



# APLICAÇÃO DE FOTOPEROXIDAÇÃO, FOTO-OXIDAÇÃO E NANOFILTRAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS TÊXTEIS

A. P. B. ARAÚJO<sup>1</sup>, B. T. OLIVEIRA<sup>1</sup>, G. C. MOREIRA<sup>1</sup>, B. C. RICCI<sup>1</sup> e L. H. ANDRADE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Química  
E-mail para contato: alessandra.araujoo20@gmail.com

**RESUMO** – O tratamento do efluente têxtil representa um desafio às indústrias devido a sua complexidade e alta variabilidade. Ademais, levando em consideração o atual período de escassez mundial de água e a ineficiência dos sistemas convencionais de tratamento utilizados, torna-se necessário o estudo de novas tecnologias. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a associação da fotoperoxidação, foto-oxidação UV e nanofiltração (NF), utilizando ultrafiltração (UF) como pré-tratamento. A resistência da incrustação da membrana, a reversibilidade dessa incrustação e o fluxo de permeado foram avaliados, assim como a taxa de recuperação para a melhor rota de tratamento. O planejamento fatorial foi usado como ferramenta para definir as melhores condições de pressão de filtração e dosagem de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Os resultados mostraram elevadas remoções de condutividade para todas as rotas avaliadas, entretanto, a rota composta apenas pela NF apresentou melhor resultado, em relação ao fluxo de permeado e a remoção da incrustação. Desse modo, essa foi determinada como a melhor rota, cuja taxa de recuperação máxima, a 8,5 bar, foi de 40%. Ademais, o efluente final se mostrou apto a ser reutilizado na indústria nas etapas de lavagem, tingimento, branqueamento, bem como em sanitários, na limpeza de galpões e equipamentos.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é um dos setores que mais contribuem para a economia dos países desenvolvidos. Porém, geram um grande volume de efluente durante os processos de fabricação de seus produtos, sendo um dos mais poluentes para os corpos hídricos e para os solos (KIM *et al.*, 2006). Aproximadamente 125 a 150 m<sup>3</sup> de água são utilizados para 1 tonelada de produto têxtil (KORBAHTI e TANYOLAÇ, 2008).

A composição do efluente têxtil é complexa devido a variados produtos químicos e reagentes auxiliares utilizados no processo produtivo tais como corantes, metais pesados, pigmentos, detergentes, sais, compostos de enxofre, óleos e graxas. Esses contaminantes podem causar sérios danos à saúde, uma vez que são tóxicos, mutagênicos e cancerígenos (BAFANA *et al.*, 2009). Segundo Kunz *et al.* (2002), os métodos de tratamento convencionalmente aplicados na indústria têxtil se baseiam em processos físico-químicos e biológicos, como a precipitação/coagulação e os sistemas de lodos ativados. Tais tratamentos propiciam uma elevada remoção dos corantes, entretanto, concomitantemente, ocorre a produção de lodo, bem como a adsorção de corantes a esse lodo, gerando, assim, um novo resíduo. Ademais, de acordo com Firmino *et al.* (2010), os corantes e pigmentos aplicados no processo têxtil são projetados para resistir à biodegradação, o que permite que esses



permaneçam no meio ambiente por um longo período de tempo, mesmo após a passagem pelas Estações de Tratamento de Efluentes (ETE).

Nesse sentido, devido à baixa eficiência dos tratamentos convencionais para os efluentes têxteis, surgem novas alternativas. Dentre elas, destacam-se os processos oxidativos avançados (POA) e os processos de separação por membranas. Os POAs são técnicas de degradação oxidativa nas quais ocorre a geração *in situ* de espécies oriundas do oxigênio altamente oxidantes, capazes de promover a mineralização da matéria-orgânica ou degradá-la parcialmente. É uma técnica já consolidada e efetiva no tratamento de água e efluentes para remoção de compostos orgânicos que apresentam alta estabilidade química e/ou recalcitrantes (MARCELINO, 2014).

Por outro lado, os processos de separação por membranas referem-se a um processo físico em que, devido à ação de uma força motriz, promove a separação de determinados compostos em suspensão ou em solução. Entre os tipos existentes, a nanofiltração vem se destacando no tratamento de efluente têxtil, visto que esse processo possibilita a remoção de compostos com baixa massa molar, além de íons bi e multivalentes, com peso molar de 700 a 1000 Da (CHOLLOM *et al.*, 2015).

Conforme KUNZ *et al.* (2002), a combinação de métodos para o tratamento dos efluentes de indústria têxtil é o ideal, uma vez que os corantes presentes normalmente se mostram resistentes à degradação. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicação de processos químicos (fotoperoxidação ou foto-oxidação) e físicos (ultrafiltração e nanofiltração) como pós-tratamento de efluente têxtil previamente tratado por processos convencionais.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Amostras

O efluente foi coletado em uma indústria têxtil localizada em Minas Gerais. Este é submetido a um tratamento prévio, sendo a sua coleta feita na saída do decantador. A fim de conhecer a amostra a ser trabalhada, o efluente foi caracterizado a partir de parâmetros físico-químicos, de acordo com o *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1999).

### 2.2 Pré-tratamento do efluente

O efluente foi pré-tratado por ultrafiltração (UF), a fim de evitar danos à nanofiltração. O módulo de UF utilizado foi o GE-Zenon ZW-1, com área de filtração de 0,047 m<sup>2</sup> e diâmetro de poro nominal de 0,04 µm. Posteriormente, o permeado da UF foi caracterizado por meio dos parâmetros pH, condutividade e turbidez.

### 2.3 Ensaios de fotoperoxidação

O efluente ultrafiltrado foi submetido à fotoperoxidação, a qual foi realizada com a lâmpada UV-611/HOPAR, potência de 24 a 36 W, por um tempo reacional de 2 horas, utilizando 2 litros de efluente e com a temperatura controlada em torno de 25 °C com o *chiller*. Após o processo de fotoperoxidação, o efluente foi caracterizado conforme os parâmetros definidos pós-ultrafiltração.



## 2.4 Ensaios de nanofiltração

A etapa de nanofiltração foi realizada com o auxílio de uma unidade experimental constituída por um módulo de aço inox, no qual a membrana foi inserida, como demonstrado por Ricci (2015). A membrana utilizada foi a NF90 (DowFilmtec), com área de filtração é de 0,0064 m<sup>2</sup>. Antes da filtração, todos os recortes de membranas foram reumidificados em solução de água e álcool 50% v/v e, posteriormente, compactadas com água destilada à pressão de 10 bar, até estabilização do fluxo de permeado. Em seguida, mediu-se a sua permeabilidade hidráulica. A nanofiltração foi realizada à pressão constante com recirculação total do permeado e do concentrado para o tanque de alimentação. Durante a filtração, a temperatura da alimentação e o fluxo do permeado foram controlados regularmente. Ao final de cada teste, as amostras de efluente tratado foram caracterizados segundo parâmetros de pH, condutividade e turbidez.

## 2.5 Planejamento fatorial

Para verificar a influência da conjugação da fotoperoxidação com a nanofiltração, um planejamento fatorial foi proposto, sendo avaliados dois fatores, a dosagem de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> na alimentação da NF, que consistiu no permeado da UF, e a pressão de operação da nanofiltração, com três repetições do ponto central e assumindo 95% de confiança. Os valores de dosagem testados foram de 1:0, 1:0,15 e 1:0,3 mg<sub>COT</sub>/mg<sub>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub>, e as pressões de operação da NF foram de 4, 7 e 10 bar, sendo o tempo de filtração equivalente a 60 minutos. A variável resposta foi a eficiência de remoção de condutividade. A partir dos testes, foi possível determinar o ponto de máxima eficiência de remoção por meio do software *Statistica 10*.

## 2.6 Rotas avaliadas

O ponto ótimo determinado estatisticamente foi avaliado experimentalmente. Para tanto, três rotas foram propostas utilizando os dados obtidos pelo modelo, sendo elas o uso do POA seguido de NF, NF sem processo oxidativo precedente e foto-oxidação UV, ou seja, sem o uso do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, seguida de NF. Em relação aos experimentos com NF, o tempo de filtração estabelecido foi de 120 minutos. Para mais, ao final dos testes, as membranas utilizadas foram submetidas à limpeza física, a qual foi feita pela recirculação da água por 30 minutos na unidade de nanofiltração, com a vazão de 2,4 L/min, na ausência de pressão. A partir da limpeza física da membrana foi possível calcular as resistências às incrustações, de acordo com Ricci (2015).

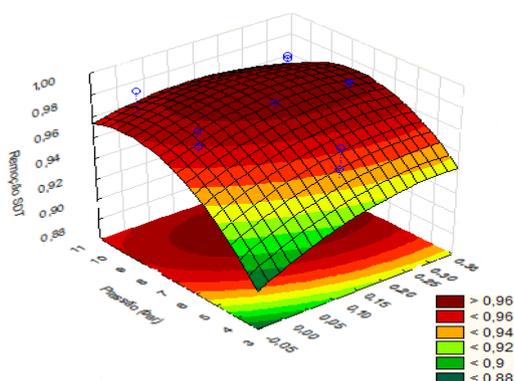
## 2.7 Taxa de recuperação

Por fim, após a avaliação da melhor rota proposta, foi realizado o teste de taxa de recuperação, que consistiu no mesmo processo inicial de tratamento da membrana, para posterior realização da coleta de permeado, em que foi utilizada a pressão de operação do ponto ótimo. O permeado foi coletado ao início da filtração e em frações de 5%, com intervalos de 30 minutos para estabilização do fluxo. Após o teste de taxa de recuperação, as frações coletadas foram caracterizadas através de parâmetros como pH e condutividade, de modo a avaliar a qualidade do permeado obtido e, assim, verificar se a taxa de recuperação máxima alcançada foi a ideal.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O planejamento fatorial desenvolvido permitiu a obtenção de um ponto ótimo, de máxima eficiência de remoção para condutividade, sendo o valor de dosagem requerido equivalente a 1:0,24 mg<sub>COT</sub>/mg<sub>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub> e pressão de 8,5 bar. A Figura 1 evidencia a superfície de resposta obtida para a avaliação desses parâmetros.

Figura 1 – Superfície de resposta em relação à remoção de condutividade.



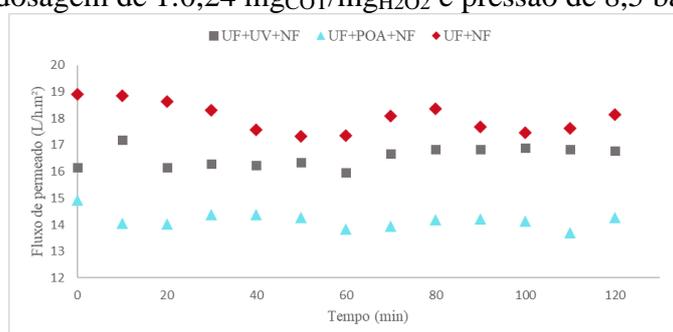
A replicação da condição ótima nas rotas com e sem o uso do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, bem como com o uso da nanofiltração permitiu analisar a influência de cada processo no fluxo de permeado e na condutividade, como mostrado na Tabela 1 e na Figura 2.

Tabela 1 – Caracterização das amostras de acordo com suas condutividades

Amostra	Efluente bruto	Efluente UF	Permeado (UF+UV+NF)	Permeado (UF+POA+NF)	Permeado (UF+NF)
Condutividade (µS/cm)	6420	6130	115,2	140,8	157,3

A Tabela 1 apresenta as elevadas remoções de condutividade alcançadas pela aplicação de todos os tratamentos, evidenciando o potencial dos mesmos para a obtenção de permeados de qualidade, visto que uma menor condutividade está associada a uma menor concentração de sólidos dissolvidos. Apesar da melhor qualidade do permeado obtido pela associação entre o POA e a NF, por meio da análise da Figura 2 é possível perceber a redução do fluxo quando o efluente foi submetido à radiação UV ou à fotoperoxidação, indicando a presença de uma maior incrustação. Esse efeito ocorre em razão do fenômeno de polarização por concentração, devido à acumulação de solutos na superfície da membrana. Essas incrustações formadas podem ser avaliadas pelas suas respectivas resistências, de acordo com a Tabela 2.

Figura 2 – Avaliação do fluxo de permeado em função do tempo para cada rota aplicada na dosagem de 1:0,24 mg<sub>COT</sub>/mg<sub>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub> e pressão de 8,5 bar.



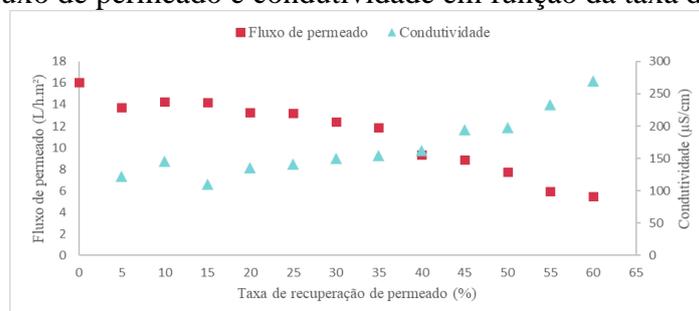
Ao analisar as três rotas, a aplicação do pré-tratamento por UF seguido da NF se mostrou mais eficiente, tendo em vista a formação de uma menor incrustação total, a qual é composta majoritariamente pela incrustação reversível, não necessitando da aplicação de processos químicos para limpeza da membrana. No caso do uso do UV e do UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, a redução do fluxo pode ser decorrência do aumento da pressão osmótica da alimentação, uma vez que não foi verificada a mineralização total dos compostos presentes no efluente tratado. Esse efeito ocorre pelo fato da aplicação desses processos levar à quebra de compostos orgânicos da matriz do efluente, entretanto levando à formação de um maior número de partículas, sendo a pressão osmótica uma função direta desse número de partículas.

Tabela 2 – Resistências associadas à membrana de NF

Resistência (m <sup>-1</sup> )	UF+UV+NF	UF+NF	UF+POA+NF
	Valor (x10 <sup>14</sup> )	Valor (x10 <sup>14</sup> )	Valor (x10 <sup>14</sup> )
Membrana	1,17	1,26	1,20
Incrustação total	0,51	0,33	0,81
Incrustação reversível	0,34	0,19	0,69
Incrustação irreversível	0,17	0,15	0,12

A análise da taxa de recuperação foi realizada para a rota UF+NF, em concordância com o resultado obtido anteriormente. A Figura 3 ilustra o fluxo de permeado no decorrer da sua taxa de recuperação, assim como evidencia a resposta da condutividade ao experimento.

Figura 3 – Fluxo de permeado e condutividade em função da taxa de recuperação.



Por meio da análise gráfica, a taxa máxima recomendada para operação é de 40%, tendo em vista uma maior queda do fluxo a partir dessa conversão, algo que pode estar relacionado à concentração por polarização, processos de adsorção na superfície da membrana ou pela alta concentração de sais. Ademais, o aumento da condutividade no decorrer do experimento também é verificado, sendo mais acentuado após essa mesma taxa. Esse aumento se deve ao fato de que à medida que a taxa de recuperação se desenvolve ocorre o aumento da concentração de sais e, por consequência, aumenta a força-motriz para a transferência de massa, fazendo com que comece a haver a passagem de sais para o permeado.

## 4. CONCLUSÃO

Perante o exposto, os processos se demonstraram como alternativas promissoras para o tratamento de águas residuais têxteis, uma vez que todas as rotas avaliadas apresentaram remoção de condutividade superior a 97%. Entretanto, concomitantemente, a fotoperoxidação e a foto-oxidação obtiveram uma maior incrustação associada, provocando menores fluxos de permeados. Desse modo, como o impacto do fluxo de permeado também deve ser avaliado, a aplicação apenas da NF é aconselhável, pois apresentou um menor decaimento do fluxo. Outrossim, ao avaliar a taxa de recuperação de permeado aplicada ao processo de NF foi possível atingir uma



conversão de 40% de permeado, com condutividade relativamente baixa. Desse modo, a aplicação da NF se mostrou mais adequada para o tratamento do efluente têxtil, visto que produziu um permeado de qualidade em relação à sua condutividade, bem como obteve uma menor incrustação da membrana. Como a condutividade possui uma relação com a quantidade de sais dissolvidos totais, e este parâmetro é de suma importância para a avaliação de reúso de efluentes, pode-se dizer que para as análises feitas, o efluente tratado se mostrou apto para ser reutilizado na indústria nas etapas de lavagem, tingimento, branqueamento, limpeza de galpões, sanitários e equipamentos. Ademais, o tratamento proporcionou uma taxa de recuperação favorável, o que acarreta em vantagens à empresa, pois a mesma poderá operar o sistema com uma conversão de 40% do permeado.

## 5. REFERÊNCIAS

- APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Part 4000 INORGANIC NONMETALLIC CONSTITUENTS Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 1999.
- BAFANA, A.; JAIN, M.; AGRAWAL, G.; CHAKRABARTI, T. *Bacterial reduction in genotoxicity of direct red 28 dye*. Chemosphere, V. 74, p. 1404-1406, 2009.
- CHOLLOM, M. N., RATHILAL, S, PILLAY, V. L., ALFA, D. *The applicability of nanofiltration for the treatment and reuse of textile reactive dye effluente*. **Water SA**, v. 41, p. 398-405, 2015.
- FIRMINO, P. I. M.; SILVA, M. E. R.; CERVANTES, F. J.; SANTOS, A. B. *Colour removal of dyes from synthetic and real têxtil wastewater in one- and two-stage anaerobic systems*. Bioresource Technology, v.101, p. 7773-7779, 2010.
- KIM, J.-O.; TRAORE, M. K.; WARFIELD, C. *The textile and apparel industry in developing countries*. Textile Progress, V. 38:3, p. 1-64, 2006.
- KORBAHTI, B. K.; TANYOLAÇ, A. *Eletrochemical treatment of simulated textile wastewater with industrial components and Levafix Blue CA reactive dye: Optimization through response surface methodology*. Journal of Hazardous Materials, V. 151, p. 422-431, 2008.
- KUNZ, A., PERALTA-ZAMORA, P, MORAES, S. G., DURÁN, N. *Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis*. Química Nova, v. 25, p. 78-82, 2002.
- MARCELINO, R. B. P. *Aplicação de processos oxidativos avançados para o tratamento de efluente da produção de antibióticos*. Belo Horizonte. 2014. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- RICCI, B. C. *Avaliação do uso de processos de separação por membranas na remoção de metais, recuperação de ácido sulfúrico e na geração de água de reúso a partir de efluente de indústria de mineração de ouro*. Belo Horizonte. 2015. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.