



Otimização das variáveis do processo foto-Fenton utilizando irradiação artificial na degradação de efluente têxtil

Diego Ricieri Manenti, Fernando Henrique Borba, Andréia Colombo, Patrícia H. Yassue, Aparecido Nivaldo Módenes

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. NBQ – Núcleo de Biotecnologia e Desenvolvimento de Processos Químicos. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. diegomanenti@hotmail.com

Resumo

Este trabalho investigou a fotodegradação dos poluentes de um efluente têxtil sintético (ETS) via processo foto-Fenton (FF). O ETS foi preparado pela mistura de seis corantes. Como fontes de irradiação UV, foram utilizadas três lâmpadas comerciais de mercúrio. As variáveis do processo, pH inicial e as concentrações de Fe^{2+} e H_2O_2 , foram otimizadas baseado nos resultados de redução da demanda química de oxigênio (DQO) e descoloração obtidos no planejamento fatorial 3^3 completo. Foi obtida uma boa representação dos dados experimentais para um modelo estatístico de quarta ordem, verificado pela aplicação de uma análise de variância. Os dados de degradação do ETS foram ajustados pelo modelo cinético de reação pseudo-primeira ordem. Com apenas 5 minutos de reação, o processo FF apresentou ótima eficiência na redução da DQO, da cor, da turbidez, dos sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV), exceto para os compostos aromáticos, que apresentaram resultados significativos de degradação em 60 minutos.

Palavras-chave: Corante têxtil. Foto-Fenton artificial. Planejamento experimental.

Área Temática: Tecnologias Ambientais.

Abstract

In this work, the pollutant photo-degradation of a synthetic textile effluent was investigated by using a lab-scale UV-based photo-Fenton reactor. As a synthetic textile effluent a mixture of six dyeing was prepared. As source of UV radiation three mercury commercial lamps were used. A 3^3 full factorial design was applied in order to seek the best values of initial pH, Fe^{2+} and H_2O_2 concentrations. The photo-Fenton process response was evaluated on the basis of chemical oxygen demand (COD) and color reduction values. A good representation of experimental data was obtained by a fourth order statistical model, which was checked out by applying a 2-way ANOVA analysis. A pseudo-first order reaction kinetic was applied to fit the substrate biodegradation data. A good performance of UV-based photo-Fenton process was achieved at 5 min, reducing COD, color, turbidity, total suspended, fixed and volatile solid, except for aromatic compound which was 95% significantly removal at 60 min.

Key words: Textile dye. Photo-Fenton artificial. Experimental design.

Theme Area: Environmental Technologies

1 Introdução

O setor têxtil é um dos segmentos industriais que figura entre os mais poluidores das águas superficiais devido aos seus processos consumirem elevadas quantidades de água que posteriormente são convertidas em efluentes. Estas águas de despejos são caracterizadas por



altas concentrações de matéria orgânica associada diretamente com elevada toxicidade causada pela presença de corantes, surfactantes, sólidos suspensos e compostos organoclorados (CISNEROS *et al.*, 2002).

A preocupação com a qualidade dos recursos hídricos demanda novas tecnologias para a remoção dos poluentes minimizando os impactos ambientais. Nos últimos anos, os processos oxidativos avançados (POAs) são aplicados como alternativa para o tratamento de efluentes de diversas matrizes ambientais (HABIBI, *et al.*, 2005). Os POAs são processos em que o principal agente oxidante corresponde ao radical hidroxila ($\cdot\text{OH}$), gerado a partir da combinação entre irradiação UV ou visível com substâncias como o H_2O_2 (LUCAS e PERES, 2006), semicondutores como o TiO_2 (HABIBI, *et al.*, 2005; LUCAS e PERES, 2006; GARCIA *et al.*, 2009), ZnO (RIVAS *et al.*, 2008), Fe^{2+} ou Fe^{3+} (LIU *et al.*, 2007; GARCIA *et al.*, 2007; QUICI *et al.*, 2007; DURÁN *et al.*, 2008), e/ou outras variações e associações. Dentre os POAs destaca-se o processo foto-Fenton (FF), baseado na reação entre sais ferrosos (Fe^{2+}) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), associados a irradiação UV, influenciando diretamente na formação do radical $\cdot\text{OH}$, proporcionando oxidações em tempos bem menores quando comparados aos outros POAs.

O objetivo deste trabalho é investigar a remoção dos poluentes do efluente têxtil pela aplicação do processo foto-Fenton, utilizando luz artificial como fonte de irradiação UV. Os parâmetros de avaliação da eficiência de oxidação foram a demanda química de oxigênio (DQO), a descoloração, a turbidez, os sólidos totais (ST), os sólidos totais fixos (STF), os sólidos totais voláteis (STV), e os compostos aromáticos simples e conjugados.

2 Materiais e Métodos

2.1 Materiais

O efluente têxtil sintético (ETS) foi preparado pela mistura de seis corantes em água destilada, com concentração de 50 ppm. Os corantes Azul FGLE ($\text{C}_{40}\text{H}_{23}\text{N}_7\text{Na}_4\text{O}_{13}\text{S}_4$), Marinho BLE ($\text{C}_3\text{H}_{24}\text{N}_5\text{Na}_3\text{O}_{13}\text{S}_3$), Escarlata BNLE ($\text{C}_{44}\text{H}_{32}\text{N}_7\text{Na}_4\text{O}_{16}\text{S}_4$), Preto FR ($\text{C}_{44}\text{H}_{32}\text{N}_{13}\text{Na}_3\text{O}_{11}\text{S}_3$), Laranja TGL ($\text{C}_{25}\text{H}_{33}\text{ClN}_6\text{O}_6\text{S}_2$) e Amarelo ARLE ($\text{C}_{48}\text{H}_{26}\text{N}_8\text{Na}_6\text{O}_{18}\text{S}_6$) foram fornecidos por uma lavanderia industrial localizada na cidade de Toledo – PR, Brasil. O H_2O_2 (30%), o $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Merck) e outros reagentes utilizados são de grau analítico.

2.2 Reator fotoquímico

O reator de escala laboratorial é constituído por becker de 500 mL, agitadores magnéticos e coletores de alíquotas, montados na forma que a solução fique a aproximadamente 30 cm de distância das fontes de radiação (três lâmpadas de alta pressão de mercúrio, Philips – 250 W). As lâmpadas são fixadas verticalmente na parte superior de uma caixa de madeira (80 cm x 80 cm x 50 cm).

2.3 Procedimento experimental

Antes de cada batelada experimental, o pH inicial do efluente foi ajustado utilizando as soluções padrões de NaOH (6 M) e H_2SO_4 (3 M). É adicionado 500 mL do efluente no reator seguido das soluções de H_2O_2 e Fe^{2+} nas quantidades determinadas no planejamento experimental. Na etapa do planejamento experimental o tempo de reação estabelecido foi de 60 minutos, e nas demais foram retiradas alíquotas nos tempos 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75 e 90 minutos para análise dos parâmetros físico-químicos.

2.4 Planejamento experimental

A influência dos três parâmetros operacionais do reator (POR): pH inicial e a concentração dos reagentes H_2O_2 e Fe^{2+} , foram investigadas baseadas na eficiência de redução



da DQO e descoloração, de acordo com um planejamento experimental fatorial 3^3 completo com triplicatas no ponto central. Os três níveis dos POR foram obtidos em testes preliminares e são apresentados na Tabela 1. Na análise do processo foto-Fenton, onde os valores dos POR podem influenciar nas respostas experimentais em termos de redução dos valores da DQO e descoloração, espera-se que as respostas gráficas 3-D sejam certa função dos níveis dos parâmetros, permitindo a otimização dos valores dos POR. A análise de variância (ANOVA) permite avaliar que tipo de interação entre os POR são estatisticamente significantes para a função resposta.

Tabela 1 - Níveis estudados para os três parâmetros operacionais do reator.

POR	Variáveis	Níveis		
		-1	0	1
[Fe ²⁺] (mg L ⁻¹)	q_1	5	10	15
[H ₂ O ₂] (mg L ⁻¹)	q_2	50	70	90
pH inicial	q_3	2	5	8

2.5 Determinações analíticas

Todas as metodologias utilizadas para determinar os parâmetros físico-químicos (DQO, cor, turbidez, pH, ST, STF e STV) do ETS tratado e não tratado seguiram o Standard Methods (APHA, 2005). Os produtos oxidados e a redução da concentração dos corantes foram medidos utilizando um Espectrofotômetro UV-vis (Shimadzu UV-1610PC) em cubetas de quartzo (5 mL e 1cm de caminho ótico) nos comprimentos de onda de máxima absorção ($\lambda_{\text{máx}}$) associados aos compostos aromáticos simples (228, 254 e 284 nm), aos compostos aromáticos conjugados (310 nm), e aos corantes Amarelo (404 nm), Laranja (416 nm), Preto (483 nm), Escarlate (494,5), Azul e Marinho (588 nm). Na etapa do planejamento experimental a cor foi mensurada no comprimento de onda 430 nm (Pt-Co) como descrito no Standard Methods (APHA, 2005).

3 Resultados e Discussão

3.1 Caracterização do ETS não tratado

As características físico-químicas do ETS não tratado são apresentadas na Tabela 2. Os valores da absorvância medidos nos comprimentos de onda de máxima absorção de cada composto presente no ETS são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 - Características físico-químicas do ETS não tratado.

Parâmetros	Valores
pH	7,0 ± 0,2
Turbidez (NTU)	47 ± 3,9
DQO (mg L ⁻¹)	211 ± 12
ST (mg L ⁻¹)	94 ± 6,2
STF (mg L ⁻¹)	32 ± 4,4
STV (mg L ⁻¹)	62 ± 5,0

Tabela 3 - Valores da absorvância do ETS nos $\lambda_{\text{máx}}$ (nm) dos compostos em estudo.

Compostos	$\lambda_{\text{máx}}$ (nm)	Valores
Aromáticos Simples	228	1,180
	254	0,727
	284	0,675
Aromáticos conjugados	310	0,534
Amarelo ARLE	404	0,775
Laranja TGL	416	0,788
Cor (PtCo)	430	0,759
Preto FR	483	0,631
Escarlate BNLE	494,5	0,613
Azul FGLE e Marinho BLE	588	0,594



3.2 Análise estatística

Os resultados obtidos no planejamento experimental para o tratamento do ETS são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Planejamento fatorial 3^3 completo com triplicata no ponto central.

Exp.	q_1	q_2	q_3	(%) redução	
				DQO	Des
1	5	50	2	77,1	82,1
2	10	50	2	83,2	88,9
3	15	50	2	70,5	90,1
4	5	70	2	90,6	92,7
5	10	70	2	99,5	99,3
6	15	70	2	85,8	98,2
7	5	90	2	59,9	93,8
8	10	90	2	63,1	99,5
9	15	90	2	55,2	95
10	5	50	5	75	82,9
11	10	50	5	86,6	86,6
12	15	50	5	72,3	88,1
13	5	70	5	83,7	93,3
14	10	70	5	95,3	97,2
15	15	70	5	81,1	99

Exp.	q_1	q_2	q_3	(%) redução	
				DQO	Des
16	5	90	5	57,5	96,2
17	10	90	5	60,2	96,7
18	15	90	5	56	97,6
19	5	50	8	66,8	80,4
20	10	50	8	69,4	83
21	15	50	8	65,6	87
22	5	70	8	80,2	91,1
23	10	70	8	89,9	89,5
24	15	70	8	78,2	90
25	5	90	8	53,4	89
26	10	90	8	59,2	95
27	15	90	8	46,8	96,3
28	10	70	5	94,8	96,6
29	10	70	5	95	97,1
30	10	70	5	95,1	97,5

Baseado nos resultados da eficiência de remoção da DQO e da descoloração combinado as ações das variáveis dos POR, foi proposto um modelo em termos lineares e as interações dos coeficientes, de acordo com a Equação (1), resultando em um bom ajuste entre os valores previstos pelo modelo e observados para a remoção da DQO e descoloração.

$$R = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i a_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_{ij} q_i q_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N w_{ijk} q_i q_j q_k + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N v_{ij} q_i^2 q_j^2 \quad (1)$$

onde R é a resposta experimental; q é o valor do POR ajustado; a_0 é a constante; a é o coeficiente dos termos lineares ajustados; b, w e v são os coeficientes associados com as interações lineares e quadráticas entre os valores dos POR ajustados; e N é o número do POR.

As respostas experimentais, baseadas nos valores da DQO e descoloração, permitiram o desenvolvimento de um modelo estatístico, com o ajuste linear e quadrático dos coeficientes associados com os valores dos POR, conforme apresentados nas Tabelas 5 (a-b). A significância dos efeitos dos POR e suas possíveis ações combinadas são verificadas aplicando a análise de variâncias (2-way ANOVA), utilizando o software Statistica®, como apresentado na Tabela 6. Na Tabela 6, a análise da ANOVA mostrou que o modelo previsto (Equação (2)) é válido, resultando em uma reprodução muito boa dos dados de remoção da DQO e descoloração, com os valores dos coeficientes apresentados nas Tabelas 5 (a-b).

Tabela 5 - Valores do ajuste linear e da interação dos coeficientes do modelo previsto para a redução da (a) DQO e (b) descoloração, com nível de significância de 95% ($p < 5\%$).(a) $r^2 = 0,98762$

Ações dos parâmetros	Coefficientes	Valor	Desvio padrão	t_{exp}	$p(\%)$
q_0	a_0	72,633	0,194	375,065	<0,01
q_1	a_1	-3,744	0,474	-7,894	<0,01
$(q_1)^2$	b_{11}	8,494	0,411	20,677	<0,01
q_2	a_2	-17,274	0,474	-36,416	<0,01
$(q_2)^2$	b_{22}	21,278	0,411	51,795	<0,01
q_3	a_3	-8,081	0,474	-17,037	<0,01

(b) $r^2 = 0,95684$

Ações dos parâmetros	Coefficientes	Valor	Desvio padrão	t_{exp}	$p(\%)$
q_0	a_0	91,823	0,145	634,307	<0,01
q_1	a_1	4,304	0,355	12,137	<0,01
$(q_1)^2$	b_{11}	1,504	0,307	4,897	<0,01
q_2	a_2	9,570	0,355	26,990	<0,01
$(q_2)^2$	b_{22}	4,426	0,307	14,413	<0,01
q_3	a_3	-4,193	0,355	-11,824	<0,01



$q_1 \times q_2$	b_{12}	-0,389	0,581	-0,669	50,57	$q_1 \times q_2$	b_{12}	-0,794	0,434	-1,830	7,22
$q_1 \times (q_2)^2$	w_{122}	0,550	0,503	1,093	27,85	$q_1 \times (q_2)^2$	w_{122}	-0,153	0,376	-0,406	68,6
$(q_1)^2 \times q_2$	w_{112}	-1,461	0,503	-2,904	0,51	$(q_1)^2 \times q_2$	w_{112}	0,197	0,376	0,524	60,2
$(q_1)^2 \times (q_2)^2$	v_{12}	2,608	0,436	5,986	<0,01	$(q_1)^2 \times (q_2)^2$	v_{12}	-0,624	0,326	-1,915	60,16
$q_1 \times q_3$	b_{13}	1,000	0,581	1,721	9,02	$q_1 \times q_3$	b_{13}	0,056	0,434	0,128	89,87
$q_1 \times (q_3)^2$	w_{133}	1,283	0,503	2,551	1,32	$q_1 \times (q_3)^2$	w_{133}	0,089	0,376	0,236	81,39
$(q_1)^2 \times q_3$	w_{113}	-0,672	0,503	-1,336	18,64	$(q_1)^2 \times q_3$	w_{113}	-2,306	0,376	-6,130	<0,01
$(q_1)^2 \times (q_3)^2$	v_{13}	0,733	0,436	1,683	9,74	$(q_1)^2 \times (q_3)^2$	v_{13}	-0,428	0,326	-1,313	19,4
$q_2 \times q_3$	b_{23}	2,261	0,581	3,892	<0,01	$q_2 \times q_3$	b_{23}	0,406	0,434	0,934	35,40
$q_2 \times (q_3)^2$	w_{233}	-2,403	0,503	-4,776	<0,01	$q_2 \times (q_3)^2$	w_{233}	1,064	0,376	2,829	<0,01
$(q_2)^2 \times q_3$	w_{223}	-0,281	0,503	-0,558	57,9	$(q_2)^2 \times q_3$	w_{223}	-1,831	0,376	-4,867	<0,01

Tabela 6 - Teste da análise de variância (2-way ANOVA) do modelo previsto para os valores de redução da DQO e descoloração.

Parâmetro		Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F		Nível de significância (%)
					Calc.	Estat.	
DQO	Regressão	15025,64	18	834,75	274,588	1,8	<0.01
	Resíduos	188,34	62	3,04			
	Total	15213,98	80				
Cor	Regressão	2333,02	18	129,61	76,36	1.8	<0.01
	Resíduos	105,24	62	1,697			
	Total	2438,27	80				

Segundo análise estatística, todos os parâmetros em termos lineares e quadráticos têm influência significativa ($p < 0,01\%$) para a eficiência do processo na remoção da DQO e descoloração. O efeito negativo ($a_3 < 0$, ver Tabelas 5 (a-b)) em relação ao nível do pH inicial, sugere que a melhor eficiência do processo FF para a remoção dos poluentes é obtida com pH inicial em meio ácido, resultados similares foram encontrados em outros trabalhos que afirmam a melhor eficiência dos POAs nas mesmas condições (KAJITVICHYANUKUL e JAMROENSAN, 2008; KNITTEL e SCHOLLMEYER, 2008; MAKHOTKINA *et al.*, 2008; PRIMO *et al.*, 2008). Baseado no total de 30 experimentos foram construídos os gráficos 3-D em função das respostas (R), e os dados experimentais foram previstos utilizando um modelo de quarta ordem (ver Eq. (2)) para os valores de remoção da DQO e descoloração, apresentando suas dependências em relação aos valores dos POR. Os resultados apresentados podem ser visualizados na Figura 1. As melhores condições do processo FF são com o pH inicial 2,3 e as concentrações de $\text{Fe}^{2+} = 9,3 \text{ mg L}^{-1}$ e $\text{H}_2\text{O}_2 = 65,5 \text{ mg L}^{-1}$.

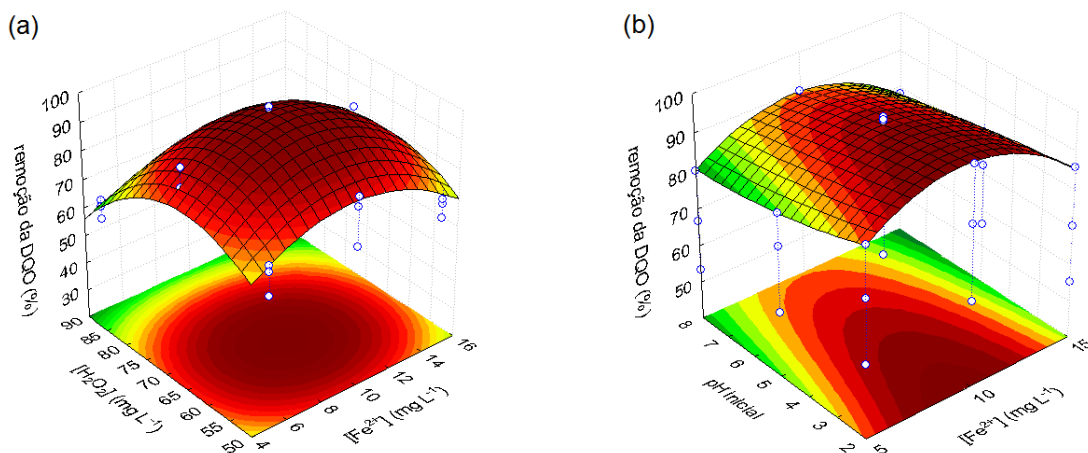


Figura 1 - Superfícies de resposta dos resultados obtidos para o processo foto-Fenton, utilizando o ETS tratado, com os dados experimentais (a) remoção da DQO vs. concentração de Fe^{2+} (q_1) e concentração de H_2O_2 (q_2) e (b) remoção da DQO vs. concentração de Fe^{2+} (q_1) e pH inicial (q_3).



3.3 Efeito do tempo de reação na degradação do ETS

Utilizando as melhores condições operacionais do processo FF encontradas no planejamento, foi obtido o espectro UV/vis em função do ETS não-tratado e tratado com o tempo de degradação estabelecido em 60 minutos conforme apresentado na Figura 2. Nas mesmas condições, foram retiradas alíquotas entre 5 e 90 minutos para verificar o efeito do tempo de reação para os melhores resultados na eficiência de remoção da DQO, da turbidez, ST, STF e STV conforme apresentado na Figura 3.

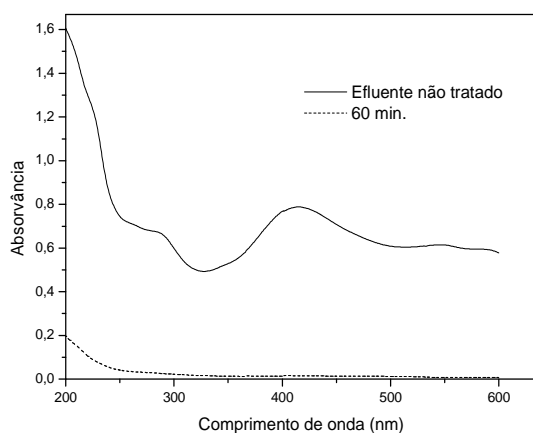


Figura 2 - Redução no valor da absorvância do ETS em função do tempo de reação.

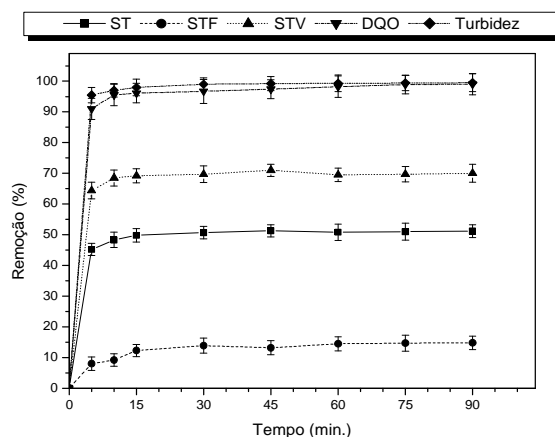


Figura 3 - Perfis de redução (ST, STF, STV, DQO e turbidez, %) em função do tempo de reação FF utilizando pH inicial em 2,3 e as concentrações de $\text{Fe}^{2+} = 9,3 \text{ mg L}^{-1}$ e $\text{H}_2\text{O}_2 = 65,5 \text{ mg L}^{-1}$.

A degradação dos corantes foi obtida com descoloração de 93%, 93%, 95%, 96% e 98% para os corantes Amarelo, Laranja, Preto, Escarlate, Azul e Marinho, respectivamente, em apenas 5 minutos, conforme apresentado na Figura 4. Nos comprimentos de onda 228, 254, 284 e 310 é revelada a degradação dos compostos aromáticos em função dos efeitos do peróxido como apresentado na Figura 5.

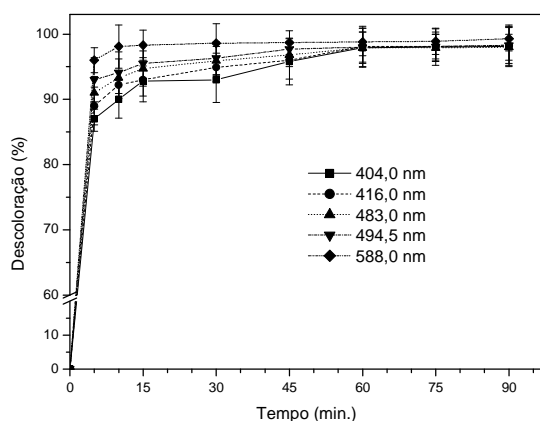


Figura 4 - Perfis de descoloração (%) nos $\lambda_{\text{máx}}$ (nm) de cada corante em função do tempo de reação FF, utilizando o ETS bruto com pH inicial em 2,3 e as concentrações de $\text{Fe}^{2+} = 9,3 \text{ mg L}^{-1}$ e $\text{H}_2\text{O}_2 = 65,5 \text{ mg L}^{-1}$.

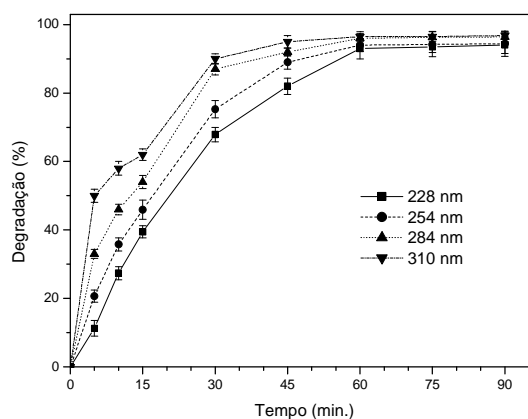


Figura 5 - Perfis de degradação (%) nos $\lambda_{\text{máx}}$ (nm) dos compostos aromáticos em função do tempo de reação FF, utilizando o ETS bruto com pH inicial em 2,3 e as concentrações de $\text{Fe}^{2+} = 9,3 \text{ mg L}^{-1}$ e $\text{H}_2\text{O}_2 = 65,5 \text{ mg L}^{-1}$.

Em geral, cinéticas de reações pseudo- primeira ordem podem prever a evolução na degradação de substratos com propriedades persistentes (KONSTANTINOY e ALBANIS,



2004). A Tabela 7 apresenta o decaimento na absorvância para o ETS tratado via processo FF, em função das constantes da taxa de reação pseudo-primeira ordem e suas respectivas regressões lineares nos $\lambda_{\text{máx}}$ (nm) dos compostos aromáticos. Esta análise não foi realizada nos $\lambda_{\text{máx}}$ (nm) relativa aos corantes devido a degradação ser muito rápida.

Tabela 7 - Degradação (%) em 60 minutos de reação FF, constantes de reação (k) e regressão linear (R) para o ETS.

ETS	228 nm	254 nm	284 nm	310 nm
Degradação (%)	93	94	96	96,5
k (min^{-1})	0,04802	0,06402	0,07285	0,09035
R	0,99686	0,99117	0,99258	0,99187

A Figura 6 apresenta a regressão linear do estudo cinético proposto. Assumindo que para esta reação, o radical hidroxila e o efluente são determinantes para a taxa de reação, podemos utilizar: $v = k_{\text{OH}} [\text{OH}^\bullet] C = k_{\text{ap}} C$; onde C é a absorvância do efluente (Abs), k_{OH} é a constante da taxa de reação, e k_{ap} é a constante de pseudo-primeira ordem. Assim, a linearização encontrada com $\ln (\text{Abs} \times 100 / \text{Abs}_0)$ é confirmada (MALATO *et al.*, 2003).

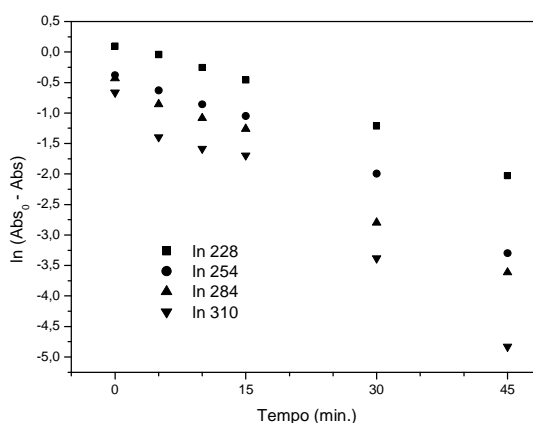


Figura 6 - Porcentagem de degradação do ETS em função do tempo de reação no processo FF para os comprimentos de onda de máxima absorção referentes aos compostos aromáticos.

4 Conclusão

Baseado nos resultados obtidos no planejamento fatorial 3^3 completo com triplicatas no ponto central, as variáveis pH inicial e as concentrações de Fe^{2+} e H_2O_2 apresentam parâmetros estatisticamente significativos, há um nível de significância de 95%, para a eficiência de degradação pelo processo FF do ETS. Foram obtidos resultados satisfatórios com o processo FF operando nas melhores condições, sendo: pH inicial 2,3 e as concentrações de $\text{Fe}^{2+} = 9,3 \text{ mg L}^{-1}$ e $\text{H}_2\text{O}_2 = 65,5 \text{ mg L}^{-1}$. Nestas condições, os parâmetros físico-químicos e os corantes foram oxidados com apenas 5 minutos de reação, diferentemente dos compostos mais persistentes como os compostos aromáticos, que apresentaram resultados significantes de degradação com 60 minutos. Com o modelo estatístico e a cinética de reação propostos, o processo em estudo pode ser relacionado com a aplicação deste em escala real, já que os mesmos geraram um bom ajuste linear. Com os resultados apresentados, o processo FF pode ser considerado eficiente para a degradação dos compostos orgânicos podendo ser incorporado como parte dos sistemas de tratamento de efluentes tipicamente biológicos, já que estes caracterizam-se essencialmente por uma simples transferência de fases dos poluentes, geralmente ocasionando acúmulos de resíduos sólidos como o lodo, que por sua vez, continua sendo um problema de poluição ambiental. Desta forma, o processo FF é alternativa eficaz para a degradação completa dos poluentes



amenizando os impactos nos recursos hídricos bem como reduzindo contaminações por subprodutos finais do processo.

Agradecimentos

À CAPES e a Fundação Parque Tecnológico Itaipu - FPTI/C&T, pelo apoio financeiro.

Referências

- APHA, AWWA, WPCF, **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 21st ed., American Public Health Association, Washington, DC, 2005.
- CISNEROS R.L., ESPINOZA A.G., LITTER M.I., “Photodegradation of an azo dye on the textile industry”, **Chemosphere** 48 (2002) 393-399.
- DURÁN A., MONTEAGUDO J.M., AMORES E., *Solar photo-Fenton degradation of Reactive Blue 4 in a CPC reactor*, **Applied Catalysis B: Environmental** 80 (2008) 42-50.
- GARCIA J.C., OLIVEIRA J.L., SILVA A.E.C., OLIVEIRA C.C., NOZAKI J., DE SOUZA N.E., *Comparative study of the degradation of real textile effluents by photocatalytic reaction involving UV/TiO₂/H₂O₂ and UV/Fe²⁺/H₂O₂ systems*, **Journal of Hazardous Materials** 147 (2007) 105-110.
- GARCIA J.C., SIMIONATO J.I., DA SILVA A.E.C., NOZAKI J., DE SOUZA N.E., “Solar photocatalytic degradation of real textile effluents by associated titanium dioxide and hydrogen peroxide”, **Solar Energy** 83 (2009) 316-322.
- HABIBI M.H., HASSANZADEH A., MAHDAVI S., “The effect of operational parameters on the photocatalytic degradation of three textile azo dyes in aqueous TiO₂ suspensions”, **J. Photochem. Photobiol. A: Chem.** 172 (2005) 89-96.
- KAJITVICHYANUKUL, P., JAMROENSAN, A., *Formaldehyde degradation in the presence of methanol by photo-Fenton process*. *J. of Env. Mana.*, 86 (2008) 545-553.
- KNITTEL, D. AND SCHOLLMAYER, E., *Functional group analysis on oxidized surfaces of synthetic textile polymers*. **Journal of Hazardous Materials**, 154 (2008) 83-91.
- KONSTANTINO, I.K., ALBANIS, T.A., *TiO₂-assisted photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solution: kinetic and mechanistic investigations: a review*. **Applied Catalysis B: Environmental** 49 (2004) 1-14.
- LIU R., CHIU H.M., SHIAU C., YEH R.Y., HUNG Y., *Degradation and sludge production of textile dyes by Fenton and photo-Fenton processes*, **Dyes and Pigments** 73 (2007) 1-6.
- LUCAS M.S., PERES J.A., “Decolorization of the azo dye Reactive Black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation”, **Dyes and Pigments** 71 (2006) 236-244.
- MAKHOTKINA, O. S., PREIS, S. V., PARKHOMCHUK, E. V., *Water delignification by advanced oxidation processes: Homogeneous and heterogeneous Fenton and H₂O₂ photo-assisted reactions*. **Applied. Cat. B: Envir.**, 74 (2008) 134-140.
- MALATO, S., BLANCO, J., VIDAL, A., ALARCÓN, D., MALDONADO, M.I., CACERES, J., GERNJAK, W., *Applied studies in solar photocatalytic detoxification: an overview*. **Solar Energy** 75 (2003) 329-336.
- QUICI N., MORGADA M.E., GETTAR R.T., BOLTE M., LITTER M.I., *Photocatalytic degradation of citric acid under different conditions: TiO₂ heterogeneous photocatalysis against homogeneous photolytic processes promoted by Fe(III) and H₂O₂*, **Applied Catalysis B: Environmental** 71 (2007) 117-124.
- PRIMO, O., RIVERO, M. J., ORTIZ, I. *Photo-Fenton process as an efficient alternative to the treatment of landfill leachates*. **J. of Haz. Mate.**, 153 (2008) 834-842.
- RIVAS F.J., CARBAJO M., BELTRÁN F., GIMENO O., FRADES J., “Comparison of different advanced oxidation processes (AOPs) in the presence of perovskites”, **Journal of Hazardous Materials** 155 (2008) 407-414.