

I - 637 - AVALIAÇÃO DO USO DE COAGULANTES A BASE DE TANINO E DE ALUMÍNIO PARA REDUÇÃO DO *FOULING* NO TRATAMENTO DE ÁGUA POR ULTRAFILTRAÇÃO (UF)

Viviane Bezerra da Silva⁽¹⁾

Pós-graduanda em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal do ABC.

Rodrigo Almeria Ragio⁽²⁾

Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental e doutorando em Energia pela Universidade Federal do ABC.

Anna Carolina Pedreira⁽³⁾

Graduanda em Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do ABC.

Clélio Rodrigo Paiva Rafael⁽⁴⁾

Pós-graduando em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal do ABC.

Eduardo Lucas Subtil⁽⁵⁾

Mestre em Engenharia Ambiental e doutor em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela Universidade de São Paulo.

Endereço⁽¹⁾: Laboratório de Tratamento de Águas Urbanas Servidas e Reúso de Água (LabTAUS), Universidade Federal do ABC – Av. dos Estados, 5001 - Bangú - Santo André - SP - CEP: 09210-580 - BrasilTel: +55 (11) 3356-7000 - e-mail: viviane.b@ufabc.edu.br

⁽²⁾ E-mail: rodrigo.ragio@ufabc.edu.br

⁽³⁾ E-mail: anna.pedreira@aluno.ufabc.edu.br

⁽⁴⁾ E-mail: rodrigo.paiva@aluno.ufabc.edu.br

⁽⁵⁾ E-mail: eduardo.subtil@ufabc.edu.br

RESUMO

As tecnologias de separação por membranas de Microfiltração (MF) e Ultrafiltração (UF) têm sido consideradas elementos chave no tratamento de águas, devido a escassez da água aliada a degradação dos mananciais e reservatórios destinados ao abastecimento. A associação entre os processos de coagulação/floculação e filtração por membrana se mostra vantajoso por reduzir a capacidade de bloqueio da membrana. Dessa forma, é importante o estudo de dosagens de coagulantes associados a processos de filtração de forma que não causem *fouling* irreversível a longo prazo e consequentemente diminuam a vida útil da membrana. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do uso de coagulantes a base de tanino e alumínio durante a filtração de água de manancial superficial com membranas de UF de fibra-oca. Foram realizados ensaios de filtrabilidade para cada coagulante com a concentração de 20 mg/L para ambos. Os resultados indicaram um melhor desempenho da filtração de água de manancial com a dosagem do coagulante à base de alumínio. O decaimento do fluxo normalizado com o tempo foi menor para o teste de filtração com o coagulante à base de alumínio, enquanto para o teste sem uso de coagulantes e com coagulante à base de tanino, o decaimento do fluxo foi maior ao final do ensaio. Os resultados da aplicação do modelo Hermia mostram que o bom ajuste dos modelos de bloqueio de poro completo e intermediário é um indício do alto grau de irreversibilidade do *fouling* causado pela matriz da água de manancial, mesmo com a adição de coagulantes nas amostras. Sugere-se para trabalhos futuros a análise de recuperação do fluxo, a caracterização do *fouling* formado e a identificação da melhor combinação da dosagem de coagulantes com os métodos físicos de aeração, retrolavagem e aeração + retrolavagem simultânea. Além disso, sugere-se melhores análises na água de manancial para investigar os compostos causadores de *fouling*. De maneira geral, os resultados sugerem que o uso de coagulantes contribui para a mitigação do *fouling*, prolongando o decaimento do fluxo, a necessidade de limpeza química e melhoria da filtração da água para abastecimento público.

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de água, membrana de fibra-oca, coagulante orgânico, *fouling*.

INTRODUÇÃO

A escassez da água aliada a degradação dos mananciais e reservatórios destinados ao abastecimento tornou ainda mais importante a utilização de novos processos para o tratamento de água (MOURA *et al.*, 2020). Neste cenário,

as tecnologias de separação por membranas de Microfiltração (MF) e Ultrafiltração (UF) tem sido consideradas elementos chave no tratamento de águas, pois (i) proporcionam água de melhor qualidade, (ii) Estações de Tratamento de Água (ETA) mais compactas e (iii) reduzem a geração de lodo e custo operacional (CARTAXO *et al.*, 2020).

Durante a filtração com membranas de MF e UF os componentes de alimentação são separados com base em seu tamanho, sendo o efeito de peneiramento o principal mecanismo (PURKAIT; SINGH, 2018). Nesse contexto, as membranas de UF apresentam grande vantagem de serem menos suscetíveis ao bloqueio interno dos poros por poluentes que ficarão retidos na superfície, sendo mais facilmente removidos na filtração tangencial (ZHANG *et al.*, 2018). Dentre os vários tipos de membranas porosas, as Membranas de Fibra Oca (HFM) são as mais utilizadas devido a maior densidade de empacotamento em relação das membranas planas ou tubulares. No entanto, a formação de depósito na membrana (*fouling*) é ainda uma importante barreira da tecnologia. Na aplicação de membranas de UF para tratamento de água de manancial superficial lântico, a matéria orgânica natural (MON), que é uma mistura complexa de ácidos húmico e fúlvico, proteínas e carboidratos, representa um importante *foulant* que pode impactar significativamente o fluxo de permeado (CASTRO-MUÑOZ, 2020). Desta forma, torna-se crucial para a sustentabilidade dos processos de separação por membrana o estudo e desenvolvimento de técnicas para prevenir e minimizar o *fouling*. Uma alternativa viável para isso é a adição de coagulantes (GONÇALVES *et al.*, 2019).

A associação entre os processos de coagulação/floculação e filtração por membrana se mostra vantajoso por reduzir a capacidade de bloqueio da membrana através da agregação das partículas menores, tornar a camada de gel menos hidrofóbica, diminuindo o seu potencial de adesão na superfície da membrana (LY *et al.*, 2018) e mitigação do *fouling* adsorvido pela remoção de compostos solúveis (KHOUNI *et al.*, 2020).

A coagulação das partículas é fortemente dependente do pH, portanto, os agentes causadores de *fouling* podem ser removidos por meio de neutralização de carga, floculação de varredura e mecanismos de adsorção. O coagulante deve ser capaz de neutralizar as cargas de partículas ou ter a capacidade de aprisioná-las, uni-las ou encapsula-las em um processo denominado adsorção e ponte. Tanto a adsorção quanto a coagulação não podem eliminar completamente os orgânicos causadores de *fouling* e ainda podem levar a efeitos adversos de *fouling* na membrana (OKORO *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2020). O uso de coagulantes quando em altas dosagens, causam alterações importantes no pH. Além disso, o aumento da dosagem do coagulante pode levar ao aumento do *fouling* devido a formação de complexos orgânicos metálicos e/ou hidróxidos metálicos coloidais (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

Uma alternativa é a aplicação de coagulantes naturais, como os baseados em taninos, uma vez que possibilitam uma menor geração de lodo, menor consumo de alcalinidade, e ausência de compostos metálicos, além de maior biodegradabilidade. Além disso, os coagulantes naturais estão recebendo mais atenção atualmente devido ao seu menor custo e maior disponibilidade. São ambientalmente seguros e neutros em carbono, regenerativos por natureza, amplamente distribuídos e fáceis de preparar e manusear (ARISMENDI *et al.*, 2018; AHMED *et al.*, 2020; OKORO *et al.*, 2021). Apesar desses benefícios, os coagulantes orgânicos também podem aumentar o *fouling* nas membranas, inclusive irreversível, pois seus flocos ou mesmo o coagulante residual dissolvido no meio podem adsorver nas membranas (RAGIO *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2011).

Dessa forma, é importante o estudo de dosagens de coagulantes associados a processos de filtração de forma que não causem *fouling* irreversível a longo prazo e consequentemente diminuam a vida útil da membrana.

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do uso de coagulantes a base de tanino e alumínio durante a filtração de água de manancial superficial com membranas de UF de fibra-oca.

METODOLOGIA

As coletas de água de manancial para os testes foram feitas na Represa Guarapiranga, em São Paulo. Os coagulantes utilizados neste estudo foram TANFLOC SG, coagulante a base de tanino, doado pelo fabricante TANAC S.A. e o AQUA PAC 18, um cloreto de polialumínio (PACl), adquirido do fabricante Purewater Controle de Efluentes Ltda.

Antes dos ensaios de filtrabilidade foi realizado um ensaio de coagulação com diferentes dosagens (5 mg/L, 10 mg/L e 20 mg/L) para cada coagulante, para avaliar seus efeitos na remoção de poluentes e determinar uma concentração de trabalho. As concentrações foram baseadas no princípio ativo dos coagulantes e seu teor nas soluções (18% de Al_2O_3 no PACl e 32% de sólidos no TANFLOC). Uma vez definida, foi realizada a avaliação do efeito dos coagulantes associado a filtrabilidade da membrana. Para isso, o sistema utilizado para avaliar os ensaios de filtração com membranas foi uma célula de filtração tipo tangencial com agitador magnético e bombas peristálticas (Figura 1). O agitador magnético foi utilizado para simular as misturas do processo de coagulação das partículas. Cada módulo de UF utilizado era composto por 5 fibras de membranas, resultando em uma área total de de 155,2 cm². As membranas testadas são de fluoreto de polivinilideno (PVDF), com tamanho de poro de 0,03 µm e diâmetro externo de 2,6 mm.

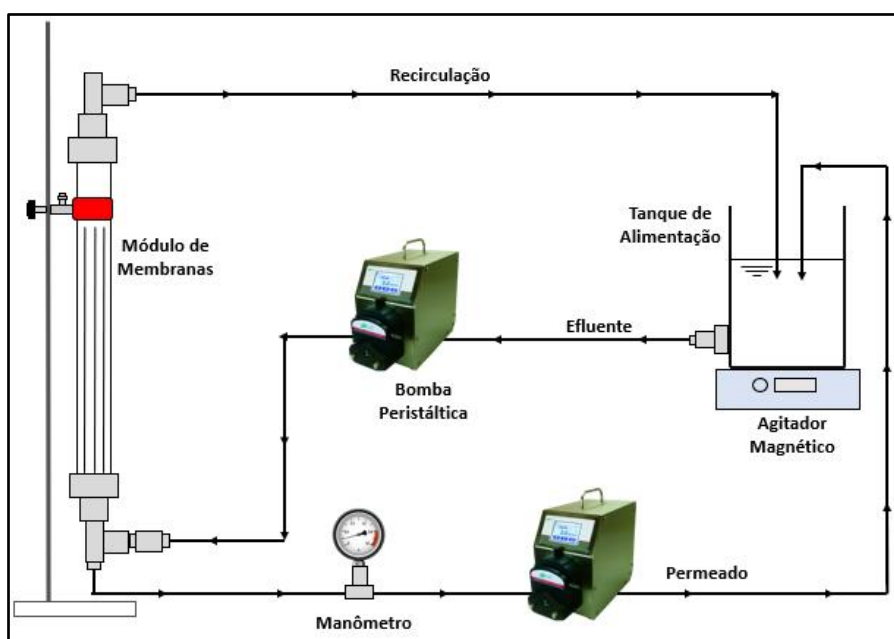


Figura 1: Desenho esquemático do sistema de filtração. Autoria própria.

Os ensaios de filtrabilidade foram feitos com PTM constante de 0,4 bar. Após a compactação das membranas durante 10 minutos a 0,4 bar, a primeira etapa foi filtração de água deionizada por 10 minutos. A segunda foi a filtração da amostra da água de manancial por 60 minutos. O primeiro ensaio foi realizado apenas com a água do reservatório Guarapiranga (controle – sem coagulantes) e os outros dois foram adicionados coagulantes a base de tanino e alumínio, respectivamente.

Ajustando os dados obtidos a partir da filtração da amostra, foram avaliados dois modelos de *fouling* descritos por Al-Malack *et al.* (2004), a filtração padrão (t/V - t) e a filtração da camada de torta (t/V - V). O ajuste do primeiro modelo foi realizado utilizando a Eq. 1.

$$\frac{t}{V} = \frac{1}{Q_0} + \frac{k}{2}t \quad \text{Eq. 1}$$

Onde t é o tempo de filtração (min), V é o volume de permeado acumulado (L), Q_0 é o fluxo inicial (L min⁻¹) e k é uma constante de filtração (L⁻¹).

O ajuste deste segundo modelo foi realizado utilizando a Eq. 2.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \cdot R_m}{A \cdot TMP} + \frac{\mu \cdot c \cdot R_c}{2A^2 \cdot TMP} V = \frac{1}{Q_0} + \frac{K}{2}V \quad \text{Eq. 2}$$

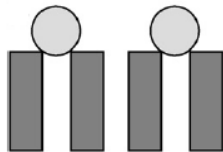
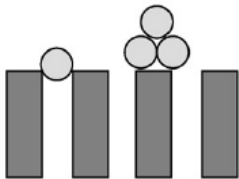
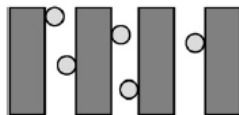
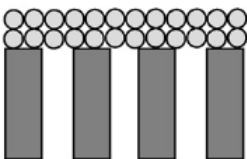
Onde μ é a viscosidade dinâmica (Pa s), R_m é a resistência da membrana (m^{-1}), A é a área da membrana (m^2), c é a concentração de partículas ($kg L^{-1}$), R_c é a resistência da camada de torta ($m kg^{-1}$), TMP é a pressão transmembrana (Pa) e K é constante de filtração da camada de torta ($min L^{-2}$).

As análises físico-químicas para turbidez, pH (4500-H+ B.), alcalinidade (2310 B.4c e 2320 B.4b), demanda química de oxigênio, DQO (5220 D.), sólidos suspensos totais, SST (2540 D.), cor real (2120 F.) e compostos que absorvem no UV, UV₂₅₄ (5910 B.) seguiram a APHA (2012), sendo que as amostras para UV₂₅₄ foram filtradas a vácuo com filtros de fibra de vidro 1,2 μm para remoção de sólidos suspensos, interferentes nas análises.

Também foi usado o modelo de Hermia modificado para filtração tangencial para caracterização do *fouling*. Ele corresponde a quatro tipos básicos de depósito: bloqueio completo, bloqueio intermediário, bloqueio padrão e formação de camada de torta. Os modelos originais foram desenvolvidos para filtração *dead-end* e são com base nas leis de filtração de pressão constante (VELA, 2008).

Após os ensaios de filtrabilidade, aplicou-se o modelo Hermia adaptado para filtrações tangenciais para a identificação dos mecanismos predominantes na formação de *fouling* durante o tempo de filtração da amostra, que inclui mecanismos de bloqueio de poro e formação da camada de torta. As equações do modelo Hermia foram apresentadas por Field et. al (1995) e estão representadas na Tabela 1. O parâmetro n assume valores diferentes para cada tipo de *fouling, o parâmetro J_0 é o fluxo inicial ($m^3/m^2 s$), J_c , J_i e J_t são os fluxos críticos teóricos ($m^3/m^2 s$), t é o tempo de filtração e K_p , K_c , K_i e K_t são as constantes de filtração de cada um dos mecanismos de *fouling*.*

Tabela 1: Equações e ilustrações do modelo Hermia. Adaptado de Vela et al. (2008).

n	Modelo	Ilustração	Equação
2	Bloqueio Completo (BC)		$J = J_c + (J_0 - J_c) \times \exp(-K_c \times J_0 \times t)$ Eq. 3
1	Bloqueio Intermediário (BI)		$J = \frac{J_0 \times J_i \times \exp(K_i \times J_i \times t)}{J_i + J_0 \times (K_i \times J_i \times t) - 1}$ Eq. 4
1,5	Bloqueio Padrão (BP)		$J = \frac{J_0}{(1 + J_0^{0.5} \times K_p \times t)^2}$ Eq. 5
0	Formação da camada de torta (CT)		$t = \frac{1}{K_t \times J_t^2} \times \ln \left[\frac{J}{J_0} \times \left(\frac{J_0 - J_t}{J - J_t} \right) - J_t \times \left(\frac{1}{J} - \frac{1}{J_0} \right) \right]$ Eq. 6

O procedimento para a aplicação do modelo Hermia foi descrito por Ragio et al. (2023). Para cada minuto de filtração de amostra, foi feito o cálculo do fluxo (ou tempo, para a equação da camada de torta) e calculado o

erro quadrático médio (eqm) cuja expressão é representada pela Eq. 7. A soma desse erro foi feita para todo período de filtração da amostra. A função *Solver* do Microsoft Excel® foi usada para ajustar os parâmetros da curva e minimizar a soma do erro quadrático, sendo alterados os fluxos críticos teóricos e as constantes de filtração. O mecanismo predominante durante a filtração é aquele que, após o ajuste, apresenta a menor soma dos erros.

$$eqm = (J_{medido} - J_{modelo})^2 \quad \text{Eq. 7}$$

RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados das análises de caracterização da água de manancial estão na Tabela 2. Os valores de caracterização foram utilizados como parâmetro comparativo para avaliação do desempenho das concentrações do coagulante e filtrabilidade das membranas.

Tabela 2: Caracterização da água de manancial. Autoria própria.

Parâmetro	Média ± Desvio Padrão
Turbidez (UNT)	3,3 ± 0,7
DQO (mg/L)	24,5 ± 6,2
pH	7,8 ± 1,0
Concentração de SST (mg/L)	2,8 ± 0,2
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	41,2 ± 6,3
Cor (uC)	27,9 ± 1,1
Cor Aparente (PCU)	79,0 ± 1,4
UV ₂₅₄ (10 ³ x cm ⁻¹)	109,0 ± 1,0

Os ensaios de coagulação obtiveram os resultados apresentados na Tabela 3. O coagulante à base de tanino (20 mg/L) apresentou flocos maiores e mais resistentes à quebra e/ou liberação de material dissolvido e coloidal durante a filtração, o que promoveu o aumento da cor aparente e da turbidez na amostra. Desta forma, com base nestes resultados a concentração adotada para os testes de filtrabilidade foi de 20 mg/L.

Tabela 3: Concentração de SST, cor aparente e turbidez em função da dosagem dos coagulantes. Autoria própria.

Coagulante	Concentração (mg/L)	SST (mg/L)	Cor Aparente (PCU)	Turbidez (UNT)
TANFLOC SG (tanino)	5	0,45	86,75	3,60
	10	0,90	101	4,30
	20	1,65	138,25	5,42
PACl (base de alumínio)	5	0,75	55,25	3,25
	10	1,15	68,25	5,67
	20	2,90	80	4,94

A Figura 2 apresenta as curvas dos fluxos normalizados para os diferentes ensaios. A curva que representa a amostra com o coagulante à base de alumínio, obteve o melhor resultado entre as amostras, com menor decaimento do fluxo ao longo do tempo. As amostras da água de manancial e com coagulante à base de tanino nos primeiros 10 minutos de ensaio, obtiveram um decaimento de fluxo aproximado. Entretanto, após este

período inicial, a amostra contendo o coagulante à base de tanino obteve um decaimento de fluxo menor, quando comparado a amostra sem coagulantes.

A Figura 3 apresenta as curvas de ajuste para os modelos de *fouling* de filtração padrão (A) e filtração de torta clássica (B). Assim, o material aderido na superfície é mais facilmente removido durante a própria filtração tangencial, como também na limpeza física, e é possível obter maior recuperação do fluxo após a filtração.

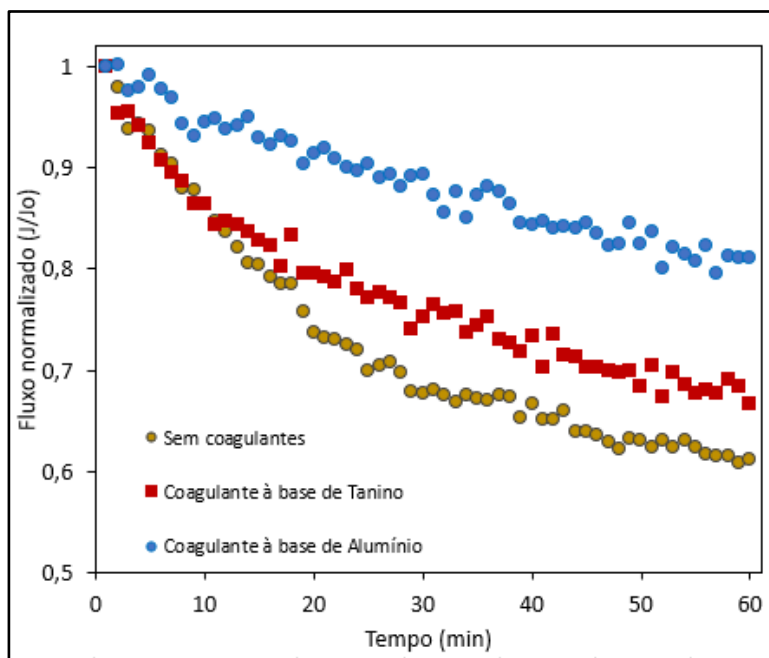


Figura 2: Fluxos normalizados para os diferentes ensaios. Autoria própria.

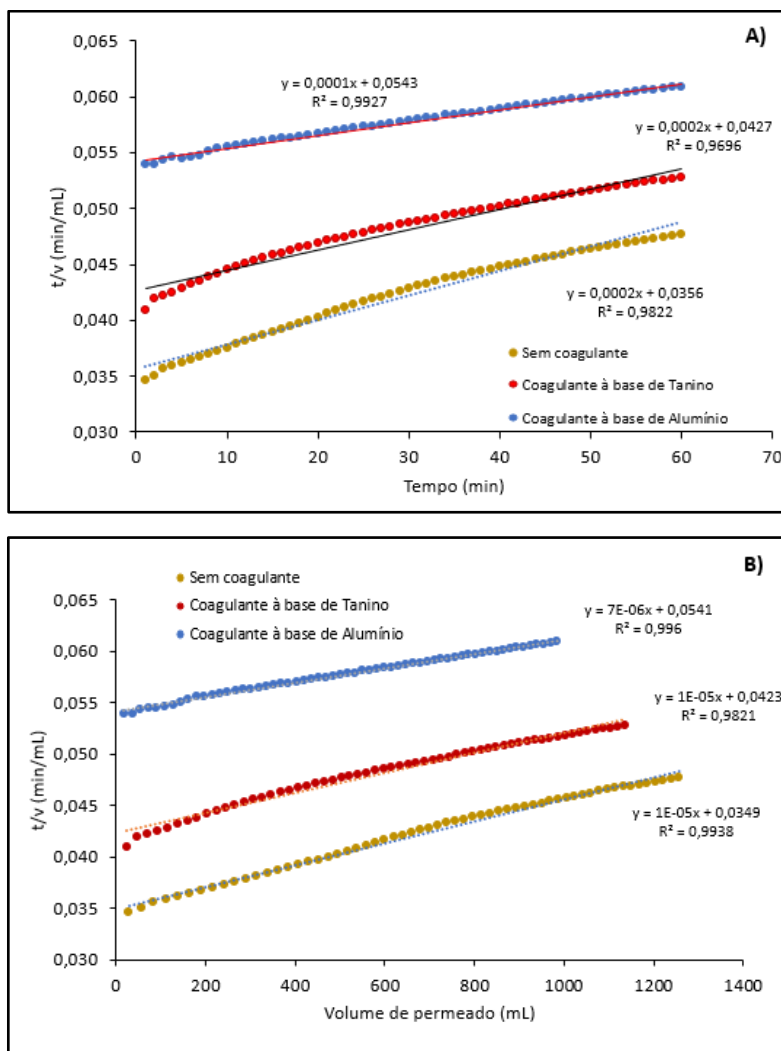


Figura 3: Curvas de ajuste para os modelos de filtração padrão de *fouling* (A) e filtração clássica de camada de torta (B). Autoria própria.

A Tabela 4 apresenta os resultados da aplicação do modelo Hermia adaptado para filtrações tangenciais.

Tabela 4: Erro quadrático médio estimado pelo modelo de Hermia. Os valores de K foram multiplicados por 10^4 . Autoria própria.

Amostra	BP		BC			BI			CT		
	eqm	K_p	eqm	K_c	J_c	eqm	K_i	J_i	eqm	K_t	J_t
Água de reservatório	1043	5,60	69	3,96	64,84	95	3,93	59,91	314	0,045	54,00
Tanino	670	4,59	73	4,85	62,74	60	4,97	60,67	479	0,049	52,00
Alumínio	44	2,44	30	2,24	49,08	30	1,90	44,50	857	0,026	39,28

Os modelos BC e BI foram predominantes em todas as filtrações. O modelo BP também foi predominante quando o coagulante de alumínio foi usado. De forma geral, a camada de torta não apresentou um bom ajuste para nenhuma das filtrações.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados para os ensaios preliminares com coagulantes mostraram sua capacidade para agregação das partículas da água superficial, levando à formação de flocos, porém nem todos os flocos sedimentaram e aqueles que ficaram suspensos levaram ao acréscimo de turbidez, cor aparente e SST conforme as dosagens empregadas. Porém, considerando que o sistema de filtração não prevê a sedimentação dos flocos, o aspecto mais importante seria a formação de flocos resistentes à quebra e/ou liberação de material dissolvido e coloidal durante a filtração, prevenindo assim o aumento do *fouling* irreversível (LY et al., 2018). Comparando-se os dois coagulantes, o baseado em tanino aumentou a cor, por causa de sua coloração característica, indicando também a presença de uma fração dissolvida desse coagulante que não colaborou com a formação de flocos, podendo ter influenciado na filtração.

Os resultados para os ensaios de filtrabilidade apresentados na Figura 2 demonstram que os dois coagulantes impactaram positivamente a filtrabilidade da água de manancial. Porém, o coagulante à base de alumínio foi capaz de mitigar mais expressivamente a redução do fluxo de permeado. Ao final da filtração com este coagulante, foi possível manter 80% do fluxo inicial, enquanto o fluxo final para o coagulante à base de tanino e a água de manancial sem coagulante foi de 67% e 60% do inicial, respectivamente.

Além disso, pode-se observar que o coagulante à base de alumínio provavelmente reduziu a adsorção de poluentes pela membrana, os quais estão geralmente associados com a redução do fluxo de permeado logo nos primeiros minutos da filtração, bem como a formação da camada de torta. Por outro lado, os resultados de redução de fluxo com o uso do coagulante à base de tanino, nos primeiros 10 minutos, são similares ao da amostra sem coagulante, indicando que a formação do flocos minimizou o desenvolvimento da camada de torta por favorecer a remoção destes durante a filtração tangencial, mas não foi capaz de mitigar a redução de fluxo associada a adsorção de compostos na membrana. O próprio coagulante pode ter feito parte dos *foulants*, porém seria necessária uma melhor caracterização dos compostos adsorvidos para confirmar esta questão.

Na Figura 3 pode-se observar os ajustes para os modelos de filtração padrão de *fouling* (Figura 3A) e filtração clássica de camada de torta (Figura 3B). O melhor ajuste foi obtido para o modelo clássico de filtração de torta em comparação ao ajuste do modelo de filtração padrão. O ensaio realizado com o coagulante à base de tanino obteve o menor ajuste do segundo modelo, o que pode indicar a influência de outros mecanismos na formação do *fouling*.

Quanto ao modelo de *fouling* de Hermia, a caracterização da água mostra que a concentração de sólidos em suspensão era baixa (Tabela 2). Desta forma, não ocorreu a predominância do modelo CT, por haver pouco material suspenso para formar a camada. Mesmo com o aumento dessas partículas pela coagulação, pode-se considerar o efeito da filtração tangencial sobre as partículas coaguladas para impedir sua adesão à membrana, mais facilmente removidas da superfície. Apesar disso, o modelo de bloqueio de poro padrão também não foi predominante para a maioria das filtrações, sugerindo que as partículas ou eram, de forma geral, maiores que os poros da membrana ou que interações eletrostáticas entre elas ou com a membrana ocorreram predominantemente na superfície. Aumento desse tipo de *fouling* pode ocorrer por causa do coagulante residual estar depositando no interior dos poros, principalmente quando o coagulante à base de alumínio é usado. De forma geral, o bom ajuste dos modelos de bloqueio de poro completo e intermediário é um indício do alto grau de irreversibilidade do *fouling* causado por essa matriz, exigindo técnicas de limpeza como emprego de soluções químicas ou limpezas físicas mais eficientes, como o ultrassom (IORHEMEN et al., 2016).

CONCLUSÕES

Os resultados indicaram um melhor desempenho da filtração de água de manancial com a dosagem do coagulante à base de alumínio. O decaimento do fluxo normalizado com o tempo foi menor para o teste de filtração com o coagulante à base de alumínio, enquanto para o teste sem uso de coagulantes e com coagulante à base de tanino, o decaimento do fluxo foi maior ao final do ensaio, embora o ensaio de filtrabilidade realizado com o com o coagulante à base de tanino obteve melhor desempenho do que o ensaio realizado sem o uso de coagulantes.

O bom ajuste dos modelos de bloqueio de poro completo e intermediário é um indício do alto grau de irreversibilidade do *fouling* causado por essa matriz, mesmo com a adição de coagulantes nas amostras.

Sugere-se para trabalhos futuros a análise de recuperação do fluxo, a caracterização do *fouling* formado e a identificação da melhor combinação da dosagem de coagulantes com os métodos físicos de aeração, retrolavagem e aeração + retrolavagem simultânea. Além disso, sugere-se melhores análises na água de manancial para investigar os compostos causadores de *fouling*.

De maneira geral, estes resultados indicam que o uso de coagulantes contribui para a mitigação do *fouling*, prolongando o decaimento do fluxo, reduzindo a necessidade de limpeza química e melhoria da filtração da água para abastecimento público.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHMED, Z. et al. *Application of natural coagulants for sustainable treatment of semi-aerobic landfill leachate*. *AIP Conference Proceedings*, v. 2267, 2020.
2. AL-MALACK, M. H. et al. *Crossflow microfiltration of electrocoagulated kaolin suspension: fouling mechanism*. *Journal of Membrane Science*, v. 243 p. 143–153, 2004.
3. APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2012.
4. ARISMENDI, W. A. et al. *Modified tannins and their application in wastewater treatment*. *Water Science and Technology*, v. 78, n. 5, p. 1115–1128, 2018.
5. CASTRO-MUÑOZ, R. *The strategy of nanomaterials in polymeric membranes for water treatment: Nanocomposite membranes*. *Tecnología y ciencias del agua*, v. 11, n. 1, p. 410-436, 2020.
6. CARTAXO, A. S. B. et al. *Contaminantes emergentes presentes em águas destinadas ao consumo humano: ocorrência, implicações e tecnologias de tratamento*. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 8, p. 61814-61827, 2020.
7. FIELD, R.W. et al. *Critical flux concept for microfiltration fouling*. *Journal of Membrane Science*, v. 100, p. 259-272, 1995.
8. GONÇALVES, A. J. et al. *Efeito da adição de sulfato de alumínio e polímero catiônico em biorreatores de membrana submersa de estágio único (SMBRs): remoção de ortofosfato e melhoria da filtrabilidade do lodo*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, p. 1–22, 2019.
9. KHOUNI, I. et al. *Efficiency of a coagulation/flocculation–membrane filtration hybrid process for the treatment of vegetable oil refinery wastewater for safe reuse and recovery*. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 135, p. 323-341, 2020.
10. IORHEMEN, O. T. et al. *Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Wastewater Treatment and Reclamation: Membrane Fouling*. *Membranes*, n.6, v. 33, 2016.
11. LY, Q. V. et al. *Insights into the roles of recently developed coagulants as pretreatment to remove effluent organic matter for membrane fouling mitigation*. *Journal of Membrane Science*, v. 564, p. 643-652, 2018.
12. MOURA, P. G. et al. *Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil*. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, p. 791-808, 2020.
13. NASCIMENTO, C. O. C. et al. *Combined application of coagulation/flocculation/sedimentation and membrane separation for the treatment of laundry wastewater*. *International Journal of Chemical Engineering*, v. 2019, 2019.
14. OKORO, B. U. et al. *Natural organic matter (NOM) and turbidity removal by plant-based coagulants: A review*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, issue 6, 2021.
15. PURKAIT, M. K.; SINGH, R. *Membrane Technology in Separation Science*. [s.l.] CRC Press, 2018.
16. RAGIO, R. A et al. *Assessment of natural tannin-based coagulant for effective ultrafiltration (UF) of UASB effluent: Fouling mechanisms, pollutant removal and water reclamation feasibility*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 11, issue 3, 2023.
17. VELA, M. C. V. *Analysis of membrane pore blocking models applied to the ultrafiltration of PEG*. *Separation and Purification Technology*, n. 62, p. 489–498, 2008.
18. ZHANG, D., et al. *Fate and behavior of dissolved organic matter in a submerged anoxic-aerobic membrane bioreactor (MBR)*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 2, p. 4289–4302, 2018.
19. WANG, J. et al. *The roles of particles in enhancing membrane filtration: A review*. *Journal of Membrane Science*, v. 595, 2020.



20. WANG, S. et al. *Fouling of microfiltration membranes by organic polymer coagulants and flocculants: Controlling factors and mechanisms*. *Water Research*, v. 45, issue 1, p. 357-365, 2011.