

II-033 - AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DE EFLUENTE DO TINGIMENTO DO BENEFICIAMENTO TÊXTIL POR PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS COM FOCO NA RECUPERAÇÃO DO CORANTE E REÚSO DA ÁGUA

Andreza Penido de Oliveira Maia ⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

Carolina Fonseca Couto

Doutoranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Míriam Cristina Santos Amaral

Engenheira Química, Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. Prof.^a. Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

Wagner Guadagnin Moravia

Engenheiro Civil, Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. Prof. Efetivo do Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

Endereço⁽¹⁾: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais/Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental. Av. Amazonas, 5253 / 2º andar / Sala 201 – Nova Suíça - Belo Horizonte - MG - CEP: 30.421-169 - Brasil - Tel.: (31)3319-7109 - E-mail: moravia@deii.cefetmg.br.

RESUMO

As indústrias têxteis são intensas consumidoras de água, principalmente nos processos que envolvem tingimento e lavagem dos fios. Em decorrência desse elevado consumo de água, este setor é caracterizado pela geração significativa de efluentes que, em geral, apresentam elevada carga orgânica e cor, além de compostos recalcitrantes que conferem baixa biodegradabilidade ao efluente. Os processos de separação por membranas podem ser aplicados no tratamento/polimento de efluentes têxteis, sendo considerados atrativos em função do potencial de recuperação de recursos e reuso da água. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi propor e avaliar o sistema conjugado de microfiltração (MF), biorreator com membranas (BRM) e nanofiltração (NF) empregado no tratamento de efluente do tingimento do beneficiamento têxtil visando à recuperação do corante índigo blue e o reuso da água. Para o desenvolvimento da pesquisa foi implementada, em escala de bancada, uma unidade experimental de MF-BRM-NF. O protocolo operacional da pesquisa foi dividido em duas etapas: 1. Investigação da MF e BRM na recuperação do corante e tratamento do efluente; 2. Avaliação das condições operacionais (fluxo *versus* incrustação) e do desempenho da NF. Os resultados mostraram que o corante índigo blue foi 100% retido pela membrana de MF, o que permite uma eventual recuperação a partir da corrente do concentrado. O BRM resultou em remoção de DQO e amônia de 73 e 100%, respectivamente. A NF foi bem sucedida no polimento do efluente da rota proposta, apresentando menor tendência de incrustação da membrana quando operada sob pressão de 12 bar e uma velocidade de fluxo cruzado de 0,63 cm s⁻¹. O permeado NF atendeu aos requisitos de qualidade para reuso em todos os processos da indústria têxtil.

PALAVRAS-CHAVE: Efluente têxtil, Processos de separação por membranas, Biorreator com membranas, Incrustação, Reuso de água.

INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é um setor da economia no qual se espera um crescimento diretamente proporcional ao crescimento populacional, pois são produzidos produtos amplamente usados por homens e mulheres de todas as idades e classes sociais (COUTO, 2016). O índigo blue (C₁₆H₁₀N₂O₂), corante utilizado no processo de tingimento do jeans, o qual possui grande importância no setor devido a sua crescente popularidade, é um corante orgânico sintético que apresenta uma estrutura orgânica complexa, podendo ser inclusive ser considerado recalcitrante (VEDRENNE *et al.* 2012). Estima-se que, durante o processo de tingimento, cerca de 15% do corante é perdido

resultando em perdas econômicas para a indústria têxtil e em severos impactos ambientais. (VEDRENNE *et al.* 2012; COUTO, 2016;). Dessa forma, tendo em vista a grandiosidade da indústria têxtil é necessário que os impactos de produção, ambientais e econômicos não sejam ignorados.

As indústrias têxteis são intensas consumidoras de água, principalmente nos processos que envolvem tingimento e lavagem dos fios (VALH *et al.* 2011). Em decorrência desse elevado consumo de água, este setor é caracterizado pela geração significativa de efluentes. A composição do efluente têxtil, em geral, apresenta elevada carga orgânica e cor, além de compostos recalcitrantes, conferindo ao efluente baixa biodegradabilidade (ROBINSON *et al.* 2001; KOYUNCU *et al.* 2003; ALLÉGRE *et al.* 2004; AOUNI *et al.* 2009; ELLOUZE *et al.* 2012; BUSCIO *et al.* 2015). Essa realidade torna desafiadora a tarefa de recuperar o corante do efluente e gerar água residual que atenda aos critérios de reuso na indústria. Entretanto o processo de separação com membranas (PSM) tem se tornado uma tecnologia interessante para solucionar esse desafio, pois, trata-se de um método simples, conhecido por ser ambientalmente correto e atrativo, capaz de possibilitar alta remoção de cor, DQO, íons geração de água de reuso, recuperação do corante, não produção de subprodutos ou poluentes secundários pela não adição de reagentes e possibilidade de atender grandes volumes de alimentação em escala industrial (ROBINSON *et al.* 2001; ALLÉGRE *et al.* 2004; VERMA *et al.* 2012). Assim o uso de membranas implicará em uma redução na perda econômica relacionada ao processo de tingimento, além de reduzir os custos com aquisição de água para os processos industriais (COUTO, 2016). Os processos de separação por membrana incluem a microfiltração (MF), a ultrafiltração (UF), a nanofiltração (NF) e a osmose inversa (OI), ou uma combinação de dois ou mais processos (DUTTA *et al.* 2007; PAIPURI *et al.* 2015).

Tendo em vista que as moléculas do corante índigo blue são estáveis e insolúveis em meio aquoso Amaral *et al.* (2013) e Couto (2016) e avaliaram o uso do processo de filtração que envolve a microfiltração (MF) para recuperar o índigo blue e concluíram que a MF revelou-se eficiente na recuperação do corante (retenção 100%). Contudo, destacaram que a MF produz um permeado que pode ainda conter outros produtos químicos utilizados no processo de tingimento, tais como produtos químicos auxiliares. Sendo assim autores como Buscio *et al.* (2015) e Unlu *et al.* (2009) destacam que o processo de MF pode ser aplicado principalmente como pré-tratamento de sistemas híbridos de membranas para reduzir a incrustação e deterioração da membrana em etapas posteriores como NF e OI.

Foram relatados resultados promissores relativos à reutilização de água utilizando biorreator com membrana (BRM). O BRM consiste em uma combinação do processo de lodos ativados convencional com um sistema de membrana de microfiltração ou ultrafiltração (LUONG *et al.*, 2016). O BRM permite o emprego de idades de lodo elevadas, devido à eficiência de retenção de sólidos, eliminando o uso de decantadores secundários sendo substituídos por uma membrana, facilitando o crescimento de microrganismos especializados no reator, e, portanto promove a degradação melhorada de compostos orgânicos de difícil degradação (BRIK *et al.*, 2006). O permeado gerado pelo BRM pode ser usado diretamente para outras aplicações, como lavar e enxaguar os tanques na linha de produção e irrigação no local. No entanto, os sólidos dissolvidos inorgânicos não puderam ser removidos usando BRM. Assim, em seguida, os efluentes oriundos do BRM exigem purificação adicional para reutilização para o processo de tingimento (BRIK *et al.* 2006; FRIHA, 2015).

Entre os processos de membrana sob pressão, a NF é considerada adequada como passo de polimento para tratar efluentes têxteis gerando um produto com potencial de reutilização (LIU *et al.*, 2011; LIN *et al.*, 2015) devido às suas características únicas de separação, que incluem exclusão de tamanho, repulsão eletrostática e proporcionar alta retenção de compostos orgânicos e sais multivalentes (BAKER, 2004; CHEN *et al.*, 2015). Chen *et al.* (2015) testou membrana de NF para tratar efluentes têxteis brutos e biológicos. O autor concluiu que, em ambos os casos, a membrana NF é eficientemente aplicada no tratamento deste efluente; Entretanto, resultados melhores em termos de remoção de DQO, cor e declínio de fluxo foram encontrados quando o efluente foi previamente tratado biologicamente. O fluxo de permeado é um dos fatores mais importantes para a avaliação do desempenho da membrana e da viabilidade econômica porque reflete a quantidade de soluto e solvente que passam pela membrana (LIU *et al.*, 2011). A redução do fluxo de permeado com o tempo é conhecida por ser um grande problema para as membranas de pressão; Isto é principalmente devido a incrustações de membrana causadas pela deposição de compostos orgânicos e inorgânicos, coloides, sólidos em suspensão e bactérias sobre a superfície da membrana (ELLOUZE *et al.*, 2012).

Neste contexto, esta pesquisa objetivou avaliar o desempenho da conjugação de MF seguida por BRM e NF empregada no tratamento de efluente do tingimento do beneficiamento têxtil com foco na recuperação do corante índigo blue e na geração de água de reuso com qualidade afim às demandas dos processos produtivos têxtil.

METODOLOGIA

AMOSTRAGEM

O efluente contendo o corante índigo blue foi concedido pela Indústria Tear Têxtil Indústria e Comércio Ltda., localizada na cidade de Paraopeba/MG – Brasil. Neste estudo, foram coletadas amostras quinzenalmente, entre os anos de 2015 e 2016. O efluente foi coletado diretamente da etapa de lavagem dos fios, após o banho de imersão no corante.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO EFLUENTE

As amostras foram caracterizadas quanto aos parâmetros físico-químicos: alcalinidade (2320 B), condutividade elétrica (CE) (2510 B - Hach 44600), cor (2120 B - Hach 2100AN), DQO (5220 B), nitrogênio amoniacal (4500-NH₃ B C), pH (4500 B - Digimed DM-22), sólidos (2510 B; 2540 B C) e fósforo total (4500 E) conforme o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). O parâmetro de índigo blue foi determinado por método colorimétrico. O parâmetro carbono orgânico total foi analisado através do equipamento Shimadzu TOC-V CNP. A concentração de Cl⁻, SO₄⁻² e PO₄⁻³ foram determinadas por cromatografia iônica. A concentração dos metais Mg⁺² e Ca⁺² foi quantificada por espectrofotometria de absorção atômica. Os valores médios e respectivos desvios padrões dos parâmetros avaliados do efluente bruto são apresentados na Tabela 1.

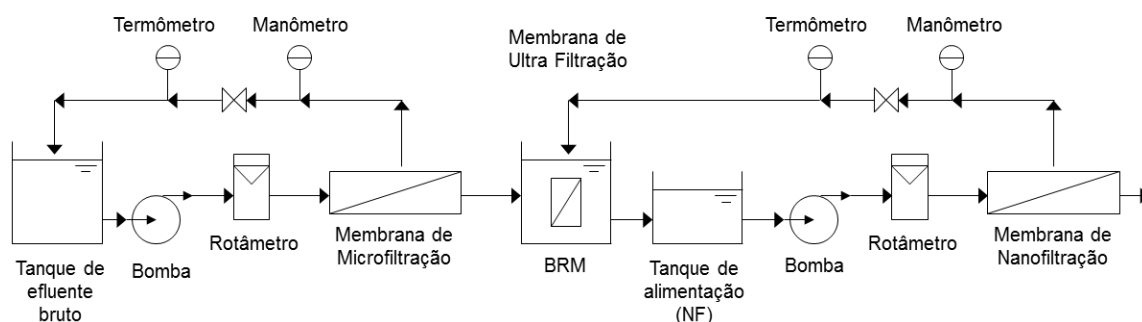


Figura 1: Protocolo esquemático da unidade experimental de MF-BRM-NF.

Tabela 1: Características Físico-químicas do efluente bruto.

Parâmetros	Unidade	Efluente bruto
pH	-	7,64±3,91
CE	μS cm ⁻¹	3.275±1.980
Cor	uH	7.129±3.186
Índigo Blue	g L ⁻¹	0,48±0,09
COT	mg L ⁻¹	1.771±396
N-NH ₃	mg NH ₃ -N L ⁻¹	10,16±9,33
Fosforo total	mg L ⁻¹	<2
Alcalinidade	mg CaCO ₃ L ⁻¹	530,33
Cálcio	mg L ⁻¹	37,79±4,24
Magnésio	mg L ⁻¹	<1,25
Sulfato	mg L ⁻¹	178,67±2,02
Cloro	mg L ⁻¹	544,40±0,11
Sólidos totais	g L ⁻¹	4,87±3,53
Sólidos voláteis totais	g L ⁻¹	1,10±0,29

ROTA DE TRATAMENTO

A Figura 1 representa o protocolo esquemático da unidade experimental de microfiltração (MF), biorreator com membranas (BRM) e nanofiltração (NF).

Na etapa de MF, utilizou-se o módulo comercial de membrana a base do polímero polieterimida (PAM Membranas Ltda.) com média de poros de 0,4 μm e uma área de filtração de 1,0 m^2 . Em todos os experimentos, a pressão foi mantida usando um manômetro e ajustado por uma válvula. Os testes de MF foram conduzidos com retorno do concentrado ao o tanque de alimentação e coleta do permeado sob pressão constante de 1 bar, velocidade de escoamento de 2,4 L min^{-1} , e taxa de recuperação correspondente à 80%. O permeado da MF foi, posteriormente, tratado no BRM (volume do biorreator: 4 L, tempo de retenção hidráulica: 8 h; idade do lodo: 30 d; SSV: 4,2 \pm 1,3 g L^{-1} ; permeabilidade da membrana: 68 \pm 21 $\text{L m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$).

O BRM foi equipado com um módulo comercial de membrana submersa a base do polímero Polifluoreto de vinilideno (PVDF) (ZeeWeed) com uma média de diâmetro de poros de 0,04 μm e área de filtração de 0,047 m^2 . O BRM foi operado por 357 dias, sobre contínua aeração e permeação intermitente (15min de sucção e 15s de retrolavagem) a fim de reduzir a incrustação da membrana. O permeado do BRM seguiu para a etapa de NF, onde foi aplicada a membrana NF90 (Dow Filmtec), a qual possui um peso molar de corte de 100 Da, uma resistência hidráulica média de 5,8 $\times 10^{13}\text{ m}^{-1}$ e taxa de rejeição de NaCl (200 mg L^{-1}) e MgSO_4 (2.000 mg L^{-1}) de 85-95% e 97%, respectivamente (DOWFILMTEC™). A unidade de NF tem operação máxima de pressão de 15 bar, obtida através de uma bamba equipada com controlador de velocidade. O fluxo da alimentação e as pressões foram ajustados e controlados por um manômetro e uma válvula. Utilizou-se uma célula de aço inoxidável com diâmetro de 9 cm e área de filtração de 63,6 cm^2 para a acomodação da membrana de NF. A temperatura durante o teste foi mantida a 20 \pm 5°C utilizando uma bolsa de gelo imersa no tanque de alimentação.

Na etapa de NF, a pressão foi ajustada e controlada em 8, 10, 12 e 15 bar e o pH da alimentação se manteve o mesmo da saída do BRM. Para a investigação de cada condição, empregou-se o seguinte procedimento: (1) Para avaliar a permeabilidade da membrana, circulou-se água deionizada em três diferentes pressões (10, 12 e 15 bar) até que fosse obtido um fluxo constante para cada uma delas, (2) o permeado do BRM foi filtrado por 120 minutos feito nas condições selecionadas, com coleta de 50 mL de permeado a cada 20 minutos e medição de fluxo a cada 10 minutos por 1 minuto, (3) após a filtração, foi feita limpeza física da superfície da membrana através da circulação de água destilada por 2 minutos na unidade sob uma velocidade de escoamento de 1,2 L min^{-1} (4) posteriormente a essa etapa, mediu-se o fluxo de água deionizada durante 20 minutos a cada 5 minutos sob pressão de 10 bar, (5) em seguida, realizou-se uma limpeza química na membrana utilizando NaOH (0,4% m/m) e ácido cítrico (pH 2,5) para remoção de substâncias orgânicas e inorgânicas, respectivamente, (6) tendo em vista que a membrana foi limpa física e quimicamente, ao final, então, foi feita uma nova medição da permeabilidade, na qual, circulou-se água deionizada em três diferentes pressões (10, 12 e 15 bar) até que fosse obtido um fluxo constante para cada uma delas.

RESULTADOS OBTIDOS

DESEMPENHO DA MF E BRM

O efluente têxtil apresentou teores de salinidade (expressa aqui em termos de CE) e cor variáveis, pois compreende uma mistura complexa de produtos químicos que depende da cor do jeans e das fibras utilizadas nos processos (Tabela 1). Embora os processos de tingimento que utilizam o índigo blue ocorram na faixa de pH variando entre 10,5 a 11,5, o efluente bruto em questão apresenta pH neutro, conforme sustentado pela literatura (CHEN *et al.*, 2015; GOZALVEZ-ZAFRILLA *et al.*, 2008). Além disso, o efluente possui cor elevada e alta concentração de matéria orgânica em termos de DQO. O processo de MF removeu, aproximadamente, 100% de cor e permitiu a recuperação do corante em sua totalidade. A elevada eficiência de remoção do corante pode ser associada ao fato de que o índigo blue, por estar em sua forma oxidada, apresentava-se insolúvel em água, A MF também removeu significativamente a DQO (65%) e a CE (26%) (Tabela 2).

O BRM resultou em remoção de DQO e amônia de 73% e 100%, respectivamente (Tabela 2). No entanto, o efluente pós BRM apresentou um aumento na sua cor, o que foi atribuído aos subprodutos microbianos produzidos durante a biodegradação do efluente. Resultados semelhantes foram relatados por Yigit *et al.* (2009) e Spagni *et al.* (2012). As concentrações de sulfato dos permeados da MF e do BRM foram de 1.762 \pm 113 e 2.281 \pm 14 mg L^{-1} , respectivamente. O aumento da concentração de sulfato após o tratamento do BRM foi atribuído à biodegradação de compostos orgânicos sulfonados, como o índigo carmim, que é um possível contaminante no corante comercial. Adicionalmente, o cálcio e o magnésio foram retidos no BRM. Este fato pode estar associado às interações da membrana com produtos microbianos solúveis e substâncias poliméricas extracelulares (EPSs), que possuem propriedades quelantes (ARABI e NAKHLA, 2010). Durante o período de operação, o desempenho do sistema BRM não foi afetado negativamente pelas variações nas características do efluente.

Após o tratamento com BRM, o efluente apresentou qualidade suficiente para reutilização em certos processos têxteis, como lavagem de equipamentos e chão. No entanto, é necessário o polimento do efluente para obter a qualidade necessária para reutilização em processos que requerem qualidade da água mais elevada, tais como nos banhos de tingimento.

Tabela 2: Características físico-químicas do efluente pós MF e pós BRM.

Parâmetro	Unidade	Concentrado MF	Permeado MF	Permeado BRM	Eficiência da MF (%)	Eficiência do BRM (%)
pH	-	8,22±3,91	8,68±0,29	8±0,26	-	-
CE	µS cm ⁻¹	16.375±1980	2.433±979	2.461±504	25,71	0
Cor	uH	35.644±3.186	0	288±96	100	0
Indigo blue	g L ⁻¹	2,4±0,09	0	0	100	-
DQO	mg L ⁻¹	6.407±396	612±170	164±54	65,44	73,20
N-NH ₃	mg L ⁻¹	24,37±9,33	6,60±9,76	0,11±0,18	-	100
Fosfóro total	mg L ⁻¹	<2	<2	<2	-	-
Alcalinidade	mg L ⁻¹	430	473,33	458,52	10,75	3,13
Cálcio	mg L ⁻¹	25,69±6,81	32,69±1,53	25,21±1,15	13,48	20,40
Magnésio	mg L ⁻¹	<1,25	<1,25	<1,25	-	-
Sulfato	mg L ⁻¹	223,56±0,47	259,32±84,82	228,13±1,45	6,87	0
Sólidos totais	g L ⁻¹	15,76±0,54	3,62±2,09	2,48±0,93	25,68	31,57
Sólidos totais voláteis	g L ⁻¹	5,2±0,12	0,99±1,21	0,73±1,02	9,37	26,91

- Não identificado.

EFEITO DA PRESSÃO NO FLUXO E NAS CARACTERÍSTICAS DO PERMEADO DA NF

A pressão aplicada é um fator crítico em um processo de separação por membrana. Em cada pressão aplicada, o fluxo de permeado diminuiu gradualmente com o aumento do tempo de funcionamento devido à polarização de concentração e/ou incrustação (Figura 2). Embora o fluxo de permeado tenha aumentado com o aumento da pressão (de 8 a 15 bar), pressões mais elevadas conduziram a maiores declínios de fluxo (Tabela 3). Esse fenômeno também foi observado por Chen *et al.* (2015) e Amaral *et al.* (2009). O fluxo de permeado inicial e final atingiu valores de 52,83, 50,93, 42,83 e 34,03 e 45,46, 46,95, 39,61 e 32,70 (Tabela 3) L m⁻² h⁻¹ a 8, 10, 12 e 15 bar, respectivamente. O declínio do fluxo é principalmente associado a fenômenos de incrustação e polarização de concentração, que aumentam a pressão osmótica na interface membrana-efluente, reduzindo a força motriz e o fluxo (AOUNI *et al.*, 2012, CHIDAMBARAM *et al.*, 2015). Para valores de pressão variando de 8-12 bar, a maior parte do declínio do fluxo foi atribuída à polarização de concentração, que aumentou com o aumento da pressão atingindo 4, 5 e 7% a 8, 10 e 12 bar, respectivamente. De acordo com Chen *et al.* (2015), o aumento da pressão osmótica devido à polarização de concentração tem mais impacto no decaimento de fluxo do que um aumento na resistência à transferência de massa, conhecida como formação de torta e bloqueio de poros, que geralmente aumentam a resistência à permeação. Um aumento na pressão aplicada leva a um aumento nos valores de fluxo inicial com base na lei de Darcy. No entanto, a força motriz foi maior em pressões mais altas, isto é, 15 bar. Portanto, houve um aumento na transferência de solvente e de solutos em direção à superfície da membrana, resultando numa maior acumulação de poluentes. Isto levou a um aumento na polarização de concentração e na incrustação resultando em um forte declínio do fluxo (MUKHERJEE *et al.*, 2016).

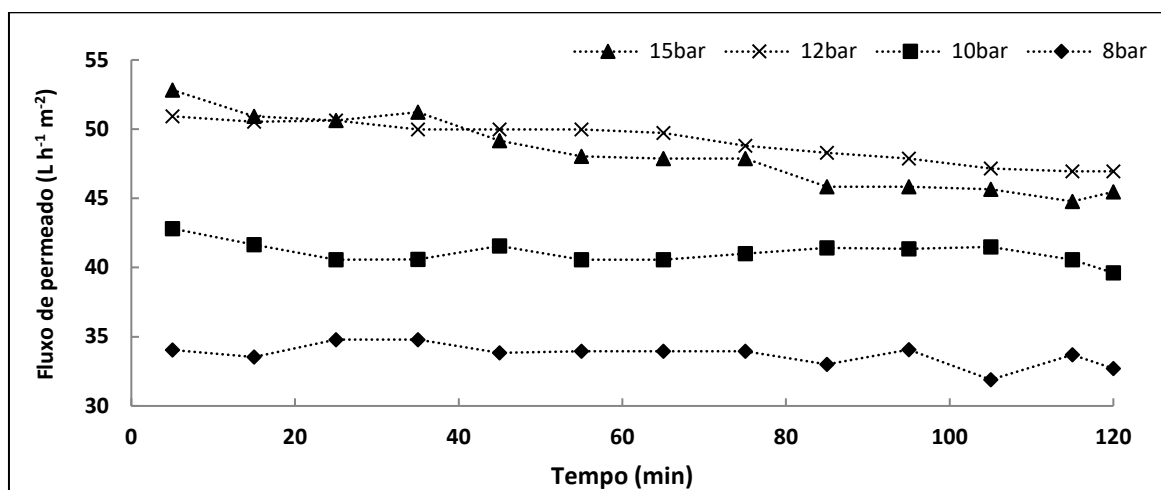


Figura 2: Declínio do fluxo em função do tempo e da pressão.

Tabela 3: Fluxo de permeado, declínio do fluxo e resistência hidráulica (R_m , R_t , R_{fr} , R_{fir} e R_{cc}) ao aplicar NF a 20°C, pH 7,86, taxa de fluxo de 2,4 L min⁻¹ e diferentes pressões.

Pressão (bar)	Jsd ₀ ^a (L m ⁻² h ⁻¹)	Jsd _f ^b (L m ⁻² h ⁻¹)	Tipo de declínio de fluxo			Resistência hidráulica ^c (x10 ¹³ m ⁻¹)				
			Total (%)	Incrustação (%)	CP (%)	R _m	R _t	R _{fr}	R _{fir}	R _{cc}
15	52,83	45,46	37	24	13	6,65	5,21	2,11	3,10	0,10
12	50,93	46,95	25	7	18	6,75	2,44	1,74	0,70	0,76
10	42,82	39,61	17	5	12	7,51	1,57	1,13	0,43	0
8	34,03	32,70	15	4	11	7,44	1,35	1,02	0,33	0

^aFluxo inicial de permeado; ^bFluxo final de permeado; ^cR_m - resistência à membrana, R_t - resistência total da camada gel, R_{fr} - resistência hidráulica reversível, R_{fir} - resistência hidráulica irreversível e R_{cc} - resistência após limpeza química.

A formação de torta e o bloqueio dos poros são os mecanismos mais influentes na incrustação da membrana de NF. Eles aumentam a resistência à permeação através de incrustação externa (formação de torta) e incrustação interna (adsorção e bloqueio de poros) (CHEN *et al.*, 2015).

O aumento da resistência à incrustação com o aumento da pressão correlacionou-se com o declínio do fluxo (Tabela 3). Esse fenômeno também foi observado por Chen *et al.* (2015). Em pressões de 8 a 12 bar, R_{fr} (resistência hidráulica reversível) é maior do que o R_{fir} (resistência hidráulica irreversível), indicando que a camada de torta contribui mais significativamente para a resistência a incrustação do que a adsorção de materiais sobre a superfície da membrana e o bloqueio dos poros. A 15 bar, a R_{fir} superior suporta a hipótese de precipitação de solutos na superfície da membrana. Além disso, o cálculo da resistência hidráulica da membrana após a sua limpeza química (R_{cc}) para cada teste, revelaram que a pressão mais elevada conduz a uma eficiência de limpeza química mais baixa. De fato, a limpeza química só foi eficiente quando aplicada a membranas operadas a 10 e 8 bar. Estes resultados sugerem que a polarização de concentração e a incrustação que ocorrem a valores elevados de pressão resultam na precipitação de sais sobre a superfície da membrana. Consequentemente, é importante otimizar a limpeza química para operação de membrana a pressões elevadas para assegurar a permeabilidade da membrana e a sustentabilidade do processo.

A partir da Tabela 4, pode-se afirmar que a capacidade de remoção de DQO da NF diminuiu com o aumento da pressão. O aumento da pressão de 8 para 15 bar, representou um aumento a concentração média de DQO de 28,9 para 41,2 mg L⁻¹. A polarização de concentração mais elevada provoca um aumento na concentração de soluto na superfície da membrana. Assim, como a retenção intrínseca da membrana permanece inalterada, a quantidade de soluto transferida para o permeado aumenta. A CE e o COT são independentes da pressão aplicada. É importante notar que, mesmo com pressões mais altas, como a de 15 bar, que resultou em água de menor qualidade, a qualidade do permeado ainda é suficiente para suprir os processos mais rigorosos do beneficiamento têxtil, havendo remoção de 100% da cor, conforme aspecto da amostra apresentado pela Figura 3.

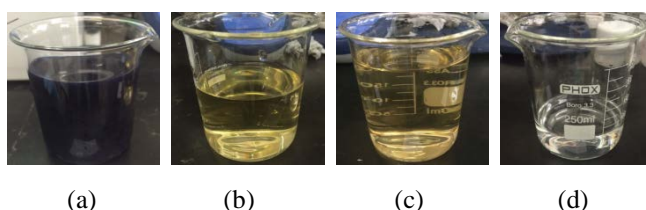


Figura 3: Efluente: (a) bruto; (b) pós MF; (c) pós BRM e (d) pós NF.

Tabela 4: Características físico-químicas do permeado da NF.

Parâmetro	Unidade	Permeado BRM	Permeado NF			
			15 bar	12 bar	10 bar	8 bar
DQO	mg L ⁻¹	129	41±6	35±4	30±3	29±7
pH	-	7,86	8,39±0,31	8,22±0,22	7,11±0,05	8,23±0,14
CE	μS cm ⁻¹	1855	35±2	35±7	33±3	35±2
Cor	uH	274	0	0	0	0
N-NH ₃	mg L ⁻¹	0	0	0	0	0

Assim, considerando-se o declínio do fluxo, a produção de permeado, as características do permeado e as condições operacionais, a pressão considerada ótima da NF foi de 12 bar. Além disso, de acordo com o teste de Kruskal Wallis, não houve diferença estatística entre as características dos permeados obtidos a 12 bar e as obtidas a 8 e 10 bar em termos de remoção de DQO, sendo estatisticamente diferentes dos resultados obtidos a 15 bar ($\alpha = 0,05$).

CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que o corante índigo blue foi 100% retido pela membrana de MF, o que permite uma eventual recuperação a partir da corrente do concentrado. O BRM resultou em remoção de DQO e amônia de 73 e 100%, respectivamente. Assim, a MF conjugada com BRM se mostrou capaz de atender demandas de reuso da água menos exigentes do processo de beneficiamento têxtil, tais como a lavagem de pisos e equipamentos. Entretanto, para que fosse alcançado um efluente final capaz de ser reutilizado em atividades que requerem uma maior qualidade da água de reuso, como a etapa de tingimento, o polimento complementar do efluente através da NF foi necessário.

A NF foi bem sucedida quando aplicada como polimento do efluente da rota proposta, apresentando menor tendência de incrustação da membrana quando operada sob pressão de 12 bar e uma velocidade de fluxo cruzado de 0,63 cm s⁻¹. A NF atingiu eficiências de remoção de DQO e Cor de 72,8 e 100%, respectivamente. A elevada redução da CE ressalta o potencial da NF na remoção SDT.

A concentração de polarização foi a principal causa do declínio do fluxo na NF. A limpeza química da membrana foi suficiente para recuperar a permeabilidade inicial do processo. A pressão ótima da NF foi 12 bar, pois, apresentou maior produtividade de efluente tratado com características que atendem aos padrões de reuso. Assim, a rota proposta se mostrou bastante atrativa do ponto de vista de sustentabilidade, pois se mostrou tecnicamente viável para a recuperação do corante e geração de água de reuso, insumos estes capazes de retornar à etapa produtiva reduzindo os custos operacionais do processo de beneficiamento têxtil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEFET-MG (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais) pelo apoio e contrapartida na pesquisa, à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo fomento concedido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLÈGRE, C.; MOULIN, P.; MAISSEU, M.; CHARBIT, F. Savings and re-use of salts and water present in dye house effluents. *Desalination*, v. 162, p. 13-22, 2004.
2. AMARAL, M.C.; FERREIRA, C.F.; LANGE, L.C.; AQUINO, S.F. Characterization of landfill leachates by molecular size distribution, biodegradability, and inert chemical oxygen demand. *Water Environment Research*, v.81, n.5, p. 499-505, 2009.
3. AOUNI, A.; FERSI, C.; CUARTAS-URIBE, B.; BES-PÍA, A.; ALCAINA-MIRANDA, M.I.; DHAHBI, M. Reactive dyes rejection and textile effluent treatment study using ultrafiltration and nanofiltration processes. *Desalination*. v.297, p.87-96, 2012.
4. APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
5. ARABI, S.; NAKHLA, G. Impact of molecular weight distribution of soluble microbial products on fouling in membrane bioreactors. *Separation and Purification Technology*. v.73, n.3, p.391-396, 2010.
6. BAKER, R.W. *Membrane technology and applications*, 2. Ed. John Wiley & Sons Ltd, England, 2004.
7. BRIK, M.; SCHOEBERL, P.; CHAMAM, B.; BRAUN, R.; FUCHS, W. Advanced treatment of textile wastewater towards reuse using a membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, v. 41, p. 1751–1757, 2006.
8. BUSCIO, V.; MARÍN, M. J.; CRESPI, M.; GUTIÉRREZ-BOUZÁN, C. Reuse of textile wastewater after homogenization–decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes. *Chemical Engineering Journal*, v. 265, p. 122–128, 2015.
9. CHEN, V.; YANGA, Y.; ZHOUA, M.; LIUA, M.; YUA, S.; GAOL, G. Comparative study on the treatment of raw and biological treated textile effluents through submerged nanofiltration. *Journal of Environmental Management*, v.284, p.121-129, 2015.
10. CHIDAMBARAM, T.; OREN, Y.; NOEL, M. Fouling of nanofiltration membranes by dyes during brine recovery from textile dye bath wastewater. *Chemical Engineering Journal*, v.262, p.156-168, 2015.
11. COUTO, Carolina Fonseca. Application of membrane separation processes on the treatment of textile effluent for water and dye reuse. 2016. Dissertação de Mestrado. (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
12. DATAR, M.T., BHARGAVA, D.S. Effects of environmental factors on nitrification during aerobic digestion of activated sludge. *Journal of the Institution of Engineering (India)*, Part EN: Environmental Engineering Division, v.68, n.2, p.29-35, 1988.
13. DUTTA, B.K. Principles of mass transfer and separation processes. PHI Learning Pvt. Ltd., 2007.
14. ELLOUZE, E.; TAHRI, N.; AMAR, R.B. Enhancement of textile wastewater treatment process using nanofiltration. *Desalination*, v.286, p. 16-23, 2012.
15. FRIHAA, I.; BRADAIB, M.; JOHNSON, D.; HILAL, N.; LOUKILA, S.; AMORA, F.B.; FEKIA, F.; HANB, J.; ISODAB, H.; SAYADI, S. Treatment of textile wastewater by submerged membrane bioreactor: In vitro bioassays for the assessment of stress response elicited by raw and reclaimed wastewater. *Journal of environmental management*, v.160, p. 184-192, 2015.
16. GOZÁLVIZ-ZAFRILLA, J.M.; SANZ-ESCRIBANO, D.; LORA-GARCÍA, J.; LEÓN HIDALGO, M.C. Nanofiltration of secondary effluent for wastewater reuse in the textile industry. *Desalination*, v.222, p.272-279, 2008.
17. KOYUNCU, I.; TOPACIK, D. Effects of operating conditions on the salt rejection of nanofiltration membranes in reactive dye/salt mixtures. *Separation and Purification Technology*, v.33, n.3, p. 283-294, 2003.
18. LINA, J.; TANGB, C.Y.; YEA, W.; SUNC, S.; HAMDANA, S.H.; VOLODIND, A.; HAESSENDONCKD, C.V.; SOTTOE, A.; LUISF, P.; VAN DER BRUGGEN, B. Unraveling flux behavior of superhydrophilic loose nanofiltration membranes during textile wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, v.493, p. 690-702, 2015.
19. LIU, M.; LÜ, Z.; CHEN, Z.; YU, S.; GAO, C. Comparison of reverse osmosis and nanofiltration membranes in the treatment of biologically treated textile effluent for water reuse. *Desalination*, v. 281, p. 372-378, 2011.
20. LUONG, T.V.; SCHMIDT, S.; DEOWAN, S.A.; HOINKIS, J.; FIGOLI, A.; GALIANO, F. *Membrane bioreactor and promising application for textile industry in Vietnam*. In: 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use, Binh Duong New City, Vietnam, 2016.
21. MUKHERJEE, R.; MONDAL, M.; SINHA, A.; SARKAR, S.; DE, S. Application of nanofiltration membrane for treatment of chloride rich steel plant effluent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.4, p.1-9, 2016.

22. PAIPURI, M.; KIM, S.H.; HASSAN, O.; HILAL, N.; MORGAN, K. Numerical modelling of concentration polarisation and cake formation in membrane filtration processes. *Desalination*, v.365, p.151-159, 2015.
23. ROBINSON, Tim et al. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource technology*, v. 77, n. 3, p. 247-255, 2001.
24. SPAGNI, A.; CASU, S.; GRILLI, S. Decolourisation of textile wastewater in a submerged anaerobic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, v.117, p.180-185, 2012.
25. UNLU, M.; YUKSELER, H.; YETIS, U. Indigo dyeing wastewater reclamation by membrane-based filtration and coagulation processes. *Desalination*, v.240, n. 1-3, p.178-185, 2009.
26. VALH, J.V.; MARECHAL, A.M.L.; VAJNHANDL, S.; JERIC, T.; SIMON, E. *Treatise on Water Science: Volume 4: Water-Quality Engineering*. 1. ed. Slovenia: Elsevier, 22p., 2011.
27. VEDRENNE, M.; VASQUEZ-MEDRANO, R.; PRATO-GARCIA, D.; FRONTANA-URIBEC, B.A.; HERNANDEZ-ESPARZA, M.; ANDRÉS, J.M. A ferrous oxalate mediated photo-Fenton system: Toward an increased biodegradability of indigo dyed wastewaters. *Journal of Hazardous Materials*, v. 243, p. 292–301, 2012.
28. VERMA, A.K.; DASH, R.R.; BHUNIA, P. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. *Journal of environmental management*. v.93, n.1, p.154-168, 2012.
29. YIGIT, N.O.; UZAL, N.; KOSEOGLU, H.; HARMAN, I.; YUKSELER, H.; YETIS, U.; CIVELEKOGLU, G.; KITIS, M. Treatment of a denim producing textile industry wastewater using pilot-scale membrane bioreactor. *Desalination*, v.240, p.143-150, 2009.