

II-337 - TÉCNICAS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS DE MEMBRANAS PRESSURIZADOS E SUBMERSOS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES

Luzia Sergina de França Neta⁽¹⁾

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/UFRJ. Prof.^a do Departamento de Química - CEFET-MG.

Miriam Cristina Santos Amaral

Engenheira Química pela Universidade Federal de Minas Gerais, Mestre e Doutora em Engenharia Química pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais. Prof.^a Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG.

Endereço⁽¹⁾: Av. Amazonas, 5253, Sala 401. Nova Suíça. Belo Horizonte. MG. 30.421-169. Brasil. Tel. + 55 (31) 3319-7151 - Fax: + 55 (31) 3319-7142 - e-mail: lsfranca@deii.cefetmg.br.

RESUMO

O baixo fluxo permeado ainda é um fator limitante para consolidação dos processos de separação por membrana (PSM) como tecnologia para tratamento de efluentes. O baixo fluxo permeado deve-se a fatores inerentes a esse processo de separação como a polarização de concentração e a formação de incrustações. Outro fator relacionado ao baixo fluxo deve-se a configuração do permeador utilizando uma determinada quantidade de membranas em seu interior que poderá melhorar ou prejudicar o escoamento do líquido em seu interior. Durante o processo de filtração ocorre a formação da torta mediante a exclusão do material particulado presente na suspensão que ao longo do processo atua como uma resistência adicional ao processo de filtração, influenciando diretamente na redução do fluxo permeado. A determinação das condições limites operacionais são importantes para que durante o processo de filtração os módulos não sejam operados acima desses limites que resultam diretamente no aumento da espessura da torta e no aumento de pressão aplicada para compensar essa resistência adicional, resultando diretamente no aumento do consumo energético. Diante dessas limitações, a caracterização dos módulos de permeação visando à determinação de vazão de escoamento em módulos pressurizados ou a vazão de aeração em módulos submersos, bem como a determinação da pressão de operação ideal são de fundamental importância para obtenção de fluxos sustentáveis, economicamente viáveis e por longo período de tempo. Neste trabalho foram avaliadas mediante ensaios laboratoriais as condições limites operacionais de módulos pressurizados e submersos. Essas condições limites foram avaliadas mediante determinação da concentração gel e do fluxo crítico para os módulos pressurizados e submersos, respectivamente. A determinação desses parâmetros permite que os módulos possam ser operados em condições operacionais viáveis que influenciam diretamente no controle da espessura da torta formada sobre a superfície da membrana resultando em um ótimo desempenho operacional dos biorreatores a membranas com módulos pressurizados ou submersos.

PALAVRAS-CHAVE: Separação por membranas, módulos pressurizados, módulos submersos, concentração gel, fluxo crítico.

INTRODUÇÃO

A legislação ambiental se apresenta cada vez mais restritiva quanto aos padrões de lançamento de efluente aliado a demanda crescente pelo reuso de água. Estas restrições fazem com seja necessário o estabelecimento de sistemas de tratamento de efluentes cada vez mais eficientes para atender a estes objetivos. Neste cenário os processos de separação por membranas (PSM) surgem como uma alternativa promissora para atender a estas expectativas por permitirem a obtenção de uma melhor eficiência resultando na melhoria na qualidade do efluente tratado além de apresentarem sistemas compactos que requerem pequena área de instalação e de fácil operação. Os PSMs podem atuar diretamente na redução de carga mediante uso de biorreatores a membranas ou simplesmente como processo de polimentos para redução de material particulado.

Os PSM são processos que utilizam uma barreira seletiva (membrana) que sob a ação de uma força motriz podem promover a separação de determinados componentes de uma solução ou suspensão. Inúmeras vantagens fizeram com que os PSM adquirissem “status” de processo comercial, tais como economia de energia, alta seletividade, separação de termolábeis e simplicidade operacional (DAVIS, 1992, HABERT *et al.*, 2003).

O baixo fluxo permeado foi, a princípio, um fator limitante à conquista desses processos no mercado. Este baixo fluxo deve-se a fatores inerentes como a polarização de concentração e formação de incrustações (DAVIS, 1992). Diversos estudos foram realizados a fim reduzir esses fatores que resultam na resistência ao transporte através da membrana. Outro fator limitante está relacionado ao desconhecimento desta tecnologia que resulta na operação inadequada dos sistemas.

A polarização de concentração ocorre devido ao aumento da concentração dos componentes retidos na interface membrana/solução. Independente do modo de operação (filtração frontal ou tangencial) ou da configuração do módulo (pressurizado ou submerso), este efeito ocorre devido à seletividade da membrana ao soluto, resultando no aumento da concentração das espécies retidas próximo à superfície da membrana (BAKER, 2004). Este fenômeno é responsável pelo decréscimo do fluxo permeado, diminuição da seletividade da membrana e da formação de resistências adicionais como a formação da camada gel, caso os solutos excedam seu limite de solubilidade.

A configuração e o modo operacional do módulo de permeação também influenciarão na redução do fluxo permeado, caso o mesmo não seja corretamente empregado. Uma forma de contornar essas limitações está relacionada com a operação adequada dos sistemas, bem como a utilização de membranas que proporcione uma baixa tendência a incrustação. A utilização de módulos submersos ou pressurizados promove desta forma fluxos permeados constantes e sustentáveis economicamente. A melhoria na hidrodinâmica pode ser traduzida em termos do aumento da velocidade de escoamento em módulos pressurizados ou no controle da vazão de ar em módulos submersos.

Este trabalho tem como objetivo avaliar módulos pressurizados e submersos em termos de concentração da camada gel e do fluxo crítico para módulos pressurizados e submersos, respectivamente. Para realização dos testes de caracterização foram utilizados módulos contendo membranas de microfiltração e a suspensão modelo era constituída de *Saccharomyces cerevisiae* e bentonita que simulava a concentração do lodo dentro de um reator biológico.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

POLARIZAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO E FORMAÇÃO DE INCRUSTAÇÕES

A polarização de concentração ocorre devido ao aumento da concentração dos componentes retidos na interface membrana/solução, é um fenômeno inerente aos PSM. Este efeito ocorre devido à seletividade da membrana ao soluto, resultando no aumento da concentração das espécies retidas próximo à superfície da membrana (BAKER, 2004, CHERYAN, 1998, DAVIS, 1992, HABERT *et al.*, 2006, MATSON, 1995). A Figura 1 ilustra a região polarizada próxima à superfície da membrana, representando o perfil de concentração da espécie retida.

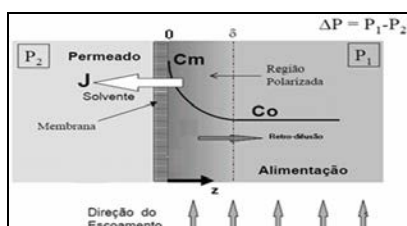


Figura 1: Região polarizada próxima à superfície da membrana. Condição de regime estabelecido no processo de microfiltração.

Em condições de regime estabelecido, o fluxo convectivo que arrasta os solutos em direção a superfície da membrana é igual ao fluxo difusivo dos solutos da região polarizada para o seio da solução. A polarização de concentração é tida como um processo reversível (BELFORT *et al.*, 1994, DAVIS, 1992). Em virtude do

aumento da concentração de soluto na interface membrana/solução, normalmente, observa-se um valor limite para o fluxo permeado com o aumento da pressão de operação do sistema, como representado na Figura 2. Isto ocorre devido à polarização de concentração, que aumenta a resistência ao transporte e compensa o aumento na força motriz (BAKER, 2004).

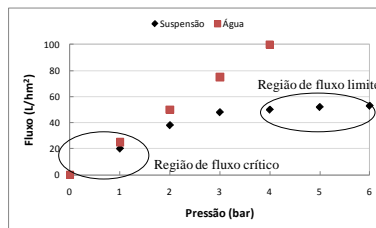


Figura 2: Fluxo permeado em função da pressão aplicada. Região de fluxo limite e fluxo crítico.

Os PSMs devem ser operados a pressões inferiores a que ocasiona o fluxo limite ou, caso contrário, apenas resultará em gastos desnecessários de energia. O valor da pressão no qual ocorre o fluxo limite é dependente do grau de polarização do sistema, da hidrodinâmica, da geometria do módulo e das características da suspensão ou do soluto em questão.

DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO GEL

A camada gel é caracterizada por uma região próxima a superfície da membrana na qual pode ocorrer a gelificação devido ao aumento da concentração do soluto retido. Em função desse fato foi formulado o modelo da camada gel que considera uma camada estagnada próxima à superfície da membrana. Este modelo é utilizado para predição do fluxo limite em módulos de membranas. Ao atingir as condições de fluxo limite o aumento da pressão operacional do sistema não resultará no aumento do fluxo permeado e resultará no aumento do gasto energético. O ideal em termos operacionais é o operar o sistema abaixo das condições de fluxo limite e o mais próximo da condição de fluxo crítico (Figura 2).

De acordo com a Figura 3a, observa-se que para baixos valores de pressão, o fluxo permeado é reduzido, assim como o efeito da polarização de concentração, não propiciando condições para a formação da camada gel sobre a superfície da membrana. Com o aumento da pressão de operação, a polarização de concentração torna-se mais significativa ocorrendo, a formação da camada gel. Com a formação da camada gel, atinge-se a região de fluxo limite, onde o aumento da pressão de operação resultará apenas no aumento da espessura da camada gel e não no aumento do fluxo permeado (BAKER, 2004, HABERT *et al.*, 2006).

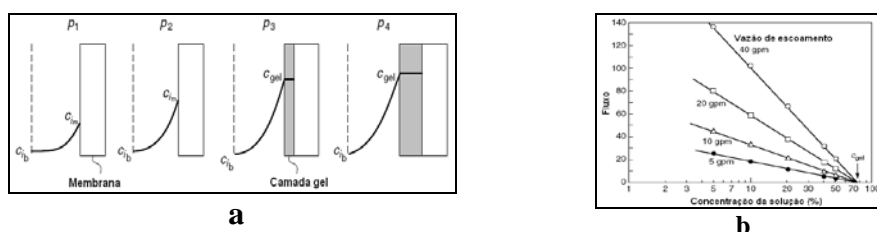


Figura 3: (a) Aumento da espessura da camada gel com o aumento da pressão de operação. $P_1 < P_2 < P_3 < P_4$. (b) Fluxo permeado versus a concentração da solução. Determinação da concentração gel e do coeficiente de transferência de massa.

Com base nessas informações e de acordo com a Equação 1, considera-se que a concentração do soluto no fluxo permeado é igual a zero e desta forma o fluxo limite pode ser aproximado por:

$$J_{lim} = k \ln \left(\frac{C_{gel}}{C_b} \right) \quad (1)$$

Onde J_{lim} é o fluxo limite, k é o coeficiente de transferência de massa, C_{gel} é a concentração gel próxima a superfície da membrana e C_b é a concentração do soluto no seio da solução. Esta equação nos permite determinar o coeficiente de transferência de massa mediante determinação da concentração gel e do fluxo

limite. As condições da hidrodinâmica do módulo, concentração da solução ou suspensão, quantidade de membranas no interior do módulo irão influenciar diretamente no desempenho do coeficiente de transferência de massa. Com a determinação da concentração gel e rearranjando a Equação 1 é possível determinar o coeficiente de transferência de massa experimentalmente.

$$J_{lim} = -k(\ln c_b - \ln c_{gel}) \quad (2)$$

A partir da relação entre a concentração da solução e o fluxo limite é possível determinar a concentração gel na superfície da membrana. Para uma dada condição hidrodinâmica, a concentração gel é obtida por extrapolação para a condição em que J_{lim} é igual a zero (BAKER, 2004) e o coeficiente de transferência de massa é obtido a partir do coeficiente angular desta reta, como indicado na Figura 3b.

FLUXO CRÍTICO

De acordo com Field *et al.* (1995) o fluxo crítico para microfiltração é o fluxo abaixo do qual não é observado declínio do fluxo com o tempo e acima do qual ocorre incrustação, e seu valor depende da hidrodinâmica do processo. Alguns autores sugerem que para fluxos inferiores ao fluxo crítico não há incrustação por partículas coloidais e tanto a diferença de pressão através da membrana quanto o fluxo permeado permanecem constantes. O fluxo crítico tem sido obtido principalmente através de medidas de fluxo de permeado e da diferença de pressão através da membrana (TMP), Figura 4.

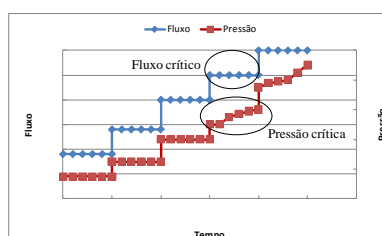


Figura 4: Determinação do fluxo crítico mediante medidas de fluxo versus diferença de pressão.

O fluxo crítico é determinado quando se observa a variação da pressão com o tempo para um dado de valor de fluxo quando este é fixado em intervalos fixo de tempo ou vice e versa, neste momento inicia-se a formação da torta que resulta na elevação da pressão de operação para manter o fluxo de permeado constante, como observado na Figura 5. Em processos de filtração, sempre se deseja um fluxo alto de permeado, entretanto um fluxo alto pode significar alta taxa de incrustação e o ideal é operar os sistemas de permeação abaixo do fluxo crítico a fim de evitar o efeito da incrustação na superfície da membrana que é inerente a esses processos. Operar o sistema abaixo do fluxo crítico e atuando na melhoria da hidrodinâmica é possível obter valores de fluxo permeado estáveis por longos intervalos de tempo. A determinação do fluxo limite e do fluxo crítico em módulos de membrana é de fundamental importância para determinação tanto da pressão de operação quando da condição hidrodinâmica para obtenção de fluxos estáveis e economicamente viáveis.

METODOLOGIA

Os módulos pressurizados foram submetidos a ensaios de permeação para determinação da concentração gel e esse parâmetro foi utilizado para determinação do coeficiente de transferência de massa em seu interior. Nos módulos submersos foram submetidos a testes de permeação variando a vazão de ar no interior dos módulos. Foi utilizada como suspensão modelo uma suspensão modelo contendo *Saccharomyces cerevisiae* para os módulos pressurizados e submersos. O fluxo crítico nos módulos submersos foi caracterizado utilizando uma suspensão de bentonita. A seguir é apresentada a metodologia utilizada para realização dos ensaios experimentais.

MEMBRANAS NA FORMA DE FIBRA OCA

Para a realização dos testes experimentais em meios porosos, foram utilizadas membranas porosas do tipo fibra oca. As membranas de fibra oca foram fornecidas pela PAM Membranas Seletivas, tendo com base a poli (éter imida)- PEI.

MÓDULOS DE PERMEAÇÃO

Os módulos de permeação foram preparados numa conformação semelhante a um trocador de calor tipo casco e tubo para os módulos pressurizados e para os submersos as fibras foram dispostas verticalmente no interior de uma carcaça de PVC apresentando duas janelas onde ocorria o contato do líquido com a superfície das fibras. Os módulos pressurizados apresentavam um comprimento de 20 cm e densidade foi variada em 500, 1.000 e 1.500 m^2/m^3 . Os módulos submersos apresentavam uma altura de janela de 14 cm e a densidade de empacotamento foi mantida em 500 m^2/m^3 , porém variou-se a área de aeração. As fibras foram fixadas no interior da carcaça de PVC mediante utilização de uma resina epóxi (Adesivo Araldite 24Hs - Vantico). A resina de vedação também serve como uma barreira que separa a alimentação do permeado, Figura 5.



Figura 5: (a) Seção transversal do módulo de permeação; (b) Fibras dispostas longitudinalmente no interior da carcaça de PVC; (c) Módulo submerso fibras dispostas verticalmente no interior da carcaça – resina epóxi nas extremidades do módulo.

SISTEMA MODELO

Os testes de permeação foram realizados utilizando uma suspensão contendo *Saccharomyces cerevisiae* obtida através de um fermento biológico liofilizado – Fermipan. A concentração da alimentação foi variada em 0, 5, 1 e 2 (% m/m) para os módulos submersos a concentração foi de 1% m/m. Para os melhores resultados obtidos com a suspensão de levedura em módulos submersos foi realizado o teste de fluxo crítico utilizando uma suspensão contendo bentonita a uma concentração de 0,5 % m/m.

SISTEMA DE PERMEAÇÃO

O sistema de permeação utilizado para os módulos pressurizados explora o escoamento tangencial da alimentação no interior do módulo de permeação. O escoamento tangencial visa à redução da camada polarizada sobre a superfície da membrana, bem como a redução do acúmulo de material. O sistema de permeação para o módulo submerso explorava a variação de aeração próxima a superfície da fibra objetivando a determinação da melhor vazão de escoamento visando a redução da espessura da camada de torta formada sobre a superfície da fibra. A Figura 6 apresenta um esquema do sistema de permeação tanto para o módulo pressurizado quanto para o módulo submerso.

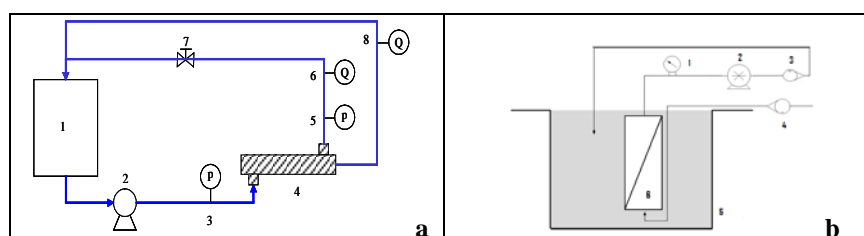


Figura 6: Sistema de microfiltração com escoamento tangencial. (a) 1 - tanque de alimentação, 2 - bomba centrífuga, 3 e 5 - manômetros, 4 - módulo de permeação, 6 - válvula para pressurização, 7 - rotâmetro alimentação e 8 - rotâmetro permeado; (b) 1 - manovacuômetro, 2 - bomba de vácuo, 3 - rotâmetro, 4 - rotâmetro para ar, 5 - tanque de alimentação e 6 - módulo submerso.

VARIÁVEIS INVESTIGADAS

As variáveis investigadas para avaliação das condições operacionais para os módulos de membrana foram à vazão de escoamento e a densidade de empacotamento das fibras no interior dos módulos pressurizados. A densidade de empacotamento relacionada à área de membrana por volume de carcaça (m^2/m^3). Nos módulos

submersos O sistema de permeação utilizado para os módulos pressurizados explorava o escoamento tangencial da alimentação no interior do módulo de permeação. O regime de escoamento (Re) foi variado em 5.000, 3.000, 1.000 e 500, a concentração da alimentação em 0,5, 1 e 2 (% m/m) e pressão de 0 a 2,0 bar. Para os módulos submersos, a concentração da alimentação foi fixada em 10 g/L para suspensão contendo levedura operando e uma pressão de 0,2 bar. Variou-se a vazão de aeração em 1, 2 e 3 Nm³/h. Os melhores resultados para a vazão de aeração foram testados para uma suspensão contendo bentonita a 5 g/L. O escoamento tangencial nos módulos pressurizados visava à redução da camada polarizada sobre a superfície da membrana, bem como a redução do acúmulo de material, enquanto que no sistema de permeação para o módulo submerso a redução da espessura da torta foi investigada mediante variação de aeração próxima a superfície da fibra.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO GEL E DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM MÓDULOS PRESSURIZADOS

Os testes de permeação foram realizados variando a concentração da alimentação em 0,5, 1 e 2 (% m/m) e o regime de escoamento (Re) foi variado de laminar a turbulento com valores de 5.000, 3.000, 1.000 e 500. Os valores de fluxo limite foram determinados para cada condição de escoamento e para cada concentração da alimentação. O fluxo limite foi obtido a partir da construção de gráficos semelhante ao da Figura 2. A Tabela 1 apresenta os resultados de fluxo limite para as densidades de empacotamento de 1.000 e 1.500 m²/m³. O fluxo limite foi determinado para uma condição operacional de pressão de 2,0 bar e uma temperatura média de 26°C.

Tabela 1: Valores de fluxo limite para o módulo de permeação de 1.000 m²/m³ e 1.500 m²/m³.

	De = 1.000 m ² /m ³				De = 1.500 m ² /m ³			
Re	5.000	3.000	1.000	500	5.000	3.000	1.000	500
C (% m/m)	Fluxo (L/hm ²)	Fluxo (L/hm ²)	Fluxo (L/hm ²)	Fluxo (L/hm ²)	Fluxo (L/hm ²)	Fluxo (L/hm ²)	Fluxo (L/hm ²)	Fluxo (L/hm ²)
0,5	20,2	15,9	13,0	11,6	17,7	15,4	10,59	8,7
1	15,9	13,0	10,1	7,2	12,5	10,6	8,66	7,7
2	11,6	8,7	7,2	5,8	8,7	7,7	4,81	3,8

A partir dos resultados de fluxo limite apresentados na Tabela 1 os gráficos do fluxo limite em função da concentração foram obtidos para determinação da concentração gel. Para obtenção da concentração gel foram plotados os gráficos que determinam os valores da concentração gel para os módulos de 1.000 e 1.500 m²/m³. As Figuras 8a e 8b apresentam os resultados para a concentração gel em cada módulo de permeação.

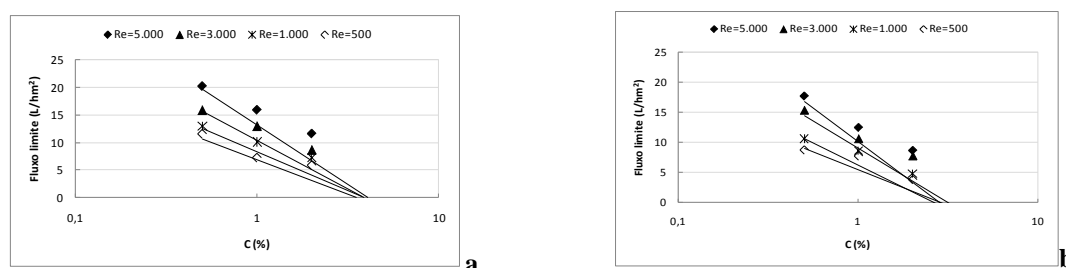


Figura 8: Determinação da concentração gel em um gráfico de fluxo permeado em função da concentração de levedura a uma pressão de operação de 2,0 bar. a) densidade de empacotamento de 1.000 m²/m³ e b) densidade de empacotamento de 1.500 m²/m³.

Diante dos valores da concentração gel e dos valores de fluxo limite e com o auxílio da Equação 2 foi possível determinar o valor médio do coeficiente de transferência de massa em cada módulo de permeação e para cada condição de escoamento. A Tabela 2 apresenta os valores do coeficiente de transferência de massa calculado para cada condição. De acordo com os resultados obtidos da Tabela 2, observa-se que o maior valor da concentração gel e do coeficiente de transferência de massa foi obtido para a menor densidade de empacotamento. Estes valores obtidos indicam uma melhor distribuição do líquido no interior do permeador pressurizado, bem como que o mesmo é capaz de operar em condições limites de concentração superior ao de maior densidade. Como observado na Tabela 2, os módulos de maior densidade apresentam uma concentração

gel inferior ao de maior densidade, este resultado é indicativo de uma má distribuição do fluido no interior do módulo resultando em uma má atuação da hidrodinâmica na redução da espessura da camada de torta formada próximo a superfície da membrana que reflete na diminuição do coeficiente de transferência de massa.

Tabela 2: Valores da concentração gel e do coeficiente de transferência de massa para o módulo de permeação de 1.000 m²/m³ e 1.500 m²/m³.

	De = 1.000 m ² /m ³		De = 1.500 m ² /m ³	
Re	C _{gel} (%)	K(m/s)	C _{gel} (%)	K(m/s)
5.000	12,8	3,55 x 10 ⁻⁶	7,8	2,17 x 10 ⁻⁶
3.000	11,1	3,07 x 10 ⁻⁶	7,6	2,10 x 10 ⁻⁶
1.000	11,3	3,14 x 10 ⁻⁶	6,9	1,90 x 10 ⁻⁶
500	7,1	1,98 x 10 ⁻⁶	7,0	1,93 x 10 ⁻⁶

INVESTIGAÇÃO DA VAZÃO DE AERAÇÃO EM MÓDULOS SUBMERSOS

O módulo submerso foi confeccionado mantendo-se constante a densidade de empacotamento em 500 m²/m³ que era equivalente a uma área de permeação de 0,5 m². A vazão do ar no interior das fibras foi variado em 1, 2 e 3 Nm³/h e foi utilizado como solução teste uma suspensão contendo levedura liofilizada (*Saccharomyces cerevisiae* – Fermipan) a uma concentração de 10g/L a uma pressão de 0,2 bar por 2h. Os resultados obtidos para os fluxos de permeado estáveis para cada módulo encontram-se na Tabela 3 e representados graficamente na Figura 9a.

Tabela 3: Fluxo permeado estável para o módulo submerso.

Módulo	Fluxo de ar (Nm ³ /h.m ²)			Fluxo permeado (L/h.m ²)		
1	1,1 x 10 ⁵	2,2 x 10 ⁵	3,3 x 10 ⁵	18	-	18
2	5,5 x 10 ⁴	1,1 x 10 ⁵	1,6 x 10 ⁵	42	41	45
3	2,7 x 10 ⁴	5,5 x 10 ⁴	8,3 x 10 ⁴	17	24	30
4	1,8 x 10 ⁴	3,7 x 10 ⁴	5,5 x 10 ⁴	48	72	-

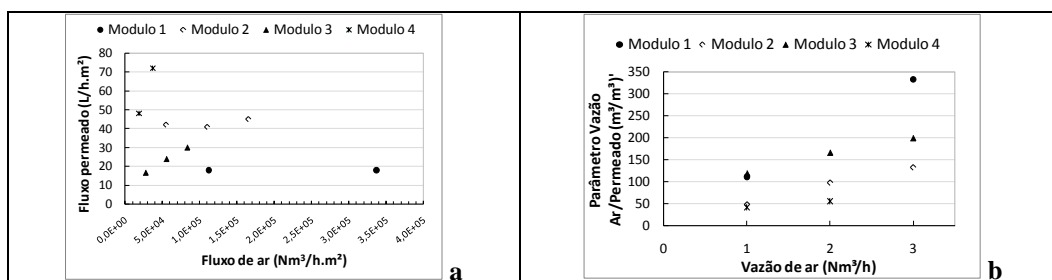


Figura 9: (a) Fluxo permeado estável em função do fluxo de ar injetado e (b) parâmetro de eficiência do módulo submerso.

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 3, observa-se um aumento do fluxo permeado ao se comparar o módulo 1 com o módulo 2 evidenciando a melhora na eficiência do fluxo permeado devido ao aumento do fluxo de aeração na base do módulo submerso. Ao se comparar o módulo 2 com o módulo 3, observa-se uma redução deste fluxo, este resultado deve-se a uma má distribuição do ar na base do módulo, propiciando regiões com elevada tendência a incrustação promovendo um menor fluxo permeado. O ideal seria a observação de um valor maior ou semelhante aos fluxos obtido no módulo 2. Este resultado se comprova quando se compara o resultado do módulo 4 com o módulo 3, onde foi possível observar o aumento do fluxo permeado. O aumento do fluxo permeado está relacionado com o aumento da vazão de aeração que atua de forma cisalhante próximo a superfície das fibras reduzindo dessa forma a espessura da camada polarizada e elevando os valores de fluxo permeado. A Figura 9a apresenta o gráfico do comportamento do fluxo permeado estável em função do aumento do fluxo de ar na base do módulo submerso. O parâmetro de eficiência utilizado para a relação fluxo permeado produzido por vazão de ar aplicada, foi o mesmo atribuído por Le-Clech *et al* (2006), em que este parâmetro não deverá ultrapassar o valor de 50 para módulos submersos constituídos por membranas de fibra oca. A Figura 9a apresenta este resultado em função da vazão de aeração para este parâmetro.

Com base no parâmetro do fluxo permeado por vazão de aeração, o módulo 2 foi selecionado para o teste de fluxo crítico utilizando uma suspensão contendo bentonita a uma concentração de 5 g/L. A Figura 10 apresenta o resultado obtido para este teste.

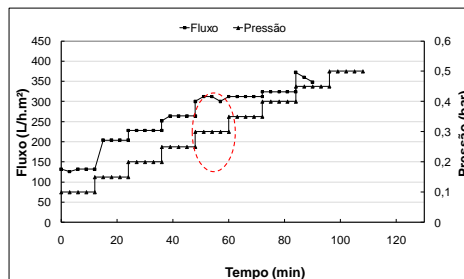


Figura 10: (a) Fluxo permeado estável em função do fluxo de ar injetado e (b) parâmetro de eficiência do módulo submerso.

Os dados do fluxo permeado apresentados na Figura 10 indicam que para uma concentração de 5 g/L de bentonita e uma vazão de ar de 1 Nm³/h a pressão crítica do sistema foi de 0,3 bar de pressão. Este valor é indicativo que o sistema para operar em condições ótimas operacionais valores de pressão acima de 0,3 bar não deverão ser empregados. Acima desses inicia-se a formação da camada de torta próxima a superfície da membrana reduzindo de forma considerável os valores de fluxo permeado com o tempo.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, observa-se que para obtenção de resultados viáveis de fluxo permeado em função do tempo é necessário que ocorra uma caracterização prévia do módulo de permeação independente da sua configuração e da suspensão que será processada. A hidrodinâmica do sistema é preponderante para obtenção de fluxos sustentáveis por um longo intervalo de tempo. As técnicas de caracterização dos módulos permitem a operação de biorreatores a membranas ou sistemas para polimento do efluente tratado visando a redução de particulados de forma sustentável, permitindo dessa forma a minimização do efeito da formação da torta sobre a superfície da membrana.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pela concessão de recursos e bolsas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BACCHIN, P., AIMAR, P., FIELD, R. W. Critical and sustainable fluxes: theory, experiments and applications. J. Memb. Sci., 2006, Article in press.
2. BAKER, R. W. Membrane Technology and Applications. Second Edition. John Wiley & Sons, 2004. ISBN: 0-470-85445-6.
3. BELFORT, G., DAVIS, R. H., ZYDNEY, A. L. The behavior of suspensions and macromolecular solutions in crossflow microfiltration. J. Memb. Sci., n. 96, p. 1-58, 1994.
4. CHERYAN, M. Ultrafiltration and Microfiltration Handbook. Pennsylvania, Technomic, 1998.
5. DAVIS, R.H. Microfiltration. In: WINSTON HO, W.S., SARKAR, K.K., REINHOLD V.N.. (Ed). Membrane Handbook, chapter 8. New York. 1992.
6. HABERT, A. C., BORGES, C. P., NOBREGA, R., 2006, Processos de Separação por Membrana – Série Escola Piloto em Engenharia Química- COPPE/UFRJ. 1ª ed. Rio de Janeiro, e-papers. ISBN 85-7650-085-X.
7. Le-Clech. P, Chen. V., FANE, T. A. G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. Journal of Membrane Science, v.284, n.1-2, p. 17-53, nov. 2006.
8. MATSON, S.L. Membrane bioseparation. In: NOBLE, R.D., STERN, S. A. (Ed). Membrane Separations Technology. Principles and Applications, chapter 8. Elsevier Science. 1995.