



TRATAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS FARMOQUÍMICOS POR REAGENTE DE FENTON

TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTE PHARMOCHEMICAL BY FENTON'S REAGENT

Taciano Peres FERREIRA^{1*}, Júlio Cesar VIANA¹, Leandro Albano ALVES² e Marcio André de PAULA²

¹ Campus Gurupi, Universidade Federal do Tocantins, Rua Badejós, Lote 7, Chácara 69/72, Zona Rural, Cx.postal 66, CEP: 77402-970, Gurupi-TO, Brasil.

² Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás, Br 153, Km 98, CP 459, 75001-970, Anápolis- GO, Brasil.

Autor para correspondência: taciano10@uft.edu.br

INF. ARTIGO	RESUMO
<p>Recebido: 05 abr 2014</p> <p>Aprovado em: 23 jun 2014</p> <p>Publicado em: 05 jul 2014</p> <hr/> <p>Editor: V. H. G. Sales jbfs@ifap.edu.br</p> <p>ID JBFS0032014</p> <p>Double blind peer review</p> <p>Prot. 0032014R01 Prot. 0032014R03</p> <p>Copyright: © 2014</p> <p>JBFS all rights (BY NC SA)</p>	<p>O presente trabalho tem como objetivo determinar a concentração ideal do Reagente de Fenton para uma indústria farmoquímica, variando a concentração de sulfato ferroso e água oxigenada, posteriormente acompanhar o tratamento em escala piloto e na estação de tratamento de efluente (ETE) dos principais parâmetros: Cor, Odor, pH e DQO. Foram realizados ensaios pilotos para a obtenção das diretrizes empregadas na formulação do reagente de Fenton a ser utilizado em larga escala, no tanque de efluente, o teste piloto do experimento T12 foi o que apresentou melhor resultado (Cor e DQO) para a composição do tratamento com: 3,2 mL de H₂O₂ e 160 mg de Sulfato Ferroso. A partir deste parâmetro foi realizado o tratamento com acompanhamento diário no laboratório e em escala piloto, sendo que os valores foram similares para ambos os tratamentos, sendo o percentual de redução de DQO de 93,57% no ensaio de laboratório e 94,00% na ETE. O processo de tratamento de efluente utilizando o Reagente de Fenton apresentou ótimos resultados, com valores melhores que os limites estabelecidos pela legislação. Entretanto o tempo de tratamento de 16 dias se torna inviável para algumas indústrias, mas sendo tranquilamente realizado na indústria estudada.</p> <p>Palavras-chave: <i>Reagente de Fenton, efluente industrial, Farmoquímico</i></p>

Abstract - This study aims to determine the optimal concentration of Fenton reagent for pharmaceutical chemistry industry, varying the concentration of ferrous sulfate and hydrogen peroxide subsequently monitor the treatment in pilot scale and wastewater treatment (WWTP) station of the main parameters: color, odor, pH and COD. Pilot tests to obtain the guidelines used in formulating the Fenton reagent to be used in large scale in the effluent tank were performed, the pilot test of experiment T12 showed the best result (Color and COD) for the composition of the treatment with: 3.2 mL of H₂O₂ and 160 mg Ferrous Sulfate. From this parameter the treatment was carried out daily monitoring in the laboratory and pilot scale, and the values were similar for both treatments, with the percentage reduction of COD of 93.57% in the lab test and 94.00% in the ETE test. The process of wastewater treatment using Fenton reagent showed excellent results, with better values than the limits established by law. But the treatment time of 16 days is not feasible for some industries, but is smoothly carried out in the study industry.

Keywords: Fenton's reagent, industrial effluent, pharmonochemical

Como referenciar esse documento (ABNT):

FERREIRA, T. P.; VIANA, J. V. C.; ALVES, L. A.; PAULA, M. A. Tratamento de resíduos industriais farmoquímicos por reagente de Fenton. **Journal of Bioenergy and Food Science**, Macapá, v.1, n. 1, p.17-26, abr. / jun. 2014.

INTRODUÇÃO

A necessidade de desenvolvimento e implantação de tratamentos alternativos para efluentes que não aceitam intervenção

microbiológica faz com que os processos de tratamento químico sejam cada dia mais estudados. Um dos processos atuais de maior eficácia é o tratamento com Reagente de Fenton, o qual vem

sendo largamente utilizado nas indústrias químicas, onde os efluentes gerados possuem uma maior carga orgânica não biodegradável, devido a substâncias presentes no meio que inibem o crescimento microbiológico (CHACÓN *et al*, 2006).

Uma das preocupações no tratamento dos efluentes líquidos, e em particular nas indústrias envolvendo processos químicos, é a redução da sua *demanda química de oxigênio* (DQO), como, aliás, está determinado na legislação em vigor. Das várias tecnologias disponíveis atualmente, uma que se apresenta como bastante promissora para o pré-tratamento de águas residuais é a oxidação com reagente de Fenton (mistura de peróxido de hidrogênio e ferro, atuando este último como catalisador), num reator que opera à pressão atmosférica e a temperaturas moderadas (KUO, 1992). O reagente de Fenton é atualmente utilizado para tratar uma grande variedade de compostos orgânicos tóxicos que não são passíveis de tratamentos biológicos. Pode ser aplicado a uma grande variedade de águas residuais, lama ou mesmo na remediação de solos contaminados (ARAUJO *et al*, 2006; DZOMBAK *et al*, 1990).

Na literatura podem-se encontrar muitos estudos relacionados com o estabelecimento do mecanismo e com a cinética desta reação. Apesar de não existir ainda um consenso geral, em parte condicionado pela complexidade do mecanismo, parece ser geralmente aceite que um passo limitante é a formação dos radicais hidroxilas (OH) a partir da decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio pelo ferro (II) em meio ácido, segundo equação:



São estes radicais hidroxilas, com elevado potencial de oxidação, os responsáveis pela oxidação dos compostos orgânicos presentes nas águas residuais. Sendo o Fe(II) o catalisador da reação, é importante que este exista em quantidade suficiente no meio reacional ou, por outro lado, que vá sendo regenerado a uma velocidade suficiente (o que pode ocorrer por uma série de reações (GULKAYA *et al*, 2006).

Na reação da matéria orgânica com o reagente de Fenton formam-se diversos produtos ou intermediários oxidados, podendo, no caso particular da oxidação ser completa, dar-se à formação de dióxido de carbono e água. As

regulamentações ambientais podem obviamente não implicar uma oxidação completa, mas sim uma oxidação parcial que seja suficiente para tornar o efluente aceitável dentro dos limites de toxicidade. No que diz respeito à cinética da reação é de referir que as conclusões dos estudos realizados são obviamente condicionadas pelas condições empregues, em particular pela natureza da matéria orgânica utilizada. No entanto, a velocidade da reação parece depender diretamente da concentração de substrato orgânico e de radicais hidroxila no meio reacional (ALVES *et al*, 2003; LEE *et al*, 2003).

Um fator preponderante é a concentração de ferro. Na ausência de ferro não há qualquer evidência de formação de radicais hidroxila quando se adiciona, por exemplo, apenas H_2O_2 a uma água residual fenólica. Existe, no entanto, um teor ótimo de catalisador de ferro, o que é característico do reagente de Fenton. É também aconselhável um teor mínimo de Fe no meio reacional, o que permite que o tempo de reação não seja demasiado longo (ALVES *et al*, 2003).

Além da concentração e natureza dos reagentes, diversos são os fatores que afetam diretamente a reação em causa. A temperatura, por exemplo, é também importante, sendo tipicamente utilizadas temperaturas na gama dos 20-40°C. O controle do pH do meio reacional é também extremamente importante, sendo o pH ótimo entre 3 e 6. Convém salientar que a adição do reagente, bem como a própria reação de oxidação (que conduz geralmente à formação de ácidos orgânicos), afetam o pH do meio. Convém por isso controlar cuidadosamente o pH no reator de forma a que este se mantenha entre 3-5 (ALVES *et al*, 2003; BIDGA, 1995).

Para se avaliar o grau de oxidação alcançado, é conveniente a determinação de alguns parâmetros que caracterizam o efluente tratado. Um particularmente relevante é a Demanda Química de Oxigênio (DQO), a qual poderá ser feita num laboratório de análises, necessitando-se por isso de recolher uma amostra do efluente. Apesar do processo ser, como se referiu anteriormente, bastante atrativo, apresenta, no entanto, algumas limitações. Assim, torna-se crucial o seu estudo prévio quer ao nível laboratorial quer mesmo à escala piloto antes de se decidir acerca da implementação a nível industrial (YUN *et al*, 1999).

Fala-se em adsorção, quando determinadas substâncias dissolvidas se depositam na superfície de corpos sólidos. Muitas substâncias nocivas para

os peixes são de origem química, como o cloro da água sanitária, resíduos alcalinos dos produtos de limpeza e restos de medicamentos. O carvão tem a propriedade de acumular esses elementos em sua superfície, ou seja, adsorvê-los, retirando-os de circulação. Deve-se ter cuidado, pois ao fim de um determinado período de trabalho, dependendo da consistência e do tipo de carvão, podem desprender-se novas substâncias nocivas, que voltariam a contaminar a água. Obtém-se, assim, o efeito contrário. Isto significa, por tanto, que só se pode realizar a filtração através do carvão por um curto período de tempo. Transcorridos uns dias, deverá revolver e efetuar a filtração específica com camadas de materiais filtrantes mecânicos e biológicos (8). Para a efetividade e rapidez de adsorção do filtro de carvão são de vital importância, além do material de base empregado em cada caso, a mistura, o tratamento e a estrutura do material (LOPEZ *et al*, 2004).

O presente trabalho tem como objetivo determinar a concentração ideal do Reagente de

Fenton para uma indústria farmoquímica, variando a concentração de sulfato ferroso e água oxigenada, posteriormente acompanhar o tratamento em escala piloto e na estação de tratamento de efluente (ETE) dos principais parâmetros: Cor, Odor, pH e DQO.

MATERIAIS E MÉTODOS

Ensaio piloto em laboratório do Reagente de Fenton

Para a determinação da composição ideal do Reagente de Fenton foi montado o experimento com 8 béqueres de 2000 mL nos quais introduziu-se 1600 mL de efluente coletado durante a produção de um lote de um dos farmoquímicos. O efluente apresentou pH inicial igual a 3, dado pela literatura como apropriado para aplicação do Reagente em questão. Esses béqueres foram identificados e o efluente de cada um deles recebeu uma combinação de Reagente de Fenton conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Identificação dos testes realizados no efluente.

Table 1. Identification of tests performed in the effluent.

Identificação	pH	Volume H ₂ O ₂ (mL)	Massa FeSO ₄ .H ₂ O (mg)
T ₁₁	3,0	3,20	32
T ₁₂	3,0	3,20	160
T ₁₃	3,0	3,20	320
T ₁₄	3,0	3,20	640
T ₂₁	3,0	0,03	640
T ₂₂	3,0	0,80	640
T ₂₃	3,0	1,60	640
T ₂₄	3,0	3,20	640
Branco	3,0	0,00	0,00

A operação do Reagente deu-se pela adição inicial da Água Oxigenada em todos os béqueres e a posterior mistura das massas de Sulfato Ferroso indicada na Tabela 1. Após a adição do Sulfato de Ferro (II) a mistura foi agitada para a completa dissolução do reagente e homogeneização do meio. Este experimento foi mantido por um período de 15 dias, durante os quais não se promoveu a agitação dos sistemas. Para a certeza de que qualquer modificação teria sido em decorrência da administração do Reagente de Fenton foi tomado um quinto béquer de 2000 mL e cheio até 1600 mL com

o mesmo efluente e sob as mesmas condições no qual não adicionou-se nenhum tipo de reagente. Este foi chamado de "Branco". Durante os 15 dias do experimento foi feito monitoramento, dia-a-dia, da qualidade do efluente de todos os béqueres e feito comparação com o Branco, sendo considerado aumento ou diminuição da medida de algum parâmetro a diferença entre essa medida para o teste e para o Branco. Os parâmetros medidos foram: Cor; Odor; pH; DQO (Demanda Química de Oxigênio); A partir dos dados obtidos ao fim deste experimento foi possível determinar qual proporção

(H₂O₂:FeSO₄) melhor se adequava ao efluente em tratamento. Após a determinação da melhor composição para Reagente de Fenton foi feito um novo teste para avaliar a ação do Carvão Ativado sobre a cor, o odor e a DQO. Para este teste foi tomado um efluente com características idênticas às do efluente do teste anterior e este foi submetido ao teste com o Reagente de Fenton que apresentou o melhor efeito sobre os parâmetros analisados. Foram, então, tomados 4 béqueres com efluente que foram submetidos, todos, ao mesmo teste. No 16° dia de tratamento com Reagente de Fenton o efluente teve seu pH elevado a 6 (pH dentro da faixa de operação do Carvão Ativado) em cada um dos 4

béqueres e adicionado uma massa diferente de Carvão Ativado como indicado na Tabela 2.

A mistura de efluente e Carvão Ativado foi mantida em agitação lenta por 1 hora e ao fim deste tempo o efluente foi deixado em repouso por 3 horas para decantação do Carvão Ativado. O sobrenadante teve seu pH elevado a 8 para floculação do Ferro e, então, os mesmos parâmetros de antes (Cor, Odor, pH, DQO) foram medidos para monitoramento da ação do Carvão Ativado no efluente já tratado com Reagente de Fenton.

Tabela 2. Adição de Carvão Ativado no fim do teste com Reagente de Fenton.

Table 2. Addition of activated carbon in the end of testing with Fenton's Reagent.

Volume Efluente (mL)	pH	Massa de Carvão Ativado (mg)
800	6,0	80
800	6,0	400
800	6,0	800
800	6,0	1200

Tratamento experimental na ETE com o Reagente de Fenton

Para o teste na ETE foi utilizado um volume total de 50 m³ de efluente contido em um tanque de concreto impermeabilizado e uma quantidade de Reagente de Fenton proporcional às indicadas pelos melhores testes do laboratório. Inicialmente foi adicionado a Água Oxigenada enquanto o efluente era mantido em reciclo através do sistema de bombeamento de efluente da ETE. Terminada a adição de H₂O₂ o Sulfato Ferroso, em solução ácida, foi jogado sobre o tanque e a agitação mantida por mais 20 minutos. Terminada a fase da adição o efluente foi mantido em repouso por 15 dias e teve os mesmos parâmetros dos testes laboratoriais medidos dia-a-dia (Cor, Odor, pH, DQO). Para este teste o **Branco** foi feito utilizando-se uma Barrica de Polietileno cortada a uma altura de 80 cm e cheia com 120 litros de efluente, o que mantém a mesma relação, Área Superficial/Volume, do tanque de efluente utilizado para o teste. Dessa forma a evaporação e a concentração de possíveis materiais não voláteis seria a mesma para o tanque e para o **Branco** que foi mantido ao lado do tanque, sob as mesmas condições. No 16° dia de tratamento o pH do efluente do tanque foi elevado a 6, com NaOH, e

mantido em reciclo enquanto era misturado a este a quantidade de Carvão Ativado indicada pelo melhor teste do laboratório. O efluente foi mantido em agitação por 1 hora e deixado em repouso para decantação do Carvão Ativado, o que demorou cerca de 3 horas. Neste momento, o efluente foi transferido para outro tanque de 50 m³ e o pH foi ajustado para 8 a fim de que o Ferro fosse floculado. Após a decantação do Hidróxido de Ferro o efluente foi transferido para o tanque final de onde foi descartado após ter medido todos os parâmetros mencionados para os testes laboratoriais e para o tratamento com Reagente de Fenton (Cor, Odor, pH, DQO).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ensaio piloto em laboratório do Reagente de Fenton

Os resultados das medições feitas, no efluente, durante o teste para a adaptação do tratamento Reagente de Fenton – Carvão Ativado, realizado neste exemplo citado, serviram para nortear os rumos do experimento em larga escala. Variáveis como quantidades de reagentes e tempo de

tratamento foram definidas a partir de tais resultados. Estes ensaios pilotos no laboratorial foram realizados para a obtenção das diretrizes responsáveis pela formulação do reagente a ser empregado, em larga escala, no tanque de efluente. Foi, desta forma, o teste piloto do experimento T₁₂ que apresentou o melhor resultado (Cor e DQO) para a composição: 3,2 mL de H₂O₂ e 160 mg de Sulfato Ferroso. Os resultados do parâmetro cor, para o teste T₁₂ (3,2 mL de H₂O₂ e 160 mg de Sulfato Ferroso) que mostrou o melhor índice de redução, mostrado no gráfico da 1. Este relaciona os valores de porcentagem de transmitância, da amostra, com o tempo a que o efluente está submetido ao

tratamento com Reagente de Fenton. Os valores relativos ao tratamento com Reagente de Fenton estão dispostos até o décimo quinto dia de tratamento. A partir deste tempo os resultados serão apresentados para o tratamento com Carvão Ativado. A medida de cor no efluente tem uma importância grande, pois indica quantidade de poluição no efluente e pode, por si só, indicar a eficácia de um tratamento quanto a medidas comparativas de redução de carga orgânica de uma água residuária em tratamento.

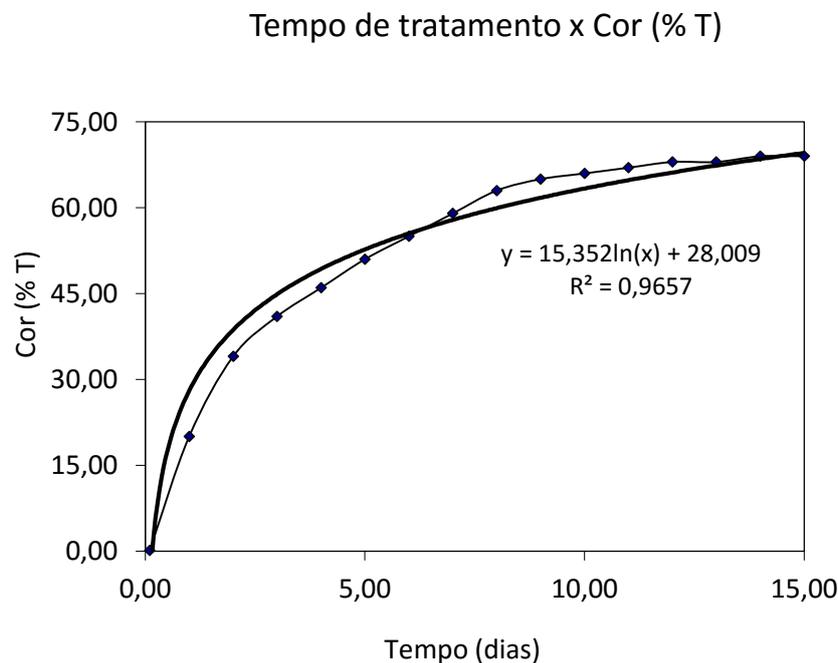


Figura 1. Comportamento da Cor do Efluente com o tratamento com Reagente de Fenton
Figure 1. Effluent color behavior to treatment with Fenton's reagent

O Gráfico da Figura 1 mostra um comportamento, aproximadamente, logarítmico ($R^2 = 0,9657$) para a diminuição de cor (aumento da transmitância). Isto sugere que a reação do Reagente de Fenton com os compostos coloridos do efluente seja de ordem diferente de 0, ou seja, depende da concentração dos compostos coloridos e da concentração do Reagente de Fenton.

Para o parâmetro odor obteve-se apenas resultados que auxiliaram na definição de qual a melhor composição do Reagente de Fenton. De modo que o teste T₁₂ ofereceu, também, a maior

redução do odor do efluente em tratamento. Inicialmente aconteceu a exalação de forte cheiro, possivelmente da degradação inicial da carga poluidora, que diminui com o passar do tempo de tratamento. Sendo que no final dos 15 dias ainda eram presentes e persistentes odores oriundos do efluente.

O teste de pH mostrou resultados parecidos para todos os tratamentos experimentais. No Gráfico da Figura 2 este comportamento é mostrado sendo que estes dados referem-se ao teste T₁₂

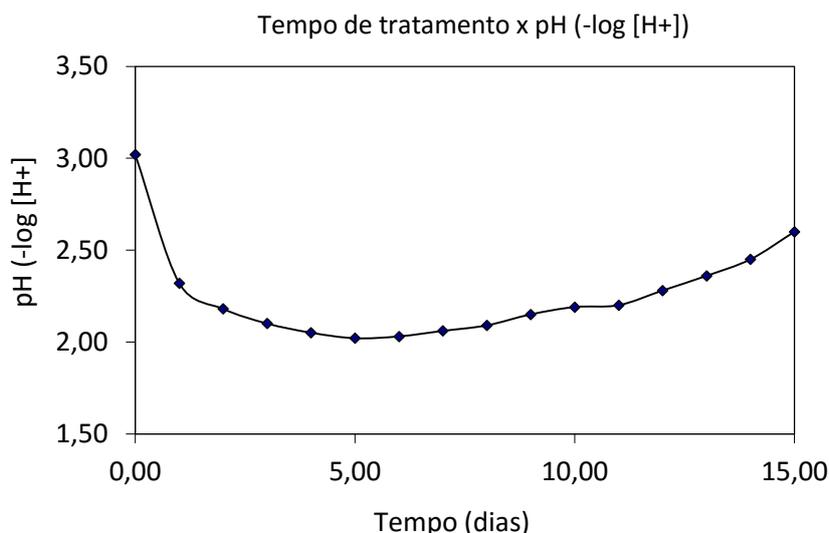


Figura 2. Comportamento do pH do Efluente com o tratamento com Reagente de Fenton
Figure 2. pH behavior of the effluent with treatment with Fenton's Reagent

Segundo a literatura consultada o Reagente de Fenton converte, em primeira instância, compostos orgânicos, como os fenólicos, em ácidos orgânicos. Isto pode ser a explicação para o comportamento da curva de pH apresentado na Figura 2. É possível ver uma queda e um posterior aumento do pH como o passar do tempo, o que seria em decorrência da oxidação final desses compostos; inicialmente a ácidos e finalmente a CO₂ e H₂O.

As medidas de DQO foram tomadas como principal parâmetro de acompanhamento do tratamento do efluente. Desta forma, o tempo de tratamento ficou condicionado à estabilização dos valores de DQO. Isto foi tomado como o ponto em que o Reagente de Fenton não mais agiria sobre a carga poluidora do efluente. No gráfico da Figura 3 tem-se o comportamento da DQO ao longo do tempo de tratamento com Reagente de Fenton, ou seja, 15 dias.

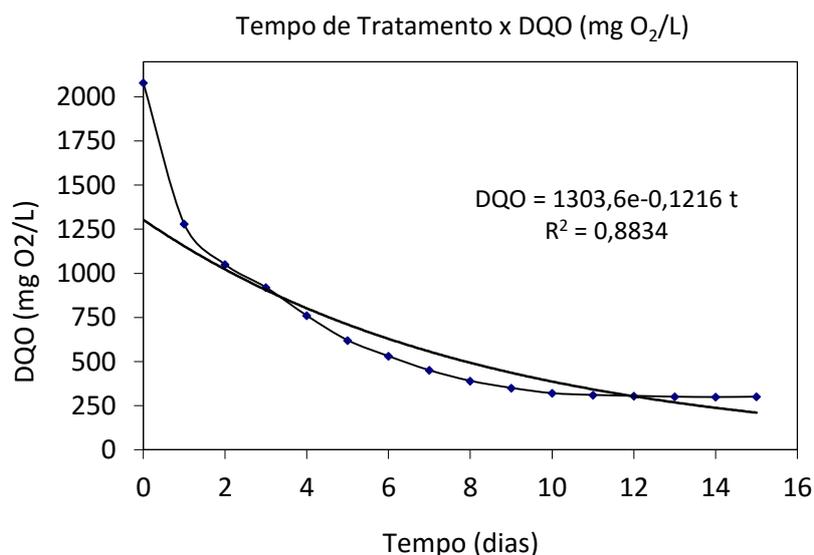


Figura 3. Comportamento da DQO do Efluente com o tratamento com Reagente de Fenton.
Figure 3. COD behavior of the effluent to treatment with Fenton's Reagent.

O gráfico da Figura 3 que mostra a queda da DQO com o passar do tempo durante o tratamento com Fenton, sugere que está queda inicial é linear e

a posterior é aproximadamente exponencial (R²=0,8834). No entanto, este valor de R² ainda é pequeno para uma completa caracterização do

comportamento dos dados, mas uma possível explicação para a mudança de intensidade da derivada da curva durante o tempo é que este tratamento pode apresentar mais de uma modalidade de reação química (pelo menos o tipo radicalar e oxidação simples pelo peróxido de hidrogênio). Por fim o gráfico estabiliza e a derivada da curva se aproxima de zero o que indica que a ação do reagente se torna desprezível, neste momento. A partir daí faz-se necessário a intervenção com Carvão Ativado.

Para escolha de quantidade de Carvão Ativado a ser adicionada ao efluente para a complementação do Tratamento com Reagente de Fenton foi feito o teste descrito anteriormente e o resultado é mostrado nos itens abaixo. Este tratamento com Carvão Ativado se justifica pelas propriedades adsorptivas verificadas para este sólido. Esta propriedade é útil, pois permite a redução de parâmetros como cor, odor e DQO já que os compostos responsáveis por estas características adsorvem-se ao Carvão que é separado do efluente ao fim da operação.

Para as medidas de cor obtiveram-se dados que estão representados pelo gráfico da Figura 4. Como mencionado anteriormente o Carvão Ativado é um tratamento complementar ao Reagente de Fenton e, portanto, adicionado após o fim da ação deste. Os valores de redução de cor mostrados no gráfico da Figura 4 são relativos a esta medida tomada imediatamente após o fim do tratamento com Reagente de Fenton. Desta forma, a redução de cor global (em relação ao valor inicial) é maior e será mostrada e discutida logo à frente.

O gráfico da Figura 4, mostra uma tendência de estabilidade na redução de cor com o aumento da adição de carvão ativado. A partir do segundo ponto (400 mg de Carvão Ativado) a redução não se torna significativa com o aumento do adsorvente, não justificando, porém, o uso destas quantidades para uma campanha de tratamento de efluentes. Para o tratamento em questão a decisão foi pela aplicação de quantidades proporcionais a 400 mg/800 mL de efluente.

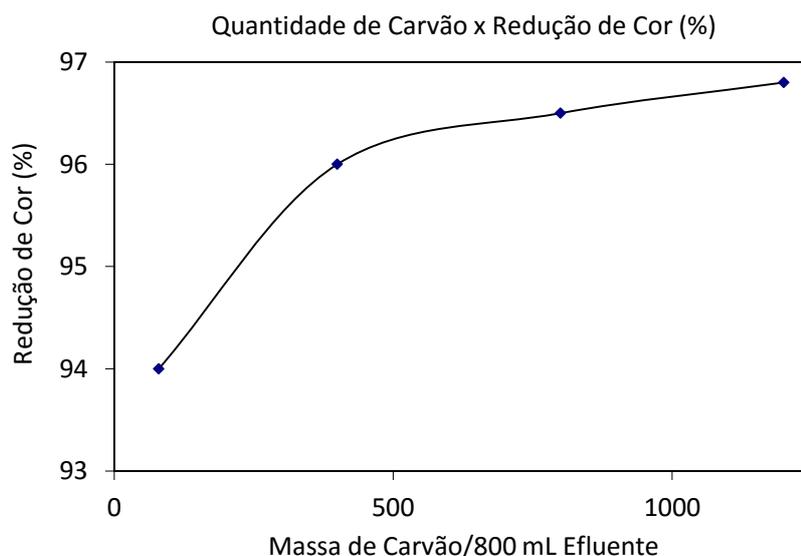


Figura 4. Comportamento da Cor do Efluente com adição de Carvão Ativado

Figure 4. Color Behavior of the effluent with addition of activated carbon.

Após a adição de carvão não foi verificado odor em nível sensorialmente perceptível para nenhuma das quantidades de Carvão Ativado adicionadas. Isto coloca o parâmetro odor como um quesito não decisivo na escolha da massa de adsorvente a ser ministrada ao efluente em tratamento. Também, o pH, não sofre influência notável destas diferentes quantidades de Carvão Ativado testadas neste experimento. Este sólido requer uma faixa de pH na qual ele melhor

desenvolve sua ação, mas não atua modificando estes valores de concentração de cátions hidrogênio. Os resultados das medidas de DQO estão no gráfico da Figura 5. Da mesma forma que para a cor o Carvão Ativado age adsorvendo compostos oxidáveis presentes no efluente e isto causa redução dos índices de Demanda Química de Oxigênio.

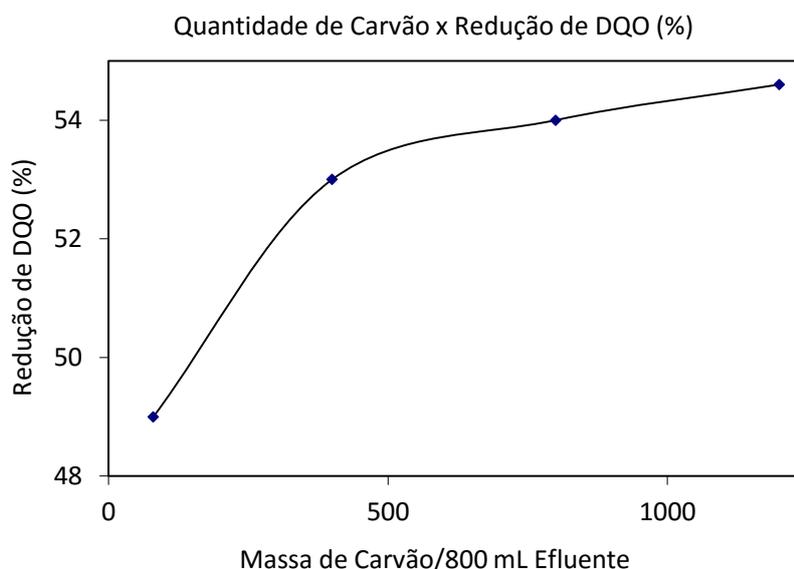


Figura 5. Comportamento da DQO do Efluente com adição de Carvão Ativado.
Figure 5. COD Behavior in effluent with addition Activated Carbon

O gráfico da Figura 5 é muito parecido com aquele que descreve a redução de cor. Isto sugere que os compostos coloridos presentes no efluente, que não sofreram degradação com Reagente de Fenton foram, também, oxidados pelo teste de DQO. Estas medidas confirmam a escolha da quantidade de Carvão Ativado feita com base na redução de cor, pois, a redução de Demanda Química de Oxigênio oferecida pelo aumento do Carvão Ativado, a partir de 400 mg/800 mL de efluente, não justifica o gasto adicional que isto

acarretaria para tratamento de uma grande quantidade de efluente.

Os gráficos das Figuras 6, 7 e 8 mostram o tratamento com um todo, juntando a primeira e a segunda fase do tratamento de efluente em pesquisa. Os gráficos levaram em conta intervenções como as alterações do pH para aplicação de Carvão Ativado e para a floculação do ferro adicionado. O gráfico da Figura 6 mostra o comportamento da Cor durante e ao final do teste completo (Reagente de Fenton + Carvão Ativado).

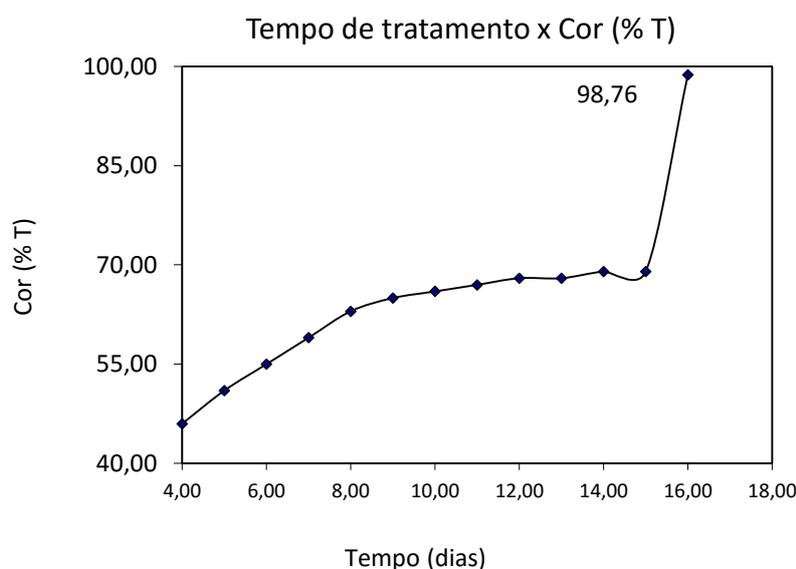


Figura 6. Cor do Efluente após Reagente de Fenton e carvão ativado.
Figure 6. Effluent color after Reagent Fenton and activated carbon.

Os valores de pH não representam exatamente uma resposta ao tratamento. Como mencionado anteriormente o pH do efluente foi acertado por duas ocasiões durante o tratamento.

Uma vez para a aplicação do Carvão Ativado já que este requer uma faixa de pH diferente daquela em que o efluente se encontrava para ter sua ação potencializada. A outra vez foi na etapa final em que

se tem a necessidade de flocular o ferro adicionado na composição do Reagente de Fenton. Dessa forma, os valores mostrados no gráfico da Figura 7 é resultado da soma da ação do tratamento e da adição de quantidades de NaOH para a elevação do

valor de pH. No entanto, o pH final está propício ao descarte do efluente o que torna esta operação totalmente benéfica ao tratamento; flocula o ferro e deixa o efluente pronto para o descarte.

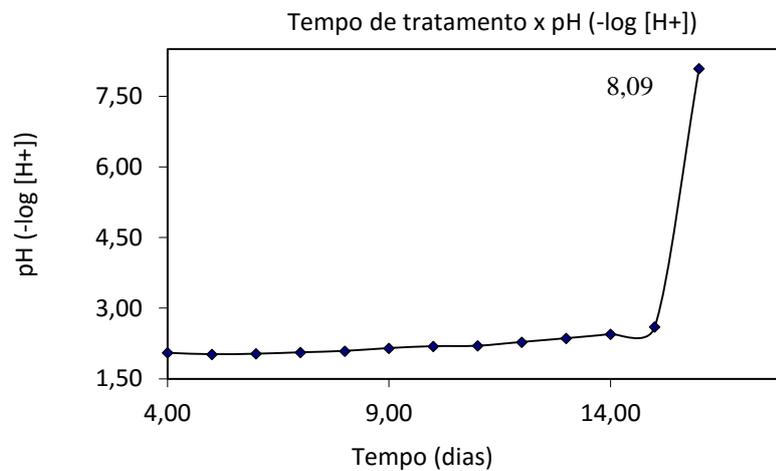


Figura 7. pH do Efluente após Regente de Fenton e Carvão Ativado.

Figure 7. pH Effluent after the addition Fenton's Reagent and Activated Carbon.

O gráfico da Figura 8, abaixo, mostra o comportamento da DQO durante e ao final do tratamento completo (Reagente de Fenton + Carvão Ativado). Neste caso a queda abrupta é decorrência direta do tratamento com Carvão Ativado, ao fim da aplicação do Reagente de Fenton, e mostra bem o efeito que o carvão tem sobre a DQO. Este resultado é muito bom, mas tem que se observar que isso só

ocorre com valores pequenos de DQO, uma vez que a quantidade de matéria orgânica retida pelo carvão deve ser fixa ou próximo disso, representando uma queda (em percentual) bem menor em um efluente com valores altos de DQO; caso desse mesmo efluente ao início do tratamento com Reagente de Fenton.

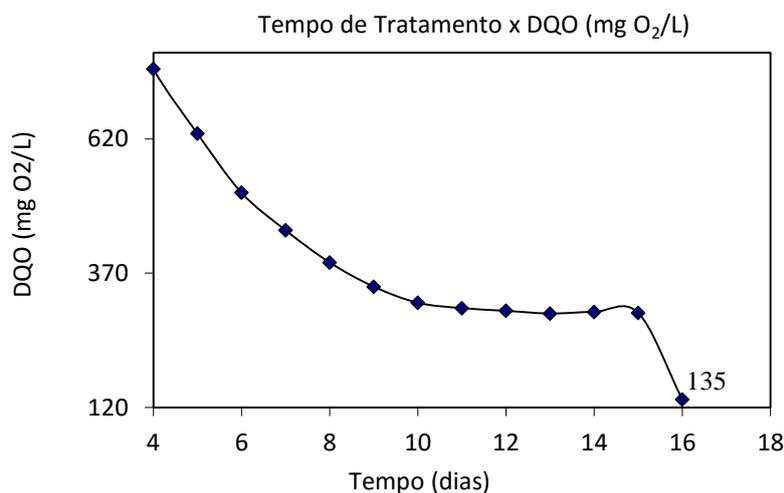


Figura 8. DQO do Efluente após Regente de Fenton e Carvão Ativado.

Figure 8. COD Effluent after addition Fenton's Reagent and Activated Carbon.

Tratamento experimental na ETE com o Reagente de Fenton

Após estes resultados no laboratório o tratamento relativo ao teste T₁₂ e à adição de 400 mg de Carvão Ativado/800 mL de efluente foi

aplicado a um tanque com 50 m³ de efluente com características idênticas às do efluente testado no laboratório. Os resultados deste teste, após 16 dias de tratamento, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados do tratamento em grande escala.**Table 3.** Large-scale treatment results.

Parâmetros	Resultados Ensaio piloto	Resultados tratamento na ETE
Volume	800 mL	45,00 m ³
pH	8,09	8,13
Cor (%T)	98,76	98,78
DQO (mg O ₂ /L)	135,0	126,0
Redução DQO (%)	93,57	94,00

Os resultados são muito parecidos com aqueles obtidos no laboratório. Isto se deve, possivelmente, ao fato de que neste período não houve mudanças bruscas do tempo como, por exemplo, chuvas ou ventos constantes. Ou seja, as condições do tanque mesmo em ambiente externo se assemelharam às condições do laboratório.

Naturalmente, é lógico pensar que estes valores de redução de Cor, Odor e DQO estejam ligados ao nível de poluição inicial do efluente em tratamento e que quanto maior a adição do Reagente de Fenton mais rápido seria os resultados. Porém este tempo de tratamento, que seria longo para algumas indústrias, é plenamente satisfatório para o exemplo citado uma vez que a ETE e o volume de efluente gerado por dia permitem que o mesmo permaneça em tratamento por 16 dias. A ETE possui número de tanques e em volumes tais que é possível

o tipo de procedimento pesquisado, desenvolvido e implantado no tratamento de suas águas residuárias.

CONCLUSÃO

Para a determinação das diretrizes empregadas na formulação do reagente de Fenton foram realizados ensaios pilotos, sendo que o teste piloto do experimento T₁₂ foi o que apresentou o melhor resultado (Cor e DQO), avaliando custo e benefício.

O teste T₁₂ apresenta composição de 3,2 mL de H₂O₂ e 160 mg de Sulfato Ferroso para um volume de 800mL. Posteriormente foi realizado o tratamento com acompanhamento diário no laboratório e em escala piloto, com resultados similares para todos os parâmetros. O percentual de transmitância como avaliação da cor apresentou resultado de 98,76% para o piloto e 98,78% na ETE, o percentual de redução de DQO foi de 93,57% no ensaio de laboratório e 94,00% na ETE.

O processo de tratamento de efluente utilizando o Reagente de Fenton apresentou ótimos resultados, sendo que após o tratamento o efluente se encontrava dentro dos limites estabelecidos pela legislação. Entretanto o tempo de tratamento de 16 dias se torna inviável para algumas indústrias, mas sendo tranquilamente utilizado na indústria estudada.

REFERÊNCIAS

ALVES, Manuel, MADEIRA, Miguel, MAGALHÃES, Fernão D. *Tratamento de Efluentes por Oxidação Química com Reagente de Fenton*. Artigo Científico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Portugal, 2003.

ARAÚJO, F. V. F.; YOKOYAMA, L.; TEIXEIRA, L. A. C. Remoção de cor em soluções de corantes reativos por oxidação com UV/H₂O₂. *Química Nova*, v. 29, n. 1, p. 11-14, 2006.

BIDGA, R. J. Consider Fenton's Chemistry for Wastewater Treatment. *Chemical Engineering Progress*, v. 91, n. 12, p. 62-6, 1995.

CHACÓN, J.M.; LEAL, M.T.; SÁNCHEZ, M.; BANDALA, E.R. Solar Photocatalytic Degradation of Azo-Dyes by Pphoto-Fenton Process, *Dyes and Pigments*, n. 69, p. 144-150, 2006.

DZOMBAK, D.A.; LAGNESE, K.M.; SPENGLER, D.B.; LUTHY, R.G. Comparison of activated sludge and RBC treatment of leachate from a solid waste land. In: Proc. Spec. Conf. Water Qual. Manage. Land. IIs, Water Pollut. Fed., Alexandria, Virginia, v.4, n.39, 1990.

GULKAYA, I.; SURUCU, G. A.; DILEK, F. B. Importance of H₂O₂/Fe²⁺ ratio in Fenton's treatment of a carpet dyeing wastewater. *Journal of Harzadous Materials*. v. B136, p. 763-769, 2006.

KUO, W. G. Decolorizing Dye Wastewater with Fenton's Reagent, *Wat. Res.* v.7, n.26, p. 881-890, 1992.

LEE, J. C.; KIM, M. S.; KIM, C.K.; CHUNG, C.H.; CHO, S. M.; HAN, G.Y.; YOON, K. J.; KIM, B.W. Removal of Paraquat in Aqueous Suspension of TiO₂ in an Immersed UV Photoreactor, *Korean J. Chem. Eng.*, v.5, n.20, p. 862, 2003.