

Condições operacionais de membrana de ultrafiltração utilizada no pós-tratamento de esgoto sanitário**Operating conditions of ultrafiltration membrane used in post-sewage treatment**

DOI:10.34117/bjdv5n11-295

Recebimento dos originais: 10/10/2019

Aceitação para publicação: 26/11/2019

Marcos André Capitulino de Barros Filho

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Mestre em Engenharia Sanitária (PPgES/UFRN). Professor da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Campus de São Luís.

Endereço: Alameda E, s/n, Brisas Altos do Calhau, Torre Bosque, Ap. 1401, Quitandinha, São Luís/MA, Brasil. Cep: 65070-628.

E-mail: marcosandrebarros@hotmail.com

Francisco Rafael Souza Freitas

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Mestre em Engenharia Sanitária (PPgES/UFRN). Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo (USP). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus de Sobral.

Endereço: Eixo Ambiente, Saúde e Segurança, IFCE- Campus Sobral. Av. Dr. Guarani, 317, Derby Clube. Sobral/CE, Brasil. Cep: 62.042-030.

E-mail: rafael.freitas@ifce.edu.br

Layane Priscila de Azevedo Silva

Bióloga pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Mestre em Engenharia Sanitária (PPgES/UFRN). Analista de Saneamento na A&E Equipamentos e Serviços Ltda.

Endereço: Rod BR 101 Norte, 900, Distrito Industrial, Nossa Sra. da Apresentação.

Natal/RN, Brasil. Cep 59115-001.

E-mail: layane_azevedo@hotmail.com

Herbert Senzano Lopes

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Mestre e Doutorando em Engenharia Química (UFRN). Professor da Universidade Potiguar (UNP).

Endereço: Rua Cabo Orange, 1447, Potengi, Natal/RN, Brasil. Cep: 59129-020.

E-mail: herbertsenzano@gmail.com

Patrícia Cristina de Araújo Puglia de Carvalho

Engenheira Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Mestre e Doutora em Engenharia Química (UFRN). Professora da Universidade Potiguar (UNP).

Endereço: Rua Clóvis Lira, 195, Ap. 302, Nova Parnamirim, Parnamirim/RN, Brasil. Cep: 59150-300.

E-mail: pcpuglia@hotmail.com

RESUMO

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 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 2^2 . 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. A vazão de concentrado, por sua vez, não apresentou influência significativa sobre nenhum dos parâmetros de qualidade. Dessa forma, concluiu-se que 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.

Palavras-chave: Condições Operacionais; Filtração Tangencial; Fluxo Permeado; Incrustação; Membranas Filtrantes.

ABSTRACT

In spite of the several benefits of using filter membrane technology, same imitations inherent in the fouling process become relevante to its applicability. The goal of this work was investigate the effect of transmembrane pressure and concentrate flow in the performance of ultrafiltration, applied to final treatment of sanitary sewage. The process was measured and optimized by varying the pressure (0,5 and 1,5 bar) and concentrate flow (300 and 600 L/h), through a factorial design 2^2 . The increase pressure resulted in higher initial permeate flow, however greater deceser in flow over time, showing a more pronounced fouling process. On the other hands, the increased concentrate flow resulted in slower fall in the permeate flow with filtrate time. With respect to quality of the permeates the transmembrane pressure of 0,5 bar was the one that allowed better results. The concentrate flow, did not show significant influence about any quality parameters. Thus, it was concluded that is more interesting to operate ultrafiltration membrana systems at lower concentrate flow associated with low transmembrane pressure, because under these conditions will be reduction in the production residue and the permeate will show lower concentration flow of the analyzed constituintes.

Keywords: Operating conditions; tangential filtration; permeate flow; filtering membranes.

1. 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).

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 e Monteggia, 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. De acordo com Schneider e Tsutiya (2001), 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.

Nesse sentido, 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. Um número pouco expressivo de estudos envolvendo a tecnologia de membranas aplicada ao tratamento de esgotos tem focado suas atenções em otimização das condições operacionais.

Nesse sentido, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar o efeito da pressão transmembrana 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.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em um equipamento de membrana de ultrafiltração (UF), 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, composta de filtro anaeróbio precedido por decanto digestor com duas câmaras em série, possuía características essencialmente domésticas.

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 2², 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.

No presente trabalho, a vazão de concentrado foi utilizada como parâmetro indicador da velocidade tangencial, haja vista que, de acordo com Ahmad^a 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 (Pb); pressão 1,5 bar, representa a pressão alta (Pa); vazão de 300 L/h, representa a vazão baixa (Vb); e a vazão de 600 L/h, representa a vazão alta (Va).

As condições operacionais foram determinadas experimentalmente, baseadas em ensaios preliminares, respeitando os valores máximos de pressão e vazão de concentrado suportados pelo sistema. Foi observado nos ensaios preliminares que valores de pressão e vazão de concentrado superiores a 1,5 bar e 600 L/h, respectivamente, causavam desequilíbrio e instabilidade no 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 pH, condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), turbidez (NTU), Sólidos Suspensos Totais – SST (mg/L), Cálcio (mg/L) e Demanda Química de Oxigênio – DQO (mg/L), 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.

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, em que os diferentes níveis foram representados pelo fator tempo. Esta ordenação foi realizada com auxílio do software STATISTICA 7.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, observou-se 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, conforme mostra a Figura 1. Percebe-se diferença evidente entre a qualidade do esgoto afluente à membrana e os permeados gerados em cada tratamento.

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.

Os parâmetros pH e condutividade elétrica não apresentaram variação entre o esgoto que alimentou a membrana e os permeados gerados em cada tempo. De fato, isso era esperado haja vista que a membrana de UF não remove constituintes a nível iônico. 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 PbVa (Figura 1 (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 1 (b)), observou-se que as concentrações nas diferentes condições testadas exibiram comportamento com variações aleatórias, não sendo possível, portanto, estabelecer um padrão.

Com relação aos sólidos suspensos (Figura 1 (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.

A concentração de DQO nos permeados gerados, em todos os tratamentos, foi bem menor do que no esgoto que alimentou a membrana (Figura 1 (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.

A fim 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 2 exibem a influência de cada variável categórica, bem como da interação entre elas, para cada indicador de qualidade do permeado. 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.

Como pode ser visto na Figura 2 (b), apenas em relação ao parâmetro turbidez, os tratamentos realizados a pressão alta apresentaram valor médio desse parâmetro maior do que aqueles realizados a baixa pressão. Essa diferença foi comprovada estatisticamente, 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.

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.

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.

Ahmad et al. (2005) 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 a velocidade de escoamento não apresentou qualquer influência sobre a rejeição de SST.

Experimentos desenvolvidos por Brião e Tavares (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.

Apenas para a remoção de turbidez a pressão transmembrana apresentou influência significativa. Os tratamentos realizados a pressão alta apresentaram valor médio de turbidez maior do que aqueles realizados a baixa pressão, conforme mostra a Figura 2(b). Essa diferença foi comprovada estatisticamente ($p < 0,05$). Dessa forma, podemos dizer que a pressão, independentemente do valor de vazão de concentrado aplicado, influenciou de forma significativa na remoção de turbidez do esgoto, de maneira que tratamentos a baixa pressão produziram permeados com menor turbidez.

Em virtude da qualidade do permeado gerado pela membrana encontrar-se em desacordo com o esperado para este tipo de sistema, notadamente quanto ao teor de turbidez no permeado, acredita-se que possa ter ocorrido algum tipo de falha na vedação da resina presente nas extremidades da membrana, o que culminaria na mistura de permeado e concentrado.

Muito embora a eficiência da membrana de UF utilizada neste estudo tenha sido baixa para turbidez, 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. Destaque-se, que as baixas taxas de remoção foram recorrentes na triplicata de ensaios, o que diminui a possibilidade de erro nas análises.

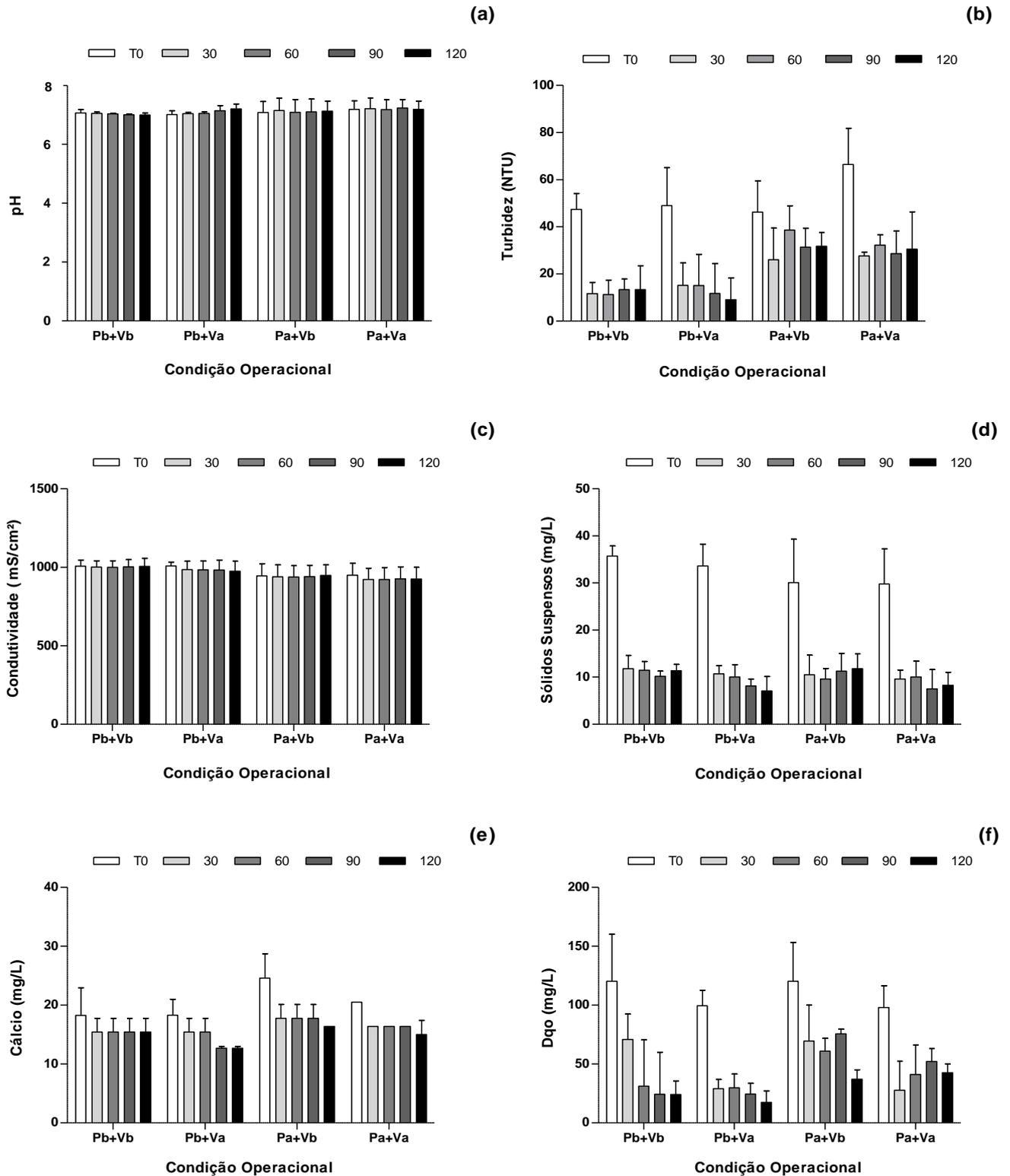


Fig. 1. Gráficos dos valores médios para cada indicador de qualidade do permeado, sendo PbVb – Pressão baixa + Vazão baixa; PbVa – Pressão baixa + Vazão alta; PaVb – Pressão alta + Vazão baixa; PaVa – Pressão alta + Vazão alta. O gradiente de cor representa os tempos de coleta, em que: T0 representa 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.

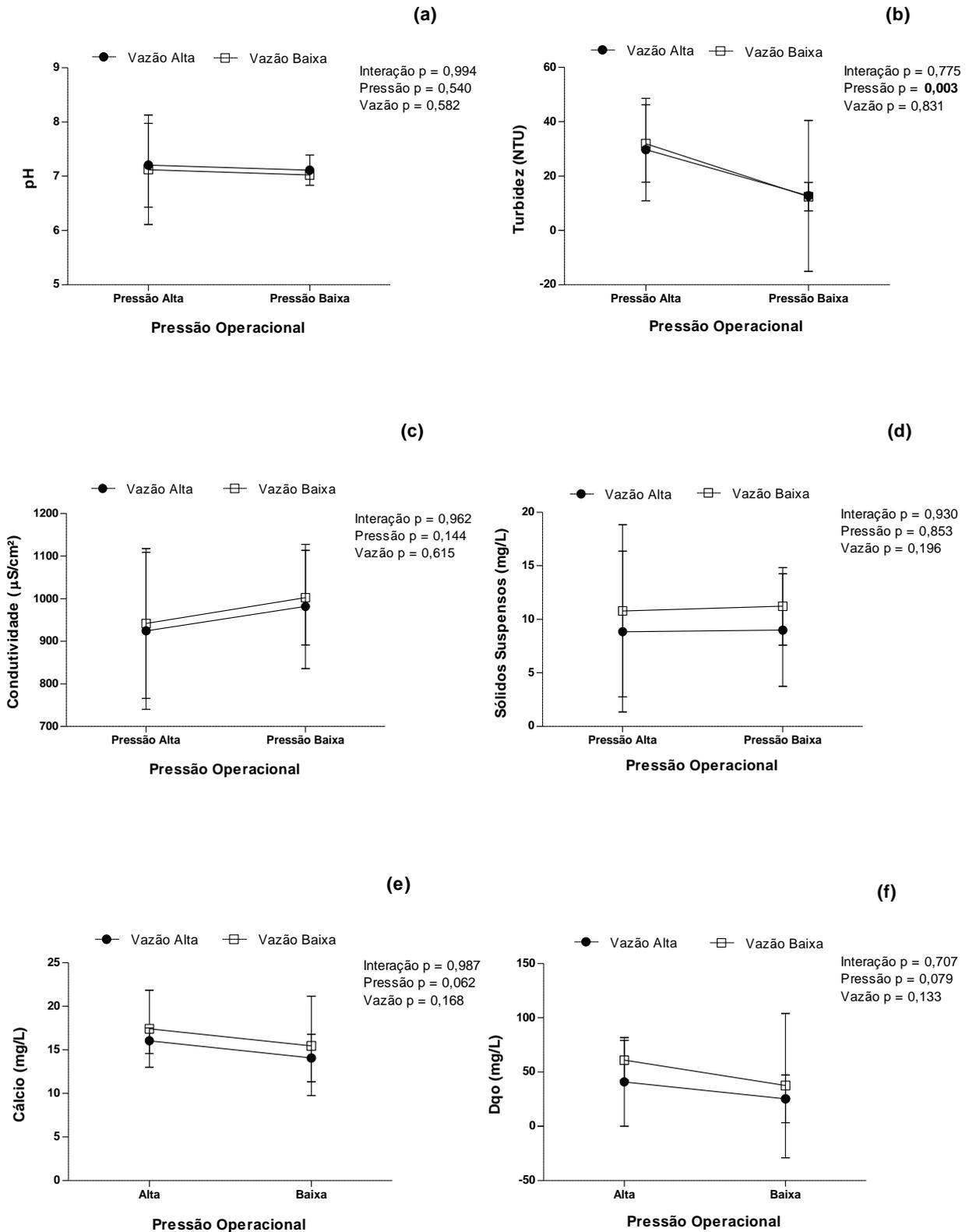


Fig. 2. Gráficos da ANOVA two-way para cada um dos indicadores de qualidade do permeado. As barras representam o intervalo de confiança (95%) dos valores amostrados. Os valores de p são mostrados para os efeitos isolados de pressão e vazão e sua interação. O Valor significativo ($p < 0,05$) está em negrito.

4 CONCLUSÕES

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.

REFERÊNCIAS

Ahmad, A. L.; Ismail, S.; Bhatia, S. (2005). Membrane treatment for palm oil mill effluent: effect of transmembrane pressure and crossflow velocity. *Desalination*. 179 (10), 245-255.

American Public Health Association – Apha; American Water Works Association – Awwa; Water Environment Federation – Wef. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21° ed. Washington, D.C, USA. 2005.

Barbosa. I. M. Avaliação do uso de membranas de ultrafiltração modificadas com nanopartículas de argila para tratamento de esgotos. São Paulo, 2017, 196p. Tese (Doutorado em Engenharia). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Brião, V. B.; Tavares, C. R. G. (2012). Ultrafiltração de efluente da indústria de laticínios para recuperação de nutrientes: efeito da pressão e da velocidade tangencial. *Brazilian Journal of Food Technology*. 15 (4), 352-362.

Cristofoli, K. Clarificação de vinho branco por microfiltração utilizando diferentes membranas cerâmicas e compósitas. Caxias do Sul, 2016, 119p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais). Universidade de Caxias do Sul.

Ersahin, M. E.; Ozgun, H.; Dereli, R. K.; Ozturk, I.; Roest, K.; B. Van Lier, J. (2012). A review on dynamic membrane filtration: materials, applications and future perspectives. *Bioresource Technology*. 122, 196-206.

Lima, E. R.; Oliveira R. A.; Ambrosio-Ugri, M. C. B.; Barros, S. T. D.; Barros Júnior, C. (2008). Recuperação da solução de soda cáustica usada no tratamento do couro bovino na produção de gelatina. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 28 (1), 98-106.

Luca, S. J.; Monteggia, L. O. Outros processos de desinfecção. In: Gonçalves, R. F. *Desinfecção de efluentes sanitários*. (2003). ABES, Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 438 p.

Mota, J. D. Preparação de membranas tubulares compósitas e sua avaliação na separação de emulsão óleo/água: utilização e reutilização. Campina Grande, 2017, 143p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande.

Schneider, R. P.; Tsutiya, M. T. (2001). *Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso*. 1ª ed., ABES, São Paulo, 234 p.