

## Influência da pressão e da vazão de concentrado no desempenho de ultrafiltração em pós-tratamento de esgoto

Apesar das inúmeras vantagens advindas do uso da tecnologia de membranas filtrantes, algumas limitações inerentes ao processo de incrustação tornam-se relevantes para sua aplicabilidade. O controle das condições operacionais consiste em importante ferramenta para mitigar o fouling e alcançar bons níveis de eficiência. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi investigar o efeito da pressão transmembrana e da vazão de concentrado no desempenho da ultrafiltração, aplicada ao pós-tratamento de esgoto sanitário. O processo foi avaliado e otimizado variando-se a pressão (0,5 e 1,5 bar) e a vazão de concentrado (300 e 600 L/h), por meio de um planejamento fatorial 2<sup>2</sup>, a fim de investigar os efeitos no fluxo permeado e na qualidade dos efluentes gerados, em cada condição operacional. Avaliaram-se os seguintes indicadores de qualidade para os permeados: pH, Condutividade Elétrica, Sólidos Suspensos Totais, Turbidez, Cálcio e Demanda Química de Oxigênio (DQO). Em todos os ensaios, observou-se diminuição acentuada do fluxo permeado nos instantes iniciais, seguida de uma queda lenta que se prolongou até atingir um patamar relativamente constante por volta dos 120 minutos de filtração. O aumento da pressão resultou em maior fluxo permeado inicial, porém com maior queda do fluxo com o tempo, evidenciando um processo de incrustação mais pronunciado. Por outro lado, o aumento da vazão de concentrado resultou em queda mais lenta de fluxo permeado com o tempo de filtração. Com relação a qualidade dos permeados, a pressão transmembrana de 0,5 bar foi a que permitiu melhores resultados, sendo confirmado estatisticamente, por meio do teste da ANOVA two-way com medidas repetidas, efeito significativo da pressão sobre a turbidez do permeado. A vazão de concentrado, por sua vez, não apresentou influência significativa sobre nenhum dos parâmetros de qualidade. Dessa forma, concluiu-se que, do ponto de vista econômico e ambiental, é mais interessante operar sistemas de membranas de ultrafiltração a uma menor vazão de concentrado associado a uma pressão transmembrana baixa, uma vez que sob estas condições haverá menor produção de rejeito e o permeado apresentará menores concentrações dos constituintes analisados, notadamente turbidez mais baixa.

**Palavras-chave:** Condições operacionais; Filtração tangencial; Fluxo permeado; Incrustação; Polarização por concentração.

## Influence of the pressure and concentrate flow in performance of ultrafiltration in post sewage treatment

Despite the innumerable advantages arising from the use of filter membrane technology, some limitations inherent to the incrustation process become relevant for its applicability. The control of operational conditions is an important tool to mitigate fouling and achieve good levels of efficiency. In this sense, the objective of this work was to investigate the effect of transmembrane pressure and the flow of concentrate on the performance of ultrafiltration, applied to the after-treatment of sanitary sewage. The process was evaluated and optimized by varying the pressure (0.5 and 1.5 bar) and the concentrate flow rate (300 and 600 L/h), through a factorial design 2<sup>2</sup>, in order to investigate the effects on the permeate flow and the quality of the effluents generated, in each operational condition. The following quality indicators for the permeate were evaluated: pH, Electrical Conductivity, Total Suspended Solids, Turbidity, Calcium and Chemical Oxygen Demand (COD). In all tests, there was a marked decrease in the permeate flow in the initial moments, followed by a slow drop that continued until reaching a relatively constant level around 120 minutes of filtration. The increase in pressure resulted in a higher initial permeate flow, but with a greater drop in flow over time, showing a more pronounced fouling process. On the other hand, the increase in the flow of concentrate resulted in a slower drop in permeate flow with the filtration time. Regarding the quality of the permeate, the transmembrane pressure of 0.5 bar was the one that allowed the best results, being confirmed statistically, through the two-way ANOVA test with repeated measures, a significant effect of the pressure on the permeate turbidity. The flow of concentrate, in turn, had no significant influence on any of the quality parameters. Thus, it was concluded that, from an economic and environmental point of view, it is more interesting to operate ultrafiltration membrane systems at a lower flow of concentrate associated with a low transmembrane pressure, since under these conditions there will be less production of waste and the permeate will have lower concentrations of the constituents analyzed, notably lower turbidity.


**Keywords:** Operating conditions; Tangential filtration; Permeate flow; Fouling; Polarization by concentration.

Topic: Engenharia Ambiental


Received: 01/12/2020


Approved: 23/12/2020


Reviewed anonymously in the process of blind peer.


Marcos André Capitulino de Barros Filho   
Universidade Federal do Maranhão, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/8824952610047891>  
<http://orcid.org/0000-0003-1827-8724>  
[marcosandrebarros@hotmail.com](mailto:marcosandrebarros@hotmail.com)

Cícero Onofre de Andrade Neto  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/9961536190401150>  
[cicero@ct.ufrn.br](mailto:cicero@ct.ufrn.br)

André Luis Calado Araújo   
Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/7133712883742750>  
<http://orcid.org/0000-0001-5050-992X>  
[andre.calado@ifrn.edu.br](mailto:andre.calado@ifrn.edu.br)

Hélio Rodrigues dos Santos   
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/9048384392428073>  
<http://orcid.org/0000-0002-3960-0316>  
[heliorodgs@gmail.com](mailto:heliorodgs@gmail.com)

Layane Priscila de Azevedo Silva   
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/1528610006304262>  
<http://orcid.org/0000-0001-6066-6814>  
[layane\\_azevedo@hotmail.com](mailto:layane_azevedo@hotmail.com)

Larissa Caroline Saraiva Ferreira   
Instituto Federal do Ceará, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/4939507824570944>  
<http://orcid.org/0000-0002-8379-850X>  
[lalinhasaraiva@hotmail.com](mailto:lalinhasaraiva@hotmail.com)



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2020.007.0030

### Referencing this:

BARROS FILHO, M. A. C.; ANDRADE NETO, C. O.; ARAÚJO, A. L. C.; SANTOS, H. R.; SILVA, L. P. A.; FERREIRA, L. C. S.. Influência da pressão e da vazão de concentrado no desempenho de ultrafiltração em pós-tratamento de esgoto. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.11, n.7, p.365-381, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.007.0030>

## INTRODUÇÃO

O atual cenário de degradação dos recursos hídricos põe em questão a confiabilidade dos sistemas convencionais de tratamento de água. Associado a isto, as previsões de escassez deste recurso têm gerado um grande interesse por tecnologias de tratamento de esgoto que atinjam padrões de qualidade compatíveis com o reúso.

Uma ampla variedade de tecnologias de tratamento avançado de esgoto tem sido desenvolvida com a finalidade de remover constituintes residuais encontrados em efluentes tratados. Nesse contexto, a utilização de processos de filtração com membranas tem se tornado cada vez mais evidente, devido às melhorias em sua forma e tecnologia, além da redução dos custos de sua implementação (CRISTOFOLI, 2016; MOTA, 2017). Maiores restrições impostas pelos padrões e regulamentos ambientais, em muitas partes do mundo, e o alto crescimento populacional, especialmente em áreas com escassez de água, irão impulsionar ainda mais o investimento em sistemas de tratamento de esgoto envolvendo membranas.

A associação da tecnologia de membranas com o tratamento biológico de águas residuárias tem sido alvo de grande interesse em pesquisas de pós-tratamento de esgoto, haja vista as inúmeras vantagens advindas dessa combinação, que consiste em técnica de depuração de efluentes com viabilidade econômica já comprovada em escala real de tratamento (LUCA et al., 2003; ERSAHIN et al., 2012; BARBOSA 2017).

Apesar das vantagens, algumas limitações inerentes ao processo de incrustação (*fouling*) das membranas tornam-se relevantes para sua aplicação. A incrustação é uma grande preocupação para os sistemas de filtração com membranas, uma vez que conduz à redução do fluxo permeado, ao aumento de demanda por energia e à diminuição da vida útil da membrana.

Apesar do número de estudos relacionados ao controle da incrustação em membranas ser muito grande, o *fouling* ainda constitui um problema relevante. O domínio das condições operacionais em processos de filtração com membranas, com vistas ao controle da incrustação, consiste em importante ferramenta para se alcançar bons níveis de eficiência e viabilizar a produção de efluentes capazes de atender a padrões restritos de emissão e diversas modalidades de reúso. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi investigar o efeito da pressão e da vazão de concentrado no desempenho de membrana de ultrafiltração, aplicada ao pós-tratamento de esgoto sanitário, por meio de testes sob diferentes condições operacionais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Sistema Experimental

O estudo foi desenvolvido em um equipamento de membrana de ultrafiltração, fabricado pela PAM Membranas Seletivas Ltda., instalado no laboratório da Estação Experimental de Tratamento de Esgoto, localizada no campus central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O esgoto afluente a essa unidade de tratamento experimental possuía características essencialmente domésticas.

O esgoto utilizado para alimentar a membrana de UF era proveniente de uma unidade de tratamento composta de filtro anaeróbio precedido por decanto digestor com duas câmaras em série. Na época da

realização do experimento, a unidade de tratamento estava operando com baixa eficiência em virtude de problemas técnicos. O sistema piloto de ultrafiltração era constituído de bomba centrífuga, membrana de ultrafiltração, painel hidráulico com rotâmetros e manômetros para o controle da vazão e pressão, respectivamente, e tanques de armazenamento da alimentação e do permeado, conforme esquematizado na Figura 1.

O funcionamento do sistema ocorria de forma que o esgoto proveniente da ETE experimental era bombeado continuamente, durante a realização de cada ensaio, para o tanque de alimentação do equipamento de membrana. Quando acionado, a alimentação em contato com a membrana era separada em duas correntes: concentrado, o qual era descartado, e permeado que era direcionado para o tanque de armazenamento deste fluxo.

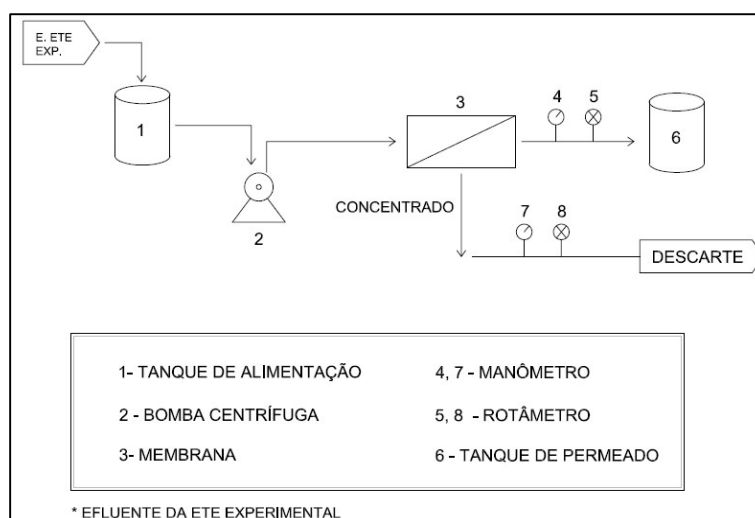


Figura 1: Digrma esquemático simplificado do sistema experimental de ultrafiltração.

### Delineamento Experimental

O experimento foi constituído de quatro tratamentos, cada um composto por 2 fatores: pressão e vazão de concentrado. Foram realizadas três réplicas para cada tratamento, totalizando 12 ensaios. A otimização do processo foi feita por meio de um planejamento fatorial  $2^2$ , cujas variáveis independentes foram a pressão transmembrana e vazão de concentrado. A Tabela 1 apresenta a matriz do planejamento experimental com os valores de pressão e vazão de concentrado aplicados no experimento.

Na presente pesquisa, a vazão de concentrado foi utilizada como parâmetro indicador da velocidade tangencial, haja vista que, de acordo com Ahmad et al. (2005), a velocidade tangencial pode ser determinada a partir do fluxo de concentrado, o qual está diretamente ligado a vazão dessa corrente.

Tabela 1: Planejamento experimental para os ensaios realizados.

Número do Ensaio	Pressão (bar)	Vazão de Concentrado (L/h)
1	0,5	300
2	0,5	600
3	1,5	300
4	1,5	600

De maneira a facilitar a representação das variáveis categóricas em cada tratamento, adotou-se a

seguinte legenda: pressão 0,5 bar, representa a pressão baixa ( $P_b$ ); pressão 1,5 bar, representa a pressão alta ( $P_a$ ); vazão de 300 L/h, representa a vazão baixa ( $V_b$ ); e a vazão de 600 L/h, representa a vazão alta ( $V_a$ ).

As condições operacionais foram determinadas experimentalmente, baseadas em ensaios preliminares, respeitando os valores máximos de pressão e vazão de concentrado suportados pelo sistema. Cada ensaio teve duração de 120 minutos, de forma que a cada 30 minutos era feito a coleta do permeado, para análise de qualidade desta corrente e aferição de fluxo permeado.

O tempo de duração de cada ensaio foi determinado experimentalmente por meio da simulação de cada condição operacional. Em todas as simulações constatou-se que entre 90 e 120 minutos de operação, o fluxo permeado tornava-se constante, caracterizando o estabelecimento da camada de incrustação e indicando, portanto, fim da carreira de filtração.

Para a caracterização qualitativa das correntes de permeado geradas no experimento, bem como da alimentação da membrana, foram definidos os indicadores apresentados na Tabela 2, cujos métodos analíticos seguiram o determinado por APHA et al. (2005).

Embora membranas de UF não removam constituintes a nível iônico, ensaios preliminares realizados com a membrana em questão demonstraram existir remoção do íon cálcio. Por este motivo, optou-se por incluir este elemento na caracterização qualitativa das correntes de permeado geradas e do esgoto que alimentou a membrana.

**Tabela 2:** Indicadores físico-químicos e seus respectivos métodos analíticos

INDICADORES	MÉTODO ANALÍTICO
pH	Potenciométrico
Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Potenciométrico
Turbidez (NTU)	Nefelométrico
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	Gravimétrico – filtração a vácuo e secagem a 103°C a 105°C
Cálcio (mg/L)	Titulométrico – EDTA
Demanda Química de Oxigênio (mg/L)	Refluxação fechada

Neste estudo, como foram avaliadas diferentes condições operacionais, fez-se necessário a padronização dos tratamentos que compõem o experimento para que se estabelecesse as mesmas condições em cada ensaio. Sendo assim, após o teste de cada condição operacional foi realizada a limpeza física, por meio da retrolavagem, e a limpeza química da membrana, com uso do hipoclorito, visando eliminar interferências acarretadas pelas permeações.

### Tratamento Estatístico dos Dados

Em uma primeira abordagem foi realizada uma análise exploratória dos resultados, por meio da construção de gráficos de barras para cada variável dependente e considerando cada um dos tratamentos, dentro de uma análise temporal. Para esta primeira parte, foi utilizado o software GraphPad Prism.

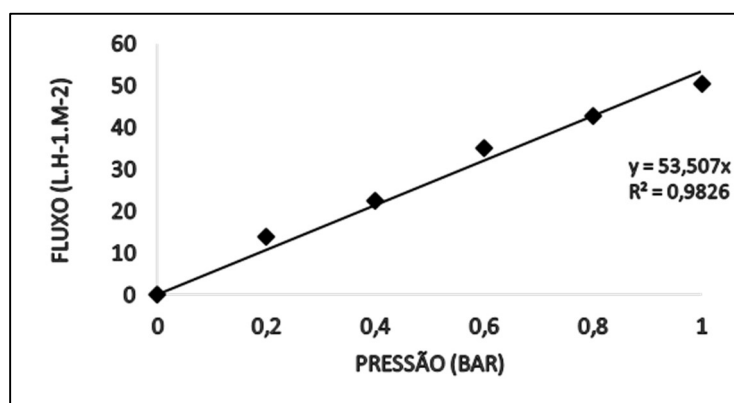
Para investigar se houve diferença significativa entre as médias dos indicadores de qualidade, considerando cada tratamento, de forma a se investigar a influência das variáveis categóricas (pressão e vazão), bem como demonstrar se houve interação entre elas, utilizou-se o método da ANOVA *two-way* com

medidas repetidas. Nesse teste, os diferentes níveis foram representados pelo fator tempo e, assim, foi possível estabelecer a influência da vazão, da pressão, da interação entre vazão e pressão, do tempo e da interação entre pressão, vazão e tempo. Esta ordenação foi realizada com auxílio do software STATISTICA 7.0.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização da membrana de ultrafiltração e do esgoto afluente

A membrana de UF foi caracterizada inicialmente por meio da permeabilidade hidráulica, a qual foi determinada variando-se a pressão do sistema e medindo-se o fluxo permeado correspondente a cada valor de pressão. Com esses valores, foi plotado um gráfico do fluxo em função da pressão, conforme a Figura 2. O coeficiente angular da reta encontrada descreve a permeabilidade hidráulica da membrana, expresso em  $L.h^{-1}.m^{-2}$ .



**Figura 2:** Permeabilidade hidráulica da membrana de ultrafiltração ( $53,507 L.h^{-1}.m^{-2}$ .) antes do início do experimento.

A Tabela 3 apresenta a caracterização do esgoto utilizado no experimento, com base nos resultados médios dos seguintes parâmetros: pH, Condutividade ( $\mu S/cm^2$ ), Turbidez (NTU), Sólidos Suspensos Totais – SST (mg/L), Cálcio (mg/L) e Demanda Química de Oxigênio – DQO (mg/L). Esses dados foram obtidos pela caracterização de todos os 12 experimentos realizados.

**Tabela 3:** Média dos indicadores de qualidade para o esgoto utilizado como afluente da membrana de ultrafiltração.

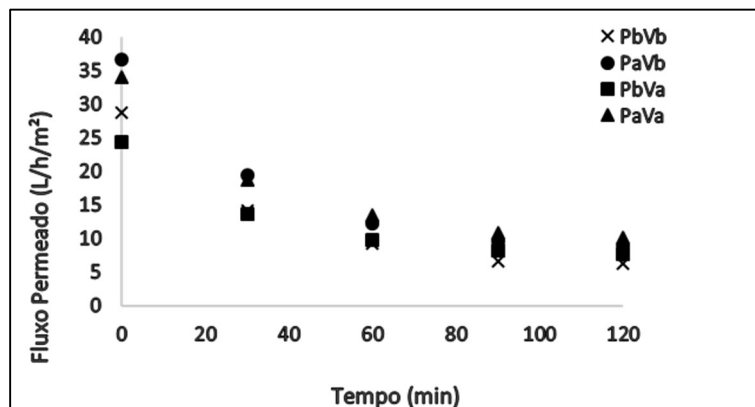
pH	Turbidez (NTU)	Condutividade ( $\mu S/cm^2$ )	SST (mg/L)	Cálcio (mg/L)	DQO (mg/L)
7,09	52,28	978,00	32,30	20,42	109,51

### Fluxo permeado

Em todos os ensaios observou-se que o fluxo permeado diminuiu com o tempo de filtração, até atingir um patamar onde permaneceu estabilizado, após 120 minutos de filtração, o qual para todos os ensaios realizados, representou em torno de 20% a 30% do fluxo inicial.

De maneira geral, percebeu-se que o fluxo permeado inicial foi maior para os tratamentos com valores de pressão mais elevado. Observou-se também que, para um mesmo valor de pressão transmembrana, o fluxo permeado, no fim da carreira de filtração, mostrou-se maior para os tratamentos realizados a vazão de concentrado elevada. A Figura 3 mostra o perfil do declínio do fluxo permeado com o

tempo para cada tratamento. Os pontos representam a média aritmética das réplicas para cada condição operacional.



**Figura 3:** Declínio de fluxo permeado com o tempo de filtração para os quatro tipos de tratamento (P<sub>b</sub>V<sub>b</sub> – Pressão baixa + Vazão baixa; P<sub>b</sub>V<sub>a</sub> – Pressão baixa + Vazão alta; P<sub>a</sub>V<sub>b</sub> – Pressão alta + Vazão baixa; P<sub>a</sub>V<sub>a</sub> – Pressão alta + Vazão alta).

Brião (2007) avaliou processos de separação por membranas para reúso de efluentes de laticínios e, de maneira semelhante, encontrou fluxo permeado estabilizado após decorridos 120 minutos de filtração. O declínio do fluxo com o tempo foi similar ao observado por Lin et al. (2004), no estudo em que os autores avaliaram o efeito dos parâmetros operacionais no declínio do fluxo permeado causado pelo *fouling*.

Huang et al. (2014) estudaram o efeito da concentração da alimentação e da pressão transmembrana no processo de incrustação de membrana de UF, e diagnosticaram, de forma semelhante, que o fluxo permeado aumentava para maiores valores de pressão, bem como a queda brusca de fluxo ocorria durante os estágios iniciais, tendendo a um valor de fluxo constante com o passar do tempo. Apresentaram ainda curvas simbolizando a incrustação para diferentes valores de pressão. Os resultados mostraram que com o aumento do tempo de filtração, maiores valores de pressão implicaram em camadas de incrustação mais espessas.

Tal fato é mostrado na Figura 3, na qual se percebe que embora o fluxo inicial, para os tratamentos com maior valor de pressão (P<sub>a</sub>), tenha sido maior, o fluxo final apresentou valores próximos para todos os tratamentos, evidenciando que o declínio do fluxo com o tempo de filtração foi maior para os ensaios nos quais foram aplicados maiores valores de pressão transmembrana. Isso é facilmente explicado pelo fato de maiores valores de pressão implicarem em maior volume de esgoto permeado, resultando em uma camada incrustante mais espessa.

Segundo Poter (1990), uma operação a elevada pressão, por aumentar o fluxo permeado, aumenta o aporte de soluto em direção à superfície da membrana, o que resulta numa queda mais rápida do fluxo permeado devido a intensificação do fenômeno da polarização de contração.

Resultados semelhantes foram encontrados por Ahmad et al. (2005a), que utilizaram duas membranas de UF para investigar a influência da pressão transmembrana e da velocidade de escoamento no desempenho do tratamento de efluente de fábrica de óleo. Para ambas as membranas foi verificado que o fluxo permeado diminuiu com o tempo de filtração até alcançar valores constantes, os quais foram alcançados quando a camada de incrustação foi desenvolvida. Observaram ainda que os valores de fluxo

constante foram maiores para condições de operação com maiores valores de velocidade de escoamento.

Sablani et al. (2001) realizaram uma revisão crítica acerca da polarização de concentração em membranas de UF e OI. De acordo com os autores, a primeira razão para o declínio do fluxo durante os estágios iniciais de um processo de separação por membranas é a polarização de concentração. Posteriormente, a queda mais lenta do fluxo ocorre devido ao *fouling*.

No caso em questão, podemos dizer que a queda brusca do fluxo permeado nos primeiros trinta minutos de filtração, em cada tratamento, deve-se, predominantemente, ao fenômeno da polarização de concentração, enquanto a queda mais lenta, observada de 30 a 120 min, deve-se ao *fouling* químico e biológico. Conforme pode ser observado na Figura 3, a resistência a filtração aumentou com o tempo de operação e alcançou seu máximo quando o fluxo estabilizado foi atingido.

Quanto à influência da vazão de concentrado, foi possível constatar que, embora inicialmente o fluxo permeado tenha sido maior para os tratamentos com maior pressão, a partir do instante 60 min, verificou-se uma mudança no padrão de declínio do fluxo permeado, de forma que, para um mesmo valor de pressão, os tratamentos operados à vazões de concentrado mais elevadas, passaram a apresentar fluxo permeado ligeiramente maior do que aqueles com vazão de concentrado menor, os quais, no início do processo de filtração, exibiam fluxo permeado maior.

Seidel et al. (2002) encontraram resultados semelhantes em seus trabalhos e explicaram que o aumento da velocidade de escoamento implica em aumento das taxas de cisalhamento que mitigam o efeito da incrustação sobre a membrana. Hamachi et al. (2002) também observaram isto no estudo que desenvolveram acerca da relação entre o fluxo permeado e a velocidade de escoamento. Eles observaram que para o maior valor de velocidade de escoamento testado, 88% da massa transportada por convecção para a superfície da membrana foi varrida pelo fluxo tangencial.

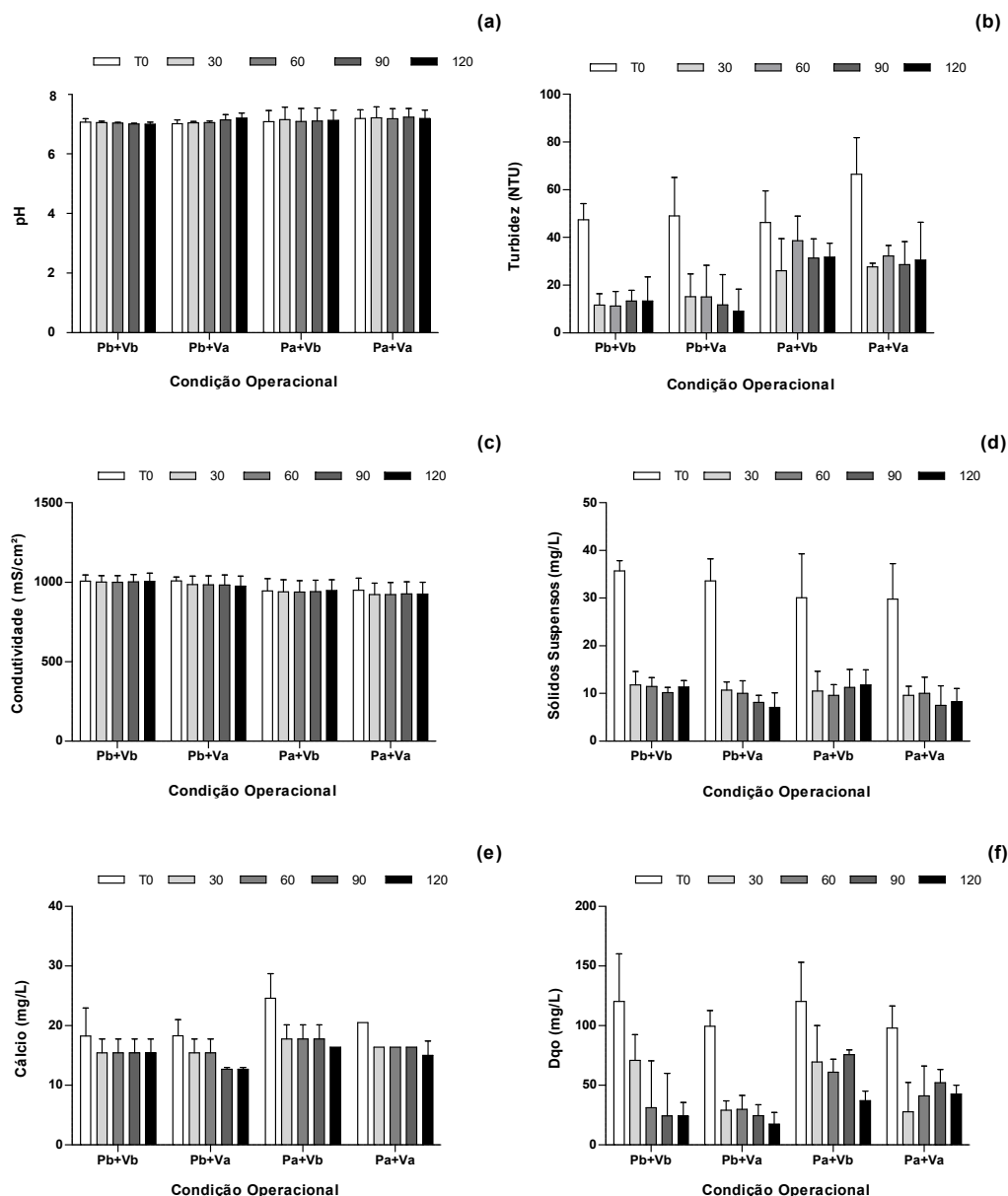
Os princípios da filtração tangencial são baseados na premissa de que a velocidade de escoamento controla a polarização de concentração e, portanto, contribui para que haja uma queda menos pronunciada do fluxo permeado com o tempo de filtração. Logo, ficou evidente que maiores vazões da corrente de concentrado implicaram em menores resistências da polarização de concentração e do *fouling*, resultando em uma queda menos pronunciada do fluxo permeado com o tempo de filtração.

### **Influência da pressão transmembrana e da vazão de concentrado na qualidade do permeado**

A Figura 4 mostra os gráficos de barras que apresentam a variação temporal das concentrações médias de cada indicador de qualidade, para cada um dos tratamentos testados. Os tratamentos estão representados no eixo horizontal, enquanto que as barras representam as concentrações dos respectivos indicadores do esgoto que alimentou a membrana (T0) e dos permeados gerados, durante os 120 minutos de filtração, a cada 30 minutos de operação (T30, T60, T90 e T120).

De maneira geral, fica evidente que, para nenhum dos indicadores de qualidade, houve variação temporal na concentração, já que houve sobreposição dos intervalos de confiança para os permeados gerados em cada condição operacional. Percebe-se diferença evidente entre a qualidade do esgoto afluente

à membrana e os permeados gerados em cada tratamento.



**Figura 4:** Gráficos dos valores médios para cada indicador de qualidade do permeado, sendo PbVb – Pressão baixa + Vazão baixa; PbVa – Pressão baixa + Vazão alta; PaVb – Pressão alta + Vazão baixa; PaVa – Pressão alta + Vazão alta. O gradiente de cor representa os tempos de coleta, em que: T0 representa as condições do esgoto afluente à membrana e os demais, os intervalos de tempo, em minutos, entre as coletas dos permeados gerados. As barras representam o intervalo de confiança (95%) dos valores amostrados.

Embora tenha sido observada tendência de diminuição da concentração de indicadores, em alguns ensaios, com o decorrer do tempo de filtração como, por exemplo, para sólidos suspensos, cálcio e DQO, a diferença no gradiente temporal para os tratamentos não foi confirmada estatisticamente. A Tabela 4 apresenta os valores de ‘p’ para as variáveis pressão e vazão, bem como para a interação entre elas, além da interação tempo, pressão e vazão, em relação a todos os indicadores de qualidade analisados para o permeado.

Os parâmetros pH e condutividade elétrica não apresentaram variação entre o esgoto que alimentou a membrana e os permeados gerados em cada tempo, conforme pode ser visto na Figura 4 (a) e (c), respectivamente. De fato, isso era esperado haja vista que a membrana de UF não remove constituintes a



nível iônico. Esta observação é muito comum em trabalhos envolvendo membranas de UF, pois como o tamanho dos íons é bem menor do que o poro da membrana a passagem destes é facilitada.

**Tabela 4:** Significância (valor p) do efeito da pressão (P), vazão de concentrado (V), da interação de ambas (P x V) e da interação tempo, pressão e vazão (T x P x V) nos indicadores de qualidade nos ensaios de ultrafiltração realizados.

	pH	Condutividade	SST	Turbidez	Cálcio	DQO
P	0,540	0,144	0,853	0,003	0,062	0,079
V	0,582	0,615	0,196	0,831	0,168	0,133
P x V	0,994	0,962	0,930	0,775	0,987	0,707
T x P x V	0,188	0,917	0,341	0,691	0,206	0,280

De maneira semelhante, observou-se pouca ou nenhuma variação na concentração do cálcio com o tempo de filtração, sendo notada diminuição no teor deste elemento no permeado a partir dos noventa minutos de operação para o tratamento P<sub>b</sub>V<sub>a</sub> (Figura 4 (e)). Acredita-se, que a maior vazão associada a baixa pressão de operação possibilitou o arraste do íon cálcio, preso a camada de *fouling* na superfície da membrana, para a corrente de concentrado, diminuindo sua concentração no permeado. Nesse caso, noventa minutos foi o tempo necessário para formação de uma camada incrustante capaz de desempenhar papel de barreira secundária à passagem deste elemento.

Para a turbidez (Figura 4 (b)), observou-se que as concentrações nas diferentes condições testadas exibiram comportamento com variações aleatórias, não sendo possível, portanto, estabelecer um padrão para a condição temporal em cada tratamento.

Com relação aos sólidos suspensos (Figura 4 (d)), percebeu-se que a remoção deste indicador pela membrana de UF em todos os tratamentos mostrou-se bem similar com o decorrer do tempo de filtração, de forma que os permeados gerados em todos os tratamentos apresentaram, em média, concentrações na ordem de 10 mg/L. Comparando-se os tratamentos, em relação a vazão de concentrado, percebe-se que os ensaios realizados a alta vazão apresentaram uma tendência de diminuição da concentração de sólidos suspensos com o decorrer do tempo de filtração, quando comparado aqueles realizados a baixa vazão. No entanto, essa influência da vazão não foi confirmada estatisticamente, conforme evidenciado pelo valor de 'p' para interação tempo, vazão e pressão (Tabela 4).

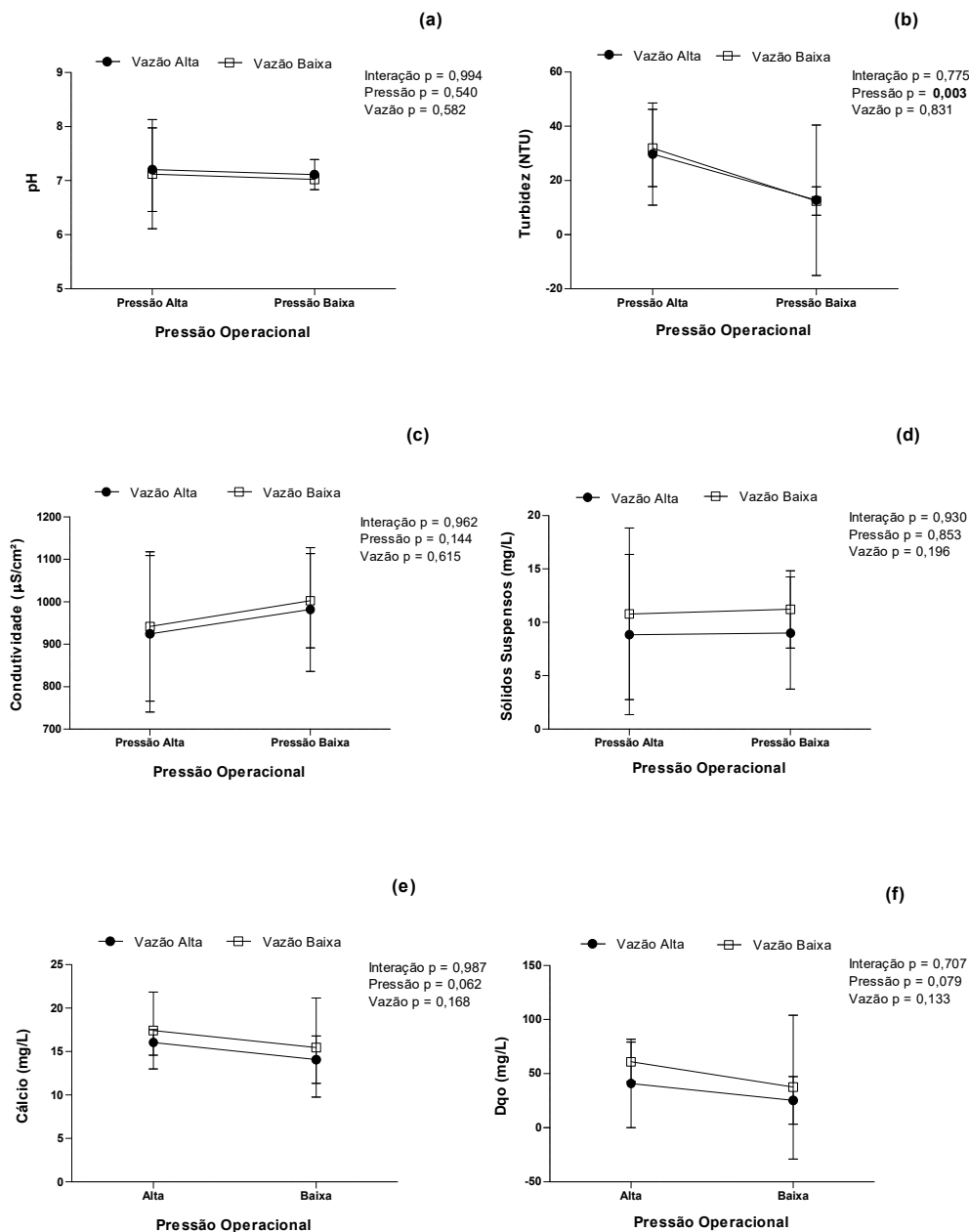
A concentração de DQO nos permeados gerados, em todos os tratamentos, foi bem menor do que no esgoto que alimentou a membrana (Figura 4 (f)). Significando dizer, portanto, que a membrana apresentou uma remoção consideravelmente boa para este parâmetro. Quanto a variação temporal, percebeu-se que as concentrações, nas diferentes condições testadas, exibiram comportamento com variações aleatórias, sendo possível perceber variação decrescente da concentração de DQO com o tempo, para os tratamentos realizados a baixa pressão.

Afim de avaliar se houve interação entre as variáveis categóricas pressão transmembrana e vazão de concentrado, foi realizado o teste da ANOVA *two-way* com medidas repetidas. Nesse teste, os diferentes níveis foram representados pelo fator tempo e, assim, foi possível estabelecer a influência da vazão, da pressão, da interação entre pressão e vazão e da interação entre tempo, pressão e vazão.

Os gráficos da Figura 5 exibem a influência de cada variável categórica, bem como da interação entre

elas, para cada indicador de qualidade do permeado. Conforme detalhado na metodologia, existem dois fatores: pressão e vazão, e cada um desses fatores possui dois níveis: alto e baixo. O eixo horizontal de cada gráfico representa o fator pressão operacional, e os pontos o fator vazão de concentrado.

De maneira geral, percebe-se que a pressão transmembrana não interagiu de forma significativa com a vazão de concentrado em nenhum dos tratamentos, haja vista que os valores de 'p' encontrados para a interação P x V foram maiores que 0,05.



**Figura 5:** Gráficos da ANOVA *two-way* para cada um dos indicadores de qualidade do permeado. As barras representam o intervalo de confiança (95%) dos valores amostrados. Os valores de p são mostrados para os efeitos isolados de pressão e vazão e sua interação. O Valor significativo ( $p < 0,05$ ) está em negrito.

A Figura 5 (a) e (c) representa o resultado da ANOVA para a variável pH e condutividade, respectivamente. Fica evidente que não houve interação entre os fatores vazão e pressão, nem tampouco efeito da pressão e da vazão, de forma isolada, no valor de pH e condutividade. Podemos dizer, portanto, que não houve diferença significativa no valor do pH e da condutividade elétrica entre os tratamentos com

os diferentes valores de pressão e vazão. Este resultado era esperado, pois, conforme discutido anteriormente, a membrana de UF não remove constituintes em nível iônico.

O resultado da ANOVA para a variável turbidez, não mostrou interação entre os fatores pressão e vazão ( $p = 0,775$ ), nem efeito da vazão ( $p = 0,831$ ). Isto é, não houve diferença entre a média dos valores de turbidez para os tratamentos, considerando os diferentes valores de vazão testados. Isso fica evidente pelo fato das barras, que representam o intervalo de confiança, terem ficado sobrepostas em ambas as situações. Podemos, então, afirmar que a concentração de turbidez no permeado independe da operação com vazão de concentrado alta ou baixa, para as condições testadas.

Como pode ser visto na Figura 5 (b), os tratamentos realizados a pressão alta apresentaram valor médio de turbidez maior do que aqueles realizados a baixa pressão. Essa diferença foi comprovada estatisticamente, como pode ser visto na Tabela 6, em que o valor de 'p' foi de 0,003. Dessa forma, podemos dizer que a pressão influenciou de forma significativa na remoção de turbidez do esgoto, de forma que tratamentos a baixa pressão produziram permeados com menor turbidez.

Em relação à concentração de SST no permeado, constatou-se que não houve interação entre os fatores vazão e pressão ( $p = 0,930$ ), nem efeito da pressão ( $p = 0,853$ ) e da vazão ( $p = 0,196$ ) de forma isolada. Embora o efeito da vazão não tenha sido confirmado do ponto de vista estatístico, pela (Figura 15 (d)) percebe-se que os ensaios realizados a vazão baixa exibiram concentração de SST ligeiramente maiores do que aqueles operados a vazão alta. Isso, confirma o fato de maiores velocidades de escoamento promoverem o arraste destas partículas para a corrente de concentrado.

Ahmad et al. (2005a), investigando a influência da pressão transmembrana e da velocidade de escoamento no desempenho de membranas de UF no tratamento de efluente de fábrica de óleo, encontraram resultado semelhante, de forma que tanto a pressão quanto a velocidade de escoamento não apresentaram qualquer influência sobre a rejeição de SST.

A Figura 5 (e) deixa evidente que a remoção de cálcio pela membrana de UF em todos os tratamentos mostrou-se bem similar, de forma que não foi observada interação entre os fatores vazão e pressão ( $p = 0,987$ ) nem efeito da vazão ( $p = 0,168$ ) e da pressão ( $p = 0,062$ ) sobre a concentração de cálcio na corrente de permeado. Como se trata de uma membrana que não remove constituintes a nível iônico, a diminuição na concentração do íon cálcio deveu-se à camada de incrustação formada durante o tempo de operação.

Embora o valor de 'p' referente a influência da pressão tenha sido baixo, a diferença observada entre a concentração de cálcio nos permeados gerados nas diferentes condições de pressão é facilmente compreendida com auxílio da Figura 4 (e). A análise dessa figura nos mostra que, as concentrações ligeiramente maiores de cálcio observadas nos tratamentos realizados a pressão alta é decorrente das concentrações dos esgotos afluentes nesses tratamentos terem apresentado concentrações igualmente maiores deste indicador, quando comparadas com os ensaios realizados a baixa pressão.

Em geral, os tratamentos realizados a pressão alta apresentaram maiores concentrações de DQO, ou seja, uma concentração maior de matéria orgânica foi capaz de permear a membrana, conforme pode ser visto na Figura 4 (f). No entanto, tal diferença não foi comprovada estatisticamente, nem mesmo foi

evidenciado efeito significativo da vazão de concentrado na remoção de DQO, conforme valores de “p” listados na Tabela 6.

O fato de a vazão de concentrado não ter influenciado significativamente as concentrações médias dos indicadores de qualidade do esgoto em nenhum dos tratamentos é evidenciado pela sobreposição dos intervalos de confiança nas diferentes condições de vazão testadas.

Experimentos desenvolvidos por Brião et al. (2012) avaliaram o efeito da pressão e da velocidade tangencial na ultrafiltração de efluente da indústria de laticínios. Os níveis de velocidade tangencial testados no estudo, com membranas do tipo espiral, também não exerceram efeito sobre os constituintes analisados no permeado. Os resultados mostraram que o aumento de velocidade tangencial não conduziu a menores concentrações de DQO e cálcio no permeado.

Lima et al. (2008) avaliaram o emprego de membranas de UF com diferentes diâmetros de corte, por meio de diferentes condições de pressão transmembrana e de temperatura, na recuperação da solução de soda cáustica empregada no tratamento do couro bovino para a produção de gelatina. Os resultados mostraram que, para todas as membranas, a concentração de DQO e de SST, nas diferentes condições testadas, seguiram um comportamento com variações não significativas e aleatórias. No entanto, diferentemente do resultado encontrado nesta pesquisa, foi observado um aumento da redução de DQO com o aumento da pressão de operação. Por outro lado, tal como ficou evidente nos resultados aqui apresentados, a concentração de SST foi bem similar em todos os ensaios, não sendo verificado nenhum tipo de efeito da pressão ou da velocidade de escoamento na remoção deste constituinte.

### **Rejeição dos constituintes pela membrana**

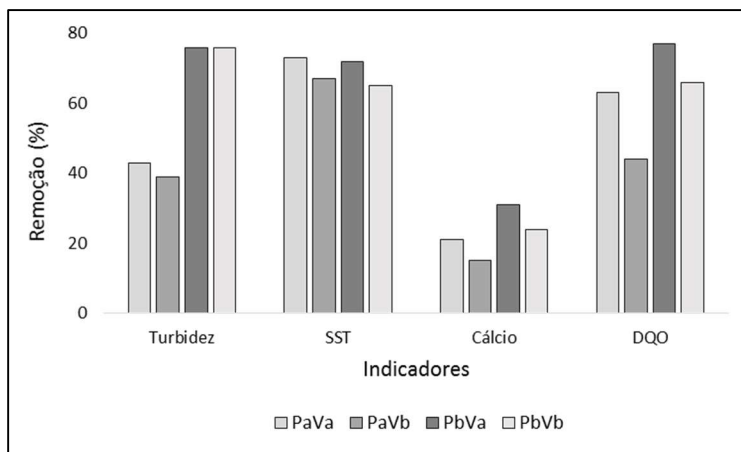
Conforme discutido anteriormente, a membrana de UF é capaz de remover quase a totalidade de sólidos, turbidez e microrganismos, como bactérias e vírus, presentes na alimentação. Inúmeros trabalhos realizados com membranas de UF comprovam sua eficiência na remoção destes constituintes (AHMAD et al., 2005b; WU et al., 2007; ZULAIKHA et al., 2014). No entanto, as taxas de remoção encontradas na presente pesquisa, para os indicadores supramencionados, foram aquém do esperado. Destaque-se, que as baixas taxas de remoção, principalmente, de SST e turbidez, foram recorrentes na triplicata de ensaios, o que diminui a possibilidade de erro na análise.

Muito embora a eficiência da membrana de UF utilizada neste estudo tenha sido baixa, isso não invalida os resultados obtidos, pois além de apresentarem caráter comparativo, percebeu-se que a membrana respondeu às diferentes condições de operação testadas, bem como foi possível manter constantes os valores de pressão e vazão de concentrado em todos os ensaios realizados.

Como pode ser visto na Figura 6, a taxa máxima de remoção encontrada nos tratamentos para a turbidez foi de, aproximadamente, 80%. Os tratamentos executados à pressão alta apresentaram remoções baixíssimas, da ordem de 40%. Por outro lado, os ensaios realizados a pressão baixa exibiram praticamente o dobro da remoção (76%). Embora tenha sido encontrada taxa de remoção de quase 80% de turbidez, esse resultado apresenta-se em desacordo com aquele encontrado na literatura para o sistema de UF, nos quais

o permeado apresenta turbidez próxima de zero, a exemplo do trabalho desenvolvido por Silva (2014), que utilizou o mesmo sistema de UF operado em condições semelhantes.

As taxas de remoção de SST atingiram, em média, 70%. Através da Figura 6, observa-se que os tratamentos a alta vazão exibiram remoção de SST ligeiramente maior do que os demais. Confrontando esse resultado com a literatura, fica evidente que está em desacordo, haja vista que a remoção de SST para um sistema de UF gira em torno de 97-99,9%.



**Figura 6:** Remoção dos indicadores Turbidez, SST (Sólidos Suspensos Totais), Cálcio, e DQO (Demanda Química de Oxigênio) pela membrana de ultrafiltração para os quatro tipos de tratamento (P<sub>b</sub>V<sub>b</sub> – Pressão baixa + Vazão baixa; P<sub>b</sub>V<sub>a</sub> – Pressão baixa + Vazão alta; P<sub>a</sub>V<sub>b</sub> – Pressão alta + Vazão baixa; P<sub>a</sub>V<sub>a</sub> – Pressão alta + Vazão alta).

A remoção do cálcio foi máxima para o ensaio P<sub>b</sub>V<sub>a</sub> (31%), e mínima para o tratamento P<sub>a</sub>V<sub>b</sub> (15%). De fato, era esperado que a remoção do cálcio fosse baixa no experimento, visto que a faixa de retenção da membrana de UF não abrange a rejeição desse componente. A remoção encontrada para este íon, deveu-se, possivelmente, a camada de incrustação formada durante a filtração, a qual atuou como barreira secundária à passagem de constituintes pela membrana. Brião et al. (2012) utilizaram membranas de UF do tipo tubular e espiral em seus experimentos, e os resultados mostraram taxa de remoção de cálcio semelhante para a membrana espiral (33,71%), e rejeição superior nos ensaios envolvendo a membrana tubular (51,45%), ambas operadas em condições de pressão e velocidade tangencial otimizadas na filtração de efluente da indústria de laticínios.

A concentração de DQO no esgoto afluente à membrana foi de, aproximadamente, 110 mg/L (Tabela 3). A remoção de DQO foi, em média, de 70% para todos os tratamentos, exceto para o ensaio realizado a alta pressão e vazão baixa (P<sub>a</sub>V<sub>b</sub>), no qual a remoção de DQO foi de 44%, conforme pode ser visto na Figura 6. O tratamento P<sub>b</sub>V<sub>a</sub> resultou na remoção mais eficiente para o constituinte em questão (77%). Taxas de remoção semelhantes para DQO em sistema de UF, foram encontradas por Lima et al. (2008).

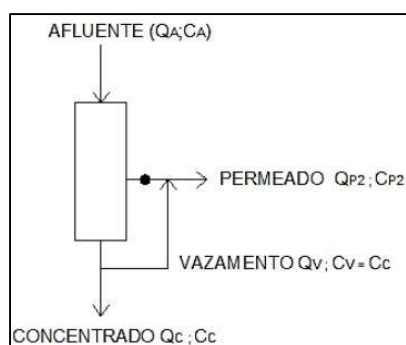
No geral, pode-se dizer que o tratamento realizado a baixa pressão e vazão alta (P<sub>b</sub>V<sub>a</sub>) exibiu melhores taxas de remoção para todos os indicadores analisados. No entanto, apenas para a remoção de turbidez a pressão exerceu influência significativa. Para os demais parâmetros, não foi confirmado estatisticamente influência das condições operacionais testadas.

## Balanco de massa considerando que houve falha na vedação das extremidades da membrana

Dada a impossibilidade de realizar a autópsia da membrana utilizada na pesquisa para investigar que tipo de problema resultou nas baixas taxas de remoção dos constituintes analisados, visto que não se dispunha de laboratório específico para este fim, optou-se por realizar um balanço de massa com base nos dados obtidos no experimento.

Supondo que a falha na membrana foi decorrente de problemas de vedação na resina presente em suas extremidades, pode-se dizer que houve escape de parte do concentrado dentro da membrana, culminando em sua mistura com o permeado.

Considerando que o esgoto afluente à membrana possuía uma vazão ' $Q_a$ ' e concentração ' $C_a$ ', após o processo de filtração teríamos um concentrado com vazão ' $Q_c$ ' e concentração ' $C_c$ ', e para o permeado poderíamos considerar duas situações distintas: uma antes da mistura com o concentrado, na qual o permeado apresentaria uma vazão ' $Q_{p1}$ ' e concentração ' $C_{p1}$ ' e outra após decorrida a mistura com o concentrado, na qual o permeado apresentaria vazão ' $Q_{p2}$ ' e concentração ' $C_{p2}$ '. Suponhamos, ainda, que o concentrado que escapou apresentava uma vazão ' $Q_v$ ' e concentração ' $C_c$ '. A Figura 7 apresenta um esquema que ilustra a situação descrita.



LEGENDA	
●	Permeado antes da mistura com o concentrado (vazão: $Q_{p1}$ ; concentração $C_{p1}$ )
$Q_a$	Vazão do esgoto afluente à membrana
$C_a$	Concentração do esgoto afluente à membrana
$Q_c$	Vazão da corrente de concentrado
$C_c$	Concentração da corrente de concentrado
$Q_{p2}$	Vazão da corrente de permeado
$C_{p2}$	Concentração da corrente de permeado
$Q_v$	Vazão da corrente de concentrado que escapou
$C_v$	Concentração da corrente de concentrado que escapou

**Figura 7:** Esquema ilustrativo do processo de filtração considerando a existência de falha na resina presente nas extremidades da membrana.

Para estimar o percentual de concentrado na corrente de permeado faz-se necessário descobrir a relação entre a vazão do concentrado que escapou ( $Q_v$ ) e a vazão do permeado após sua mistura com o concentrado ( $Q_{p2}$ ). Aplicando-se o princípio da conservação da massa, teremos a seguinte situação:

$$Q_{p2} * C_{p2} = Q_{p1} * C_{p1} + Q_v * C_c \quad (\text{Equação 1})$$

O balanço de massa foi realizado considerando os dados obtidos de sólidos suspensos totais e turbidez. Uma membrana de UF normalmente apresenta taxas de remoção destes indicadores de, aproximadamente, 100%, assim podemos dizer que  $C_{p1} = 0$ , logo teremos que:

$$Q_{p2} * C_{p2} = Q_v * C_c$$

$$\frac{Q_v}{Q_{p2}} = \frac{C_{p2}}{C_c} \quad (\text{Equação 2})$$

Como não se dispõe das concentrações de nenhum dos indicadores para as correntes de concentrado ( $C_c$ ), é possível encontrá-las a partir da seguinte equação com base no princípio da conservação da massa:

$$Q_a * C_a = Q_c * C_c + Q_{p2} * C_{p2} \quad (\text{Equação 3})$$

A vazão afluyente à membrana corresponde a soma das vazões das correntes de concentrado e permeado, de maneira que:

$$Q_a = Q_c + Q_{p2} \quad (\text{Equação 4})$$

Substituindo (4) em (3) encontra-se a concentração dos indicadores na corrente de concentrado e, então, é possível achar a relação  $Q_v/Q_{p2}$  para cada um dos tratamentos. As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados dos balanços de massa para os indicadores turbidez e sólidos suspensos totais, respectivamente, considerando cada um dos tratamentos que compõem o experimento.

**Tabela 5:** Balanço de massa para o indicador turbidez considerando os quatro tipos de tratamentos ( $P_bV_b$  – Pressão baixa + Vazão baixa;  $P_bV_a$  – Pressão baixa + Vazão alta;  $P_aV_b$  – Pressão alta + Vazão baixa;  $P_aV_a$  – Pressão alta + Vazão alta).

Parâmetros	Tratamentos			
	$P_bV_b$	$P_bV_a$	$P_aV_b$	$P_aV_a$
$Q_c$	300	600	300	600
$Q_{p2}$	52,9	51,9	70,8	71,13
$Q_a$	352,9	651,9	370,8	671,13
$C_{p2}$	12,42	12,74	31,98	29,77
$C_a$	52,28	52,28	52,28	52,28
$C_c$	59,31	55,70	57,07	54,95
$Q_v/Q_{p2}$	0,21	0,23	0,56	0,54

**Tabela 6:** Balanço de massa para o indicador sólidos suspensos totais considerando os quatro tipos de tratamentos ( $P_bV_b$  – Pressão baixa + Vazão baixa;  $P_bV_a$  – Pressão baixa + Vazão alta;  $P_aV_b$  – Pressão alta + Vazão baixa;  $P_aV_a$  – Pressão alta + Vazão alta).

Parâmetros	Tratamentos			
	$P_bV_b$	$P_bV_a$	$P_aV_b$	$P_aV_a$
$Q_c$	300	600	300	600
$Q_{p2}$	52,9	51,9	70,8	71,13
$Q_a$	352,9	651,9	370,8	671,13
$C_{p2}$	11,22	9,00	10,8	8,85
$C_a$	32,30	32,30	32,30	32,30
$C_c$	36,02	34,32	37,37	35,08
$Q_v/Q_{p2}$	0,31	0,26	0,29	0,25

O resultado do balanço de massa para o indicador turbidez mostrou que para os tratamentos realizados a baixa pressão, um percentual de 21% a 23% da vazão de permeado, em média, foi resultante do vazamento do concentrado. Para os ensaios realizados a alta pressão, o vazamento foi da ordem de 54% a 56%, o que significa dizer que mais da metade da vazão de permeado era concentrado. Em relação a concentração de sólidos suspensos totais, o balanço de massa mostrou que o permeado coletado continha, em média, de 25% a 31% de concentrado.

Assim, considerando que a membrana de UF apresentava falha na vedação de suas extremidades, pode-se dizer que os maiores valores de turbidez encontrados para os tratamentos realizados a alta pressão foram resultantes do aumento do vazamento do concentrado para a corrente de permeado.

Destaque-se, que este resultado leva em consideração que a resina presente nas extremidades da membrana apresentava falha na vedação, o que implicaria na mistura do concentrado com o permeado. Logo, os resultados do balanço de massa são resultantes da suposição deste problema como causador das baixas taxas de remoção encontradas para os constituintes analisados.

## CONCLUSÕES

A pressão transmembrana implica em efeito direto no aumento inicial do fluxo permeado. No entanto, pressões transmembranares mais altas resultam em maior queda do fluxo permeado com o tempo de filtração. A vazão de concentrado, por sua vez, atua como fator controlador do *fouling* na superfície da membrana, de forma que maiores vazões contribuem para declínio de fluxo permeado menos pronunciado com o decorrer do tempo de operação. Entre as condições operacionais testadas, o tratamento  $P_bV_a$  (Pressão baixa + Vazão alta) apresentou-se como condição de declínio de fluxo permeado menos pronunciado, pois além da operação ter sido realizada a baixa pressão, a vazão de concentrado elevada contribuiu para retardar o *fouling*, promovendo o arraste de partículas da superfície da membrana para a corrente de concentrado.

Quanto ao aspecto qualitativo do permeado, a vazão de concentrado elevada não implica em melhoria significativa na remoção de Sólidos Suspensos Totais, Turbidez, Cálcio e DQO. Desta forma, do ponto de vista econômico e ambiental, é mais interessante operar sistemas de membranas de ultrafiltração com vazão de concentrado baixa, pois além de implicar em menor gasto energético, resulta na produção de uma quantidade de resíduo (concentrado) significativamente menor. Por outro lado, a pressão transmembrana apresenta efeito significativo sobre a remoção de turbidez, de forma que menores pressões de operação resultam em teores mais baixos de turbidez no permeado. Para nenhum outro constituinte analisado, houve variação significativa na rejeição em virtude da pressão operacional.

Tendo em vista que o efeito do aumento da vazão de concentrado no retardamento do *fouling* não resultou em melhoria significativa do fluxo permeado, conclui-se que a condição operacional otimizada para a geração de permeados com maior grau de pureza, associado a geração de um menor volume de resíduo, consiste naquela em que se aplica uma pressão transmembrana baixa associada a uma vazão menor de concentrado ( $P_bV_b$ ).

Se considerarmos que a membrana utilizada na pesquisa apresentava falha na vedação de suas extremidades (resina), é possível mostrar, por meio de um balanço de massa, que os maiores teores de turbidez encontrados nos ensaios realizados à pressão mais alta são resultantes do aumento do vazamento do concentrado dentro da membrana, o qual é estimado como sendo mais da metade da vazão da corrente de permeado, para esta condição operacional. Supondo esta situação, quanto ao aspecto qualitativo do permeado, pressão e vazão de concentrado não implicam em efeito significativo na remoção de nenhum dos indicadores de qualidade analisados. Desta forma, conclui-se, de maneira semelhante, que a condição operacional otimizada associa baixa pressão, por implicar em menor gasto energético, e baixa vazão de concentrado, por resultar em menor geração de resíduo (concentrado).



## REFERÊNCIAS

AHMAD, A. L.; ISMAIL, S.; BHATIA, S.. Membrane treatment for palm oil mill effluent: effect of transmembrane pressure and crossflow velocity. **Desalination**, Kuala Lumpur, v.179, p.245-255, 2005a. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.desal.2004.11.071>

AHMAD, A. L.; ISMAIL, S.; BHATIA, S.. Ultrafiltration behavior in the treatment of agro-industry effluent: Pilot scale studies. **Chemical Engineering Science**, Kuala Lumpur, v.60, p.5385-5394, 2005b. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ces.2005.04.021>

APHA; AWWA; WEF. American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21 ed. Washington: APHA, 2005.

BARBOSA, I. M.. **Avaliação do uso de membranas de ultrafiltração modificadas com nanopartículas de argila para tratamento de esgotos**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

BRIÃO, V. B.. **Processos de separação por membranas para reúso de efluentes de laticínios**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

BRIÃO, V. B.; TAVARES, C. R. G.. Ultrafiltração de efluente da indústria de laticínios para recuperação de nutrientes: efeito da pressão e da velocidade tangencial. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.15, n.4, p.352-362, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1981-67232012005000028>

CRISTOFOLI, K.. **Clarificação de vinho branco por microfiltração utilizando diferentes membranas cerâmicas e compósitas**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

ERSAHIN, M. E.; OZGUN, H.; DERELI, R. K.; OZTURK, I.; ROEST, K.; VAN LIER, J.. A review on dynamic membrane filtration: materials, applications and future perspectives. **Bioresource Technology**, v.122, p.196-206, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.086>

HAMACHI, M.; MIETTON-PEUCHOT, M.. Analysis of deposit behavior in crossflow microfiltration by means of thickness measurement. **Chemical Engineering Journal**, v.86, p.251-257, 2002. DOI: [http://doi.org/10.1016/S1385-8947\(01\)00184-X](http://doi.org/10.1016/S1385-8947(01)00184-X)

HUANG, J.; LIU, L.; ZENG, G.; LI, X.; PENG, L.; LI, F.; JIANG, Y.; ZHAO, Y.; HUANG, X.. Influence of feed concentration and transmembrane pressure on membrane *fouling* and effect of hydraulic flushing on the performance of ultrafiltration.

**Desalination**, v.335, p.1-8, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.11.038>

LIMA, E. R.; OLIVEIRA R. A.; AMBROSIO-UGRI, M. C. B.; BARROS, S. T. D.; BARROS JÚNIOR, C.. Recuperação da solução de soda cáustica usada no tratamento do couro bovino na produção de gelatina. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, p.98-106, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000100015>

LIN, C.-J.; RAO, P.; SHIRAZI, S.. Effect of operating parameters on permeate flux decline caused by cake formation: a model study. **Desalination**, v.171, p.95-105, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.03.023>

LUCA, S. J.; MONTEGGIA, L. O.. Outros processos de desinfecção. In: Gonçalves, R. F.. **Desinfecção de efluentes sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 2003.

MOTA, J. D.. **Preparação de membranas tubulares compósitas e sua avaliação na separação de emulsão óleo/água: utilização e reutilização**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SABLANI, S. S.; GOOSENA, M. F. A.; AL-BELUSHI, R.; WILF, M.. Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review. **Desalination**, v.141, p.269-289, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)85005-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)85005-0)

SEIDEL, A.; ELIMELECH, M.. Coupling between chemical and physical interactions in natural organic matter (NOM) *fouling* of nanofiltration membranes: implications for *fouling* control. **Journal of Membrane Science**, v.203, p.245-255, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(02\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00013-3)

SILVA, L. P. A.. **Utilização de membranas no pós-tratamento de esgotos para reúso do permeado e aproveitamento de concentrado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

WU, T. Y.; MOHAMMAD, A. W.; JAHIM, J. M.; ANUAR, N.. Palm oil mill effluent (POME) treatment and bioresources recovery using ultrafiltration membrane: Effect of pressure on membrane *fouling*. **Biochemical Engineering Journal**, v.35, p.309-317, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.01.029>

ZULAIKHA, S.; LAU, W. J.; ISMAIL, A. F.; JAAFAR, J.. Treatment of restaurant wastewater using ultrafiltration and nanofiltration membranes. **Journal of Water Process Engineering**, v.2, p.58-62, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.05.001>