para um mesmo tempo de contato.

Já para o permanganato de potássio, conforme pode ser observado nas Figuras 4 e 5, também com o aumento da dosagem de oxidante, para um mesmo CAP e tempo de contato, há um ligeiro aumento na concentração de MIB na água bruta. No entanto, a influência do permanganato de potássio no processo de adsorção é muito mais reduzida quando comparado com o cloro livre. Este comportamento também pôde ser evidenciado para todos os CAPs empregados nos ensaios cinéticos de adsorção.

Fase 2: Aplicação de KMnO₄ e CAP para diferentes dosagens de CAP na remoção de MIB e GEOSMINA

Assim como na fase 1, ao comparar as Figuras 7, 8 e 9 à Figura 6, é verificada uma pequena interferência do permanganato de potássio na capacidade de adsorção de MIB e Geosmina pelo carvão ativado em pó, para altas concentrações de CAP (30 e 40 mg/L), inclusive, essa alteração é praticamente desprezível. Ao levar em conta apenas o MIB, verifica-se que o tratamento com ou sem permanganato praticamente não tem diferença resultando sempre num residual em torno de 60% para quaisquer dosagens de CAP e KMnO₄, exceto a dosagem de 40 mg/L combinada com 1mg/L de oxidante, que obteve aproximadamente 50% de remoção de MIB. Para a Geosmina a variação na remoção com a adição do oxidante foi um pouco maior chegando a resultar num residual em torno de 20% para altas concentrações de carvão ativado.

Tais resultados revelaram um comportamento um pouco diferente do obtido na primeira fase com relação à remoção dos micropoluentes, ou seja, mesmo em dosagens superiores à demanda o permanganato de potássio praticamente não trouxe prejuízo à remoção de MIB e geosmina. Fato que motiva a execução de mais ensaios e estudos desse tipo para avaliar melhor a interação entre KMnO₄ e o carvão ativado em pó.

Outro fator importante a ressaltar é que, apesar de o efeito do permanganato de potássio na remoção dos micropoluentes ser mínimo, há um consumo do oxidante e tal consumo apresenta um comportamento semelhante à remoção de MIB e Geosmina em relação às diferentes dosagens de CAP aplicadas. Isto é quanto maior a dosagem de CAP, menores são os residuais dos poluentes e do permanganato de potássio, como exposto nas Figuras 7, 8 e 9. Esse fenômeno é bem nítido para a geosmina para as três dosagens de oxidante aplicadas.

Fase 3: Ensaios cinéticos em água sem poluentes

De acordo com as figuras 10, 11 e 12, é possível dizer que o consumo de permanganato de potássio ocorre mais rapidamente na primeira hora de ensaio, principalmente nos primeiros 30 ou 40 minutos e após isso, a variação é muito pequena tendendo a um valor constante. Também fica evidente que quanto maior a concentração de CAP, maior é o consumo de KMnO₄, fato que indica que a cinética da reação de oxidação do permanganato de potássio, neste caso, é de primeira ordem com valores de constante cinética (K) em função da dosagem de carvão aplicadas, como exposto na Tabela 2.

É importante dizer que, para o ensaio em que foi aplicado 1mg/L de KMnO₄ e elevada concentração de CAP (40 mg/L) os valores dos residuais encontrados foram difíceis de serem tomados durante ensaio em laboratório, pois a cor preta do carvão interferia um pouco durante a titulação da cor rosa do permanganato de potássio. Portanto, tais resultados não apresentaram boa confiabilidade e merecem ser repetidos ou melhor avaliados.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos, pode-se concluir que:

- A aplicação de cloro juntamente com o CAP trouxe prejuízos ao processo de adsorção. Este prejuízo mostrou-se ser diretamente proporcional à dosagem de cloro.
- A aplicação de permanganato de potássio também ocasionou prejuízos ao processo de adsorção quando aplicado em concentração superior à sua demanda, no entanto, o seu efeito foi muito mais reduzido quando comparado com o cloro livre.
- Há um consumo de permanganato de potássio durante a adsorção de MIB e Geosmina pelo carvão ativado, que é superior quanto maior for a concentração de CAP.
- O consumo do KMnO_4 obedecendo a cinética química de uma reação de primeira ordem, com constantes cinéticas proporcionais às dosagens de carvão ativadas.
- Tal consumo do oxidante ocorre rapidamente nos primeiros 30 minutos de contato, não havendo assim, necessidade de longos tempos de contato, pois o residual do KMnO_4 não varia muito depois desse estágio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CRITTENDEN, J.C.; TRUSSELL, R.R.; HAND, D.W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G.. MWH's Water Treatment: Principles and Design. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2012.
2. EDZWALD, J.K. (editor). Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water. 6th ed. New York: McGraw Hill; 2011.
3. JUTTNER, F.; WATSON, S. B. Biochemical and ecological control of geosmin and 2-methylisoborneol in source waters. Applied and Environmental Microbiology, v. 73, 4395-4406. 2007.
4. LALEZARY, S.; PIRBAZARI, M.; DALE, M.; TANAKA, T.; MCGUIRE, M. Optimising the removal of geosmin and 2-methylisoborneol by powdered activated carbon. Journal American Water Works Association, v. 80 (3), p. 73-80. 1988.
5. MATSUI, YOSHIHIKO ; NAKAO, SOICHI ; SAKAMOTO, ASUKA ; TANIGUCHI, TAKUMA ; PAN, LONG ; MATSUSHITA, TAKU ; SHIRASAKI, NOBUTAKA Adsorption capacities of activated carbons for geosmin and 2-methylisoborneol vary with activated carbon particle size: Effects of adsorbent and adsorbate characteristics. Water Research, v. 85, p. 95-102. 2015.
6. NEWCOMBE, G., COOK, D. Influences on the removal of tastes and odours by PAC. J. Water Supply: Res. Technol. e Aqua, v. 51, p. 463-474. 2002.
7. SMITH, K., M. Characterization of Activated Carbon for Taste and Odour Control. University of Toronto, Canada, p. 136. M.A.Sc. Thesis. 2011.
8. SONTHEIMER, H.; CRITTENDEN, J.C.; SUMMER, R.S. Activated carbon for water treatment. 2ed. Karlsruhe, DVGW-Forschungsstelle, 1988, 722p.
9. SRINIVASAN, R.; SORIAL, G. A. Treatment of taste and odor causing compounds 2-methylisoborneol and geosmin in drinking water: A critical review. Journal of Environmental Sciences, v. 23(1), p. 1-13. 2011.
10. SU, M., YU, J., ZHANG, J., CHEN, H., AN, W., VOGT, R.D., ANDERSON, T., JIA, D., WANG, J., YANG, M. MIB-producing cyanobacteria (Planktothrix sp.) in a drinking water reservoir: distribution and odor producing potential. Water Research, v. 68, p. 444 - 453. 2015.
11. WATSON, S. B.; RIDAL, J.; BOYER, G. L. Taste and odour and cyanobacterial toxins: impairment, prediction, and management in the Great Lakes. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, v. 65, p. 1779-1796. 2008.
12. ZAMYADI, A.; HENDERSON, R. K.; STRUETZ, R; HOFFMANN, R; HO, L.; NEWCOMBE, G. Fate of geosmin and 2-methylisoborneol in full-scale water treatment plants. Water Research, v. 83, p. 171-183. 2015.
13. ZHANG, Y.; WANG, Y.; ZHOU, L. Influence of excess KMnO_4 on the adsorption of powdered activated carbon. Chemical Engineering Journal, v. 226, p. 279-285. 2013.