

III-090 - OTIMIZAÇÃO DA MICROFILTRAÇÃO NO TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO PÓS-PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO

Wagner Guadagnin Moravia⁽¹⁾

Engenheiro Civil, Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Míriam Cristina Santos Amaral

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

Liséte Celina Lange

Química, Doutora em Tecnologia Ambiental pela Universidade de Londres - Inglaterra, Profª. Associada do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal de Minas Gerais/Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Av. Antônio Carlos 6627 – 4º andar – Sala 4402 – Pampulha, Belo Horizonte – MG. CEP: 31.270-901; Tel: (31)3409-1714; Fax: (31)3409-1879; e-mail: moravia@desa.ufmg.br.

RESUMO

Os lixiviados de aterro sanitário são caracterizados pela alta concentração de matéria orgânica refratária, amônia e compostos tóxicos. Uma alternativa atrativa de tratamento deste efluente são os processos oxidativos avançados, entretanto, quando aplicado de forma isolada, não permitem o enquadramento do efluente. A conjugação do POA com os processos de separação por membranas apresenta diversas vantagens e se mostra adequada neste tipo de solução. No entanto, a otimização das condições hidrodinâmicas do sistema e das técnicas de limpeza da membrana podem ser essenciais para a minimização da incrustação, aumentando-se assim a eficiência do tratamento. Neste contexto, o objetivo deste artigo foi otimizar os processos de microfiltração e nanofiltração no tratamento de lixiviado pós-POA/Fenton com ênfase na permeabilidade da membrana. Os resultados mostraram que a otimização contribuiu significativamente para a eficiência do processo de MF, sendo que em relação à pressão crítica, esta não foi observada provavelmente em função das características da alimentação, onde mesmo com pressão de operação muito baixa (0,25 bar) já foi suficiente para condicionar a formação de torta. Constatou-se também que o aumento do Reynolds influenciou significativamente o fluxo de permeado estabilizado onde a MF aumentou de 16,3 para 32,7 L.m⁻².h⁻¹ quando operado com pressão de 0,25 bar e regime de escoamento com Re de 5.700 em relação ao Re de 2.600. Em relação à limpeza de manutenção da membrana, a técnica mais eficaz foi a retrolavagem aplicada em intervalos de 15 minutos com duração de 15 segundos se apresentou como condição mais atrativa. O protocolo de limpeza de recuperação da membrana de MF sugerido nesta aplicação foi através da conjugação do agente químico dodecil sulfato de sódio na concentração de 500 mg.L⁻¹ durante 120 minutos e ácido cítrico - pH 3 durante 20 minutos.

PALAVRAS-CHAVE: Microfiltração, Otimização, Lixiviado de aterro sanitário, Processo oxidativo avançado.

INTRODUÇÃO

O lixiviado de aterro sanitário pode ser definido como o líquido proveniente da umidade natural e água de constituição presente na matéria orgânica dos resíduos, dos produtos da degradação biológica dos materiais orgânicos presentes e da água de infiltração na camada de cobertura e interior das células de aterramento, somado a materiais dissolvidos ou suspensos extraídos da massa de resíduos. As técnicas mais usuais para o tratamento de lixiviados são as fundamentadas em mecanismos biológicos. Todavia, ocorrem dificuldades ao utilizar estes tratamentos principalmente para lixiviado estabilizado em função de suas características refratárias.

Uma alternativa para este tipo de lixiviado são as conjugações de tratamentos baseados em processos físico-químicos, que são capazes de promover a degradação ou até mesmo a mineralização da matéria poluente

refratária (KURNIAWAN *et al.*, 2006). Os processos oxidativos avançados (POA) surgem como uma nova tendência para o tratamento de efluentes visando à degradação de compostos recalcitrantes, de difícil remoção por processos biológicos. Embora sua alta eficiência, o POA quando aplicado de forma isolada no tratamento de lixiviado ainda não permite o enquadramento do efluente nos padrões de lançamento estabelecido pela legislação vigente, o que torna necessário o emprego de técnicas de pós-tratamento para este fim. A conjugação do POA empregando o reagente de Fenton com os processos de separação por membranas (PSM) apresenta diversas vantagens. A etapa de decantação utilizada na separação do lodo gerado no POA/Fenton pode ser eliminada com o uso dos PSM, diminuindo drasticamente o tempo de tratamento. Esta associação também permite uma maior eficiência de remoção de poluentes, por oferecer tratamento complementar possibilitando o enquadramento do efluente segundo os padrões da legislação, além de economia nos requisitos de área para a implementação da planta de tratamento.

Os PSM podem ser entendidos como um grupo de métodos ou processos que envolvem a utilização de membranas sintéticas para a separação de componentes presentes. Habert *et al.* (2006), definem membrana como uma barreira que separa duas fases e que restringe, sob a ação de uma força motriz, total ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nestas fases. As moléculas de tamanho inferior ao do poro da membrana passam através dela, enquanto as de tamanho superior ficam retidas pelo efeito de retenção ou por forças repulsivas atuantes na superfície da membrana. A alimentação separa-se, portanto, em duas correntes: o fluido que atravessa a membrana, chamado de filtrado ou permeado, e o que permanece ao lado da alimentação que contém os solutos ou sólidos suspensos que foram rejeitados pela membrana, denominado de retido ou concentrado (GIRALDO-ZUNIGA *et al.*, 2004; ORDÓNEZ, 2005). Tais operações podem servir para tratar efluentes e baseiam-se na permeabilidade seletiva de um ou mais componentes através da membrana.

A incrustação das membranas, em algumas vezes, tem sido um fator limitante para a aplicação dos PSM. Este fenômeno condiciona o declínio do fluxo permeado com o tempo fazendo com que o fluxo se torne independente da pressão através da membrana. Neste contexto, a otimização das condições hidrodinâmicas do sistema e das técnicas de limpeza da membrana pode ser usada para minimizar a incrustação, aumentando-se assim a eficiência do tratamento.

Desta forma o objetivo deste artigo foi otimizar as condições hidrodinâmicas e das técnicas de limpeza da membrana do processo de microfiltração (MF) no tratamento de lixiviado pós-POA/Fenton com ênfase na permeabilidade da membrana.

MATERIAIS E MÉTODOS

Amostragem e caracterização físico-química do lixiviado bruto e pós-tratado

Para a caracterização do lixiviado bruto e pós-tratado foram realizadas 10 amostragens provenientes do do Aterro Sanitário da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTRS) da cidade de Belo Horizonte / MG – Brasil, onde foram contemplados os seguintes parâmetros físico-químicos: cor real e aparente, DBO, DQO, COT, pH, alcalinidade, série sólidos, nitrogênio total e amoniacal, fósforo e cloretos. As análises foram realizadas em conformidade com as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

Operação do processo oxidativo avançado pelo reagente de Fenton

A etapa de oxidação consistiu, para cada ensaio, no ajuste do pH de reação com ácido sulfúrico (adição lenta) de 1 litro de lixiviado bruto empregado seguido pela adição de sulfato ferroso heptahidratado sólido e solução de peróxido de hidrogênio. Durante a reação o sistema foi mantido sob agitação. Aliquotas da amostra pré e pós-tratamento foram coletadas e analisadas sendo que os ensaios foram realizados em equipamento *Jar Test*. Os reagentes utilizados nos ensaios de POA foram solução de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) em concentração de 30% (v/v) da marca VETEC e o reagente sólido sulfato ferroso heptahidratado (FeSO₄.7H₂O) da marca SYNTH. As condições operacionais foram de acordo com as otimizadas por Moravia (2010).

Unidade experimental

A unidade experimental de POA/MF é constituída de reator, agitador, reservatório de alimentação/coleta de permeado e concentrado, bomba para bombeamento da alimentação, módulos de membrana tipo fibra oca de MF para a otimização (diâmetro de corte da membrana na faixa de 0,1 - 0,4 μm e área efetiva de filtração igual a 0,1 m^2) e para a operação (1,0 m^2), manômetros, rotâmetros (alimentação e permeado). A unidade também apresenta circuito de limpeza por retrolavagem. A Figura 1 apresenta o protocolo esquemático do sistema.

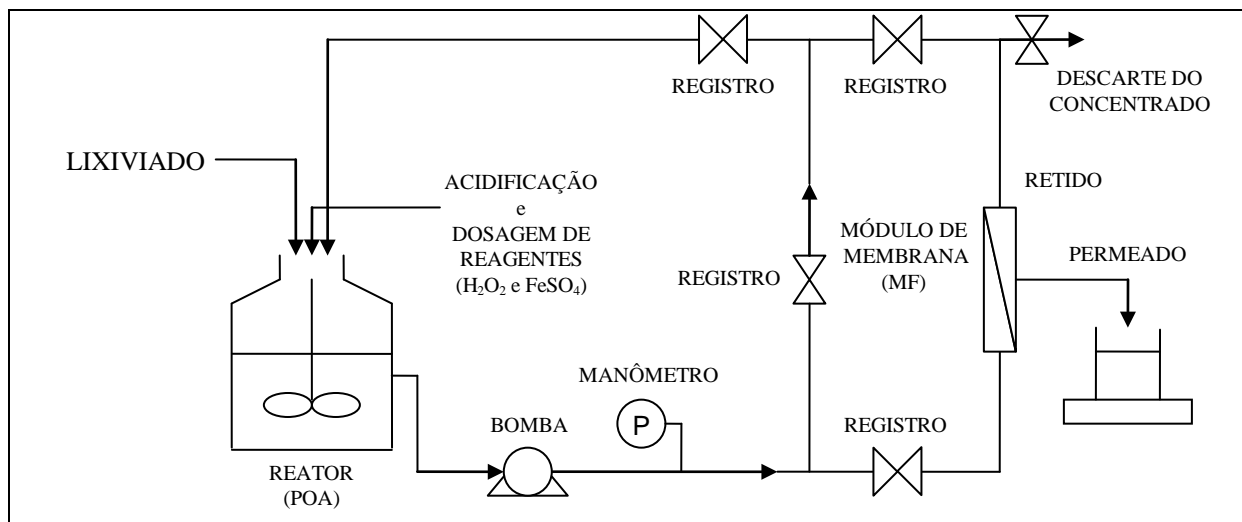


Figura 1 - Protocolo esquemático do sistema.

Otimização da MF

a) Pressão de operação

O efeito da pressão de operação foi avaliado através da determinação da pressão crítica. Para determinação da pressão crítica foram realizados ensaios nos quais a pressão foi fixada e o fluxo de permeado monitorado durante 18 minutos. A cada 3 minutos a pressão era incrementada, sucessivamente, com respectivo acompanhamento do fluxo de permeado. Os valores de pressão avaliados foram de 0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,25 bar respectivamente para o processo de MF.

b) Velocidade de escoamento

O efeito da velocidade de escoamento foi avaliado variando-se a vazão de alimentação correspondente à variação dos regimes hidráulicos referentes aos números de Reynolds entre 2.600, 4.400 e 5.700 para o módulo de MF obedecendo as limitações da unidade experimental. Os ensaios foram realizados com o efluente em temperatura ambiente. Após o término de cada teste, os módulos foram submetidos aos processos de limpeza física e química até a recuperação total da membrana.

Avaliação do protocolo de limpeza da membrana de MF

a) Limpeza de manutenção

As técnicas de limpeza de manutenção empregadas foram a retrolavagem, o relaxamento e a recirculação, todas em condição estabelecidas. A vazão de retrolavagem aplicada foi equivalente a 1,5 vezes o valor da vazão de alimentação. A duração da retrolavagem avaliada foi de 30 segundos em intervalos de 10 minutos para efeito comparativo. O relaxamento consistiu na despressurização do sistema e consecutiva cessão da vazão de recirculação. A duração da recirculação avaliada foi de 30 segundos em intervalos de 10 minutos para efeito comparativo. A recirculação foi através da despressurização do sistema e aumento para o dobro da vazão de alimentação aplicada. A duração da recirculação avaliada foi de 30 segundos em intervalos de 10 minutos.

b) Limpeza de recuperação

Para a avaliação de cada protocolo de limpeza, as membranas foram previamente incrustadas de acordo com o seguinte procedimento: permeação de efluente com escoamento contínuo com recirculação do concentrado e do permeado para o reservatório de alimentação, durante 60 minutos, empregando pressão crítica pré-estabelecida. Após a permeação do efluente, a membrana foi lavada com recirculação de 5 litros de água limpa sem pressurização. A limpeza de recuperação foi aplicada e os resultados determinados como o percentual de recuperação da permeabilidade hidráulica da membrana.

Foram avaliadas as eficiências de diferentes conjugações de agentes químicos na limpeza da membrana, bem como a avaliação da influência da concentração e do tempo de ação do agente de limpeza. O módulo de membrana empregado nestes ensaios foi o de MF apropriado para a etapa de otimização. Num primeiro momento, avaliou-se a influência da ordem de combinação de diferentes agentes de limpeza visando à remoção de material orgânico e inorgânico incrustado. As conjugações avaliadas empregaram ácido cítrico - pH 3 com duração da limpeza de 20 minutos com hipoclorito de sódio (NaClO - solução 2%), dodecil sulfato de sódio (DSS) - 500 mg.L⁻¹ ou percarbonato de sódio (2Na₂CO₃.3H₂O₂) - 500 mg.L⁻¹ com duração da limpeza de 60 minutos. A ordem inversa das conjugações também foram avaliadas. Em seguida, avaliou-se através de um delineamento fatorial completo 2² a influência da concentração do agente químico e do tempo de ação na eficiência de limpeza, onde variou-se concentrações mínimas e máximas de 250 e 500 mg.L⁻¹, respectivamente, e tempos de limpeza entre 60 e 120 minutos.

RESULTADOS OBTIDOS

Otimização da MF

a) Pressão de operação

Adotando pH da alimentação neutro, a pressão de operação foi avaliada através da avaliação da pressão crítica. A pressão crítica é definida como aquela em que a relação entre a pressão e o fluxo de permeado se torna não linear, ou seja, a partir da qual se observa a incrustação da membrana. Na Figura 2 é apresentada a relação entre fluxo de permeado e pressão de operação usada para determinação de pressão crítica do processo de MF. A vazão de alimentação (Q_a) empregada foi de 2,4 L.min⁻¹ (Re = 2.600).

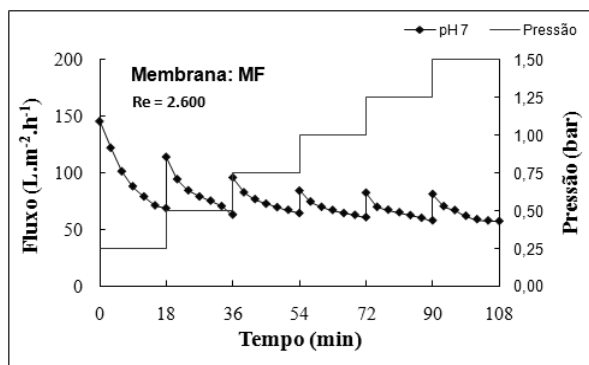


Figura 2 - Relação entre fluxo de permeado e pressão de operação para determinação de pressão crítica no processo de MF.

Observou-se que o fluxo decai a partir das primeiras idades do teste, indicando assim incrustação precoce da membrana. Essa incrustação provavelmente se deve às características da alimentação e representa as condições reais do processo nesta aplicação. Provavelmente, em função dos sólidos coloidais, as forças convectivas na direção da superfície da membrana acarretadas pelo gradiente de pressão, mesmo que baixo, já são suficientes para elevar a concentração de sólidos próximos a camada seletiva da membrana, e com isso favorecer a formação de torta e a precipitação química de compostos solúveis. Desta forma, para uma operação sustentável do sistema, sugere-se neste caso a operação com um gradiente de pressão de 0,25 bar para a MF.

b) Velocidade de escoamento

A verificação dos efeitos da velocidade de escoamento sobre a permeabilidade operacional no sistema de MF foi realizada empregando diferentes vazões de alimentação, respectivas aos regimes hidráulicos relativos aos Re de 2.600, 4.400 e 5.700. A Figura 3 mostra a permeabilidade operacional da MF quando operadas em diferentes Re. Estes ensaios foram realizados para pressões otimizadas (0,25 bar).

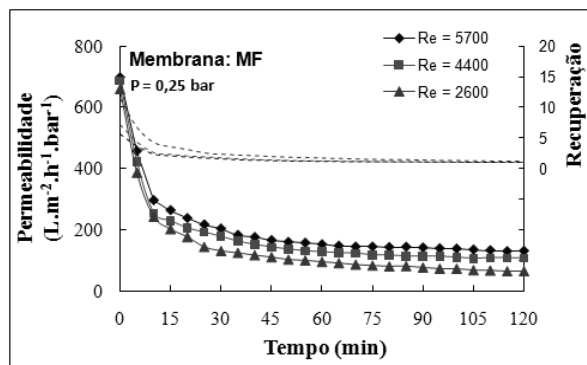


Figura 3 - Permeabilidade operacional para diferentes velocidade de escoamento durante a operação da MF.

De acordo com os resultados, o fluxo estabilizado de permeado da MF aumentou quando operado com regime de escoamento com Re de 5.700 em relação ao Re de 2.600. A permeabilidade operacional foi vantajosa também para Re mais alto. Esses resultados podem ser explicados pela maior turbulência e maior cisalhamento próximo à superfície da membrana, o que acarreta no maior arraste e, conseqüentemente, menor concentração de partículas próximas à camada seletiva, elevando-se assim o fluxo de permeado. A velocidade de escoamento ótima sugerida do sistema de MF foi equivalente a Re igual a 5.700 ($Q_a = 2,4 \text{ L.min}^{-1}$).

Avaliação do protocolo de limpeza da membrana de MF

a) Limpeza de manutenção

Os resultados obtidos na etapa de otimização das condições operacionais do processo de MF sugeriram que a redução do fluxo se deve, principalmente, à formação de torta, o que tornou necessário avaliar possíveis técnicas físicas de recuperação do fluxo de permeado para este processo. Na Figura 4 são apresentados os perfis do fluxo de permeado em relação ao tempo de operação empregando as diferentes técnicas de recuperação de fluxo aplicadas durante 30 segundos a cada 10 minutos, e a eficiência de recuperação de fluxo de permeado e fluxo médio das diferentes condições de retrolavagem.

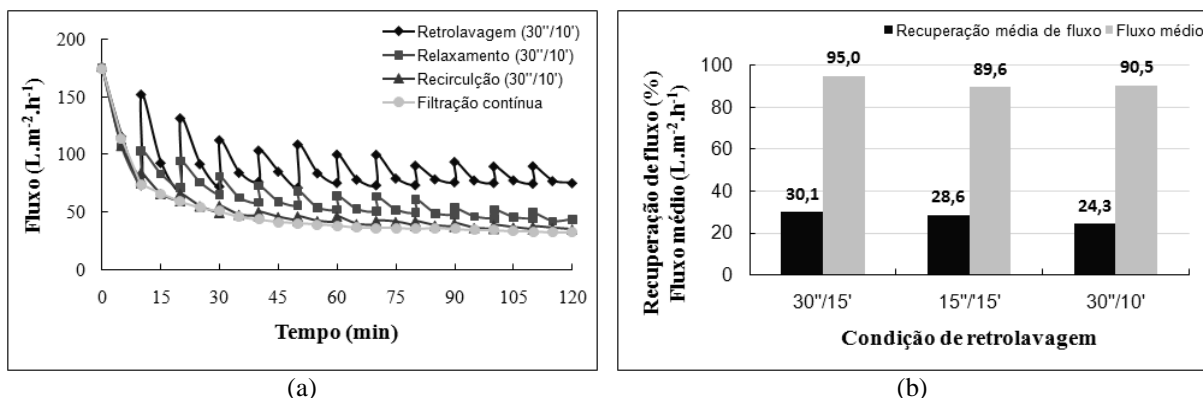


Figura 4 - (a) Perfil de fluxo permeado em diferentes modos de operação; (b) Eficiência de recuperação de fluxo de permeado e fluxo médio das diferentes condições de retrolavagem.

Observa-se que todas as técnicas avaliadas permitem a recuperação do fluxo de permeado, sendo a retrolavagem a mais eficiente, onde apresentou recuperação média de fluxo superior a 18%. O uso da recirculação no mesmo sentido da alimentação foi pouco efetiva. Uma possível justificativa é o estado

precipitado das partículas na superfície da membrana, consistindo numa torta adensada predominada por forças de interações físicas e químicas. Já a técnica de relaxamento apresentou recuperação média de fluxo pouco superior à recirculação. Os resultados também mostraram baixa influência da frequência e duração da retrolavagem na recuperação de fluxo de permeado. Sendo assim, o emprego da retrolavagem em intervalos de 15 minutos com duração de 15 segundos se apresenta como condição mais atrativa em função da menor demanda de permeado.

b) Limpeza de recuperação

A Figura 5 apresenta os percentuais de recuperação de permeabilidade hidráulica obtidos para as combinações de agentes de limpeza avaliadas em diferentes ordens de aplicação no processo de MF.

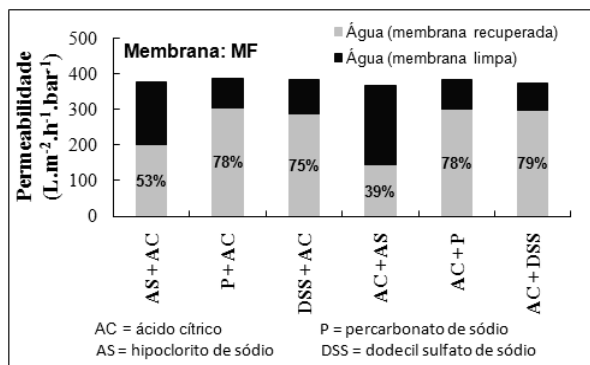


Figura 5 - Recuperação da permeabilidade hidráulica após incrustação com efluente pós-POA do módulo de MF empregando água microfiltrada.

De acordo com os resultados obtidos, a ordem de emprego dos agentes não influenciou na eficiência de recuperação da permeabilidade hidráulica da membrana de MF. Nota-se também um menor desempenho do hipoclorito de sódio em relação aos demais agentes de limpeza química avaliados. A eficiência de limpeza da combinação do ácido cítrico/percarbonato de sódio e do ácido cítrico/dodecil sulfato de sódio foram similares (80%) sendo bem superiores a do hipoclorito de sódio (39%). Nesse contexto, o dodecil sulfato de sódio combinado com o ácido cítrico se torna uma solução mais atrativa por se tratar de um produto menos oneroso.

A Figura 6 mostra a estimativa dos efeitos principais dos fatores envolvidos no protocolo de limpeza química da membrana de MF e suas interações entre efeitos, sobre a resposta recuperação de permeabilidade hidráulica, quando ocorre mudança do nível mais baixo (-) para o nível mais alto (+) de cada fator.

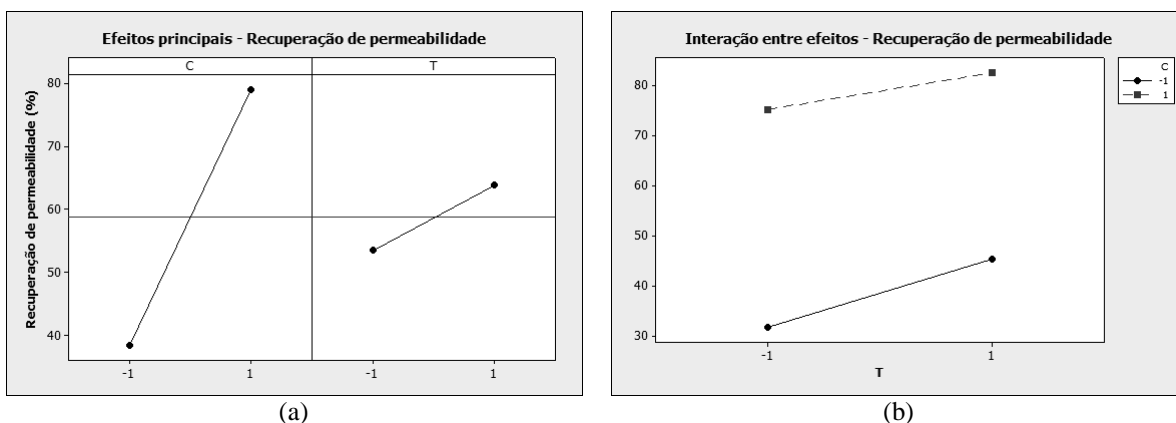


Figura 6 - (a) Efeitos principais; (b) Interações entre efeitos para a resposta recuperação de permeabilidade hidráulica empregando o dodecil sulfato de sódio como agente de limpeza química da membrana de MF.

Conforme esperado, os resultados mostraram que tanto a concentração do agente químico quanto o tempo de limpeza apresentaram maior desempenho de limpeza da membrana quando aplicado em seu maior nível (maior

concentração e maior tempo). Analisando-se o efeito da concentração do agente químico nos limites, o aumento deste fator acarretou no aumento da eficiência de recuperação de permeabilidade hidráulica na ordem de 40,4%. O efeito do tempo de limpeza na eficiência de recuperação de permeabilidade hidráulica foi positivo. Os resultados também mostraram que não há interação entre efeitos dos fatores concentração do agente químico e o tempo de limpeza. Sendo assim, o protocolo de limpeza química da membrana de MF sugerido nesta aplicação é através da conjugação do dodecil sulfato de sódio na concentração de 500 mg.L⁻¹ durante 120 minutos e ácido cítrico - pH 3 durante 20 minutos.

CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que a otimização contribuiu significativamente para a eficiência do processo de MF, sendo que em relação à pressão crítica, esta não foi observada provavelmente em função das características da alimentação, onde mesmo com pressão de operação muito baixa (0,25 bar) já foi suficiente para condicionar a formação de torta. Constatou-se também que o aumento do Reynolds influenciou significativamente o fluxo de permeado estabilizado onde a MF aumentou de 16,3 para 32,7 L.m⁻².h⁻¹ quando operado com pressão de 0,25 bar e regime de escoamento com Re de 5.700 em relação ao Re de 2.600. Em relação à limpeza de manutenção da membrana, a técnica mais eficaz foi a retrolavagem aplicada em intervalos de 15 minutos com duração de 15 segundos se apresentou como condição mais atrativa. O protocolo de limpeza de recuperação da membrana de MF sugerido nesta aplicação foi através da conjugação do agente químico dodecil sulfato de sódio na concentração de 500 mg.L⁻¹ durante 120 minutos e ácido cítrico - pH 3 durante 20 minutos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th Edition. American Public Health Association, Washington, DC. 2005.

GIRALDO-ZUNIGA, A.D. et al. Tecnologias aplicadas ao processamento do soro de queijo. Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes, v.59, n.340-341, p.53-66, 2004.

KURNIAWAN, T.A.; LO, W.; CHAN, G.Y.S. Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. Journal of Hazardous Materials, v.129, p.80-100, 2006.

MORAVIA, W.G. Avaliação do tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de processo oxidativo avançado conjugado com sistema de separação por membranas. Tese de Doutorado em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 261p., 2010.

ORDÓÑEZ, J.A. Tecnología de alimentos: alimentos de origem animal. Porto Alegre: Artmed Editora, 2005.