

II-336 - TRATAMENTO DE VINHOTO EMPREGANDO ULTRAFILTRAÇÃO CONJUGADA COM BIORREATOR COM MEMBRANA

Míriam Cristina Santos Amaral⁽¹⁾

Engenheira Química pela UFMG. Mestre e Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Professora adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Luzia Sergina de França Neta

Engenheira Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Mestre e Doutora em Engenharia Química pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE/UF RJ. Profª do Departamento de Química - CEFET-MG.

Natalie Cristine Magalhães

Graduanda do curso de Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (EE/UFMG). Aluna Bolsista pelo BITIB/FAPEMIG de Iniciação Científica e Tecnológica do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG.

Roberto Bentes de Carvalho

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Pará (1999), mestrado e doutorado em Eng. Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Endereço⁽¹⁾: Avenida Antônio Carlos, 6627, Escola de Engenharia, Bloco 2, sala 4544 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31270-901 - Brasil - Tel: (31) 3409-1714 - e-mail: miriam@desa.ufmg.br

RESUMO

O vinhoto, também conhecido como vinhaça, é o resíduo líquido do processo de destilação do caldo ou melaço de cana-de-açúcar fermentado para obtenção de etanol. O vinhoto se caracteriza pela elevada concentração de matéria orgânica que, se descartada de forma inadequada no corpo de água ou no solo, pode causar a deterioração dos mesmos. Uma alternativa para o tratamento do vinhoto é a conjugação da micro ou ultrafiltração para remoção do material em suspensão e, consequentemente, redução da sua carga e remoção da matéria orgânica solúvel por biorreatores com membranas (BRM). Os BRM consistem da associação de processo biológico com processos de separação por membranas. A utilização de membranas permite aumentar a concentração de microrganismos no biorreator e assim melhorar a qualidade do efluente. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o uso de BRM aeróbio com aeração entre as fibras para o tratamento de vinhoto previamente micro/ultrafiltrado. Os resultados mostraram que a conjugação da micro/ultrafiltração com BRM é viável apresentando eficiência de remoção global de matéria orgânica em torno de 98%.

PALAVRAS-CHAVE: Vinhoto, Biorreator com Membranas, Ultrafiltração, Microfiltração.

INTRODUÇÃO

O vinhoto constitui-se em um dos grandes desafios para o crescimento das indústrias alcooleiras do Brasil, que geram cerca de 15 litros de vinhoto para um litro de etanol produzido (Van Haandel, 2005). A carga orgânica desta corrente gerada pode apresentar valores de DQO de aproximadamente 30.000 mg/L, consequentemente, o descarte inadequado desta corrente nos corpos de água pode causar a deterioração da qualidade destas nas regiões produtoras de álcool, às vezes, a ponto de se tornarem inviáveis para o abastecimento público. Em muitos casos a melhor opção para se dar um destino final a este resíduo tem sido aplicá-lo nos próprios canaviais, aproveitando-se assim dos nutrientes nele contido. Entretanto, o uso desse material na fertilização do próprio canavial deverá ser extremamente rigoroso, pois a alta concentração de material orgânico biodegradável poderá promover a "queima" das folhas da cana, implicando na sua aplicação após o corte, quando não há folhas. Outro problema é a alta concentração de potássio que limita a aplicação de vinhoto em aproximadamente 600 m³/ano. Sabendo-se que em um hectare de cana pode ser produzido em torno de 75 ton/ano de cana, que podem gerar 5 m³ de álcool e, portanto 65 m³ de vinhoto, conclui-se que para distribuir o vinhoto sobre os canaviais precisa-se irrigar no mínimo 100/600 ou 1/6 da área plantada (Van Haandel, 2000).

Outra prática utilizada como destino a este vinhoto produzido é infiltrá-lo em uma fração da aérea cultivada. Esse destino poderá causar problemas como contaminação de lençóis freáticos, bem como sacrificar cerca de 5% da área de cultivo da destilaria, que deverá ficar fora do plantio por um determinado intervalo de tempo.

Açudes de evaporação de vinhoto também são utilizados como destino final a este rejeito, embora as usinas produtoras de álcool no Brasil se localizem em regiões de boas chuvas, conclui-se que o vinhoto causa um impacto adverso importante sobre o meio ambiente, particularmente sobre as águas de superfície, demandando dessa forma um tratamento prévio e adequado antes do seu lançamento.

Diversos estudos vêm sendo realizados de forma a ter rotas de tratamento que permitam o aproveitamento de forma segura dos nutrientes e sais contidos no vinhoto (Bebé *et al.*, 2009). O uso do processo de separação por membranas de micro ou ultrafiltração poderá ser utilizado como um pré-tratamento do vinhoto antes de encaminhá-lo a um tratamento para redução da sua carga. Na micro/ultrafiltração alia-se a concentração do vinhoto a recuperação da água que pode ser tratada e reutilizada. Por se tratar de um setor com alta demanda de água, pois ela é utilizada em quase todas as etapas do processo de produção, o reúso se apresenta como uma opção para garantir a sustentabilidade do setor. O processo de micro/ultrafiltração gerará duas correntes denominadas de permeado e concentrado. A corrente concentrada será avaliada para fins de utilização como fertilizante no canavial e a corrente do permeado será encaminhada para um tratamento específico para redução da sua carga.

O biorreator com membranas (BRM) apresenta-se como um dos processos promissores para o tratamento deste tipo de efluente após o pré-tratamento. O BRM consiste da associação de processo biológico com processos de separação por membranas. A utilização de membranas permite aumentar a concentração de microrganismos no biorreator e assim melhorar a qualidade do efluente.

O fenômeno da incrustação da membrana ainda é uma limitação ao crescimento do número de aplicações em larga escala destes sistemas que envolvem o uso de membranas, pois esta causa um significativo declínio de fluxo de permeado, requer limpeza e substituição de membranas com frequência, acarretando em uma elevação do custo do processo de tratamento. A utilização da aeração, tanto no biorreator quanto no módulo de membrana, visa à remoção do acúmulo de material (torta) ocasionado pelas incrustações, permitindo, assim, operá-los com fluxos de permeado sustentáveis ao longo de todo o processamento do vinhoto. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o uso de BRM aeróbio com aeração entre as fibras para o tratamento de vinhoto previamente micro/ultrafiltrado.

MATERIAIS E MÉTODOS

AMOSTRAGEM

O vinhoto utilizado para a realização dos experimentos foi fornecido pela Usina Irmãos Malosso localizada em Itápolis/SP.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO VINHOTO

Previamente, foram realizados testes de caracterização do efluente a fim de subsidiar o estabelecimento das condições operacionais do BRM. Para a caracterização físico-química convencional dos efluentes foram selecionados os seguintes parâmetros: DQO, DBO, pH, cor, série sólidos, nitrogênio, fósforo e condutividade. As análises foram realizadas em conformidade com as recomendações do “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”.

PRÉ-TRATAMENTO DO VINHOTO COM ULTRAFILTRAÇÃO/MICROFILTRAÇÃO (UF/MF)

A aplicação da micro/ultrafiltração ao tratamento de vinhoto objetiva tanto um tratamento primário do mesmo, para redução da carga orgânica que será encaminhada para o tratamento secundário, assim como a utilização da corrente concentrada do vinhoto para uso em fertirrigação. Os ensaios de pré-tratamento foram realizados empregando módulos de microfiltração e de ultrafiltração com membranas do tipo fibra oca fornecidos pela PAM Membranas Seletivas LTDA. Na Tabela 1 são apresentadas as características do módulo de membrana submerso com um sistema de aeração na base do módulo, operando em um tanque de membrana que apresenta volume útil de 5 L. Antes da realização de cada teste a membrana foi submetida à limpeza em solução de hipoclorito de sódio 200 mg/L por 20 minutos em um banho de ultra-som. Os testes foram realizados aplicando vácuo de 0,3 bar.

Tabela 1: Principais características dos módulos de membrana.

Características	Descrição (Ultrafiltração)	Descrição (Microfiltração)	Unidade
Material	Poli (étersulfona)	Poli (éter imida)	—
Diâmetro da Fibra	0,5-0,6	0,8	mm
Diâmetro de Corte	50	0,5	kDa/ μ m
Diâmetro Útil do Módulo	3,7	3,7	cm
Comprimento Útil do Módulo	15,2	15,2	cm
Área Efetiva de Filtração	0,082	0,037	m ²
Densidade de Empacotamento	500	300	m ² /m ³

UNIDADE DO BRM

Na Figura 1 é apresentado o sistema de BRM utilizado para realização dos testes de tratabilidade do vinhoto. O sistema de BRM é dotado de um tanque de armazenamento para a alimentação (efluente bruto UF previamente); um biorreator aeróbio (tanque biológico) com um módulo submerso de membranas de ultrafiltração do tipo fibra oca; um tanque de armazenamento para o permeado produzido na operação, sendo este o efluente tratado; um tanque para a retrolavagem; uma bomba peristáltica para a alimentação do biorreator; uma bomba diafragma para a operação de retrolavagem; uma bomba de vácuo para a filtração; válvulas de diversos tipos para funções específicas; indicadores de vazão; manômetros; além de um *skid* com painel elétrico para automatizar as operações, minimizando erros causados pela operação manual.

**Figura 1: Biorreator a membranas.**

O tanque biológico possui um volume de 5L. O sistema possui cinco correntes de processo: linha de alimentação do BRM; linha de ar comprimido para aeração do biorreator e para o sistema de aeração do módulo de membrana; linha de efluente ultrafiltrado; linha de vácuo; linha de permeado para retrolavagem. Foi utilizado membrana do tipo fibra oca de poli(éter sulfona) com as mesmas características das membranas usadas no pré-tratamento (Tabela 1) que foram fornecidas pela PAM Membranas Seletivas LTDA.

ACLIMATAÇÃO DA BIOMASSA

O lodo usado como inoculo foi coletado no reator de lodos ativados ETE Arrudas/BH e submetido a uma etapa de aclimação objetivando tornar a biomassa adaptada às características do efluente e às condições operacionais intrínsecas ao BRM. Inicialmente o BRM foi operado com TRH de 48h e depois de estabilizada a remoção de DQO, este tempo foi reduzido para 24h. O BRM foi operado com TRH de 48h por apresentar maior remoção de matéria orgânica quando operado com este tempo de residência, de acordo com estudos realizados anteriormente pelos autores. Durante a operação, o BRM foi alimentado com o efluente ultrafiltrado, o pH foi mantido entre 6,8 - 7,0 e a temperatura mantida entre 25-30°C. Periodicamente uma alíquota do permeado e do lodo foram coletadas para análise da DQO e de Sólido voláteis (SSV), respectivamente.. A operação de aclimação foi realizada até a remoção de DQO constante e superior a 70%.

OPERAÇÃO DO BRM

Após aclimação da biomassa, o BRM foi operado com tempo de residência hidráulica de 48 h, empregando retrolavagem a cada 15 min com duração de 15 s. O BRM foi alimentado com o vinhoto ultrafiltrado. O pH da suspensão biológica no BRM foi mantido entre 7 – 7,5. As correções de pH foram realizadas com soluções de NaOH. A temperatura da suspensão biológica foi mantida entre 25-30°C. A vazão de ar total empregada para aeração do líquido do BRM e da membrana (aeração na base do módulo) foi de 1 Nm³/h de forma contínua.

Para o monitoramento da operação do BRM a pressão foi monitorada e registrada diariamente, alíquotas do efluente de vinhoto ultrafiltrado (alimentação) e permeado do BRM foram coletadas diariamente e caracterizados em relação à concentração de DQO e alíquotas do lodo, para análise de sólidos. Todas estas análises foram realizadas em conformidade com as recomendações do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Para a limpeza química da membrana, o módulo foi imerso no banho de ultrassom com solução de hipoclorito de sódio 2%. O tempo de limpeza empregado foi de 20 minutos, após o qual, o módulo foi lavado em água corrente para remoção do agente de limpeza. A permeabilidade hidráulica em água foi determinada ao término de cada limpeza para avaliar a sua eficiência.

RESULTADOS

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO VINHOTO

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da caracterização físico-química do vinhoto. Verifica-se que o vinhoto apresenta elevada concentração de matéria orgânica em termos de DQO e elevada coloração. A baixa concentração de DBO em relação à concentração de DQO provavelmente se deve ao fato de que a análise de DBO foi realizada sem a adição de inóculo. Em relação à concentração de sólidos, observou-se que o vinhoto apresenta elevada concentração de sólidos totais, principalmente na forma de sólidos voláteis e a grande parte se encontra dissolvido, uma vez que a concentração de sólidos suspensos corresponde a apenas 29, 7 e 33% dos sólidos totais, totais fixos e totais voláteis respectivamente. Dessa forma, torna-se apropriado o tratamento do mesmo pelo sistema proposto, micro/ultrafiltração para remoção do sólido em suspensão e o biorreator a membrana para degradação da matéria orgânica.

Tabela 2: Características físico-químicas do vinhoto.

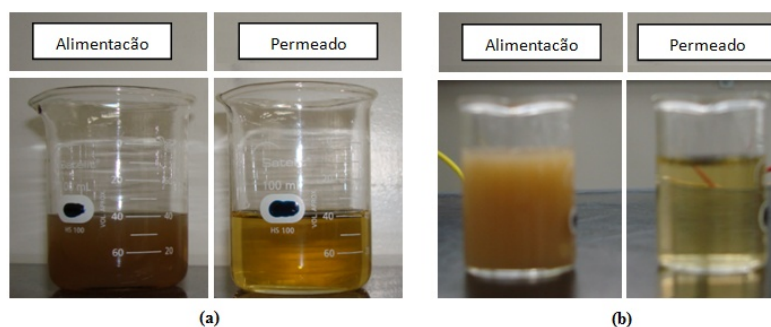
Parâmetros	Unidade	Vinhoto Bruto
DQO	mg/L	27.138,26
DBO ₅	mg/L	6450
pH	-	3,8-4,1
Cor	uC	9968,4
SST	g/L	5,76
SSF	g/L	0,22
SSV	g/L	5,54
ST	g/L	20,15
STF	g/L	3,35
STV	g/L	16,79
Nitrogênio total	mg/L	114
Fósforo	mg/L	158
Condutividade	mS/cm	4,26

PRÉ-TRATAMENTO DO VINHOTO COM ULTRAFILTRAÇÃO/MICROFILTRAÇÃO

A seguir serão apresentados os resultados obtidos durante a avaliação da microfiltração e da ultrafiltração como pré-tratamento para o biorreator a membrana. A Tabela 3 apresenta as condições operacionais adotadas bem como os valores de DQO obtidos para os dois sistemas de pré-tratamento. A Figura 2 apresenta o aspecto do concentrado e do permeado utilizando esses sistemas.

Tabela 4: Comparação do emprego de MF e UF como pré-tratamento

Parâmetros	Microfiltração	Ultrafiltração
Tamanho de poros/diâmetro de corte da membrana	0,5 μm	50 kDa
Pressão de operação (bar)	0,3	0,4
Permeabilidade da membrana ($\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar}$)	87,5	18,3
DQO alimentação (mg/L)	39.755	39.755
DQO permeado (mg/L)	16.780	12.340

**Figura 2: Foto de amostras de alimentação e permeado obtidos na (a) microfiltração e (b) ultrafiltração do efluente.**

A permeabilidade hidráulica operacional tanto da membrana de microfiltração quanto de ultrafiltração apresentaram valores elevados, levando-se em consideração a elevada concentração de sólidos em suspensão no efluente. Os elevados valores de permeabilidade operacional obtidos, devem-se ao módulo com aeração distribuída entre as fibras, nesta configuração, as bolhas encontram-se dispersas no meio atuando como um cisalhante da torta formada próximo a superfície da membrana. Desta forma, a espessura da camada de material depositado na superfície da membrana torna-se constante mesmo com o aumento da concentração da alimentação.

Observa-se uma maior eficiência de remoção de DQO pela UF em relação a MF, o que já era esperado uma vez que a membrana de UF apresenta menor tamanho de poros. Entretanto, a produtividade da membrana de UF é menor do que a de MF, mas como o permeado do pré-tratamento será tratado por processos biológicos uma menor concentração de permeado resultará em reatores com menor tempo de residência, menores dimensões, menor requisito energético para aeração, que pode compensar a maior demanda de área de membrana, ressaltando ainda que, embora a permeabilidade da membrana de UF seja menor do que a de MF, esta apresenta uma ordem de grandeza significativa pelo que é esperado de membranas de UF.

Periodicamente as membranas foram submetidas a um processo de limpeza química recuperando a permeabilidade inicial das membranas. A recuperação da permeabilidade inicial caracteriza que a incrustação sofrida pela membrana durante o processo de concentração é reversível e que as mesmas poderão ser reutilizadas após processo de limpeza.

Na Figura 3 são apresentados os valores de DQO obtido para o permeado micro ou ultrafiltrado ao longo de todo tempo de operação.

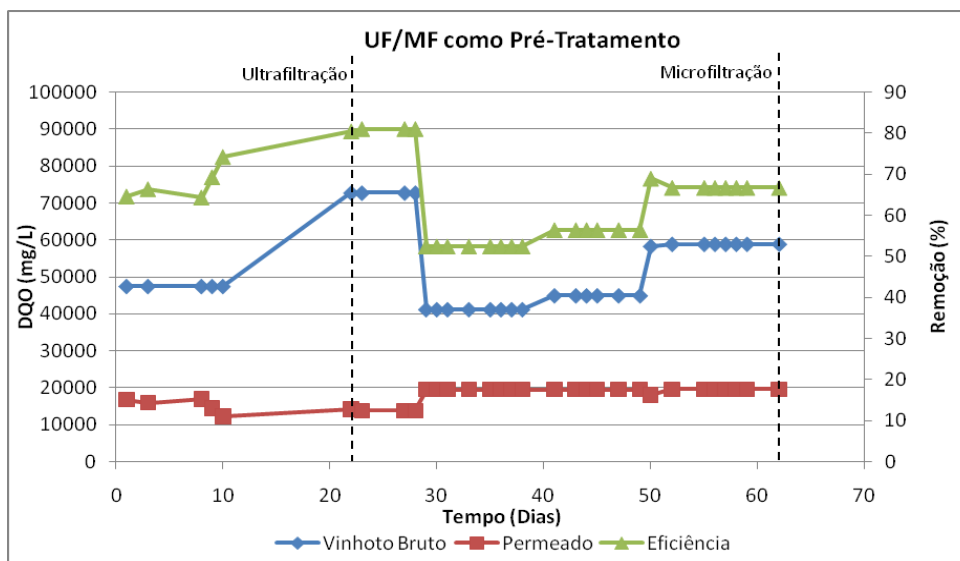


Figura 4: Perfil da DQO do permeado e da eficiência do pré-tratamento durante operação em modo batelada alimentada.

De acordo com o resultado obtido observa-se que a DQO do permeado permanece praticamente constante ao longo de todo o processo de concentração do vinhoto, mesmo quando há variação na concentração de DQO na alimentação. Este fato pode estar relacionado ao novo sistema de aeração das fibras que favorece a formação de uma camada de material com espessura constante ao longo de todo o processo evitando que haja passagem de constituintes responsáveis pelo aumento da DQO do permeado por meio difusivo, apresentando uma média de remoção de DQO de aproximadamente de 60%. A UF com módulo submerso e aeração na base do módulo apresentou-se como uma excelente alternativa para o tratamento primário do vinhoto com remoção de matéria orgânica em termos de DQO média de 70 %, com remoção total de sólidos em suspensão e 20% de sólidos totais.

ACLIMATAÇÃO DO LODO

Observou-se que a aclimação do lodo ao efluente foi rápida devido ao fato do vinhoto ser constituído de substratos facilmente biodegradáveis. O BRM foi operado com a concentração do lodo dentro do BRM em torno de 6-7 g/L. Após aclimação da biomassa, iniciou-se a operação do BRM.

OPERAÇÃO DO BRM

Durante os testes de degradação do vinhoto utilizando o biorreator com membranas foram utilizadas membranas de micro ou ultrafiltração para a realização do pré-tratamento e o uso de membranas de microfiltração no interior do biorreator. O tempo de residência avaliado foi de 48 horas com a idade do lodo de 30 dias. A Figura 5 apresenta os resultados do comportamento da DQO para este período de avaliação. De acordo com os resultados obtidos, observa-se que quando o biorreator foi operado utilizando a microfiltração e um tempo de residência de 48 horas, o permeado do biorreator apresentou valores médios de DQO em torno de 619 mg/L (mínimo de 106 mg/L e máximo de 1250 mg/L com desvio padrão de 343 mg/L). Os picos nos valores de DQO do permeado deve-se a problemas operacionais relacionados ao rompimento de algumas fibras no interior do biorreator permitindo a passagem do líquido reacional para o líquido permeado. Logo após a restauração do módulo de microfiltração, deu-se continuidade ao processo. Desta forma a remoção de DQO do vinhoto no BRM se manteve com valores médios em torno de 96,6%. A eficiência de remoção de DQO global (sistema de MF/UF conjugado com BRM) foi de 98,8%.

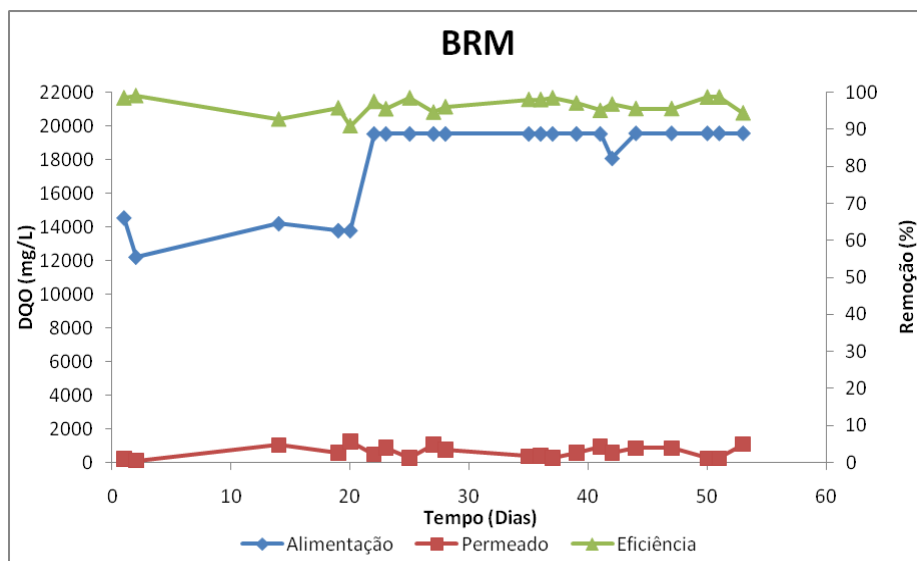


Figura 5: Perfil da DQO do permeado e da eficiência do BRM durante operação em regime permanente.

Na Figura 6 estão representados os dados de sólidos suspensos totais (SST), fixos (SSF) e voláteis (SSV) analisados durante o período de operação do BRM.

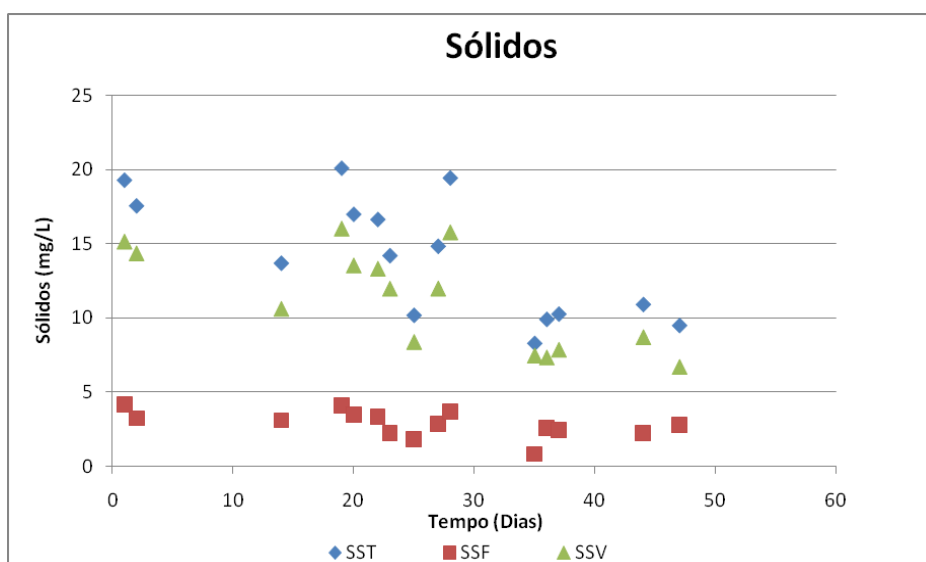


Figura 6: Perfil de sólidos presentes no interior do BRM durante a operação em regime permanente.

Ao longo de todo o tratamento biológico foi utilizado o mesmo lodo. Nota-se que, mesmo mantendo a idade do lodo em 30 dias, houve uma variação nos valores de SST e SSV que pode ter ocorrido devido à variação da carga de matéria orgânica alimentada. A redução da concentração do lodo entre o 28º e o 35º dia de operação se deve à perda de lodo devido à presença de fibras rompidas. Os valores de SSF se mantiveram aproximadamente constantes ao longo de todo o processo.

Na Figura 7 são apresentados os perfis de pressão, fluxo e permeabilidade operacional aplicados durante a operação do BRM. Observa-se uma queda da permeabilidade mesmo com a redução da concentração de sólidos dentro do BRM no estágio inicial da operação do BRM. Esta redução ocorre devido à incrustação da membrana que provavelmente tem uma menor contribuição devido ao depósito do lodo na superfície da membrana e uma maior contribuição de incrustação devido à presença de SMP e EPS, o que justificaria a queda da permeabilidade ou até mesmo a queda do fluxo entre os 44º - 48º dia de operação do BRM mesmo quando a concentração de lodo dentro do BRM se reduziu. Diversos estudos demonstram que os SMP contribuem consideravelmente para a incrustação de membranas (HUANG *et al.*, 2006; LEE *et al.*, 2002; CHANG e LEE., 1998).

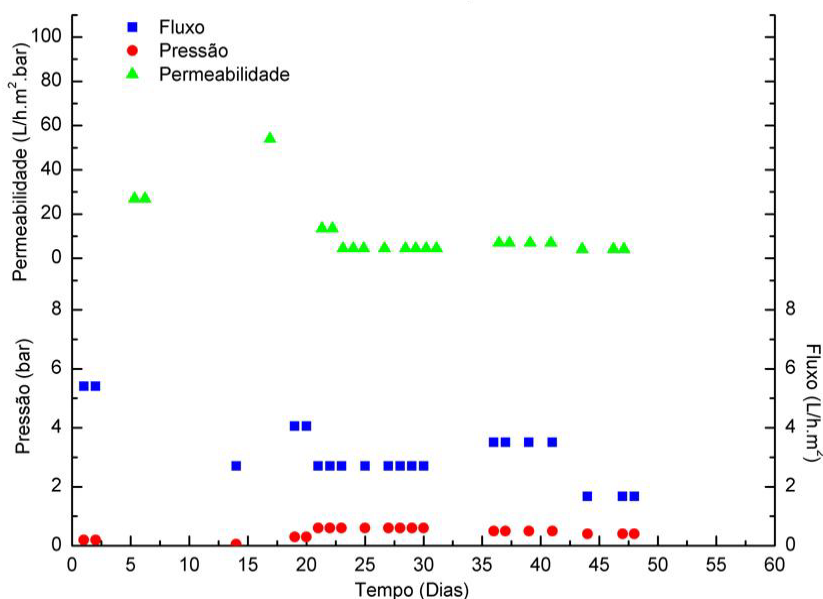


Figura 7: Avaliação da permeabilidade operacional da membrana de microfiltração no BRM.

CONCLUSÕES

O vinhoto se caracteriza pela elevada concentração de matéria orgânica dentre outros poluentes. A UF apresentou eficiência média de remoção de DQO de 63%. Ao conjugar o pré-tratamento de UF com o BRM alcançou-se elevada remoção de matéria orgânica, aproximadamente 98%, o que viabiliza o seu polimento final ou até mesmo o reúso do vinhoto tratado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fapemig (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pela bolsa de Iniciação Científica e Tecnológica (BITIB) concedida e a PAM Membranas Ltda pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition. American Public Health Association, Washington, DC, 2005.
2. CHANG I.S.; LEE, C.H. Membrane filtration characteristics in membrane coupled activated sludge system—the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling. *Desalination*, v.120, p.221–33, 1998.
3. Goldemberg, J.; Coelho, S. T.; Guardabassi, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, Volume 36, Issue 6, June 2008, Pages 2086-2097.
4. HUANG, X.; LIU, R.; QIAN, Y. Behaviour of soluble microbial products in a membrane bioreactor. *Process. Biochem.*, v.36, p.401– 406, 2000.
5. LEE, Y.; CHO, J.; SEA, Y.; LEE, J.W.; AHN, K.H. Modeling of submerged membrane bioreactor process for wastewater treatment. *Desalination*, v.146, p.451–457, 2002.
6. Van Haandel A.C. and Catunda P.F.C. (1994): " Profitability increase of alcohol distilleries by the rational use of byproducts." *Wat.Sci.Tech.*, 29, 8, 106-117.
7. Van Haandel, A. C. Aproveitamento dos subprodutos de destilarias de álcool para proteger o meio ambiente e aumentar a rentabilidade. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, 2000.
8. Van Haandel, A. C. Integrated energy production and reduction of the environmental impact at alcohol distillery plants. *Water Science and Technology*. 2005;52(1-2):49-57.