

Artigo

Degradação de Efluente Têxtil Sintético Utilizando os Processos Oxidativos Avançados Foto-Fenton Artificial e Foto-Fenton Solar

França, A. A. C.;* Moita Neto, J. M.; Rios, M. A. S; Pereira, A. D.; Lira, M. A. T.;
Martins, L. M.; Matos, J. M. E.; Sá, J. L. S.; Silva, C. E.

Rev. Virtual Quim., 2021, 13 (2), 335-346. Data de publicação na Web: 18 de Dezembro de 2021

<http://rvq.sbg.org.br>

Degradation of Textile Dye Using the Advanced Oxidation Processes Photo-Fenton and Solar Photo-Fenton

Abstract: The present work aimed to evaluate the efficiency of the photo-Fenton process assisted by artificial or solar light applied in the treatment of synthetic textile effluent. For the study of solar radiation was designed and built a solar reactor type Compound Parabolic Collector (CPC), and the efficiency of the treatment was analyzed in terms of color removal, chemical oxygen demand (COD) and spectral scanning of samples. The results obtained showed that the photo-Fenton process was efficient in discoloring the effluent, with emphasis to the study conducted by sunlight that in all operational conditions of work presented removal rates above 90%. In terms of COD, the best efficiency was obtained when 1250 mg L⁻¹ e :62,5 mg L⁻¹ showing rates of 85.40% and 50.20% for the process with artificial or solar light respectively.

Keywords: Textile wastewater; photo-Fenton; solar radiation; black biozol; Fenton reaction.

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do processo Foto-Fenton assistido por luz artificial ou solar aplicado no tratamento de efluente têxtil sintético. Para o estudo com radiação solar foi projetado e construído um reator solar do tipo Compound Parabolic Collectors (CPC), e a eficiência do tratamento foi analisada em termos de remoção de cor, demanda química de oxigênio (DQO) e varredura espectral das amostras. Os resultados obtidos mostraram que o processo Foto-Fenton foi eficiente na descoloração do efluente, com destaque para o estudo conduzido por luz solar que em todas as condições operacionais de trabalho apresentou taxas de remoção superior a 90%. Em termos de DQO, a melhor eficiência foi obtida quando: 1250 mg L⁻¹ e 62,5 mg L⁻¹ apresentando taxas de 85,40% e 50,20% para o processo com luz artificial e solar respectivamente.

Palavras-chave: Efluente têxtil; foto-Fenton; radiação solar; preto biozol; reação Fenton.

* Universidade Federal do Piauí, Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Ininga, CEP 64049-550, Teresina-PI, Brasil.

Degradação de Efluente Têxtil Sintético Utilizando os Processos Oxidativos Avançados Foto-Fenton Artificial e Foto-Fenton Solar

Aline Aparecida Carvalho França,^{a,*}  José Machado Moita Neto,^a  Maria Alexandra de Sousa Rios,^c  Alexandre Diógenes Pereira,^b  Marcos Antônio Tavares Lira,^a  Leonardo Madeira Martins,^a  José Milton Elias de Matos,^a  José Luís Silva Sá,^b  Carlos Ernando da Silva^a 

^a Universidade Federal do Piauí, Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Ininga, CEP 64049-550, Teresina-PI, Brasil

^b Universidade Estadual do Piauí, Campus Poeta Torquato Neto, Pirajá, CEP 64002-150, Teresina-PI, Brasil

^c Universidade Federal do Ceará, GRINTEQUI/DEM/CT, Campus do Pici, Bloco 714, CEP 60455-760, Fortaleza-CE, Brasil.

*allinneaparecida@hotmail.com

Recebido em 23 de Julho de 2020. Aceito para publicação em 17 de Novembro de 2020.

1. Introdução

2. Materiais e Métodos

3. Resultados e Discussões

3.1. Processo de descoloração do corante Preto Biozol

3.2. Avaliação espectroscópica no UV e Visível

4. Conclusão

1. Introdução

A indústria de beneficiamento têxtil é um setor com elevado potencial poluidor, pois seus processos demandam grandes volumes de água e geram efluentes quimicamente complexos. Os reagentes químicos utilizados durante as operações de tingimento de fibras têxteis, processo este que é responsável pela geração de grandes volumes de resíduos líquidos, contendo elevada carga orgânica e forte coloração, apresentam composição diversificada, variando dos compostos inorgânicos aos polímeros e produtos orgânicos.^{1,2,3}

Os efluentes líquidos das indústrias têxteis são coloridos em razão do uso excessivo de corantes nos processos de tingimento e estamparia. A complexidade da estrutura molecular e a origem

sintética dos corantes empregados dificulta os processos de tratamento aplicados aos efluentes.⁴

O lançamento desses efluentes no meio ambiente é prejudicial para a vida aquática e humana, pois ao serem descartados sem tratamento em corpos hídricos, alteram as propriedades físico-químicas do meio e a alta concentração de matéria orgânica nesses efluentes faz com que bactérias heterotróficas possam ser rapidamente multiplicadas nos corpos hídricos, comprometendo a sobrevivência de seres aquáticos devido à competição por oxigênio, pois prejudicando a penetração de luz, os corantes comprometem a fotossíntese e conseqüentemente a quantidade de oxigênio dissolvido. Somado a tudo isso, efluentes têxteis podem ainda apresentar potencial carcinogênico e mutagênico o que faz com que processos convencionais de tratamento, como os tratamentos biológicos não apresentem uma

solução completa para o problema em razão da baixa biodegradabilidade de muitos corantes.²

Tais compostos são de difícil remoção por tratamentos convencionais e podem ser transportados prontamente através de esgotos e rios, além de poderem sofrer alterações químicas sob determinadas condições ambientais como degradação biológica ou fotoquímica, e os produtos de transformação podem ainda, em alguns casos, ser mais tóxicos do que o composto original.⁵

Um dos processos frequentemente utilizados pelas indústrias têxteis brasileiras para tratar seus efluentes, é a tecnologia de lodos ativados, que demanda a aplicação posterior de tratamentos adicionais para a redução da cor. Também é muito comum a aplicação de processos integrados que combina tratamentos biológicos, físicos e químicos. A literatura reporta algumas técnicas disponíveis para o tratamento de efluentes têxteis como adsorção, adsorção em carvão ativado, coagulação/floculação, ultrafiltração e osmose reversa, porém além de apresentarem um custo maior que os processos biológicos, estes processos realizam apenas a transferência de fase do poluente, necessitando assim de pós tratamento dos resíduos sólidos gerados ou regeneração do material adsorvente.^{6,7}

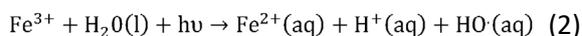
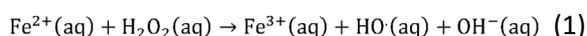
Diante deste cenário de resistência dos corantes têxteis frente a processos de natureza biológica, do caráter não destrutivo de muitas propostas de tratamento, além da problemática relacionada à geração e disposição do lodo químico e biológico, os processos oxidativos avançados, conhecido como POA's, vêm se destacando nos últimos anos e são apresentados como uma alternativa para a remoção de poluentes persistentes e de efluentes com elevada carga orgânica, quando os tratamentos convencionais não alcançam a eficiência necessária.^{8,9}

Os POA's são processos baseados na produção *in situ* do radical hidroxila (HO[•]), que apresenta um alto potencial padrão de redução (2,73 V vs EPH), o que lhe confere alta capacidade oxidativa, e assim o torna uma boa alternativa para promover a degradação de diversas moléculas orgânicas, sendo capaz de produzir alterações profundas na estrutura química dos poluentes, podendo inclusive levar à sua completa mineralização. Em águas residuárias coloridas, que apresentem em sua composição corantes do tipo azocorantes, os radicais hidroxila atacam as ligações azo insaturadas do cromóforo, descolorindo assim o efluente.^{10,11,12,13}

Uma característica importante dos POA's é a baixa seletividade do ataque dos radicais hidroxila, o

que é uma característica de considerável relevância para um oxidante utilizado no tratamento de efluentes. Outra vantagem destes processos é que estes podem ser utilizados no tratamento de contaminantes cuja concentração seja muito baixa, chegando até às concentrações de ppb.^{11,14,15}

Dentre os POA's, a reação de Fenton (**equação 1**), amplamente divulgada na literatura científica e conhecida pela sua simplicidade operacional e grande eficiência de degradação, pode tornar-se um método ainda mais eficiente com a utilização de radiação ultravioleta que é responsável pelo aumento da taxa de degradação do poluente orgânico, sendo conhecido como processo Foto-Fenton (**equação 2**). A redução de Fe³⁺ a Fe²⁺ é responsável pelo efeito positivo da radiação sobre a reação.¹¹



Uma das grandes vantagens do processo Foto-Fenton é a possibilidade de utilização da radiação solar o que resulta no aumento da taxa de degradação do poluente. A utilização de processos irradiados por radiação solar deve, sempre que possível ser incentivada, já que apresentam eficiência de degradação compatíveis aos processos assistidos por radiação artificial, e o uso da radiação ultravioleta artificial acaba por tornar o processo dispendioso em virtude do consumo de energia e da necessidade de materiais como o quartzo que apresenta preços elevados.^{6,16,17}

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do processo Foto-Fenton e Foto-Fenton Solar aplicado na degradação do corante têxtil Preto Biozol.

O corante Preto Biozol é um produto de larga utilização em Teresina e segundo a indústria que o forneceu para esta pesquisa, este é considerado de difícil remoção. Este corante, cuja fórmula química não foi fornecida pela empresa fabricante, é classificado como azo e direto.^{18,19} Os corantes azos correspondem ao maior grupo de corantes sintéticos, caracterizam-se por possuírem o grupamento N=N, e são considerados corantes de elevada complexidade, pois quando presente nos efluentes têxteis trazem diversos prejuízos ao meio ambiente como o comprometimento da qualidade da água e danos ao ecossistema.²⁰

Conforme caracterização realizada por Martins (2011),¹⁸ a fórmula mínima do corante Preto Biozol

UC é $C_{27}H_{36}O_{13}N_5S$, e a análise de infravermelho não detectou o grupo C=O e nem os estiramentos fortes dos grupos C-O, O-H, NO_2 e C-X.

2. Materiais e Métodos

O efluente sintetizado foi composto pelo corante têxtil Preto Biozol, adquirido de uma empresa da cidade de Teresina-PI. A solução foi preparada conforme metodologia de Mo *et al.* (2007)²¹ descrita na Tabela 1. As condições operacionais dos experimentos foram realizadas pelo ajuste do pH igual a 3, utilizando-se H_2SO_4 e NaOH.

Utilizou-se H_2O_2 35% (w/w) e $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ como fonte de íons Fe^{2+} . A solução do branco, necessário para a calibração do espectrofotômetro, foi preparado com a adição de NaCl, Na_2SO_4 , álcool polivinílico e água destilada.

Os sais NaCl e Na_2SO_4 são produtos muito utilizados no processo de tingimento têxtil, por isso foram adicionados durante o preparo da solução do corante, a fim de se simular um efluente real.

Em ambos processos, assistidos por radiação artificial e radiação de luz solar, o pH foi ajustado antes do início do processo e monitorado ao longo da reação com o auxílio de um pHmetro, modelo 3110. Para o início do processo, primeiro adicionou-se o $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ e depois H_2O_2 , sempre nessa ordem em todos os experimentos, e nas concentrações pré-estabelecidas. A Tabela 2 apresenta as quatro condições experimentais utilizadas no desenvolvimento do trabalho, conforme metodologia descrita por Martins *et al.* (2011).¹⁹

O processo Foto-Fenton irradiado por luz artificial foi conduzido em um fotorreator de bancada (Figura 1) com capacidade de 1 L, equipado com banho ultratermostatizado, a fim de se manter as condições isotérmicas em 25°C (1A); o mesmo contém uma tampa de nylon contendo 4 orifícios necessários para a adaptação dos instrumentos de medição (1B). A radiação foi fornecida por uma lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão, 80 W modelo HPLN80W (Philips) (1C) a qual ficou imersa no efluente protegida por um tubo de quartzo cujas medidas eram: 23 mm de diâmetro e 140 mm de altura.

Os ensaios utilizando radiação solar foram realizados na cidade de Teresina, localizada a 05° 05' 12" de latitude Sul e a 42°48'42" de longitude Oeste preferencialmente nos dias claros e com mínima presença de nuvens, no horário de 12:00 às 14:00 horas. Os dados meteorológicos básicos (temperatura do ar, precipitação pluviométrica, insolação e radiação solar) foram obtidos juntos aos registros da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instalada no Campo Experimental da Embrapa Meio Norte – PI. A intensidade média de radiação solar obtida nos dias de experimentos variava de 1850,3 a 2058,3 kJ/h.²²

O processo de degradação foi conduzido em reator solar projetado e construído, do tipo CPC (Cilíndrico Parabólico Composto) o qual é composto por quatro tubos de borossilicato conectados em série, os quais são posicionados sobre coletores de alumínio (Figura 2). Tais reatores apresentam vantagens que os tornam bastante versáteis, como melhor relação óptica para o aproveitamento da energia solar, baixo

Tabela 1. Composição do efluente têxtil sintético

Reagentes	Concentração (g L ⁻¹)
Corante Preto Biozol UC	0,10
NaCl	0,25
Álcool polivinílico	0,50
Na_2SO_4	0,75

Fonte: Mo *et al.* (2007)²¹

Tabela 2. Concentração dos reagentes

H_2O_2 (mg L ⁻¹)	Fe^{2+} (mg L ⁻¹)
750	37,5
1000	50
1250	62,5
1500	75

Fonte: Martins *et al.*¹⁹

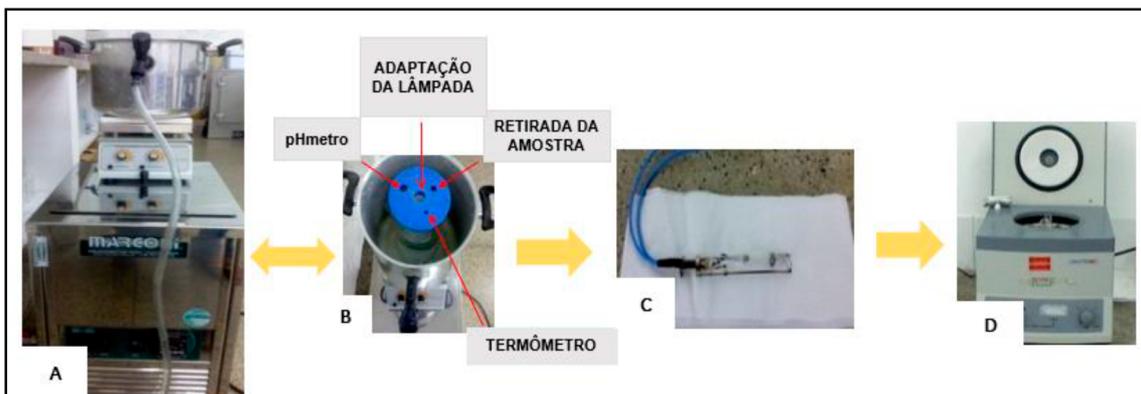


Figura 1. Fotoreator de bancada utilizado para o processo Foto-Fenton irradiado por luz artificial. (A - banho ultratermostatzado; B - tampa de nylon para a adaptação dos instrumentos de medição; C - lâmpada de vapor de mercúrio; D - centrífuga)

custo, fácil instalação e manutenção, além de permitir que tanto a radiação difusa como a direta sejam utilizadas durante o processo.^{11,23}

O reator solar é conectado a um reservatório com capacidade para 6 L e a circulação entre o reservatório e o reator foi feita por bomba de circulação (modelo LYN - 50) de potência 0,5/0,37 Kw; a vazão média de trabalho foi de 3,04 L min⁻¹.

Para ambos os processos, o tempo de reação foi 120 minutos e alíquotas do efluente foram retiradas em tempos pré-estabelecidos de 0', 10', 20', 30', 40', 50', 60', 90' e 120', as quais eram

centrifugadas a 200 rpm por 5 minutos (1D) e submetidas a controle analítico.

A eficiência dos processos foi avaliada por meio da análise de remoção de cor, espectroscopia eletrônica no Ultravioleta e Visível e remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO). O acompanhamento do perfil espectrofotométrico das amostras foi realizado em espectrofotômetro modelo Varian, Cary 300 monitorando-se a região compreendida entre 200 e 800 nm. As cubetas utilizadas eram de quartzo e possuíam 1 cm de caminho óptico.



Figura 2. Fotorreator do tipo CPC construído para o processo Foto-Fenton irradiado por luz solar

A avaliação da remoção de cor foi monitorada por meio da leitura da absorbância no comprimento de onda 507 nm, região de máxima absorbância do efluente têxtil sintético, em espectrofotômetro de feixe simples, modelo Hach DR 2800, seguindo a equação 3.

$$\text{Remoção de cor}_{(\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

Onde C_0 é o valor da absorbância da solução antes do tratamento e C_t absorbância da solução após o tratamento nos respectivos tempos em que a amostra foi coletada.

A determinação da DQO do efluente seguiu o método do refluxo fechado conforme Apha, Awwa, Wef (1999).²⁴ Para o cálculo da concentração final da DQO foi necessário eliminar a interferência do peróxido residual, já que conforme foi observado por Kang, Cho e Hwang (1999),²⁵ o peróxido de hidrogênio residual existente influencia negativamente no valor final da DQO. A concentração residual de peróxido de hidrogênio foi determinada pelo método iodométrico seguindo Ohlweiler (1968),²⁶ e para fazer essa correção foi utilizada a equação 4, indicada pelos autores, conforme descrito abaixo:

$$\begin{aligned} \text{DQO}_{\text{mg/L}} &= \text{DQO}_{\text{final}} - f \cdot [\text{H}_2\text{O}_2] \\ \text{Onde } f &: 0,4766 - 4,06 \cdot 10^{-5} \cdot [\text{H}_2\text{O}_2] \end{aligned} \quad (4)$$

Os resultados obtidos foram submetidos a testes estatísticos para avaliação das respostas quantitativas obtidas para os parâmetros remoção de cor e remoção de DQO na degradação do efluente sintético. Para isso, aplicou-se a análise da variância (ANOVA), que consiste num teste estatístico usado para testar a igualdade dos efeitos dos tratamentos, permitindo identificar se existe diferença significativa entre as médias e se os fatores (variáveis independentes) influenciam a variável dependente.

O teste de Tukey, um teste de comparação múltipla, foi aplicado para avaliar a magnitude das diferenças entre as médias. Tal teste se faz necessário quando existe diferença significativa entre as médias, completando assim a análise de variância, comparando o resultado de todos os pares de médias.

A Análise estatística (ANOVA e teste Tukey) aplicada aos dados foi realizada com o auxílio do software SPSS 15.0. Foi adotado um nível de significância (α) de 5% em todos os testes realizados.

3. Resultados e Discussões

3.1. Processo de descoloração do corante Preto Biozol

O reaproveitamento do efluente gerado na indústria têxtil apresenta grande limitação em virtude da qualidade que é exigida do mesmo para tal fim. A problemática está relacionada à intensa coloração apresentada pelos efluentes têxteis os quais apresentam inúmeros impactos quando lançados em corpos hídricos, pois além da interferência estética, estes dificultam o tratamento de água para abastecimento público além de causarem alterações nas atividades fotossintetizantes da biota aquática. Assim, faz-se importante avaliar a taxa de remoção de cor em processos de degradação de efluentes.^{2,4,5,8}

Para que fosse possível avaliar a eficiência de cada um dos processos testados em termos de porcentagem de degradação o presente trabalho avaliou o processo de remoção de cor bem como a remoção da DQO do efluente estudado durante o processo Foto-Fenton assistido por radiação artificial e solar.

Os resultados obtidos para o processo de remoção de cor no processo Foto-Fenton assistido por radiação UV e solar estão apresentados nas Figuras 3 e 4. Comparando-as pode-se observar a influência do tipo de radiação utilizada na descoloração do efluente. No processo assistido por radiação artificial, a maior taxa de remoção de cor obtida após 120 minutos de tratamento foi 92,47% quando 1500 mg L⁻¹ e :75 mg L⁻¹. Nesta mesma condição o processo assistido por luz solar apresentou taxa de remoção de 90,65% com apenas 1/4 do tempo total de reação. Mesmo comportamento observou-se quando 1250 mg L⁻¹ e 62,5 mg L⁻¹, que com apenas 30 minutos de tratamento com radiação solar já apresentava taxa de 93,84%.

Dessa forma, tendo como parâmetro a porcentagem de descoloração do efluente têxtil sintético, observa-se que nas condições operacionais estudadas o melhor desempenho foi obtido no processo Foto-Fenton Solar utilizando reator CPC, seguido do processo com radiação artificial. Para melhor visualização do resultado obtido ver Figura 4.

A análise de variância e teste de Tukey para os resultados da remoção de cor estão apresentados nas Tabelas 3 e 4. Na ANOVA foi considerado um nível de significância (sig) de 5% (resultados estatisticamente significativos quando sig < 0,05).

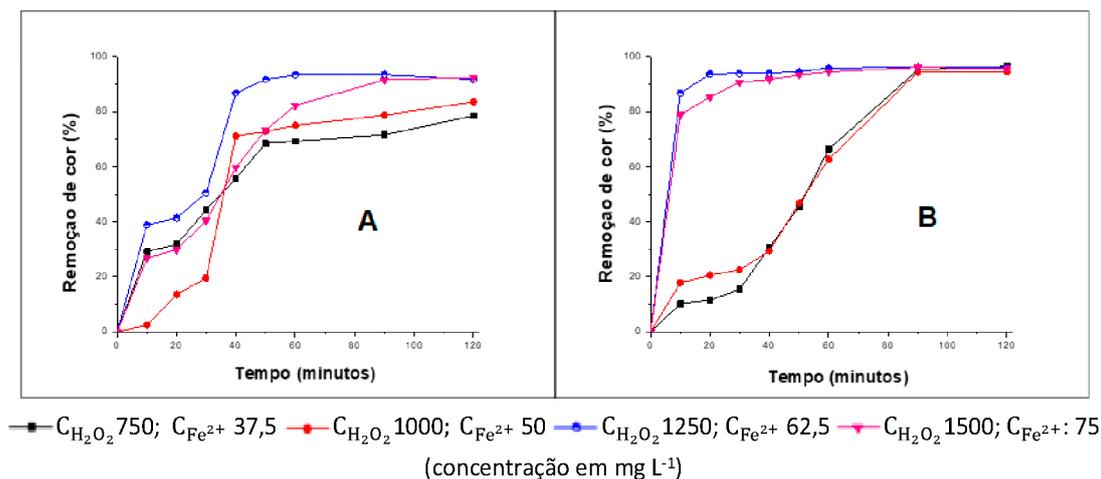


Figura 3. Remoção de cor para o processo assistido por luz artificial (A) e luz solar (B).



Figura 4. Resultado do processo de descoloração do efluente após 120 minutos de reação para a condição: $C_{H_2O_2}$: 1500 $mg L^{-1}$ e $C_{Fe^{2+}}$: 75 $mg L^{-1}$

Tabela 3. ANOVA para remoção de cor

Tipo de Análise	Foto Fenton		Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	Significância
COR	Artificial	Entre Grupos	268,279	89,426	10,328	0,024
		Dentro dos grupos	34,634	8,659		
		Total	302,913			
	Solar	Entre Grupos	5,029	1,676	0,456	0,727
		Dentro dos grupos	14,695	3,674		
		Total	19,724			

De acordo com o resultado do teste F, o processo artificial apresenta diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade entre os processos. Com o valor de sig menor que 0,05 podemos concluir que, para qualquer nível de significância as médias dos

grupos não são todas iguais, ou seja, existe pelo menos uma diferença entre os grupos analisados. Para o processo solar o valor de sig obtido foi maior que 0,05 o que indica igualdade de variância entre os grupos analisados.

Tabela 4. Resultado do teste de Tukey aplicado a análise da remoção de cor

Foto Fenton	Concentração de H ₂ O ₂	Subconjunto para alfa= 0,05	
		1	2
Artificial	750	78,5950	
	1000	83,6050	83,6050
	1250		91,7550
	1500		92,4750
	sig	0,427	0,123
Solar	1000	94,6250	
	1500	95,2750	
	1250	96,1350	
	750	96,6950	
	sig	0,719	

O teste de Tukey foi aplicado para comparação das médias nas condições utilizadas para o processo de remoção de cor no processo Foto-Fenton. Os resultados mostraram que as condições 750 mg L⁻¹ e 1000 mg L⁻¹ são estatisticamente semelhantes bem como as condições 1000 mg L⁻¹, 1250 mg L⁻¹ e 1500 mg L⁻¹ para o Foto-Fenton Artificial. No processo solar todas as condições são estatisticamente semelhantes. Portanto a recomendação no processo artificial é 1250 mg L⁻¹ enquanto para o solar é 750 mg L⁻¹.

Tendo como parâmetro a porcentagem de descoloração do efluente têxtil Preto Biozol, vemos que nas condições operacionais estudadas, o melhor desempenho foi obtido no processo Foto-Fenton assistido por radiação solar haja visto que em todas as condições apresentou taxa de remoção de cor superior a 90%. Sobre isso, importante destacar que o uso de radiação artificial como fonte de energia em processos de degradação deve ser analisado com bastante rigor em virtude do elevado custo do sistema de tratamento que faz uso de materiais onerosos como o quartzo e do

elevado custo energético, sendo preferível utilizar, sempre que for possível radiação solar.

Levando-se em consideração que altos percentuais de remoção de cor nem sempre significa completa mineralização dos efluentes tratados, analisou-se neste trabalho, a remoção de DQO nas amostras obtidas durante o processo Foto-Fenton. A DQO avalia a quantidade de oxigênio necessário à degradação da matéria orgânica de uma amostra que pode ser biodegradável ou não e sua mensuração antes e após o tratamento permite avaliar a degradação ocorrida no efluente tratado. A Tabela 5 apresenta os resultados.

A maior redução de DQO encontrada foi para o processo Foto-Fenton utilizando luz artificial. A condição operacional que proporcionou a maior porcentagem de remoção em ambos experimentos foi :1250 mg L⁻¹ e :62,5 mg L⁻¹.

O mesmo tratamento estatístico dado para o parâmetro remoção de cor foi aplicado para a remoção de DQO em ambos os processos. Os resultados estão apresentados nas Tabela 6.

Tabela 5. Remoção de DQO para o processo Foto Fenton

Condição (mg L ⁻¹)	Foto Fenton Artificial (%)	Processo Foto Fenton Solar (%)
C _{H₂O₂} : 1500 C _{Fe²⁺} : 75	65,34	35,59
C _{H₂O₂} : 1250 C _{Fe²⁺} : 62,5	85,40	50,20
C _{H₂O₂} : 1000 C _{Fe²⁺} : 50	54,25	45,21
C _{H₂O₂} : 750 C _{Fe²⁺} : 37,5	46,11	21,89

Tabela 6. ANOVA para remoção de DQO

Tipo de Análise	Foto Fenton		Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	Significância
DQO	Artificial	Entre Grupos	1737,616	579,205	33,129	0,003
		Dentro dos grupos	69,934	17,483		
		Total	1807,550			
	Solar	Entre Grupos	931,746	310,582	160,588	0,000
		Dentro dos grupos	7,736	1,934		
		Total	939,482			

Conforme resultado da ANOVA, os processos Foto-Fenton artificial e solar apresentam diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade, ou seja, para qualquer nível de significância as médias dos grupos não são todas iguais, existindo pelo menos uma diferença entre os grupos analisados.

O teste de Tukey (Tabela 7) mostrou que as condições: 750 mg L⁻¹ e 1000 mg L⁻¹ são estatisticamente semelhantes bem como as condições 1000 mg L⁻¹ e 1500 mg L⁻¹ para o Foto-Fenton Artificial. No processo solar apenas as condições 1000 mg L⁻¹ e 1250 mg L⁻¹ são estatisticamente semelhantes.

3.2. Avaliação espectroscópica no UV e Visível

O perfil espectrofotométrico das amostras coletadas durante o processo Foto-Fenton nas condições :1250 mg L⁻¹ e :62,5 mg L⁻¹ está apresentado na Figura 5. Os espectros de varredura obtidos permitem identificar em quais faixas de absorbância houve alterações estruturais durante o tratamento.

A região do ultravioleta compreendida entre 200 e 300 nm é característica de estruturas aromáticas,^{27,28} logo o objetivo pretendido neste trabalho, ao monitorar esta região foi avaliar a degradação de

espécies aromáticas presentes na amostra analisada, utilizando como resposta ao tratamento, o decréscimo ou eliminação do sinal nesta região.

Analisando a Figura 5, observamos para o estudo conduzido por luz artificial e solar que a partir de trinta minutos de reação, o efluente não apresenta nenhuma banda na região do visível. Comparando os resultados obtidos, observa-se que o processo irradiado por luz artificial (Figura 5A) apresentou intensa atividade na região ultravioleta e com 30 minutos de tratamento há formação de bandas na região centrada entre 270 e 273 nm atestando assim a presença de espécies aromáticas. Com o decorrer do tratamento os sinais se modificam e após 120 minutos de reação esta região apresentava-se livre do sinal, o que pode indicar que não houve acúmulo de intermediários de caráter aromático ao final do tratamento. Para o tratamento utilizando a luz solar (Figura 5B) observa-se que a partir de 30 minutos de reação ocorre significativa redução da absorbância da região ultravioleta.

A ausência de intensos sinais na região do ultravioleta, característicos de grupos aromáticos substituídos, ao final do tratamento pode ser um indicativo de mineralização do efluente e eficiência do tratamento aplicado.

Tabela 7. Resultado do teste de Tukey aplicado à análise de remoção de DQO

		Subconjunto para alfa= 0,05		
Foto Fenton	Concentração de H ₂ O ₂	1	2	3
Artificial	750	46,1100		
	1000	54,2550	54,2550	
	1500		65,3450	
	1250			85,4000
	sig	0,338	0,172	1,000
Solar	750	21,8950		
	1500		35,5900	
	1000			45,2150
	1250			50,2000
	sig	1,000	1,000	0,074

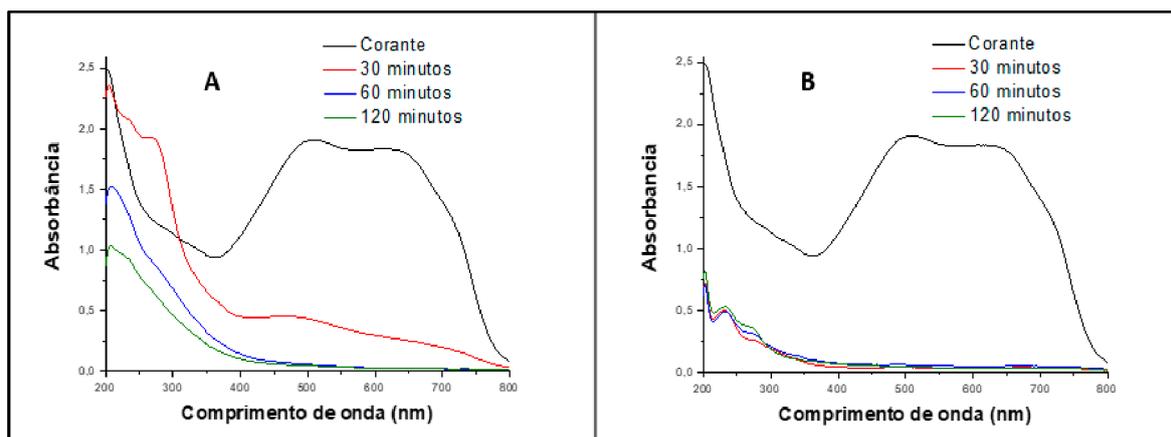


Figura 5. Acompanhamento espectrofotométrico **A:** Foto Fenton **B:** Foto Fenton Solar para a condição: $C_{H_2O_2}$):1250 mg L⁻¹ e $C_{Fe^{2+}}$:62,5 mg L⁻¹

Assim, tendo como parâmetro as transições ocorridas na região ultravioleta, pode-se inferir que o estudo utilizando radiação solar através do reator CPC apresentou melhor desempenho, o que é muito importante visto a possibilidade de economia energética proporcionada por este processo.

A eficiência do processo Foto-Fenton conduzido por radiação solar tem sido bastante documentada no meio científico. Katsumata *et al.* (2010)²⁹ realizaram um estudo comparativo, aplicando o processo Foto-Fenton assistido por radiação artificial e solar na degradação do corante reativo Yellow 86, concluindo que a eficiência de descoloração do corante sob degradação solar foi similar ao processo utilizando radiação artificial. Estes resultados reforçam a iniciativa de que sempre que possível deve-se optar pela utilização da energia solar como fonte de radiação ultravioleta.

Um estudo proposto por Costa *et al.* (2015)³⁰ aplicou os processos Fenton e Foto Fenton solar como tratamento para lixiviados oriundos de dois aterros sanitários localizados na cidade do Rio de Janeiro. Os resultados obtidos após o tratamento apontam que o processo utilizando radiação UV solar foi mais eficiente, alcançando taxas de 88% e 78% para remoção de DQO contra 56% e 19% utilizando o processo Fenton.

Oliveira *et al.* (2019)³¹ testaram a atividade catalítica de ferrita de cobalto (CoFe₂O₄) sintetizada sobre aluminato de magnésio (MgAl₂O₄) e zeólita ZSM-5, na degradação do corante amarantho, *via* reação foto-Fenton sob irradiações visível artificial e solar. Os autores relatam que as atividades catalíticas para ambos os sistemas foram superiores quando irradiação solar foi usada no processo,

atingindo 95% de descoloração em 30 minutos e 80% de mineralização em 240 minutos de reação.

4. Conclusão

Os processos de degradação utilizando Foto-Fenton assistido por luz artificial e solar apresentaram resultados satisfatórios, com destaque para radiação solar que mostrou melhor desempenho no parâmetro remoção de cor em todas as condições operacionais trabalhadas. O bom desempenho do reator solar do tipo CPC na degradação do corante Preto Biozol serve de estímulo para que trabalhos futuros possam explorar a potencialidade deste sistema de tratamento bem como o potencial solar da cidade de Teresina.

Sobre a análise do perfil espectrofotométrico, é possível inferir que o uso da radiação solar e artificial na degradação do efluente sintético contendo o corante Preto Biozol seguem mecanismos de processos diferentes.

O bom rendimento do processo utilizando luz solar durante o dia, comprova que esta é uma alternativa de tratamento com potencial promissor, apresentando vantagens de ordem econômica e ambiental, uma vez que pode minimizar prejuízos para o meio ambiente. Tal processo, deve sempre que possível, ter sua aplicação fomentada.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado e à Coordenação de

Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências Bibliográficas

- ¹ Peixoto, F.; Marinho, G.; Rodrigues, K. Corantes têxteis: uma revisão. *HOLOS* **2013**, *5*, 98. [[CrossRef](#)]
- ² Ramos, M. D. N.; Claudio, C. C.; Rezende, P. H. V.; Cabral, L. P.; Santos, L. A.; Costa, G. G.; Mesquita, P. L.; Aguiar, A. Análise Crítica das Características de Efluentes Industriais do Setor Têxtil no Brasil. *Revista Virtual de Química* **2020**, *12*, 913. [[CrossRef](#)]
- ³ Trevizani, J. L. B.; Carvalho, K. Q.; Passig, F. H.; Schiavon, G. J.; Pereira, I. C.; Medeiros, F. V. S. Determinação da cinética de ozonização de efluente têxtil na remoção de cor e matéria orgânica. *Revista Matéria* **2019**, *24*, e-12331. [[CrossRef](#)]
- ⁴ Lellis, B.; Fávaro-Polonio, C. Z.; Pamphile, J. A.; Polonio, J. Cesar. Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation* **2019**, *3*, 275. [[CrossRef](#)]
- ⁵ Berradi, Mohamed.; Hsissou, Rachid.; Khudhair, Mohammed.; Assouag, Mohammed.; Cherkaoui, Omar.; El Bachiri, Abderrahim.; El Harfi, Ahmed. Textile finishing dyes and their impact on aquatic environs. *Heliyon* **2019**, *5*, 2711. [[CrossRef](#)]
- ⁶ Justino, N. M.; Battistelli, A. A.; Lapolli, F. R.; Lobo-Recio, M. A.; Souza, K. V.; Nagel-Hassemer, M. E. Degradação sazonal de efluentes têxteis por processo foto-Fenton solar mediado por ferrioxalato: descoloração e comportamento dos sólidos. *Engenharia Sanitária Ambiental* **2019**, *24*, 33. [[CrossRef](#)]
- ⁷ Queiroz, M. T. A.; Queiroz, C. A.; Alvim, L. B.; Sabará, M. G.; Leão, M. M. D.; Amorim, C. C. Reestruturação na forma do tratamento de efluentes têxteis: uma proposta embasada em fundamentos teóricos. *Gestão & Produção* **2019**, *26*, 1149. [[CrossRef](#)]
- ⁸ Rocha, J. A.; Koslowski, L. A. D.; Licodiedoff, S.; Riella, H. G. Tratamento de um efluente modelo têxtil via reação de Fenton. *HOLOS* **2016**, *4*, 25. [[CrossRef](#)]
- ⁹ Salvador, T.; Marcolino, L. H. Jr.; Zamora, P. P. Degradação de corantes têxteis e remediação de resíduos de tingimento por processos Fenton, Foto-Fenton e Eletro-Fenton. *Química Nova* **2012**, *35*, 932. [[CrossRef](#)]
- ¹⁰ Fioreze, M.; Santos, E. P.; Schmachtenberg, N. Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicação ambiental. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET* **2014**, *18*, 79. [[CrossRef](#)]
- ¹¹ Nogueira, R. F. P.; Trovó, A. G.; Silva, M. R. A.; Villa, R. D.; Oliveira, M. C. Fundamentos e aplicações ambientais dos processos Fenton e Foto-Fenton. *Química Nova* **2007**, *30*, 400. [[CrossRef](#)]
- ¹² Poyatos, J. M.; Muñio, M. M.; Almecija, M. C.; Torres, J. C.; Hontoria, E.; Osorio, F. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: State of the Art. *Water Air Soil Pollut* **2010**, *205*, 187. [[CrossRef](#)]
- ¹³ Silva, C. R., Maniero, M.G., Peres, M. S., Guimarães, J. R. Ocorrência e degradação de quinolonas por Processos Oxidativos Avançados. *Química Nova* **2014**, *37*, 868. [[CrossRef](#)]
- ¹⁴ Costa, L. F.; de Oliveira, D. G.; Moreira, F. M. S.; de Urzedo, A. P. F. M.; Cestarolli, D. T.; Bernardes-Silva, A. C. Utilização de Biocarvão e Processos Oxidativos Avançados para Remoção do Propranolol de Efluentes Aquosos Simulados. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 295. [[CrossRef](#)]
- ¹⁵ Oliveira, L. G.; Fernandes, F. H.; Mesquita, W. D.; Junior, M. G.; Santos, M. R. de C.; Gurgel, M. F. do C. Uma Revisão do Uso de Processos Oxidativos Avançados para Descoloração de Águas Residuais de Efluentes. *Revista Processos Químicos* **2019**, *13*, 105. [[CrossRef](#)]
- ¹⁶ Araújo, K. S.; Antonelli, R.; Gaydeczka, B.; Granato, A. C.; Malpass, G. R. P. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. *Revista Ambiente & Água* **2016**, *11*, 388. [[CrossRef](#)]
- ¹⁷ Lucena, L. G., Rocha, E. M. R., Silva, F. L.H., Cahino, A. M. Otimização multivariada do processo foto-Fenton solar na remoção da demanda química de oxigênio em lixiviados de aterros sanitários. *Engenharia Sanitária e Ambiental* **2018**, *23*, 499. [[CrossRef](#)]
- ¹⁸ Martins, L. M., *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Piauí, 2011. [[Link](#)]
- ¹⁹ Martins, L. M.; Silva, C. E.; Moita Neto, J. M.; Lima, Á. S.; Moreira, R. F. P. M. Aplicação de Fenton, foto-Fenton e UV/H₂O₂ no tratamento de efluente têxtil sintético contendo o corante Preto Biozol UC. *Engenharia Sanitária e Ambiental* **2011**, *16*, 261. [[CrossRef](#)]
- ²⁰ Saratale, R.G.; Saratale, G.D.; Chang, J.S.; Govindwar, S.P. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* **2011**, *42*, 138. [[CrossRef](#)]
- ²¹ Mo, J.; Hwang, J. E.; Jegal, J.; Kim, J. Pretreatment of a Dyeing Wastewater Using Chemical Coagulants. *Dyes and Pigments* **2007**, *72*, 240. [[CrossRef](#)]

- ²² INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>> Acesso em: 7 junho 2020.
- ²³ Malato, S.; Blanco, J.; Vidal, A.; Richter, C. Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview. *Applied Catalysis B: Environmental* **2002**, *37*, 1. [[CrossRef](#)]
- ²⁴ Apha, Awwa, Wef. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20a. ed., Washington: American Public Health Association, **1999**.
- ²⁵ Kang, Yu. W.; Cho, M. J.; Hwang, K.Y. Correction of hydrogen peroxide interference on standard chemical oxygen demand test. *Water research* **1999**, *33*, 1247. [[CrossRef](#)]
- ²⁶ Ohlweiler, O. A.; *Teoria e Prática da Análise Quantitativa Inorgânica*, Editora Universidade de Brasília: Brasília, 1968.
- ²⁷ Durigan, M. A. B.; Vaz, S. R.; Zamora, P. P. Degradação de poluentes emergentes por processos Fenton e Foto-Fenton. *Química Nova* **2012**, *35*, 1381. [[CrossRef](#)]
- ²⁸ Zanella, G.; Scharf, M.; Vieira, G. A.; Peralta, Z. P. Tratamento de banhos de tingimento têxtil por processos Foto Fenton e avaliação da potencialidade de reuso. *Química Nova* **2010**, *33*, 1039. [[CrossRef](#)]
- ²⁹ Katsumata, H.; Koike, S.; Kaneco, S.; Suzuki, T.; Ohta, K. Degradation of Reactive Yellow 86 with photo-Fenton process driven by solar light. *Journal of Environmental Sciences* **2010**, *22*, 1455. [[CrossRef](#)]
- ³⁰ Costa, F. M.; Campos, J. C.; Fabiana, V. F.; Bila, D. M. Tratamento de lixiviados de aterros de resíduos sólidos utilizando Processos Fenton e Foto-Fenton Solar. *Revista Ambiente & Água* **2015**, *10*, 107. [[CrossRef](#)]
- ³¹ Oliveira, J. S.; Halmenschlager, F. C.; Jahn, S. L.; Foletto, E.L. Síntese de CoFe_2O_4 sobre os suportes MgAl_2O_4 e ZSM-5 para uso na degradação de poluente orgânico pelo processo foto-Fenton heterogêneo sob irradiação visível e solar. *Revista Matéria* **2019**, *24*, e-12498. [[CrossRef](#)]