

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA NO TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO UTILIZANDO PROCESSO FENTON

André Granzotto Gewehr¹; Jones Souza da Silva²; Daniel Borges Almeida³; Eduardo Fleck⁴; Luiz Fernando Cybis⁵

Resumo – O processo Fenton é uma alternativa promissora no tratamento de lixiviado antigo de aterros sanitários, devido à sua grande capacidade de degradar a matéria orgânica recalcitrante presente em grande concentração. A geração do radical hidroxila, responsável pela oxidação da matéria orgânica, é dependente de fatores como pH inicial, concentração de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e relação molar ferro divalente e H_2O_2 . Nesse sentido, a presente pesquisa reporta a otimização de tais fatores através da Metodologia de Superfície de Resposta, com base no Delineamento Central Composto Rotacional. Com tal método, é possível determinar um modelo matemático polinomial e seus pontos críticos, ou seja, os pontos ótimos do sistema. Foram aplicadas como variáveis-resposta a remoção de DQO e a cor verdadeira. Os resultados dos ensaios apresentaram a remoção de DQO como parâmetro-modelo mais adequado do que a cor verdadeira, que apresentou falta de ajuste significativa. A concentração de H_2O_2 verificou-se como o fator mais significativo do estudo, seguido da interação entre H_2O_2 e $Fe:H_2O_2$. O intervalo de pH adotado não afetou de forma significativa. A remoção de DQO foi de 91% com os seguintes valores ótimos: (1) pH inicial = 4,2; (2) $H_2O_2 = 16,3 \text{ gH}_2\text{O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$; (3) $Fe:H_2O_2 = 1:5,1 (5,3 \text{ gFe}^{+2} \cdot \text{L}^{-1})$.

Palavras-Chave – Lixiviado, Fenton, MSR.

APPLICATION OF THE RESPONSE SURFACE METHODOLOGY FOR LANDFILL LEACHED TREATMENT USING FENTON PROCESS

Abstract – The Fenton process is a promising alternative in the treatment of leachate from old landfills, because of its great ability to degrade recalcitrant organic matter present in high concentration. The generation of the hydroxyl radical, responsible for the oxidation of organic matter, is dependent on factors such as initial pH, concentration of hydrogen peroxide (H_2O_2) and molar divalent iron and H_2O_2 . Accordingly, the present study reports the optimization of such factors via Response Surface Methodology, based on Central Composite Rotational Delineation. With this method it is possible to determine a polynomial mathematical model and its critical points, which are the optimal points system. Were applied as response variables removal of COD and true color. The test results showed the COD removal as a parameter model more appropriate than the true color, which showed significant lack of fit. The H_2O_2 concentration was found as the most significant factor in the study, followed by the interaction between H_2O_2 and $Fe:H_2O_2$. The pH range adopted did not affect significantly. The COD removal was 91% with the following optimal values: (1) initial pH = 4,2; (2) $H_2O_2 = 16,3 \text{ gH}_2\text{O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$; (3) $Fe:H_2O_2 = 1:5,1 (5,3 \text{ gFe}^{+2} \cdot \text{L}^{-1})$.

Keywords – Leachate, Fenton, RSM.

¹ Inst Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre (RS). 91501-970. andregewehr@hotmail.com

² Inst Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre (RS). 91501-970. joneswsilva@gmail.com

³ Inst Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre (RS). 91501-970. dani_b_a7@hotmail.com

⁴ Inst Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre (RS). 91501-970. edufleck@yahoo.com.br

⁵ Inst Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre (RS). 91501-970. lfcybis@iph.ufrgs.br

1. INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários permanecem como estratégia preponderante no mundo de destinação final dos resíduos sólidos. Tal metodologia possibilita, se executada de forma tecnologicamente qualificada, a otimização da estabilização parcial anaeróbia dos resíduos e a proteção da saúde pública e dos recursos naturais locais. Entretanto, o aterro sanitário produz subprodutos líquidos e gasosos, os quais necessitam de gerenciamento adequado. O subproduto líquido, denominado lixiviado, é gerado a partir da lixiviação dos resíduos em metabolização microbiológica por águas de composição dos resíduos, e, sobretudo, por águas de chuvas. As principais características do lixiviado são as altas concentrações de nitrogênio amoniacal e matéria orgânica. A idade do aterro sanitário, onde o lixiviado é gerado, influencia na biodegradabilidade da matéria orgânica do efluente, de tal modo que para lixiviado maduro (ou antigo) a parcela recalcitrante atinge elevadas concentrações (QASIM, S. R.; CHIANG, 1994). A recalcitrância do lixiviado está relacionada à presença de compostos húmicos como os ácidos húmicos e fúlvicos, que apresentam grande peso molecular e são de difícil biodegradação (IM *et al.*, 2001). Os compostos húmicos necessitam ser removidos devido ao impacto que causam no meio ambiente, pois podem estar combinados com metais pesados e poluentes orgânicos persistentes como pesticidas, inseticidas e herbicidas. Soma-se a isso, também, a sua contribuição a problemas de sabor, odor, coloração, turbidez e acidez do efluente (RENOU *et al.*, 2008; WU *et al.*, 2010).

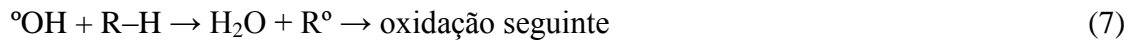
Para atingir os padrões de emissão estabelecidos pela legislação, o lixiviado deve passar por um sistema de tratamento adequado (RENOU *et al.*, 2008). Em geral, o lixiviado é tratado através de processos biológicos. Entretanto, em razão da baixa biodegradabilidade dos compostos orgânicos presentes, tais processos sozinhos não são eficientes na remoção de substâncias húmicas (WU *et al.*, 2010). Diversos processos físico-químicos são recomendados para o tratamento de lixiviado maduro, entre os quais se destacam os processos oxidativos avançados (POA) (RENOU *et al.*, 2008). A alta eficiência na remoção dos compostos húmicos, o aumento da biodegradabilidade através dos POA, a remoção de cor e odor e a diminuição da toxicidade (LI *et al.*, 2010) vêm atraindo pesquisas para a determinação das melhores condições de aplicação desses processos.

O processo Fenton destaca-se como um dos POA mais promissores no tratamento de lixiviado maduro, podendo ser empregado como pré ou pós-tratamento de lixiviados (LANGE *et al.*, 2006). Assim como outras modalidades dos processos oxidativos avançados, o processo Fenton baseia-se na formação do radical hidroxila ($^{\circ}\text{OH}$). Tal radical apresenta potencial de oxidação muito elevado ($E^0 = 2,3\text{V}$) (WU *et al.*, 2010). Para a sua geração, é necessária a utilização de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e sais de ferro divalente (DENG, 2006). O mecanismo de geração catalítica de radicais hidroxila pode ser descrito por uma série de reações (equações 1 a 6) (CASTRO; FARIA, 2001, DENG, 2006):



O radical $^{\circ}\text{OH}$ pode, idealmente, conduzir os compostos orgânicos à formação de água e dióxido de carbono, ou produzir compostos ainda não estáveis termodinamicamente, mas que se apresentem biodegradáveis. Portanto, suscetíveis ao tratamento biológico complementar (BULL;

ZEFF, 1991 apud LANGE *et al.*, 2006). A oxidação da matéria orgânica recalcitrante, de forma simplificada, ocorre da seguinte maneira (equação 7) (WU *et al.*, 2010):



O processo Fenton depende de diversos fatores como: (1) tempo de reação; (2) pH inicial; (3) relação molar $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$; (4) dosagem dos reagentes; (5) DQO inicial; (6) pH de coagulação; (7) temperatura (ZHANG *et al.*, 2009; LANGE, 2006). Uma das formas de otimizar os fatores condicionantes do processo oxidativo avançado pelo reagente de Fenton, afim de se obter elevada eficiência no tratamento em função de uma determinada resposta, é a técnica de delineamentos experimentais (MORAVIA, 2010). A otimização por delineamento experimental pode ser realizada de forma univariada ou multivariada (LI *et al.*, 2010).

Na otimização multivariada, os fatores envolvidos no processo são estudados e otimizados simultaneamente, investigando-se, também, as interações entre os mesmos (MORAVIA, 2010). As vantagens são a diminuição de ensaios, gerando maior rapidez, economia e eficiência e, ainda, a condução de modo efetivo da otimização simultânea de mais de um fator (LI *et al.*, 2010; MORAVIA, 2010; ZHANG *et al.*, 2009). Os delineamentos experimentais podem ser de primeira ordem, que apresentam modelos lineares, ou de segunda ordem, que apresentam modelos quadráticos (MORAVIA, 2010). Os delineamentos de segunda ordem são mais completos, pois também determinam a função estabelecida entre a resposta analítica e as variáveis independentes significativas do processo, possibilitando obter uma otimização dos resultados (FERREIRA *et al.*, 2002 apud MORAVIA, 2010).

O método multivariado comumente empregado é o da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) na qual a otimização é baseada em delineamentos fatoriais e abrange um conjunto de procedimentos estatísticos usados na modelagem matemática de respostas (ZHANG *et al.*, 2009). Essa técnica utiliza delineamento fatorial ampliado de segunda ordem, onde se destaca o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) (MORAVIA, 2010). Tal modelo baseia-se em um delineamento fatorial de dois níveis (2^k), um delineamento em estrela [2^k à uma distância $\alpha = (2^k)^{1/4}$] e pontos centrais (LI *et al.*, 2010). O presente trabalho objetiva utilizar os métodos estatísticos citados para otimizar determinados fatores interferentes no processo Fenton e analisar a viabilidade técnica.

2. METODOLOGIA

Para execução dos ensaios com o reagente de Fenton foi utilizado lixiviado proveniente da Central de Resíduos do Recreio, sita em Minas do Leão, Rio Grande do Sul. As características do lixiviado utilizado são apresentadas na Tabela 1. O experimento foi realizado em escala de bancada no Laboratório de Saneamento do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Todas as análises foram realizadas de acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - American Public Health Association (APHA, 1999). A análise de cor verdadeira foi realizada utilizando-se colorímetro HACH DR 890. Para as análises de DQO, foram corrigidas as possíveis interferências de H_2O_2 residual (KANG *et al.*, 1999) e as amostras foram previamente filtradas em filtro de diâmetro de poro de $0,45 \mu\text{m}$. As análises de H_2O_2 residual foram realizadas através do método iodométrico (KOLTHOFF, 1920), que é menos susceptível à interferência de compostos orgânicos.

Os ensaios foram realizados em equipamento *jar-test*, da marca *Alfakit*, modelo AT-700, dotado de seis provas e regulagem de velocidade para a agitação, trabalhando-se com volume de 800 mL por jarro. Os ensaios ocorreram em temperatura média de 22°C . O pH foi ajustado com

ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) e hidróxido de sódio 2N (NaOH). Os reagentes utilizados foram solução comercial de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) na solução comercial em concentração de 30% (v/v) e sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$).

Tabela 1 – Características do lixiviado utilizado nos ensaios

Parâmetros	Unidade	Método analítico	Valor
pH	-	4500 H ⁺ B – Método eletrométrico	8,3
DQO	mgO ₂ .L ⁻¹	5220 C – Refluxo fechado / Método titulométrico	5.900
DBO ₅	mgO ₂ .L ⁻¹	5210 D – Respirométrico	1.200
Cor verdadeira	mgPt-Co.L ⁻¹	8025 – Platina-Cobalto DR 890 Colorímetro Hach	15.600
Condutividade	mS.cm ⁻¹	Determinação com eletrodo	17,3

Para cada ensaio, foram ajustados previamente o pH, seguido-se adição de sulfato ferroso heptahidratado e peróxido de hidrogênio, nesta ordem. A adição de peróxido de hidrogênio seguiu a base estequiométrica 2,125 mgH₂O₂.mgDQO⁻¹. Procedeu-se, de início, mistura rápida a 150 rpm durante um minuto, e, a seguir, mistura lenta a 30 rpm por 59 minutos. Segundo diversos estudos (WU *et al.*, 2010), esse tempo é suficiente para completarem-se as reações de oxidação. Após, ajustou-se novamente o pH, para então agitar-se por 2 min a 150 rpm, e, após, 15 min a 45 rpm, deixando-se, então, sedimentar por 2 horas. O sobrenadante de cada ensaio foi coletado para análise das características.

O experimento foi realizado em Delineamento Composto Central Rotacional aplicável à Metodologia de Superfície de Resposta para otimizar os seguintes fatores: (1) pH inicial; (2) concentração de peróxido de hidrogênio; (3) relação molar [H₂O₂]/[Fe²⁺]; (4) pH coagulação. A Tabela 2 apresenta os níveis fatoriais mínimos (-1) e máximo (+1), ponto central (0) e pontos axiais mínimo (-2) e máximo (+2).

Tabela 2 – Níveis de variação dos fatores do DCCR

Fator	Símbolo	-2	-1	0	+1	2
pH inicial	X ₁	2,4	3,0	4,0	5,0	5,6
Dosagem H ₂ O ₂ *	X ₂	0,13	0,4	0,8	1,2	1,47
Fe ²⁺ :H ₂ O ₂	X ₃	1:0,6	1:2	1:4	1:6	1:7,4

* Fator de multiplicação 2,125 g de H₂O₂ para cada g de DQO do lixiviado

O delineamento experimental DCCR (k=3) consistiu em 8 ensaios em delineamento fatorial de dois níveis (2^k), seis ensaios em delineamento em estrela (2k) a uma distância α [$\alpha = (2^k)^{1/4}$] e quatro ensaios replicados nos pontos centrais (LI *et al.*, 2010). No total foram aplicados 18 ensaios. Para avaliar o desempenho do processo Fenton, foram selecionadas como variáveis-resposta DQO e cor verdadeira. Cada variável resposta determina os coeficientes (β) do modelo matemático quadrático, no caso um polinômio de segunda ordem (Equação 8). Os pontos críticos da superfície de resposta foram calculados através de um sistema com três equações lineares e três incógnitas. Os resultados foram analisados através da análise de variância (ANOVA) e gráficos de superfície de resposta e grau de influência dos fatores analisados gerados pelo software *Statistica*.

$$Y(X) = \beta_0 + \sum_j \beta_j X_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_j \beta_{jj} X_j^2 + r \quad (8)$$

Onde: $Y(X)$ é a variável resposta; X são os fatores do processo; β_0 é o termo independente; β_j são os coeficientes dos termos lineares; β_{ij} são os coeficientes da interação; β_{jj} são os coeficientes dos termos quadráticos e r é o resíduo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O *design* experimental utilizando o Método de Superfície de Resposta é apresentado, com os respectivos resultados de remoção das variáveis-resposta DQO e cor verdadeira de cada ensaio, na Tabela 3. O processo Fenton resultou em elevadas remoções de DQO e cor verdadeira.

Tabela 3 – Planejamento fatorial 2^3 e respectivos resultados

Ensaio	pH inicial	H ₂ O ₂	Fe:H ₂ O ₂	Remoção DQO (%)	Remoção Cor (%)
1	-1	-1	-1	74,46%	89,98%
2	+1	-1	-1	75,64%	86,12%
3	-1	+1	-1	85,32%	96,55%
4	+1	+1	-1	87,01%	94,85%
5	-1	-1	+1	62,14%	75,73%
6	+1	-1	+1	63,85%	73,97%
7	-1	+1	+1	86,47%	96,87%
8	+1	+1	+1	86,14%	97,20%
9	-1,682	0	0	76,66%	85,34%
10	+1,682	0	0	82,99%	83,34%
11	0	-1,682	0	53,29%	70,59%
12	0	+1,682	0	90,45%	97,03%
13	0	0	-1,682	78,33%	82,91%
14	0	0	+1,682	79,09%	83,94%
15	0	0	0	86,49%	97,61%
16	0	0	0	86,54%	96,97%
17	0	0	0	83,92%	96,63%
18	0	0	0	84,34%	97,24%

Os coeficientes de explicação do modelo ajustado R^2 (Tabelas 4 e 5) para a DQO e cor verdadeira, respectivamente, foram de 90,76% e 76,27%. A análise de variação, para um nível de significância de 95% foi significativa para ambas as variáveis-resposta, visto que o p-valor de regressão foi menor que 0,05, demonstrando que o modelo quadrático pode ser adequado para explicar os efeitos dos fatores na variável-resposta. Entretanto, o teste da falta de ajuste para a cor verdadeira resultou em valor significativo (p-valor menor que 0,05), evidenciando que o modelo adotado não é adequado para este parâmetro, ao contrário da DQO na qual o teste foi insignificante.

Tabela 4: Análise de variância da DQO para o modelo quadrático

Fonte de variação	DQO				Cor verdadeira			
	Soma quadrática	Média quadrática	F	p	Soma quadrática	Média quadrática	F	p
Modelo	1661,163	184,5737	19,632	0,00015	1249,646	138,8496	7,071	0,00564
Resíduos	75,2110	9,40137			157,0797	19,63496		
Falta de ajuste	69,4086	13,88172	7,177	0,06777	156,5686	31,31372	183,803	0,00062
Erro puro	5,802356	1,934119			0,511095	0,170365		
Total	1736,374				1406,726			

DQO: $R^2 = 0,9566$; Adj $R^2 = 0,9076$; Cor verdadeira: $R^2 = 0,88836$; Adj $R^2 = 0,7627$

A intensidade de significância dos termos é apresentada na Figura 1. A concentração de peróxido de hidrogênio foi o termo mais significativo para ambos os parâmetros. O termo X_2X_3 (Dosagem H_2O_2 e $Fe^{+2}:H_2O_2$) para a DQO ficou acima do nível de 5%. O pH foi significativo apenas para a cor verdadeira.

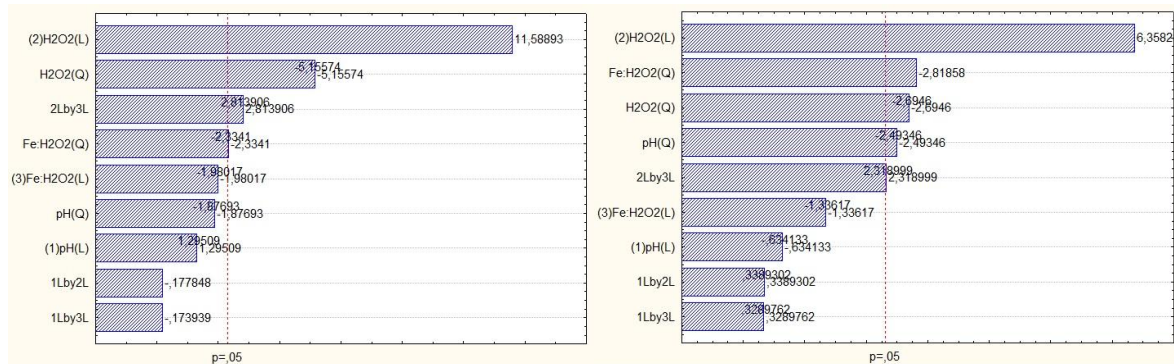


Figura 1: Diagrama de pareto para a remoção de DQO (esquerda) e remoção de cor verdadeira (direita)

Após a validação do modelo adotado, através da análise de variância e estimativa dos efeitos principais, foi possível determinar um modelo matemático polinomial de segunda ordem para a remoção de DQO na Equação 9. Embora a falta de ajuste para a cor verdadeira tenha sido significativa, o modelo matemático polinomial da cor verdadeira é demonstrado na Equação 10. A identificação das coordenadas do ponto crítico da superfície de resposta resultou nos valores apresentados na Tabela 6.

$$Y_1(X) = 20,3321 + 15,8339X_1 + 55,3276X_2 + 0,4467X_3 - 1,7469X_1^2 - 27,8583X_2^2 - 0,4922X_3^2 - 0,4820X_1X_2 - 0,0943X_1X_3 + 3,8130X_2X_3 \quad (9)$$

Onde: $Y_1(X)$ = Remoção de DQO (%); X_1 = pH inicial; X_2 = dosagem H_2O_2 ; X_3 = $Fe:H_2O_2$

$$Y_2(X) = 29,7218 + 23,9615X_1 + 29,2832X_2 + 1,4106X_3 - 3,3538X_1^2 - 21,0415X_2^2 - 0,8590X_3^2 + 1,3275X_1X_2 + 0,2577X_1X_3 + 4,5413X_2X_3 \quad (10)$$

Onde: $Y_2(X)$ = Remoção de cor verdadeira (%); X_1 = pH inicial; X_2 = dosagem H_2O_2 ; X_3 = $Fe:H_2O_2$

Como base neste modelo, foram construídas superfícies de respostas e de contornos para a remoção de DQO, que apresentou um modelo mais adequado (Figura 2). Observam-se, nas figuras citadas, que os valores da Tabela 6 são os pontos onde há maior remoção, atingindo até 90,96%. A clarificação do lixiviado pode ser verificada na Figura 3, onde pode ser feita a comparação do lixiviado com o efluente do ensaio de número 4.

Tabela 6: Pontos críticos para a DQO e cor verdadeira

	X_1 (pH inicial)	X_2 (dosagem de H_2O_2)	X_3 ($Fe^{+2}:H_2O_2$)	% Remoção
DQO	4,2	1,30 ($16,3 \text{ gH}_2\text{O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)	5,10 ($5,3 \text{ gFe}^{+2} \cdot \text{L}^{-1}$)	90,96
Cor verdadeira	3,9	1,10 ($13,8 \text{ gH}_2\text{O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)	2,69 ($9,8 \text{ gFe}^{+2} \cdot \text{L}^{-1}$)	98,32

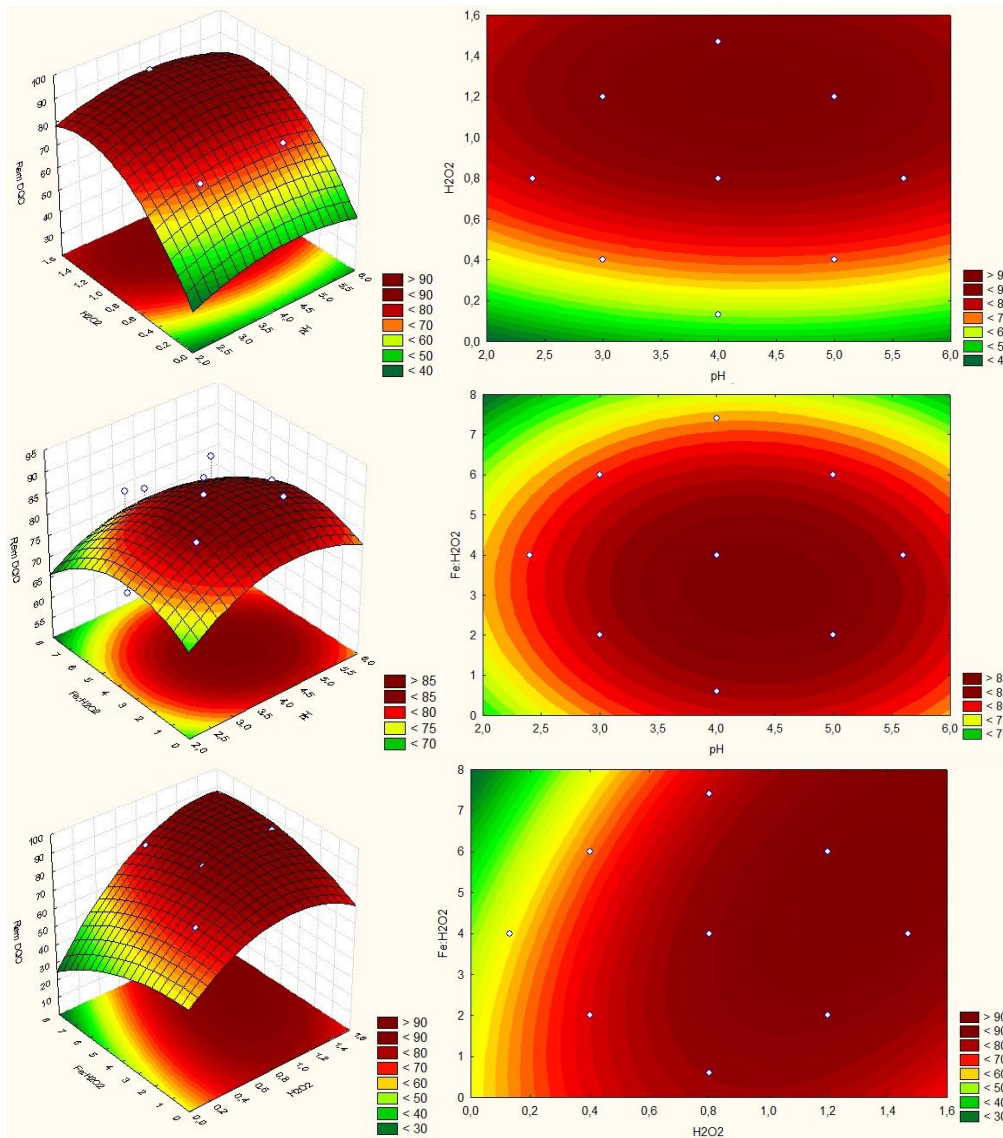


Figura 2. Superfície de resposta para a remoção de DQO e os fatores analisados



Figura 3. À direita lixiviado bruto e à esquerda lixiviado após o processo Fenton (ensaio 4)

4. CONCLUSÃO

O processo Fenton demonstrou grande eficácia no tratamento de lixiviado antigo com alta concentração de matéria orgânica recalcitrante, representada pelos parâmetros DQO e cor verdadeira. Através da Metodologia de Superfície de Resposta, foi possível verificar que os fatores

estudados (pH inicial, dosagem de H_2O_2 e relação molar $Fe:H_2O_2$) têm influências distintas nas variáveis-resposta. Para a remoção de DQO a concentração de peróxido de hidrogênio foi o fator mais significativo, seguido da interação H_2O_2 e $Fe:H_2O_2$. O intervalo de pH adotado não afetou de forma significativa a remoção de DQO. Pela análise de variância, a DQO demonstrou ser um parâmetro mais adequado do que a cor verdadeira para otimização dos fatores estudados.

O Delineamento Composto Central Rotacional aplicável à Metodologia de Superfície de Resposta determinou a região ótima dos fatores para a remoção de DQO: 1) pH inicial = 4,2; 2) dosagem de H_2O_2 = 1,30 (equivalente a $16,3 \text{ gH}_2\text{O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$); 3) $Fe:H_2O_2$ = 1:5,10 (equivalente a $5,3 \text{ gFe}^{+2} \cdot \text{L}^{-1}$). Esse conjunto de valores ajustados às variáveis resultam em remoção de cerca de 91% da DQO. Com base nos dados demonstrados, o método demonstrou adequação à otimização dos fatores na aplicação do processo Fenton ao tratamento de lixiviado.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). 1999. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed, Washington.
- CASTRO, J. P.; FARIA, P. Projecto de Investigação - Oxidação química com Reagente de Fenton. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 37 f. 2001.
- DENG, Y.; ENGLEHARDT, J. D. Treatment of landfill leachate by the Fenton process. *Water Research*, v. 40, p. 3683-3694, 2006.
- IM, J.-H.; WOO, H.-J.; CHOI, M.-W.; HAN, K.-B.; KIM, C.-W. Simultaneous organic and nitrogen removal from municipal landfill leachate using an anaerobic-aerobic system. *Water Research*, v. 25, p. 2403-2410, 2001.
- KANG, Y.; CHO, M.; HWANG, K. Correction of hydrogen peroxide interference on standard chemical oxygen demand test. *Water Research*, v. 33, p. 1247-1251, 1999.
- KOLTHOFF, I. M. *Chem. Weekblad*, 17:197, 1920.
- LANGE, L. C.; ALVES, J. F.; AMARAL, M. C. S.; MELO JÚNIOR, W. R. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processo oxidativo avançado empregando reagente de Fenton. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, p. 175-183, 2006.
- LI, H.; ZHOU, S.; SUN, Y.; LV, J. Application of response surface methodology to the advanced treatment of biologically stabilized landfill leachate using Fenton's reagent. *Waste Management*, v. 30, p. 2122-2129, 2010.
- MORAVIA, W. G. Avaliação do tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de processo oxidativo avançado conjugado com sistema de separação por membranas. 2010. 265 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- QASIM, S. R.; CHIANG, W. Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment. Lancaster, PA: Technomic Publishing, 1994.
- RENOU, S.; GIVAUDAN, J. G.; POULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F.; MOULIN, P. Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, v. 150, p. 468-493, 2008.
- WU, Y.; ZHOU, S.; QIN, F.; PENG, H.; LAI, Y.; LIN, Y. Removal of humic substances from landfill leachate by Fenton oxidation and coagulation. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 88, p. 276-284, 2010.
- ZHANG, H.; CHOI, H. J.; CANAZO, P.; HUANG, C. P. Multivariate approach to the Fenton process for the treatment of landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, v. 161, p. 1306-1312, 2009.