



ANÁLISE DE MECANISMOS DE BLOQUEIO DE PORO NA MICROFILTRAÇÃO DA ÁGUA DE PRODUÇÃO

Jader Conceição da Silva

Projeto Final de Curso

Orientadores

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.
Prof. Silvia Maria Cruzeiro da Silva, D.Sc.

Outubro de 2008

ANÁLISE DE MECANISMOS DE BLOQUEIO DE PORO NA MICROFILTRAÇÃO DA ÁGUA DE PRODUÇÃO

Jader Conceição da Silva

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Discente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Cintia Kuhn Schulz, D.Sc.

Cristiano Piasek Borges, D.Sc.

Suely Pereira de Freitas, D.Sc.

Orientado por:

Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Silvia Maria Cruzeiro da Silva, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Outubro de 2008

DA SILVA, Jader Conceição. Análise de Mecanismos de Bloqueio de Poro na Microfiltração da Água de Produção [Rio de Janeiro: UFRJ/EQ], 2008.

xi, 51 p.; il. (Projeto Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2008. Orientadores: Silvia Maria Cruzeiro da Silva e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa.

1. Microfiltração. 2. Modelagem. 3. Processos de Separação por Membranas. 4. Projeto Final de Curso. (Graduação – UFRJ/EQ). Silvia Maria Cruzeiro da Silva e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa.

Aos meus pais pela educação e o amor em minha criação. A presença de vocês foi fundamental para chegada deste momento.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela concretização de um sonho;

Aos meus orientadores pela instrução e paciência dedicada;

Aos amigos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação;

As minhas sobrinhas Lara e Isabella que nos meus momentos de dificuldade traziam alegria e paz com os seus sorrisos;

A Angela pelo carinho, dedicação e paciência nos meus vários momentos de ausência;

Por fim aos meus pais que, com muito trabalho e honestidade, me transmitiram com muito amor, carinho e dedicação a educação necessária para minha formação profissional, solidária e, principalmente, pela transmissão do caráter de uma pessoa humana.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para conclusão do curso de Engenharia Química.

ANÁLISE DE MECANISMOS DE BLOQUEIO DE PORO NA MICROFILTRAÇÃO DA ÁGUA DE PRODUÇÃO

Autor: Jader Conceição da Silva

Agosto de 2008

Orientadores: Prof^ª. Silvia Maria Cruzeiro da Silva, D. Sc.

Prof^º. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D. Sc.

O descarte de efluentes é uma crescente preocupação de vários segmentos industriais. Nas indústrias petrolíferas, são grandes os volumes de água extraídos junto com o petróleo. Esta água, denominada água de produção, necessita de técnicas cada vez mais eficientes para se enquadrar em padrões de descarte e reúso. Neste sentido os processos de separação por membranas (PSM), acompanhados de processos tradicionais, fornecem uma alternativa de tratamento desses efluentes oleosos. A microfiltração é um dos processos de separação por membranas utilizados no tratamento de efluentes oleosos e tem no gradiente de pressão a sua força motriz. O uso deste tipo de tratamento é cada vez mais aplicado devido ao seu baixo custo relativo: as pressões empregadas na separação dificilmente ultrapassam 2,5 atm. Com a finalidade de obter maiores volumes de água tratada e otimizar a utilização das membranas, pesquisas sobre a minimização dos efeitos que diminuem o fluxo de permeado são desenvolvidas no intuito de identificar e propor tratamentos que sejam mais adequados. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo identificar o(s) mecanismo(s) de bloqueio de poro que governam o processo de microfiltração da água de produção de uma unidade da Petrobrás situada no nordeste do Brasil, onde, para isso, será feito uso de modelos encontrados na literatura.

ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
I.1 – Objetivos	4
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
II.1 – Processo de separação por membranas (PSM)	5
II.1.1 – Histórico	5
II.2 – Definição dos PSM que têm no gradiente de pressão a sua força motriz	7
II.2.1 – Microfiltração	8
II.2.2 – Ultrafiltração	8
II.2.3 – Nanofiltração	8
II.2.4 – Osmose Inversa	8
II.3 – Vantagens dos processos de separação por membranas	9
II.5 – Princípios dos processos de separação por membranas	12
II.6 – Reuso de água na irrigação	13
II.7 – Água de produção	14
II.8 – Modelos de bloqueio de poro	14
CAPÍTULO III – EXPERIMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS	21
III.1 – Materiais	21
III.1.1 – Dados técnicos das membranas e do módulo de MF	23
III.1.2 – Estação de tratamento de efluentes (ETE)	24
III.1.3 – Localização da unidade	25
III.1.4 – Análises realizadas	26
III.1.4.1 – Determinação da concentração de óleo	26
III.1.4.2 – Determinação do índice de sedimentáveis (SDI)	26
III.1.4.3 – Determinação do pH	27
III.1.4.4 – Determinação dos sólidos suspensos totais (SST)	27
III.2 – Variáveis analisadas	27
III.3 – Resultados e discussão	28
III.3.1 – Efluente de saída dos filtros de areia	28
III.3.2 – Efluente de saída do separador água/óleo (SAO)	30
III.4 – Conclusões parciais a partir dos resultados obtidos	34

III.4.1 – Efluente oriundo do filtro de areia	34
III.4.2 – Efluente oriundo do separador água-óleo	34
CAPÍTULO IV – MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS NA ANÁLISE	36
IV.1 – Introdução	36
IV.2 – Verificação dos dados experimentais do processo	36
IV.3 – Análise da microfiltração na saída do filtro de areia	37
IV.3.1 – Modelo de bloqueio total de poro	37
IV.3.2 – Modelo de bloqueio interno de poro	39
IV.4 – Análise da microfiltração na saída do separador água-óleo	41
IV.4.1 – Modelo bloqueio total de poro	41
IV.4.2 – Modelo bloqueio interno de poro	43
IV.5 – Justificativa para a escolha dos modelos analisados	44
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	46
V.1 – Análise dos modelos	46
V.2 – Sugestões	47
CAPÍTULO VI – BIBLIOGRAFIA	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1: Distribuição de água no planeta	4
Figura II.1: Membrana porosa e membrana densa	8
Figura II.2: Faixas de separação de separação para MF, UF, NF e OI	12
Figura II.3: Comportamento característico das filtrações convencional e tangencial	14
Figura II.4: Fluxos de permeado. Polarização da concentração e <i>fouling</i>	14
Figura II.5: Ilustração de bloqueios de poro	15
Figura III.1: Vista frontal da unidade de MF	21
Figura III.2: Vista lateral da unidade de MF	22
Figura III.3: Fluxograma da unidade de MF em escala de bancada	22
Figura III.4: Legenda para o fluxograma	22
Figura III.5: Membrana de microfiltração	23
Figura III.6: Estação de Tratamento de Efluentes	24
Figura III.7: Separador Água/Óleo (SAO)	25
Figura III.8: Filtro de Areia	25
Figura III.9: Fluxo de permeado e permeabilidade x tempo de operação (FA)	29
Figura III.10: Fluxo de permeado e permeabilidade (FA)	29
Figura III.11: Fluxo de permeado e permeabilidade x tempo de operação (SAO)	31
Figura III.12: Fluxo de permeado e permeabilidade x tempo de operação (SAO)	32
Figura IV.1: Modelo de bloqueio total de poro – Início da Filtração (FA)	38
Figura IV.2: Modelo de bloqueio de poro total – Final da filtração (FA)	39
Figura IV.3: Modelo de bloqueio interno de poro – Início da filtração (FA)	40
Figura IV.4: Modelo de bloqueio interno de poro – Final da filtração (FA)	40
Figura IV.5: Modelo de bloqueio total de poro – Início da filtração (SAO)	41
Figura IV.6: Modelo de bloqueio total de poro – Final da filtração (SAO)	42
Figura IV.7: Modelo de bloqueio interno de poro – Início da filtração (SAO)	43
Figura IV.8: Modelo de bloqueio de poro interno – Final da filtração (SAO)	44

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela II.1: Principais eventos dos PSM	7
Tabela III.1: Resultados de índice de sedimentáveis – Filtros de areia	30
Tabela III.2: Resultados de índice de sedimentáveis – SAO	32
Tabela III.3: Resultados de TOG com efluente do SAO	33
Tabela IV.4: Coeficientes FA	44
Tabela IV.5: Coeficientes SAO	44

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

(1) Equação geral de HÉRMIA	16
(2) Bloqueio total de poro	16
(3) Bloqueio parcial de poro	16
(4) Bloqueio por formação de torta	17
(5) Bloqueio interno de poro	17
(6) Filtração-não estacionária (<i>Relaxation Model</i>) – Diferencial	17
(7) Filtração-não estacionária – Solução	17
(8) Resistência	18
(9) Índice de Sedimentáveis	26
(10) Fluxo de permeado	27

NOMENCLATURA

$J(t)$	Fluxo de permeado
J_{∞}	Fluxo de permeado no estado estacionário
L_P	Permeabilidade
K_n	Constante referente ao respectivo bloqueio de poro
$(t_0)^{-1}$	Constante de declínio de fluxo
ΔP	Pressão transmembrana
η	Viscosidade
$R_T(t)$	Resistência
SDI	Índice de sedimentáveis
t_1	Tempo necessário para coletar 500 mL (Teste de SDI)
t_{15}	Tempo necessário para coletar 500 mL (Após 15 minutos de teste SDI)
Q	Vazão de permeado
A	Área de permeação
R	Coefficiente de rejeição
C_A	Concentração na alimentação
C_P	Concentração no permeado
SAO	Separador água/óleo
FA	Filtro de areia
TOG	Teor de óleos e graxas
SST	Sólidos suspensos totais

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O lançamento de resíduos industriais tornou-se nos últimos anos um problema ambiental. A falta de procedimentos eficientes para o gerenciamento desses resíduos tem feito surgir uma séria preocupação em relação ao seu impacto no meio ambiente. O controle da geração e descarte dos resíduos é uma crescente preocupação do setor industrial e, por isso, seu tratamento é realizado, de maneira mais intensa, devido à rigorosa legislação ambiental.

Na indústria existe a grande necessidade de separar determinadas substâncias para enquadrá-las em patamares próprios com base na exigência da legislação. Uma velha e, relativa, boa prática é a filtração com seu devido desenvolvimento e aperfeiçoamento. A filtração pode ser definida como um processo de passagem de uma solução ou mistura por um meio poroso com a finalidade de remoção de sólidos suspensos e/ou precipitados químicos. Normalmente o processo de filtração é projetado para separar partículas em suspensão. Mais recentemente os processos de separação por membranas, técnica de filtração que utiliza uma membrana como barreira seletiva na separação, além de separar partículas em suspensão pode ser utilizada até mesmo para remover substâncias que estejam dissolvidas numa solução trazendo desta maneira a vantagem na minimização da utilização de produtos químicos para o tratamento de efluentes.

O impacto causado pela aplicação desta legislação, a pressão da sociedade no rigor das leis e o custo financeiro devido à má prática de geração e descarte têm levado a maioria das empresas à iniciativa de gerenciar e tratar adequadamente os seus resíduos investindo em outras rotas mais eficientes e econômicas como, por exemplo, os processos de separação por membranas. No entanto, as indústrias, com a sua política de minimização de geração de resíduos, tendem a produzir efluentes com novas características. Grande parte desses efluentes precisa de técnicas, que na maioria das vezes são mais complexas e exigem um maior dispêndio de custos.

Das as crises sociais e naturais que os seres humanos possam vir enfrentar, a dos recursos hídricos é a que mais afeta a sobrevivência do ser humano e a do planeta. Um alarmante informe mundial sobre a água foi divulgado oficialmente pela UNESCO, no qual adverte os governos sobre a “inércia política” que só agrava a situação pela permanente redução dos mananciais do planeta, pelo alto grau de poluição e pelo aquecimento global. Segundo Koichiro Matsuura, Diretor Geral da UNESCO, em mensagem por ocasião do Dia Mundial da Água, em março de 2007, “a escassez cada vez maior, e o aumento da competição em torno da água, que ameaçam a paz e a erradicação da pobreza, nos obrigam a procurar um destino mais eficaz e equitativo desse recurso essencial”. Na mensagem, Matsuura lembra que “a escassez de água não é somente resultado de uma carência física de recursos hídricos, mas um fenômeno que se agrava por causa de problemas relativos à gestão dos mesmos pelo governo”.

Neste sentido grandes empresas, públicas e privadas, priorizam cada vez mais, o investimento na conscientização do uso racional dos recursos hídricos. Mesmo com toda essa preocupação, por vezes, é inevitável o uso de grandes volumes de água em alguns setores industriais. Com isso, efluentes das mais variadas composições, são gerados em quantidades proporcionais ao volume de água utilizada necessitando, em alguns casos, de tratamentos específicos.

No setor petrolífero, por exemplo, durante a produção de petróleo e gás natural, volumes substanciais de água salina são produzidos juntamente com o petróleo. Esta água, geralmente, contém quantidades de substâncias de difícil separação e alguns processos convencionais não são suficientes para tratar e atender os requisitos necessários aos tipos de reúso e descarte desta água. Por isso, nos últimos anos, estudos nos processos de separação por membranas têm sido desenvolvidos com a finalidade do tratamento, específico, destes efluentes aquosos.

Devido às exigências cada vez mais rigorosas dos órgãos responsáveis pelo meio ambiente, o enquadramento da água gerada em unidades de produção de petróleo constitui, atualmente, no maior desafio ao enquadramento das indústrias e prestadoras de serviços deste ramo de atividade. Para que sejam atendidos os padrões ambientais de descarte e/ou características necessárias para o reúso da água, o tratamento desta água oleosa se torna uma operação complexa e dependente de processos altamente eficientes.

É dentro desse contexto que os processos de separação por membrana (PSM) são aprimorados para atender os níveis de descarte, reúso e até mesmo potabilidade da água gerada nos mais diferentes segmentos industriais, inclusive o petrolífero.

Atualmente, é grande a quantidade de informações quanto às projeções da falta de água no planeta, juntamente com a ausência desse recurso já observada em um bom número de regiões. Muitas pesquisas em relação ao assunto alertam sobre a gravidade do problema e no que tange a má distribuição desse recurso em nível mundial. Algumas delas fazem até comparações e mostram que num futuro não muito distante a água terá seu valor maior comparado com aquele que hoje é chamado de “ouro negro”, o petróleo.

A escassez de água no mundo é agravada em virtude da desigualdade social e da falta de manejo e usos sustentáveis dos recursos naturais. De acordo com os números apresentados pela ONU – Organização das Nações Unidas – fica claro que, em muitas ocasiões, controlar o uso da água significa deter poder.

As diferenças registradas entre os países desenvolvidos e os em desenvolvimento evidenciam que a crise mundial dos recursos hídricos está diretamente ligada às desigualdades sociais.

Em regiões onde a situação de falta de água já atinge índices críticos de disponibilidade, como nos países do Continente Africano, segundo dados da Companhia de Tecnologia Saneamento Ambiental, ligada a Secretaria Estadual de Meio Ambiente de São Paulo, a média de consumo por pessoa varia em torno de dez a quinze litros de água potável por dia, que para um continente com escassez deste recurso é um consumo relativamente alto. Já em Nova York há um consumo exagerado de água doce tratada e potável, aonde um cidadão chega a gastar, aproximadamente, dois mil litros/dia.

O volume total de água disponível no planeta é da ordem de 1,5 milhões de km³. Deste total, aproximadamente 97,5% correspondem à água salgada, de difícil utilização para abastecimento doméstico, industrial ou irrigação, por necessitar de tratamentos, por exemplo, dessalinização, que, na maioria das vezes têm alto custo. Os restantes 2,5% correspondem à água doce, que está disponível na forma de geleiras (68,9%) e em águas subterrâneas (29,9%). Apenas 0,3% do total existente no planeta está disponível na

condição de água doce na superfície de rios, lagos e em reservatórios subterrâneos pouco profundos que oferecem maior facilidade para utilização humana.

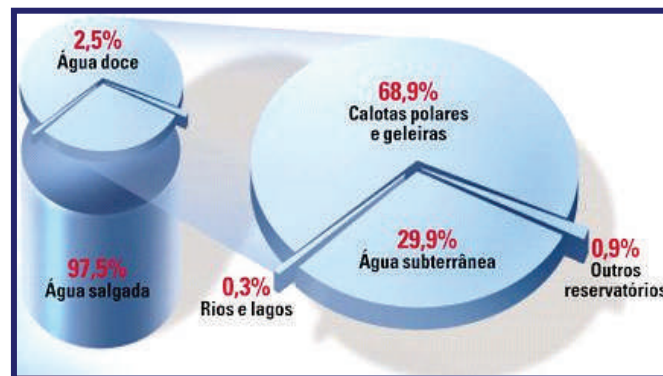


Figura I.1: Distribuição de água no planeta.

Fonte: <http://www.soaresoliveira.br/projetoagua/agua.html>, 2003.

I.1 – Objetivos

Devido ao descarte de efluentes industriais e a busca deste setor por uma maior eficiência em seus procedimentos de tratamento que o presente trabalho tem os seguintes objetivos:

- Analisar os dados experimentais e buscar modelos na literatura que possam descrever os dados obtidos na microfiltração por membrana da água produzida (água oleosa), de um campo de produção de petróleo da Petrobrás, situado no Nordeste Brasileiro, e identificar o mecanismo de bloqueio de poro, visando encaminhar procedimentos para amenizar a queda de fluxo de permeado.
- Verificar se existe a possibilidade da microfiltração ser um pré-tratamento adequado para que o permeado seja tratado em uma unidade de osmose inversa e esta água seja destinada à irrigação.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados alguns aspectos dos processos de separação por membranas, seu desenvolvimento e aplicações, reúso da água para irrigação, definições de água de produção e os modos de operação e suas vantagens. Serão apresentados modelos da literatura referente ao mecanismo de bloqueio de poro colocando as considerações sobre seu uso.

II.1 – Processo de separação por membranas (PSM)

II.1.1 – Histórico

As membranas sintéticas surgiram na tentativa de imitar as membranas naturais, quanto às suas características de seletividade e permeabilidade. Com essa finalidade houve a necessidade de observação experimental do fenômeno de permeação e do desenvolvimento de técnicas de preparo.

O desenvolvimento dos processos de separação por membranas e suas aplicações industriais podem ser considerados relativamente recentes mesmo que ainda sejam estudados há mais de um século. Na realidade, o primeiro registro sobre um estudo relativo a fenômenos que ocorrem com membranas, data de 1748 e se deve a um abade francês de nome Nollet. Na sua experiência, Nollet coloca, em água pura, um copo cheio de um destilado de vinho (para efeito, uma simples mistura de água e etanol), vedado com uma bexiga (membrana) de origem animal. Após certo tempo ele verificou que a bexiga ficou estufada chegando mesmo a romper em alguns casos. (HABERT, 2006)

Ficou evidenciado, pela primeira vez, as características de semi-permeabilidade de uma membrana. A interpretação deste fenômeno, hoje, é relativamente simples: a diferença de potencial químico da água entre os dois lados da membrana (bexiga animal) determina um fluxo preferencial da água para dentro do copo. Como a bexiga é elástica, no início ela se expande, mantendo a pressão dentro do copo. Numa etapa posterior sua elasticidade já é menor e a pressão no interior do copo começa a aumentar,

fazendo com que o potencial químico da água, no interior do copo, aumente. Caso a membrana resista a esta pressão sem se romper, o potencial químico da água, no interior do copo, pode se igualar ao potencial químico da água do recipiente externo ao copo, atingindo-se, assim, o equilíbrio termodinâmico.

Somente em 1855, mais de 100 anos após a experiência de Nollet, Fick publicou sua lei da difusão, que até hoje é utilizada para descrever muitos fenômenos que ocorrem em membranas. Alguns anos mais tarde, Graham estudou a permeação de gases através de borrachas e efetuou as primeiras medidas experimentais de diálise, utilizando membranas sintéticas. Ainda na segunda metade do século retrasado Traube, por volta de 1877, Pfeffer e Van't Hoff estudaram o fenômeno osmótico, que serviu de base para a descrição termodinâmica deste fenômeno, no caso de soluções diluídas – Lei de Van't Hoff. (HABERT, 2006)

Os processos de separação por membranas começaram, realmente, a deixar de ser uma curiosidade científica e de laboratório no final da década de 50. Nesta época começou, nos Estados Unidos, um plano de pesquisa em dessalinização de águas que resultou em, pelo menos, duas descobertas importantes: 1) Reid e Breton (1953) relataram que membranas homogêneas de acetato de celulose, quando utilizadas para osmose inversa, podiam apresentar uma retenção salina elevada, e 2) Loeb e Sourirajan (1960-1962) aperfeiçoaram uma técnica para preparo de membrana, mais tarde chamada técnica de inversão de fase por imersão-coagulação, que podia aumentar muito o fluxo de permeado de água mantendo-o, consideravelmente, elevado.

A experiência de Loeb e Sourirajan mostrou que há uma melhoria na seletividade e na redução da resistência ao transporte das espécies permeantes. Estas alterações indicaram que os processos de separação por membranas, e não somente dessalinização de águas, poderiam ser mais competitivos que os processos de separação tradicionais.

A Tabela II.1 resume os principais eventos que contribuíram para o desenvolvimento da ciência e tecnologia de membranas.

Tabela II.1: Principais eventos dos PSM

1748	Nollet	Utilizou o termo osmose para descrever o transporte de água
1823	Dutrochet	Explicação sobre osmose e diálise
1840	Mitchell	Permeação H ₂ e CO ₂
1866	Graham	Mecanismo solução-difusão (O ₂ , N ₂ , NR)
1877	Traube e Pfeffer	Estudos quantitativos sobre osmose
1887	Van't Hoff	Comportamento de solução diluída
1906	Bechold	Técnica de preparo de membranas microporosas de nitrocelulose
1930	"Sartotius"	Utilização comercial de membranas microporosas
1944	Kolff	Desenvolvimento do primeiro hemodializador
1960	Loeb, Sourirajan, Riley, etc.	Desenvolvimento da base para a tecnologia e ciência de membranas moderna

Fonte: BAKER, 2005

II.2 – Definição dos PSM que têm no gradiente de pressão a sua força motriz

Antes de definir os processos de separação por membranas, cuja força motriz é gradiente de pressão, destacam-se, outros processos que também utilizam membranas, porém, com forças motrizes diferentes do anterior, como por exemplo: Diálise (D), Eletrodiálise (ED), Permeação de Gases (PG) e Pervaporação (PV) que apresentam como força motriz, respectivamente, o gradiente de concentração, potencial elétrico, pressão/concentração e pressão de vapor.

De uma maneira geral, e ampliando o conceito, membranas são meios filtrantes, geralmente produzidos a partir de materiais poliméricos (mas que podem ser constituídos por materiais inorgânicos), que podem apresentar poros de dimensões variadas (membrana porosa) ou não (membranas densas). No caso de apresentarem poros, como já foi citado, o transporte de massa ocorre por convecção como, por exemplo, na micro e ultrafiltração. Quando a membrana não apresenta poros, ou seja, é densa, como a membrana de osmose inversa, o transporte ocorre por difusão. As membranas agem como barreiras seletivas que atuam como uma espécie de filtro. Elas são capazes de promover separações em sistemas onde os filtros comuns não são eficientes. A seguir são dadas as definições dos processos que têm no gradiente de pressão a sua força motriz.

II.2.1 – Microfiltração (MF)

A microfiltração (MF) é o processo de separação com membranas mais próximo da filtração clássica. Utiliza membranas porosas com poros na faixa entre 0,1 e 10 μ m (10^{-7} e 10^{-5} m), sendo, portanto, indicada para retenção de materiais em suspensão e emulsão. Como as membranas de MF são relativamente abertas, as pressões empregadas, como força motriz para o transporte, são pequenas e, dificilmente, ultrapassam 3 atm.

II.2.2 – Ultrafiltração (UF)

A ultrafiltração (UF) é um processo de separação por membrana utilizado quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo macromoléculas. As membranas de UF apresentam poros na faixa 0,01 e 1 μ m (10^{-8} e 10^{-6} m). Como os poros das membranas de UF são menores, uma força motriz maior é necessária para obter fluxos de permeados elevados o suficiente para que o processo possa ser utilizado industrialmente. Por este motivo as diferenças de pressão através da membrana variam na faixa de 1 a 7 atm.

II.2.3 – Nanofiltração (NF)

A Nanofiltração é o processo utilizado quando se deseja separar soluções contendo substâncias de baixo peso molecular. O diâmetro dos poros é da ordem de 0,001 μ m (10^{-9} m). Como o tamanho de poro é menor são necessárias pressões mais elevadas. Na NF as pressões aplicadas giram em torno 5 a 25 atm.

II.2.4 – Osmose Inversa (OI)

A osmose inversa (OI) é o processo de separação por membrana usado quando se deseja reter solutos de baixa massa molar, tais como sais inorgânicos ou pequenas moléculas orgânicas como glicose. Sua principal característica é a ausência de poros, portanto, têm maior resistência à permeação e, conseqüentemente, pressões de operação

mais elevadas do que as utilizadas nos processos anteriores. As pressões de operação giram em torno de 15 a 80 atm.

A Figura II.2 a seguir mostra, resumidamente, as faixas de separação – tamanho de partículas – que ficam retidas em cada processo de separação por membrana que tem no gradiente de pressão a sua força motriz.

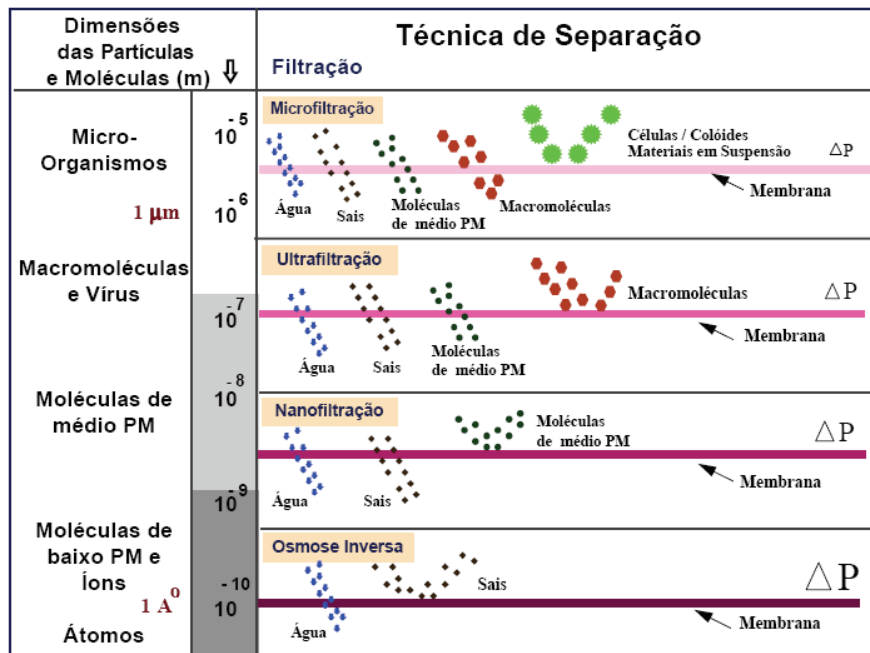


Figura II.2: Faixas de separação de separação para MF, UF, NF e OI. Fonte: HABERT, 2006

II.3 – Vantagens dos processos de separação por membranas

Os PSM atingiram o *status* de processos comerciais devido a uma série de vantagens inerentes a esta tecnologia, como podemos ver a seguir:

- *Economia de energia*: os PSM, em sua grande maioria, promovem a separação sem que ocorra mudança de fase. Neste sentido, podemos considerar que são processos energeticamente favoráveis;
- *Seletividade*: em alguns casos estes processos se apresentam como única alternativa técnica de separação. No entanto, em um grande número de casos, são utilizados processos clássicos combinados com processos com membranas;

- *Separação de Compostos Termolábeis*: como, via de regra, os PSM são operados à temperatura ambiente, podem ser aplicados no fracionamento de misturas envolvendo substâncias termossensíveis;
- *Simplicidade de Operação e Escalonamento*: ao contrário dos processos de separação clássicos, os PSM apresentam a vantagem de serem extremamente simples do ponto de vista operacional e em termos de escalonamento (*scale up*). Os sistemas são modulares e os dados de dimensionamento de uma planta podem ser obtidos a partir de equipamentos pilotos operando com módulos de membrana de mesma dimensão daqueles utilizados industrialmente. Além disso, a operação dos equipamentos com membranas é simples e não intensiva em mão-de-obra.

Dependendo do tipo e da característica do efluente a ser tratado, podemos ter algumas das seguintes aplicações para os PSM: esterilização bacteriana, recuperação de pigmentos, purificação de enzimas, dessalinização de águas, hemodiálise, concentração de soluções salinas, fracionamento do ar e desidratação de álcoois.

II.4 – Tipos de operação para o processo de filtração nos PSM

Uma das principais características dos processos de separação com membranas é que eles podem ser operados em fluxo cruzado ou tangencial (*cross flow filtration*) além da operação convencional do tipo *dead end filtration*. Neste último, uma solução ou suspensão é pressionada contra a membrana.

Na operação convencional o permeado passa pela membrana e o soluto ou os materiais em suspensão são retidos, acumulando-se na interface membrana/solução. Este fenômeno é chamado de polarização de concentração. Da mesma maneira que na filtração clássica, ocorre a formação de uma torta. Trata-se de um modo de operação fundamentalmente transiente, uma vez que há um aumento na polarização.

Na filtração tangencial, a solução escoia paralelamente à superfície da membrana enquanto o permeado é transportado transversalmente à mesma. A polarização de concentração, que em geral é um aumento da concentração de soluto na interface membrana/solução, continua presente mas, neste caso, é possível minimizar o seu

efeito, em particular, alterando-se a hidrodinâmica de escoamento da corrente de alimentação. Na Figura II.3 são apresentados, esquematicamente, os dois modos de operação citados, bem como as curvas típicas de fluxo de permeado em função do tempo, para cada caso.

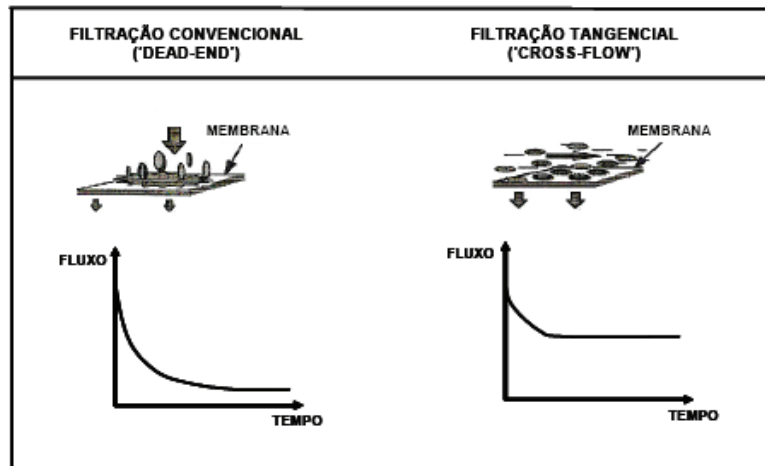


Figura II.3: Comportamento característico das filtrações convencional e tangencial. Fonte: BORGES, 2005.

Na filtração tangencial, o fenômeno da polarização da concentração se estabelece rapidamente, provocando uma queda inicial acentuada do fluxo de permeado. Porém, na maioria dos casos, o que se observa na prática é um decréscimo contínuo do fluxo com o tempo como se pode observar na Figura II.4. Isto indica que outros fenômenos, tais como bloqueio de poros, adsorção de solutos na membrana e depósito de material em suspensão sobre a superfície da membrana, com a formação de uma espécie de torta, estão ocorrendo em adição à inevitável polarização de concentração. A esse conjunto de fenômenos, em parte de natureza irreversível, dá-se o nome de *fouling* por isso, nas aplicações industriais, a filtração tangencial é preferida pela menor tendência ao *fouling* e a uma menor formação de torta.

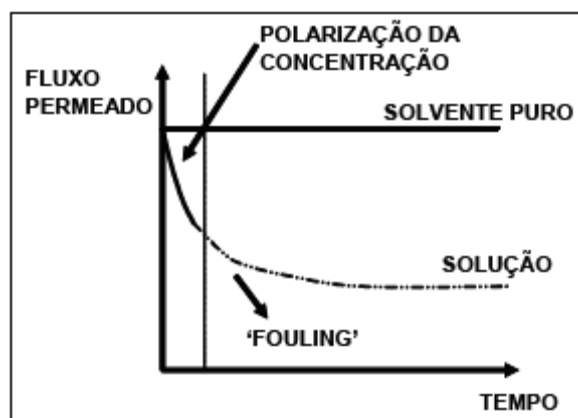


Figura II.4: Fluxos de permeado. Polarização da concentração e *fouling*. Fonte: BORGES, 2006.

II.5 – Princípios dos processos de separação por membranas

A tecnologia de separação por membranas baseia-se no princípio de que os componentes de uma mistura líquida ou gasosa, de acordo com suas características moleculares, passam seletivamente através de uma membrana, orgânica ou inorgânica, sob determinadas condições operacionais.

Diversos fatores contribuíram para o avanço científico e tecnológico dos processos de separação por membranas, ocorrido nos últimos 30 anos. Dentre eles pode-se citar o menor consumo energético, em comparação com os processos tradicionais, a flexibilidade operacional, devido ao fato dos sistemas com membranas serem mais compactos, e a obtenção de produtos finais de melhor qualidade.

As membranas utilizadas nesses processos podem ser classificadas, de acordo com sua estrutura, em densas e porosas como se observa na Figura II.1. Nos processos que utilizam membranas densas, como a pervaporação, separação de gases e osmose inversa, o transporte das espécies ocorre por mecanismo difusivo e a força motriz é o gradiente de concentração ou de pressão de vapor através da membrana. A seletividade é função da afinidade das espécies com o material da membrana e de seus coeficientes de difusão. Por outro lado, nos processos que utilizam membranas porosas, como microfiltração, ultrafiltração e nanofiltração, a força motriz é o gradiente de pressão através da membrana, e o transporte é, fundamentalmente, convectivo. A capacidade seletiva da membrana, neste caso, depende das relações entre o tamanho das espécies e as dimensões dos poros da membrana.

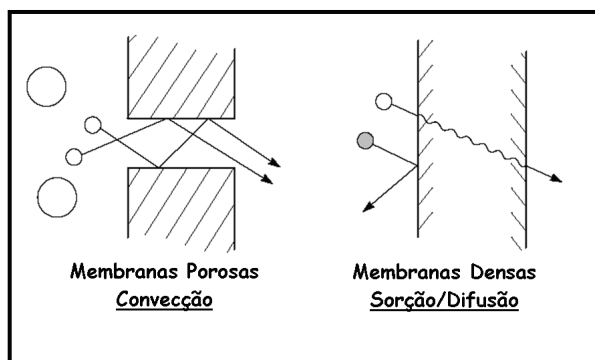


Figura II.1: Membrana porosa e membrana densa. Fonte: BAKER, 2004.

II.6 – Reuso de água na irrigação

Segundo, FERNANDEZ e GARRIDO (2002) considera-se água para a agricultura irrigada o volume desse recurso natural que não é suprido naturalmente por meio de chuvas, sendo necessário à aplicação artificial deste recurso aos cultivos, de forma a otimizar o seu desenvolvimento.

Por meio da irrigação, pode-se intensificar a produção agrícola, regularizando, ao longo do ano, as disponibilidades e os estoques das espécies cultivadas, uma vez que esta prática permite uma produção na contra-estação. Além disso, a agricultura irrigada reduz as incertezas, prevenindo o agente irrigante contra a irregularidade das chuvas.

Previsões em relação ao uso de água são elaboradas de acordo com a quantidade de água e sua utilização. De acordo com ONYANGO (2002), quando chegar o ano de 2025, a retirada de água, principalmente, para usos domésticos, industriais e de pecuária, terá um aumento de pelo menos 50%. Dentro deste contexto o autor ressalta que o aumento limitará severamente a retirada de água para irrigação.

Cerca de 250 milhões de hectares são irrigados no mundo hoje, quase cinco vezes mais do que no início do século XX. A irrigação tem ajudado a aumentar a produção dos campos agrícolas e estabilizar a produção e preços dos alimentos. Mas o crescimento populacional tende a aumentar a demanda por mais água para irrigação, com o objetivo de atender o suprimento de alimentos.

Podemos encontrar algumas considerações relevantes à importância sobre o reúso de água para irrigação. A demanda pela água continuará a aumentar, o retorno das águas servidas e o seu reúso vêm se tornando um componente importante no planejamento, desenvolvimento e utilização dos recursos hídricos, tanto em regiões áridas, como em regiões úmidas BEEKMAN (1996). A utilização das águas servidas para propósitos de uso não potável, como na agricultura, representa um potencial a ser explorado em substituição à utilização de água tratada e potável. Por meio do planejamento integrado dos recursos de águas naturais e águas servidas, a reutilização pode propiciar suficiente flexibilidade para o atendimento das demandas em curto prazo, assim como, assegurar o aumento e garantia no suprimento de longo prazo.

Assim, o reúso de água para diversos fins, incluindo o da irrigação, surge então como alternativa para aumentar a oferta de água, garantindo economia do recurso e racionalização do uso deste bem. Diversos países já utilizam tecnologia de reúso e possuem regulamentação específica na temática. No entanto, considera-se que o Brasil ainda está em fase embrionária na efetivação e regulamentação da técnica, havendo um grande potencial de crescimento.

II.7 – Água de produção

Durante a produção de petróleo e gás natural, volumes substanciais de água salina são produzidos juntamente com o petróleo. Esta água, geralmente denominada de água associada, água de produção ou ainda água de formação, contém uma mistura complexa de materiais orgânicos e inorgânicos, cuja composição varia em função da idade do campo produtor e das diferentes estruturas geológicas que constituem o poço produtor (GARLAND *et al*, 1999). Esta água, por sua vez, apresenta grande quantidade de óleo. A água de produção apresenta alguns sais inorgânicos, cujo teor total excede várias vezes ao da água do mar, sendo o cloreto de sódio responsável por cerca de 80% desses compostos. Além desses sais, cátions como Na^+ , K^+ , Ca^+ , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} e Fe^{2+} e ânions como Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, HCO_3^- , estão presentes na água de produção, acompanhados de metais pesados como cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), níquel (Ni), prata (Ag) e zinco (Zn). Ainda em sua composição, a água de produção traz outros materiais em suspensão, como areia, terra e argila.

II.8 – Modelos de bloqueio de poro

Na literatura encontram-se modelos clássicos que descrevem o declínio do fluxo de permeado devido ao fenômeno de bloqueio de poro, são eles:

- a) Bloqueio total de poro: a entrada do poro é totalmente vedada;
- b) Bloqueio parcial de poro: a entrada do poro é parcialmente obstruída;
- c) Bloqueio de poro por formação de torta: forma-se uma camada (torta) que oferece resistência à passagem do líquido junto com a membrana;
- d) Bloqueio interno (ou contração) de poro: o material no interior do poro, não rejeitado pelo tamanho, é adsorvido ou aprisionado em suas paredes;

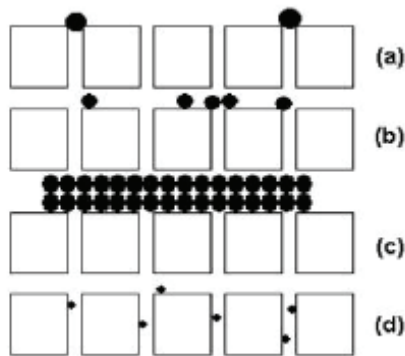


Figura II.5: Ilustração de bloqueios de poro: (a) Bloqueio total de poro, (b) Bloqueio parcial de poro, (c) Bloqueio de poro por formação de torta e (d) Bloqueio interno (ou contração) de poro. Fonte: ALVES, 2005.

É sustentado que, dentre os fenômenos de bloqueio de poro colocados na Figura II.5, não existe qualquer tipo de preferência, ou seja, a ordem colocada acima não é, necessariamente, a ordem do aparecimento destes fenômenos durante o processo de filtração. Contudo, ainda pode haver a predominância de um ou mais fenômenos deste tipo bloqueio.

FIELD *et al* (1995) apresentaram o modelo matemático que descreve o fluxo de microfiltração de água natural. Este modelo baseia-se nas equações clássicas de filtração *dead-end* a pressão constante (HÉRMIA, 1982), que mostra, quando os dados experimentais podem ser representados pelo modelo, o mecanismo de bloqueio de poro mais provável, resultando na seguinte equação diferencial:

$$-\frac{dJ(t)}{dt} = \frac{K_n [J(t) - J_\infty]}{[J(t)]^{n-2}}, \quad (1)$$

onde $J(t)$ é o fluxo no instante t , J_∞ é o fluxo limite, atingido no estado estacionário, K_n é o coeficiente fenomenológico, referente a cada tipo de bloqueio, e n , índice geral, sendo dependente do mecanismo de *fouling*. Os bloqueios de poro podem ser do tipo:

- Bloqueio total de poro ($n = 2$): o mecanismo de bloqueio total de poro acontece quando o diâmetro da partícula é maior que o diâmetro do poro. Desta maneira o poro é totalmente fechado, resultando na seguinte equação:

$$J(t) = J_{\infty} + (J_0 - J_{\infty}) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \quad \text{ou} \quad \ln\left(\frac{J(t) - J_{\infty}}{J_0 - J_{\infty}}\right) = -K_2 \cdot t \quad (2)$$

onde J_0 é o fluxo inicial no tempo ($t = 0$).

De acordo com TODISCO (1996) o bloqueio total de poro reduz a área total de filtração. Dependendo do fluxo cruzado, o fluxo de permeado pode ser restabelecido, ou não, com um aumento de pressão entre a carga de alimentação e o permeado. Uma vez processada a microfiltração, de maneira geral, o fluxo, por mais que se tente exaustivamente limpar a membrana por lavagem, jamais seria restabelecido, pois, fenômenos associados ao *fouling* irreversível impediriam a membrana de retornar ao seu estado inicial, ou seja, completamente limpa.

- Bloqueio parcial de poro ($n = 1$): diferente do bloqueio total de poro o bloqueio parcial de poro acontece quando o tamanho da área de filtração de cada poro é reduzida deixando ainda uma área menor para a filtração, resultando na seguinte equação:

$$K_1 \cdot t = \left(J_{\infty} \cdot \left[\ln\left(\frac{J_0 - J_{\infty}}{J_0} \cdot \frac{J(t)}{J(t) - J_{\infty}} \right) \right] \right)^{-1} \quad (3)$$

- Bloqueio de poro por formação de torta ($n = 0$): este tipo de bloqueio ocorre quando as partículas não entram nos poros da membrana formando uma torta em sua superfície a qual, junto da membrana, causa uma resistência que é composta pela contribuição da membrana e da torta. Esse fenômeno de bloqueio resume-se na equação:

$$K_0 \cdot t = \frac{1}{J_{\infty}^2} \cdot \left[\ln\left(\frac{J(t)}{J_0} \cdot \frac{J_0 - J_{\infty}}{J(t) - J_{\infty}} \right) - J_{\infty} \cdot \left(\frac{1}{J(t)} \cdot \frac{1}{J_0} \right) \right] \quad (4)$$

- Bloqueio interno de poro ($n = 1,5$ e $J_{\infty} = 0$): no bloqueio interno de poro as partículas entram nos poros e são depositadas e/ou adsorvidas, reduzindo dessa maneira o volume de poro. Neste caso a resistência da membrana aumenta como

conseqüência da redução do tamanho de poro. A equação para este mecanismo é mostrada a seguir:

$$\frac{1}{[J(t)]^{0,5}} = \frac{1}{J_0^{0,5}} + K_{1,5} \cdot t \quad (5)$$

KONIECZNY (2002) usou o modelo de resistência e filtração não-estacionária (*Relaxation Model*) no qual o decréscimo do fluxo de permeado na filtração de água natural é descrito pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{d}{dt}(J(t) - J_\infty) + \frac{1}{t_0}(J(t) - J_\infty) = 0, \quad (6)$$

sendo sua solução;

$$\frac{J(t) - J_\infty}{J_0 - J_\infty} = e^{-\frac{t}{t_0}} \quad \text{ou} \quad \ln\left(\frac{J(t) - J_\infty}{J_0 - J_\infty}\right) = -\frac{t}{t_0}, \quad (7)$$

onde $\frac{1}{t_0}$ é a constante característica do declínio de fluxo.

Um outro modelo capaz de representar o mecanismo de *fouling* é o modelo de resistência hidráulica, o qual relaciona o fluxo de permeado através da membrana com a viscosidade da carga de alimentação e a resistência total do processo causada pela membrana e os fenômenos ocorridos na interface, associando cada comportamento característico da resistência, a um provável mecanismo de bloqueio de poro e/ou *fouling*. A equação, considerada relativamente simples, é mostrada adiante (LI, 2006):

$$J(t) = \frac{\Delta P}{\eta \cdot R_T(t)}, \quad (8)$$

onde ΔP é a pressão transmembrana, η é a viscosidade da carga, $R_T(t)$ é a resistência do conjunto.

A consequência da polarização de concentração e da incrustação é a queda no valor do fluxo de permeado em relação ao valor obtido com o solvente puro. Assim, ambos representam resistências adicionais à transferência de massa através da membrana. A cinética relativamente lenta de alguns fenômenos que provocam a incrustação justifica a demora para se atingir um possível estado estacionário, fluxo constante (BORGES, 2006).

TRACEY e DAVIS (1994) estudaram a filtração de Albumina de Soro Bovino (BSA), associando o comportamento da resistência à permeação com o tempo a um determinado mecanismo de bloqueio de poro. Neste estudo, como a solução de BSA era diluída e o comportamento da resistência com o tempo mostrou patamares diferentes, os autores associaram a um primeiro estágio à predominância de bloqueio interno de poro e no segundo estágio a de formação de torta. Também foi parâmetro de estudo a variação do fluxo de permeado com a pressão. Neste ponto observaram que o fluxo não variou de maneira linear com o tempo. Um ponto bastante significativo que poderia ter sido explorado pelos autores seria um estudo mais detalhado sobre a interação da proteína com a membrana e a sua influência no decréscimo do fluxo de permeado.

HO e ZYDNEY (2000), utilizando o modelo de HÉRMIA (1982), com membranas de policarbonato, desenvolveram um modelo combinado considerando bloqueio de poro e formação de torta na descrição da queda de fluxo na filtração de BSA. Segundo os autores, este modelo mostra uma “leve” transição do mecanismo de bloqueio de poro para o bloqueio por formação de torta. Apesar do modelo desenvolvido representar os dados experimentais, e os autores afirmarem que não há a necessidade de uma descrição matemática separada para cada tipo de fenômeno individualmente, eles poderiam, de certa maneira, estar descartando qualquer outro fenômeno de bloqueio, o que poderia acarretar em erros.

DUCLOS-ORSELLO *et al* (2006) também usaram o modelo de HÉRMIA (1982) combinando os modelos de contração, formação de torta e bloqueio total de poro para investigar o *fouling* na filtração da Albumina de Soro Bovino, utilizando membranas de Policarbonato. Em seus estudos, os autores simularam uma filtração com microesferas de poliestireno de 0,25 micrômetros de diâmetro, através de membranas Isopore, em que esperariam a dominância do modelo de bloqueio total do poro, já que o

diâmetro do poro, 0,2 micrômetros, era menor que o das esferas. Já na microfiltração da BSA, propriamente dita, os autores esperavam a dominância do modelo de bloqueio interno de poro. Para a realização de seus experimentos, assumiram que os poros da membrana eram totalmente cilíndricos e que o escoamento do fluido poderia ser descrito pela equação de Hagen-Poiseulli. Na análise com microesferas de poliestireno era de se esperar que predominasse o modelo de bloqueio de poro total e, por isso, talvez fosse necessário reduzir o diâmetro das microesferas para verificar se há ou não interação no interior do poro e analisar a influência deste mecanismo no processo.

SCOTT e HU (2007) estudaram a evolução do *fouling* na microfiltração tangencial de emulsões óleo-água. Para isso fizeram uso do Modelo de HÉRMIA que descrevem, de maneira linear, o comportamento do fluxo com o tempo. A emulsão foi simulada utilizando água (filtrada por em um filtro Milipore), querosene, sulfato de cobre e Span 80 como surfactante. O sulfato de cobre foi utilizado para facilitar a determinação do grau de *fouling* na superfície da membrana e, também, para simular a extração do metal do sistema. Foram utilizadas membranas do tipo PTFE Poli(tetrafluoretileno) com diâmetro de poro 0,2 μ m e 151 μ m de espessura, PVDF Poli(fluoreto de vinilideno) com diâmetro de poro 0,2 μ m e 132 μ m de espessura e celulose regenerada com diâmetro de poro 0,15 μ m e 118 μ m de espessura. Quando as membranas de PTFE e PVDF foram utilizadas o mecanismo de bloqueio de poro por formação de torta mostrou-se dominante, sendo o melhor modelo para descrever o declínio do fluxo de permeado com o tempo. Quando foi usada a membrana de celulose regenerada não se teve a certeza da dominância do tipo de bloqueio, mas, os experimentos realizados apontam, para uma fase inicial de bloqueio por formação de torta seguido por bloqueio parcial de poro. Os autores levaram em consideração um número significativo de parâmetros operacionais, os quais poderiam influenciar diretamente no processo: temperatura, pressão, velocidade de escoamento e viscosidade são alguns deles. Este trabalho foi que demonstrou maior clareza nas análises realizadas pelos modelos testados, porém, não indica de forma explícita a(s) concentração(ões) de óleo utilizadas nos testes.

Como observou-se, o modelo de HÉRMIA ainda é amplamente utilizado para descrever o declínio do fluxo de permeado e, principalmente, na identificação do mecanismo de bloqueio de poro existentes no processo de filtração. Outro procedimento

importante para a verificação dos fenômenos de bloqueio é determinar as características da carga a ser tratada para analisar a influência das mesmas durante o processo e, até mesmo, na identificação do mecanismo de bloqueio de poro.

CAPÍTULO III

EXPERIMENTOS e MATERIAIS UTILIZADOS

Este capítulo fará a análise os dados de operação extraídos por técnicos de campo. Inicialmente os materiais utilizados durante o processo serão listados bem como será apresentada uma representação do sistema, o fluxograma do processo e os dados técnicos referentes à membrana de microfiltração. Ao final os testes serão apresentados com a sua devida discussão e conclusão.

III.1 – Materiais

Foi instalada, no nordeste do Brasil, em uma unidade operacional da PETROBRÁS, uma unidade de microfiltração (MF) em escala de bancada, utilizando membranas do tipo fibras-ocas, com área de permeação de $0,5\text{m}^2$. A capacidade de tratamento da unidade é de 180L/h.

As Figuras III.1 e III.2, abaixo, mostram as fotografias da unidade citada:



Figura III.1: Vista frontal da unidade de MF.



Figura III.2: Vista lateral da unidade de MF.

Apenas para ilustração do processo, a seguir temos a representação do fluxograma da unidade de MF em escala bancada:

Fluxograma do Sistema de Microfiltração

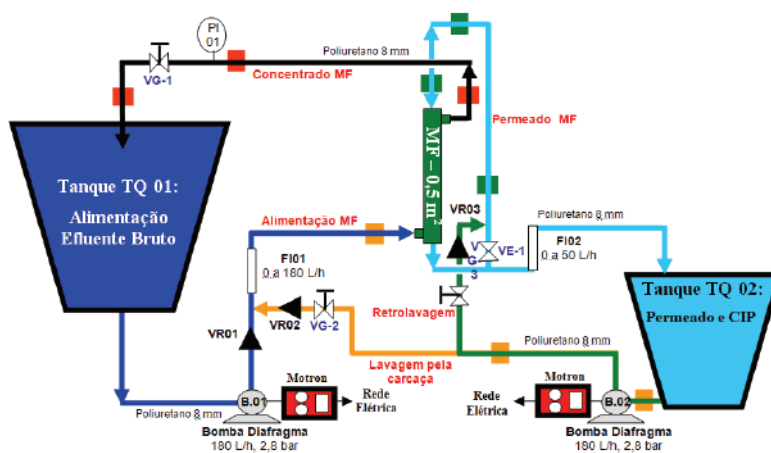


Figura III.3: Fluxograma da unidade de MF em escala de bancada.

Legenda

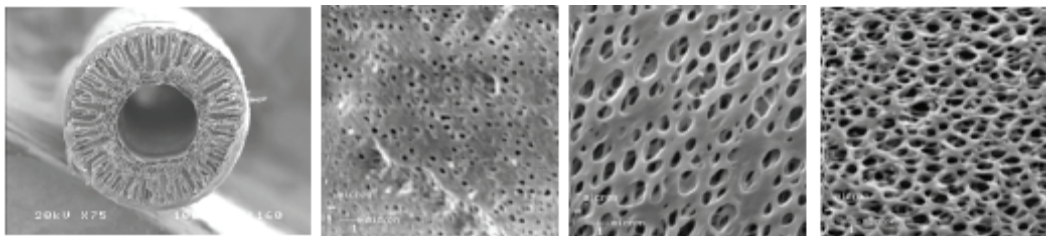


Figura III.4: Legenda para o fluxograma

III.1.1 – Dados técnicos da membrana e do módulo de MF

A seguir temos a descrição dos materiais utilizados durante o processo de microfiltração, em escala bancada, da água de formação.

- Membranas na forma de fibras ocas;
- Material das membranas: poli (imida);
- Diâmetro externo das fibras: entre 0,6 e 1,0 mm;
- Fibras com camada seletiva externa;
- Diâmetro médio de poros na superfície externa das fibras: entre 0,1 e 0,5 μ m;



Seção Transversal

Superfícies

Figura III.5: Membrana de microfiltração.

- Área útil de permeação de cada módulo: 0,5 m²;
- Alimentação escoando pela carcaça (por fora das fibras);
- Permeado escoando no interior das fibras;
- Vazão de alimentação: 180 L/h (operando a 0,5 bar);
- Pressão de operação: entre 0,5 e 1,0 bar;
- Na retrolavagem o fluxo de efluente microfiltrado ocorre a partir do interior das fibras em direção a superfície externa, no sentido contrário ao de permeação;
- Pressão máxima durante a retrolavagem: 1 bar;
- pH: 2,0 a 13,0.

III.1.2 – Estação de Tratamento de Efluentes (ETE)

O sistema de tratamento de efluentes, mostrado na Figura III.6, tem como função retirar o máximo possível de óleo e sólidos suspensos (SST) da água produzida, especificando-a para reinjeção e pré-tratando-a para geração de vapor.

A água separada na Estação de Tratamento de Óleo (ETO) é enviada para a ETE, e acondicionada num tanque. Na Figura III.6 temos uma representação da ETE.

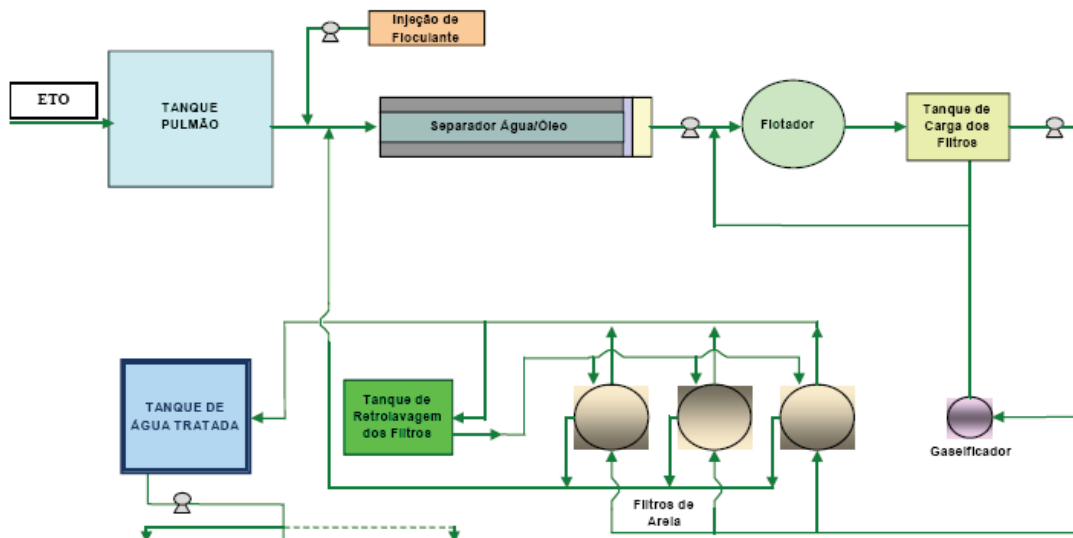


Figura III.6: Estação de Tratamento de Efluentes.

A ETE é composta de um Separador Água/Óleo (SAO) do tipo API, um flutador a ar dissolvido e três filtros de areia. A montante do flutador, apesar de não estar representado no esquema acima, existe um sistema de abrandamento a quente com NaOH, para diminuir a dureza da água.

Após passar pela ETE uma parte desta água é reinjetada e outra parte vai para a ETA (Estação de Tratamento de Água) onde, após passar pelo sistema de resinas trocadoras de íons é usada na geração de vapor para recuperação terciária de petróleo.

III.1.3 – Localização da unidade

A unidade foi instalada de maneira a poder operar com os efluentes da saída do separador água/óleo, Figura III.7 e com a saída dos filtros de areia – Figura III.8.



(a)



(b)

Figura III.7: (a) Separador Água/Óleo (SAO) e (b) ponto de onde foi coletado o efluente do SAO



(a)



(b)

Figura III.8: (a) Filtros de Areia e (b) ponto de onde foi coletado o efluente dos Filtros de Areia.

Os primeiros testes foram realizados utilizando o efluente coletado da saída dos filtros de areia, Figura III.8 – (b). Os testes foram realizados com pH em torno de 9,5–10, devido a adição de NaOH, a montante, do flotador.

Durante os experimentos foram utilizados dois módulos de MF. Um para os testes com o efluente da saída do separador água/óleo e outro para os testes com efluente da saída dos filtros de areia. Após o término dos experimentos os módulos foram retirados para análise.

III.1.4 – Análises realizadas

III.1.4.1 – Determinação do teor de óleo e graxas

O teor de óleos e graxas foi determinado no analisador Horiba OCMA-350. Os dados de teor de óleos e graxas (TOG) que serão discriminados na Tabela III.3 são referentes ao efluente da saída do separador água/óleo, pois, para os testes realizados com o efluente do filtro de areia, no mesmo intervalo de tempo utilizados nos testes de índice de sedimentáveis, os valores de TOG foram praticamente nulos. Este equipamento foi especialmente concebido para medir contaminação de amostra de água (doce e salgada) e de solo por hidrocarbonetos em geral, operando de acordo com a técnica de absorção de energia no espectro infravermelho, na faixa de comprimento de onda entre 3,4 e 3,5µm. Segundo o princípio do instrumento, a quantidade de energia absorvida é diretamente proporcional à concentração de hidrocarboneto presente na amostra.

III.1.4.2 – Determinação do índice de sedimentáveis (SDI)

O índice de sedimentáveis foi determinado por filtração, segundo procedimento descrito por RAUTENBACH e ALBRECHT (1989). Inicialmente, o efluente é filtrado em um sistema constituído por uma célula de PVC e membrana de acetato de celulose (Millipore®) com 0,45µm de diâmetro de poro. O efluente é submetido a uma pressão de 30 psi. No início da primeira coleta de filtrado, deve-se garantir a filtração *dead-end*, mantendo-a até o final do teste. É determinado o tempo necessário para serem coletados 500mL de filtrado (t_1). O mesmo procedimento é repetido após 15 minutos (t_{15}). O índice de sedimentáveis é determinado conforme equação abaixo:

$$SDI = 100 \cdot \frac{\left(1 - \frac{t_1}{t_{15}}\right)}{\Delta t} \quad (9)$$

onde:

t_1 = tempo necessário para coletar 500 mL de filtrado no início do teste;

t_{15} = tempo necessário para coletar 500 mL de filtrado após 15 minutos de teste (t_{15});

Δt = tempo decorrido entre o início do primeiro teste e o segundo teste (15 minutos).

III.1.4.3 – Determinação do pH

Avaliação colorimétrica semi-quantitativa com papel indicador universal.

III.1.4.4 – Determinação dos sólidos suspensos totais (SST)

Análise de sólidos suspensos totais foi realizada com membrana filtrante (Millipore® 0,45 µm) e após a filtração foi enviada para análise em laboratório.

III.2 – Variáveis analisadas

Foram analisados o fluxo de permeado e a rejeição das membranas à fase dispersa. O fluxo de permeado foi calculado através da Equação 10. Antes de iniciar a permeação com as membranas hidrofílicas de MF, foi determinada sua permeabilidade hidráulica com água doce.

$$J = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

onde, J é o fluxo de permeado, Q é a vazão de permeado e A é a área de permeação.

A outra variável analisada foi rejeição aos componentes (óleo, SDI, SST), através da Equação 11.

$$R = 1 - \frac{C_P}{C_A} \quad (11)$$

onde, R é a rejeição da membrana a fase dispersa, C_A e C_P são as concentrações da alimentação e do permeado, respectivamente.

A Figura III.10 apresenta o comportamento do fluxo de permeado e da permeabilidade hidráulica pelo tempo de operação até o segundo período de limpeza das membranas.

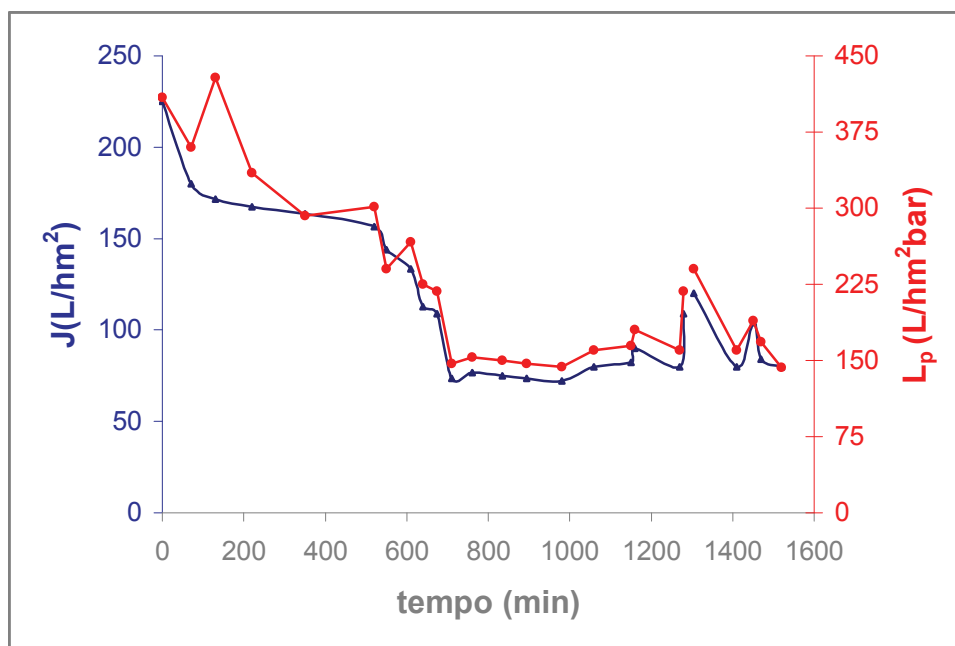


Figura III.10: Fluxo de permeado (J-azul) e permeabilidade hidráulica (L_p-vermelha) x tempo de operação. (2)

Aos 1.270 minutos foi realizada uma limpeza do módulo. Operou-se por mais 120 minutos e realizou-se uma nova limpeza.

Cabe salientar que a permeabilidade hidráulica da membrana na operação com este efluente apresentou o mesmo comportamento que o fluxo de permeado, uma vez que não houve grandes variações da pressão de operação ao longo do experimento. Além disso, o pico que podemos observar, em torno de 3.145 minutos é devido primeira limpeza realizada.

As análises de SDI (Índice de Sedimentáveis) realizadas durante o experimento estão apresentadas na Tabela III.1.

Tabela III.1 – Resultados de Índice de Sedimentáveis com efluente dos filtros de areia (pH=10,0)

Períodos (min)	60	345	810	960	1180	2640	3110	3365	5000	5125
SDI (Alimentação)	x	x	4,61	4,89	5,05	4,75	5,23	5,17	4,76	4,53
SDI Permeado	1,1	0,3	1,21	0,33	0	0	0,61	0,47	0,63	0,54
Coefficiente de rejeição (%)	x	x	73,7	93,2	100	100	88,4	90,8	86,7	88,1

Como colocado anteriormente, a análise do teor de óleos e graxas (TOG) apresentaram valor zero para os mesmos períodos nos quais foram realizados os testes de SDI. Os resultados de SDI demonstraram que a membrana foi eficiente na remoção dos sólidos sedimentáveis, porém, deve-se verificar se a quantidade de sólidos presentes no permeado está adequada para ser passada a uma unidade de osmose inversa.

III.3.2 – Efluente de Saída do Separador Água/Óleo (SAO)

A unidade de MF em escala de bancada foi operada também com efluente da saída do separador água/óleo (SAO). A temperatura média do efluente ficou em torno de 55°C e o pH em torno de 7,0. Para a operação com este efluente foi instalado um novo módulo de MF, com área de 0,5m² e a permeabilidade hidráulica inicial ficou em torno 300 L/hm²bar.

A Figura III.11, apresentada a seguir, mostra a variação do fluxo de permeado e permeabilidade com tempo até a realização da primeira limpeza da membrana.

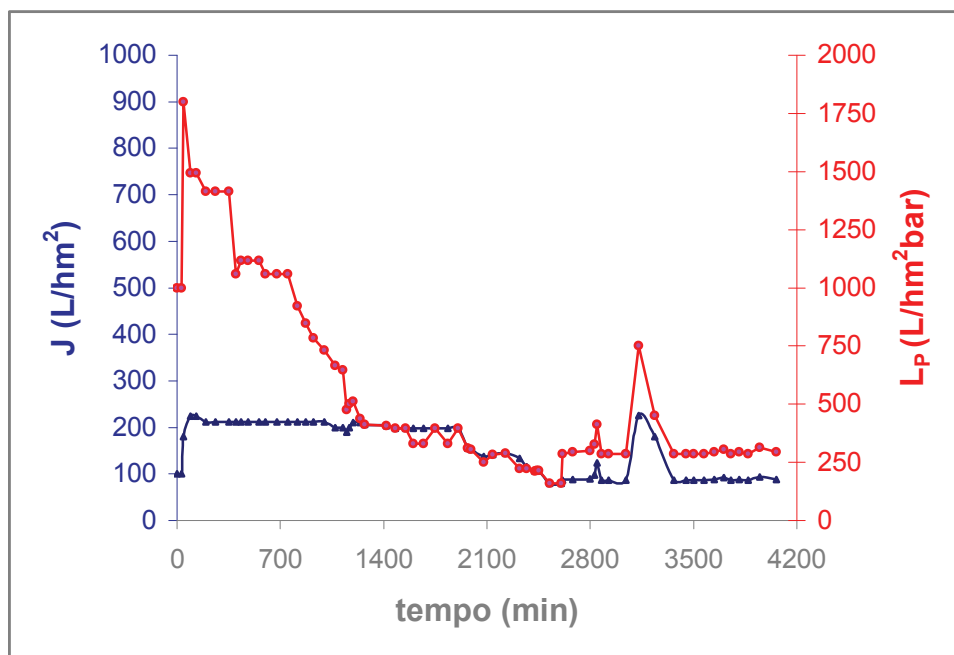


Figura III.11: Fluxo de permeado (J-azul) e permeabilidade hidráulica (L_p-vermelha) x tempo de operação.(2)

No início, como a membrana estava limpa, mesmo em baixas pressões foi possível se chegar a graus de recuperação de quase 100%. Conforme o fluxo diminuía, sinal de que a membrana estava ficando suja, a pressão de operação foi sendo aumentada, dentro de valores possíveis, em torno de 0,5 bar, e então os valores de permeabilidade e fluxo foram se aproximando. Cabe salientar a diferença na escala nos resultados apresentados de permeabilidade e de fluxo permeado.

A primeira limpeza foi realizada após 4.060 minutos de operação.

A unidade continuou operando até o dia seguinte. Os resultados estão apresentados no gráfico da Figura III.12 a seguir:

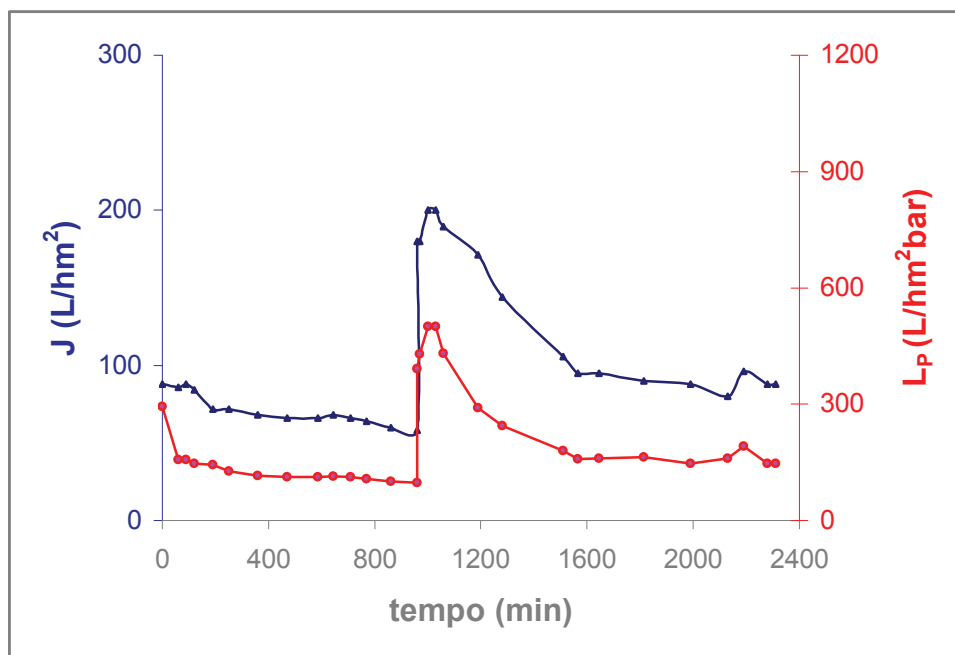


Figura III.12: Fluxo de permeado (J-azul) e permeabilidade hidráulica (L_p -vermelha) x tempo de operação. (2)

Após mais 960 minutos de operação foi realizada outra limpeza que podemos perceber pelo pico apresentado no gráfico acima.

O sistema foi colocado em operação por mais 1.350 minutos, totalizando 6.370 minutos de operação total.

Como podemos notar no gráfico acima, houve um aumento significativo no fluxo de permeado após ser realizada a limpeza. Nesta etapa a limpeza foi realizada com uma solução de 1% em tolueno.

As análises de SDI foram realizadas somente no permeado e estão apresentadas na Tabela III.2.

Tabela III.2 – Resultados de Índice de Sedimentáveis com efluente do SAO

Períodos (min)	130	1195	1480	2525	2800	3870
SDI permeado	5,3	5,56	5,33	4,22	4,11	4,53

Como a água tratada pela membrana irá passar também por um módulo de osmose inversa, os resultados dos testes de SDI não foram satisfatórios, pois estes deveriam estar com o valor máximo de cinco para que a água esteja apropriada para entrar na unidade de osmose inversa. Estes valores são próximos aos encontrados no efluente na entrada dos filtros de areia. A hipótese de haver óleo pode ter afetado a remoção dos sólidos sedimentáveis e, por este motivo, tenha levado aos resultados apresentados na tabela anterior.

Os resultados do teor de óleos e graxas (TOG) estão expostos na Tabela III. 3.

Tabela III.3 – Resultados de TOG com efluente do SAO

Períodos (min)	30	1150	1480	2440	2800	2830	3810	4060
TOG alimentação	14,2	7,8	5,7	6,6	7,5	127,6	70	72,1
TOG permeado	0	0	0	1,3	1,1	0,4	0	3,6
Coefficiente de Rejeição (%)	100	100	100	80,3	85,3	99,7	100	95

Os resultados de TOG demonstram que a membrana é capaz de remover grande parte do óleo presente no efluente. A rejeição foi em torno de 80-90%. Não é comum durante a operação da ETE, nesta unidade operacional, este efluente apresentar altas concentrações de óleo, como as que aparecem aos 2.830 minutos de operação. Este fato deve ter sido causado por algum problema na operação a montante da unidade de MF.

As análises de sólidos suspensos totais (SST) foram enviadas para o laboratório para serem analisadas e até o fechamento deste trabalho não foram obtidos os resultados.

III. 4 – Conclusões parciais a partir dos resultados obtidos

III. 4.1 – Efluente oriundo do filtro de areia

Na microfiltração do efluente oriundo do filtro de areia observou-se que em determinados instantes o fluxo de permeado era maior que algum fluxo anterior, ou seja, comportamento incompatível visto que no curso de qualquer tipo de filtração o meio filtrante é obstruído e a área de permeação (filtração) é reduzida tendo como conseqüência, queda de fluxo. Este fato pode estar associado a uma descompactação das membranas que, entre as fibras, pode conter “vazios” onde poderia haver acúmulo de carga e uma pequena sobrepressão, aumentando o fluxo em alguns pontos. Comparando as Figuras III.9 e III.10 nota-se um comportamento menos disperso depois da limpeza. Este fato pode estar associado, neste ponto, ao maior grau de compactação da membrana com relação ao período que antecedeu à limpeza.

A membrana mostrou-se relativamente eficiente para a remoção de sólidos sedimentáveis, levando em consideração a remoção de aproximadamente noventa por cento. Como os testes de TOG, para os mesmos períodos de análise de SDI, apresentaram valor zero na alimentação da membrana, temos que o filtro de areia é eficiente para a remoção de óleos e graxas.

III. 4.2 – Efluente oriundo do Separador Água-Óleo

Nesta análise, da mesma maneira vista para o filtro de areia, em alguns pontos o fluxo era maior que seu antecedente e, também, atribui-se esse fenômeno a uma descompactação da membrana no início da filtração.

Como a água tratada pela membrana passará, caso se enquadre nos níveis aceitos, por uma membrana de osmose inversa, os testes de SDI apenas no permeado mostraram que apenas um módulo com membranas de microfiltração não é suficiente para reter o óleo proveniente do SAO, ou seja, com essa quantidade de sólidos na corrente de permeado é inviável utilizar uma unidade de osmose inversa para tratar esta água. A média da rejeição de óleos e graxas ficou em torno de noventa e cinco por cento. Porém, a faixa de rejeição foi de oitenta a cem por cento. Esta flutuação é ruim, pois como provavelmente haverá a passagem dessa corrente para o tratamento em uma

unidade de osmose inversa, os níveis de rejeição deveriam estar próximos de cem por cento. Foram realizadas duas limpezas sendo a primeira aos 4.060 minutos, com água. Após continuou-se operando e, após 960 minutos, foi realizada a segunda limpeza, dessa vez com uma solução a 1% em tolueno. Na primeira foi observado um leve aumento de fluxo. Já na segunda esse aumento foi brusco, cerca de 70 para 200 L/hm². Como a segunda limpeza foi realizada com tolueno uma das prováveis causas é que tolueno tenha danificado a membrana, fazendo com que o fluxo aumentasse nessa magnitude.

CAPÍTULO IV

MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS NA ANÁLISE

Neste capítulo serão analisados os dados experimentais, por dois modelos matemáticos, obtidos no sistema de microfiltração com a finalidade de escolher aquele que melhor possa representar o processo. No início, haverá uma breve descrição do que vem a ser modelagem nos processos de separação por membranas. Em seguida, se será realizada uma breve discussão dos modelos e, por fim serão colocadas as justificativas para a escolha dos modelos utilizados e considerações a respeito. Nesta etapa é válido salientar que o sistema foi exposto em condições críticas para teste com a intenção de sujar (incrustar) a membrana.

IV.1 – Introdução

A modelagem de um processo é, basicamente, o direcionamento de uma melhor compreensão do comportamento transiente de um processo onde determinadas variáveis são monitoradas com as finalidades de entender, desenvolver e projetar plantas e/ou sistemas cada vez mais eficientes. A modelagem pode ser definida como a atividade de representação dos fenômenos que ocorrem num processo por meio de equações e correlações entre as variáveis que possam afetar de maneira global e/ou pontual, um determinado processo.

Nos processos de separação por membranas, estudos referentes ao mecanismo de bloqueio de poro são realizados com interesse na caracterização destes fenômenos para tratá-los de maneira adequada com a intenção de minimizá-los visando, uma maior rentabilidade do processo e, conjuntamente, aumentar o tempo de vida útil da membrana e, se for o caso, fornecer orientação sobre as ações a serem tomadas com relação à capacidade de tratamento do efluente a ser tratado.

IV.2 – Verificação dos dados experimentais do processo

Nesta etapa do trabalho serão analisados os dados experimentais com a finalidade de identificar o modelo mais próximo do comportamento do sistema de microfiltração da água oleosa.

Nas análises, verificou-se, para cada um dos efluentes, os modelos de bloqueio de poro por bloqueio total e interno. É válido salientar que alguns pontos considerados com comportamento bem diferente do previsto para uma microfiltração foram, em algum momento da análise, excluídos.

IV.3 – Análise da microfiltração na saída do filtro de areia (FA)

IV.3.1 – Modelo de bloqueio total de poro

Nesta primeira análise, foi verificado o comportamento da microfiltração da água oleosa pelo modelo de bloqueio de poro que, na verdade, é similar ao “*Relaxation Model*” e é descrito pela equação:

$$J(t) = J_{\infty} + (J_0 - J_{\infty}) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \rightarrow \ln\left(\frac{J(t) - J_{\infty}}{J_0 - J_{\infty}}\right) = -K_2 \cdot t$$

Para os dois modelos de bloqueio de poro, interno e total, as equações foram utilizadas em termos de vazão (Litros por hora), e o tempo em horas e representados num gráfico *t versus* $\ln\left(\frac{Q(t) - Q_{\infty}}{Q_0 - Q_{\infty}}\right) = \ln(Q)$.

Para cada modelo de bloqueio de poro foram realizadas duas análises nomeadas de início e final. Esta análise em separado foi realizada devido o motivo pelo qual, durante o período da microfiltração foram obtidos dados de fluxo muito diferentes do esperado. Outro importante aspecto, para análise separada, foi a realização da limpeza nas membranas o que, teoricamente, resulta num aumento de fluxo causando uma “quebra” no comportamento que havia até o referido momento.

Para primeira análise, com o efluente do filtro de areia, foi obtido o seguinte comportamento:

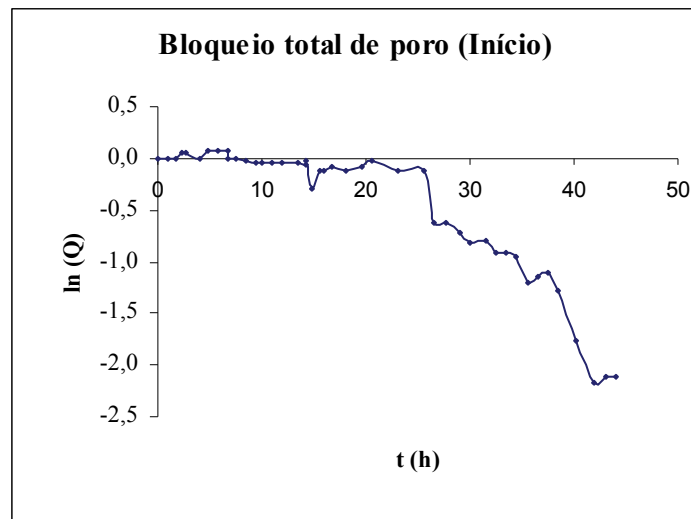


Figura IV.1: Modelo de bloqueio total de poro – Início da Filtração

Como verifica-se na Figura IV.1, os dados experimentais estudados foram postos até 44 horas, ou seja, cerca de, aproximadamente, oito horas antes da primeira limpeza da membrana que foi realizada em 3.145 minutos (52,4h). Estes pontos, que compreendem o término da microfiltração antes da primeira limpeza, foram excluídos por apresentarem comportamento diferente do esperado para a microfiltração.

A equação que descreve o modelo de bloqueio total tem comportamento linear e os dados experimentais têm comportamento não linear. Mesmo observando uma não linearidade foi feita a regressão linear com a finalidade de quantificar o desvio e obteve-se um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,8106, ou seja, valor baixo mostrando que o modelo não descreve o comportamento dos dados em questão.

Após a análise dos dados experimentais do gráfico acima verificou-se, nas quatro horas seguintes, que o comportamento da vazão de permeado com o tempo não apresentou-se de maneira coerente o que seria esperado para uma microfiltração. Por este motivo, esses pontos foram descartados e usados os na faixa de 52,4 e 63 horas com uma alteração: como o objetivo foi o de verificar o mecanismo de bloqueio de poro, e a equação do modelo necessita de dados no instante zero, foi considerado $t=0$ sendo $t=52,4h$ e feito os devidos incrementos correspondentes, a partir do zero, até o tempo equivalente a 63h gerando o gráfico da Figura IV.2

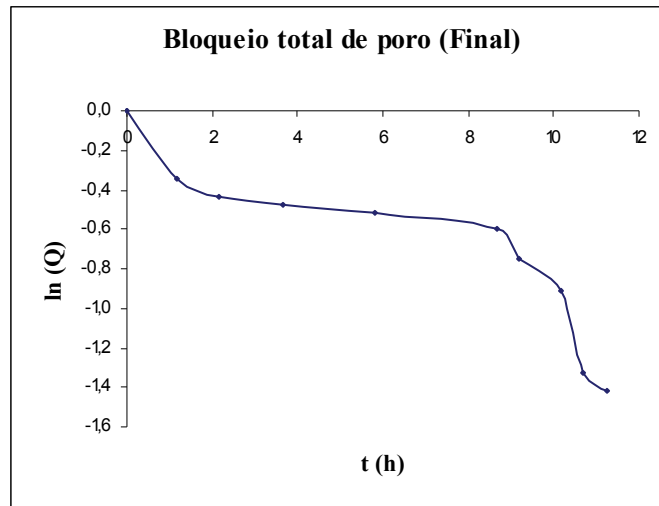


Figura IV.2: Modelo de bloqueio de poro total – Final da filtração

Realizando a regressão linear o coeficiente de correlação obtido foi de 0,7993, portanto, o modelo de bloqueio total de poro, não é satisfatório para indicar o tipo de bloqueio de poro e/ou não existe este fenômeno na microfiltração do efluente em questão. Como o modelo mais uma vez apresentou altos desvios em relação aos pontos experimentais há uma forte indicação de que não há este tipo de bloqueio de poro no processo de microfiltração.

IV.3.2 – Modelo de bloqueio interno de poro

Esta análise foi realizada com os mesmos intervalos de tempo usados na análise anterior. O modelo de bloqueio interno de poro é regido pela seguinte equação:

$$\frac{1}{[J(t)]^{0,5}} = \frac{1}{J_0^{0,5}} + K_{1,5} \cdot t$$

O gráfico de tempo *versus* vazão obtido através deste modelo é apresentado na Figura IV.3.

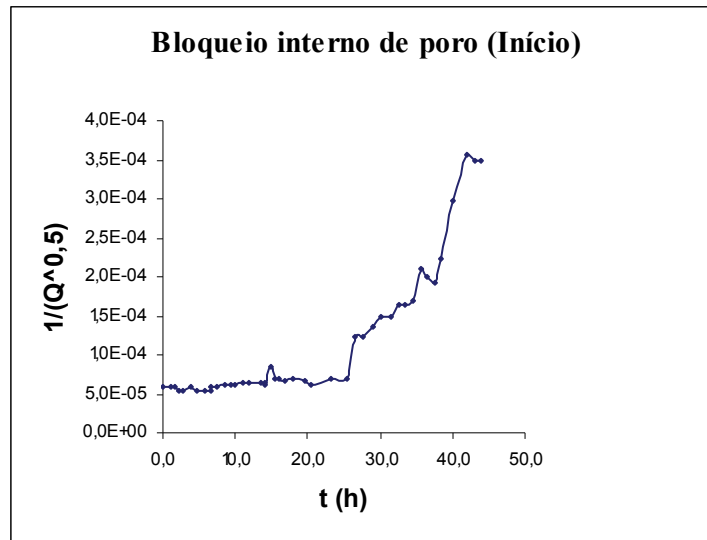


Figura IV.3: Modelo de bloqueio interno de poro – Início da filtração

Verifica-se claramente o comportamento não é linear, mas, para quantificar o desvio, foi realizada a regressão e obtido o valor de 0,7567.

Para fins de comparação também foi analisado o intervalo de tempo compreendido entre 52,4 e 63h. Para este caso, na regressão linear, foi obtido o valor de 0,7479 para o coeficiente de correlação. Na aplicação desta regressão o coeficiente linear, representado por $(J_0)^{-0,5}$, teve valor negativo contrastando fisicamente com os dados preditos pelo modelo. No gráfico da Figura IV.4 é mostrado o gráfico obtido por este modelo.

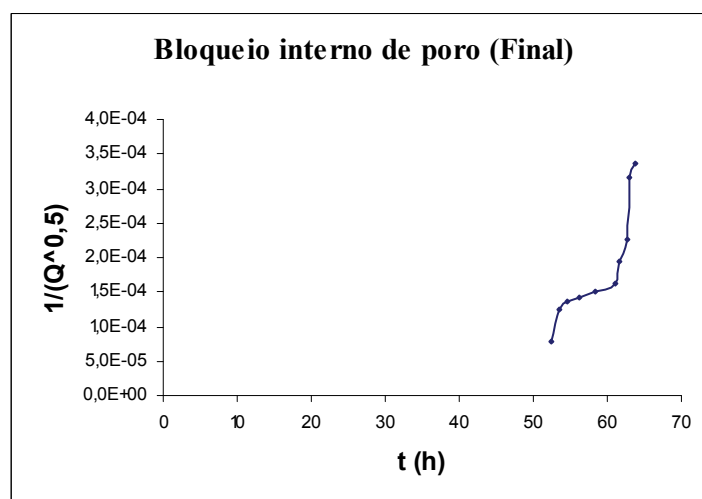


Figura IV.4: Modelo de bloqueio interno de poro

IV.4 – Análise da microfiltração na saída do separador água-óleo (SAO)

IV.4.1 – Modelo bloqueio total de poro

A forma de analisar o modelo de bloqueio de poro na microfiltração da água oleosa, oriunda do separador, foi análoga à do filtro de areia, ou seja, no início e final da microfiltração.

Pode-se observar na Figura III.11 que no início da microfiltração há um aumento na vazão de permeado contrastando com o balanço geral de massa do processo, pois a vazão de saída no permeado foi maior do que a de entrada fato esse atribuído, principalmente, ao aumento de pressão do sistema de microfiltração. Observando a Figura III.11 podemos verificar que, aproximadamente, em 300 minutos de operação o fluxo permaneceu constante antes de começar a decair. Por isso a análise do efluente oriundo do separador água-óleo foi iniciada neste instante.

Na análise inicial deste intervalo de tempo até a primeira limpeza, 4.060 minutos foi obtido o seguinte comportamento da vazão de permeado pelo modelo de bloqueio total de poro:

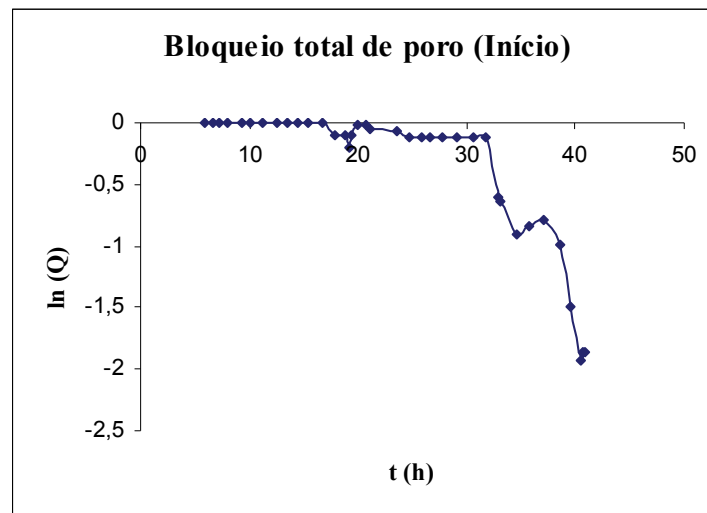


Figura IV.5: Modelo de bloqueio total de poro – Início da filtração SAO

Com isto foi possível observar com nitidez um comportamento não linear desta representação. Mesmo assim, para quantificar o desvio, foi feita a regressão linear dos dados anteriores tendo sido obtido um coeficiente de correlação igual a 0,6345. Com

este valor de correlação está descartado, para este intervalo de tempo estudado, qualquer tentativa de representar o processo por este modelo.

Para a análise do final da microfiltração usou-se os intervalos de tempo após a limpeza: 84,3 a 97,9h. A escolha deste intervalo de tempo foi devido as dados experimentais da vazão de permeado, anteriores terem um comportamento não compatível com a realidade de uma microfiltração. Para o intervalo de tempo estudado foi obtido o seguinte comportamento para o modelo de bloqueio total apresentado, na Figura IV.6:

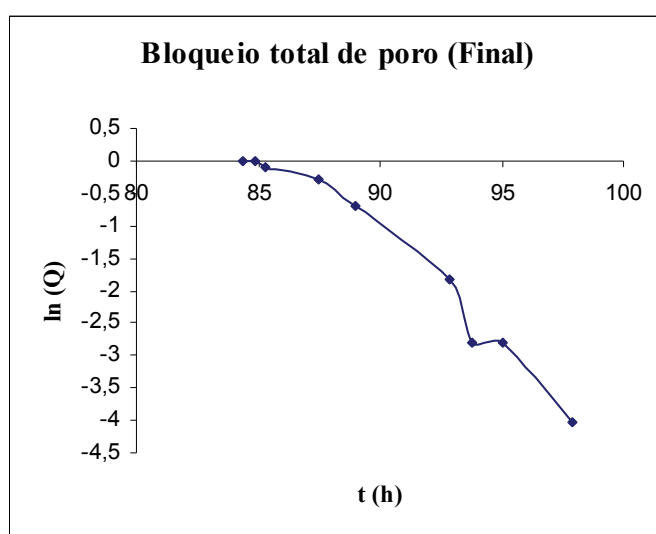


Figura IV.6: Modelo de bloqueio total de poro – Final da filtração SAO

Realizando a regressão linear dos dados Figura IV.6 obteve-se um coeficiente de correlação igual a 0,9602. Embora o coeficiente de correlação esteja mais próximo da unidade, em comparação com os anteriores, não se pode afirmar com certeza se há a presença deste mecanismo de bloqueio.

IV.4.2 – Modelo bloqueio interno de poro (SAO)

Para o modelo de bloqueio interno de poro foram analisados os mesmos intervalos de tempo usados para o modelo de bloqueio total. Para análise inicial foi obtido o seguinte comportamento:

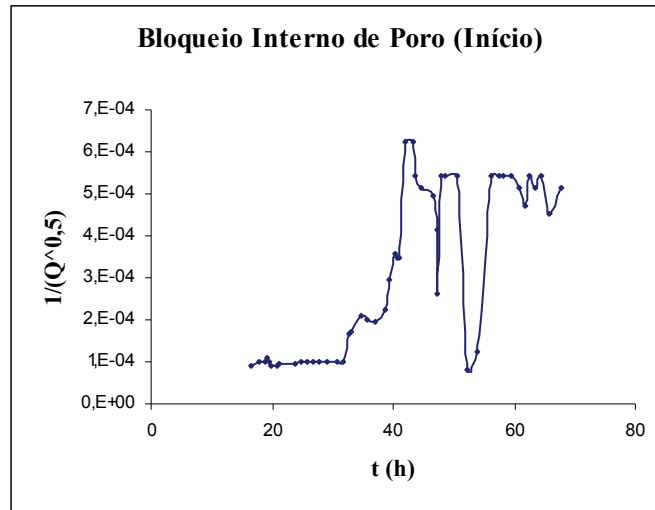


Figura IV.7: Modelo de bloqueio interno de poro – Início da filtração SAO

Como podemos observar, pelo formato da curva, notamos seu comportamento, completamente, não linear. Entretanto, para quantificar este desvio, foi realizada a regressão linear, obtendo-se 0,6423 como valor do coeficiente de correlação para os dados da Figura IV.7. Com este valor de coeficiente está descartado o uso deste modelo para este período de análise.

Para o final da microfiltração foi registrado o seguinte comportamento representado na Figura IV.8:

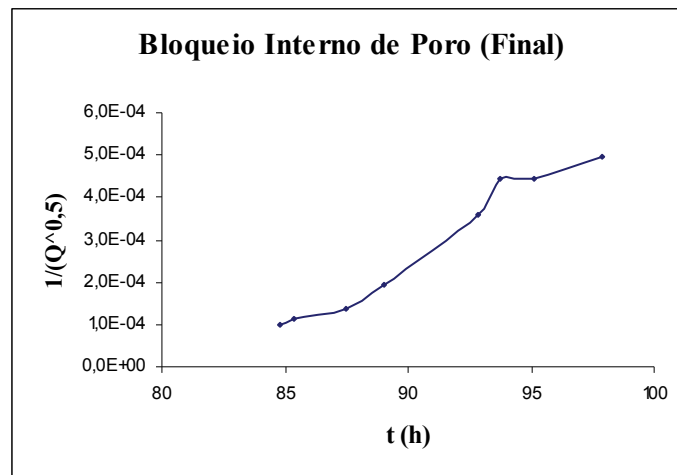


Figura IV.8: Modelo de bloqueio de poro interno – Final da filtração SAO

Pode-se verificar na figura acima que os dados experimentais estão menos dispersos quando comparados com os dados no início da microfiltração. Portanto, fazendo a regressão linear obteve-se o valor de 0,9608 como coeficiente de correlação.

As Tabelas IV.4 e IV.5, a seguir, resumem os valores de cada coeficiente de correlação para os estudos de modelo de bloqueio de poro realizados:

Tabela IV.4 – Coeficientes FA

Filtro de areia		
Bloqueio	Início	Final
Total	0,8106	0,7993
Interno	0,7567	0,7479

Tabela IV.5 – Coeficientes SAO

Separador água-óleo		
Bloqueio	Início	Final
Total	0,6345	0,9602
Interno	0,6423	0,9608

IV.5 – Justificativa para a escolha dos modelos analisados

Podemos encontrar, na literatura, alguns modelos ditos clássicos para descrever o comportamento transiente de determinada variável em processos de filtração. Neste trabalho foram utilizados dois modelos de bloqueio poro desacoplados para o estudo da microfiltração da água de produção: o bloqueio total e interno de poro. Mesmo tendo a ciência de que outros fenômenos de bloqueio podem ocorrer, a escolha por esses dois

modelos deu-se, principalmente, pela facilidade de sua aplicação e pelo fato de que quando há bloqueio de poro esses dois fenômenos ocorrem com uma maior frequência.

O fato de poder analisar apenas uma corrida na planta dificultou, de certa maneira, um estudo mais amplo na análise dos dados da microfiltração.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES FINAIS e SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões finais bem como algumas sugestões referentes ao trabalho realizado.

V.1 – Análise dos modelos

A verificação do mecanismo de bloqueio de poro pelos modelos bloqueio total e interno de poro não foi satisfatória para predizer, mediante uma única corrida na planta, que esses modelos sejam os melhores para descrever o processo de microfiltração da água de produção. Os desvios associados ao modelo, em alguns casos, foram extremamente altos. Mesmo que estes modelos pudessem ser capazes de representar o declínio do fluxo de permeado e indicar o bloqueio de poro dominante, em apenas uma corrida na planta, ainda sim, não seria sensato afirmar com alguma certeza a existência destes fenômenos.

A água tratada nesta microfiltração, para ser utilizada para fins de irrigação ainda passará por uma unidade de osmose inversa, e na análise da composição da água tratada oriunda do separador água-óleo, verificou-se uma concentração de óleo acima do permitido para enviá-la a unidade de osmose inversa, ou seja, é inviável a aplicação desta água para a irrigação de culturas.

Caso houvesse obtido algum êxito na aplicação dos modelos, ainda sim, não seria prudente afirmar de maneira clara, que os mecanismos referentes a cada modelo governam o processo de microfiltração, pois, como já salientado anteriormente, outros fenômenos associados podem ocorrer, influenciando diretamente na queda do fluxo permeado, fornecendo resultados inconsistentes com a realidade. Outro fator que também limitou de maneira significativa a análise dos modelos foi, a impossibilidade de realizar mais de uma corrida na planta e obter mais dados referentes ao fluxo de permeado *versus* tempo comparando o comportamento dos experimentos submetidos em outras condições.

Na análise final com o efluente da saída do SAO verificou-se uma tendência à presença dos bloqueios de poro analisados. Mesmo verificado este fato não é cauteloso afirmar a presença destes fenômenos.

Por fim, a microfiltração submetida em condições drásticas pode levar a correntes permeadas de baixa qualidade por isso, é necessário que se estabeleça as condições de operacionais ótimas, principalmente, de pressão para que se possa obter boa qualidade da corrente permeada preservando a membrana.

V.2 – Sugestões

Como em determinados pontos o fluxo de permeado foi maior do que o fluxo de entrada sugere-se “microfiltrar” água limpa (destilada ou deionizada) para tentar compactar a membrana objetivando reduzir possíveis regiões de sobrepressão para que se possa ter uma menor oscilação no fluxo de permeado.

Com a possibilidade de realizar um maior número de experimentos deve-se avaliar a influência de parâmetros como temperatura e pressão na qualidade de permeado. Simular o efluente em concentrações diferentes também pode ser relevante na análise do bloqueio de poro.

Conclusões afirmativas de que estes mecanismos de bloqueio de poro existem e/ou são dominantes no processo seriam, no mínimo, imprudentes mas, caso houvesse a oportunidade de realizar mais experimentos e, dessa maneira, certificar a presença destes mecanismos de bloqueio de poro, deveria ser verificada a quantidade e qualidade do permeado e, se fossem satisfatórias, para a alimentação da unidade de osmose inversa, realizaria-se um estudo dos métodos de limpeza específico, uma vez conhecido os bloqueios de poro dominantes objetivando a redução de seus efeitos. Outra verificação de relevante importância seria avaliar viabilidade econômica da inserção de mais módulos para atingir os níveis desejados para destinar a água para a unidade de osmose inversa.

Outro fator relevante, que pode ser explorado, é a utilização de outros tipos de membranas que sejam resistentes à solvente já que, tem-se a hipótese de que o tolueno tenha danificado a que foi utilizada nesta análise.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFIA

HABERT, A. C.; BORGES, C. P. e NOBREGA, R. “Processos de Separação por Membranas”, Série Escola Piloto em Engenharia Química – COPPE/UFRJ (2006);

HABERT, A. C.; BORGES, C. P. e NOBREGA, R.; COSTA, A. C. M.; OLIVEIRA, D. R.; RAMOS, G. M.; BERTOLDO, L. C.; “Fundamentos e Operação dos Processos de Nanofiltração e Osmose Inversa”. Programa de Engenharia Química – COPPE/UFRJ (2005);

MACEDO, H.; “Físico-Química I” – IQ-UFRJ – Departamento de Físico-Química, Ed. Guanabara Dois (1981);

CAMPOS, J. C., “Processos Combinados Aplicados ao Tratamento de Água de Produção de Petróleo”. Tese D.Sc. PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (2000);

FERNANDEZ, J. C., GARRIDO, R. J., “Economia dos Recursos Hídricos”. Salvador: EDUFBA (2002);

BEEKMAN, G. B., “Qualidade e Conservação da Água”. Encontro Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural, 1996, Brasília. Conferência. Brasília: Associação Brasileira das Entidades de Assistência Técnica e Extensão Rural (1996);

GARLAND, E., et al., 1999. “*Monitoring Oil in Produced Water Discharged into Sea: a Review of Current & Emerging Practices*”. Report 2.78/285, E & P Forum, London;

ONYANGO, E., “Oferta de água em 2025”. Lista Fonte d’água. Centro de Referência do Everglades (USA), Movimento de Cidadania pelas Águas. *Water Media Network* (2002);

BERDINARDI, C. C., “Reuso de Água para Irrigação”. Monografia em Especialização Lato Sensu, Modalidade MBA (2003);

HOWELL, J.A., FIELD, R.W., WU, D., GUPTA, B.B.(1995). “*Critical flux concept for microfiltration fouling*”, Journal of Membrane Science 100 (1995) 259-272;

TRACEY, E. M., DAVIS, R.H. (1994). “*Protein Fouling of Track-Etched Polycarbonate Microfiltration Membranes*”, Journal of Colloid and Interface Science 167, 104-116 (1994);

HO, C.C., ZYDNEY, A. L., (2000). “*A Combined Pore Blockage and Cake Filtration Model for Protein Fouling during Microfiltration*”, Journal of Colloid and Interface Science 232, 389-399 (2000);

KONIECZNY, K. (2002). “*Modelling of Membrane Filtration of Natural Water for Potable Purposes*”, Desalination 143, 123-139 (2002);

BAKER, R. W. (2004). “*Membrane Technology and Applications*”, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd.

SCHULZ, C. K., Tratamento de Efluentes Oleosos Utilizando Processos de Separação Por Membranas, Tese D.Sc. PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (2005);

DUCLOS-ORSELLO, C., LI, W., HO, C-C. (2006). “*A Three Mechanism Model to Describe Fouling of Microfiltration Membranes*”, Journal of Membranes Science 280, 856-866 (2006);

SCOTT, K., HU, B. (2007). “*Microfiltration of water in oil emulsions and evaluation of fouling mechanism*”, Chemical Engineering Journal;

SITES CONSULTADOS:

www.cetesb.sp.gov.br;

Consultado em 15/09/2007

www.meiofiltrante.com.br

Consultado em 15/09/2007

www.unesco.org.br/noticias/opiniao/disc_mat/diadaagua2007/mostra_documento

Consultado em 17/10/2007

www.soaresoliveira.br/projetoagua/agua.html