

ESTUDOS DE TRATABILIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM COLUNAS DE CARVÃO ATIVADO E DE AR DIFUSO

Alexandre Davide Miller ⁽¹⁾; Marcelo Cottas ⁽²⁾

RESUMO

O tratamento da água oriunda de sistemas de remediação, antes de seu descarte, constitui-se num componente de custo expressivo no processo de remediação. O presente estudo apresenta resultados de ensaios de bancada que avaliaram dois métodos de tratamento da água contaminada por BTXE: o carvão ativo e o arraste com ar difuso. Os resultados comprovaram que ambas as técnicas são altamente eficientes no tratamento. Desta forma, adicionalmente, foi traçado um comparativo de outros aspectos inerentes a cada método, relacionando suas vantagens e desvantagens, incluindo os custos gerais que envolvem a utilização de cada um deles.

ABSTRACT

The treatment of water from the remediation systems, before its disposal, is a significant cost component in the remediation process. This study presents results of tests on laboratory that evaluated two methods of treatment of water contaminated by BTXE: the activated carbon and the diffused aeration. The results showed that both techniques are highly effective in treatment. Thus, in addition, a comparison was made between other aspects of each method, showing its advantages and disadvantages, including overhead costs involving the use of each technique.

PALAVRAS CHAVE: água subterrânea; remediação; tratabilidade; ar difuso; carvão ativado

(1) Geólogo, Msc. em Hidrogeologia pelo IGC-USP. Sócio-Diretor da MILLER Consultoria Ambiental Ltda.
(alexandre@millerambiental.com.br)

(2) Geólogo. Sócio-Gerente da MILLER Consultoria Ambiental Ltda.
(cottas@millerambiental.com.br)

MILLER Consultoria Ambiental Ltda. Rua Pedro Morganti nº 51, Vila Mariana, São Paulo, SP - CEP: 04020-070 - Fone (11) 3798-4535

1 - INTRODUÇÃO

Observa-se, nos últimos anos, a ocorrência de um expressivo aumento de ações de intervenção na água subterrânea visando reduzir a carga de contaminantes presente na mesma, fato este associado à maior atuação dos órgãos ambientais no que se refere à fiscalização e exigências de remediação de áreas contaminadas.

Os processos de remediação baseados em técnicas de extração (bombeamento e extração multifásica) em áreas impactadas por hidrocarbonetos de petróleo geram volumes de águas que normalmente contêm concentrações variáveis de compostos orgânicos voláteis (COVs). Estas águas se constituem num problema a ser solucionado, tendo em vista a necessidade prévia de seu tratamento antes do descarte final, o que gera um acréscimo nos custos de operação dos sistemas de remediação.

Desta forma, a avaliação de alternativas eficientes para o tratamento destas águas e que acarretem um melhor custo/benefício é de grande valia, principalmente em função da elevada demanda de trabalhos na área.

2 - OBJETIVO E SÍNTESE DOS TRABALHOS REALIZADOS

O objetivo deste trabalho é apresentar os procedimentos utilizados e os respectivos resultados de um estudo desenvolvido para avaliar duas técnicas de tratabilidade de água com presença de compostos aromáticos, com ênfase para o Benzeno.

O estudo compreendeu a realização de ensaios laboratoriais simulando processos de adsorção com carvão ativado e de arraste com ar difuso. Complementarmente, foi feita uma comparação simplificada das vantagens e desvantagens que envolvem a utilização de cada um dos métodos no tratamento da água contaminada.

Em virtude das características da água utilizada nos ensaios, principalmente no que se referem às concentrações dos compostos analisados, os resultados obtidos podem ser utilizados como orientação no dimensionamento e definição de parâmetros de funcionabilidade de sistemas de tratamento de água proveniente de atividades de remediação, desenvolvidas tanto em áreas industriais quanto em postos de combustíveis onde ocorreram vazamentos de gasolina.

3 - PROCESSOS COMUMENTE UTILIZADOS NA REMEDIAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A redução da carga de contaminantes da água subterrânea em áreas em processo de remediação pode se dar tanto *in-situ* (em subsuperfície), quanto *ex-situ*.

No tratamento *in-situ*, as técnicas e processos mais comumente utilizados são a injeção de ar (*air sparging*), a biorremediação, a oxidação química, o tratamento térmico e as barreiras reativas.

Outras técnicas utilizadas no processo de remediação de áreas contaminadas são responsáveis pela remoção da água subterrânea para fora de seu ambiente, a qual, na maioria das vezes, deve ser tratada antes do descarte.

As principais técnicas que contemplam a remoção da água subterrânea são o bombeamento e tratamento (*pump & treat*), muitas vezes associado à contenção hidráulica de plumas de contaminação, e a extração multifásica (*multi-phase extraction*), onde a remoção da água subterrânea se dá juntamente com a fase pura e com o vapor do contaminante.

Comumente, o mecanismo utilizado para o tratamento *ex-situ* da água subterrânea contaminada, proveniente dos processos de remediação, é o carvão ativado. Em menor escala, são utilizadas técnicas de polimento biológico e processos de *air strippers*, que consistem, basicamente, no aumento da área de contato da água contaminada com o ar, favorecendo a transferência da massa de contaminante da água para o ar.

No presente estudo foram abordados aspectos de duas destas técnicas: o carvão ativado e o arraste por ar difuso (realizado em colunas de aeração).

4 - CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

4.1 - Carvão Ativado

4.1.1 - Processo de Adsorção

O carvão ativado em contato com a água contendo o adsorbato remove, seletivamente, o adsorbato por adsorção. Adsorção é o fenômeno em que as moléculas aderem-se à superfície do adsorvente através de forças de atração que se estabelecem nesta interface.

A adsorção física, principal responsável pelo processo de adsorção dos orgânicos no carvão, ocorre em três etapas: difusão no filme, difusão nos poros e adesão das moléculas na superfície do carvão.

A difusão no filme é a penetração das moléculas do soluto através do filme superficial das partículas de carvão. A poro-difusão envolve a migração das moléculas do soluto através dos poros do carvão e a adesão ocorre quando as moléculas do soluto aderem a poro-superfície do carvão.

Em geral, a estrutura dos poros e a alta área superficial são as principais

características do carvão ativado no processo de adsorção de compostos em solução, processo este também influenciado por vários outros fatores, dentre eles o pH, a temperatura e propriedades físico-químicas do adsorbato, como peso molecular e ponto de ebulição.

Com relação ao pH, em geral, a adsorção é aumentada com seu decréscimo, enquanto que para a temperatura, a quantidade de substância adsorvida decresce com o aumento da mesma. No que se refere ao peso molecular e ao ponto de ebulição, o processo de adsorção é mais efetivo para compostos que apresentam maiores valores destes parâmetros. Compostos com peso molecular superior a 50 e ponto de ebulição acima de 50° C são bons candidatos à adsorção.

A Figura 1 representa uma seção de uma partícula de carvão ativado. Praticamente toda a área superficial disponível para adsorção está associada com a poro-estrutura interna. A mudança nos diâmetros dos poros varia de “muito grande” no limite superficial do grão a “muito pequeno” dentro do interior da partícula. As moléculas do contaminante tendem a ser adsorvidas mais fortemente nas áreas onde o poro-diâmetro do adsorvente possui as dimensões aproximadas do diâmetro da molécula do composto.

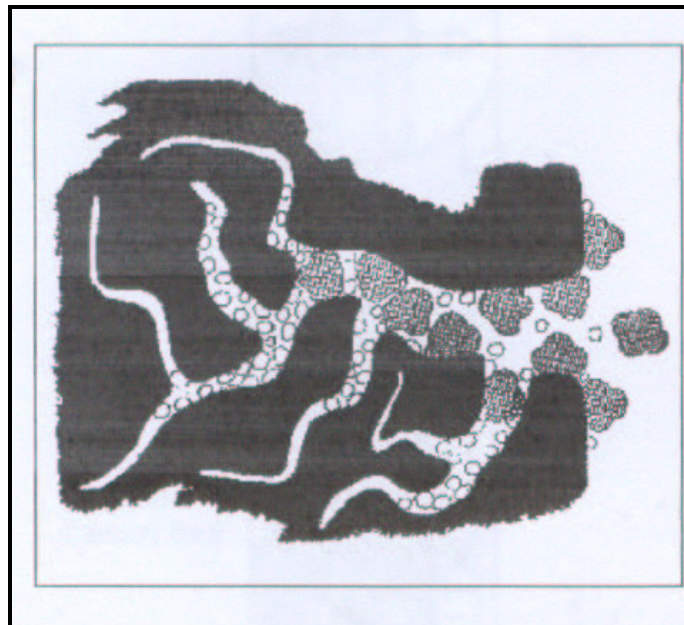


Figura 1. Seção de uma Partícula de Carvão Ativado (SHEPHERD, P. E. 2001)

4.1.2 - Isoterma de Adsorção

Para se determinar a eficiência do carvão para o tipo de substância a ser adsorvida, utiliza-se como referência a isoterma de adsorção do mesmo, que consiste em relações empíricas que servem para descrever quanto do soluto poderá ser adsorvido pelo carvão.

A isoterma de fase líquida de Freundlich pode ser utilizada para determinar a

capacidade de adsorção do carvão ativado em um range de diferentes concentrações. Sob condições normais, a capacidade de adsorção do carvão ativado irá diminuir com o aumento das concentrações até um limite máximo de saturação ser atingido.

A determinação da isoterma de adsorção do carvão ativado é um procedimento executado em situações de equilíbrio. Normalmente as colunas de adsorção funcionam em regime de fluxo. Isso faz com que o teste laboratorial necessite ser complementado com os ensaios em coluna.

A equação de Freundlich descreve matematicamente a relação entre a quantidade de soluto adsorvido em equilíbrio com a concentração do soluto remanescente na solução através da relação:

$$X/M = KC^{1/n} \quad (1)$$

X = Quantidade de composto adsorvido em equilíbrio [M];

M = Massa de carvão utilizada [M];

C = Concentração do composto remanescente na solução [M.L-1];

K & n = Constantes específicas das condições de teste e do tipo de carvão utilizado.

A isoterma de adsorção fornece diversas informações. Primeiro, ela ajuda a determinar se é possível atingir uma concentração desejada utilizando o carvão ativo. Isso é importante quando temos múltiplos compostos a serem adsorvidos. Segundo, a isoterma permite calcular a carga de carvão (X/M) em equilíbrio.

4.1.3 - Breakthrough Curve

Para a avaliação do processo de adsorção em regime de fluxo, é necessário o conhecimento do avanço da frente de saturação na coluna de carvão ativado. O efeito da taxa de fluxo linear pode ser visualizado no diagrama de zona de transferência de massa - MTZ (*Mass Transfer Zone*). Após um período de operação, o topo do leito de adsorção se torna completamente saturado, consistindo-se na zona de saturação.

A remoção dos compostos orgânicos dissolvidos se dá na região da coluna denominada como MTZ. O comprimento da MTZ pode ser otimizado em baixas taxas de vazão. Outros fatores como concentração e tamanho das partículas também afetam a MTZ. A zona de equilíbrio se torna estável durante o progresso da MTZ através da coluna. A Figura 2 ilustra esse fenômeno.

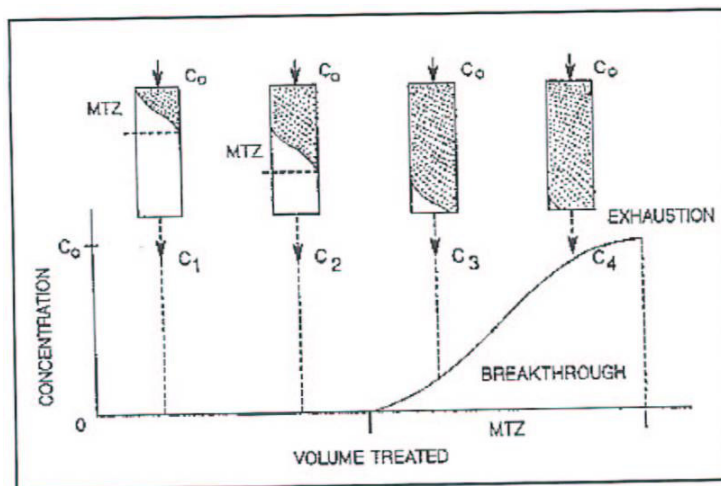


Figura 2. Diagrama de Zona de Transferência de Massa (MTZ)
(www.activated-carbon.com/solrec3.html)

O processo de adsorção em uma coluna de carvão ativado se inicia logo que a água adentra a coluna, sendo o adsorbato prontamente adsorvido na região do leito de carvão posicionada próxima à entrada. O adsorbato não removido imediatamente será removido através das sucessivas camadas do leito. Quando a capacidade de adsorção dos primeiros níveis se exaurir, a zona de transferência de massa (região do leito onde ocorre a adsorção) se move através do leito numa linha circular. Quando o leito está exaurido e a zona de transferência de massa se aproxima do fim do leito, concentrações crescentes de adsorbato são observadas na saída, até o ponto em que a concentração de entrada se iguala à concentração de saída da coluna e nenhuma remoção acontece. Esse fenômeno é chamado de *breakthrough*.

A eficiência da adsorção pode ser otimizada usando partículas finas de carvão que irão produzir um aumento na taxa de difusão na superfície deste. Isso deve ser balanceado com as limitações referentes ao ganho de pressão na coluna.

4.1.4 - Fatores que Influenciam no Design e Operação de Sistemas de Adsorção de Fase Líquida

Existem diversos fatores que influenciam no projeto e operação dos sistemas de adsorção de fase líquida. De modo geral, os principais fatores são:

- Características do líquido a ser tratado, como concentração do adsorbato, temperatura e pH do líquido, taxas de vazão, frequência de operação e pressões atuantes no sistema;
- Características do adsorbato, como massa molecular relativa, solubilidade, concentração relativa ao limite de solubilidade e polaridade;

- Seleção do adsorvente para otimização da eficiência: estudo das isotermas de adsorção, seleção do nível ótimo de atividade, requisitos físicos do sistema de adsorção, análise de custos e considerações sobre destinação final.

4.2 - Ar Difuso

A técnica de tratamento através do arraste por ar difuso se baseia na utilização de dois princípios de transferência de massa, ambos fazendo-se valer da pressão de vapor dos compostos a serem removidos e de seus valores de constante de Henry.

O primeiro princípio de transferência de massa consiste no arraste do contaminante para a fase gasosa, promovido pela movimentação das bolhas de ar, enquanto que o segundo consiste na transferência de massa do contaminante, por difusão, da água para o ar das bolhas.

A relação de troca ocorre na superfície de contato das bolhas com o líquido e depende da dimensão das bolhas, de sua velocidade de ascensão, da pressão parcial do composto, da turbulência, do tempo de residência da água na unidade de aeração, da temperatura e de propriedades físico-químicas do composto.

A Figura 3 ilustra um aerador típico circular com três diâmetros de bolha distintos.



Figura 3. Aeradores Circulares

Conforme ZAMBON (1998), em reatores por batelada, assumindo-se que a remoção de um composto orgânico “y” ocorre apenas na interface das bolhas, a taxa de transferência da fase líquida para a gasosa pode ser representada pela equação a seguir.

$$F_y = V_L \cdot \frac{d_{CL,y}}{d_t} \quad (2)$$

F_y = Taxa de transferência do composto “y” da fase líquida para a gasosa [$M \cdot T^{-1}$];

V_L = Volume total do líquido [L^{-1}];

CL,y = Concentração da substância “y” no meio líquido [$M \cdot L^{-3}$];

t = tempo [T].

A Lei de Henry estabelece que “a massa de um composto dissolvido em um dado volume de solvente é diretamente proporcional à sua pressão parcial na fase gasosa em equilíbrio com a fase líquida”.

$$H_i = \frac{C_{g,i}}{C_{l,i}} \quad (3)$$

H_i = Constante de Henry na forma adimensional;

$C_{g,i}$ = Concentração do composto “ i ” na fase gasosa em equilíbrio com a fase líquida [$M.L^{-1}$];

$C_{l,i}$ = Concentração do composto “ i ” na fase líquida [$M.L^{-1}$].

5 - TRABALHOS REALIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS

As águas utilizadas nos ensaios foram obtidas através do bombeamento da água subterrânea desenvolvido numa área contaminada com BTXE, a qual se encontra em processo remediação. Não foram detectados compostos do parâmetro PAH nas amostras. As amostras foram coletadas em duas ocasiões distintas e cada lote serviu para ensaios específicos. O primeiro lote (A) foi utilizado no ensaio de tempo de residência do carvão ativado e nos ensaios com o ar difuso, enquanto que o lote (B) foi destinado ao ensaio de regime de fluxo em coluna de carvão ativado. O volume total de água de cada lote foi de 150 litros.

As amostras utilizadas nos ensaios apresentaram concentrações iniciais de Benzeno que variaram aproximadamente de 13,2 a 68,1 mg/L. Para os compostos Tolueno, Xileno e Etilbenzeno, os intervalos das concentrações iniciais na água variaram de 5,1 a 12,9 mg/L, 0,6 a 1,0 mg/L e 2,9 a 6,4 mg/L, respectivamente. As concentrações de Fe^{2+} variaram de 5,1 (lote A) a 19,4 mg/L (lote B), enquanto que de Fe^{3+} o range variou de 0,6 (lote B) a 1,5 mg/L (lote A). O pH das duas amostras se manteve próximo a 6, enquanto que o oxigênio dissolvido (OD) variou de 0,9 (lote A) a 1,8 mg/L (lote B).

5.1 - Ensaios com Carvão Ativado

Para os ensaios com carvão ativado, foi utilizado o produto do fabricante Carbonmar, Tipo: CD 500, com número de iodo min 850 mg/g, pH entre 6 e 7, densidade aparente variando de 0,45 a 0,55 g/cm³ ($\pm 0,05$) e granulometria 2x4.

5.1.1 - Ensaio para Determinação do Tempo de Adsorção

Este ensaio teve como objetivo avaliar a capacidade de adsorção do carvão ativado utilizado com relação aos compostos a serem adsorvidos e o tempo de equilíbrio no processo de adsorção dos solutos no carvão.

O procedimento do ensaio consistiu na colocação de uma massa pré-estabelecida de carvão (20 g) em 6 recipientes. Em cada recipiente foi adicionado o volume de 200 ml de água. Em outro recipiente foi adicionada apenas a água (também 200 ml), compreendendo este ao branco de ensaio. Foi ainda coletada uma amostra adicional para análise química, tratada como a amostra inicial do ensaio.

A amostra inicial do ensaio apresentou concentração de Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno igual a 18,3 mg/L, 12,9 mg/L, 0,6 mg/L e 6,4 mg/L, respectivamente. A temperatura da amostra foi de 6°C, o pH igual 7,7 e OD igual a 0,7 mg/L.

Em cada um dos 6 recipientes a água ficou em repouso em contato com o carvão por um determinado período de tempo pré-estabelecido (1, 5, 10, 20, 30 e 60 minutos), sendo ao final de cada período coletada uma alíquota da amostra do respectivo recipiente para análise química. A amostra referente ao branco de ensaio foi coletada juntamente com a última amostra (no tempo de 60 minutos).

O Gráfico 1 apresenta uma síntese dos resultados obtidos no ensaio para determinação do tempo de adsorção. O segundo valor representado na curva de cada composto corresponde à concentração do branco de ensaio.

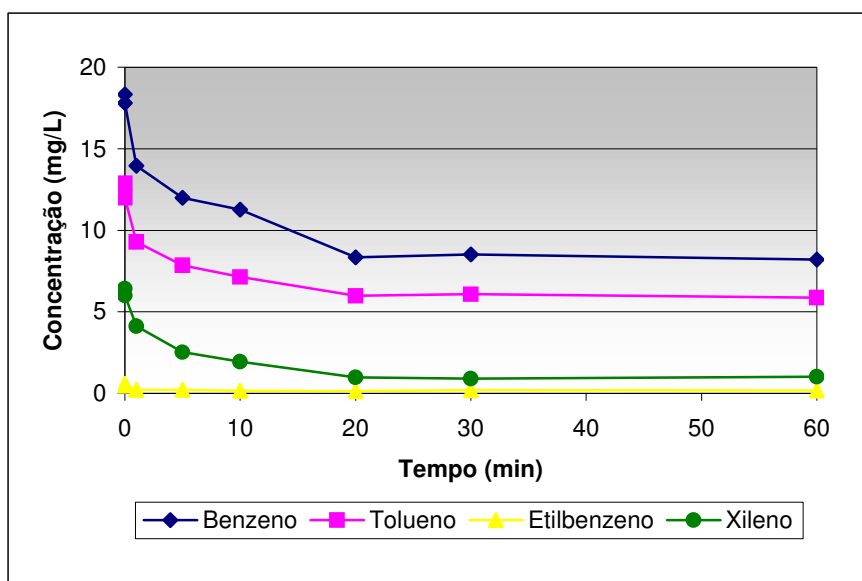


Gráfico 1. Ensaio de Tempo de Residência do Carvão Ativado

Analisando-se os resultados observa-se que, a partir do vigésimo minuto, não ocorrem mais decréscimos nas concentrações, ou seja, a capacidade adsortiva do carvão já está excedida.

5.1.2 - Ensaio em Regime de Fluxo para Determinação da Zona de Transferência de Massa

Este ensaio objetivou avaliar o comportamento de uma coluna de adsorção em regime de fluxo contínuo e determinar o período de saturação da carga de carvão.

A coluna de carvão utilizada no ensaio foi construída no diâmetro de 6" e 75 cm de comprimento, tendo volume útil aproximado de 10 litros. A coluna foi construída de modo que o fluxo fosse ascendente. A fim de diminuir o volume de espaços vazios, permitir melhor compactação e conseqüentemente evitar a formação de caminhos preferenciais, a colocação do carvão na coluna foi feita de forma cuidadosa, através da agitação constante da mesma e colocação de água destilada. A adição da água permitiu também a lavagem do carvão e a remoção de partículas "pó" que acompanham o mesmo. Ao todo foram colocados 7,2 Kg de carvão na coluna.

Foram instalados, ao longo da coluna, três pontos de amostragem (B, C, D), além dos pontos de entrada e saída (A e E), conforme ilustrado na Figura 4.

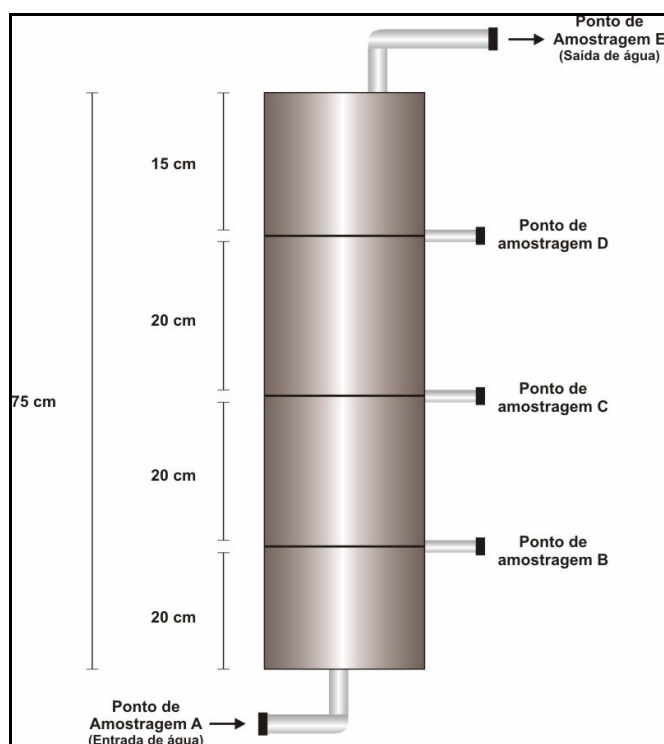


Figura 4. Desenho Esquemático - Coluna de Carvão Ativo

O ensaio foi realizado com vazão de água constante, sendo realizada, em intervalos de tempo pré-estabelecidos (5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 minutos), a coleta de amostras de água para análise química e o monitoramento de índices físico-químicos (pH, OD e temperatura) nos diversos pontos de monitoramento da coluna. Para a colocação da água na coluna foi utilizada uma bomba peristáltica e tubulações descartáveis de silicone.

A amostragem de água e o conseqüente monitoramento dos índices físico-químicos ocorreram a partir do início do ensaio (tempo 0 minuto) no ponto A. Nos pontos B e C as amostras começaram a ser coletadas a partir do décimo minuto. Nos pontos D e E, a amostragem teve início no décimo quinto e vigésimo minuto, respectivamente. Ao final, foi também coletada uma amostra de água no ponto E, tratada como branco de ensaio.

Durante o ensaio, que se estendeu por 70 minutos, foi mantida uma vazão constante de 1,0 L/min, de modo que o volume total de água utilizada foi de 70 litros.

Para este ensaio foi utilizada a água do lote B, sendo que a concentração inicial de Benzeno, medida no ponto A da coluna, variou de 62 a 68 mg/L.

O Gráfico 2 ilustra as concentrações nos pontos intermediários da coluna (B, C e D).

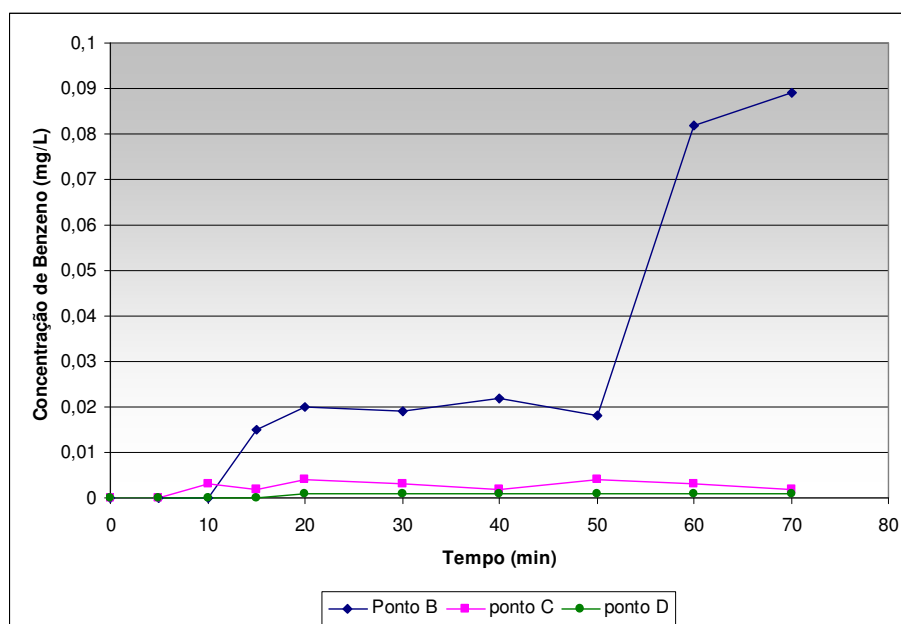


Gráfico 2. Evolução da Concentração de Benzeno na Coluna de Carvão

Através dos dados representados no gráfico e dos demais resultados obtidos durante o ensaio, pode-se constatar que:

- A média das concentrações de entrada foi de aproximadamente 65 mg/L;
- No primeiro ponto de amostragem da coluna (B), situado a 20 cm da entrada, os teores diminuíram para valores em torno de 0,02 mg/L até o quinquagésimo minuto de ensaio. Após esse tempo, as concentrações passaram para 0,082 e 0,089 mg/L, respectivamente, ou seja, durante todo o ensaio, o primeiro trecho da coluna se mostrou suficiente para a adsorção do Benzeno, reduzindo a concentração de aproximadamente 65 mg/L para em torno de 0,09 mg/L (redução de 99,9%).
- No ponto de medição C, segundo ponto de amostragem da coluna, situado a 40 cm da entrada, os teores se mantiveram próximos a 0,002 mg/L durante todo o ensaio,

cabendo salientar que a primeira amostragem efetuada no ponto C foi efetuada após 10 minutos do início da injeção de água na coluna.

- Nos demais pontos monitorados (D e E), situados respectivamente a 60 e 75 cm da entrada, os valores obtidos foram inferiores ao limite de detecção, indicando que a concentração de saída da coluna foi inferior a 0,001 mg/L de Benzeno.

Conclui-se, pelos resultados apresentados, que nos ensaios laboratoriais o carvão ativado mostrou-se completamente viável no tratamento da água utilizada, podendo-se inclusive atingir teores inferiores ao limite de potabilidade.

Com base nos resultados do ensaio de coluna, observa-se que com 1.920 g de carvão (massa de carvão nos primeiros 20 cm da coluna), foi possível reduzir a concentração de, aproximadamente, 65 mg/L para 0,09 mg/L. Num cálculo simplista, em 70 litros de água (quantidade de água que passou neste trecho durante o ensaio) com concentração de 65 mg/L, temos 4.550 mg de Benzeno. Desta forma, observa-se que a massa de carvão necessária para a redução do Benzeno para níveis inferiores a 0,1 mg/L foi de aproximadamente 420 gramas de carvão/grama de Benzeno, considerando-se as condições do ensaio e dos contaminantes presentes na água.

5.2 - Ensaios com Ar Difuso

Estes ensaios tiveram como objetivo avaliar a eficiência da técnica de arraste por ar difuso na remoção de BTXE da água, em especial do Benzeno, através de ensaio conduzido em três estágios de vazão de ar.

Para tanto foi construída uma coluna de aeração com 6" de diâmetro e 75 cm de comprimento, com a fixação de um aerador próximo à sua base, constituído com membrana de PTFE - Politetrafluoretileno (TEFLON®) com microfuros capazes de produzir bolhas de 1,0 a 3,0 mm de diâmetro e a densidade de perfuração de aproximadamente 9 furos/cm². Na porção superior da coluna foram feitas adaptações e a instalação de registros e mangueira para medição da concentração de Benzeno no ar, realizada por meio de tubos colorimétricos (Dräger), e para a coleta de água para análise química. De modo a impedir possível retorno da água pela tubulação de ar, foi instalada uma válvula de retenção no *cap* inferior da coluna. A coleta das amostras de água foi feita a 20 cm do topo da coluna. A Figura 5 representa a coluna utilizada no ensaio.

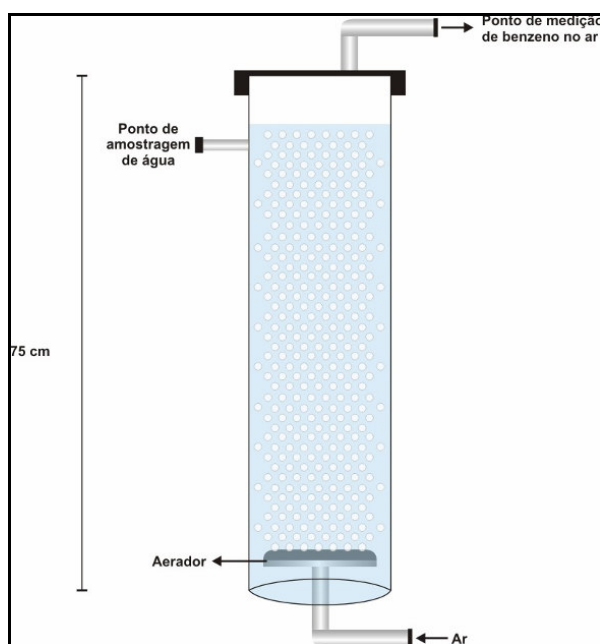


Figura 5. Desenho Esquemático - Coluna de Ar Difuso

O ensaio foi realizado em três estágios, ou seja, com três vazões de ar distintas (1,0, 4,0 e 6,0 L/min). A água foi adicionada à coluna através de uma bomba peristáltica. O processo de enchimento da coluna foi feito por batelada, sendo a cada estágio substituída a água e efetuada a limpeza da coluna e de seus componentes. O volume de água utilizado em cada estágio foi de 10 litros.

Para cada estágio foi mantida uma vazão de ar constante, com o uso de um rotâmetro, e efetuados monitoramentos de índices físico-químicos (pH, OD, temperatura) e das concentrações de Benzeno no ar, além da amostragem de água para análise química de BTXE.

Os monitoramentos e as amostragens foram efetuadas nos tempos de 1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos. No início de cada estágio foram coletadas amostras referentes ao branco de ensaio e à amostra inicial, para referência dos teores de entrada.

Os Gráficos 3 a 5 representam a variação da concentração dos compostos ao longo do tempo nos três estágios do ensaio. Durante a execução do ensaio foi constatado que em todos os estágios houve a remoção de Benzeno e dos demais compostos analisados.

1º Estágio:

- Com relação ao Benzeno, a redução da concentração inicial (aproximadamente 13,8 mg/L) para em torno de 0,7 mg/L, foi de 95%.
- A remoção do Benzeno ocorreu logo nos primeiros minutos da aeração e o teor conserva-se ao longo do ensaio, sem acréscimos significativos na remoção de massa ao longo do tempo.

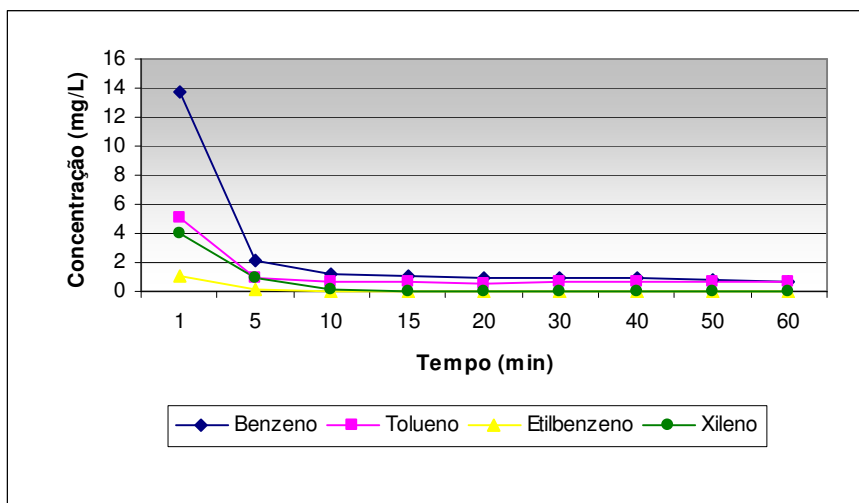


Gráfico 3. Ensaio em Coluna de Ar Difuso - 1º Estágio - ($Q_{ar} = 1,0$ L/min)

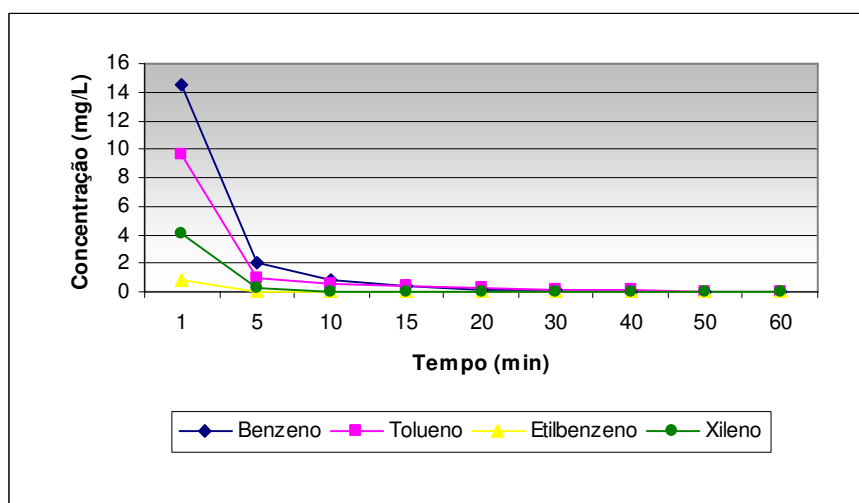


Gráfico 4. Ensaio em Coluna de Ar Difuso - 2º Estágio - ($Q_{ar} = 4,0$ L/min)

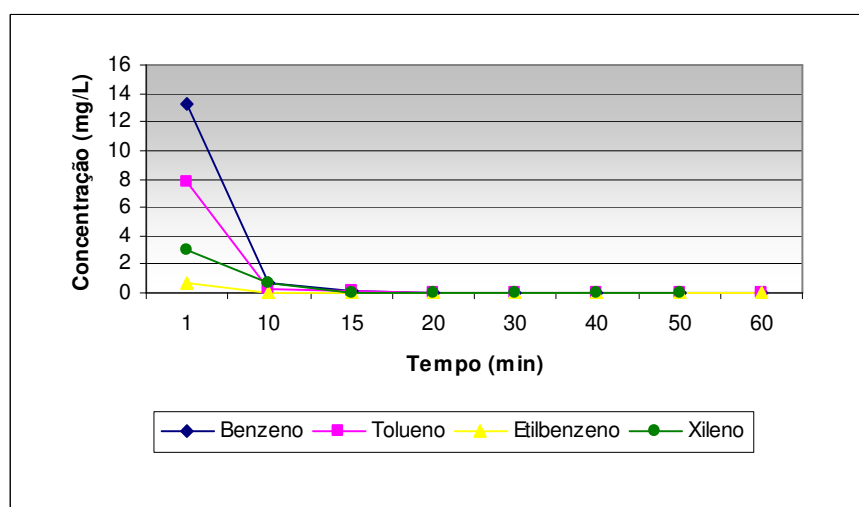


Gráfico 5. Ensaio em Coluna de Ar Difuso - 3º Estágio - ($Q_{ar} = 6,0$ L/min)

- O pH da água no início do ensaio era de 5,8 e foi aumentando gradativamente, atingindo 6,9 no término do mesmo. A concentração de OD também aumentou gradativamente conforme o desenvolvimento do ensaio, iniciando-se em 3,8 e atingindo a 7,8 mg/L ao término deste. A temperatura variou entre 25 e 26°C.
- Quanto às emissões, a concentração de Benzeno no ar superou o fundo de escala (>60 ppm) no início do ensaio e, no decorrer deste, os valores foram diminuindo até atingir 20 ppm.

2º Estágio:

- De um modo geral, ocorreu uma rápida redução nas concentrações de Benzeno logo no início do ensaio, obtendo-se, ao final deste, uma redução de 14,5 mg/L para 0,033 mg/L, ou seja, superior a 99%. O pH variou de 5,5 a 6,0. Já o OD aumentou gradativamente conforme observado no estágio anterior, passando de 3,6 para 8,3 mg/L. A temperatura manteve valores similares aos observados no primeiro estágio.
- As maiores concentrações relacionadas à emissão de Benzeno superaram 60 ppm. No décimo minuto de ensaio as concentrações caíram para 30 ppm e depois, aos 20 minutos, estiveram em 0 ppm, indicando que as transferências significativas de massa se deram desde o início até aproximadamente 15 minutos de ensaio.

3º Estágio:

- A redução em massa de Benzeno se deu de 13,2 mg/L para 0,016 mg/L, ou seja, superior também a 99%, sendo que a maior faixa de redução aconteceu logo nos primeiros 10 minutos do ensaio.
- O pH variou de 5,6 a 5,9. A concentração de OD aumentou rapidamente já nos primeiros 10 minutos, passando de 3,1 a 8,1 mg/L, atingindo ao final do ensaio 8,7 mg/L. A temperatura continuou apresentando valores similares aos observados nos estágios anteriores.
- Com relação às emissões, a primeira leitura, realizada 10 minutos após o início do ensaio, foi de 20 ppm. Como a transferência de massa se deu logo no início, antes dos 10 primeiros minutos, acredita-se que os teores de Benzeno logo no início, foram superiores a 60 ppm.

Conforme verificado, a remoção do Benzeno através da utilização do ar difuso mostrou-se também bastante eficiente, apresentando significativas reduções nos três estágios do ensaio e permitindo a redução para concentrações bastante baixas.

Para definir o ponto ótimo de vazão de ar, tomando-se como base os resultados obtidos, foi elaborado o Gráfico 6, que representa a vazão de ar em função da razão entre a concentração final e inicial de Benzeno.

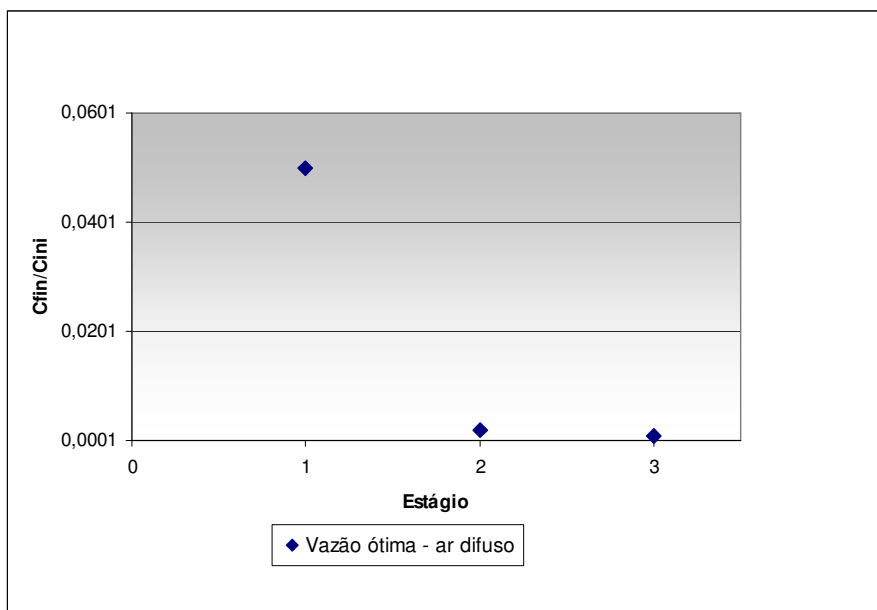


Gráfico 6. Vazão Ótima - Ar Difuso

Conforme se observa nos gráfico, a transferência de massa se dá fortemente entre o primeiro e o segundo estágios de vazão, sendo que do segundo para o terceiro a remoção é muito modesta, indicando que o aumento na vazão do segundo para o terceiro estágio não representa ganho significativo na redução de massa.

Essa constatação é muito importante para que se possa elaborar um sistema cujo consumo energético (produção de ar) seja otimizado. No caso acima, a vazão ótima de ar foi de 4 L/min, correspondente à vazão utilizada no 2º estágio.

Durante a execução do ensaio com ar difuso, percebeu-se uma coloração avermelhada na água, decorrente da precipitação de ferro.

6 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS

Neste item é apresentada uma análise comparativa simplista das vantagens e desvantagens de cada um dos métodos, a fim de nortear futuros trabalhos a serem desenvolvidos para a definição da melhor técnica a ser aplicada no tratamento de água com as características da água ensaiada.

No que se refere à eficiência de cada método, apesar de ambos apresentarem resultados extremamente satisfatórios, o ensaio realizado com o carvão ativado mostrou-se ligeiramente mais eficiente na redução da carga dos contaminantes analisados.

Por outro lado, os custos envolvidos na montagem, operação, manutenção e

disposição final dos sistemas com carvão ativado são bastante elevados quando comparados com o ar difuso, em decorrência, principalmente, da necessidade de aquisição e substituição periódica do carvão, além da sua destinação final.

A Tabela 1 apresenta uma análise comparativa dos dois métodos, descrevendo, de modo geral, as vantagens e desvantagens de cada método empregado.

Tabela 1. Análise comparativa dos dois métodos avaliados.

Itens de Comparação	Métodos	
	Carvão Ativado	Ar Difuso
Eficiência na remoção de Benzeno	Muito eficiente. Mais eficiente que o ar difuso, atingindo teores inferiores ao limite de potabilidade.	Bastante eficiente, podendo atingir teores próximos ao limite de potabilidade.
Eficiência na remoção dos outros compostos	Muito eficiente. Mais eficiente que o ar difuso.	Bastante eficiente, podendo atingir teores inferiores ao limite de potabilidade.
Disponibilidade de materiais, equipamentos e insumos.	Facilmente encontrados no mercado.	Facilmente encontrados no mercado.
Facilidade para montagem, transporte e implantação.	Maior quantidade de itens de construção, maior peso, maiores dificuldades de transporte e eventual necessidade de correção de problemas de estanqueidade na implantação e operação.	Montagem, transporte e implantação bastante simples. Equipamento leve e de fácil transporte e manejo.
Manutenção	Necessidade constante de substituição do carvão e de verificação da estanqueidade do sistema sob pressão.	Limpeza dos tanques e substituição dos aeradores, quando necessário.
Geração de pressão no sistema	Geração de pressão nas colunas que pode evoluir ao longo do tempo pela redução da permeabilidade da coluna.	Pressão atmosférica.
Vazões de tratamento	Opera em faixas estreitas de vazão, atingindo-se no máximo as vazões de projeto, as quais, durante a operação, tendem a diminuir.	Geralmente possui maior elasticidade no controle das vazões.
Característica da água tratada	Transparente	Avermelhada, com alto teor de ferro precipitado.
Geração de resíduos	Geralmente todo o sistema (filtros e carvão) é destinado como resíduo.	Sem geração de resíduos. Os únicos eventuais resíduos são o lodo precipitado, em pequenas quantidades, e o material utilizado no tratamento complementar das emissões, se necessário.
Custos gerais	Custo alto.	Custo baixo, bastante inferior ao carvão ativado.

7 - CONCLUSÕES

Nos testes de laboratório, ambos os métodos de tratamento mostraram-se eficientes no processo de redução da carga de contaminante de BTXE na água, sendo que, independentemente da concentração inicial dos compostos analisados, houve uma redução substancial dos teores.

Embora as taxas de remoção obtidas no ensaio com carvão ativado sejam elevadas, atingindo facilmente os limites de potabilidade, esta alternativa enfrenta como desvantagens os elevados custos de aquisição, montagem, manutenção e destinação final, podendo gerar, ao longo do tempo, quantidades significativamente altas de resíduos a serem destinados como classe 1.

Por outro lado, a utilização do ar difuso permite adequar a água aos parâmetros de lançamento e traz como vantagem os baixos custos de montagem, instalação, manutenção e operação.

8 - SUGESTÕES DE ESTUDOS COMPLEMENTARES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

O estudo cujos resultados foram apresentados neste trabalho foi feito utilizando-se água proveniente de áreas em remediação, com a coleta de lotes distintos, em épocas também distintas, proporcionando características diferentes nas águas, em especial no que se refere às concentrações, notadamente do Benzeno.

Embora amostras de água provenientes de áreas sob intervenção de processos de remediação sejam as ideais para a simulação de diferentes métodos de tratamento, convém que estas pertençam a um único lote e que sejam provenientes da mesma porção da área contaminada, de modo que as concentrações de entrada sejam similares.

Complementarmente aos ensaios realizados, é sugerida a realização de novos ensaios que permitam a elaboração de isotermas de adsorção para diferentes tipos de carvão (de fornecedores distintos e com características distintas de granulometria e número de iodo), para obter-se um melhor conhecimento do perfil de adsorção de cada tipo de carvão disponível no mercado.

Com relação ao ar difuso, podem ser realizados ensaios complementares simulando o tratamento por batelada e por fluxo contínuo, de modo a avaliar o comportamento do processo de redução da carga de contaminantes da água em ambos os casos.

Com estes estudos complementares será possível estabelecer, com maior segurança, a quantificação dos custos envolvidos em cada método de tratamento.

Para a aplicabilidade de cada um dos métodos no tratamento da água, os resultados

dos ensaios aqui apresentados e de outros ensaios de bancada poderão ser utilizados com referência, porém estes devem sempre ser complementados por ensaios pilotos em campo, visando a avaliar, em escala real, a eficiência do método selecionado, bem como dimensionar o sistema de tratamento e definir os parâmetros de funcionabilidade do mesmo.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1998). **Standard Practice for Determination of Adsorptive Capacity of Activated Carbon by Aqueous Phase Isotherm Technique**. D 3860 – 89a.

CPL CARBON LINK. Disponível em: <<http://www.activated-carbon.com/3-1.html>>. Acesso em 18 mar. 2009.

HENNING, K. D.; DEGEL, J. (1990) - **Purification of air, water and off-gas solvent recovery**. Disponível em: <<http://www.activated-carbon.com/solrec3.html>>. Acesso em 18 mar. 2009.

LULP, R. L.; WESNER, G. M.; LULP, G. (1978) - **Handbook of Advanced Wastewater Treatment** – 2nd edition - Van Nostrand Reinhold Env. Engineering Series, p. 167 – 247.

MONTGOMERY, J. M. (1985) **Water Treatment – Principles and Design** - Consulting Engineers, Inc., John Wiley & Sons, p.174 – 197.

REYNOLDS, T. D.; RICHARDS, P. A. - **Unit Operations and Processes in Environmental Engineering** – 2nd edition - PWS Publishing Co., p. 25, 350, 749.

SHEPHERD, A. P. E. (2001) – **Activated Carbon Adsorption for Treatment of VOC Emissions** - 13th. Annual EnviroExpo - Boston – EUA.

ZAMBON, R. C. (1998) - **Influência das condições hidrodinâmicas na remoção de compostos orgânicos voláteis em arraste por ar difuso** - Dissertação Mestrado – POLI – USP – SÃO PAULO.