

Tratamento de corantes têxteis por degradação redutiva, reação de fenton, coagulação/floculação e filtração lenta

Treatment of textile dyes by reductive degradation, fenton reaction, coagulation/flocculation e slow filtration

Felipe Chaves Malheiros, Victor Marques Campos, Raniere Rodrigues de Carvalho, Rodolpho Souza Amado de Carvalho, Victor Hugo Nascimento Neves e Núbia Natália de Brito*

Instituto de Química, Universidade Federal de Goiás

** nubiabrito@ufg.br*

Submetido em 03/09/2015; Versão revisada em 14/10/2015; Aceito em 21/10/2015

Resumo

Neste trabalho foi estudada a degradação do corante têxtil direto Optisal Amarelo 2RL, via tratamento redutivo seguido da reação de Fenton e coagulação/floculação. Os ensaios foram realizados em um reator de vidro com capacidade volumétrica de 2,0 L. Posteriormente foi estudada a filtração lenta para resíduos de mistura de corantes têxteis, o filtro lento consistiu-se de um tubo cilíndrico de policloreto de vinila com altura útil de 65,0 cm e diâmetro de 14,5 cm. Para a degradação redutiva e reação de Fenton seguidos de coagulação/floculação os principais resultados foram: Remoções de 75,26% da matéria orgânica (DQO) e 90,63% de cor. No estudo da tecnologia filtração lenta os principais resultados encontrados para o tratamento da mistura de corantes têxteis, foram: Remoções de 72,00% de DQO e 91,00% de cor. Foi possível concluir que os tratamentos propostos demonstraram-se eficientes na degradação da matéria orgânica sendo acessíveis e de baixo custo.

Palavras-Chave: mistura de corantes, indústria têxtil, tratamento.

Abstract

In this work it was studied the degradation of the direct dye Optisal Yellow 2RL, through treatment reductive followed by Fenton reaction and coagulation/flocculation. The analytical tests were accomplished in a glass reactor with 2.0L volumetric capacity. Subsequently it was studied the slow filtration for mixture of textile dyes, the slow filter consisted of a cylindrical tube of polyvinyl chloride with height of 65.0 cm and diameter of 14.5 cm. For the reductive degradation and Fenton reaction followed by coagulation/flocculation the main results were: Removals of 75.26% of the organic matter (COD) and 90.63% of color. In the study of the technology slow filtration the main results found for the treatment of mixture of textile dyes, they were: Removals of 72,00% of COD and 91,00% of color. It was possible to conclude that the proposed treatments were demonstrated efficient in the degradation of the organic matter being accessible and of low cost.

Keywords: mixture of textile dyes, textile industry, treatment.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os problemas ambientais têm se tornado cada vez mais críticos e frequentes, principalmente devido ao desmedido crescimento populacional e ao aumento da atividade industrial (ELMORSI et al., 2010). Neste seguimento, as indústrias têxteis possuem grande destaque, pois geram efluentes com alta carga orgânica, baixas concentrações de oxigênio dissolvido, forte coloração e pouca biodegradabilidade (KARTHIKEYAN et al., 2011).

A remoção de poluentes tóxicos, bem como de compostos recalcitrantes, muitas vezes só é possível por meio de técnicas não biológicas ou integração de tecnologia biológica com outras, tais como: coagulação/floculação, precipitação, adsorção em carvão ativado granular, arraste (stripping) com ar, osmose reversa e processos oxidativos avançados (NAGEL-HASSEMER et al., 2012).

Os POA envolvem a geração de radicais hidroxilas (OH), altamente reativos ($E^{\circ} = 2,80 \text{ V}$), que têm a capacidade de destruição total de muitos poluentes orgânicos. Os radicais livres formados atacam o composto orgânico levando a sua oxidação completa, com potencial para produzir CO_2 e H_2O . Quando resulta em uma oxidação parcial, geralmente ocorre um aumento da biodegradabilidade dos poluentes e, neste caso, os compostos orgânicos residuais podem ser removidos por meio de técnicas biológicas (MORAVIA, LANGE e AMARAL, 2011; CAMPOS e BRITO, 2014a).

Apesar dos POA mostrarem-se muito eficientes para a degradação de uma gama bastante grande de substâncias, eles enfrentam dificuldades quando os compostos apresentam centros deficientes de elétrons, já que a reação do radical hidroxila com estes ocorre de maneira bem mais lenta. Um exemplo seria que a reação de eliminação para espécies que contêm a estrutura azo $\text{N}=\text{N}$, muito comum em corantes têxteis, é muito mais

rápida quando as etapas iniciais do processo de degradação são redutivas em vez de oxidativas (PEREIRA e FREIRE, 2005).

Nesta abordagem alternativa, o ferro de valência zero surge como uma ferramenta promissora para a remediação dessas importantes classes de compostos poluentes, já que, se trata de um agente de elevado potencial redutivo ($E^{\circ} \text{Fe}^0/\text{Fe}^{2+} -0,440\text{V}$), de baixo custo e fácil aquisição. Além disso, como fator colaborador, o sistema atua como fonte constante de íons ferrosos, os quais fundamentam as reações posteriores do tipo Fenton, conhecido como sistema homogêneo sem irradiação $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ (CRANE e SCOTT, 2012).

Outro fator importante é a coagulação/floculação química recomendada após a oxidação de Fenton, a fim de manter a concentração de ferro em solução sob a forma de íon ferroso dentro dos limites exigidos pela legislação CONAMA 430/2011 para descarte do efluente ($15,0 \text{ mg L}^{-1}$).

Com relação à filtração lenta esta representa uma tecnologia de tratamento que apresenta capacidade de remoção de micro-organismos, toxinas produzidas por cianobactérias, agroquímicos e matéria orgânica, além de se apresentar como uma tecnologia de tratamento de baixo custo de construção, manutenção e simplicidade operacional (NASCIMENTO et al., 2012).

Esta capacidade de remediação que a tecnologia via filtração lenta apresenta deve-se principalmente porque no sistema existe a formação de uma camada biológica no topo do meio filtrante denominada de Schmutzdecke constituída fundamentalmente de partículas inertes, matéria orgânica e uma grande variedade de micro-organismos, tais como: bactérias, protozoários, algas e outros (BRITO et al., 2010).

Essa camada biológica contribui significativamente para degradação de diversos compostos poluentes, sendo que a atividade

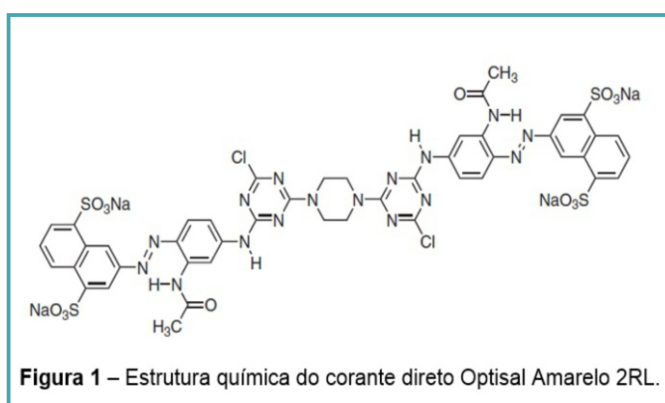
biológica é uma das características importantes do filtro lento para o tratamento de águas residuárias, funcionando como um reator aeróbio e anaeróbio simultaneamente (BRITO et al., 2010).

Diante do exposto, este trabalho teve como objeto de estudo a utilização de tecnologias de tratamento tais como: Redução degradativa seguido de oxidação via reação de Fenton e coagulação/floculação para o tratamento de um corante têxtil direto Optisal Amarelo 2RL e posteriormente, em outro momento, foi realizado um tratamento com resíduos de mistura de corantes têxteis por filtração lenta. Todo o trabalho teve como objetivo avaliar a máxima eficiência dos tratamentos através das principais análises e parâmetros de controle ambiental.

MATERIAL E MÉTODOS

Degradação redutiva seguido de oxidação via reação de Fenton e coagulação/floculação

O corante têxtil direto Optisal Amarelo 2RL foi fornecido pela empresa Daneto (São Paulo). Sua solução foi preparada com água destilada na concentração de 30 mg L^{-1} em pH 6,19 e à temperatura ambiente (25°C) (Figura 1).

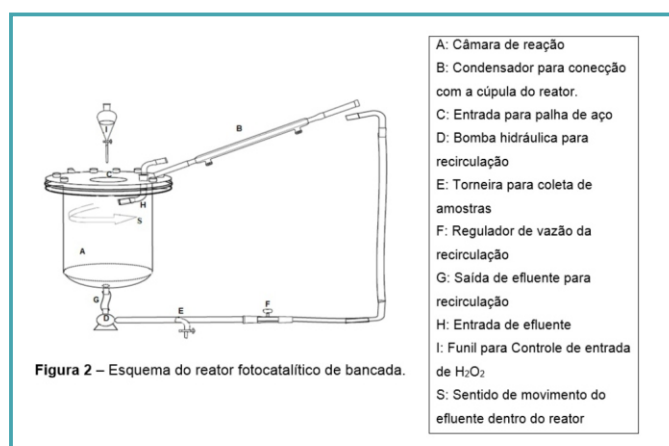


No processo redutivo foi utilizado como fonte de ferro metálico, palha de aço média e grossa (nº 1 e 2, respectivamente) da marca Assolan. No processo oxidativo avançado, utilizou-se peróxido de hidrogênio 5% padronizado por titulação permanganométrica. E em correções de pH utilizou-

se soluções de ácido sulfúrico e hidróxido de sódio ambas na concentração de $3,0 \text{ mol.L}^{-1}$.

Os ensaios de degradação redutiva/oxidativa foram realizados em reator de bancada (Figura 2), apresentando volume de 2,0 L. A agitação do processo foi mantida contínua por meio da recirculação da solução do corante através de uma bomba hidráulica (Invensys Ba1115-02U 220 V 60 Hz 34 W), sob vazão constante de $108,0 \text{ mLmin}^{-1}$.

O procedimento de tratamento da solução do corante em estudo foi realizado da seguinte forma: uma hora de recirculação redutiva com ferro metálico, posteriormente, uma hora de recirculação oxidativa com peróxido de hidrogênio 5% e 4 horas de repouso para sedimentação dos possíveis flocos formados na etapa de coagulação/floculação.



Filtração lenta

Ensaio preliminares

Inicialmente para operação do filtro lento foi testado uma filtração de água residuária simulada (água de torneira e solo, para desenvolvimento de micro-organismos) apresentando turbidez em torno de 100 NTU. O filtro construído foi constituído por um tanque cilíndrico de PVC (policloreto de vinila) com altura útil de 65,0 cm, diâmetro de 14,5 cm.

A espessura do material filtrante foi constituída de uma camada de aproximadamente, 15 cm de areia fina de construção civil e 8 cm de brita, sendo utilizados no topo do filtro e entre as camadas de areia e brita uma manta sintética não tecida com granulometria 400 gm^{-3} e manta sintética

com geocomposto bentonítico. Bentonita é uma argila natural contendo uma elevada percentagem de montemorilonite um silicato de alumínio hidratado natural que é caracterizado pela alta superfície específica, alta capacidade de troca catiônica e potencial de adsorção (RODRÍGUEZ et al., 2008).

O sistema de drenagem foi realizado na parte inferior do filtro e seguia por um tubo externo que se estendia até 10 cm acima da camada de areia, evitando assim a ocorrência de pressão negativa e conseqüentemente, acúmulo de ar no interior do meio filtrante garantindo a presença constante de água residuária no interior do filtro. Neste ponto foi realizado também coleta de amostras (figura 3).

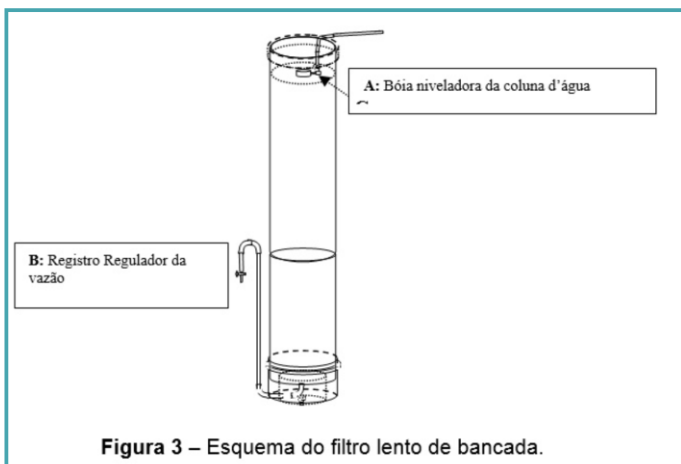


Figura 3 – Esquema do filtro lento de bancada.

Durante os ensaios manteve-se o filtro lento com nível constante mediante utilização de uma bóia hidráulica fixa na parte superior e taxa de filtração constante por meio de registro regulador de vazão na parte inferior (após sistema de drenagem). A taxa adotada foi de $3\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{dia}$, sendo monitorada durante a filtração pelo método volumétrico. O tempo de detenção hidráulica (TDH) da água residuária dentro do filtro lento foi de 4 horas em média.

Análises

Na avaliação da eficiência do tratamento da solução de corante direto e da mistura de corantes têxteis foram empregados os seguintes parâmetros analíticos: pH, cor real, turbidez, ferro total, condutividade, peróxido de hidrogênio residual e

Demanda Química de Oxigênio (DQO); conforme Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998).

A cor real foi determinada pela absorvância no comprimento de onda de máxima absorção na região do visível (400-800 nm) utilizando espectrofotômetro Femto 700 Plus.

O peróxido de hidrogênio residual foi baseado na reação entre peróxido de hidrogênio e o íon vanadato (VO_3^-) em meio ácido. A reação leva a formação de íon peroxovanádio (VO_2^{3+}) de coloração avermelhada que absorve fortemente em 446 nm (OLIVEIRA et al., 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do corante têxtil direto Optisal Amarelo 2RL.

O espectro de absorvância da solução do corante têxtil direto Optisal Amarelo 2RL preparado na concentração de $30,0\text{ mg L}^{-1}$ em pH 6,19 e à temperatura ambiente apresentou um pico de máxima absorção na região do visível em 400 nm. A solução do corante “in natura” apresentou 1,70 NTU de turbidez e $0,33\text{ mS.cm}^{-1}$ a $25,1^\circ\text{C}$ de condutividade. A DQO medida foi de $57,51\text{ mg O}_2\text{L}^{-1}$.

Processo de otimização de degradação reductiva/oxidativa/ coagulação floculação do corante têxtil direto Optisal Amarelo 2RL.

Neste estudo foi construído um planejamento fatorial variando o tipo (número) da palha de aço utilizada, sua massa e o pH inicial da solução do corante analisado, conforme a Tabela 1.

Para avaliação da eficiência do tratamento em estudo foi utilizado o parâmetro analítico absorvância no máximo comprimento de onda na faixa do visível 400 nm, como indicativo da redução da cor.

O resultado mais expressivo referiu-se ao experimento 3: tipo de palha de aço 1, massa 3,0 g e pH 3,0 apresentando 19,0% de redução de cor.

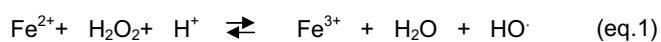
Tabela 1 – Planejamento Fatorial 2³ variáveis: tipo de palha de aço Pa, massa da palha de aço Mpa e pH inicial da solução pHi, para otimização da degradação redutiva do corante direto Optisal Amarelo 2RL, absorbâncias finais Absf (λ = 400 nm) e % de redução de cor

Experimento	Pa	MPa (g)	pHi	Absf	% Redução de cor
1	1	1,0	3	0,560	7,9%
2	2	1,0	3	0,570	6,3%
3	1	3,0	3	0,492	19,0%
4	2	3,0	3	0,542	10,9%
5	1	1,0	7	0,608	0,0%
6	2	1,0	7	0,608	0,0%
7	1	3,0	7	0,606	0,0%
8	2	3,0	7	0,607	0,0%

Wang e colaboradores (2010), constataram que a degradação do corante têxtil ocorre preferencialmente através da clivagem do grupo azo, tornando essas espécies químicas mais suscetíveis a subseqüentes tratamentos oxidativos.

Estipulado então, o melhor tipo de palha de aço, a massa “ótima” e o pH prosseguiu-se para a 2ª etapa degradativa, o tratamento oxidativo via Fenton, com o objetivo de aumentar a eficiência na remediação do corante têxtil.

A escolha por um tratamento subseqüente via reação de Fenton deve-se principalmente pela geração do radical hidroxila que envolve a decomposição do peróxido de hidrogênio (H₂O₂) catalisado por íons ferrosos em meio ácido, equação 1. Como tais íons ferrosos já foram gerados durante a oxidação do ferro metálico na etapa anterior e o meio já se encontra ácido (pH 3,0), apenas peróxido de hidrogênio foi necessário para iniciar tal processo (MORAVIA, LANGE e AMARAL, 2011; CAMPOS e BRITO, 2014b).



Iniciou-se o tratamento sob condições ácidas pH 3,0 e com palha de aço tipo 1 este sistema de

degradação redutiva foi mantido no reator durante 1 hora, seguido, subseqüentemente do tratamento oxidativo via reação de Fenton durante também 1 hora.

Para o tratamento via reação de Fenton foi construído um planejamento fatorial variando agora o volume de H₂O₂ a 5% e, novamente, variou-se a massa “ótima” de palha de aço.

Ao término deste, a solução foi transferida para um béquer que permaneceu em repouso para sedimentação do lodo formado durante 4 horas, os resultados encontram-se na Tabela 2.

Nos experimentos 2 e 4, onde foram adicionados a maior massa da palha de aço, ou seja, com maior disponibilidade de ferro metálico Fe⁰, houve aumento do pH final na etapa de redução, este foi acidificado novamente para iniciar o processo Fenton. O aumento do pH com a maior quantidade de ferro no sistema é aceitável pois em condições aeróbias, o oxigênio atua como acceptor de elétrons, principalmente no excesso deste metal não reagido com as moléculas orgânicas, segundo a equação 2 (FU, DIONYSIOU e LIU, 2014)

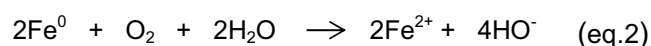
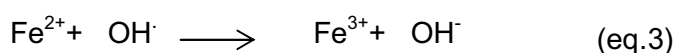


Tabela 2 – Planejamento Fatorial 2³ variáveis: massa da palha de aço MPa e volume de peróxido de hidrogênio para otimização da degradação redutiva/oxidativa, e dados da redução da absorvância %RA e pH ao final de cada etapa do processo dos respectivos experimentos (MPa, H₂O₂).

Variável	Nível (-)		Nível (0)		Nível (+)	
MPa / g	2,0		3,0		6,0	
H ₂ O ₂ / mL	2,0		5,0		8,0	
Experimento	Redução 1 h		Fenton 1h		Pós- Fenton 4h	
	% RA	pH	% RA	pH	% RA	pH
1 (-, -)	- 32,4%	2,9	- 41,8 %	2,9	- 78,0%	3,0
2 (+, -)	- 32,0%	5,3	+ 148,4%	2,9	- 64,0%	2,9
3 (-, +)	- 25,0%	2,7	- 43,3%	3,0	- 81,8%	3,5
4 (+, +)	- 36,5%	4,7	+ 68,0%	2,7	- 80,9%	2,9
5 (0, 0)	- 24,8%	3,6	- 34,2 %	3,1	- 72,5%	3,0

Outro detalhe interessante foi o aumento da absorvância nesses mesmos experimentos (2 e 4), isto deve-se ao fato de que o excesso do ferro metálico pode gerar excesso do íon ferroso, o que causa o aumento na captura de radicais hidroxila, minimizando o potencial oxidativo na degradação e aumentando a formação do íon férrico, conforme a equação 3. Este por sua vez, forma oxihidróxidos férricos solúveis de coloração laranja-avermelhado, sendo possivelmente a causa do aumento da absorvância no comprimento de onda característico do corante têxtil (GUO et al., 2010)



Com moléculas mais suscetíveis a ataque oxidativo, pós-redução inicial, os radicais hidroxila formados segundo a equação 1, extremamente reativos, iniciarão um processo em cadeia de degradação destas moléculas orgânicas, equação 4. Além disso, espécies intermediárias competem por radicais ou outras espécies oxidantes formadas no processo, tornando a degradação um processo global (MA e XIA, 2009).



O experimento 1 foi escolhido como o melhor no planejamento fatorial (Tabela 2), pois utiliza-se a menor massa de ferro metálico (2,0 g) e menor volume de H₂O₂ (2mL). Com estes dados foi possível alcançar 78% de redução da cor. Como não somente degradar a molécula, mas reduzir a concentração de reagentes químicos utilizados para tal fim é importante, isto também foi levado em consideração durante a escolha dos melhores experimentos no tratamento do corante têxtil.

O resultado do corante tratado após: etapa redutiva com ferro metálico (1h), etapa oxidativa via reação de Fenton (1h) e etapa de coagulação/floculação em pH 8,0 (4h) foi comparado com o corante têxtil “in natura”, em uma varredura espectral (200 nm-800 nm) conforme a Figura 4.

Um fato importante diz respeito aos 30 minutos iniciais do processo Fenton que gera uma queda da absorvância isto evidencia a fase inicial curta e ativado processo Fenton, onde a maior parte das moléculas orgânicas são oxidadas e seus

subprodutos gerados (MA e XIA, 2009).

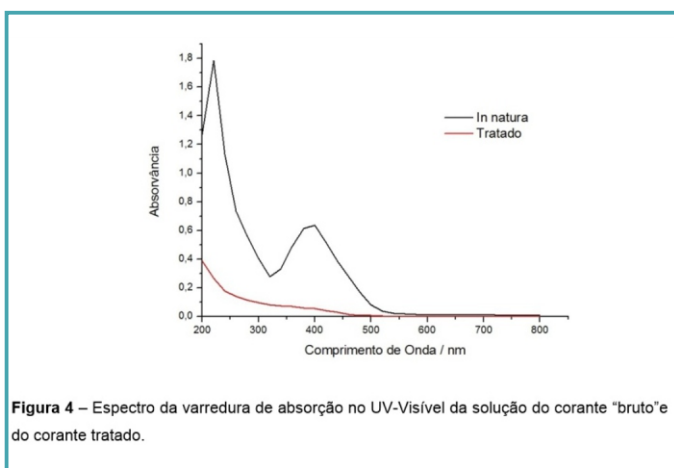
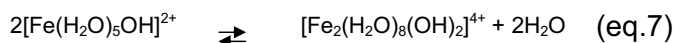
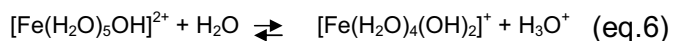
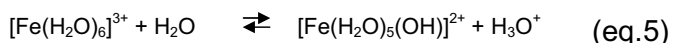


Figura 4 – Espectro da varredura de absorção no UV-Visível da solução do corante “bruto” e do corante tratado.

Ao final do processo Fenton, as partículas dissolvidas formaram um sistema coloidal. Tanto íons ferrosos quanto íons férricos gerados no processo, formam complexos hidroxí de ferro, levando o processo de tratamento a coagulação/floculação conforme equações 5-7 (MA e XIA, 2009).



A fim de diminuir a quantidade de íons ferrosos descartados ao final do processo e, principalmente, acelerar o tratamento via coagulação/ floculação, o sistema foi basicado para pH 8,0.

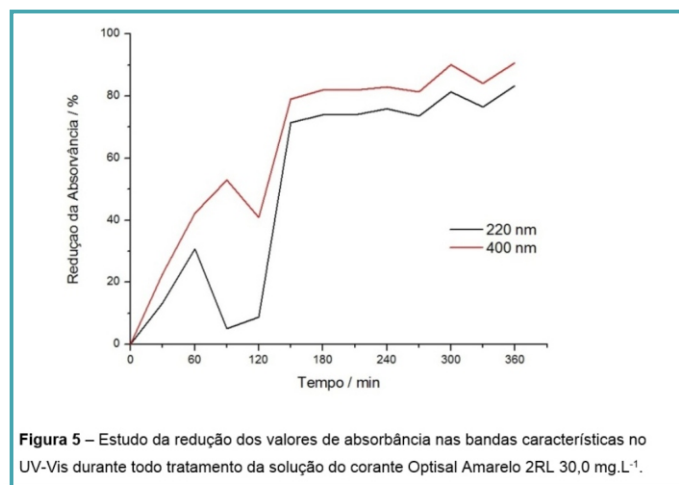


Figura 5 – Estudo da redução dos valores de absorbância nas bandas características no UV-Vis durante todo tratamento da solução do corante Optisal Amarelo 2RL 30,0 mg.L⁻¹.

Na Figura 5 pode ser observada a redução da absorvância nestes picos de máxima absorção do corante têxtil (220 nm e 400 nm). Evidenciando a eficiência do tratamento com remoção de 90,63% da cor na banda característica do visível (400 nm) e 83,22% de remoção na banda característica do ultravioleta (220 nm).

Demais parâmetros utilizados na avaliação da eficiência do tratamento

O pH final, de 8,08, apresentou valor dentro dos parâmetros exigidos pela Resolução 430/2011 do CONAMA, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes e estipula pH entre 5 e 9. Além deste, a resolução estipula um limite de 15,0 mg L⁻¹ de lançamento de ferro dissolvido, neste parâmetro foi possível obter leitura nula de ferro dissolvido no corante tratado.

Alcançou-se uma eficiência de 75,26% na remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO), principal parâmetro usado neste estudo na quantificação indireta do teor de matéria orgânica.

A condutividade apresentou valor de 0,58 mS cm⁻¹ a 26,8°C observa-se um aumento na condutividade, o que pode ser justificado pelo uso de íons ferrosos e a acidificação natural ocasionada pelo reagente de Fenton. Um aumento na condutividade representa um aumento de compostos iônicos solúveis, o que pode influenciar na morte de determinados organismos. No entanto, este aumento da condutividade ainda mantém a solução de corantes com características de águas superficiais (Faixa de condutividade para águas superficiais 100 µS cm⁻¹ a 1 mS cm⁻¹) (ARANTES et al., 2013).

A turbidez apresentou valor final de 2,35 NTU que, mesmo sendo maior que a turbidez “in natura”, ainda permaneceu baixa, não sendo motivo de preocupação, já que, a turbidez para águas doces classe 1 deve ter um valor máximo de 40 NTU, o valor conseguido com o tratamento proposto está bem abaixo do recomendado pela

RESOLUÇÃO CONAMA 357/2005 que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água.

E para finalizar o monitoramento do corante têxtil tratado, foi possível observar $0,057 \text{ mg L}^{-1}$ de peróxido de hidrogênio residual, uma concentração relativamente baixa de H_2O_2 e que não terá potencial para gerar impacto ambiental, visto que, esse reagente químico decompõe espontaneamente em água e oxigênio molecular.

Filtração Lenta

Caracterização da água residuária para testes com o filtro lento

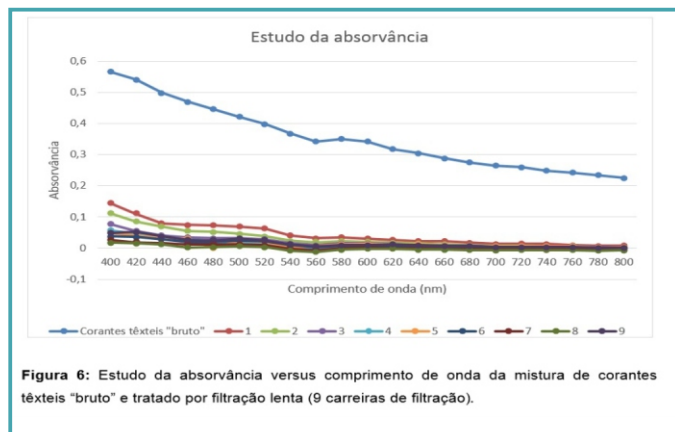
A água residuária simulada foi preparada utilizando água de torneira com solo seco, sem partículas ou pedras que apresentou turbidez de 100 NTU, pH 7,5, ferro total $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ e cor de $100 \text{ mg Pt Co L}^{-1}$.

Durante os ensaios preliminares utilizando água residuária simulada foi possível observar reduções dos valores de turbidez em média de 92,00%, ferro total 63,00% e 86,00% de cor. Os valores de pH após o processo de filtração se mantiveram em torno de 7,5. Neste estudo foi possível realizar 9 carreiras de filtração sem que o filtro colmatasse e, conseqüentemente, diminuisse sua eficiência de tratamento.

Após dar a partida no filtro lento iniciou-se o tratamento com resíduos líquidos contendo uma mistura de corantes têxteis. Para isto foi realizado uma varredura espectral da mistura de corantes têxteis "bruto", os resultados referentes a remoção da absorvância durante as 9 carreiras de filtração, podem ser visualizados na Figura 6.

Pode-se observar que o pico máximo de absorção na faixa do visível foi em 580 nm alcançando uma remoção da cor de 99,00%.

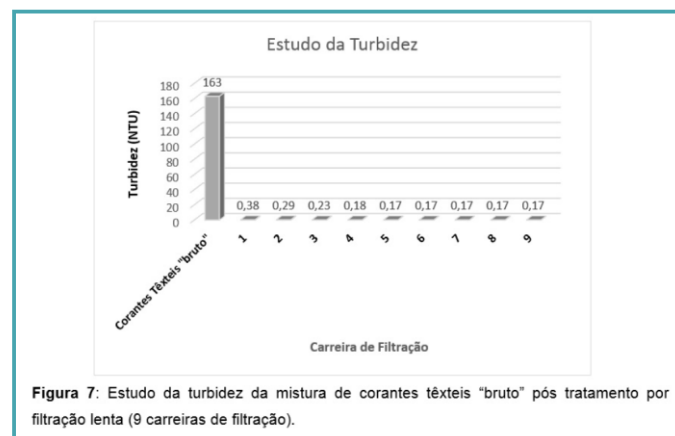
Nascimento e colaboradores (2012), no tratamento de água de uma lagoa através de um filtro lento em escala piloto utilizando 400 mm de areia, seguido de 100 mm de brita e mantas sintéticas não tecidas alcançaram 50,00% de remoção de cor..



Brito e colaboradores (2010), no tratamento de percolado de aterro utilizando filtração lenta seguido de fotocatalise heterogênea (TiO_2/UV) alcançaram 76,42% de remoção da coloração. O filtro utilizado pelos autores apresenta as seguintes características: Altura útil 1000 mm, diâmetro de 580 nm e seção circular de $0,26 \text{ m}^2$, o material filtrante usado foi areia comum utilizada em construção civil e mantas sintéticas não tecidas.

Lopes e colaboradores (2014), investigaram a eficiência da remoção de corante artificial FD&C azul nº 2 Indigotina, com uso do fungo de degradação branca *Trametes versicolor* em combinação com a filtração lenta e obtiveram uma remoção máxima de descoloração de 44,74% com uma taxa de filtração de $1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ dia}$.

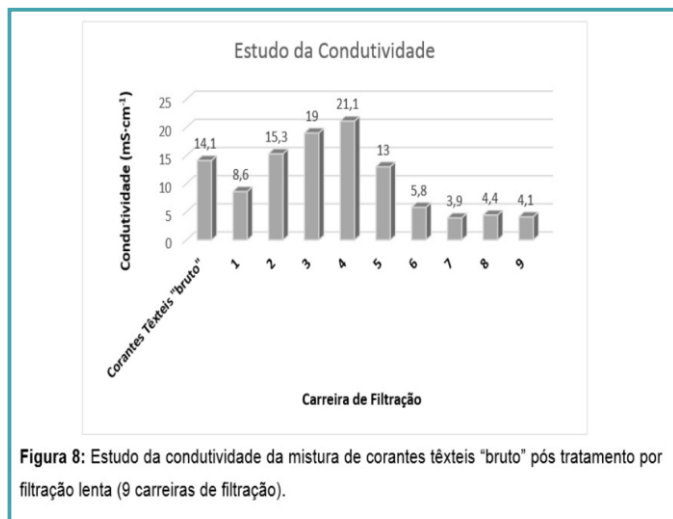
Quanto ao parâmetro turbidez, pode ser visualizado na Figura 7 uma máxima remoção da turbidez de 99,00% apresentando uma entrada de 163 NTU e saída de 0,17 NTU a partir da quinta carreira de filtração, com tempo de detenção hidráulica em torno de 240 minutos.



Ahmmammed e Davra (2011), utilizando biofiltro lento de areia no tratamento de água para abastecimento humano na Índia apresentou turbidez inicial de 14.7 NTU e turbidez final em torno de 1.0 NTU alcançando assim uma remoção da turbidez de 93,00% com tempo de detenção hidráulica entre 25 minutos a 120 minutos.

Langenbach e colaboradores (2009), utilizando o filtro lento como tratamento terciário contendo uma camada de areia de 50 cm suportada em 5 cm de pedregulho (tamanho 2-4 mm) e no topo 5 cm de pedregulho (tamanho 4-8 mm) obtiveram níveis de turbidez final de 0,5 a 0,8 NTU.

A condutividade apresentou variações entre $3,9 \text{ mS cm}^{-1}$ a $21,1 \text{ mS cm}^{-1}$ durante o período estudado (Figura 8). De acordo com os dados obtidos foi possível observar que no início da carreira de filtração ocorre liberação de íons do meio filtrante, quando o filtro “amadurece” (6ª carreira) ocorre a diminuição dos valores de condutividade pós filtração lenta.

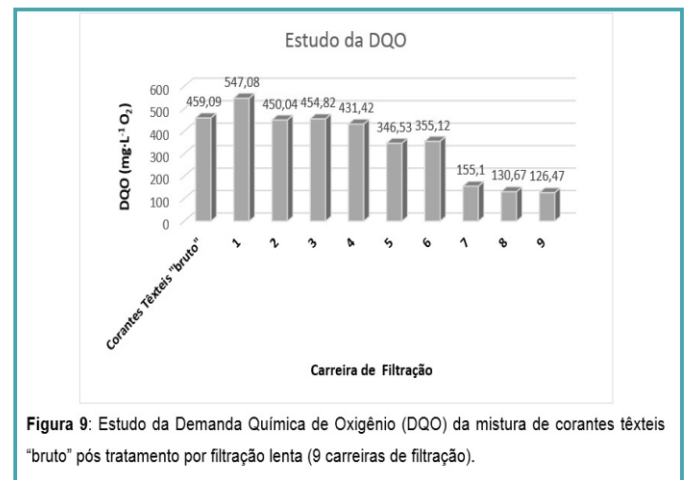


O valor de condutividade da mistura de corantes têxteis “bruto” que entram no processo de filtração lenta correspondem a valores de águas residuárias têxteis (10 mS cm^{-1} a 100 mS cm^{-1}) e ao final do tratamento os valores de condutividade alcançaram características de água de superfície ($100 \mu\text{S cm}^{-1}$ a 10 mS cm^{-1}) (Santos et al., 2013).

Segundo Brito e colaboradores (2007), os

valores elevados de condutividade podem influenciar na morte dos organismos em função do excesso de concentração de sais e do aumento da capacidade de troca iônica dos compostos. Este fato representa um fator desfavorável que aumenta a toxicidade de águas residuárias.

Para matéria orgânica a concentração da mistura de corantes têxteis “bruto” apresentou valor de $459,09 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ a melhor carreira de filtração (carreira 9) apresentou DQO de saída de $126,47 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ apresentando uma remoção de 72,00% (Figura 9).



Segundo Rodríguez et al. (2008), no tratamento de água residuária proveniente da indústria de vinho alcançou-se 90-100% da remoção de turbidez e 14,10% de remoção de Demanda Química de Oxigênio, utilizando-se uma dosagem de $0,2 \text{ g L}^{-1}$ de bentonita em ensaios de jarros.

Langenbach e colaboradores (2009), utilizando filtração lenta como polimento de esgoto sanitário alcançou uma remoção de DQO na faixa de 14,00 a 43,00%

Importante ressaltar o mecanismo de sorção proporcionado pela sílica e alumínio proveniente da areia também poderá influenciar na eficiência do tratamento. Além disso, o mecanismo biológico contribui diretamente para o tratamento, processos de nitrificação e desnitrificação podem ocorrer ao longo do filtro desde o topo do meio filtrante onde é desenvolvido a camada biológica denominada de schmutzdecke a outras comunidades biológicas que

cohabitam as profundidades do filtro (ELLIOTT, DIGIANO e SOBSEY, 2011).

Melhores remoções são alcançadas com o amadurecimento do filtro lento e posteriormente um declínio da eficiência nas remoções podem ser observado isto ocorre devido a colmatação e saturação dos poros do meio filtrante (ELLIOTT, DIGIANO e SOBSEY, 2011).

A elevada eficiência encontrada no tratamento por filtração lenta deve-se principalmente ao mecanismo biológico governado pelo consórcio de micro-organismos - schmutzdecke, no entanto, cabe ressaltar, o potencial adsorvente da manta composto por bentonita utilizada no topo do meio filtrante. As bentonitas, assim como outros minerais de argila, vêm despertando interesses crescentes para sua utilização como materiais adsorventes alternativos (TITO et al., 2008).

Estudos já foram realizados testando a capacidade de adsorção e retenção de hidrocarbonetos presentes na gasolina pelas argilas bentonita, os resultados para remoção e retenção dos contaminantes foram satisfatórios, concluindo que tais materiais podem ser utilizados para conter vazamentos em tanques contendo hidrocarbonetos (CAVALCANTI et al., 2009).

Diante dos resultados, pode-se concluir que o tratamento proposto tanto por degradação reductiva, oxidação por Fenton, coagulação/floculação e filtração lenta demonstraram eficiência na degradação da matéria orgânica; sendo todos acessíveis e de baixo custo com potencial para se apresentar como uma nova diretriz de remediação de corantes têxteis, garantindo a redução do impacto poluidor deste tipo de água residuária.

CONCLUSÃO

Este trabalho propôs desenvolver uma nova metodologia no aperfeiçoamento do tratamento do corante direto Optisal Amarelo 2RL, utilizando um

reator de bancada que combinava redução com ferro metálico (palha de aço nº 1), oxidação com H₂O₂ reação de Fenton e coagulação/floculação.

Foi possível alcançar reduções dos valores de absorvância nas bandas características do corante têxtil estudado em 220 nm e 400 nm, 83,22% e 90,63%, respectivamente, e redução de 75,26% da matéria orgânica (DQO).

Além disso, os parâmetros finais de descarte estipulados pelas Resoluções 430/2011 e 357/2005 do CONAMA foram devidamente atendidos no que se refere a ferro total dissolvido, pH e turbidez.

Quanto ao tratamento da mistura de corantes têxteis por filtração lenta obteve-se remoções altas de cor 99,00%, turbidez 99,00% e matéria orgânica 72,00%, além disso, os valores finais dos parâmetros em estudo alcançaram os níveis exigidos para descarte conforme legislação federal. Cabe ressaltar que a interação do mecanismo biológico e o processo de adsorção realizado pela manta sintética com bentonita permitiram a remediação desta matriz poluente estudada neste trabalho.

As tendências de pesquisas em tratamento de águas residuárias atualmente, visam o desenvolvimento de tecnologias que busquem a remediação mais limpa possível, simples, de baixo custo e com potencial de reuso das águas. Portanto a integração de tecnologias de tratamentos tanto no primeiro estudo (degradação reductiva, oxidação por fenton, coagulação/floculação) quanto no segundo estudo (Filtração lenta: tratamento biológico e físico químico-adsorção) tem potencial para fazer parte de uma rotina de tratamento de compostos altamente recalcitrantes como é o caso de efluentes têxteis, unindo as vantagens de cada processo em estudo.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo suporte financeiro através do Programa de Iniciação Científica (PIBIC).

REFERÊNCIAS

- AHMAMMED, M.M.; DAVRA, K. Performance evaluation of biosand filter modified with iron oxide-coated sand for household treatment of drinking water. **Desalination**, Qatar, v.276, p.287-293, 2011.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION-APHA. Standard Methods for the Water and Wastewater. 20 ed. New York: **APHA**, United States, 1998.
- ARANTES, A. G. S.; MENDES, A. M.; AZEREDO, W. A.; BRITO, N. N. Environmental and Statistical Analysis on Water Quality of João Leite Creek in Goiânia-GO, Brazil. **International Journal of Lakes and Rivers**, India, v. 6, n. 1, p. 69-83, 2013.
- BRITO, N. N.; BROTA, G.A.; SANTOS, E.M.R.; SILVA, N.B.; PELEGRINI R. T.; PATERNIANI, J. E. S.. Ensaio Toxicológico com Sementes para Avaliação de Tratamento do Choroço por Filtração Lenta e Fotocatálise. **Holos Environment**, Rio Claro-SP, v. 10, p. 139-152, 2010.
- BRITO, N.N.; PELEGRINI, R.; PATERNIANI, J.E.S. Ecotoxicological evaluation of leachate from the Limeira sanitary landfill with a view to identifying acute toxicity. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté-SP, v.2, n.3, p.1-10, 2007.
- CAMPOS, V.M.; BRITO, N.N. Photochemical Treatment with H₂O₂/UV Applied to the Remediation of Dispersive Textile Dye. **Oxidation Communications**, Bulgaria, v. 37, p. 583-595, 2014a.
- CAMPOS, V.M.; BRITO, N.N. Tratamento de Efluente Têxtil Utilizando Coagulação/Floculação e Fenton. **Revista de Química Industrial**, Rio de Janeiro-RJ, v. 82, p. 11-17, 2014b.
- CAVALCANTI, J.V.F.L.; DE ABREU, C.A.M.; SOBRINHO, M.A.M.; BARAÚNA, O.S.; PORTELA, L.A.P. **Química Nova**. Preparação e utilização de uma argila esmectítica organofílica como adsorvente de fenol, São Paulo-SP, v.32, n.8, p.2051-2057, 2009.
- CRANE, R.A.; SCOTT, T.B. Nanoscale zero-valent iron: Future prospects for an emerging water treatment technology. **Journal Hazardous Materials**, United States, v.211-212, p.112-115, 2012.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução **CONAMA nº 430**, de 13 de maio de 2011. Publicada no Diário Oficial da União de 16 de maio de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acessado em 20 de junho de 2014.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução **CONAMA nº 357**, de 17 de março de 2005. Publicada no Diário Oficial da União de 18 de março de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acessado em 09 de agosto de 2014.
- ELLIOTT, M.A.; DIGIANO, F.A.; SOBSEY, M.D. Virus attenuation by microbial mechanisms during the idle time of a household slow sand filter. **Water Research**, Netherlands, v.45, n.4092-4102, 2011.
- ELMORSI, T.M.; RIYAD, Y.M.; MOHAMED, Z.H.; BARY, H.M.H.M.H.A. Decolorization of Mordant red 73 azo dye in water using H₂O₂/UV and photo-Fenton treatment. **Journal of Hazardous Materials**, United States, v.174, p.352-358, 2010.
- FU, F.; DIONYSIOU, D.D.; LIU, H. The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: A review. **Journal of Hazardous Materials**, United States, v.267, p.194-205, 2014.
- GUO, J.S.; ABBAS, A.A.; CHEN, Y.P.; LIU, Z.P.; FANG, F.; CHEN, P. Treatment of landfill leachate using a combined stripping, Fenton, SBR, and coagulation process. **Journal of Hazardous Materials**, United States, v. 178, p.699-705, 2010.
- KARTHIKEYAN, S.; TITUS, A.; GNANAMANI, A.; MANDAL, A.B.; SEKARAN, G. Treatment of textile wastewater by homogeneous and heterogeneous Fenton oxidation processes. **Desalination**, Qatar, v. 281, p.438-445, 2011.

- LANGENBACH, K.; KUSCHK, P.; HORN, H.; KASTNER, M. Slow sand filtration of secondary clarifier effluent for wastewater reuse. **Environmental Science Technology**, United States, v.43, n.5896-5901, 2009.
- LOPES, M.M.G.; SALES, P.T.F.; CAMPOS, L.C.; SCHIMIDT, F.; SANTIAGO, M.F. Estudo da descoloração do corante FD&C azul no 2 Indigotina pelo tratamento combinado do fungo *Trametes versicolor* e processo de filtração lenta. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro-RJ, v. 19, n.2, p. 113-120, 2014.
- MA, X.J.; XIA, H.L. Treatment of water-based printing ink wastewater by Fenton process combined with coagulation. **Journal of Hazardous Materials**, United States, v.162, p.386-390, 2009.
- MORAVIA, W. G.; LANGE, L. C.; AMARAL, M. C. S. Avaliação do processo oxidativo avançado pelo reagente de Fenton em condições otimizadas no tratamento de lixiviado de aterro sanitário com ênfase em parâmetros coletivos e caracterização do lodo gerado. **Química Nova**, São Paulo-SP, v. 34, n. 8, p. 1370-1377, 2011.
- NAGEL-HASSEMER, M. E.; CORAL, L. A.; LAPOLLI, F. R.; DE AMORIM, M. T. S. P. Processo UV/H₂O₂ como pós-tratamento para remoção de cor e polimento final em efluentes têxteis. **Química Nova**, São Paulo-SP, v. 35, n. 5, p. 900-904, 2012.
- 2005.NASCIMENTO, A. P.; PELEGRINI, R.T.; BRITO, N.N. Filtração lenta para o tratamento de águas para pequenas comunidades. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia-GO, v.2, n.4, p.54-58, 2012.
- OLIVEIRA, M. C.; NOGUEIRA, R. F. P.; NETO, J. A. G.; JARDIM, W. F.; ROHWEDDER, J. J. R. Sistema de injeção em fluxo espectrofotométrico para monitorar peróxido de hidrogênio em processo de fotodegradação por reação foto-Fenton. **Química Nova**, São Paulo-SP, v. 24, n. 2, p. 188-190, 2001.
- PEREIRA, W.S.; FREIRE, R.S. Ferro zero: Uma abordagem para o tratamento de águas contaminadas com compostos orgânicos poluentes. **Química Nova**, São Paulo-SP, v.28, n.1, p.130-136, 2005.
- RODRÍGUEZ, E.; MÁRQUEZ, G.; CARPINTERO, J. C.; BELTR, F.J.; ALVAREZ, P. Sequential use of bentonites and solar photocatalysis to treat winery wastewater. **Journal of agricultural and food chemistry**, Germany, v.56, p.11956-11961, 2008.
- TITO, G.A.; CHAVES, L.H.G.; RIBEIRO, S.; SOUZA, R.S. Isotermas de adsorção de cobre por bentonita, **Revista Caatinga**, Mossoró-RN, v.21, n.3, p. 16-21, 2008.
- WANG, K.S.; LIN, C.L.; WEI, M.C.; LIANG, H.H.; LI, H.C.; CHANG, C.H.; FANG, Y.T.; CHANG, S.H. Effects of dissolved oxygen on dye removal by zero-valent iron. **Journal of Hazardous Materials**, United States, v.182, p.886-895, 2010.