

Avaliação da Utilização de Lodo Ativado e do Processo de Ozonização na Remediação de Águas Subterrâneas Oriundas de Sistemas *Pump and Treat*

Raphael Gonçalves Rieboldt Oliveira
Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Brasil, rieboldt@gmail.com

José Tavares Araruna Jr.
Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Brasil, araruna@puc-rio.br

Norbert Dichtl
Universidade Técnica, Braunschweig, Alemanha, n.dichtl@tu-braunschweig.de

RESUMO: Em função do crescente número de área contaminadas, é de crucial importância a evolução e o desenvolvimento dos processos de tratamento destes locais, visando reduzir os riscos à saúde humana e ao meio ambiente. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de diferentes técnicas processuais, que poderiam ser aplicadas no tratamento de águas subterrâneas contaminadas, incluindo a ozonização e o uso de lodo ativado. Ensaios de tratabilidade, divididos em 3 etapas, foram realizados no Institute of Sanitary and Environmental Engineering, da Universidade Técnica de Braunschweig, Alemanha. A primeira etapa, de caráter biológico, utilizou lodo ativado para a degradação de compostos orgânicos presentes em efluentes similares a um efluente oriundo de um sistema de tratamento de áreas contaminadas. A segunda etapa utilizou como técnica de tratamento a ozonização, promovendo assim a oxidação química dos contaminantes. Finalmente, foi utilizada uma combinação dos dois processos, com a ozonização do efluente antes da degradação biológica, objetivando avaliar o incremento da biodegradabilidade por meio da ozonização. Os resultados obtidos indicaram, além da remoção da cor, uma efetiva redução da DQO, quando combinadas as técnicas de tratamento, sugerindo que a combinação pode ser uma boa alternativa para o tratamento de efluentes de alta complexidade.

PALAVRAS-CHAVE: Áreas contaminadas, água subterrânea, efluentes, oxidação química, biodegradação, *pump and treat*.

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea é uma das principais fontes de água potável no mundo. Estima-se que as águas subterrâneas são utilizadas para abastecer cerca de 1,5 bilhão de pessoas, sendo que destacam-se no uso deste recurso hídrico a Alemanha, França, Rússia, Dinamarca, Arábia Saudita, Líbia e Austrália (Leal, 1999). Na contramão da importância da água subterrânea, o desenvolvimento da industrialização ocorreu em diversas áreas sem uma política ambiental adequada e isto ocasionou a contaminação desta

fonte em diversos locais. Apresentado este cenário, é de crucial importância a evolução e o desenvolvimento dos processos relacionados ao tratamento destas áreas, visando reduzir os riscos à saúde humana e ao meio ambiente, associados à presença dos contaminantes no meio subterrâneo.

Uma das técnicas mais utilizadas no processo de remediação das áreas contaminadas, segundo Sharma e Reddy (2004) é o sistema *pump and treat*, que consiste, basicamente, no bombeamento e tratamento, *ex-situ*, das águas subterrâneas contaminadas. A

evolução desta técnica está, portanto, diretamente relacionada ao desenvolvimento de métodos capazes de tratar os efluentes gerados.

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a eficiência de diferentes técnicas processuais, que poderiam ser aplicadas no tratamento de águas subterrâneas contaminadas. Para isso, foram realizados ensaios de tratabilidade no laboratório do *Institute of Sanitary and Environmental Engineering*, da Universidade Técnica de Braunschweig, na Alemanha, os quais foram divididos em 3 etapas. A primeira etapa consistiu de um tratamento de caráter biológico, utilizando lodo ativado, para a degradação de compostos orgânicos presentes em efluentes, artificiais e naturais, que simularam um efluente oriundo de um sistema de tratamento de uma área contaminada. A segunda etapa utilizou como técnica de tratamento, para o mesmo efluente, a ozonização, promovendo assim a oxidação química dos contaminantes. Por fim, foi utilizada uma combinação dos dois processos, sendo realizada a ozonização do efluente antes da degradação biológica com o uso de lodo ativado. O objetivo desta etapa foi avaliar o incremento da biodegradabilidade do efluente por meio da ozonização.

Os processos de tratamento biológico consistem na utilização de micro-organismos, como fungos, bactérias e protozoários, que através de seu metabolismo, podem degradar os contaminantes orgânicos em compostos menos tóxicos ou até mesmo atóxicos, como o gás carbônico e a água. Em relação à oxidação química, diversos são os compostos que podem ser utilizados como oxidante no tratamento de efluentes oriundos de sistemas de remediação de águas subterrâneas ou efluentes industriais, mas os utilizados com maior frequência são o Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2), estudado por Vasconcelos e Gomes (2009) e Zangeneh et al. (2014), e o Ozônio (O_3), avaliado por Almeida et al. (2004) e Souza et al. (2010). Além desses, podemos citar ainda o Cloro, o Permanganato de Potássio e o Dióxido de Cloro (Kelley et al., 1990).

De acordo com Mansour et al. (2014), em função do alto custo operacional associado aos processos de oxidação simples, a combinação

de processos químicos e biológicos para tratamento de contaminantes em efluentes é uma boa alternativa. De forma a reduzir o custo operacional e aumentar a eficiência, a combinação já foi sugerida também por outros autores, como Oller et al. (2011). A utilização de processos de oxidação química como pré-tratamento é citada também por Almeida et al. (2004) e Poyatos et al. (2010), como uma alternativa para aumento da biodegradabilidade de compostos recalcitrantes. O estudo menciona a utilização do ozônio e dos processos oxidativos avançados (POA) associados, combinando o seu uso com luz ultravioleta (UV), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e óxido de titânio (TiO_2).

2 METODOLOGIA

No total, foram realizados 7 ensaios de tratabilidade, os quais foram ajustados de acordo com os resultados obtidos.

O lodo ativado utilizado nos ensaios de biodegradação foi coletado na estação municipal de tratamento de esgoto de Braunschweig, Alemanha. Este material, de aparência floculada e coloração marrom escura, consiste de biomassa produzida pelo crescimento de organismos durante o processo de aeração do esgoto. Em função da alta quantidade de bactérias e protozoários nas partículas, tal material pode ser utilizado para degradação de matéria orgânica, com diferentes objetivos. O uso de lodo ativado é descrito por Ledakowicz et al. (2001), que realizaram ensaios de tratabilidade com efluentes têxteis com DQO na faixa de 2154 mg/L.

Em relação aos efluentes tratados, foram utilizados dois materiais distintos. O primeiro foi preparado no laboratório, com quantidades conhecidas de determinados hidrocarbonetos tipicamente presentes na gasolina e no diesel. Em seguida, foi utilizado um efluente real originário de uma planta industrial automotiva localizada no estado alemão da Baixa Saxônia. Este efluente foi coletado em um setor de limpeza de peças e possui alta concentração de compostos orgânicos originários de óleos e graxas, utilizados para proteger as peças

metálicas. O efluente apresenta coloração esverdeada e podem ser visualizadas algumas gotas em fase livre de produtos menos densos que a água, provavelmente resíduos oleosos removidos das peças metálicas. Para a realização do ensaio, apenas a fase aquosa do efluente foi utilizada. Para verificar a presença de compostos orgânicos no efluente, uma amostra foi analisada no laboratório do *Institute of Environmental and Sustainable Chemistry*, da Universidade Técnica de Braunschweig, sendo identificados diversos hidrocarbonetos.

A degradação dos compostos durante os ensaios foi acompanhada através da medição da demanda química de oxigênio (DQO) nos reatores. O valor de DQO indica a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente na amostra e, por isso, quanto menor o valor, menor a quantidade de compostos orgânicos presentes. Em função do efluente conter compostos orgânicos de diferentes tipos, a quantificação e identificação individual é de difícil obtenção. Segundo Ohron et al. (2009), tanto os efluentes sanitários quanto os efluentes industriais contêm uma grande variedade de compostos orgânicos que não podem ser identificados e quantificados individualmente em uma rotina básica de análises. As análises de DQO são uma boa forma de caracterizar o conteúdo orgânico geral.

Para o primeiro ensaio, antes do início, o lodo recebeu uma mistura de nutrientes, como Fosfato Monopotássico (KH_2PO_4) e Cloreto de Cálcio (CaCl_2), e Ácido Acético (CH_3COOH), como fonte de carbono. A escolha destes nutrientes é fruto da experiência do laboratório do *Institute of Sanitary and Environmental Engineering*, no desenvolvimento de técnicas avançadas de tratamento biológico de águas residuais. Os dados dos ensaios realizados são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Dados dos ensaios realizados

Ensaio	Técnica processual	Duração (horas)	Tipo de efluente
1	Biodegradação	4:00	Artificial
2	Biodegradação	22:00	Artificial
3	Biodegradação	96:00	Industrial
4	Biodegradação	52:00	Industrial
5	Ozonização	4:40	Industrial
6	Ozonização	1:45	Industrial
7	Oz. e Bio.	6:10 (oz.)/47:15 (bio.)	Industrial

Tabela 2. Dados dos ensaios realizados - Contaminantes

Ensaio	Contaminantes adicionados	Adição de nutrientes	Concentração de contaminantes ou efluente no reator
1	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, o-Xileno e Naftaleno	Sim	Contaminantes 117 mg/L
2	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e o-Xileno	Não	Contaminantes 580 mg/L
3	-	Não	Efluente 16,7 %
4	-	Não	Efluente 5,0 %
5	-	Não	Efluente 100 %
6	-	Não	Efluente 10% Ozonização: Efluente 100%
7	-	Não	Biodegradação: Efluente 10%

3 MATERIAIS

Os ensaios de degradação foram realizados em reatores de vidro, de cerca de 4 litros de capacidade. No interior de cada reator foram posicionadas placas porosas interligadas a um sistema de ar, de forma a aerar o conjunto e fornecer oxigênio para a degradação aeróbia dos compostos. Cada uma das placas foi conectada a um controlador de vazão, de forma a regular o volume de ar injetado e promover vazões similares em ambos os reatores. Todos os ensaios de biodegradação foram montados em duplicada, sendo um reator preenchido com o lodo ativado e o outro preenchido com água.

A intenção dessa duplicação é desconsiderar a influência da volatilização dos compostos nos resultados obtidos, visto que os reatores permaneceram a todo momento conectados a um sistema de aeração, o que facilita a transferências dos compostos voláteis da fase aquosa para a fase gasosa. Por conta disso, todos os ensaios foram montados no interior de uma capela com sistema de exaustão e tratamento de gases, de forma a impedir o acúmulo de gases no interior do laboratório e a liberação para a atmosfera sem o devido tratamento.

Visando também avaliar a quantidade de compostos dissolvidos e adsorvidos na fração sólida do lodo ativado, foram utilizadas amostras filtradas e não filtradas.

As amostras que foram filtradas antes de serem analisadas para DQO foram inicialmente centrifugadas, por um período de 3 minutos, sob

rotação de 5000 rpm, visando separar as frações líquida e sólida. Após isso, a fração líquida foi filtrada em um sistema montado com um tubo de aço inoxidável, conectado a uma fonte de ar pressurizada. Para cada amostra foram utilizados dois papéis filtros, um com malha de 200 microns e um com malha de 50 microns.

Nos testes de ozonização foi utilizado um gerador de ozônio da marca Sorbios e um equipamento medidor de ozônio, juntamente com um reator de vidro. Através do gerador de ozônio é possível controlar a pressão e a concentração de ozônio, em g.m^{-3} , injetada no reator. A massa de ozônio consumida no reator pode ser calculada através da diferença da concentração fixada no gerador e da concentração medida na saída do reator. Através de um registro situado na base do reator, foram coletadas amostras do efluente, de forma a acompanhar a evolução no valor de DQO.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dois primeiros ensaios realizados, os quais utilizaram o efluente produzido no laboratório, não apresentaram resultados conclusivos, o que motivou a utilização do efluente coletado na planta industrial. No primeiro ensaio, em função da utilização do ácido acético como fonte de carbono, durante o período de aclimação, e devido a uma possível degradação incompleta antes do início do ensaio, os valores de DQO no reator preenchido com lodo ativado foram muito elevados, superando as expectativas e o limite dos testes de cubeta utilizados. Já no segundo ensaio, em função de uma possível extrapolação dos limites de solubilidade dos compostos em água, uma fase livre não aquosa foi formada sobre os níveis de água e lodo ativado nos reatores. De forma a promover a continuidade do teste, novos reatores foram preenchidos, utilizando-se apenas a fração aquosa, a qual foi separada com o auxílio de um decantador. No entanto, as análises efetuadas ao longo do ensaio indicaram um incremento dos valores de DQO no reator preenchido com água e verificou-se que a fase não aquosa formada no início do ensaio havia ficado aderida à placa de aeração quando o reator foi esvaziado. Sendo

assim, à medida que o ar passava pela placa, os compostos foram sendo liberados, elevando assim a DQO no reator.

A partir do terceiro ensaio, já com a utilização do efluente coletado na indústria automotiva, os resultados foram mais conclusivos. A partir desta etapa, as amostras analisadas passaram a ser filtradas antes da medição do valor de DQO. Neste ensaio, cada um dos reatores foi preenchido com 500 mililitros do efluente industrial e 2,5 litros de água (reator 1) ou lodo ativado (reator 2). A Figura 1 apresenta a evolução dos valores de DQO medidos nos dois reatores.

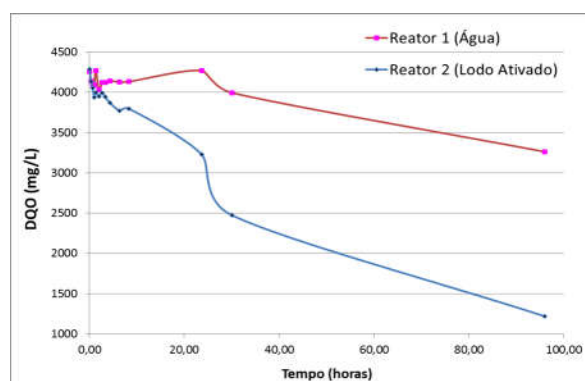


Figura 1. Evolução do valor de DQO no ensaio 3

Através dos resultados obtidos foi possível perceber uma elevada redução no valor de DQO do reator 2, em comparação com o reator 1. Observa-se também que esta redução é acentuada depois das primeiras 10 horas de ensaio, que pode ser justificada por uma concentração elevada de contaminantes no início do ensaio, o que dificultou o início da biodegradação. Analisando os resultados ao longo de todo o ensaio, verifica-se a redução na DQO de 23,4% no reator 1 e de 71,6% no reator 2, evidenciando desta forma a atividade microbiana na degradação dos compostos presentes no efluente industrial. A redução no reator 1, onde não foi adicionado o lodo ativado, pode ser explicada pela volatilização ou pela fotodegradação de parte dos compostos presentes no efluente, efeitos esses que também atuam no reator 2. A diferença entre as reduções nos dois reatores, de 48,2%, pode ser traduzida como sendo a fração efetivamente biodegradada.

No quarto ensaio optou-se por utilizar uma concentração menor de contaminantes, visando avaliar se o mesmo comportamento do terceiro ensaio se repetiria ou se a degradação dos compostos seria iniciada em um período de tempo mais curto. Cada um dos reatores foi preenchido com 150 mililitros do efluente industrial e 2,85 litros de água (reator 1) ou lodo ativado (reator 2). A Figura 2 apresenta a evolução dos valores de DQO medidos nos dois reatores.

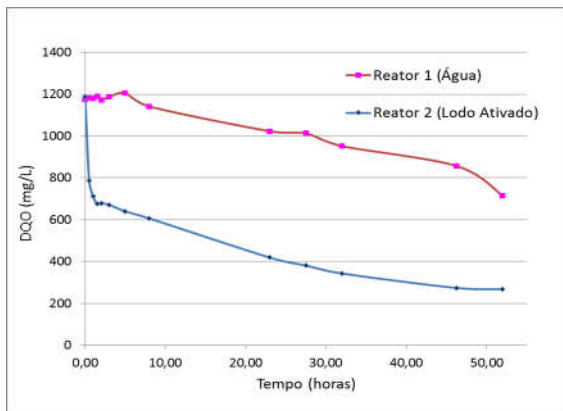


Figura 2. Evolução do valor de DQO no ensaio 4

Através dos valores de DQO, uma alta degradação inicial pôde ser observada no reator 2, a qual ocorreu durante os primeiros 30 minutos do ensaio. A redução do valor de DQO no reator com lodo ativado foi de cerca de 77,4%, enquanto a redução no reator contendo apenas água foi de aproximadamente 39,1%. Sendo assim, a redução da DQO no reator 2, em função exclusivamente da biodegradação pode ser aproximada como sendo a diferença entre estes dois valores, ou seja, cerca de 38,3%.

Visando avaliar a adsorção dos contaminantes na fração sólida do lodo ativado, foram coletadas também algumas amostras do reator 2, ao longo do ensaio, para serem analisadas sem filtragem. Os resultados são apresentados na Figura 3.

Os resultados obtidos confirmam a degradação dos compostos presentes no efluente industrial adicionado ao lodo ativado, visto que é percebida também a redução na DQO das amostras não filtradas, em valores inclusive superiores aos observados nas amostras filtradas. Tal fato comprova que a redução da

DQO nas amostras filtradas não ocorre exclusivamente por conta de uma possível adsorção dos contaminantes às partículas sólidas do lodo, e sim pela degradação dos compostos existentes no efluente.

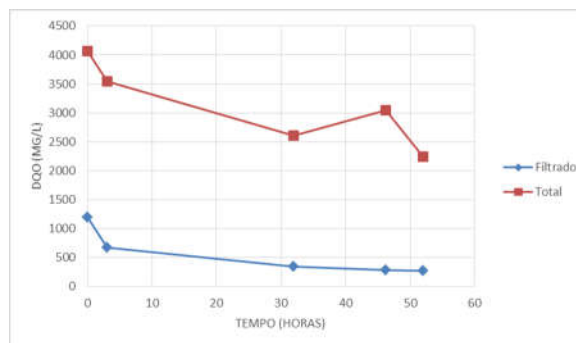


Figura 3. Resultados de DQO nas amostras tratadas, com e sem filtragem, no ensaio 4 (Reator 2)

O quinto ensaio foi realizado através da técnica de ozonização. Em relação às condições de pH do meio, não foram realizadas medições, visto que em estudos realizados por Sevimli e Kinaci (2002), apesar de ter sido verificado que a remoção de DQO foi maior em condições alcalinas, a diferença para um meio ácido não foi significativa. A remoção da DQO aumentou de 11 para 12%, para meio ácido e alcalino, respectivamente.

No primeiro ensaio de ozonização o reator de vidro foi preenchido com 2 (dois) litros do efluente coletado na indústria automotiva. O efluente industrial foi analisado antes do início do ensaio de forma a determinar o valor de DQO inicial, que foi de 34965 mg.L^{-1} .

A vazão de injeção do equipamento gerador de ozônio foi fixada em 50 L.min^{-1} e a concentração de ozônio de entrada foi fixada em 80 g.m^{-3} , gerando uma vazão mássica de ozônio constante de 4 g.min^{-1} .

Ao longo do ensaio, foram coletadas diversas amostras do efluente, de forma a acompanhar a evolução do valor de DQO. Os resultados das análises não indicaram redução dos valores de DQO, que se mantiveram constantes ao longo de todo o ensaio, conforme é possível observar na Figura 4.

Durante o ensaio foi possível verificar uma mudança na coloração do efluente, que passou de um aspecto esverdeado para uma coloração

branca. Em compensação, a redução da DQO obtida não foi significativa.

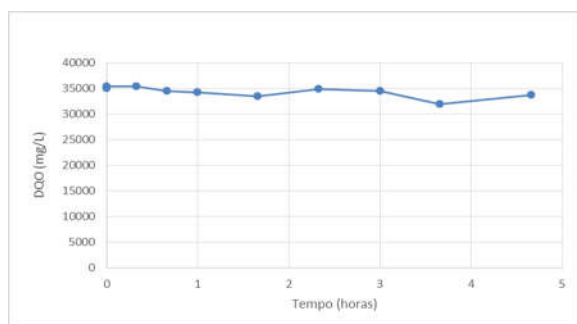


Figura 4. Evolução do valor de DQO no ensaio 5

Comparando o valor inicial com o valor final observa-se uma redução da ordem de 3,7%. A remoção de cor do efluente, através do processo de ozonização, é relatada por Almeida et al. (2004) que, em ensaios realizados com efluentes têxteis, identificou redução da cor de 75%, enquanto a remoção de DQO foi de apenas 12%. Sevimli e Kinaci (2002) obtiveram resultados similares em testes também realizados em efluentes têxteis. Apesar da alta eficiência na remoção de cor, entre 60% e 91%, a remoção de DQO variou entre 9% e 17%, após 30 minutos de ozonização no efluente.

No ensaio 6, segundo ensaio com a técnica de ozonização, o reator foi preenchido com apenas 10% do efluente industrial e avolumado para 2 litros, com água destilada. A vazão e a concentração de injeção foram mantidas. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.

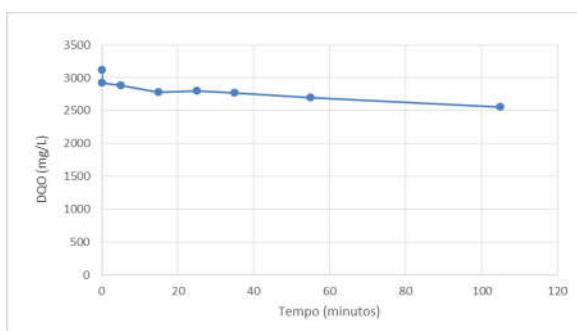


Figura 5. Evolução do valor de DQO no ensaio 6

Conforme é possível observar na Figura 5, o valor de DQO no reator apresentou uma leve redução, de cerca de 18,3%, quando comparado

com o valor inicial de DQO, que neste caso foi adotado como sendo um décimo da DQO medida no efluente antes de ser iniciado o ensaio, já que o reator foi preenchido com apenas 10% do efluente. Novamente, foi observada mudança na coloração do efluente, que passou de esverdeado para branco opaco.

Por fim, foi realizado um ensaio combinando as duas técnicas de tratamento. Em uma primeira etapa, o efluente passou pelo processo de ozonização, durante 6 horas, e posteriormente foi iniciado o processo de biodegradação, através da adição do lodo ativado. O intuito do ensaio foi verificar se o processo de ozonização é capaz de transformar os compostos existentes no efluente a ponto de deixá-los biodegradáveis, facilitando assim o tratamento com o lodo ativado. Para efeitos de controle, novamente foram utilizados dois reatores, sendo o reator 1 preenchido com água e o reator 2 com lodo ativado.

O processo de ozonização foi realizado com 2 (dois) litros do efluente puro, da mesma forma como foi realizado no primeiro ensaio de ozonização. A vazão de injeção do equipamento gerador de ozônio foi fixada em 50 L.min⁻¹ e a concentração de ozônio de entrada foi fixada em 80 g.m⁻³, gerando uma vazão mássica de ozônio constante de 4 g.min⁻¹.

O gráfico mostrando a evolução dos valores de DQO é apresentado na Figura 6. Para a confecção do gráfico, os valores de DQO obtidos no ensaio de biodegradação foram multiplicados por 10, visto que neste ensaio foi utilizado apenas 10% de efluente.

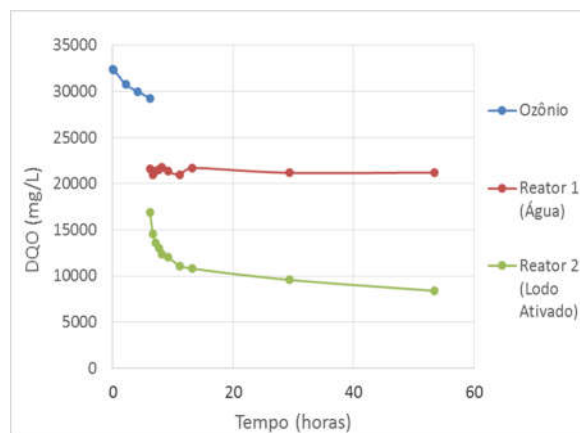


Figura 6. Evolução do valor de DQO no ensaio 7

Através do gráfico, nota-se diferença entre o valor de DQO no final do processo de ozonização e no início da biodegradação. Esta diferença ocorreu em função das amostras coletadas no processo de biodegradação terem sido filtradas antes da análise e por isso, a fração sólida foi desconsiderada. Já a diferença entre os valores iniciais dos reatores 1, preenchido com água, e 2, preenchido com lodo ativado, é consequência da adsorção de parte dos compostos na fração sólida do lodo ativado, o que ocasiona uma redução nos valores de DQO medidos nas amostras filtradas.

Para comprovar que os compostos foram degradados no reator 2 (lodo ativado) e que a redução observada não ocorreu exclusivamente em função do processo de adsorção, foram coletadas duas amostras para análises sem filtragem, uma no início e outra ao término do ensaio. Os resultados, apresentados na Tabela 3, evidenciam a degradação, visto que o valor de DQO nas amostras não filtradas, coletadas no reator 2, também foi reduzido ao longo do ensaio, enquanto o valor no reator 1 se manteve praticamente o mesmo.

Tabela 3. Valores de DQO, sem filtragem

Identificação	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
Reator 1 inicial	0,00	2780
Reator 1 final	47,25	2701
Reator 2 inicial	0,00	6688
Reator 2 final	47,25	4861

Através dos resultados apresentados na Figura 7, considerando apenas a fase de ozonização nota-se uma redução no valor de DQO de cerca de 10%. Além da degradação de alguns compostos, essa redução pode também ser atribuída à volatilização de parte deles. Ao contrário dos ensaios 3 e 4, quando o reator 1 apresentou significativa redução, associada à volatilização, neste ensaio os valores inicial e final no reator 1 foram praticamente os mesmos, indicando que a fração de compostos mais voláteis já havia sido removida durante o processo de ozonização. Considerando os resultados do processo combinado, a redução da DQO atinge cerca de 74,1%, quando levados em consideração os valores obtidos no reator 2.

A simulação de um efluente em laboratório mostrou de difícil execução, por conta de questões envolvendo a solubilidade dos compostos e o risco inerente à exposição aos mesmos, impedindo assim a obtenção de resultados significativos nos dois primeiros ensaios realizados. Em função disso, optou-se, nas demais etapas, pela utilização de um efluente oriundo de uma área de limpeza de peças de uma fábrica automotiva, com alta carga orgânica e DQO superior a 39000 mg.L⁻¹.

Nos ensaios de biodegradação realizados com o efluente automotivo, foram verificadas reduções dos valores de DQO nos reatores preenchidos com lodo ativado de 71,6% no ensaio 3 e de 77,4% no ensaio 4, sendo que a diferença entre estes dois ensaios foi a proporção de efluente/água ou lodo ativado. No ensaio 3, 16,7% dos reatores foram preenchidos com o efluente, enquanto no ensaio 4, foi utilizado o valor de 5%. Vale ressaltar que, em ambos os ensaios, foram identificadas reduções significativas nos reatores preenchidos apenas com o efluente industrial e água destilada, o que podemos associar à volatilização de parte dos compostos. A redução nestes reatores foi de 23,4% no ensaio 3 e de 39,1% no ensaio 4. Sendo assim, podemos aproximar a redução da DQO consequente da biodegradação como sendo de 48,2% no ensaio 3 e de 38,3% no ensaio 4.

Durante os ensaios de ozonização, ficou clara a capacidade do ozônio de remover a cor do efluente, conforme já havia sido demonstrado por Sevimli e Kinaci (2002). O efluente que inicialmente apresentava coloração esverdeada passou a ter uma aparência branca opaca, tanto no ensaio 5 quanto no ensaio 6. Em relação à DQO, a redução foi baixa quando comparada com os resultados dos ensaios de biodegradação. As reduções verificadas foram de 3,7% e 18,3% nos ensaios 5 e 6, respectivamente.

Por fim, foi realizada uma combinação das duas técnicas, de forma a verificar a capacidade do ozônio de aumentar a biodegradabilidade do efluente. A conjugação destas técnicas já havia sido abordada por Narkis e Schneider-Rotel

(1978), que identificaram que seria muito caro tentar destruir toda a matéria orgânica apenas através da ozonização. Sendo assim, o processo de ozonização poderia ser usado para converter a matéria orgânica persistente em compostos biodegradáveis, que poderiam então ser tratados pela atividade biológica. Durante o processo de ozonização realizado no ensaio 7, que combinou as duas técnicas, novamente foi verificada a remoção da cor do efluente e a redução do valor de DQO foi de 9,7%. Considerando o processo combinado, a redução total do valor de DQO foi de 74,1%. Este valor reflete uma redução real das concentrações de compostos orgânicos, e não é oriundo da adsorção dos compostos na fração sólida do lodo ativado. Apesar de inicialmente haver uma adsorção dos compostos na fração sólida, os resultados indicam que inclusive esta porção foi degradada, visto que o valor da DQO nas amostras sem filtragem também foi reduzido ao longo do ensaio.

Com base nos resultados é possível sugerir que a combinação das técnicas de oxidação química e degradação biológica é uma boa alternativa para o tratamento de efluentes de alta complexidade e com carga orgânica elevada. O processo combinado, além da remoção da cor, promoveu uma remoção de 74,1% da DQO. Vale ressaltar que, no meio do processo, o efluente foi diluído, o que poderia ser feito, em casos reais, através da mistura com efluentes que apresentem cargas orgânicas mais baixas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico (DAAD) e aos responsáveis pelo projeto EXCEED (Excellence Center for Development Cooperation – Sustainable Water Management in Developing Countries), pela bolsa concedida para a realização de parte deste trabalho na Universidade Técnica de Braunschweig.

REFERÊNCIAS

Almeida, E.; Assalin, M. R.; Rosa, M. A. (2004)

- Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio. *Revista Química Nova*, v. 27, n. 5, p. 818-824.
- Kelley, R. L.; Gauger, W. K.; Srivastava, V. J. (1990) Application Of Fenton's Reagent as a Pretreatment Step in Biological Degradation of Polyaromatic Hydrocarbons. Illinois. IGT.
- Leal, A. S. (1999) As águas subterrâneas no Brasil: ocorrências, disponibilidades e uso. Brasília: ANEEL.
- Ledakowicz, S., Solecka, M., Zylla, R. (2001) Biodegradation, decolourisation and detoxification of textile wastewater enhanced by advanced oxidation processes. *Journal of Biotechnology*, v. 89, p. 175-184.
- Mansour, D.; Fourcade, F.; Huguet, S.; Soutrel, I.; Bellakhal, N.; Dachraoui, M.; Hauchard, D.; Amrane, A. (2014) Improvement of the activated sludge treatment by its combination with electro Fenton for the mineralization of sulfamethazine. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 88, p. 29-36.
- Narkis, N.; Schneider-Rotel, Malka. (1978) Evaluation of ozone induced biodegradability of wastewater treatment plant effluent. *Water Research*, v. 14, p. 929-939, Pergamon Press. Grã-Bretanha.
- Oller, I.; Malato, S.; Sánchez-Pérez, J.A. (2011) Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination - A review. *Science of the Total Environment*, v. 409, p. 4141-4166.
- Orhon, D.; Babuna, F. G.; Karahan, O. (2009) *Industrial Wastewater Treatment by Activated Sludge*. Londres: IWA Publishing. 387 p.
- Poyatos, J. M.; Munio, M. M.; Almecija, M. C.; Torres, J. C.; Hontorio, E.; Osorio, F. (2010) Advanced oxidation processes for wastewater treatment: state of the art. *Water Air & Soil Pollution*, v. 205, p. 187-204.
- Sevimli, M.F.; Kinaci, C. (2002) Decolorization of textile wastewater by ozonation and Fenton's process. *Water Science & Technology*, v. 45, p. 279-286.
- Sharma, H. D.; Reddy, K. R. (2004) *Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies*. 1 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 996 p.
- Souza, S. M. A. G. U.; Bonilla, K. A. S.; Souza, A. A. U. (2010) Removal of COD and color from hydrolyzed textile azo dye by combined ozonation and biological treatment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 179, p. 35-42.
- Vasconcelos, D. V.; Gomes, A. (2009) Tratamento de efluentes de postos de combustíveis para o reúso usando processos oxidativos avançados. In: *Cadernos UniFOA*, e. 11.
- Zangeneh, H.; Zinatizadeh, A. A. L.; Feizy, M. (2014) A comparative study on the performance of different advanced oxidation processes (UV/O₃/H₂O₂) treating linear alkyl benzene (LAB) production plant's wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 20, p. 1453-1461.