

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

**ESTUDO DO REJUVENESCIMENTO DE MEMBRANAS
DE POLIAMIDA DE OSMOSE REVERSA UTILIZANDO
ÁCIDO TÂNICO**

João Batista Azevedo da Silva

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Química

Porto Alegre, 2001

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

ESTUDO DO REJUVENESCIMENTO DE MEMBRANAS DE POLIAMIDA DE OSMOSE REVERSA UTILIZANDO ÁCIDO TÂNICO

João Batista Azevedo da Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – PPGEQ, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração:
Pesquisa e Desenvolvimento de Processos.

Porto Alegre, RS – Brasil
Dezembro de 2001

ESTUDO DO REJUVENESCIMENTO DE MEMBRANAS DE POLIAMIDA DE OSMOSE REVERSA UTILIZANDO ÁCIDO TÂNICO

João Batista Azevedo da Silva

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de *Mestre em Engenharia Química* e aprovada em sua forma final pelos Orientadores e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Orientador:

D. Sc. Keiko Wada, UFRGS

Co-Orientador:

D. Sc. Isabel Cristina Tessaro, UFRGS

Banca Examinadora:

D. Sc. Nilo Sérgio de Medeiros Cardozo, UFRGS

D. Sc. Mara Zeni Andrade, UCS

D. Sc. Lígia Damasceno Ferreira Marczak, UFRGS

D. Sc. Jorge Otávio Trierweiler
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química

Porto Alegre, dezembro de 2001.

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Às professoras Keiko Wada e Isabel Tessaro pela atenção dedicada na orientação deste trabalho, proporcionando incentivo e tantas outras valiosas contribuições.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Separação por Membranas pelas indispensáveis colaborações agregadas.

Ao colega e amigo Rodrigo Simion Hunger pela parceria durante o curso de mestrado.

A Ana Carolina pelo estímulo e agradável presença na conclusão deste trabalho.

À minha família, pelo incondicional apoio.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química pela oportunidade, e aos funcionários do departamento de Engenharia Química pela cooperação.

À empresa AZ, nome fictício neste trabalho, e a seus funcionários pela oportunidade e pró-atividade.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
I . INTRODUÇÃO	1
II . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
II.1 Processos de Separação por Membranas	3
II.2 O Processo de Osmose Reversa	4
II.2.1 – Princípios do Fenômeno	5
II.2.2 – Membranas.....	6
II.2.2.1 – Módulo em Espiral	9
II.2.3 – Configurações do Sistema de OR e Condições de Operação	11
II.2.3.1 – Fatores que Afetam a Retenção de Sais e o Fluxo de Permeado.....	12
II.2.3.2 – Pré-Tratamento da Corrente de Alimentação de Sistemas de OR.....	14
II.2.3.3 – Limpeza Química de Membranas de OR.....	16
II.3 Tratamento de Rejuvenescimento de Membranas de OR	17
II.3.1 – O Ácido Tânico.....	20
III . SISTEMA DE OSMOSE REVERSA DA EMPRESA AZ	21
III.1 Pré-Tratamento	21
III.2 O Sistema de OR	22
III.2.1 Limpeza Química.....	23
III.3 Pós-Tratamento	24
III.4 Performance do Sistema de OR	24
III.5 Composições de Correntes de Águas da ETA da Empresa AZ	24

IV . MATERIAIS E MÉTODOS	26
IV.1 Materiais	26
IV.1.1 Membranas	26
IV.1.2 Produtos Químicos	27
IV.1.3 Equipamentos	28
IV.2 Métodos	32
IV.2.1 Metodologia Experimental	32
IV.2.1.1 Estudo Sobre o Poder de Catálise do Íon Alumínio (Al^{+3}) no Processo de Oxidação de Membranas de PA de OR por Cloro Livre	32
IV.2.1.2 Estudo da Degradação de Membranas Causada pelo Uso do Agente Tensoativo Lauril Sulfato de Sódio, em Procedimentos de Limpeza Química.....	34
IV.2.1.3 Avaliação e Otimização de Procedimentos para Tratamento de Rejuvenescimento de Membranas de PA Utilizando Ácido Tânico	35
IV.2.2 Condições Experimentais Padronizadas para Avaliação de Performance de Membranas.....	38
IV.2.3 Métodos Analíticos.....	39
IV.2.3.1 Análise de Condutividade elétrica.....	39
IV.2.3.2 Análise de pH.....	39
IV.2.3.3 Análises de Concentrações de Sílica Solúvel, Ferro Total, Alumínio e Cloro Livre.....	39
IV.2.3.4 Análise da Concentração de NaCl.....	40
V . RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
V.1 Experimentos Realizados	43
V.1.1 Estudo sobre o Poder de Catálise do Íon Alumínio (Al^{+3}) em Oxidações por Cloro Livre.....	43
V.1.2 Estudo da Degradação de Membranas Causada pelo Uso do Agente Tensoativo Lauril Sulfato de Sódio, em Procedimentos de Limpeza Química.....	47
V.1.3 Avaliação e Otimização de Procedimentos para Tratamento de Rejuvenescimento de Membranas de PA Utilizando Ácido Tânico	53
V.1.3.1 Avaliação de Ácidos Orgânicos e Adstringentes como Agentes de Rejuvenescimento	53

V.1.3.2 Otimização do Procedimento de Rejuvenescimento Utilizando Ácido Tânico como Agente de Rejuvenescimento.....	56
V.1.3.3 Avaliação do Procedimento de Rejuvenescimento sobre Membranas Degradadas a Diferentes Níveis, Utilizando Ácido Tânico como Agente de Rejuvenescimento	60
V.1.3.4 Avaliação de Tempos de Campanha de Membranas Rejuvenescidas	62
V.2 Avaliação do Sistema de OR da Empresa AZ	70
V.2.1 Estudo Sobre uma Possível Oxidação por Cloro Livre Sofrida pelas Membranas do Sistema de OR da Empresa AZ	70
V.2.2 Estudo Sobre a Compatibilidade entre Dispersantes/anti-incrustantes Poliméricos Utilizados nos Sistemas de Separação por Membranas com a Água de Alimentação desses Sistemas	72
VI . CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	74
VI.1 Conclusões	74
VI.2 Sugestões	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
ANEXO A - Operação do Sistema de OR em Bancada	82
ANEXO B - Dados Experimentais	85
ANEXO C - Teste de Fujiwara.....	114
ANEXO D - Artigos Submetidos ao XIV COBEQ	115
APÊNDICE A - Dados dos Fabricantes sobre as Membranas.....	132

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AC	Acetato de celulose	
ACM1	Membrana de poliamida de osmose reversa TRISEP ACM1-TSA	
BW30	Membrana de poliamida de osmose reversa FILMTEC BW30-2514	
Co	Concentração de soluto na corrente de alimentação.....	mg.L ⁻¹
Cp	Concentração de soluto na corrente de permeado.....	mg.L ⁻¹
EDTA	Ácido etilenodiaminotetraacético	
ETA	Estação de tratamento de água	
<i>f</i>	<i>f=f(x,y)</i> Função dependente de <i>x</i> e <i>y</i>	
LSS	Lauril sulfato de sódio	
MF	Micro filtração	
NF	Nanofiltração	
NTU	Unidade nefelométrica de turbidez	
OR	Osmose reversa	
PA	Poliamida	
ppb	Partes por bilhão.....	mg.m ⁻³
ppm	Partes por milhão.....	mg.L ⁻¹
PS	Polissulfona	
PSM	Processo de separação por membrana	
R	Retenção.....	%
SDI	Índice de sedimentação de colóides	
UF	Ultrafiltração	
<i>x, y</i>	Variáveis medidas e independentes	
$\Delta \bar{f}$	Erro absoluto de <i>f</i>	
$\Delta \bar{x}$	Erro absoluto de <i>x</i>	
$\Delta \bar{y}$	Erro absoluto de <i>y</i>	

LISTA DE TABELAS

Tabela II.1 – Forças motrizes de alguns PSM.....	4
Tabela II.2 – PSM relacionados com tamanho dos poros das membranas e respectivas pressões de operação, segundo MULDER (1996).	4
Tabela III.1 – Concentrações de alumínio, ferro, sílica e dureza em algumas correntes de águas da ETA.....	25
Tabela IV.1 – Características das membranas utilizadas.	26
Tabela IV.2 – Erros relativos máximos das análises realizadas no Spectroquant NOVA 60.	40
Tabela IV.3 – Medidas de condutividade elétrica de diferentes concentrações de NaCl a 25,0 °C.....	40
Tabela V.1 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7.....	50
Tabela V.2 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 3.A1, 3.A2 e 3.A3.	54
Tabela V.3 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 3.B1, 3.B2, 3.B3 e 3.B4.....	57
Tabela V.4 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 3.B5, 3.B6 e 3.B7.....	58
Tabela V.5 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 3.B8, 3.B9 e 3.B10.....	59
Tabela V.6 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 3.C1, 3.C2, 3.C3 e 3.C4.....	61
Tabela V.7 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa do experimento 3.D1.....	63

Tabela V.8 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa do experimento 3.D2.....	64
Tabela V.9 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa do experimento 3.D3.....	66
Tabela V.10 – Média aritmética das cinco medidas realizadas na etapa da limpeza química da membrana BW30 para o rejuvenescimento do experimento 3.D4.	68
Tabela V.11 – Resultados dos testes de Fujiwara realizados com membrana do sistema de OR da empresa AZ após três anos em operação.	71

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1 – Representação esquemática do fluxo osmótico, equilíbrio osmótico e osmose reversa.....	6
Figura II.2 – Desenho esquemático da estrutura de um módulo em espiral.	10
Figura II.3 – Representação esquemática da polarização de concentração formada na superfície de uma membrana de OR.....	13
Figura IV.1 – Representação esquemática do sistema de Osmose Reversa.....	28
Figura IV.2 – Fotografia do equipamento do sistema de OR, com módulo para membrana plana.....	29
Figura IV.3 – Fotografia equipamento do sistema de OR, com módulo para membrana em espiral.....	29
Figura IV.4 – Vista superior do módulo para membrana plana.	31
Figura IV.5 – Vista lateral do módulo para membrana plana.	31
Figura IV.6 – Curva de conc. de NaCl <i>versus</i> cond. elétrica (25°C), para a faixa de 0,2 a 20 ppm de NaCl.	41
Figura IV.7 – Curva de conc. de NaCl <i>versus</i> cond. elétrica (25°C), para a faixa de 20 a 300 ppm de NaCl.	41
Figura IV.8 – Curva de conc. de NaCl <i>vs</i> cond. elétrica (25°C), para a faixa de 300 a 2000 ppm de NaCl.	41
Figura V.1 – Retenção utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por alumínio.....	44
Figura V.2 – Retenção utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por ferro.	44
Figura V.3 – Fluxo de permeado utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por alumínio.	45

Figura V.4 – Fluxo de permeado utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por ferro.....	46
Figura V.5 – Comparação entre os gráficos das Figuras V.1, V.2, V.3 e V.4, performances de retenção e fluxo de permeado das oxidações por cloro livre em presença de alumínio e ferro.....	47
Figura V.6 – Retenção de NaCl utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, performance inicial da membrana do experimento 2.1.....	48
Figura V.7 – Fluxo de permeado utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, performance inicial da membrana do experimento 2.1.....	48
Figura V.8 – Retenção de NaCl utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, performance após limpeza da membrana do experimento 2.1 utilizando solução ácida.	49
Figura V.9 – Fluxo de permeado utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, performance após limpeza da membrana do experimento 2.1 utilizando solução ácida.	49
Figura V.10 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos sete experimentos realizados e mostradas na Tabela V.1, antes e após cada etapa da limpeza química.....	52
Figura V.11 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos três experimentos mostradas na Tabela V.2, antes e após os tratamentos de rejuvenescimento.	55
Figura V.12 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos quatro experimentos mostradas na Tabela V.3, antes e após os tratamentos de rejuvenescimento.	57
Figura V.13 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos três experimentos mostradas na Tabela V.4, antes e após os tratamentos de rejuvenescimento.	59
Figura V.14 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos três experimentos mostradas na Tabela V.5, antes e após os tratamentos de rejuvenescimento.	60
Figura V.15 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos três experimentos mostradas na Tabela V.6, antes e após os tratamentos de rejuvenescimento.	62
Figura V.16 – Retenção de NaCl utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D1.	63

Figura V.17 – Fluxo de permeado utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D1.	64
Figura V.18 – Retenção de sais e sílica utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D2.....	65
Figura V.19 – Fluxo de permeado utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D2.....	65
Figura V.20 – Retenção de NaCl utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D3.	67
Figura V.21 – Fluxo de permeado utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D3.	67
Figura V.22 – Retenção de sais e sílica utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D4.....	69
Figura V.23 – Fluxo de permeado utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D4.....	69

ESTUDO DO REJUVENESCIMENTO DE MEMBRANAS DE POLIAMIDA DE OSMOSE REVERSA UTILIZANDO ÁCIDO TÂNICO

João Batista Azevedo da Silva

Orientadoras: Prof.^a Keiko Wada
Prof.^a Isabel Cristina Tessaro

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o rejuvenescimento de membranas de poliamida de osmose reversa utilizando ácido tânico como agente de rejuvenescimento. Em uma primeira etapa foram estudadas oxidações de membranas por cloro livre catalisadas por ferro e alumínio, e degradações promovidas por procedimentos de limpeza química. Posteriormente, testes de rejuvenescimento foram realizados para encontrar as melhores condições para a recuperação da eficiência das membranas. Parâmetros operacionais de procedimentos de rejuvenescimento, tais como: pressão, pH e concentração de ácido tânico da corrente de alimentação foram variados a fim de otimizar a eficiência do tratamento químico na superfície das membranas. Os experimentos foram realizados em um sistema de osmose reversa (OR) em bancada, que pode operar com dois tipos de módulos para membrana, um para membrana plana e outro para membrana em espiral. As performances das membranas foram avaliadas medindo-se a retenção de NaCl e sílica, utilizando-se soluções contendo 2000 ppm de NaCl e também água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ. Os resultados obtidos com os experimentos demonstraram que o alumínio e o ferro catalisaram oxidações por cloro livre nas superfícies das membranas utilizadas. Também, o agente de limpeza química lauril sulfato de sódio degradou membranas que tinham suas superfícies previamente oxidadas por cloro livre. O tratamento de rejuvenescimento melhorou a retenção de NaCl e de sílica de membranas previamente oxidadas e degradadas por cloro livre e lauril sulfato de sódio, respectivamente. Este trabalho é complementado por um estudo sobre as condições operacionais e de performance das membranas do sistema de osmose reversa da empresa AZ, a fim de verificar e/ou confirmar algumas dúvidas relacionadas com o decréscimo na performance do sistema de OR.

STUDY OF REVERSE OSMOSIS POLYAMIDE MEMBRANES REJUVENATION BY TANNIC ACID

João Batista Azevedo da Silva

Thesis supervisors: Prof.^a Keiko Wada
Prof.^a Isabel Cristina Tessaro

ABSTRACT

In this work is presented a study about reverse osmosis polyamide membranes rejuvenation by using tannic acid as renew agent. Firstly it was investigated membrane oxidation with free chlorine catalyzed by iron and aluminum, and the degradation provoked by the chemical cleaning procedures. After this, rejuvenation tests were performed to find the best condition to recovery the membranes efficiency. Operational parameters of rejuvenation procedures, such as: pressure, pH and tannic acid concentration in the feed solution have been changing in order to optimize the chemical treatment efficiency on the membranes surface. Experiments were carried out in a laboratory scale reverse osmosis (RO) system, which has two exchangeable membrane modules, one flat sheet, and the other a spiral wound. Membrane performances were evaluated analyzing NaCl and silica retentions, making use of solutions of 2000 ppm of NaCl, and RO feed water supplied by AZ company. The results obtained with the experiments showed that aluminum and iron catalyzed free chlorine oxidation on the membrane surface. Also, that the chemical cleaning agent sodium lauril sulfate degraded membranes which were previously oxidized with free chlorine. The rejuvenation treatment improved the NaCl and silica retentions of the membranes previously oxidized and degraded, with free chlorine and sodium lauril sulfate respectively. This work is complemented with a study about the operating conditions and membrane performance of the AZ company RO system, in order to check and/or confirm some doubts related with the decrease on the RO system performance.

I. INTRODUÇÃO

Processos de separação por membranas (PSM) são utilizados para separar, concentrar ou purificar substâncias químicas. Dentre os muitos processos convencionais utilizados para os mesmos fins, os PSM caracterizam-se por utilizar membranas semi-permeáveis como barreiras seletivas. Os PSM ampliam o conceito de filtração convencional, permitindo que solutos dissolvidos sejam separados de correntes líquidas.

O processo de osmose reversa (OR) é uma valiosa operação de PSM e tornou-se uma tecnologia comum em muitas indústrias que requerem separação de solutos de baixo peso molecular, normalmente sais dissolvidos em correntes líquidas. Diversas aplicações têm sido encontradas para os processos de OR. Os fabricantes de membranas de OR trabalham para desenvolver estruturas e materiais que conjuguem resistência química e mecânica com altos fluxos de permeado.

Um dos problemas enfrentados pelos usuários de OR é a formação de depósitos e “fouling”. É normal que as variadas correntes de alimentações incrustem as membranas causando o fenômeno chamado de “fouling”, o qual pode ser amenizado utilizando-se procedimentos adequados a cada sistema, ainda que não possa ser eliminado completamente. Decréscimo do fluxo de permeado, aumento da perda de carga da corrente de alimentação e aumento da passagem de sólidos dissolvidos são os principais efeitos observados à medida que as membranas acumulam “fouling” e depósitos. Limpezas químicas periódicas fazem-se necessárias para recuperar a performance das membranas de OR e geralmente possuem diferentes graus de sucesso.

Membranas de OR podem operar de 3 a 7 anos com condições satisfatórias de desempenho. Perdas perceptíveis de performance das membranas são verificadas ao longo dos anos de operação e podem ser atribuídas a diversos fatores. Técnicas de tratamentos químicos podem promover o rejuvenescimento de superfícies de membranas degradadas, melhorando suas características de retenção de sólidos dissolvidos.

Neste trabalho, membranas planas de poliamida de OR são submetidas a condições específicas de operação e procedimentos de limpeza química, a fim de avaliar a influência de diversos fatores que prejudicam a membrana. Oxidações por cloro livre catalisadas por ferro e

alumínio são estudadas e comparadas com os dados encontrados na literatura. Estudou-se também as ações de diferentes agentes utilizados em procedimentos de limpeza química. Este trabalho objetivou, sobretudo, estudar procedimentos de rejuvenescimento em membranas de poliamida de OR, previamente degradadas sob condições controladas, utilizando ácido tânico como agente de rejuvenescimento.

Este trabalho é parte integrante do projeto de pesquisa “Otimização do Processo de Osmose Reversa da Empresa AZ”, cuja motivação está em buscar explicações e soluções para alguns dos problemas enfrentados pelo referido processo. Por esta característica, este trabalho é composto por alguns estudos em paralelo ao objetivo principal que é o processo de rejuvenescimento das membranas de OR. Cabe salientar ainda que os problemas acima mencionados referem-se à degradação das membranas, sem a qual não faz sentido o estudo de tratamentos de rejuvenescimento.

Os experimentos de OR foram realizados utilizando módulo para membrana plana e módulo para membrana em espiral.

No Capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica e fundamentos teóricos, onde trabalhos de diferentes autores e pesquisadores são citados para descrever os PSM, o processo de OR e o rejuvenescimento de membranas de OR. Os dados e informações estão dispostos de forma a conduzir a um entendimento teórico dos objetivos propostos neste trabalho.

No Capítulo III é apresentada uma descrição do sistema de OR da empresa AZ. Esse sistema e os dados de performance de suas membranas serviram para caracterizar e expor peculiaridades de uma planta industrial de OR, e também auxiliaram a guiar as propostas dos objetivos deste trabalho.

No Capítulo IV estão descritos os materiais e métodos utilizados nos experimentos realizados neste trabalho. A descrição abrange os equipamentos utilizados, as membranas, os produtos químicos, os experimentos realizados e as análises utilizadas para as determinações das concentrações nas correntes de alimentação e permeado.

No Capítulo V os resultados experimentais obtidos são apresentados e discutidos. Este capítulo é complementado com avaliações realizadas sobre o sistema de OR da empresa AZ, em que alguns ensaios experimentais foram realizados a fim de averiguar a causa de problemas ocorridos com as membranas daquele sistema.

No Capítulo VI estão descritas as conclusões dos resultados obtidos e sugestões para futuros trabalhos.

II . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura e fundamentos teóricos abordando trabalhos que deram subsídio a esta dissertação, situando o leitor no contexto dos objetivos deste trabalho. Os trabalhos de autores e pesquisadores são referenciados de modo a descrever os processos de separação por membranas, o processo de osmose reversa e finalmente o rejuvenescimento de membranas de osmose reversa.

II.1 Processos de Separação por Membranas

Embora este trabalho trate apenas sobre o processo de OR, inicia-se o capítulo descrevendo sobre diferentes processos de separação por membranas, salientando as características fundamentais que diferenciam a OR dos demais PSM.

Processos de separação por membranas representam operações destinadas a separar, concentrar ou purificar substâncias. Entre os diversos processos convencionais de separação, os PSM se destacam devido a um baixo consumo energético, sendo inclusive utilizados, segundo SCHAEFER (2001), como meio alternativo para reaproveitamento de efluentes gerados por processos industriais.

Segundo MULDER (1996), existem vários processos que utilizam membranas, baseados em diferentes princípios ou mecanismos de separação. Aplicações específicas podem cobrir a separação de um ampla variedade de substâncias, de partículas a moléculas. Apesar de várias diferenças existentes, as membranas representam o centro vital de todos os PSM e podem ser consideradas como uma barreira semi-permeável entre duas fases.

CHERYAN (1986) define filtração como a separação entre dois ou mais componentes de uma corrente fluida, onde estes componentes são partículas sólidas. Os PSM ampliam esta definição da filtração convencional para separações onde os solutos estão dissolvidos na corrente líquida e para separações de misturas de gases.

O transporte de substâncias através das membranas, de acordo com MULDER (1996), é realizado como resultado da ação de uma força motriz sobre uma solução de alimentação. A Tabela II.1 indica alguns PSM e as respectivas forças motrizes empregadas.

Tabela II.1 – Forças motrizes de alguns PSM.

Força Motriz	PSM
Δ (Pressão)	Microfiltração (MF)
	Ultrafiltração (UF)
	Nanofiltração (NF)
	Osmose Reversa (OR)
Δ (Concentração)	Pervaporação (PV)
	Diálise (D)
Δ (Potencial elétrico)	Eletrodiálise (ED)

Os PSM onde a força motriz é o gradiente de pressão são diferenciados pelo tamanho dos poros e pelos limites de pressão aplicados em cada processo, conforme a Tabela II.2.

Tabela II.2 – PSM relacionados com tamanho dos poros das membranas e respectivas pressões de operação, segundo MULDER (1996).

PSM	Tamanho dos poros (nm)	Limites de pressão (bar)
MF	50 – 10000	0,1 – 2,0
UF	1 – 100	1,0 – 5,0
NF	< 2	5,0 – 20
OR	< 2	10 – 100

Segundo o mesmo autor, sistemas de filtração podem operar com fluxo de alimentação tangencial ou transversal; neste último, toda a fase líquida da alimentação é forçada através da membrana. Para aplicações industriais, operações com fluxo tangencial são preferidas devido a menor tendência de acumular rejeitos sobre a superfícies da membrana. Nos sistemas com fluxo tangencial, a alimentação escoia paralelamente à superfície da membrana e é separada numa corrente purificada (permeado) e em outra corrente concentrada de partículas e/ou solutos (concentrado). A corrente de permeado é separada escoando transversalmente à membrana.

II.2 O Processo de Osmose Reversa

Sistemas de OR, de acordo com BYRNE (1995), têm como objetivo separar partículas dissolvidas da água por meio de uma membrana semi-permeável que permite a passagem de água preferencialmente à passagem de soluto. Segundo RAUTENBACH e ALBRECHT (1989), o solvente é transportado através da membrana semi-permeável como resultado da aplicação de uma pressão, maior do que a pressão osmótica de equilíbrio da solução a ser concentrada.

De acordo com BYRNE (1995), a OR tornou-se uma tecnologia de tratamento de água de uso comum a muitas indústrias que requerem separação de um soluto dissolvido em um solvente, geralmente água. A aplicação mais comum de OR é a purificação de água, envolvendo a remoção de contaminantes indesejados. Indústrias fazem intenso uso desta aplicação da OR desde produção de água de processo ultra pura, até o tratamento de efluentes industriais. O processo de OR também é utilizado para produzir água potável pela dessalinização de água salgada. Em residências, a OR é utilizada para melhorar o gosto da água e para remover contaminantes prejudiciais à saúde, tais como impurezas dissolvidas. Osmose reversa é um componente fundamental em sistemas de tratamento para água utilizada na fabricação de semicondutores, produtos farmacêuticos, aparelhos médicos, assim como na purificação de água utilizada para diálise e para geração de vapor de alta pressão. Com o passar dos anos, novas aplicações são encontradas para os processos de OR.

O mesmo autor considera que a atual expansão da tecnologia de OR é devido, principalmente, à sua operação econômica e simples. Comparada a outras tecnologias de remoção de sais dissolvidos, a OR não requer energia na forma de calor para mudança de fase, tal como a destilação, e também não requer grandes volumes de reagentes químicos, tal como é necessário em sistemas por troca iônica. Um processo básico de OR utiliza uma bomba de alta pressão, para prover a força motriz, e uma membrana semi-permeável.

II.2.1 – Princípios do Fenômeno

Osmose é um fenômeno que ocorre naturalmente em vários processos biológicos e, segundo RAUTENBACH e ALBRECHT (1989), consiste no transporte do solvente através de uma membrana semi-permeável, como o resultado de uma diferença de concentração entre as fases líquidas separadas por esta membrana. O solvente é transportado da fase menos concentrada para a fase mais concentrada, e se o sistema não estiver sujeito a influências externas, uma diferença de pressão hidrostática é estabelecida entre as fases. Esta condição é conhecida como equilíbrio osmótico e a correspondente diferença de pressão é denominada pressão osmótica. Equilíbrio osmótico representa um equilíbrio termodinâmico: solvente ainda passa através da membrana mas os fluxos possuem o mesmo valor em ambas as direções. Se uma pressão maior do que a pressão osmótica for aplicada sobre a solução mais concentrada, o fluxo de solvente pode ser invertido sendo transportado através da membrana da solução mais concentrada para a menos concentrada, esta condição caracteriza o processo de osmose reversa.

Uma representação esquemática de fluxo osmótico, equilíbrio osmótico e osmose reversa está mostrada na Figura II.1.

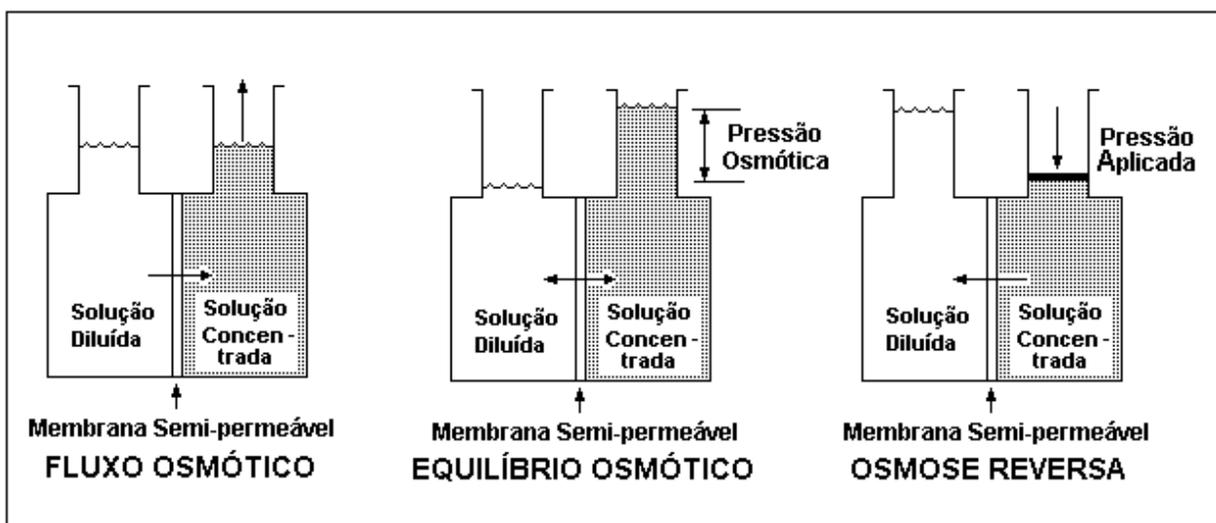


Figura II.1 – Representação esquemática do fluxo osmótico, equilíbrio osmótico e osmose reversa.

BRANDT (1985) ressalta que o fluxo de água transportado através da membrana depende: das propriedades da membrana, da temperatura da solução, da diferença de pressão aplicada através da membrana e da diferença de pressão osmótica entre o concentrado e a solução diluída. A pressão osmótica é proporcional à temperatura e à concentração da solução e, também, depende dos tipos das espécies iônicas presentes.

O fluxo de soluto através da membrana, de acordo com HENRY et al. (1997), é devido a um efeito combinado de arraste pelo solvente, geralmente insignificante, e difusão através da membrana. A passagem de solutos através da membrana é uma função da diferença de potencial químico, traduzida principalmente pela diferença de concentração entre as soluções concentrada e permeada.

II.2.2 – Membranas

Como já mencionado, a membrana é o elemento principal nos PSM e, portanto, faz-se necessário ampliar o conhecimento sobre suas características.

BYRNE (1995) expõe que o processo de OR é diferente de filtração convencional, onde as partículas são retidas por serem maiores do que os poros das membranas. Poros podem não existir em membranas de OR, mesmo com a utilização de microscópios de alta resolução tais poros nunca foram encontrados. É mais provável que água e partículas de pequena massa molar

sejam capazes de uma difusão através da estrutura do material constituinte da membrana, por meio de ligações e afinidades entre os segmentos de sua estrutura química. Entretanto, sais dissolvidos e moléculas orgânicas de grande massa molar não serão transportadas através da membrana em função dos seus tamanhos e características de carga.

Membranas de OR, segundo BYRNE (1995), são bastante hidrofílicas, o que significa que sua estrutura química atrai as moléculas de água. A habilidade de uma membrana de OR permitir a difusão de certos solutos enquanto rejeita outros não é absoluta, mas geralmente ions de maior valência e de maior tamanho sofrem maior rejeição.

A seletividade de uma membrana, de acordo com MULDER (1996), em relação ao soluto contido em uma solução é geralmente expressa em termos de retenção desse soluto pela membrana. O soluto é parcialmente ou completamente retido pela membrana, enquanto as moléculas de solvente (água) passam através da membrana. A retenção, também denominada rejeição, é definida como:

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_o} \right) \times 100 \quad (\text{II.1})$$

onde C_o representa a concentração do soluto na alimentação e C_p a concentração do soluto no permeado.

Em processos de OR, geralmente o objetivo é purificar ou concentrar soluções que contêm diferentes tipos de solutos e partículas, onde cada uma dessas substâncias será diferentemente retida pela membrana. A fim de medir a retenção global de solutos/partículas através das membranas é necessário que a concentração de sólidos dissolvidos totais na corrente de alimentação e de permeado seja determinada.

Tipicamente, a concentração de sólidos dissolvidos totais de soluções aquosas processadas em membranas de OR incluem pequenas quantidades de materiais orgânicos e grandes quantidades de sais dissolvidos, sendo que somente os sais dissolvidos têm efeito significativo sobre a condutividade elétrica. Assim, medidas de condutividade elétrica podem ser utilizadas para estimar a concentração de sólidos dissolvidos totais nas correntes de alimentação e de permeado, freqüentemente denominada de concentração de sais.

MACÊDO (2000) avalia que as membranas de OR em geral retêm a maioria dos contaminantes orgânicos e até 99% de todos os íons. Retêm ainda, até 99,9%, os vírus, as bactérias e colóides.

Para aplicações de purificação de água, de acordo com BYRNE (1995), as duas famílias de membranas de OR mais utilizadas são constituídas por polímeros: acetato de celulose (AC) e poliamida (PA). Um terceiro tipo utiliza polissulfona carregada (PS). Membranas de PA são amplamente utilizadas devido as suas características de elevado fluxo de permeado e elevada retenção. São capazes de operar numa ampla faixa de pH mas são muito sensíveis a agentes oxidantes, tal como o cloro livre. Membranas de AC possuem uma resistência maior a agentes oxidantes, mas são limitadas a operar num estreito intervalo de pH. Fora dos valores de pH especificados pelos fabricantes essas membranas são facilmente hidrolisadas e degradadas. Membranas de PS são carregadas negativamente, possuem alta resistência a agentes oxidantes e podem operar numa ampla faixa de pH, mas devido as suas características de carga, atraem e retêm cátions em sua superfície, reduzindo a performance.

O fluxo de solvente através da membrana, de acordo com MULDER (1996), é tão importante quanto a seletividade em relação aos vários tipos de soluto, e é inversamente proporcional à espessura da membrana. Por esta razão, a maioria das membranas de OR possuem uma estrutura assimétrica, isto é, uma fina e densa película de membrana (menor do que 1 μm) é suportada por outra camada porosa de maior espessura (50 – 150 μm). A resistência ao transporte de solvente através da membrana é determinada principalmente pela película fina e densa que também é responsável pelas características de seletividade da membrana. A camada suporte porosa confere resistência mecânica à película. Membranas com estrutura assimétrica podem ter a película seletiva e camada suporte constituídas por materiais poliméricos diferentes, para que cada camada seja otimizada separadamente, e membranas com este tipo de estrutura são denominadas compostas.

BRANDT et al. (1992) destacam que membranas compostas de OR em geral apresentam melhores características de estabilidade química, resistência a ataques microbiológicos e possuem a habilidade de produzir altos fluxos de solvente operando em pressões moderadas.

Membranas de OR são acondicionadas em módulos cujas configurações possibilitam que uma grande área de membrana esteja contida em um pequeno volume. BRANDT et al. (1992) descrevem quatro configurações comercialmente utilizadas em membranas de OR: módulo em espiral, placa e quadro, fibra oca e tubular.

De acordo com BYRNE (1995), membranas de OR em configurações tubular e placa e quadro constituíram os primeiros sistemas de OR em larga escala colocados em operação, mas apresentaram desvantagens como o alto custo e uma baixa área superficial de membranas por

volume de módulos utilizados. As configurações mais utilizadas pelos usuários de OR são módulos em espiral e de fibra oca, que possuem, entre outras características, maior área superficial de membranas por volume de módulos utilizados. Membranas em fibras ocas perderam espaço comercial com o surgimento das membranas em espiral, mas ainda são bastante utilizadas em sistemas de dessalinização.

Segundo BUECKER (2000), módulos com membranas em espiral são atualmente, de longe, os mais amplamente utilizados em sistemas de OR.

De acordo com GAUWBERGEN e BAEYENS (2001), unidades para membranas planas são preferidas em experimentos laboratoriais para a determinação de propriedades intrínsecas das membranas em relação ao fluxo de permeado e à eficiência de separação. Estas unidades não são caras e, devido a facilidade de substituição de membranas, permitem que diferentes membranas sejam utilizadas. O uso industrial destas unidades é excluído devido a baixa área de membrana por volume da unidade.

II.2.2.1 – Módulo em Espiral

Descreve-se aqui o módulo em espiral com maiores detalhes, já que este tipo de configuração é utilizado nos experimentos e também na empresa AZ.

Na construção de módulos em espiral, de acordo BYRNE (1995), são utilizadas duas membranas planas com três extremidades coladas de modo a criar um envelope com a camada seletiva da membrana voltada para fora. Dentro do envelope é colocado uma tela fina, tal como algum tecido polimérico, que permite o escoamento do permeado em seu interior, mesmo quando as superfícies externas do envelope estiverem submetidas a altas pressões. A extremidade aberta do envelope é colada em um tubo rígido plástico com perfurações que permitem o escoamento de água de dentro do envelope para o interior do tubo. Dependendo do diâmetro desejado para o módulo a ser construído, vários envelopes podem ser enrolados ao redor do tubo plástico central. Entre estes envelopes uma rede plástica, denominada espaçador, é colocada a fim de criar o canal para o escoamento da corrente de alimentação e promover a sua turbulência. O módulo em espiral formado pelos envelopes enrolados ao redor do tubo central tem sua parte externa lacrada com fibra de vidro.

A corrente de alimentação percorre longitudinalmente o módulo em espiral, entre os espaçadores dos envelopes de membranas, tangencial às suas superfícies, e o solvente escoa transversalmente através das membranas para dentro dos envelopes e em seguida para o tubo

central coletor de permeado. BYRNE (1995) ressalta que dentro dos envelopes a pressão é próxima da pressão atmosférica, enquanto que a pressão da corrente de alimentação no lado de fora dos envelopes pode ser tão alta quanto 68 bar. A Figura II.2 representa um desenho esquemático da estrutura de um módulo em espiral.

Este mesmo autor salienta que a configuração das membranas em módulos espiral permite um escoamento uniforme da alimentação, e a turbulência promovida pelos espaçadores reduz o potencial de formação de depósitos e “fouling” sobre a membrana e melhora a eficiência das limpezas químicas.

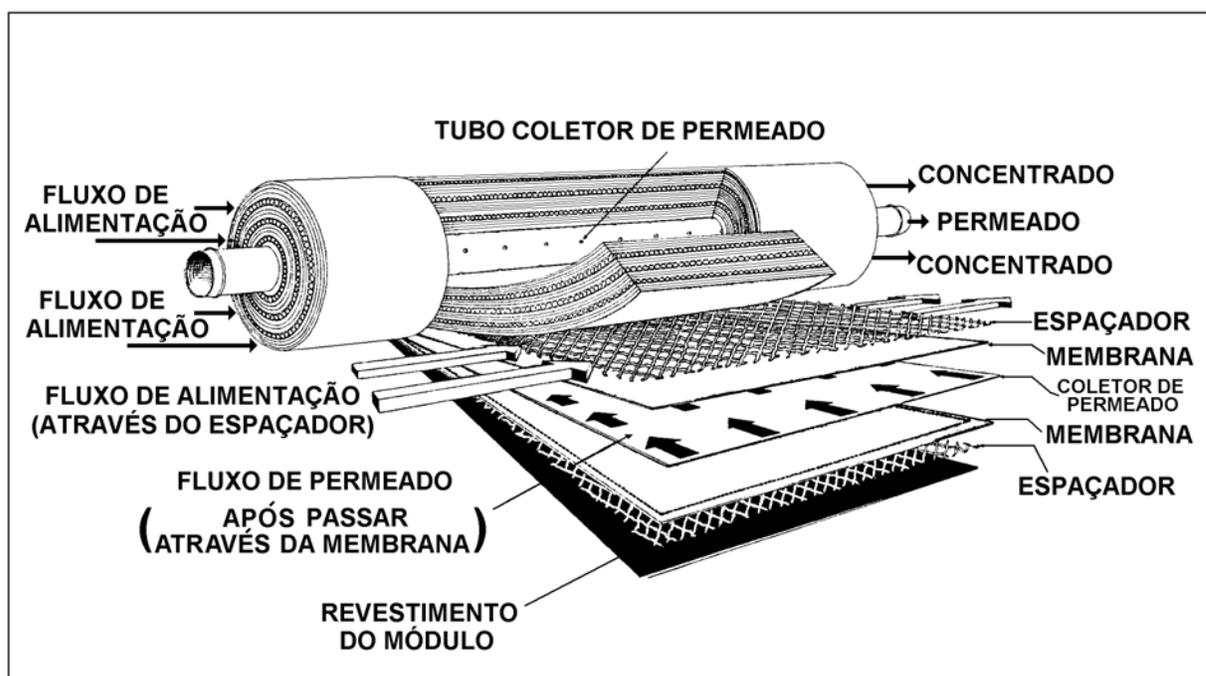


Figura II.2 – Desenho esquemático da estrutura de um módulo em espiral.

Módulos em espiral requerem vasos de pressão externos projetados para suportar as pressões de operação da OR. BYRNE (1995) considera que um vaso de pressão típico pode conter até 7 módulos individuais conectados em série, onde cada módulo possui 101,6 cm (40 in) de comprimento.

A recuperação de permeado é definida por BRANDT et al. (1992) como a percentagem da corrente de alimentação que é convertida em corrente de permeado. Individualmente, módulos em espiral operam com 8 a 10% de recuperação de permeado. Quatro a sete módulos são conectados em série no interior de vasos de pressão obtendo-se até 50% de recuperação de permeado. Aqui, a corrente de concentrado que deixa cada módulo alimenta o módulo

subsequente e os tubos coletores de permeado dos módulos são conectados de modo a efluir uma mistura das correntes de permeado individuais de cada módulo.

BYRNE (1995) ressalta que sistemas de OR submetidos a altos valores de recuperação de permeado podem ter a qualidade do permeado afetada. Recuperar solvente da alimentação implica em concentrá-la, possibilitando uma passagem de solutos e partículas através da membrana proporcionalmente maior.

II.2.3 – Configurações do Sistema de OR e Condições de Operação

PITTNER (1992) avalia que sistemas de OR deveriam ser vistos como um sistema abrangendo vários componentes e considerações. A primeira consideração é o específico uso da água produzida, que determina a qualidade e quantidade requeridas pelas necessidades do usuário.

BUKAY (1996) salienta que sistemas de OR devem ser projetados em configurações apropriadas para produzir uma determinada qualidade e quantidade de água. Os módulos individuais de membranas podem ser arranjados em diversas configurações destinadas a diferentes fins. Geralmente os sistemas de OR são compostos por um ou dois estágios, onde o primeiro estágio representa um conjunto de vasos de pressão carregados com módulos de membrana, que são alimentados pelo fluxo fornecido pela bomba de alta pressão, e a corrente de concentrado efluente do primeiro estágio é a que alimenta o segundo estágio.

De acordo com PAUL (1995), a fim de reduzir ainda mais a concentração de solutos, a corrente de permeado pode alimentar outro conjunto de módulos de membrana e este conjunto é denominado de segundo passo.

FLEMMING (1992) ressalta que a performance de um sistema de OR bem como a sua manutenção são influenciados diretamente pela natureza da água de alimentação que pode afetar a qualidade e quantidade do permeado produzido. Análises da água de alimentação devem ser realizadas e consideradas no projeto de um sistema de OR.

BYRNE (1995) considera que a qualidade do permeado requerido pode determinar o tipo de membrana a ser utilizada no sistema de OR e, possivelmente, limitar a recuperação de permeado produzido.

II.2.3.1 – Fatores que Afetam a Retenção de Sais e o Fluxo de Permeado

De acordo com BRANDT et al. (1992) e MATSUURA (1992), a superfície das membranas, ao longo da operação, pode impregnar com materiais coloidais, orgânicos, óxidos e hidróxidos de metais e crescimentos biológicos, e a estas incrustações denomina-se “fouling”. Precipitação de sais da corrente de alimentação podem causar depósitos na superfície da membrana. Materiais coloidais são geralmente diminutas partículas argilosas; materiais orgânicos podem ser óleos e gorduras, ácidos húmicos e taninos; óxidos e hidróxidos de metais são geralmente formados de ferro, manganês e alumínio. A presença de sólidos suspensos na corrente de alimentação, tal como sedimentos, podem causar entupimento do canal de alimentação dos módulos de membrana, assim como "fouling" em sua superfície. Incrustações minerais, tais como sais, consistem de carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, sulfato de bário e silicatos, entre outros.

VROUWENVELDER e KOOIJ (2001) definem como “biofouling” a acumulação de materiais biológicos na superfície de membranas.

BYRNE (1995) considera que os tipos de "fouling" nas superfícies das membranas dependem das características físico-químicas e da composição da corrente de alimentação, bem como das condições de pressão, temperatura, vazão e taxa de recuperação de permeado na qual opera o sistema de OR. À medida que água permeia através das membranas, "fouling" e depósitos acumulam em suas superfícies, reduzindo o fluxo de permeado e aumentando a perda de carga da corrente de alimentação nos módulos de membrana, como resultado de uma maior resistência ao transporte dessas correntes. O aumento de concentração nas proximidades da superfície da membrana, em relação aos pontos mais distantes, depende de quão rápido estes sais podem difundir de volta para a corrente de alimentação, e esta taxa de difusão depende da turbulência da corrente de alimentação. Polarização de concentração é o termo utilizado para descrever esta camada de concentração de sais junto à superfície da membrana. A Figura II.3 mostra uma representação esquemática da formação de polarização de concentração na superfície de uma membrana de OR.

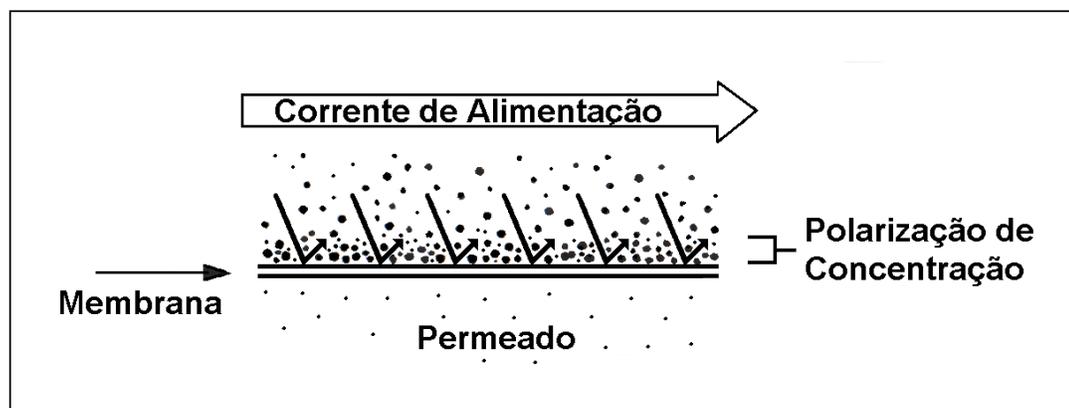


Figura II.3 – Representação esquemática da polarização de concentração formada na superfície de uma membrana de OR.

Segundo LISDONK et al. (2001), a concentração de solutos sobre a superfície da membrana causada pela concentração de polarização proporciona uma maior passagem de sais através da membrana. Polarização de concentração pode ser reduzida pelo aumento da turbulência da corrente de alimentação, ao passo que “fouling” não é reduzido apenas por turbulência, devido à natureza química da sua interação com a superfície da membrana.

BYRNE (1995) considera "fouling" uma ocorrência normal em operações de sistemas de OR e pode ser controlado com um monitoramento adequado e limpezas químicas periódicas. Depósitos de minerais precipitados podem ou não ser controlados, dependendo da natureza de suas formações. Alguns tipos de depósitos, tais como sulfatos ou silicatos, podem ser extremamente difíceis de remover da superfície das membranas. Tais incrustações podem rapidamente levar à perda de desempenho das membranas de OR. No entanto, o potencial de incrustações de uma determinada corrente de alimentação pode ser controlada com um pré-tratamento adequado, vazões apropriadas e adição de produtos químicos.

De acordo com HOOLEY et al. (1992), análises específicas, tais como a de turbidez e índice de sedimentação de colóides, podem ser usadas como indicadores do potencial de “fouling” de correntes de alimentação de sistemas de OR. Índice de sedimentação de colóides (SDI) é um teste que mede a taxa de “fouling” em filtros de membranas de 0,45 µm, contidas em equipamentos destinados a realização dessas medidas.

Alguns parâmetros operacionais e físico-químicos possuem influência direta sobre a passagem de solvente e solutos através da membrana. Segundo FUTSELAAR (1993), escoamentos com maior turbulência obtidos com fluxos elevados da corrente de alimentação diminuem a polarização de concentração na superfície da membrana, melhorando por

conseqüência a retenção de sais pela membrana. BYRNE (1995) destaca que a passagem de água através da membrana é uma função da diferença de pressão através da membrana, enquanto que a passagem de sais não representa uma função desta diferença. A passagem de solutos e solvente através da membrana aumenta com o aumento da temperatura da corrente de alimentação, conforme observa BUKAY (1992).

II.2.3.2 – Pré-Tratamento da Corrente de Alimentação de Sistemas de OR

De acordo com ISAIAS (2001), um pré-tratamento apropriado pode ser considerado como a chave de um bom desempenho de uma planta de OR.

BYRNE (1995) observa que o propósito dos pré-tratamentos de sistemas de OR é otimizar a performance e o tempo de vida útil dos módulos de membranas de OR. O pré-tratamento compreende um conjunto de equipamentos e operações com o objetivo de realizar uma tarefa que envolve basicamente três objetivos:

1. Garantir a compatibilidade da corrente de alimentação com as membranas de OR.
2. Reduzir o potencial de formação de “fouling” sobre as membranas de OR.
3. Reduzir a freqüência de limpezas químicas nas membranas de OR.

BRADLEY (1992) afirma que águas originárias das mais variadas fontes podem receber tratamento adequado possibilitando alimentar sistemas de OR. A fim de remover partículas e contaminantes de origem orgânica e inorgânica, uma seqüência de operações podem ser requeridas. Clarificação, filtrações, ultrafiltração, ajustes de pH, remoção de agentes oxidantes e injeção de produtos anti-incrustantes e dispersantes podem ser utilizadas, entre outras operações.

Sob condições normais, clarificação é necessária quando a fonte de captação fornece água com turbidez elevada e com grande concentração de contaminantes. Segundo KIM (1995), a operação de clarificação permite que um grande percentual de contaminantes seja precipitado rapidamente. Devido às características de carga das partículas suspensas, muitas estações de tratamento utilizam substâncias que contêm ferro ou alumínio como agentes coagulantes para dissipar as cargas negativas das partículas suspensas na água, permitindo que se aglomerem e precipitem da suspensão. BYRNE (1995) ressalta que o alumínio e o ferro possuem muitas semelhanças em suas tendências para reagir. Assim como o ferro, o alumínio se combina com oxigênio para formar um óxido insolúvel. Ambos os metais são capazes de complexar com colóides orgânicos carregados negativamente, precipitando prontamente quando silicatos estão

presentes. Características de valência e tamanho fazem do alumínio um íon metálico com alta densidade de carga, o que o torna muito reativo.

Cloro livre é utilizado em operações de tratamento de águas como biocida e agente oxidante de contaminantes. TCHOBANOGLIOUS e SCHROEDER (1985) observam que devido ao cloro livre ser um oxidante a quantidade requerida para a desinfecção é uma função da concentração de todos os materiais oxidáveis, principalmente materiais orgânicos. Concentração de cloro livre residual é definida como a soma das concentrações de hipoclorito e ácido hipocloroso. Conceitualmente quatro etapas estão envolvidas na obtenção de cloro livre residual: oxidação de substâncias facilmente oxidáveis, formação de cloraminas e compostos cloro-orgânicos, destruição parcial de cloraminas e compostos cloro-orgânicos e finalmente a formação de cloro livre residual. “Breakpoint” é a denominação do ponto em que todo o cloro adicionado será convertido em cloro livre. Estações de tratamento de água buscam adicionar quantidades de cloro suficientes para obterem cloro livre residual, garantindo que o “breakpoint” seja alcançado.

Com exceção de algumas novas membranas de polissulfona, que são utilizadas em limitadas aplicações, BRADLEY (1992) constata que todas as membranas de OR são suscetíveis à degradação por agentes oxidantes, especialmente por cloro livre. Membranas de AC são mais resistentes ao contato com agentes oxidantes que as membranas de PA que são mais facilmente oxidadas. Já que as membranas poliméricas em geral sofrem oxidação em contato com cloro livre este deve ser removido da corrente de alimentação de sistemas de OR. Os dois métodos mais utilizados para remover cloro livre de correntes de águas são: passagem da corrente por leitos de carvão ativado, e a adição de agentes redutores, tais como bissulfito e metabissulfito de sódio.

BYRNE (1995) e HENLEY (1996) relatam a habilidade de metais de transição, como o ferro, o manganês, o cobre e o zinco, de mudar seus estados de valência catalisando e aumentando o potencial de oxidação de agentes oxidantes, como o cloro livre, sobre a superfície de membranas de OR, especialmente a de PA. Quando estes metais e cloro livre estão presentes ao mesmo tempo sobre a superfície da membrana, elétrons são mais agressivamente retirados da estrutura da membrana. Devido à maior ocorrência em fontes de captação de águas, bem como na composição de tubulações e equipamentos, a presença de ferro é comum na corrente de água de alimentação de sistemas de OR. Portanto, a ação catalítica do íon ferro na oxidação de membranas por cloro livre tem sido um assunto digno de atenção.

Ferro é encontrado na natureza no estado reduzido (Fe^{+2}), que tende a ser solúvel, e no estado oxidado (Fe^{+3}) onde a sua solubilidade é reduzida. Características físico-químicas da

solução, tais como pH e a presença de agentes oxidantes ou redutores, indicarão a quantidade presente de ferro em cada uma das duas valências. BYRNE (1995) sugere que o ferro, assim como todos os metais de transição, incrusta sobre as membranas de OR quando estiver em estado oxidado, onde estas partículas insolúveis podem ser quimicamente reduzidas, catalisando a ação dos agentes oxidantes, tal como o cloro livre. Por outro lado, HENLEY (1996) afirma que a catálise de ferro em oxidações por cloro livre, somente acontecerá se o íon ferroso estiver presente, sem a necessidade da presença do íon férrico.

Se a concentração de sais exceder o seu limite de solubilidade, precipitação e depósito podem ocorrer sobre a superfície da membrana. BRADLEY (1992) ressalta que produtos anti-incrustantes e dispersantes podem ser injetados na corrente de alimentação da OR a fim de reduzir a formação de "fouling" e depósitos. Estes produtos retardam o processo de precipitação inibindo o crescimento de cristais e mantêm as partículas repelidas e dispersas. Diversos tipos de anti-incrustantes e dispersantes, poliméricos e não poliméricos, são utilizados em sistemas de OR.

II.2.3.3 – Limpeza Química de Membranas de OR

De acordo com BYRNE (1995), depósitos e "fouling" afetam o fluxo de permeado e a perda de carga da corrente de alimentação mais significativamente do que a retenção de sais pela membrana. Fabricantes de membranas de OR sugerem índices toleráveis de mudanças de performance antes da necessidade da realização de limpeza química no sistema de OR. Devido às diferentes condições diárias de operação, tais como temperatura, vazão e pressão da corrente de alimentação, as performances de sistemas de OR devem ser avaliadas por meio de dados normalizados, onde a variação das condições operacionais representam parâmetros de funções matemáticas utilizadas para normalização de dados. O monitoramento de dados normalizados permite uma comparação direta dos dados de operação de diferentes dias e sob diferentes condições de operação. Geralmente, as quantidades máximas de mudança de performance aceitáveis compreendem:

1. Redução de 10 a 15% no fluxo de permeado normalizado.
2. Aumento de 10 a 15% na perda de carga normalizada.
3. Redução de 1 a 2% na retenção de sais.

BYRNE (1995) salienta que devido aos dados de retenção de sais não serem normalizados, e por representarem mudanças muito pequenas, normalmente é secundária na decisão de realização de uma limpeza química. Os limites preestabelecidos representam valores

de segurança, acima dos quais "fouling" e depósitos podem não ser efetivamente removidos pela limpeza química, levando as membranas a uma perda irreversível de performance.

ISNER e WILLIAMS (1992) constataram que são muitos os tipos de "fouling" e depósitos em membranas de OR. Limpeza química representa um assunto complexo. Caracterizar os tipos de incrustações é essencial para a seleção de produtos eficientes para limpeza química.

BRADLEY et al. (1992) sugerem que detergentes sejam utilizados com o objetivo de remover materiais particulados, coloidais, biológicos e orgânicos das superfícies das membranas. Este procedimento é normalmente realizado por meio de recirculação da solução de limpeza química a baixa pressão. Incrustações de carbonatos podem ser removidos pela recirculação de soluções diluídas de ácido clorídrico ou cítrico. Incrustações de sulfatos são mais difíceis de serem removidas, ácido cítrico ou agentes quelantes, tal como o ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), são geralmente recomendados. Óxidos metálicos podem ser removidos com ácido cítrico, hidrosulfito de sódio, hexa-metafosfato de sódio ou misturas de ácido cítrico e agentes quelantes. Soluções alcalinas são amplamente utilizadas para remoção de materiais orgânicos, devido a maior solubilidade destas substâncias em pH elevado.

O uso de agentes tensoativos (detergentes) em limpezas químicas de membranas é amplamente difundido entre os usuários de OR. A seleção apenas deve respeitar características de compatibilidade entre o detergente e a membrana. Segundo BYRNE (1995) e AMJAD (1992), entre outros, o detergente LSS, que é um tensoativo aniônico, é compatível com membranas de PA aniônicas de OR. Contudo, cada limpeza química representa um desgaste da membrana, que pode ser mais ou menos intenso dependendo da agressividade do agente usado para este fim e das condições de operação.

MOHAMMADI (2001) ressalta que a eficiência de uma limpeza química depende do tipo de agente químico utilizado e de sua concentração. Condições operacionais, tais como: vazão, turbulência, pH, temperatura e tempo de recirculação da corrente de alimentação também representam papéis importantes no processo de limpeza. Procedimentos de limpeza química requerem um profundo entendimento das interações entre os tipos de incrustantes e a membrana.

II.3 Tratamento de Rejuvenescimento de Membranas de OR

Sendo o objetivo principal deste trabalho o estudo do processo de rejuvenescimento (regeneração ou restauração) para a melhoria do desempenho de retenção de membranas, os

dados de literatura foram procurados intensamente para verificar o estado de arte sobre este assunto. Poucos dados foram encontrados mostrando que: ou o assunto é ainda pouco explorado ou os resultados dos estudos não são publicados.

De acordo com BUECKER (2000), membranas de OR podem operar com condições satisfatórias de performance durante 3 a 7 anos, dependendo das características da alimentação e das condições de operação e limpeza.

Segundo AMJAD et al. (1992), durante o tempo de vida útil das membranas de OR, degradação gradual de performance é verificada. Procedimentos de limpezas químicas geralmente possuem vários graus de sucesso. Em alguns casos, perdas perceptíveis de retenção de sais pela membrana podem ocorrer, devido a fatores como: defeitos na superfície, danos por abrasão, ataques químicos (produtos utilizados em limpezas químicas e agentes oxidantes) e hidrólise. Para restaurar as perdas de características de retenção de sais pelas membranas, agentes químicos de rejuvenescimento podem ser utilizados.

BYRNE (1995) ressalta que as membranas podem responder diferentemente a tratamentos de rejuvenescimento, dependendo dos tipos e origens das degradações, dos níveis dos danos e do estado de limpeza de suas superfícies. O tratamento tem pouco efeito se o dano causado na membrana for mecânico, tais como lesões na camada seletiva ou rompimento da colagem dos envelopes de membranas nos sistemas em espiral. É muito improvável obter bons resultados de rejuvenescimento em casos de degradações de membranas que tenham a retenção de sais reduzida a menos de 75%.

Dois mecanismos, de acordo com AMJAD et al. (1992), têm sido propostos para explicar o efeito de rejuvenescimento: “tratamento superficial”, adicionando uma cobertura na superfície da membrana, e “tamponamento de orifícios”. Técnicas de rejuvenescimento foram estudadas por fabricantes de membranas e pelo governo norte-americano durante a década de 1970 e meados da década de 80.

DALTON et al. (1977), SUBCASKY e SEGOVIA (1971) estudaram o rejuvenescimento de membranas degradadas de AC utilizando polímeros solúveis em água.

BYRNE (1995) acrescenta que a membrana deve estar livre de "fouling" ou depósitos para o tratamento químico de rejuvenescimento aderir à sua superfície. Sistemas de OR deveriam passar por uma limpeza química antes de receber um tratamento de rejuvenescimento. A efetividade da limpeza química sobre a superfície das membranas pode ditar o sucesso do tratamento de rejuvenescimento aplicado.

AMJAD et al. (1992) e BYRNE (1995) citam alguns produtos químicos utilizados como agentes de rejuvenescimento, descritos a seguir.

O “Colloid 189” (“COLLOIDS OF AMERICA Co.”) é um copolímero de polivinil acetato em solução amoniacal, com pH entre 8 e 9. Este agente mostrou-se particularmente efetivo em membranas de AC, restaurando a retenção de sais para mais de 95%, e obteve menos sucesso com membranas de PA. Além disso, uma diminuição do fluxo de permeado normalizado de 10 a 15% pode ocorrer, e também algum aumento de perda de carga da corrente de alimentação pode ser observado. Por este produto químico ser solúvel em pH alcalino, após o tratamento de rejuvenescimento a corrente de alimentação deve ser mantida em pH ácido. A melhora na retenção de sais obtida com o rejuvenescimento é estimada durar de 1 a 6 meses.

O polivinil metil éter (PVME) da BASF e ácido tânico mostraram-se efetivos em restaurar as características de retenção de sais de módulos de membranas de fibras ocas de PA B-9 e B-10, fabricados pela DUPONT. Uma diminuição de fluxo de permeado e um aumento na perda de carga da corrente de alimentação podem ocorrer, mas geralmente mais sutis do que no tratamento com o “Colloid 189”. O PVME é efetivo para melhorar as características de retenção de sais por tamponamento de imperfeições mecânicas das fibras ocas. O ácido tânico é adsorvido pela superfície das membranas, restringindo a difusão de sais através da membrana. Assim como o “Colloid 189”, o PVME e o ácido tânico são removidos da superfície da membrana com o tempo de operação e durante as limpezas químicas.

WILF e GLUECHKSTERN (1985) estudaram o rejuvenescimento de membranas comerciais de OR utilizando soluções coloidais de polímeros de alta massa molar como agentes de rejuvenescimento a altas pressões. Módulos de fibra oca de 20,32 cm (8 in) e 25,4 cm (10 in) de diâmetro foram rejuvenescidos utilizando soluções contendo 100 ppm de ácido tânico a 20 bar de pressão e em 10 minutos de recirculação. A passagem de sais foi reduzida de aproximadamente 14% para um nível de 6-10%. Módulos em espiral de 20,32 cm (8 in) de membranas de poliamida foram rejuvenescidos utilizando-se o mesmo procedimento e a passagem de sais foi reduzida 43% em média.

CADOTTE et al. (1981), BURN e ROE Inc. (1981) investigaram a utilização de produtos químicos como agentes de rejuvenescimento. Entre os produtos utilizados o ácido tânico obteve alta eficiência em regenerar as características das membranas degradadas avaliadas.

EBRAHIM (1994) descreveu o estado da arte de limpezas químicas e rejuvenescimentos de membranas de OR, relacionando o ácido tânico como efetivo agente de rejuvenescimento.

BYRNE (1995) ressalta que tratamentos da superfície de membranas, entre eles o rejuvenescimento, agem como uma camada dinâmica melhorando as características de retenção de sais. O tempo que o tratamento superficial permanece aderido à membrana é imprevisível e depende de uma combinação de diversos fatores, tais como: condições físicas das membranas, grau de limpeza, compatibilidade entre o agente químico de rejuvenescimento utilizado e a membrana, procedimento de aplicação do tratamento, configuração das membranas e condições de operação do sistema de OR.

Tratamentos de rejuvenescimento podem ser aplicados de diferentes maneiras sobre as membranas, conforme BYRNE (1995). Alguns procedimentos podem ser realizados com o sistema de OR em operação normal, sendo que o agente químico de rejuvenescimento é injetado na própria corrente de alimentação. Tratamentos de rejuvenescimento também podem ser realizados em procedimentos com condições particulares de operação, assim como são realizadas as limpezas químicas em suas condições específicas de operação.

II.3.1 – O Ácido Tânico

Por este trabalho se referir ao estudo do ácido tânico como agente de rejuvenescimento, algumas características deste composto estão descritas a seguir.

Segundo CHUNG et al. (1999), o ácido tânico é obtido da fermentação de vegetais e é um polifenol solúvel em água. A estrutura orgânica e fórmula química podem possuir pequenas variações dependendo do vegetal que o originou, sendo normalmente obtido como $C_{14}H_{10}O_9$ ou $C_{76}H_{52}O_{46}$.

No MERCK INDEX (1976) é citado, entre outras características, o poder de adstringência do ácido tânico.

Adstringência é uma característica comum a muitos ácidos orgânicos. SOWALSKY e NOBLE (1998) fazem referência às características de adstringência do ácido maléico, e LAWLESS et al. (1994) estudaram as características de adstringência do ácido gálico, o qual é obtido por hidrólise do ácido tânico.

Na tentativa de avaliar a procedência da ação de rejuvenescimento do ácido tânico sobre membranas de PA de OR, suas características de origem orgânica e de adstringência foram utilizadas neste trabalho para selecionar outros ácidos com as mesmas propriedades.

III . SISTEMA DE OSMOSE REVERSA DA EMPRESA AZ

Neste capítulo é realizada uma descrição do sistema de OR da empresa AZ, objeto de pesquisa deste trabalho, abrangendo desde o sistema de pré-tratamento que condiciona a corrente de alimentação da OR. Os dados levantados, característicos de sistemas industriais de OR, foram utilizados como subsídio para proposição dos objetivos deste trabalho.

III.1 Pré-Tratamento

Água bruta é bombeada do rio para o tanque de mistura rápida na estação de tratamento de água (ETA), onde recebe a dosagem de produtos químicos destinados a promover a clarificação: gás cloro, sulfato de alumínio férrico, hidróxido de cálcio e polieletrólito. As concentrações dos produtos químicos a serem dosados na água bruta são ajustadas manualmente, de acordo com análise da qualidade da água bruta. A água, após a coagulação e floculação, sofre sedimentação passando ao estado de água clarificada.

A água clarificada deve possuir pH entre 5,8 e 6,0 e turbidez menor do que 2 NTU, “unidade nefelométrica de turbidez” utilizada em métodos denominados nefelométricos que consistem em equipamento com luz de tungstênio e detectores fotoelétricos capazes de detectar a luz que é dispersa num ângulo de 90° com a luz incidente. Após a clarificação, a água é dividida em duas correntes. Uma corrente recebe novo ajuste de pH e é armazenada em dois tanques, sendo utilizada como água de resfriamento e água de incêndio. A outra corrente de água clarificada segue para filtros de areia por gravidade, sendo que esta filtração tem por finalidade reter partículas suspensas e flocos de pequenas dimensões que não foram sedimentados na clarificação.

Após deixar os filtros de areia, a corrente de água é dividida novamente em duas correntes. Uma corrente é condicionada como água potável e água de serviço. A outra corrente de água filtrada recebe um pré-tratamento que a condiciona como água de alimentação da OR.

O pré-tratamento da água filtrada que abastece a OR consiste em:

1. Filtração em filtros pressurizados de areia e antracito estratificados.
2. Filtração e descloração em filtros pressurizados de carvão ativado.
3. Dosagem de dispersante/anti-incrustante.

4. Filtração em filtros cartucho de 3 µm.

O Bissulfito de sódio começará a ser dosado na corrente afluyente dos filtros cartuchos, quando a primeira batelada de membranas, em operação desde a partida do sistema de OR realizada em 1997, for substituída por membranas novas. Esta dosagem visará assegurar que todo o cloro livre, que por ventura não tenha sido removido nos leitos de carvão ativado, seja eliminado por meio de conversão em cloreto de sódio e ácido sulfúrico.

O sistema de pré-tratamento da alimentação da OR conta ainda com um sistema habilitado a dosar produtos químicos na corrente afluyente dos filtros pressurizados de areia e antracito. Representando a possibilidade de dosar produtos, quando julgado adequado, destinados a diversos fins, tais como correção de pH ou polieletrólitos para reduzir o SDI (índice de sedimentação de colóides).

Quatro pontos distintos possuem equipamento para medição de valores de SDI, a montante e a jusante dos filtros de areia e antracito, de carvão ativado e de cartuchos.

III.2 O Sistema de OR

O sistema de OR é composto por cinco conjuntos independentes. Cada conjunto é constituído por dois estágios, o primeiro estágio é composto por 16 vasos de pressão e o segundo estágio por 8 vasos de pressão. Cada vaso de pressão é carregado com 7 módulos de membranas em espiral que possuem 20,32 cm (8 in) de diâmetro e 1,016 m de comprimento. Cada conjunto possui uma bomba centrífuga responsável pela pressurização da corrente de alimentação.

Cada conjunto de OR opera com uma recuperação de 82% de permeado da corrente de alimentação. A vazão de permeado obtido com os cinco conjuntos deve atender a demanda de água desmineralizada requerida pelas caldeiras. Com isto, a pressão e vazão da corrente de alimentação de cada conjunto de OR representam variáveis controladas para que os 82% de permeado recuperado da corrente de alimentação atendam a demanda requerida de água desmineralizada. Desse modo, cada conjunto de OR, mantendo os 82% de recuperação de permeado, pode operar em diferentes condições de pressão e vazão da corrente de alimentação.

O sistema de OR foi projetado para produzir aproximadamente 600 m³.h⁻¹ de permeado.

A temperatura da água de alimentação da OR não é controlada, variando conforme as condições climáticas locais, e o pH permanece praticamente nos mesmos valores da água clarificada, entre 5,8 e 6,0.

O sistema de OR utiliza membranas assimétricas compostas de PA suportadas em polissulfona, que são especificadas para operarem com valores de SDI inferiores a 5.

III.2.1 Limpeza Química

Os procedimentos para limpeza química do sistema de OR foram aprovados, no projeto do sistema (1997), pelos fabricantes das membranas.

As limpezas químicas são realizadas separadamente em cada conjunto de OR, utilizando um tanque de alimentação de 3 m³ e uma bomba centrífuga.

A limpeza química consiste de duas etapas, descritas a seguir:

1. Limpeza com solução ácida.

Solução de 1,7% de ácido cítrico em água desmineralizada. O pH deve ser ajustado para 4,0, utilizando hidróxido de amônio.

2. Limpeza com solução alcalina + lauril sulfato de sódio (LSS).

Solução de 0,5% de LSS em água desmineralizada. O pH deve ser ajustado para 11,0, utilizando hidróxido de sódio.

Os estágios de cada conjunto de OR são submetidos separadamente à limpeza química, sendo que em cada estágio são realizadas as duas etapas da limpeza química, primeiramente com solução ácida e posteriormente com solução alcalina.

Em cada etapa da limpeza química, inicialmente é realizado um enxágüe com a solução de limpeza, visando remover do sistema os excessos de “fouling”, bem como preencher os módulos e tubulações com a solução. Posteriormente é preparado um novo volume de solução, a qual é recirculada por 1 hora, a 40°C, com retorno total de concentrado e permeado ao tanque de alimentação. A pressão não deve ultrapassar 3,0 kgf.cm⁻² e a vazão deve ser de 6,25 m³.h⁻¹ em cada vaso de pressão. Após 1 hora de recirculação, as membranas são deixadas de molho na solução de limpeza por 20 minutos e enxaguadas em seguida.

A limpeza química é ainda complementada por uma desinfecção com biocida de nome comercial KATHON.

III.3 Pós-Tratamento

O permeado obtido com o sistema de OR é descarbonatado, em torres de descarbonatação, e polido em vasos contendo leitos mistos de resinas catiônicas e aniônicas trocadoras de íons. Após estes tratamentos a água é especificada como água desmineralizada, com condutividade elétrica menor do que $0,3 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. A água desmineralizada é utilizada para alimentação das caldeiras que têm como finalidade a produção de vapor de super alta pressão (VS), $113 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ e $525 \text{ }^\circ\text{C}$.

III.4 Performance do Sistema de OR

O sistema de OR entrou em operação em dezembro de 1997, e a performance inicial atingiu os valores esperados de projeto. Entretanto, no período de junho de 1998 a abril de 1999 foram detectados crescentes e significantes aumentos nas concentrações de sílica no permeado, em todos os conjuntos de OR. Nesse período, a retenção de sais pelas membranas diminuiu levemente, enquanto que foi verificado um acentuado aumento de passagem de sílica.

No período de 1º de julho a 1º de novembro de 1999, o dispersante/anti-incrustante que vinha habitualmente sendo dosado na corrente de alimentação da OR foi trocado por outro, do tipo polimérico. Nesse período foram verificados aumento da passagem de sílica para o permeado, diminuição da retenção de sais e aumento das pressões das correntes de alimentação sem aumento proporcional das perdas de carga nos primeiros e segundos estágios. Com a suspensão da dosagem do novo produto, em 1º de novembro de 1999, os efeitos nocivos observados pararam de evoluir, mas as membranas jamais recuperaram os desempenhos anteriores, registrados antes da dosagem deste produto.

Em novembro de 2000, após a realização de uma limpeza química, conforme descrito no item III.2.1, em um dos cinco conjuntos de OR, a retenção de sais e de sílica foi reduzida sensivelmente. O desempenho deste conjunto de OR anterior à limpeza química também não foi recuperado nos meses posteriores ao evento.

III.5 Composições de Correntes de Águas da ETA da Empresa AZ

Dados de determinações de concentrações em algumas correntes de águas da ETA estão mostradas na Tabela III.1.

Tabela III.1 – Concentrações de alumínio, ferro, sílica e dureza em algumas correntes de águas da ETA.

Dia	Corrente analisada	Alumínio (ppm)	Ferro (ppm)	Sílica (ppm SiO₂)	Dureza (ppm CaCO₃)
Média de Janeiro a Março de 2000	Alimentação da OR	0,029	0,020	17,3	30
Média de Abril a Julho de 2000	Alimentação da OR	0,017	0,036	16,8	27
15/9/2000*	Água Bruta	6,6	5,1	40,5	24,1
	Água Clarificada	0,2	0,078	14,1	51,1
	Alimentação da OR	0,2	0,02	13,8	42,6
	Rejeito da OR	0,8	0,097	66,5	192,1
18/9/2000*	Água Bruta	6,2	5,5	38,8	26,1
	Água Clarificada	0,18	0,05	12,7	57,1
	Alimentação da OR	0,18	0,01	14,2	44,3
	Rejeito da OR	0,9	0,082	67,1	193,3
25/9/2000*	Água Bruta	6,8	4,6	38,2	27,5
	Água Clarificada	0,21	0,055	11,6	58,0
	Alimentação da OR	0,21	0,01	13,4	45,9
	Rejeito da OR	0,9	0,090	66,2	194,0

* Análises de amostras coletadas no referido dia

IV . MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos todos os procedimentos experimentais desenvolvidos no Laboratório de Separação por Membranas, materiais utilizados, técnicas analíticas empregadas e métodos adotados para a realização dos experimentos propostos.

Este capítulo está complementado pelo Anexo A, onde está descrito o procedimento operacional dos sistemas de OR em bancada utilizados.

IV.1 Materiais

A descrição dos materiais utilizados abrange as membranas, os produtos químicos e os equipamentos de OR, que serão apresentados separadamente a seguir.

IV.1.1 Membranas

Em todos os experimentos foram utilizadas membranas compostas de OR comerciais, assimétricas de poliamida, carregadas negativamente e suportadas em polissulfona. Nos experimentos onde se utilizou o módulo para membrana plana, as membranas foram provenientes do fabricante TRISEP, e no experimento em que foi utilizado módulo em espiral a membrana foi fornecida pelo fabricante FILMTEC. De acordo com os fabricantes, as características das membranas estão descritas na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Características das membranas utilizadas.

Membrana	TRISEP ACM1-TSA	FILMTEC BW30-2514
Pressão Máxima de Operação (bar)	41,37	41,37
Temperatura Máxima de Operação (°C)	45	45
pH de Operação	4 - 11	2 - 11
Tolerância ao Cloro Livre (ppm)	<0,1	<0,1

O módulo em espiral BW30-2514 possui 6,10 cm (2,4 in) de diâmetro e 0,30 m de comprimento.

As membranas planas ACM1 foram retiradas de dois módulos em espiral comerciais, com 20,32 cm (8 in) de diâmetro e 1,016 m de comprimento, um módulo novo e outro módulo retirado do sistema de OR da empresa AZ após 3 anos de uso. Estas membranas foram

preservadas em solução de bissulfito de sódio 1%, sob refrigeração, a fim de evitar o crescimento de microorganismos.

Dados complementares das membranas utilizadas estão apresentados no apêndice A.

IV.1.2 Produtos Químicos

Para preparação das soluções de rejuvenescimento foram utilizados:

- Ácido tânico comercial (C₁₄H₁₀O₉) da VERONESE.
- Ácido gálico monohidratado (pureza analítica) da NUCLEAR.
- Ácido maléico (para síntese) da VETEC.

As soluções para limpeza química das membranas de OR foram preparadas a partir de hidróxido de sódio (pureza analítica) da SYNTH, ácido cítrico (pureza analítica) da SYNTH, hidróxido de amônio (pureza analítica) da REAGEN e lauril sulfato de sódio (*Texapon ZACD*) da HENKEL.

As soluções utilizadas para preservar as membranas planas ACM1-TSA foram preparadas com bissulfito de sódio (pureza analítica) da NUCLEAR.

Os ensaios de oxidação das membranas foram realizados com hipoclorito de sódio (10 – 12 %) da LABORPEQ. As soluções de ferro (total) e de alumínio foram preparadas a partir de sulfato de ferro (II) heptahidratado (pureza analítica) da MERCK e sulfato de alumínio (pureza analítica) da REAGEN, respectivamente.

Para avaliações de performance das membranas nos experimentos foram utilizadas duas soluções:

- Solução sintética contendo 2000 ppm de NaCl (pureza analítica) da MERCK.
- Água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, com características físico-químicas descritas no item V.1.3.4.

As soluções sintéticas contendo 2000 ppm de NaCl foram utilizadas em todos os experimentos realizados, a fim de padronizar avaliações de retenção deste sal pelas membranas. A água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ foi utilizada apenas nos experimentos onde se julgou necessária a avaliação da retenção de sílica solúvel pela membrana.

Com exceção da água de alimentação da OR da empresa AZ, todas as soluções foram preparadas utilizando água destilada como solvente.

IV.1.3 Equipamentos

Foram utilizados nos experimentos dois sistemas de OR em bancada. Os dois sistemas diferem basicamente na geometria das membranas utilizadas:

- Sistema utilizando módulo para membrana plana.
- Sistema utilizando módulo para membrana em espiral.

Os sistemas de OR em bancada são compostos por módulos para membrana (um para membrana plana e outro para membrana em espiral), uma bomba de engrenagens, um tanque de alimentação, um banho termostático com serpentina, pré-filtro, manômetros, termopar e válvulas agulha e esfera.

Os dois sistemas fazem uso em comum, em momentos distintos, dos seguintes equipamentos: o tanque de alimentação com serpentina, bomba de engrenagens, banho termostático, termopar e pré-filtro.

O sistema de OR em bancada com módulo para membrana em espiral utiliza um sistema fornecido pela FLUID SYSTEMS, o qual é constituído por um conjunto independente de módulo para membrana em espiral de 6,10 cm (2,4 in) de diâmetro e 0,30 m de comprimento, válvulas e manômetros.

Uma representação esquemática, comum aos dois sistemas de OR em bancada utilizados, está representado na Figura IV.1. Fotos dos equipamentos são mostradas nas Figuras IV.2 e IV.3, onde é possível visualizar os constituintes compartilhados pelos dois sistemas.

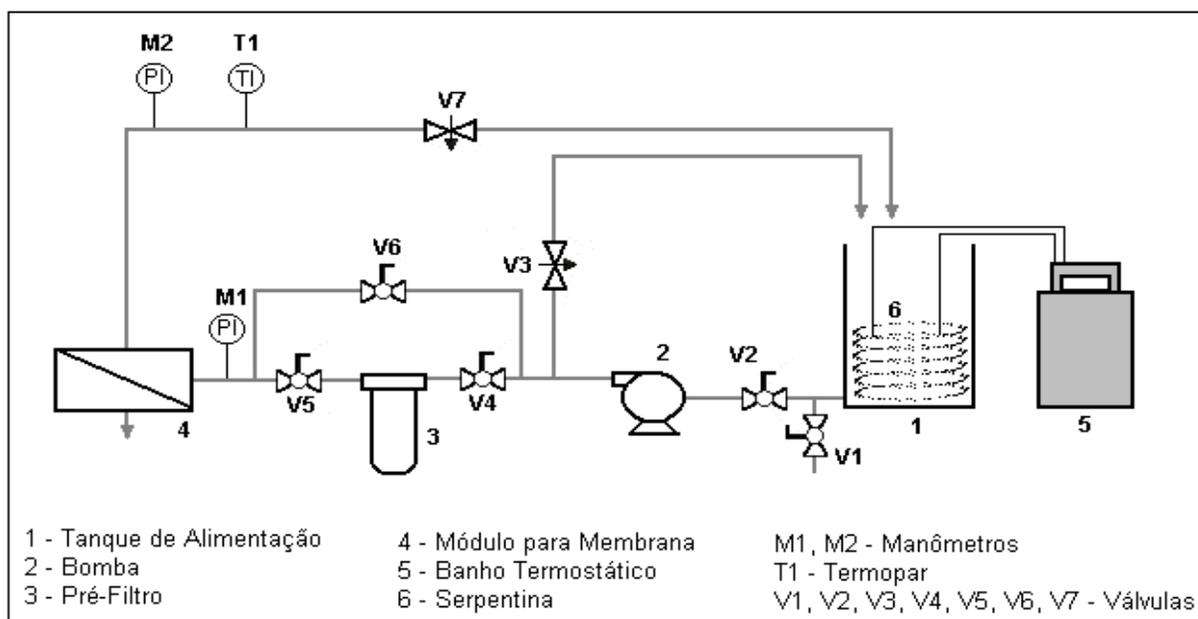


Figura IV.1 – Representação esquemática do sistema de Osmose Reversa.

O tanque de alimentação (1) tem capacidade para vinte litros, constituído por PVC e fornecido pela PERMUTION. Este possui duas válvulas esfera na saída, sendo que a válvula (V1) drena o conteúdo do tanque em procedimentos de lavagem e a válvula (V2) isola o tanque do resto do sistema.

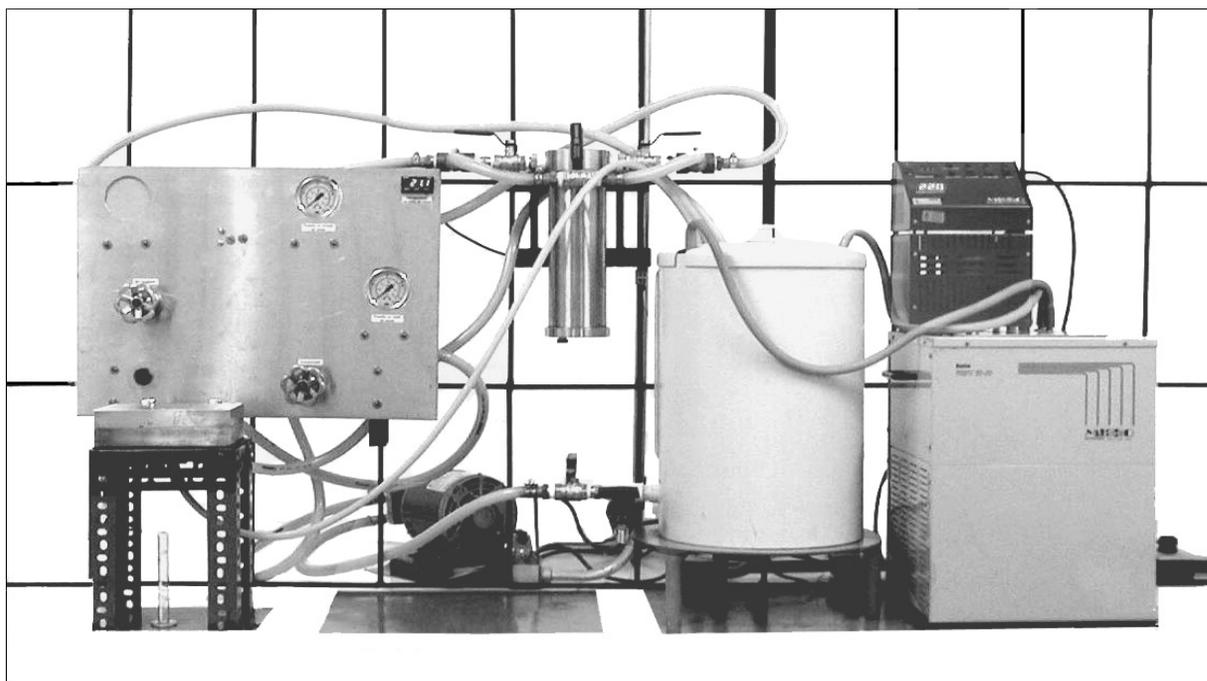


Figura IV.2 – Fotografia do equipamento do sistema de OR, com módulo para membrana plana.

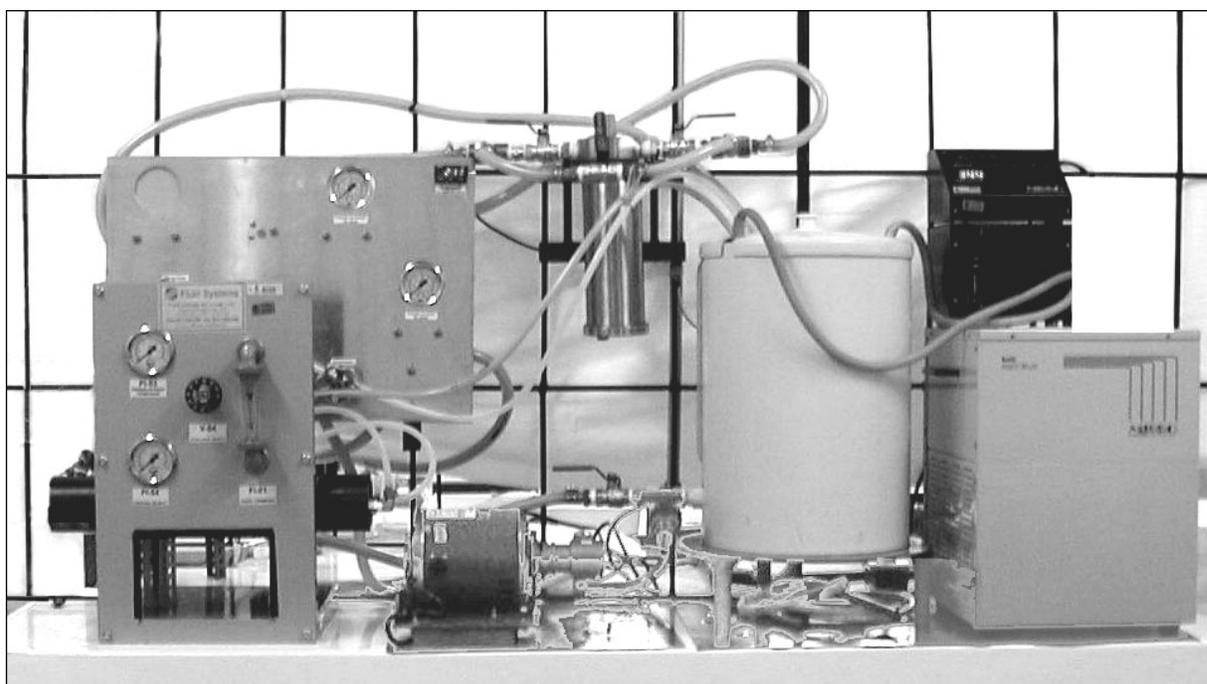


Figura IV.3 – Fotografia do equipamento do sistema de OR, com módulo para membrana em espiral.

O sistema é alimentado por uma bomba de engrenagens (2) fabricada pela PROCON em aço inox, a qual fornece pressão máxima de 17,23 bar e vazão máxima de $7,89 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. A fim de compensar a inexistência de regulação própria de vazão pela bomba (2), a válvula agulha (V3) regula o fluxo de recirculação que retorna ao tanque de alimentação, ajustando assim a vazão de alimentação do módulo de OR.

O pré-filtro de cartucho (3), modelo 1BR1, possui carcaça em aço inox carregada com elemento filtrante de polipropileno de 5 μm , fabricado pela CUNO, tem a função de proteger a membrana de eventuais impurezas presentes na solução de alimentação, tais como sólidos suspensos. Segundo BYRNE (1995), essa operação visa evitar o entupimento das membranas. O conjunto das válvulas (V4), (V5) e (V6) formam uma alternativa para desvio da alimentação do pré-filtro, em procedimentos julgados necessários.

O módulo para membrana (4) permite intercâmbio, podendo operar com o módulo para membrana plana ou com o módulo para membrana em espiral

O módulo para membrana plana foi fabricado em aço inox, e a corrente de alimentação é distribuída uniformemente por meio de uma canaleta através de uma seção transversal de 5,10 cm por 0,13 cm, e ao longo de uma área superficial de 5,10 cm por 11,0 cm. A área permeável de membrana, 56,1 cm^2 , é representada por toda superfície da membrana em contato com a corrente de alimentação. A membrana é suportada por uma placa de aço inox sinterizado com 40 cm^2 , sendo que este elemento poroso permite o escoamento do permeado para um orifício na parte inferior do módulo, onde é recolhido. Após a alimentação escoar sobre a membrana a corrente recebe a denominação de concentrado e é recolhida por outra canaleta que a direciona para fora do módulo. Dois *O-rings* são responsáveis pela vedação entre a parte inferior e superior do módulo.

Desenhos esquemáticos da vista superior e lateral do módulo para membrana plana estão representados nas Figuras IV.4 e IV.5.

Um indicador de temperatura, WEST 2300, com graduação decimal em graus Celsius, mostra o sinal recebido de um termopar do tipo J (T1) inserido na corrente de concentrado efluente do módulo.

Dois manômetros (M1) e (M2), colocados na corrente de alimentação e na corrente de concentrado, respectivamente, medem as pressões na entrada e na saída do módulo. Os manômetros, WIKA, possuem escala de 0 a 40 $\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ (39,23 bar), com graduação de 2 $\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ (1,96 bar) e precisão de 1,6 % no fundo de escala.

A válvula agulha (V7) juntamente com a válvula de recirculação (V3) permitem a regulação do fluxo de alimentação e pressão de operação do sistema.

O banho termostático (5), modelo MQBTC 99-26 da MICRO QUÍMICA, controla a temperatura desejada com precisão $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$. Este equipamento possui um sistema de recirculação interno acoplado à serpentina de aço inox (6), a qual é responsável pelo controle da temperatura no interior do tanque de alimentação.

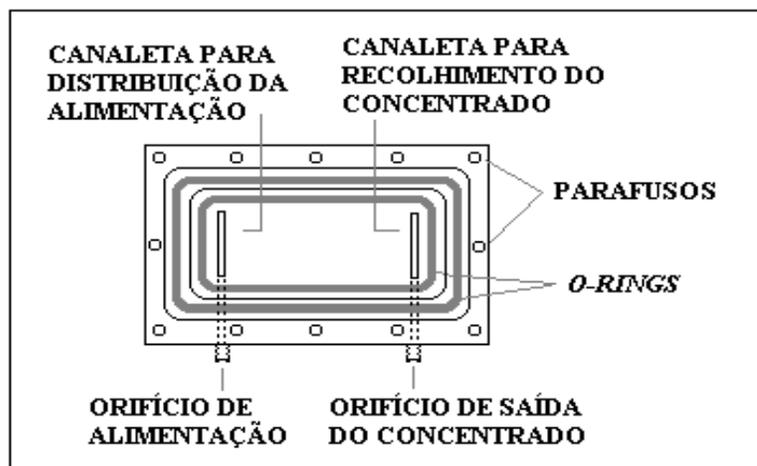


Figura IV.4 –Vista superior do módulo para membrana plana.

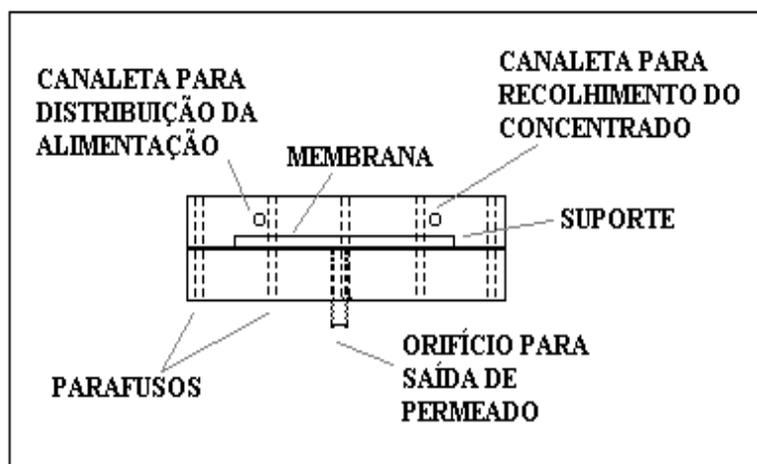


Figura IV.5 –Vista lateral do módulo para membrana plana.

Em um procedimento de avaliação da performance do módulo em espiral após rejuvenescimento, o mesmo foi deslocado para a ETA da empresa AZ, a fim de ser alimentado continuamente pela mesma água de alimentação do sistema de OR. No módulo em espiral instalado na empresa AZ foram utilizados dois manômetros para a medição das pressões de entrada e saída do módulo. Os manômetros utilizados, RECAMP, possuem escala de 0 a

20 kgf.cm⁻² (19,61 bar), com graduação de 0,5 kgf.cm⁻² (0,49 bar) e precisão de 3 a 5 % no meio de escala.

A seqüência de procedimentos utilizados para operar os sistemas de bancada de OR está detalhada no Anexo A.

IV.2 Métodos

A descrição dos métodos empregados abrange a metodologia experimental e os experimentos realizados, as análises de condutividade elétrica, pH e análises espectrofotométricas utilizadas para as determinações das concentrações nas correntes de permeado e alimentação.

IV.2.1 Metodologia Experimental

Os experimentos de OR realizados estão divididos em três etapas:

1. Estudo sobre o poder de catálise do íon alumínio (Al⁺³) no processo de oxidação de membranas por cloro livre.
2. Estudo da degradação de membranas causada pelo uso do agente tensoativo lauril sulfato de sódio, em procedimentos de limpeza química.
3. Avaliação e otimização de procedimentos para rejuvenescimento de membranas de PA, utilizando ácido tânico como agente de rejuvenescimento.

IV.2.1.1 Estudo Sobre o Poder de Catálise do Íon Alumínio (Al⁺³) no Processo de Oxidação de Membranas de PA de OR por Cloro Livre

Com o objetivo de avaliar o poder de catálise do íon alumínio em oxidações com cloro livre foram utilizadas membranas planas ACM1.

Conforme já referenciado no Capítulo II, metais de transição possuem um poder de catálise em processos de oxidação de membranas de PA por cloro livre. BYRNE (1995) e HENLEY (1996) recomendam que a concentração de ferro não ultrapasse 0,05 ppm em águas afluentes a sistemas de OR. Em vista de não terem sido encontradas referências na literatura consultada atribuindo tal característica ao alumínio, experimentos também foram realizados com o ferro, nas mesmas condições de operação e concentrações daquelas dos experimentos com o alumínio. Os resultados, nas condições dos experimentos, referentes aos dois metais, ferro e alumínio, podem ser comparados quantitativamente.

As condições de operação durante os experimentos foram escolhidas de modo a aproximá-las das condições normais de operação de um sistema industrial de OR. A vazão de operação da alimentação foi mantida em $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, com temperatura de $25,0^\circ\text{C}$ e pressão de 7,85 bar ($8,0 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$).

Cada experimento foi realizado com uma membrana nova. Antes do início de cada experimento foi realizada uma limpeza química, conforme procedimento descrito no Capítulo III, para assegurar que as avaliações das membranas iniciassem nas mesmas condições de limpeza, isto é, sem incrustações. Este procedimento visou remover completamente quaisquer traços de solução de bissulfito de sódio, na qual as membranas novas eram preservadas.

Os experimentos foram realizados com soluções de 500 ppm de cloro livre, as quais foram preparadas utilizando hipoclorito de sódio (NaClO). Devido ao pequeno tempo de duração dos experimentos, 6 horas, foi adotada uma alta concentração de cloro livre, a fim de que fosse possível detectar a oxidação causada nas membranas pelo método analítico empregado, ao longo de cada avaliação.

Foram realizados 7 ensaios experimentais conforme descrito a seguir:

Experimento 1.1 – 500 ppm de cloro livre.

Experimento 1.2 – 0,05 ppm de Al^{+3} + 500 ppm de cloro livre.

Experimento 1.3 – 0,10 ppm de Al^{+3} + 500 ppm de cloro livre.

Experimento 1.4 – 0,26 ppm de Al^{+3} + 500 ppm de cloro livre.

Experimento 1.5 – 0,05 ppm de Fe total ($\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$) + 500 ppm de cloro livre.

Experimento 1.6 – 0,10 ppm de Fe total ($\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$) + 500 ppm de cloro livre.

Experimento 1.7 – 0,26 ppm de Fe total ($\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$) + 500 ppm de cloro livre.

As soluções contendo o íon alumínio e o íon ferro foram preparadas a partir de sulfato de alumínio e sulfato ferroso heptahidratado, respectivamente.

O pH foi mantido em 10,8, valor das soluções preparadas com 500 ppm de cloro livre.

Durante a realização de cada experimento a performance da membrana foi avaliada utilizando a própria solução oxidante, em relação ao fluxo de permeação e em relação à retenção de hipoclorito de sódio.

IV.2.1.2 Estudo da Degradação de Membranas Causada pelo Uso do Agente Tensoativo Lauril Sulfato de Sódio, em Procedimentos de Limpeza Química

Foram avaliados os efeitos do uso de soluções ácida e alcalina, esta última com 0,5% de LSS, do procedimento de limpeza química descrito no Capítulo III, mas com um tempo de recirculação de 10 horas, superior ao convencional de 1 hora de recirculação.

As membranas foram avaliadas antes e depois de cada experimento com solução contendo 2000 ppm de NaCl, medindo-se a performance da membrana em relação ao fluxo de permeado e em relação à retenção de NaCl, em condições padronizadas de operação, conforme descrito no item IV.2.2.

Foram realizados 7 ensaios experimentais, utilizando membranas planas ACM1.

Nos experimentos descritos a seguir as recirculações foram realizadas com vazão de alimentação de $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 40°C e 1,96 bar ($2 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$).

Os experimentos 2.1 e 2.2 utilizaram membranas novas.

Experimento 2.1 – 10 horas de recirculação da solução ácida.

Experimento 2.2 – 10 horas de recirculação da solução alcalina + 0,5% LSS.

A fim de avaliar a ação da limpeza química sobre as membranas com três anos de operação no sistema de OR da empresa AZ foram realizados os experimentos 2.3 e 2.4.

Experimento 2.3 – 10 horas de recirculação da solução ácida.

Experimento 2.4 – 10 horas de recirculação da solução alcalina + 0,5% LSS.

Para avaliar a ação combinada de degradação causada pela oxidação por cloro livre e o efeito da limpeza química sobre as membranas foram realizados os experimentos 2.5, 2.6 e 2.7. Nestes experimentos as membranas novas foram primeiramente submetidas a 8 horas de oxidação por cloro livre, nas mesmas condições operacionais de pressão, temperatura e concentração de hipoclorito de sódio dos experimentos do item IV.2.1.1, e posteriormente submetidas à limpeza química.

Experimento 2.5 – Primeira parte: oxidação durante 8 horas; segunda parte: 10 horas de recirculação da solução ácida.

Experimento 2.6 – Primeira parte: oxidação durante 8 horas; segunda parte: 10 horas de recirculação da solução alcalina + 0,5% LSS.

Experimento 2.7 – Primeira parte: oxidação durante 8 horas; segunda parte: 10 horas de recirculação da solução alcalina sem LSS.

IV.2.1.3 Avaliação e Otimização de Procedimentos para Tratamento de Rejuvenescimento de Membranas de PA Utilizando Ácido Tânico

Os experimentos de rejuvenescimento estão divididos em quatro fases.

Em uma primeira seqüência de experimentos, a fim de avaliar características do ácido tânico acerca da origem da ação rejuvenescedora em membranas de OR de PA, utilizou-se os ácidos gálico e maléico, que, assim como o ácido tânico, são orgânicos e adstringentes. Nesta fase todos os três ácidos foram utilizados como agentes de rejuvenescimento, segundo um mesmo procedimento básico de operação.

Posteriormente, os experimentos concentraram-se sobre o ácido tânico, com o objetivo de otimizar a eficiência da ação rejuvenescedora deste ácido. O ácido tânico foi escolhido por representar o produto de menor custo comercial entre os três ácidos avaliados na fase anterior. Foram variados, isoladamente, os seguintes parâmetros do procedimento inicial de rejuvenescimento: pressão de recirculação, pH e concentração do agente de rejuvenescimento.

Numa terceira fase, foram realizados ensaios onde se variou o nível de degradação das membranas a serem rejuvenescidas. Sendo utilizado o melhor procedimento de rejuvenescimento encontrado na fase anterior.

Nas três primeiras fases, foram utilizadas membranas planas ACM1, e estas foram avaliadas antes e depois de cada procedimento de rejuvenescimento utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl. A performance das membranas foram medidas em relação ao fluxo de permeado e em relação à retenção de NaCl, em condições padronizadas de operação, conforme descrito no item IV.2.2, durante 30 minutos de avaliação experimental.

Na quarta fase foram avaliados os tempos de campanha da ação rejuvenescedora em membranas planas e em membrana em espiral. Nesta fase também utilizou-se água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ para avaliação da performance das membranas rejuvenescidas.

Segundo as condições do item IV.2.2, para avaliação de performance da membrana, os resultados do Capítulo V mostram que as membranas novas planas ACM1 possuem uma retenção de NaCl de aproximadamente 99,35%. Nos experimentos de rejuvenescimento as membranas novas foram inicialmente oxidadas por cloro livre, e posteriormente degradadas por uma recirculação de solução alcalina + 0,5% de LSS, semelhante ao procedimento do experimento 2.6 do item IV.2.1.2. Esta operação visou reduzir a performance de retenção das membranas, para que então pudessem ser rejuvenescidas.

– **Fase A: avaliação de ácidos orgânicos adstringentes como agentes de rejuvenescimento.**

Membranas oxidadas por 8 horas com solução contendo 500 ppm de cloro livre, nas seguintes condições de operação: temperatura de 25,0°C, vazão de $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e pressão de 7,85 bar (8,0 kgf.cm⁻²), semelhante aos experimentos de oxidação do item IV.2.1.2. Este procedimento reduziu a retenção de NaCl aproximadamente de 99,35% para 97,0%. Em seguida, 3,5 horas de recirculação da solução alcalina + 0,5% de LSS, vazão de alimentação mantida em $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a 40,5°C e 1,96 bar (2 kgf.cm⁻²), o que reduziu a retenção de NaCl aproximadamente de 97,0% para aproximadamente 90,5%.

Foram realizados 3 experimentos de rejuvenescimento, sendo que em cada ensaio foi utilizado uma nova membrana.

Experimento 3.A1 – Ácido tânico como agente de rejuvenescimento.

Experimento 3.A2 – Ácido gálico como agente rejuvenescimento.

Experimento 3.A3 – Ácido maléico como agente rejuvenescimento.

Todos experimentos seguiram o mesmo procedimento de rejuvenescimento, onde a corrente de alimentação é caracterizada por: vazão de $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, concentração de 80 ppm de ácido, temperatura de 40,0°C e pressão de 2,94 bar (3 kgf.cm⁻²). Foram realizados 60 minutos de recirculação com retorno total de concentrado e permeado para o tanque de alimentação.

– **Fase B: otimização do procedimento de rejuvenescimento utilizando ácido tânico como agente de rejuvenescimento.**

Em todos os experimentos desta fase as membranas foram oxidadas e degradadas utilizando o mesmo procedimento da fase A, reduzindo para aproximadamente 90,5% a retenção de NaCl.

Utilizando ácido tânico, e partindo do procedimento para rejuvenescimento da fase anterior, foram realizados experimentos variando, isoladamente, os seguintes parâmetros operacionais:

- Variação de pH da solução.

Experimento 3.B1 – pH 3,0, com adição de 150,2 ppm de ácido cítrico.

Experimento 3.B2 – pH 5,0, com adição de 2,3 ppm de ácido cítrico.

Experimento 3.B3 – pH 2,4, com adição de 4000 ppm de ácido cítrico.

Experimento 3.B4 – pH 2,1, com adição de 8300 ppm de ácido cítrico.

- Variação da pressão de alimentação.

Experimento 3.B5 – 5,88 bar (6,0 kgf.cm⁻²).

Experimento 3.B6 – 7,85 bar (8,0 kgf.cm⁻²).

Experimento 3.B7 – 1,96 bar (2,0 kgf.cm⁻²).

- Variação da concentração de ácido tânico na solução.

Experimento 3.B8 – 160 ppm.

Experimento 3.B9 – 240 ppm.

Experimento 3.B10 – 400 ppm.

– Fase C: avaliação do procedimento de rejuvenescimento sobre membranas degradadas a diferentes níveis.

Nesta fase foi utilizado o procedimento de rejuvenescimento do experimento 3.B9 da fase anterior, de acordo com análise dos resultados mostrados no Capítulo V este procedimento mostrou-se o mais eficiente.

As membranas, em cada experimento, foram oxidadas de acordo com o procedimento realizado na fase A, reduzindo a aproximadamente 97,0% a retenção de NaCl. A degradação com recirculação de solução alcalina + 0,5% de LSS também foi realizada de acordo com as condições da fase A, variando-se somente o tempo de recirculação, a fim de degradar a membrana em diferentes níveis.

Experimento 3.C1 – membrana degradada a 51,45% de retenção de NaCl.

Experimento 3.C2 – membrana degradada a 81,72% de retenção de NaCl.

Experimento 3.C3 – membrana degradada a 84,98% de retenção de NaCl.

Experimento 3.C4 – membrana degradada a 96,80% de retenção de NaCl.

– Fase D: avaliação dos tempos de campanha de membranas rejuvenescidas.

Assim como na fase C, também foi utilizado o procedimento de rejuvenescimento do experimento 3.B9.

Nos experimentos 3.D1 e 3.D2 foram utilizadas membranas planas ACM1, oxidadas e degradadas utilizando o mesmo procedimento da fase A, reduzindo para aproximadamente 90,5% a retenção de NaCl.

Experimento 3.D1 – Avaliação do rejuvenescimento em 15 horas de operação, utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, sob condições padronizadas de operação, conforme descrito no item IV.2.2.

Experimento 3.D2 – Avaliação do rejuvenescimento em 15 horas de operação, utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, sob as condições padronizadas de operação, conforme descrito no item IV.2.2.

Nos experimentos 3.D3 e 3.D4 foi utilizada a membrana módulo em espiral BW30.

A membrana módulo em espiral foi oxidada e degradada utilizando as mesmas condições de operação dos experimentos 3.D1 e 3.D2.

Experimento 3.D3 – Avaliação do rejuvenescimento em 15 horas de operação, utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, sob condições padronizadas de operação, conforme descrito no item IV.2.2.

A membrana em espiral utilizada no experimento 3.D3 foi aproveitada para o experimento 3.D4. Para tanto foi efetuada uma limpeza química a fim de remover o rejuvenescimento realizado sobre a superfície da membrana. Esta membrana foi novamente rejuvenescida para a avaliação do experimento 3.D4.

Experimento 3.D4 – Avaliação do rejuvenescimento em 30 dias de campanha, utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ. Nesta avaliação, a membrana módulo em espiral foi deslocada para o sistema de OR da empresa AZ e alimentada continuamente.

IV.2.2 Condições Experimentais Padronizadas para Avaliação de Performance de Membranas

Para avaliações de performance das membranas nos experimentos foram realizadas medidas de fluxo de permeado e medidas de retenção de sólidos dissolvidos, utilizando-se as seguintes soluções:

- Solução contendo 2000 ppm de NaCl, pH entre 6,9 – 7,0 (natural desta solução).
- Água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, pH entre 5,8 – 6,0, com características físico-químicas descritas no item V.1.3.4.

As soluções utilizadas em cada experimento estão descritas no Capítulo V.

As avaliações das membranas utilizando o módulo para membranas planas foram realizadas em condições operacionais padronizadas, com vazão de alimentação mantida em $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a uma temperatura de 25,0°C e pressão de 11,77 bar (12,0 kgf.cm⁻²). As medidas

de fluxo de permeado e retenção de NaCl foram realizadas em intervalos de 6 minutos, durante 30 minutos de avaliação.

As medidas de fluxo foram realizadas determinando-se o tempo requerido para completar volumes pré estipulados em provetas graduadas. O erro relativo máximo das medidas de fluxo realizadas por meio deste procedimento foi estimado em 1,5%.

As avaliações realizadas na membrana módulo em espiral, nos experimentos 3.D3 e 3.D4, utilizaram condições de operação indicadas no item V.1.3.4.

IV.2.3 Métodos Analíticos

Os métodos analíticos e equipamentos utilizados estão descritos a seguir.

IV.2.3.1 Análise de Condutividade elétrica

As medidas de condutividade elétrica foram realizadas com condutivímetro DIGIMED DM-31, com eletrodo modelo DMC-010M. O erro relativo máximo das medidas realizadas por este equipamento, conforme dados fornecidos pelo fabricante, é de 3,16%.

As medidas de condutividade elétrica do experimento 3.D4 foram realizados na ETA da empresa AZ utilizando um condutivímetro ORION modelo 125. O erro relativo máximo das medidas realizadas por este equipamento, conforme dados fornecidos pelo fabricante, é de 2,50%.

IV.2.3.2 Análise de pH

Para determinação dos valores de pH foi utilizado um pHmetro DIGIMED, modelo DM20. O erro relativo máximo das medidas realizadas por este equipamento, conforme dados fornecidos pelo fabricante, é de 1,97%.

IV.2.3.3 Análises de Concentrações de Sílica Solúvel, Ferro Total, Alumínio e Cloro Livre

Para análise destes elementos foi utilizado o espectrofotômetro Spectroquant NOVA 60, juntamente com conjuntos de reagentes da MERCK, específicos para cada elemento a ser analisado neste equipamento. Os códigos da MERCK dos conjuntos de reagentes utilizados e os erros relativos máximos, conforme dados fornecidos pelo fabricante, estão mostrados na Tabela IV.2.

Tabela IV.2 – Erros relativos máximos das análises realizadas no Spectroquant NOVA 60.

Elemento	Código MERCK	Erro relativo máximo (%)
Alumínio	14825	1,3
Cloro livre	14828	2,0
Ferro total	14761	1,02
Sílica solúvel	14794	1,7

As análises de sílica do experimento 3.D4 foram realizadas com o espectrofotômetro de emissão em plasma de argônio indutivamente acoplado, THERMO JARRELL Ash Icap 61, do laboratório da empresa AZ. Foi utilizado o método SM 3120 B - 93 – *Inductively Coupled Plasma (ICP) Method*, de acordo com CLESCERI et al. (1998). O erro relativo máximo das análises de sílica realizadas por meio deste método e equipamento, de acordo com dados fornecidos pelo laboratório da empresa AZ, é de 0,94%.

IV.2.3.4 Análise da Concentração de NaCl

As concentrações de NaCl, nas correntes de alimentação e permeado, foram determinadas indiretamente por medidas de condutividade elétrica. Segundo SANTOS FILHO (1981), a condutividade elétrica da água é determinada pela presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ions. A fim de converter medidas de condutividade elétrica em equivalente concentração de NaCl curvas experimentais de calibração foram previamente preparadas.

Curva experimental de condutividade elétrica versus concentração de NaCl

Foram preparadas 20 soluções com concentrações de NaCl de 0,2 a 2000 ppm. Medidas de condutividade elétrica foram realizadas a 25 °C e os resultados estão contidos na Tabela IV.3.

Tabela IV.3 – Medidas de condutividade elétrica de diferentes concentrações de NaCl a 25,0 °C.

Concentração de NaCl (ppm)	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Concentração de NaCl (ppm)	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
2000	3200	100	185
1750	2824	70	134
1500	2430	60	110
1250	2045	50	98,3
1000	1695	31	62,4
750	1266	20	43,0
500	877	15	32,1
300	543	10	22,3
200	362	3	8,40
160	295	0,2	1,62

A fim de melhorar o ajuste das curvas, os dados da Tabela IV.3 foram divididos em três intervalos de concentrações, conforme apresentado nas Figuras IV.6, IV.7 e IV.8.

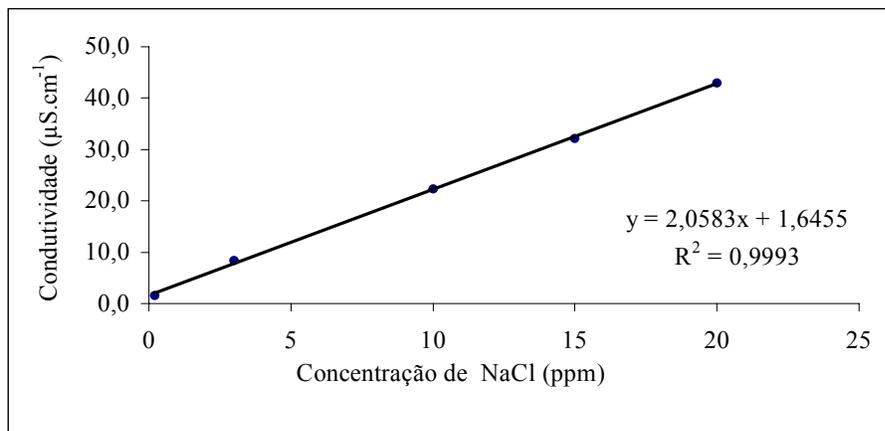


Figura IV.6 – Curva de conc. de NaCl *versus* cond. elétrica (25°C), para a faixa de 0,2 a 20 ppm de NaCl.

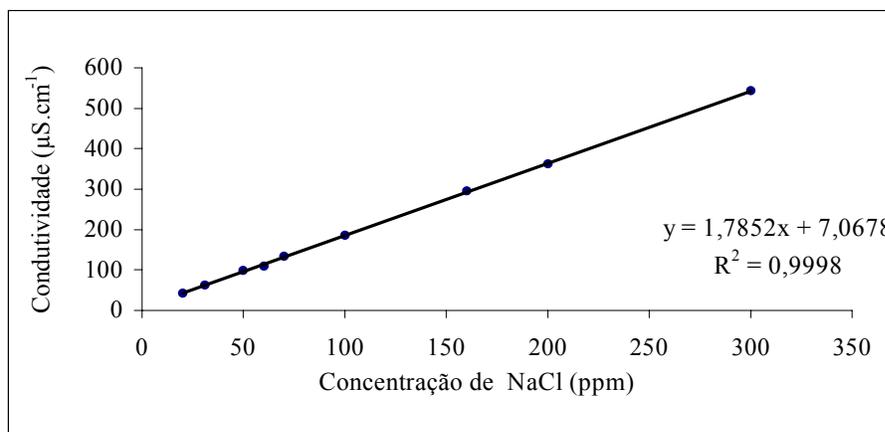


Figura IV.7 – Curva de conc. de NaCl *versus* cond. elétrica (25°C), para a faixa de 20 a 300 ppm de NaCl.

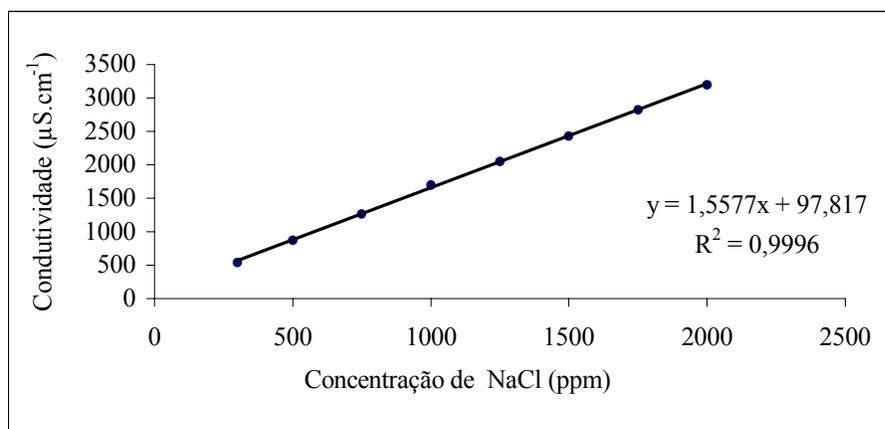


Figura IV.8 – Curva de conc. de NaCl *vs* cond. elétrica (25°C), para a faixa de 300 a 2000 ppm de NaCl.

A condutividade elétrica da água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ foi convertida em equivalente concentração de NaCl, segundo as curvas de calibração das Figuras IV.6, IV.7 e IV.8, para os cálculos de retenção de sólidos dissolvidos onde foi utilizada esta água. Apesar desta operação representar uma aproximação, de acordo com BYRNE (1995), águas contendo diferentes tipos de eletrólitos necessitam se referenciar em curvas padronizadas de um único sal.

Utilizando-se a equação de retenção II.1, os erros relativos associados às medidas de condutividade elétrica e às medidas de concentração de sílica se propagam aos resultados calculados de retenção de NaCl e de retenção de sílica, respectivamente. Deste modo, os resultados de retenção de NaCl e sílica, derivados das respectivas medidas efetuadas possuem, segundo FRAGNITO et al. (1997), uma combinação dos erros destas medidas realizadas. Faz-se necessário estimar qual o erro resultante que afeta a variável R (retenção) que é uma função das medidas de condutividade elétrica e concentração de sílica das correntes de alimentação e de permeado. Estes autores sugerem que o erro absoluto de funções dependentes de duas variáveis medidas seja calculado em cada ponto desejado, utilizando a noção de derivada da função, conforme a equação IV.1 mostrada a seguir:

$$\Delta \bar{f} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 (\Delta \bar{x})^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 (\Delta \bar{y})^2} \quad (\text{IV.1})$$

onde $f=f(x,y)$ é uma função dependente de x e y , variáveis medidas e independentes, e $\Delta \bar{f}$, $\Delta \bar{x}$, $\Delta \bar{y}$ representam os respectivos erros absolutos. Aqui $\frac{\partial f}{\partial x}$ e $\frac{\partial f}{\partial y}$ são as derivadas parciais de $f(x,y)$ em relação a x e y , respectivamente, calculadas no ponto $(x, y) = (\bar{x}, \bar{y})$.

Os erros absolutos referentes aos resultados de retenção de NaCl e sílica, mostrados no Capítulo V, foram estimados por meio da metodologia de propagação de erros representada pela equação IV.1.

V . RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho.

Inicialmente estão apresentados os resultados dos experimentos realizados, abrangendo: o estudo sobre o poder de catálise do alumínio em oxidações por cloro livre, o estudo sobre a degradação de membranas causada pela limpeza química e a avaliação e otimização de procedimentos para rejuvenescimento de membranas utilizando ácido tânico. Posteriormente estão apresentados os resultados de testes experimentais e estudos realizados sobre o sistema de OR da empresa AZ, objeto de pesquisa deste trabalho.

V.1 Experimentos Realizados

Neste item, os resultados estão apresentados na forma de gráficos e tabelas. Os pontos experimentais coletados estão contidos no Anexo B na forma de tabelas, referenciadas ao código do respectivo experimento.

V.1.1 Estudo sobre o Poder de Catálise do Íon Alumínio (Al^{+3}) em Oxidações por Cloro Livre

Os resultados obtidos nos experimentos das oxidações por cloro livre em presença de alumínio e ferro, experimentos 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 e 1.7, estão apresentados em gráficos de performance ao longo das seis horas de avaliação experimental, onde a própria solução oxidante de hipoclorito de sódio ($NaClO$) foi utilizada para as medições de retenção e fluxo de permeado. O experimento 1.1 foi realizado com solução contendo 500 ppm de cloro livre. Os experimentos 1.2, 1.3 e 1.4 foram realizados com soluções contendo 500 ppm de cloro livre e em presença de 0,05, 0,10 e 0,26 ppm de alumínio, respectivamente. Os experimentos 1.5, 1.6 e 1.7 foram realizados com soluções contendo 500 ppm de cloro livre e em presença de 0,05, 0,10 e 0,26 ppm de ferro total, respectivamente.

Os resultados dos experimentos estão representados nas Figuras V.1 e V.2 em termos de retenção de $NaClO$, e nas Figuras V.3 e V.4 em termos de fluxo de permeado.

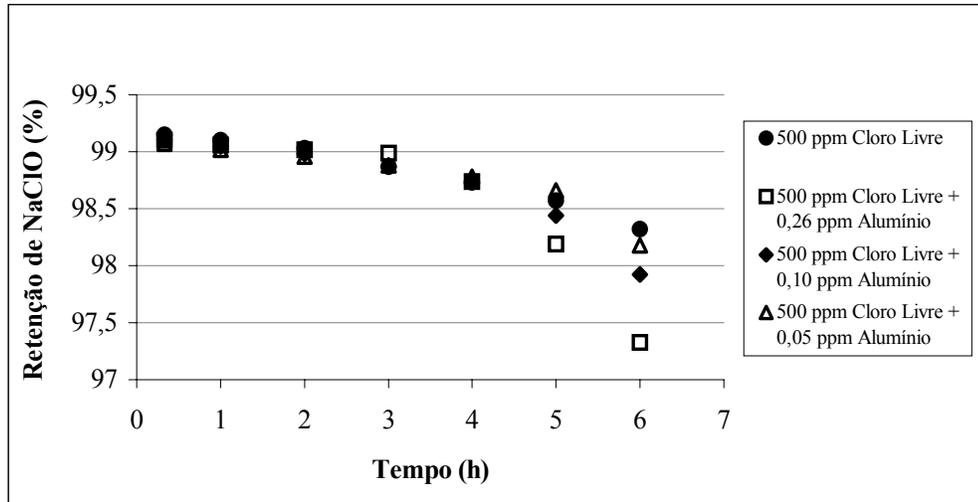


Figura V.1 – Retenção utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por alumínio.

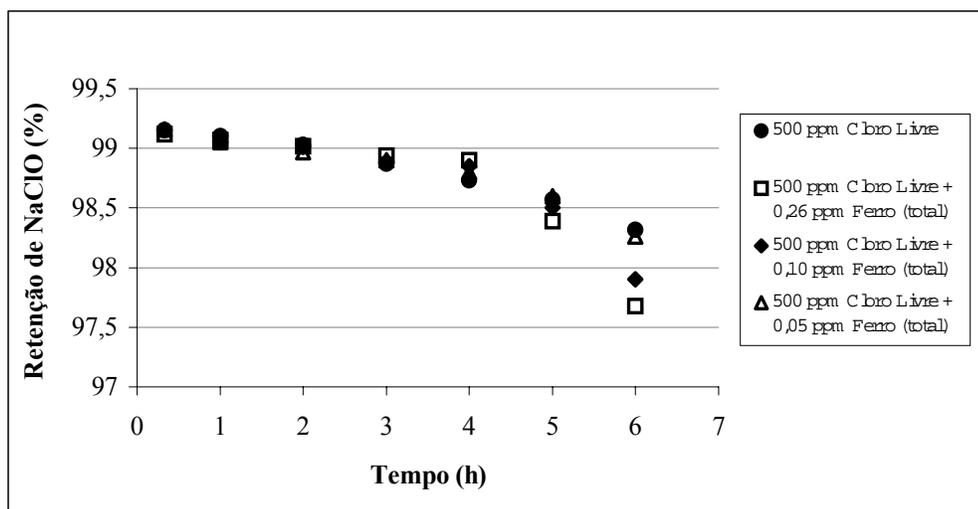


Figura V.2 – Retenção utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por ferro.

As condutividades elétricas foram transformadas em concentração equivalente de NaCl utilizando as curvas de calibração das Figuras IV.6, IV.7 e IV.8. As pequenas frações adicionadas dos metais alumínio e ferro não interferiram nos valores de condutividade elétrica da solução oxidante de 500 ppm de cloro livre.

Ao longo das seis horas de duração dos experimentos as soluções de alimentação tiveram, naturalmente, as concentrações de cloro livre reduzidas de 500 para aproximadamente 460 ppm. Esta redução pode ser atribuída a perdas por evaporação e ao próprio consumo nas oxidações.

Segundo BYRNE (1995), membranas oxidadas têm suas retenções de sais reduzidas e seus fluxos de permeado aumentados. O que representa uma maior facilidade de passagem, tanto de sais quanto de solvente, pela camada seletiva da membrana e essas conseqüências serão proporcionais aos níveis de oxidações sofridos pelas membranas.

Nas Figuras V.1 e V.2 observam-se as reduções de retenção de NaClO causadas pelas oxidações sofridas pelas membranas, ao longo das seis horas de cada experimento, nas três concentrações de alumínio e ferro avaliadas. É possível notar que tanto nos experimentos com ferro quanto nos experimentos com alumínio as membranas reduziram suas performances de retenção, indicando que sofreram oxidação. As duas figuras mostram que os efeitos das oxidações foram tanto maiores quanto maiores foram as concentrações de metal adicionadas em cada experimento, sendo que com 0,26 ppm de metal adicionado aos 500 ppm de cloro livre obteve-se os maiores níveis de oxidação.

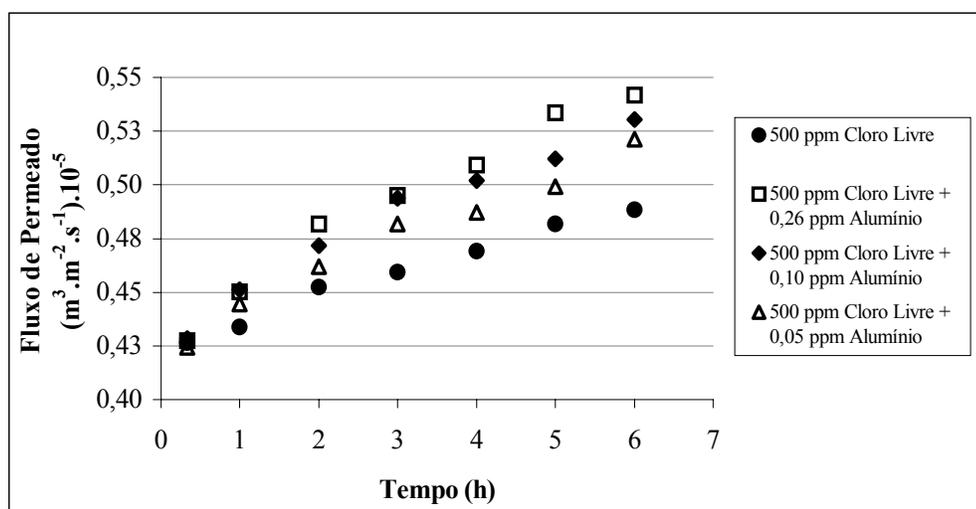


Figura V.3 – Fluxo de permeado utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por alumínio.

As Figuras V.3 e V.4 representam os aumentos de fluxo de permeado provocados pelas oxidações sofridos pelas membranas, ao longo das seis horas de cada experimento. Similarmente à tendência dos gráficos das Figuras V.1 e V.2, os efeitos das oxidações foram mais acentuados para as maiores concentrações de metal adicionadas.

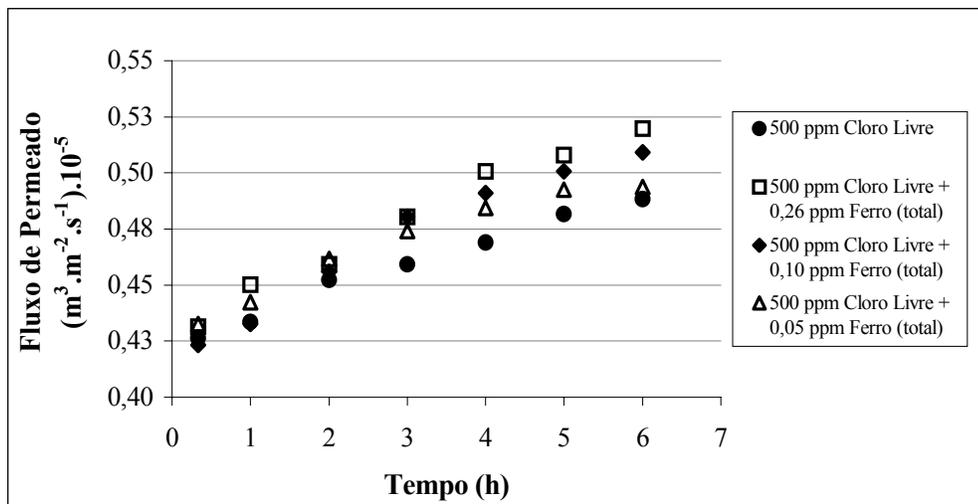


Figura V.4 – Fluxo de permeado utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por ferro.

Conforme diversos autores, entre eles BYRNE (1995) e HENLEY (1996), a catálise por ferro em oxidações por cloro livre é prevista ocorrer em membranas de OR. Os resultados dos gráficos das Figuras V.2 e V.4 mostram que as oxidações foram catalisadas pelo ferro, nas condições em que os experimentos foram realizados. Quanto maior a concentração de ferro adicionada aos 500 ppm de cloro livre maior foi a taxa de oxidação observada nos experimentos.

Os resultados dos gráficos das Figuras V.1 e V.3 revelam que, similarmente ao ferro, o alumínio mostrou um poder de catálise sobre as oxidações por cloro livre em membranas de PA de OR, nas condições experimentais realizadas. Conforme já citado no Capítulo II, BYRNE (1995) expõe diversas semelhanças entre o ferro e o alumínio e suas tendências para reagir.

Os efeitos de catálise nas oxidações podem ser melhor observados nas Figuras V.3 e V.4, onde as taxas de oxidação se mostram diferentes desde o início de cada experimento realizado.

A Figura V.5 representa uma comparação entre os resultados das Figuras V.1, V.2, V.3 e V.4, onde é possível atribuir ao alumínio um poder de catálise levemente superior ao do ferro, nas condições em que foram realizados os experimentos. Nas três concentrações de metal adicionadas, as taxas de oxidação foram levemente maiores para os experimentos com o alumínio, o que pode ser visualizado nas figuras em termos de redução de retenção e em termos de aumento de fluxo de permeado.

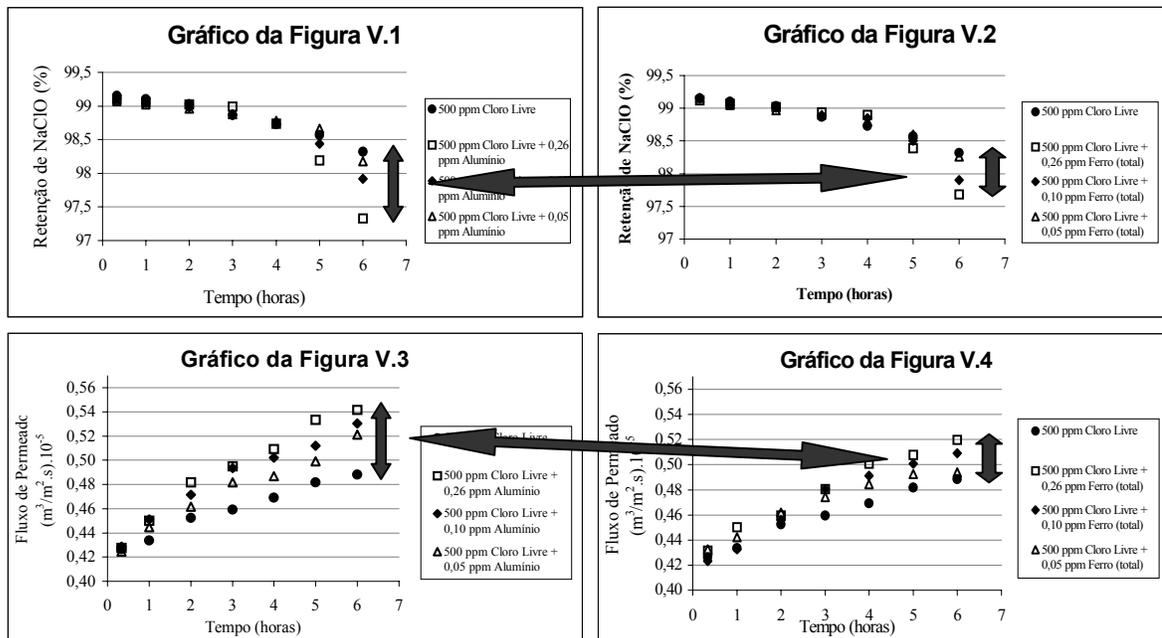


Figura V.5 – Comparação entre os gráficos das Figuras V.1, V.2, V.3 e V.4, performances de retenção e fluxo de permeado das oxidações por cloro livre em presença de alumínio e ferro.

V.1.2 Estudo da Degradação de Membranas Causada pelo Uso do Agente Tensoativo Lauril Sulfato de Sódio, em Procedimentos de Limpeza Química

Para os sete experimentos realizados foram avaliadas recirculações de 10 horas das soluções de limpeza química ácida ou alcalina, sobre a superfície de membranas novas nos experimentos 2.1 e 2.2, sobre a superfície de membranas com 3 anos de uso no sistema de OR da empresa AZ nos experimentos 2.3 e 2.4, e sobre a superfície de membranas previamente oxidadas por cloro livre nos experimentos 2.5, 2.6 e 2.7. As membranas foram avaliadas antes e depois de cada etapa dos experimentos utilizando-se solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Os gráficos das Figuras V.6, V.7, V.8 e V.9 mostram os resultados obtidos no primeiro experimento 2.1. A performance inicial da membrana utilizada no experimento, em termos de retenção de NaCl e em termos de fluxo de permeado, está mostrada nas Figuras V.6 e V.7, respectivamente. Os gráficos das Figuras V.8 e V.9 mostram as avaliações de performance da membrana após as 10 horas de recirculação de solução da etapa ácida.

Comparando os gráficos das Figuras V.8 e V.9 com os gráficos das Figuras V.6 e V.7, pode-se observar que após a realização do procedimento de 10 horas de recirculação da solução ácida da limpeza química a membrana manteve sua performance inicial. Os valores de retenção de NaCl e fluxo de permeado da membrana avaliada não foram prejudicados pelo procedimento de limpeza química realizado no experimento. A média dos fluxos de permeado da avaliação

inicial da membrana passaram de $(0,68 \pm 0,01)$ para $(0,70 \pm 0,01) \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$ após a realização da limpeza química. A média das retenções de NaCl da avaliação inicial da membrana passaram de $(99,36 \pm 0,03)$ para $(99,38 \pm 0,03) \%$ após a realização da limpeza química. Assim sendo, estes valores são constantes dentro da faixa de erro verificada.

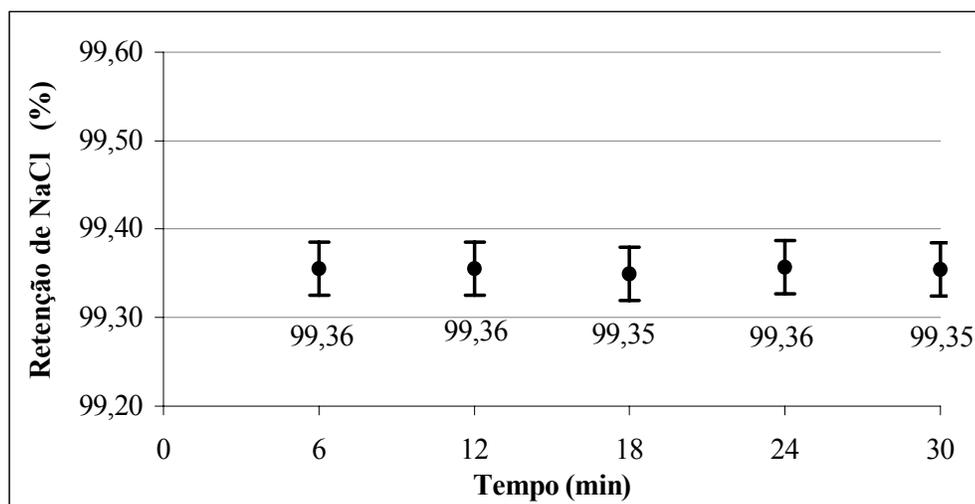


Figura V.6 – Retenção de NaCl utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, performance inicial da membrana do experimento 2.1.

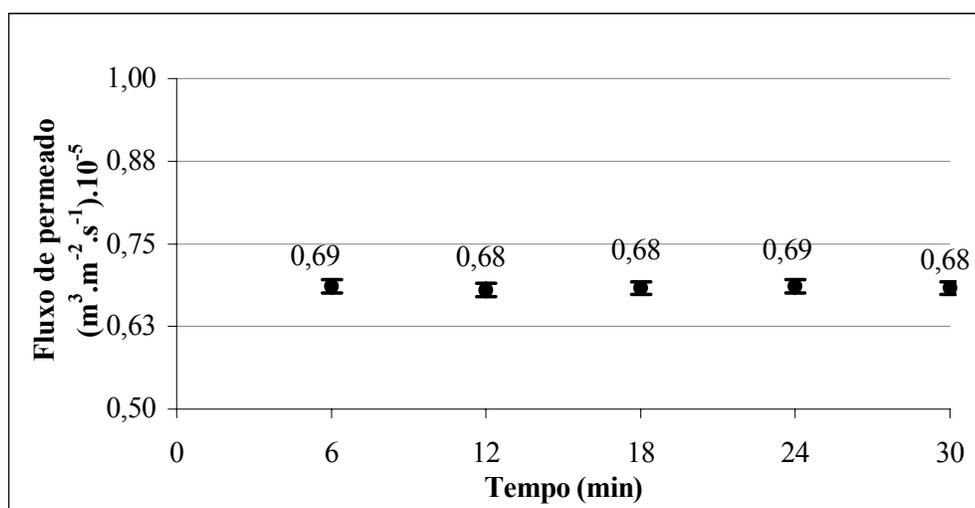


Figura V.7 – Fluxo de permeado utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, performance inicial da membrana do experimento 2.1.

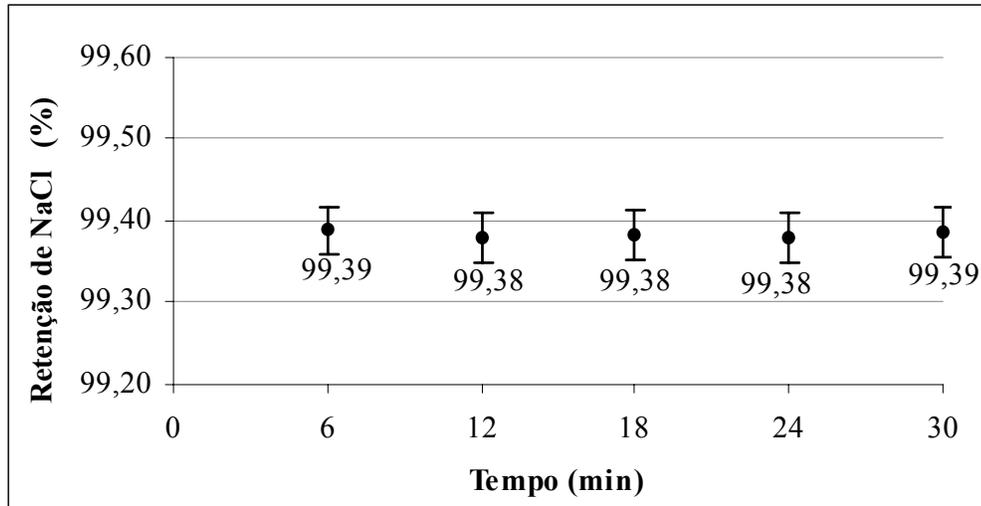


Figura V.8 – Retenção de NaCl utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, performance após limpeza da membrana do experimento 2.1 utilizando solução ácida.

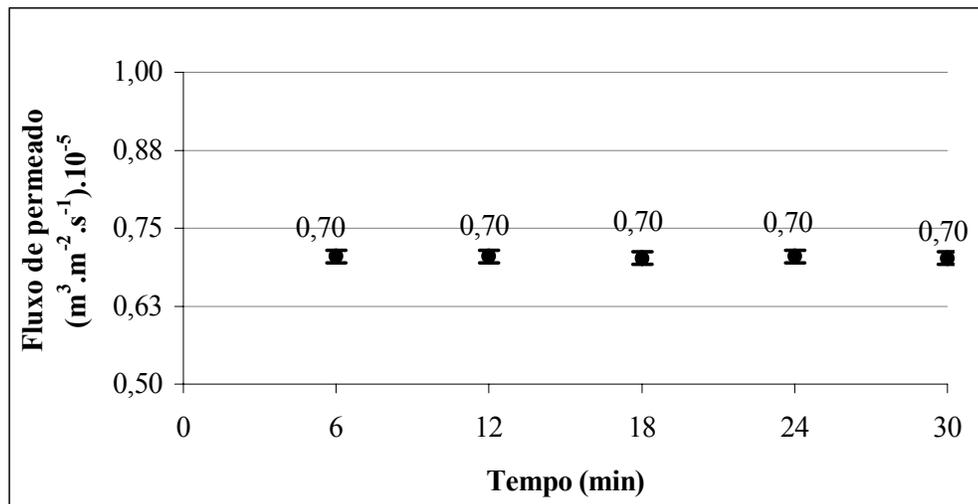


Figura V.9 – Fluxo de permeado utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, performance após limpeza da membrana do experimento 2.1 utilizando solução ácida.

Como pode ser observado nos gráficos das Figuras V.6, V.7, V.8 e V.9 as avaliações de fluxo de permeado e retenção de NaCl, ao longo dos 30 minutos de avaliação, apresentam diferenças muito pequenas entre as cinco medidas realizadas. Os resultados dos próximos experimentos estão mostrados em tabelas onde os valores de fluxo de permeado e retenção de NaCl representam uma média aritmética das cinco medidas realizadas ao longo dos 30 minutos de avaliação experimental.

As médias dos resultados dos experimentos 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 estão representadas na Tabela V.1.

Tabela V.1 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7.

Experimento	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 10^{-5}
Experimento 2.2	Inicial (membrana nova)	99,34 ± 0,03	0,66 ± 0,01
	Após 10h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	99,35 ± 0,03	0,67 ± 0,01
Experimento 2.3	Inicial (membrana 3 anos OR/empresa AZ)	99,29 ± 0,03	0,60 ± 0,01
	Após 10h de Limpeza ácida	99,31 ± 0,03	0,65 ± 0,01
Experimento 2.4	Inicial (membrana 3 anos OR/empresa AZ)	99,28 ± 0,03	0,60 ± 0,01
	Após 10h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	99,30 ± 0,03	0,64 ± 0,01
Experimento 2.5	Inicial (membrana nova)	99,34 ± 0,03	0,69 ± 0,01
	Após Oxidação	96,96 ± 0,14	3,00 ± 0,05
	Após 10h de Limpeza ácida	97,36 ± 0,12	2,94 ± 0,04
Experimento 2.6	Inicial (membrana nova)	99,32 ± 0,03	0,68 ± 0,01
	Após Oxidação	96,80 ± 0,14	2,90 ± 0,04
	Após 10h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	84,80 ± 0,68	5,90 ± 0,09
Experimento 2.7	Inicial (membrana nova)	99,31 ± 0,03	0,64 ± 0,01
	Após Oxidação	96,89 ± 0,14	3,12 ± 0,05
	Após 10h de Limpeza alcalina (sem LSS)	96,90 ± 0,14	3,16 ± 0,05

Pela Tabela V.1, a membrana nova do experimento 2.2 manteve sua performance inicial, mesmo após 10 horas de recirculação de limpeza química com solução alcalina + 0,5% de LSS. O fluxo de permeado e a retenção de NaCl, assim como no experimento 2.1, permaneceram constantes dentro da faixa de erro verificada.

Analisando os resultados dos experimentos 2.1 e 2.2 verifica-se que, nas condições operacionais dos experimentos, as soluções ácida e alcalina + 0,5% de LSS da limpeza química descrita no Capítulo III não degradaram as membranas novas de PA de OR utilizadas nos experimentos.

Na tentativa de utilizar membranas que melhor representassem condições de desgaste operacional no qual estariam submetidas em sistemas de OR industriais, foram utilizadas membranas planas ACM1 retiradas de um módulo em espiral com três anos de operação no sistema de OR da empresa AZ. O módulo em espiral, na ocasião em que foi retirado de operação, estava com quatro meses sem sofrer limpeza química. Os experimentos 2.3 e 2.4 foram realizados utilizando estas membranas com três anos de operação.

De acordo com os resultados da Tabela V.1, observa-se que as soluções ácida e alcalina + 0,5% de LSS utilizadas nos experimentos 2.3 e 2.4, respectivamente, não degradaram as membranas utilizadas nestes experimentos.

Embora as membranas utilizadas nos experimentos 2.3 e 2.4 estivessem com três anos de operação obteve-se resultados de retenção de NaCl equivalentes aos das membranas novas. Entretanto, resultados inferiores de retenção de NaCl eram supostamente esperados. De acordo com a descrição do sistema de OR da empresa AZ realizada no Capítulo III, a performance de retenção global de sais daquelas membranas foi afetada e reduzida consideravelmente ao longo dos três primeiros anos de operação. Uma vez que o módulo para membrana plana utilizado nos experimentos utiliza apenas 56,1 cm² de membrana, é possível que os pedaços utilizados nos experimentos 2.3 e 2.4 tivessem mantido sua performance original intacta. Este fato pode ser explicado considerando-se uma degradação não homogênea das membranas contidas nos módulos em espiral do sistema de OR da empresa AZ. Uma abordagem sobre as condições de performance destas membranas será retomada no item V.2.

Nos experimentos 2.5, 2.6 e 2.7 optou-se por utilizar membranas novas oxidadas preliminarmente por cloro livre. Os experimentos estão divididos em uma primeira parte onde foi realizada a oxidação, e em uma segunda parte onde foi realizada a recirculação de solução da limpeza química. Este procedimento visou estudar os efeitos da limpeza química sobre uma superfície de membrana com retenção de sais reduzida por oxidação por cloro livre, o que não foi possível utilizando as membranas com 3 anos de operação nos experimentos 2.3 e 2.4.

Os resultados da Tabela V.1 mostram que, igualmente aos experimentos anteriores, o experimento 2.5 não degradou a membrana. A recirculação de 10 horas de solução ácida da limpeza química, sobre uma superfície de membrana oxidada e com retenção de NaCl reduzida a 96,96%, não piorou as características de retenção da membrana.

Analisando os resultados do experimento 2.6 constata-se que a recirculação da solução alcalina + 0,5% de LSS degradou a membrana utilizada. A retenção de NaCl foi reduzida de $(96,80 \pm 0,14)$ para $(84,80 \pm 0,68)\%$, e o fluxo de permeado foi aumentado de $(2,90 \pm 0,04)$ para $(5,90 \pm 0,09) \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$.

A proposta do experimento 2.7 foi de realizar uma recirculação da solução alcalina sem a adição do LSS, sobre uma superfície de membrana também preliminarmente oxidada. Observando os resultados da Tabela V.1 a recirculação desta solução alcalina sem o LSS não

reduziu a performance da membrana. As características de retenção de NaCl e de fluxo de permeado foram mantidas, após a realização do experimento.

Uma comparação entre os sete experimentos realizados pode ser visualizada na Figura V.10, e revela que as membranas que tinham suas superfícies originais intactas não foram agredidas e degradadas pelas soluções ácida e alcalina + 0,5% de LSS da limpeza química descrita no Capítulo III. Por outro lado, nas condições experimentais realizadas, a membrana com a superfície preliminarmente oxidada teve sua performance afetada pela solução alcalina + 0,5% de LSS da limpeza química.

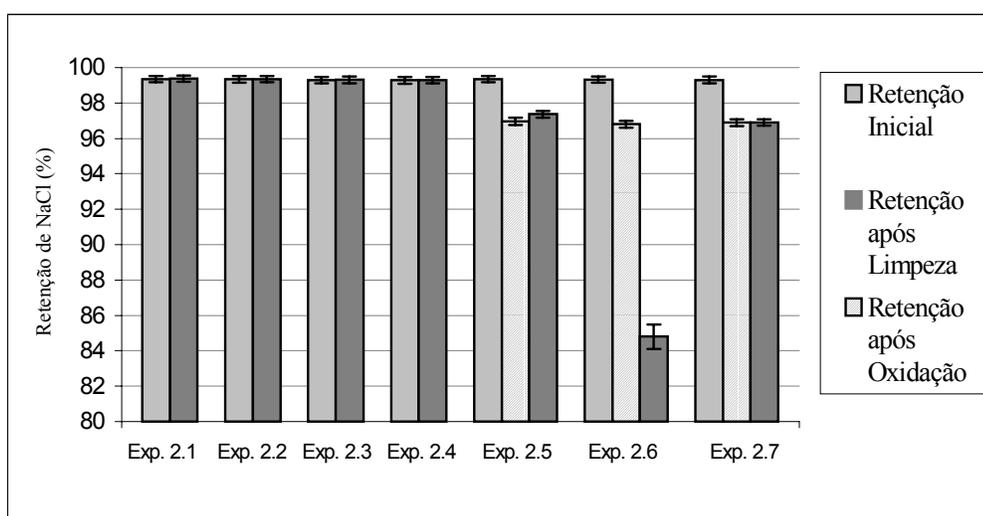


Figura V.10 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos sete experimentos realizados e mostradas na Tabela V.1, antes e após cada etapa da limpeza química.

Distinguindo entre os experimentos 2.6 e 2.7, o tensoativo LSS parece ter sido o agente causador da degradação da solução alcalina da limpeza química. A solução alcalina contendo 0,5% de LSS tem suas propriedades físicas alteradas, tais como densidade e viscosidade, em comparação à solução alcalina sem o LSS. Sabe-se que em escoamentos viscosos de fluidos newtonianos a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à viscosidade do fluido. Considerando os pontos de oxidação por cloro livre sofridos pela membrana como rugosidades criadas em sua superfície, esses pontos estariam sujeitos a um maior cisalhamento pelo fluido, o que pode explicar o fenômeno verificado.

V.1.3 Avaliação e Otimização de Procedimentos para Tratamento de Rejuvenescimento de Membranas de PA Utilizando Ácido Tânico

Os resultados e discussões dos experimentos de rejuvenescimento realizados estão apresentados de acordo com a divisão por fases, descritas no item IV.2.1.3. Na primeira fase foram realizadas avaliações de ácidos orgânicos e adstringentes como agentes de rejuvenescimento. Na segunda fase foram realizados experimentos para otimização do procedimento de rejuvenescimento utilizando ácido tânico. Na terceira fase foram realizados experimentos para avaliação do procedimento de rejuvenescimento aplicado sobre membranas degradadas a diferentes níveis. Na quarta fase foram realizados experimentos para avaliação dos tempos de campanha de membranas rejuvenescidas.

V.1.3.1 Avaliação de Ácidos Orgânicos e Adstringentes como Agentes de Rejuvenescimento

Assim como o ácido tânico, os ácidos gálico e maléico, também orgânicos e adstringentes, foram avaliados como agentes de rejuvenescimento.

Em cada um dos três experimentos foi utilizado o mesmo procedimento básico de rejuvenescimento. A vazão de alimentação foi mantida em $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a temperatura em $40,0^\circ\text{C}$ e a pressão em 2,94 bar ($3 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$). As soluções de alimentação foram preparadas com 80 ppm de ácido. O pH da solução com 80 ppm de ácido tânico foi reduzido de 5,5 para 4,0 com a adição de 10,4 ppm de ácido cítrico. As soluções com 80 ppm dos ácidos gálico e maléico tiveram seus pH naturais mantidos em 3,95 e 3,32, respectivamente.

Os valores dos parâmetros operacionais do procedimento descrito acima foram escolhidos baseando-se no procedimento descrito por BYRNE (1995), para rejuvenescimento de membranas em módulos de fibra oca utilizando ácido tânico como agente de rejuvenescimento. Segundo o procedimento descrito, o autor propõe uma vazão de alimentação de $1,26 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (2 GPM) para cada módulo em espiral de 10,16 cm (4 in) de diâmetro, mantida a 35°C e pressão de 6,86 a 10,30 bar (7,0 a $10,5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$). A solução de alimentação deve conter 80 ppm de ácido tânico e 10000 ppm de ácido cítrico, e deve ser recirculada por 1 hora. O pH da solução não é ajustado, o que representa $\text{pH} < 2$, considerando as concentrações de ácidos tânico e cítrico presentes.

A opção por adotar valores diferentes no procedimento de rejuvenescimento desta fase do trabalho, dos daqueles descritos por BYRNE (1995), será explicada a seguir. A temperatura de $40,0^\circ\text{C}$ foi adotada porque as membranas utilizadas ACM1 e BW30 operam com segurança nesta condição, de acordo com a Tabela IV.1, e pela consideração de que temperaturas maiores

beneficiam os tratamentos de rejuvenescimento. A dilatação térmica abre mais a estrutura da membrana e este efeito pode aumentar o alcance da atuação do agente de rejuvenescimento em direção à espessura da membrana. No procedimento descrito pelo autor, a temperatura de 35°C foi adotada para padronizá-la a outros procedimentos descritos na mesma seção. A pressão de 2,94 bar (3,0 kgf.cm⁻²) foi arbitrada para melhor aproximá-la aos parâmetros de baixa pressão que os sistemas industriais de limpeza química de OR operam, já que estes sistemas de limpeza podem vir a ser aproveitados para realização do procedimento de rejuvenescimento. A concentração de 80 ppm de ácido tânico foi mantida. Contudo, optou-se por não utilizar 10000 ppm de ácido cítrico, já que um pH<2 está muito abaixo do valor mínimo de operação que as membranas utilizadas toleram, segundo a Tabela IV.1. Deste modo optou-se por trabalhar em pH 4, adicionando ácido cítrico equivalente. A vazão de 30,5x10⁻⁶ m³.s⁻¹ foi escolhida sem correlação com àquela proposta pelo autor, devido a diferenças de escalas e configurações entre os sistemas utilizados.

Nos experimentos 3.A1, 3.A2 e 3.A3 foram utilizados os ácidos tânico, gálico e maléico, respectivamente, como agentes de rejuvenescimento. As médias dos resultados destes experimentos estão apresentadas na Tabela V.2.

Tabela V.2 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 3.A1, 3.A2 e 3.A3.

Experimento	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado (m ³ .m ⁻² .s ⁻¹).10 ⁻⁵
Experimento 3.A1	Inicial	99,31 ± 0,03	0,64 ± 0,01
	Após Oxidação	96,90 ± 0,14	3,13 ± 0,05
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,40 ± 0,43	5,15 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (ácido tânico)	98,15 ± 0,08	2,76 ± 0,04
Experimento 3.A2	Inicial	99,34 ± 0,03	0,64 ± 0,01
	Após Oxidação	97,06 ± 0,13	2,88 ± 0,04
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,38 ± 0,43	4,98 ± 0,07
	Após Rejuvenescimento (ácido gálico)	98,57 ± 0,06	2,92 ± 0,04
Experimento 3.A3	Inicial	99,28 ± 0,03	0,68 ± 0,01
	Após Oxidação	96,90 ± 0,14	2,94 ± 0,04
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,50 ± 0,42	5,57 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (ácido maléico)	98,12 ± 0,08	2,73 ± 0,04

Analisando os dados da Tabela V.2 observa-se que nos experimentos 3.A1, 3.A2 e 3.A3 os respectivos ácidos utilizados melhoraram a performance da membrana degradada. Após a realização dos procedimentos de rejuvenescimento, a retenção de NaCl aumentou de aproximadamente 90,4% para valores superiores a 98%. A Figura V.11 representa uma comparação entre os três experimentos mostrados na Tabela V.2, onde é possível visualizar as performances de retenção de NaCl pelas membranas, anteriores e posteriores aos tratamentos de rejuvenescimento.

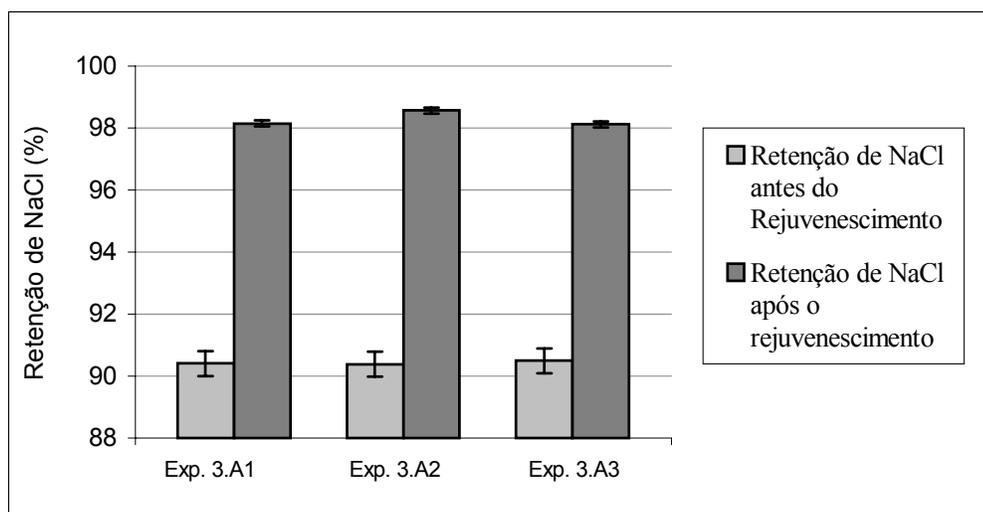


Figura V.11 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos três experimentos mostradas na Tabela V.2, antes e após os tratamentos de rejuvenescimento.

Os resultados de fluxo de permeado, também mostrados na Tabela V.2, indicam que estes valores têm comportamento inverso às retenções de NaCl, isto é, quanto menores os valores de retenção de NaCl verificados pela membrana, conseqüentemente uma maior facilidade de passagem deste sal e também de solvente é observada, aumentando o fluxo de permeado e sua concentração. Após os tratamentos de rejuvenescimento observa-se que os fluxos de permeado foram reduzidos quando comparados com os valores anteriores ao rejuvenescimento, de aproximadamente 5 para $2,8 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$. Contudo, é importante notar que os resultados experimentais iniciais de fluxo de permeado das membranas novas eram de aproximadamente $0,65 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$; desse modo, mesmo com as reduções após os rejuvenescimentos, os valores de fluxo de permeado ainda se mantiveram altos.

Os ácidos tânico e maléico obtiveram ações de rejuvenescimento equivalentes em termos de retenção de NaCl. O ácido gálico obteve a melhor ação de rejuvenescimento alcançando

(98,57 ± 0,1)%, levemente superior aos dois primeiros, aproximadamente 20% em termos de passagem de NaCl pela membrana.

Os resultados dos experimentos 3.A1, 3.A2 e 3.A3 com os três diferentes ácidos orgânicos e adstringentes utilizados, mostraram que estas substâncias, nas condições experimentais realizadas, apresentaram ação de rejuvenescimento sobre as membranas.

V.1.3.2 Otimização do Procedimento de Rejuvenescimento Utilizando Ácido Tânico como Agente de Rejuvenescimento

Nesta fase foi utilizado somente ácido tânico como agente de rejuvenescimento, devido ao seu menor valor comercial. A fim de otimizar o procedimento de rejuvenescimento foram variados, isoladamente, os seguintes parâmetros: pressão de recirculação, pH e concentração da solução de rejuvenescimento.

Os resultados dos experimentos, conforme a descrição realizada no item IV.2.1.3 estão agrupados por parâmetro variado.

Nos experimentos 3.B1, 3.B2, 3.B3 e 3.B4, os valores de pH foram ajustados para 3,0, 5,0, 2,4 e 2,1, respectivamente, sendo necessário a adição de 150,2, 2,3, 4000 e 8300 ppm de ácido cítrico, respectivamente. Os outros parâmetros do procedimento foram mantidos em seus valores descritos no item V.1.3.1.

As médias dos resultados dos experimentos 3.B1, 3.B2, 3.B3 e 3.B4 estão representadas na Tabela V.3.

Pela análise dos resultados da Tabela V.3, a ação do rejuvenescimento em termos de retenção de NaCl praticamente não diferiu nos experimentos 3.B1 e 3.B2, (98,14 ± 0,1)% e (98,13 ± 0,1)%, respectivamente, quando comparados aos resultados obtidos com pH 4,0 do experimento 3.A1 da Tabela V.2. Por outro lado, nos experimentos 3.B3 e 3.B4 as eficiências dos rejuvenescimentos, em termos de retenção de NaCl, (94,08 ± 0,3)% e (96,23 ± 0,2)%, respectivamente, foram prejudicadas pela redução do pH.

Verificando a Tabela V.3 observa-se que nenhum dos valores de pH utilizados nos experimentos melhorou o procedimento de rejuvenescimento do experimento 3.A1, realizado com pH 4,0. A Figura V.12 representa uma comparação entre os quatro experimentos mostrados na Tabela V.3, onde é possível visualizar as performances de retenção de NaCl, anteriores e posteriores aos tratamentos de rejuvenescimento.

Tabela V.3 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 3.B1, 3.B2, 3.B3 e 3.B4.

Experimento	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 10^{-5}
Experimento 3.B1	Inicial	99,29 ± 0,03	0,66 ± 0,01
	Após Oxidação	96,90 ± 0,14	3,13 ± 0,05
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,43 ± 0,43	5,57 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (pH 3,0)	98,14 ± 0,08	2,61 ± 0,04
Experimento 3.B2	Inicial	99,35 ± 0,03	0,67 ± 0,01
	Após Oxidação	96,95 ± 0,14	3,02 ± 0,05
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,46 ± 0,43	5,15 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (pH 5,0)	98,13 ± 0,08	2,66 ± 0,04
Experimento 3.B3	Inicial	99,27 ± 0,03	0,68 ± 0,01
	Após Oxidação	97,05 ± 0,13	3,00 ± 0,05
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,63 ± 0,42	5,37 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (pH 2,4)	94,08 ± 0,26	3,65 ± 0,05
Experimento 3.B4	Inicial	99,33 ± 0,03	0,65 ± 0,01
	Após Oxidação	96,87 ± 0,14	2,92 ± 0,04
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,40 ± 0,43	5,24 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (pH 2,1)	96,23 ± 0,17	3,35 ± 0,05

Valores de pH inferiores a 2,1 não foram experimentados por estarem muito abaixo do valor mínimo de pH de operação especificado pelo fabricante da membrana ACM1, de acordo com a Tabela IV.1.

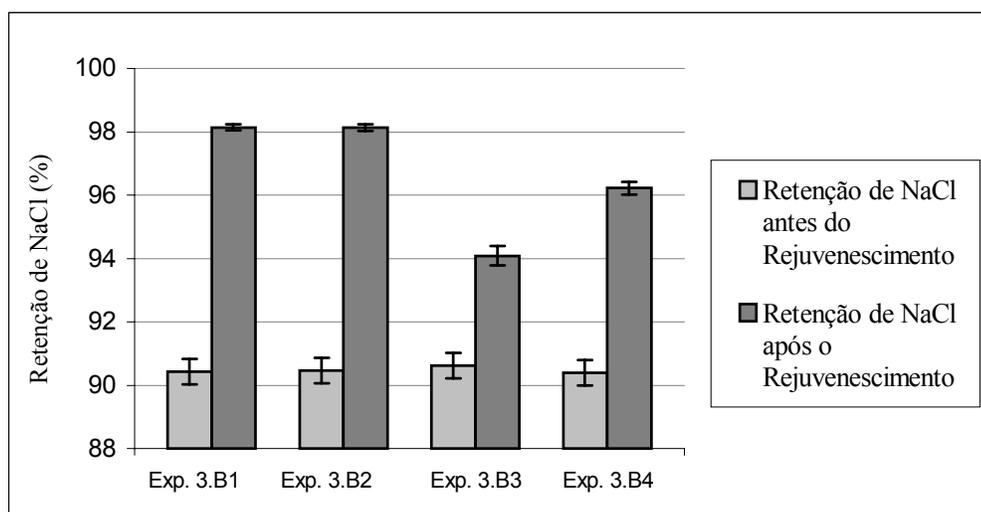


Figura V.12 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos quatro experimentos mostradas na Tabela V.3, antes e após os tratamentos de rejuvenescimento.

Nos experimentos 3.B5, 3.B6 e 3.B7 os valores de pressão de alimentação foram fixados em 5,88, 7,85 e 1,96 bar (6,0, 8,0 e 2,0 kgf.cm⁻²), respectivamente. Os outros parâmetros do procedimento foram mantidos nos valores do experimento 3.A1.

As médias dos resultados dos experimentos 3.B5, 3.B6 e 3.B7 estão representadas na Tabela V.4.

Tabela V.4 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 3.B5, 3.B6 e 3.B7.

Experimento	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado (m ³ .m ⁻² .s ⁻¹).10 ⁻⁵
Experimento 3.B5	Inicial	99,29 ± 0,03	0,65 ± 0,01
	Após Oxidação	96,98 ± 0,13	3,00 ± 0,05
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,19 ± 0,44	5,21 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (6,0 kgf/cm ²)	98,18 ± 0,08	2,58 ± 0,04
Experimento 3.B6	Inicial	99,27 ± 0,03	0,66 ± 0,01
	Após Oxidação	97,07 ± 0,13	2,88 ± 0,04
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,63 ± 0,42	5,12 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (8,0 kgf/cm ²)	98,12 ± 0,08	2,71 ± 0,04
Experimento 3.B7	Inicial	99,32 ± 0,03	0,65 ± 0,01
	Após Oxidação	96,93 ± 0,14	2,99 ± 0,04
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,39 ± 0,43	5,50 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (2,0 kgf/cm ²)	98,11 ± 0,08	2,88 ± 0,04

Os resultados dos experimentos 3.B5, 3.B6 e 3.B7, representados na Tabela V.4, mostram que os procedimentos de rejuvenescimento obtiveram performance muito similares ao do experimento 3.A1, que foi realizado com 2,94 bar (3,0 kgf.cm⁻²). A Figura V.13 representa uma comparação entre os três experimentos mostrados na Tabela V.4, onde é possível visualizar as performances de retenção de NaCl, anteriores e posteriores aos tratamentos de rejuvenescimento.

A pressão de alimentação, conforme os resultados experimentais da Tabela V.4, parece não influenciar na eficiência do procedimento de rejuvenescimento, pelo menos para as avaliações experimentais de 30 minutos que foram realizadas, conforme as condições padronizadas de operação descritas no item 2.2.

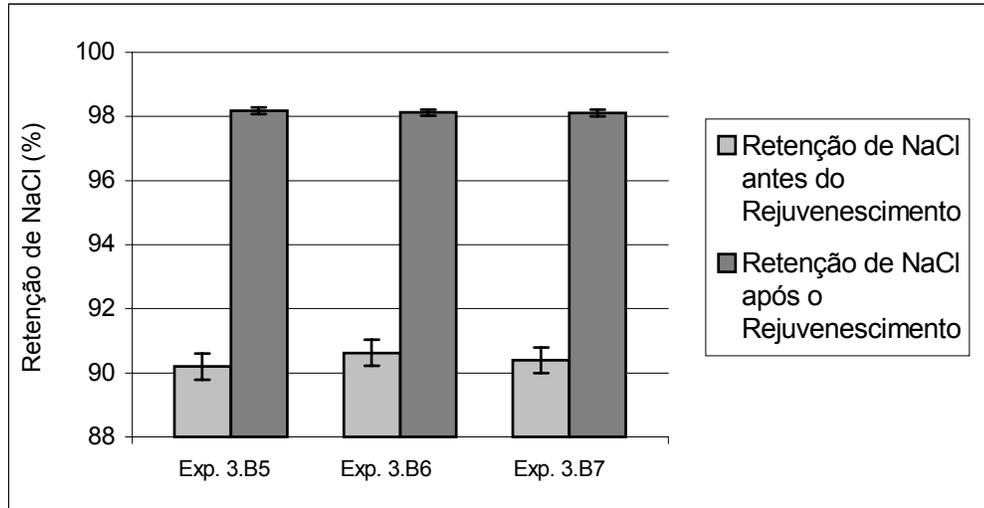


Figura V.13 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos três experimentos mostradas na Tabela V.4, antes e após os tratamentos de rejuvenescimento.

Nos experimentos 3.B8, 3.B9 e 3.B10 foram utilizados, na solução de alimentação, valores de concentração de ácido tânico de 160, 240 e 400 ppm, respectivamente. Os outros parâmetros do procedimento foram mantidos nos valores do experimento 3.A1.

As médias dos resultados dos experimentos 3.B8, 3.B9 e 3.B10 estão representadas na Tabela V.5.

Tabela V.5 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 3.B8, 3.B9 e 3.B10.

Experimento	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)
Experimento 3.B8	Inicial	99,31 ± 0,03	0,65 ± 0,01
	Após Oxidação	96,96 ± 0,14	2,99 ± 0,04
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,28 ± 0,43	5,44 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (160 ppm)	98,52 ± 0,07	2,79 ± 0,04
Experimento 3.B9	Inicial	99,35 ± 0,03	0,66 ± 0,01
	Após Oxidação	96,78 ± 0,14	2,97 ± 0,04
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,49 ± 0,43	5,21 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (240 ppm)	98,68 ± 0,06	2,50 ± 0,04
Experimento 3.B10	Inicial	99,27 ± 0,03	0,64 ± 0,01
	Após Oxidação	96,72 ± 0,15	2,86 ± 0,04
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,59 ± 0,42	5,50 ± 0,08
	Após Rejuvenescimento (400 ppm)	98,67 ± 0,06	2,42 ± 0,04

Observando a Tabela V.5, os resultados dos experimentos indicam que utilizando concentrações maiores de ácido tânico a eficiência do rejuvenescimento, em termos de retenção de NaCl, aumentou quando comparados com a eficiência do rejuvenescimento utilizando 80 ppm do procedimento do experimento 3.A1. A Figura V.14 representa uma comparação entre os três experimentos mostrados na Tabela V.5, onde é possível visualizar as performances de retenção de NaCl, anteriores e posteriores aos tratamentos de rejuvenescimento.

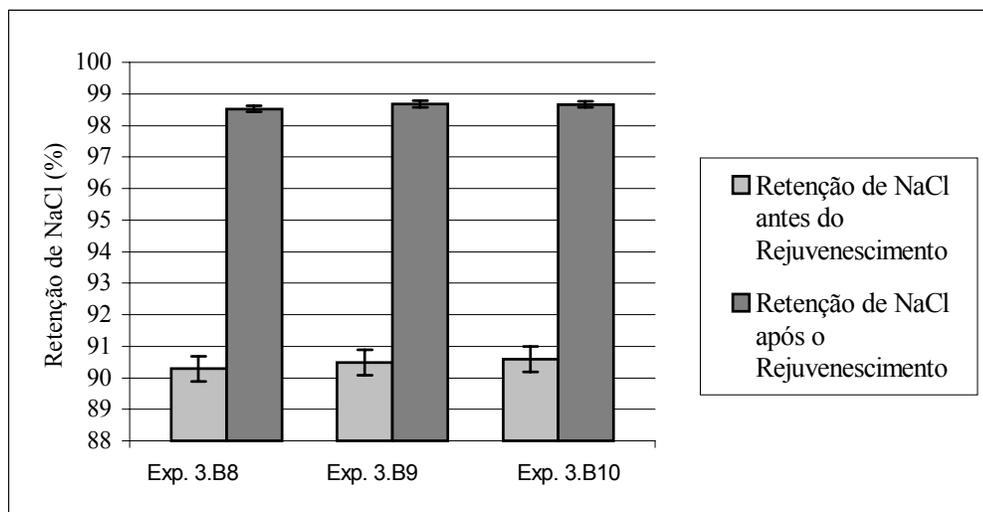


Figura V.14 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos três experimentos mostradas na Tabela V.5, antes e após os tratamentos de rejuvenescimento.

No experimento 3.B8 a eficiência do rejuvenescimento com 160 ppm de ácido tânico aumentou consideravelmente, em termos de retenção de NaCl passou os $(98,15 \pm 0,08)\%$ do experimento 3.A1 para um valor de $(98,52 \pm 0,07)\%$. No experimento 3.B9 a eficiência do rejuvenescimento utilizando 240 ppm de ácido tânico aumentou para $(98,68 \pm 0,06)\%$. Comparando os resultados dos experimentos 3.B9 e 3.B10 nota-se que foi insignificante a diferença entre as eficiências dos rejuvenescimentos utilizando 240 e 400 ppm, o que sugere um limite de concentração de 240 ppm de ácido tânico, acima do qual a eficiência não foi aumentada, nas condições experimentais realizadas.

V.1.3.3 Avaliação do Procedimento de Rejuvenescimento sobre Membranas Degradadas a Diferentes Níveis, Utilizando Ácido Tânico como Agente de Rejuvenescimento

Nos experimentos anteriores, as membranas foram degradadas a aproximadamente 90,5% em termos de retenção de NaCl, para que então fossem rejuvenescidas pelos diferentes procedimentos aplicados.

Nesta fase, um mesmo procedimento de rejuvenescimento foi utilizado em membranas degradadas a diferentes níveis em termos de retenção de NaCl.

Considerando os resultados do item V.1.3.2 foi adotado um procedimento de rejuvenescimento com uma concentração de 240 ppm de ácido tânico na solução de alimentação. Os demais parâmetros do procedimento foram mantidos nos mesmos valores do experimento 3.A1. Com isto, utilizou-se uma vazão de alimentação mantida em $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a uma temperatura de $40,0^\circ\text{C}$, com concentração de 240 ppm de ácido tânico, com pressão de 2,94 bar ($3 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$) e pH 4,0 com adição de aproximadamente 10,2 ppm de ácido cítrico.

Nos experimentos 3.C1, 3.C2, 3.C3 e 3.C4 as membranas foram degradadas a retenções de NaCl de 51,45, 81,72, 84,98 e 96,80%, respectivamente, antes de receberem os rejuvenescimentos. As médias dos resultados destes experimentos estão representadas na Tabela V.6.

Tabela V.6 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa dos experimentos 3.C1, 3.C2, 3.C3 e 3.C4.

Experimento	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 10^{-5}
Experimento 3.C1	Inicial	99,24 ± 0,03	0,67 ± 0,01
	Após Oxidação	96,51 ± 0,16	3,13 ± 0,05
	Após 15h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	51,45 ± 2,17	16,20 ± 0,24
	Após Rejuvenescimento	81,21 ± 0,84	6,37 ± 0,10
Experimento 3.C2	Inicial	99,23 ± 0,03	0,64 ± 0,01
	Após Oxidação	96,88 ± 0,14	2,85 ± 0,04
	Após 11h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	81,72 ± 0,82	8,91 ± 0,13
	Após Rejuvenescimento	92,10 ± 0,35	4,20 ± 0,06
Experimento 3.C3	Inicial	99,26 ± 0,03	0,66 ± 0,01
	Após Oxidação	97,03 ± 0,13	2,92 ± 0,04
	Após 10h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	84,98 ± 0,67	5,90 ± 0,09
	Após Rejuvenescimento	97,67 ± 0,10	3,07 ± 0,05
Experimento 3.C4	Inicial	99,32 ± 0,03	0,64 ± 0,01
	Após Oxidação	97,10 ± 0,13	2,91 ± 0,04
	Após 0,25h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	96,80 ± 0,14	3,00 ± 0,05
	Após Rejuvenescimento	99,30 ± 0,03	1,24 ± 0,02

Observando os resultados da Tabela V.6 verifica-se que as retenções de NaCl dos experimentos 3.C1, 3.C2, 3.C3 e 3.C4, após os rejuvenescimentos, aumentaram para $(81,21 \pm$

0,84), $(92,10 \pm 0,35)$, $(97,67 \pm 0,10)$ e $(99,30 \pm 0,03)\%$, respectivamente. Observa-se que, quanto maior foi a degradação provocada pela limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS, e por consequência menor a retenção de NaCl sobre o qual foi realizado o rejuvenescimento, tanto maior foi a eficiência do mesmo, em termos de ganho de retenção de NaCl. Contudo, os valores mais altos de retenção de NaCl, após os rejuvenescimentos, foram obtidos nas membranas menos degradadas. A Figura V.15 representa uma comparação entre os quatro experimentos mostrados na Tabela V.6, onde é possível visualizar as performances de retenção de NaCl, anteriores e posteriores aos tratamentos de rejuvenescimento.

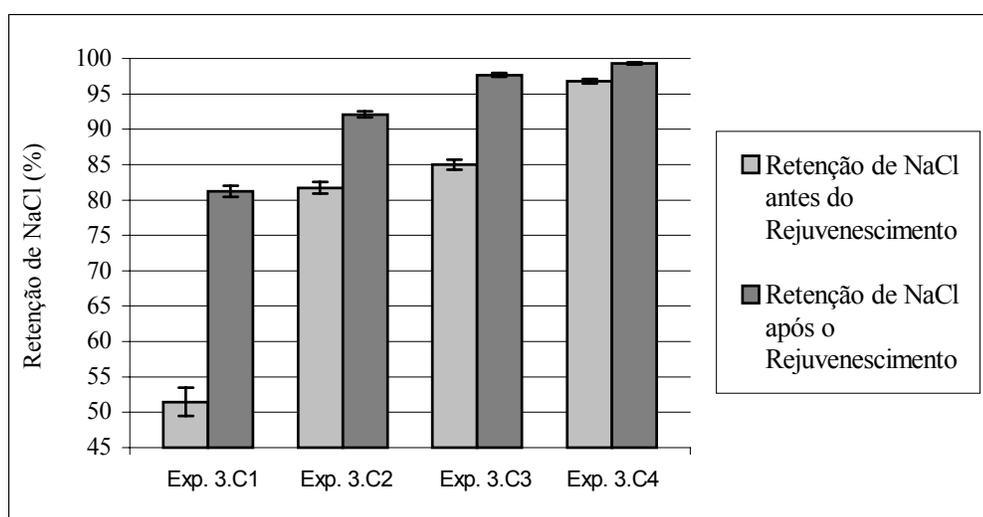


Figura V.15 – Comparação entre as performances de retenção de NaCl dos três experimentos mostradas na Tabela V.6, antes e após os tratamentos de rejuvenescimento.

Os resultados experimentais de fluxo de permeado após os rejuvenescimentos, também mostrados na Tabela V.6, seguiram a mesma tendência dos resultados de retenção de NaCl. Quanto maiores foram os valores de retenção do sal obtidos pelas membranas após os rejuvenescimentos, tanto menores foram os fluxos de permeado alcançados. Contudo, mesmo no experimento 3.C4 onde foi obtido o menor fluxo de permeado, $(1,24 \pm 0,02) \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$, este fluxo obtido foi maior do que o fluxo inicial de permeado da membrana nova utilizada no experimento, que era de $0,64 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$.

V.1.3.4 Avaliação de Tempos de Campanha de Membranas Rejuvenescidas

Nos experimentos desta fase, foi utilizado o mesmo procedimento de rejuvenescimento da fase anterior.

Os resultados das avaliações dos rejuvenescimentos ao longo do tempo de operação estão representados nas Figuras V.16 a V.23, em gráficos de retenção de NaCl e de sílica e em gráficos de fluxo de permeado ao longo do tempo de operação avaliado.

Os experimentos 3.D1 e 3.D2 utilizaram membranas planas ACM1, oxidadas e degradadas utilizando-se o mesmo procedimento dos experimentos dos itens V.1.3.1 e V.1.3.2. Este procedimento reduziu para aproximadamente 90,5% a retenção de NaCl pelas membranas.

O rejuvenescimento das membranas dos experimentos 3.D1 e 3.D2 foram avaliados sob as condições padronizadas de operação, conforme item IV.2.2, mas com um tempo de operação de 15 horas. No experimento 3.D1 foi utilizada solução contendo 2000 ppm de NaCl, enquanto que no experimento 3.D2 foi utilizada água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ.

As médias dos resultados do experimento 3.D1, até a etapa de degradação com solução alcalina + 0,5% de LSS estão representadas na Tabela V.7.

Tabela V.7 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa do experimento 3.D1.

Experimento	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 10^{-5}
Experimento 3.D1	Inicial	99,33 ± 0,03	0,64 ± 0,01
	Após Oxidação	97,11 ± 0,13	2,92 ± 0,04
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	90,81 ± 0,41	4,82 ± 0,07

As Figuras V.16 e V.17 contêm os gráficos da avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D1, em termos de retenção de NaCl e fluxo de permeado, respectivamente.

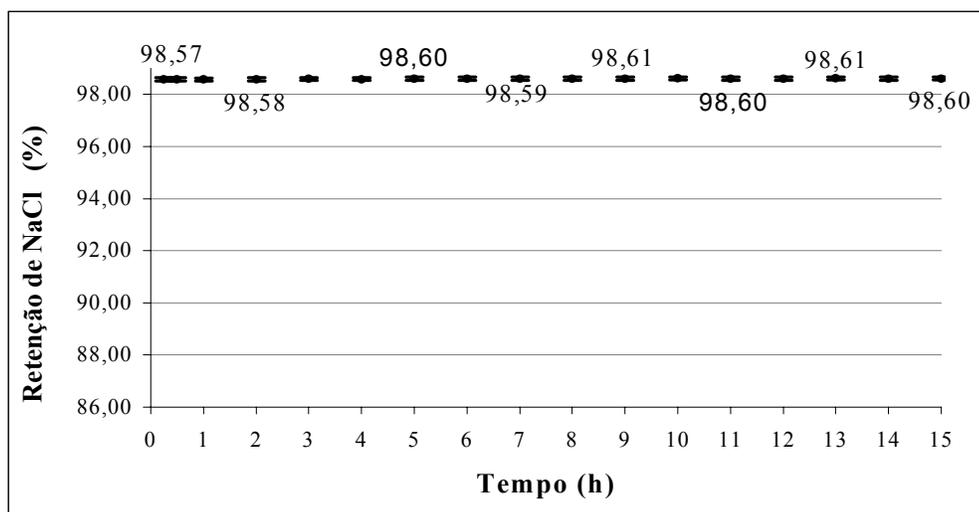


Figura V.16 – Retenção de NaCl utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D1.

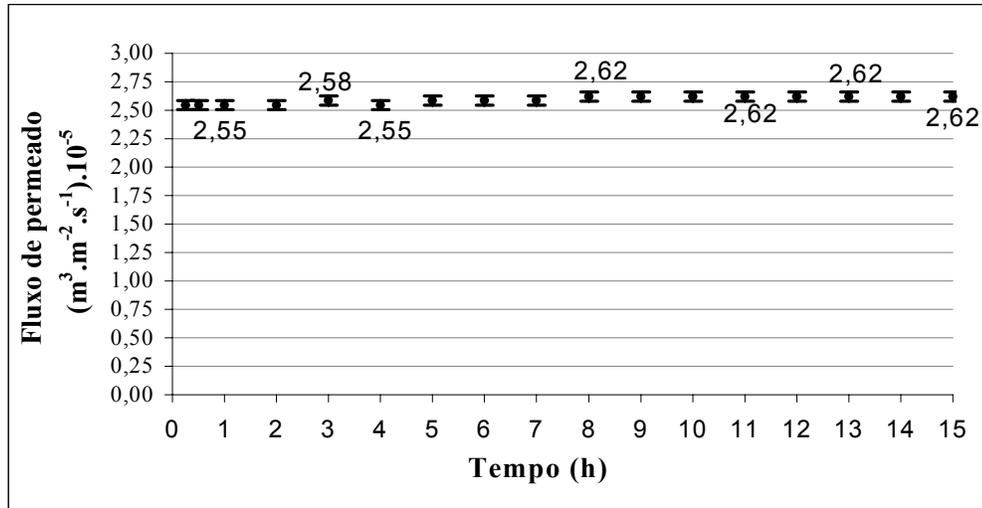


Figura V.17 – Fluxo de permeado utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D1.

Observando as Figuras V.16 e V.17 verifica-se que os valores de retenção de NaCl e fluxo de permeado não variaram ao longo das 15 horas de operação. A retenção de NaCl permaneceu em torno de $(98,57 \pm 0,06)\%$ enquanto que o fluxo de permeado permaneceu em torno de $(2,58 \pm 0,04) \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$.

A membrana rejuvenescida do experimento 3.D1 manteve a sua performance durante as 15 horas de operação.

O rejuvenescimento da membrana do experimento 3.D2 foi avaliado utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ com as seguintes características: pH 5,94, condutividade elétrica de $112 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ e 13,5 ppm de sílica.

As médias dos resultados do experimento 3.D2 até a etapa de degradação com solução alcalina + 0,5% de LSS estão representadas na Tabela V.8.

Tabela V.8 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa do experimento 3.D2.

Experimento	Etapa Avaliada	Retenção de sais (%)	Retenção de Si (%)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)
Experimento 3.D2	Inicial	$97,48 \pm 0,11$	$97,75 \pm 0,05$	$0,76 \pm 0,01$
	Após Oxidação	$92,46 \pm 0,34$	$86,36 \pm 0,33$	$3,43 \pm 0,05$
	Após 3,5h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	$86,21 \pm 0,62$	$75,35 \pm 0,59$	$6,23 \pm 0,09$

As Figuras V.18 e V.19 contêm os gráficos da avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D2, em termos de retenção de sais e sílica e fluxo de permeado, respectivamente.

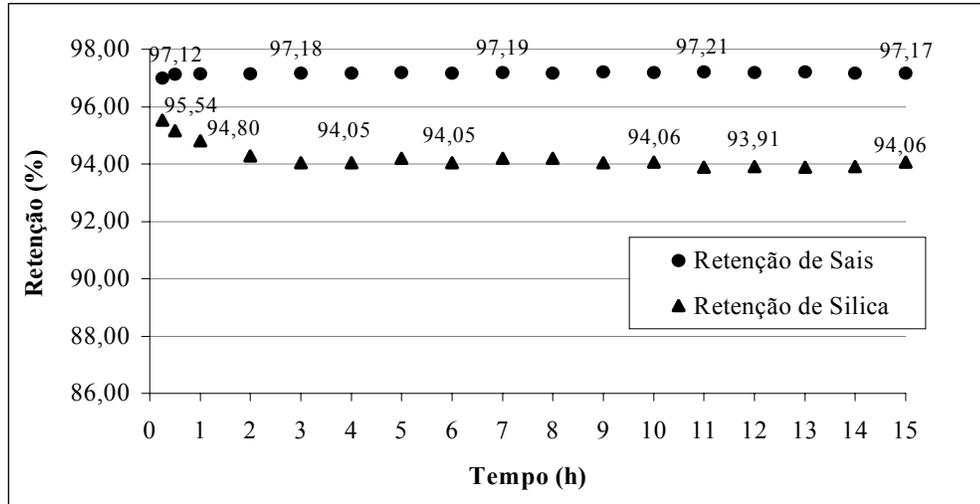


Figura V.18 – Retenção de sais e sílica utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D2.

Os resultados das Figuras V.18 e V.19 mostram que os valores das medidas de retenção de sais e fluxo de permeado não variaram significativamente ao longo das 15 horas de operação. A retenção de sais permaneceu em torno de $(97,1 \pm 0,13)\%$. O fluxo de permeado aumentou de $(1,76 \pm 0,03)$ para $(2,00 \pm 0,03) \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$ durante a primeira hora de avaliação experimental e permaneceu constante nas 14 horas subseqüentes de avaliação.

Observando os resultados de retenção de sílica da Figura V.18, verifica-se que os valores sofreram uma redução durante as 3 primeiras horas de operação diminuindo de $(95,54 \pm 0,13)$ para $(94,05 \pm 0,14)\%$ e permaneceram constantes durante as 12 horas posteriores de avaliação.

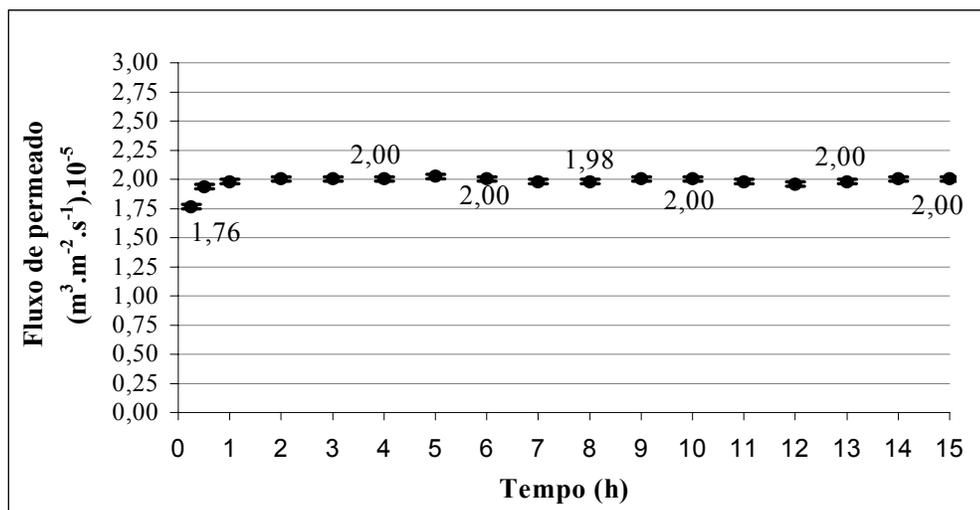


Figura V.19 – Fluxo de permeado utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D2.

Comparando a Figura V.16 com a Figura V.18 verifica-se que a retenção da membrana, em termos de NaCl e sais, foi menor quando utilizada água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, indicando que a presença de outras substâncias, tal como sílica, exercem influência sobre a retenção de sais. A retenção de sílica no experimento 3.D2 obteve valores inferiores aos valores de retenção de sais, representados como retenção de NaCl. Diferentes valores de retenção pela membrana são explicados, segundo BYRNE (1995), pelas diferentes interações entre variadas estruturas moleculares com a água e com a estrutura da membrana. Em termos de retenção de sílica pela membrana, COMB (1996) e SHEIKHOESLAMI et al. (2001) explicaram que semelhanças de polaridade e composição entre as moléculas de água e sílica solúvel (ácido silícico) promovem uma grande similaridade e interação entre estas substâncias.

Os experimentos 3.D3 e 3.D4 utilizaram a membrana módulo em espiral BW30, oxidada e degradada nas mesmas condições de operação dos experimentos 3.D1 e 3.D2.

A membrana módulo em espiral necessitou de 15 horas de oxidação para ter sua retenção de NaCl reduzida a 96,99%. A degradação com recirculação de solução alcalina + 0,5% de LSS necessitou de 2 horas de operação para reduzir a retenção de NaCl pela membrana de 96,99% para 85,62%. Estes diferentes tempos requeridos para oxidação e degradação entre as membranas ACM1 e BW30 podem ser explicados pelas diferentes características intrínsecas das membranas, apesar das duas serem de PA, e principalmente pelas diferenças hidrodinâmicas entre os módulos utilizados.

O rejuvenescimento da membrana do experimento 3.D3 foi avaliado com solução contendo 2000 ppm de NaCl, em 15 horas de operação, com vazão de alimentação mantida em $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a uma temperatura de $25,0^\circ\text{C}$ e pressão de 11,77 bar ($12 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$).

As médias dos resultados do experimento 3.D3, até a etapa de degradação com solução alcalina + 0,5% de LSS estão representadas na Tabela V.9.

Tabela V.9 – Média aritmética das cinco medidas realizadas em cada etapa do experimento 3.D3.

Experimento	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 10^{-5}
Experimento 3.D3	Inicial	$99,17 \pm 0,04$	$0,40 \pm 0,01$
	Após Oxidação	$96,99 \pm 0,13$	$1,21 \pm 0,02$
	Após 2h de Limpeza alcalina + 0,5 % LSS	$85,61 \pm 0,64$	$1,82 \pm 0,03$

As Figuras V.20 e V.21 contêm os gráficos da avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D3, em termos de retenção de NaCl e fluxo de permeado, respectivamente.

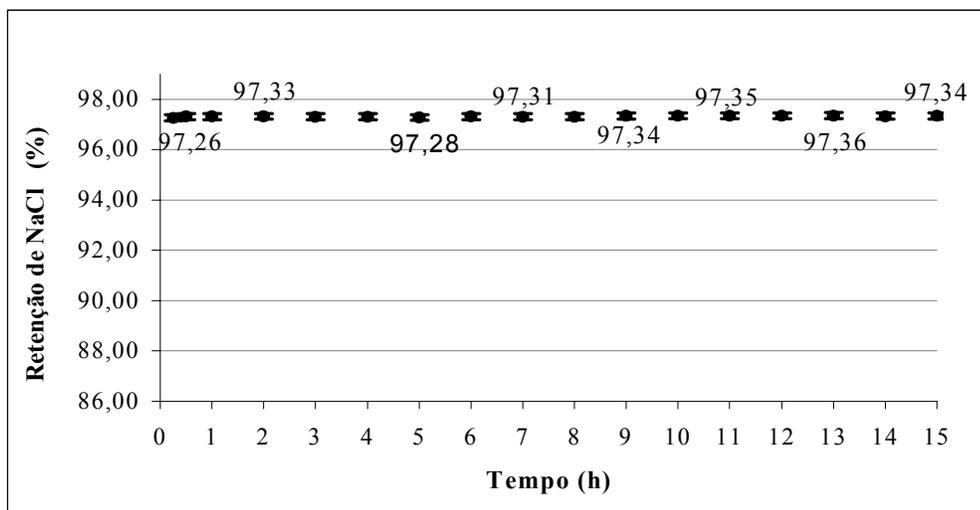


Figura V.20 – Retenção de NaCl utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D3.

Analisando a Figura V.20 observa-se que a retenção de NaCl pela membrana BW30, após o rejuvenescimento, manteve-se constante durante as 15 horas de operação, permanecendo em torno de $(97,30 \pm 0,12)$ %. O fluxo de permeado durante as 15 horas de operação manteve-se estável em $(1,04 \pm 0,02) \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$.

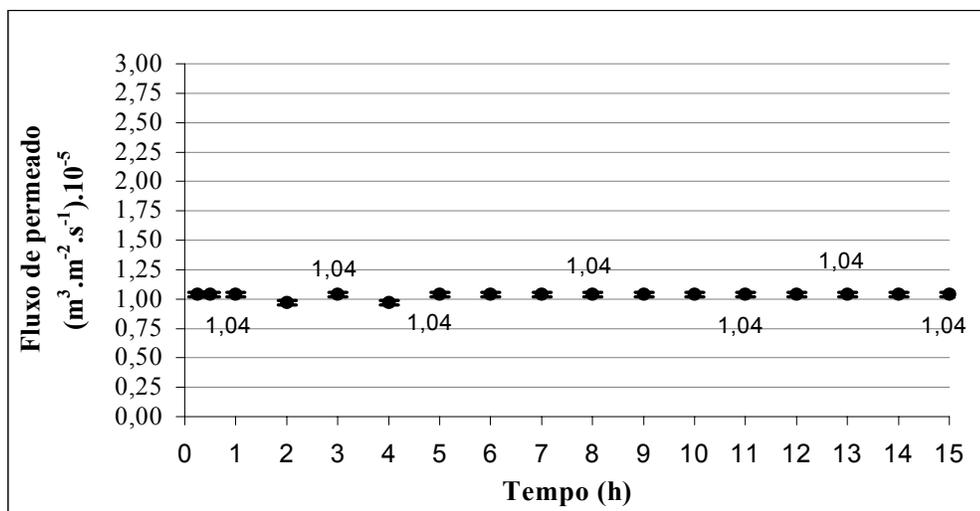


Figura V.21 – Fluxo de permeado utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D3.

A performance de retenção de NaCl obtida após o rejuvenescimento, pela membrana em espiral BW30, foi menor do que os valores obtidos após o rejuvenescimento das membranas ACM1, degradadas a 90,5% de retenção de NaCl. Contudo, é interessante notar que a membrana BW30, no experimento 3.D3 da Tabela V.9, foi degradada a 85,61% de retenção de NaCl, para que então fosse rejuvenescida.

Após o experimento 3.D3 foi realizada uma limpeza química na membrana módulo em espiral BW30, conforme o procedimento descrito no Capítulo III, onde o LSS foi suprimido da solução alcalina para que a membrana não fosse novamente degradada.

As médias dos resultados da limpeza química da membrana BW30 estão representadas na Tabela V.10.

Tabela V.10 – Média aritmética das cinco medidas realizadas na etapa da limpeza química da membrana BW30 para o rejuvenescimento do experimento 3.D4.

Experimento	Etapa Avaliada	Retenção de sais (%)	Retenção de Si (%)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 10^{-5}
Experimento 3.D4	Após Limpeza Química	88,14 ± 0,42	71,34 ± 0,69	1,62 ± 0,02

A membrana BW30 foi novamente rejuvenescida para avaliação do experimento 3.D4. Nesta avaliação o sistema de OR em bancada com módulo para membrana em espiral, que utiliza um sistema fornecido pela FLUID SYSTEMS, foi deslocado para ETA da empresa AZ a fim de ser alimentado continuamente pela água de alimentação do sistema de OR. As condições de operação durante este experimento acompanharam as oscilações que a água de alimentação daquele sistema sofreu em termos de qualidade, pressão, vazão e temperatura.

As Figuras V.22 e V.23 contêm os gráficos da avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D4, em termos de retenção de sais e sílica e fluxo de permeado, respectivamente. A avaliação foi realizada em 30 dias de operação, e as variações de temperatura, pressão, condutividade elétrica e concentração de sílica da corrente de alimentação estão mostradas na Tabela B.106 do anexo B. A vazão da corrente de alimentação foi ajustada e mantida em aproximadamente $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

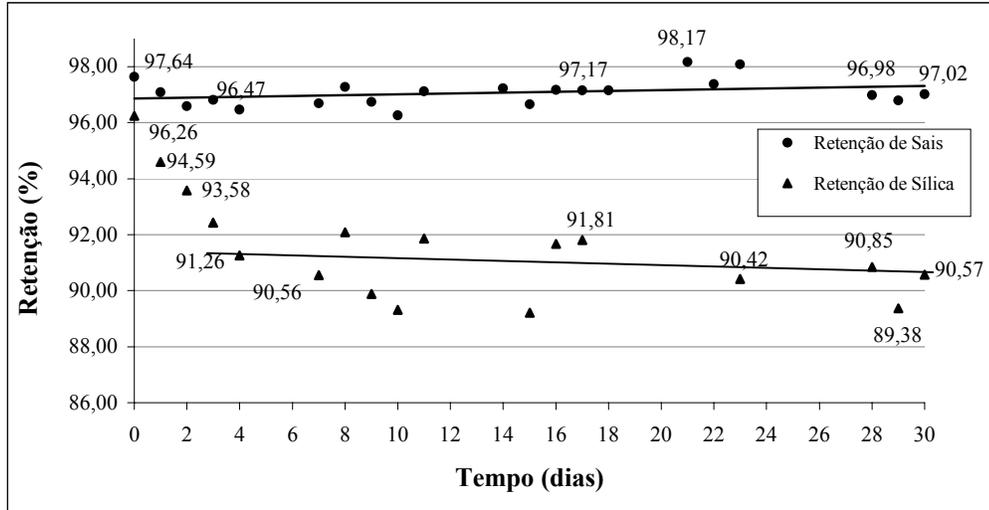


Figura V.22 – Retenção de sais e sílica utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D4.

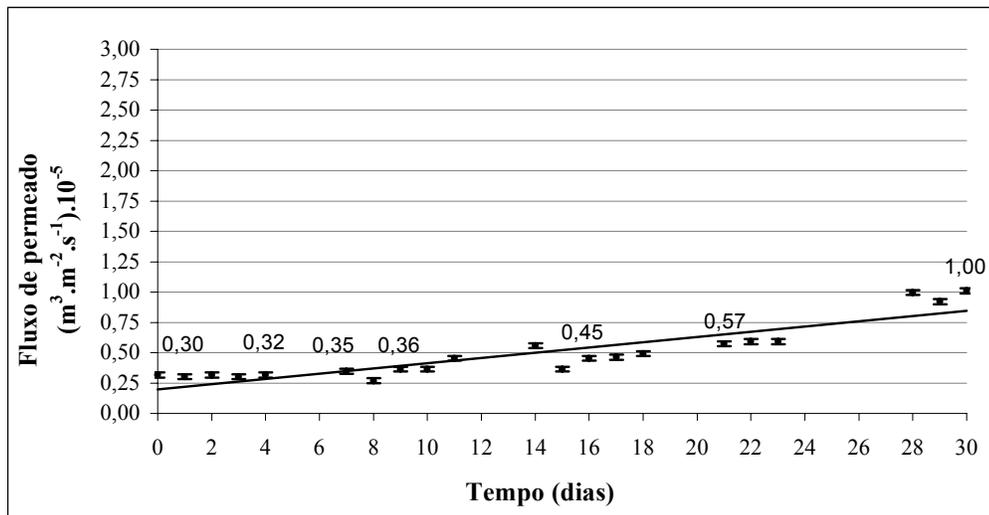


Figura V.23 – Fluxo de permeado utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, avaliação do rejuvenescimento do experimento 3.D4.

Analisando o gráfico da Figura V.22 pode-se observar que a performance da membrana BW30 rejuvenescida iniciou no primeiro dia de operação com $(97,64 \pm 0,08)$ % de retenção de sais e $(96,26 \pm 0,05)$ % de retenção de sílica. Ao longo dos 30 dias de operação contínua, a retenção de sais pela membrana permaneceu em torno do valor inicial. Por outro lado, os valores de retenção de sílica reduziram com o tempo de operação, atingindo $(90,57 \pm 0,13)$ % no trigésimo dia.

O fluxo de permeado do experimento 3.D4, representado no gráfico da Figura V.23, iniciou com $(0,30 \pm 0,01) \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$ e aumentou ao longo do tempo de operação, atingindo $(1,00 \pm 0,02) \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$ no trigésimo dia de avaliação.

Aqui, cabe lembrar que as condições de operação durante este experimento acompanharam as oscilações que a água de alimentação daquele sistema sofreu, fazendo com que a eficiência de retenção pela membrana também oscilasse. Entretanto, a tendência dos resultados obtidos pode ser visualizada nos gráficos das Figuras V.22 e V.23.

A avaliação do experimento 3.D4 realizada em 30 dias de operação mostrou que a retenção inicial de sais foi pouco alterada, e a retenção de sílica decresceu. Alto fluxo de permeado é um fator desejado em performance de membranas, mas o aumento de fluxo de permeado verificado neste experimento sugere que o efeito da ação do ácido tânico sobre a superfície da membrana foi parcialmente removido, ao longo dos 30 dias em que a membrana permaneceu em operação. O decréscimo observado na retenção de sílica pela membrana foi, possivelmente, causado pelo desprendimento do ácido tânico da superfície da membrana. Apesar dos valores de retenção de sílica pela membrana terem decrescido com o tempo de operação, comparando com os dados da Tabela V.10 é interessante notar que a retenção de sílica da membrana degradada era de $(71,34 \pm 0,69) \%$, e a retenção de sais era de $(88,14 \pm 0,42) \%$ antes do rejuvenescimento, valores inferiores aos resultados de performance do trigésimo dia de avaliação do rejuvenescimento da membrana do experimento 3.D4.

V.2 Avaliação do Sistema de OR da Empresa AZ

O sistema de OR da empresa AZ, descrito no Capítulo III, foi avaliado e os resultados e discussões estão apresentados a seguir.

V.2.1 Estudo Sobre uma Possível Oxidação por Cloro Livre Sofrida pelas Membranas do Sistema de OR da Empresa AZ

Conforme descrito no Capítulo III, foram verificadas reduções de performance de retenção de sais pelas membranas do sistema de OR da empresa AZ. Segundo PARISE (1996), esta consequência é característica de oxidação por cloro livre. Avaliações experimentais foram realizadas a fim de pesquisar evidências sobre uma possível oxidação por cloro livre sofrida pelas membranas.

Segundo FEIGL (1966) e KOLTHOFF (1971), a reação de Fujiwara é um método simples para determinar se a membrana foi exposta ao cloro livre ou a agentes oxidantes halogênicos.

Testes de Fujiwara foram realizados com membrana retirada do sistema de OR da empresa AZ após três anos em operação. De acordo com o procedimento descrito por FEIGL (1966) e KOLTHOFF (1971), contido no Anexo C, foram realizados cinco testes de Fujiwara, e os resultados estão mostrados na Tabela V.11, onde resultado positivo significa que a amostra foi exposta ao cloro livre ou a algum oxidante halogênico.

Tabela V.11 – Resultados dos testes de Fujiwara realizados com membrana do sistema de OR da empresa AZ após três anos em operação.

AMOSTRA	RESULTADO
1	Negativo
2	Negativo
3	Negativo
4	Positivo
5	Negativo

Observando a Tabela V.11, os resultados da análise em quatro amostras não indicaram a presença de oxidação, e o resultado da análise em uma amostra indicou a presença de oxidação por cloro livre ou por algum oxidante halogênico.

O módulo em espiral retirado do sistema de OR da empresa AZ possuía 33,9 m² de superfície de membrana. De acordo com o procedimento realizado nos testes de Fujiwara, somente 1 cm² de membrana é analisado em cada amostra.

Os pedaços de membrana utilizados nos testes de Fujiwara foram removidos do mesmo módulo do qual foram utilizados os pedaços de membrana utilizados nos experimentos 2.3 e 2.4, mostrados no item V.1.2. Cabe lembrar que os conjuntos de módulos do sistema de OR da empresa AZ, após as crises descritas no Capítulo III, estavam apresentando baixos valores de retenção de sais e sílica. Contudo, alguns pedaços de membrana do módulo removido tiveram desempenho superior, conforme mostrado nos experimentos 2.3 e 2.4. Estes fatos indicam que a degradação da membrana não foi um fenômeno que ocorreu de maneira homogênea, e sim manifestado por desgastes pontuais. Os resultados dos testes de Fujiwara também confirmam esta hipótese.

Segundo BYRNE (1995), oxidações pontuais, localizadas ao redor de um ponto, causadas por cloro livre, são suspeitas acontecerem em torno de partículas de metais de transição incrustadas na superfície da membrana. Conforme citado e referenciado no Capítulo II, metais de

transição como o ferro, o manganês, o cobre e o zinco possuem a habilidade de mudar seus estados de valência catalisando e aumentando o potencial de oxidação de agentes oxidantes como o cloro livre, sobre a superfície de membranas de PA.

De acordo com os resultados obtidos nos experimentos 1.1 a 1.7, mostrados no item IV.2.1.1, o alumínio mostrou, similarmente ao ferro, um poder de catálise sobre as oxidações por cloro livre em membranas de PA, nas condições dos experimentos realizados.

Os resultados de análises da água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, mostradas na Tabela III.1 do Capítulo III, indicam valores de concentração de alumínio que na média de vários dias de análises representam baixos valores, tais como 0,029 e 0,017 ppm. Por outro lado, análises realizadas em dias aleatórios podem revelar altas concentrações, tais como 0,2, 0,18 e 0,21 ppm. As análises de concentração de ferro total, mostrados na mesma tabela, representam sempre baixos valores, tais como 0,02, 0,036, 0,02, 0,01 e 0,01 ppm.. Estes dados indicam que a água de alimentação desta empresa pode apresentar eventuais picos de altas concentrações de alumínio, o que pode ser explicado por resíduos de sulfato de alumínio, eventualmente adicionado em excesso na etapa de clarificação da água bruta. É interessante notar que, de acordo com a Tabela III.1, a água bruta captada diretamente do rio apresentou valores bastante próximos para as concentrações de alumínio e ferro, descartando a possibilidade da água bruta já estar chegando na ETA com concentrações muito altas de alumínio.

V.2.2 Estudo Sobre a Compatibilidade entre Dispersantes/anti-incrustantes Poliméricos Utilizados nos Sistemas de Separação por Membranas com a Água de Alimentação desses Sistemas

De acordo com o Capítulo III, durante o período de quatro meses no qual foi utilizado dispersante/anti-incrustante polimérico na água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ consequências danosas foram verificadas na performance das membranas.

De acordo com AMJAD et al. (1999), o uso de dispersante/anti-incrustante polimérico em águas de alimentação de OR não inibe a complexação de sílica e a formação de sílica amorfa não é controlada sobre a superfície da membrana. Sílica coloidal formada durante a complexação de sílica pode incrustar a superfície da membrana e entupir os canais de alimentação dos módulos. Além disso, íons de metais polivalentes, tais como ferro, alumínio, cálcio, magnésio, entre outros, presentes na corrente de água de alimentação podem adsorver ou complexar sílica e catalisar a precipitação (ASTM Standard D-4993-89).

De acordo com WENG *apud* AMJAD et al. (1999), o uso de dispersante/anti-incrustante polimérico foi recentemente investigado, e os resultados de um estudo piloto de OR mostrou que a deposição de sílica e magnésio podem ser prevenidas por meio do uso de dispersante/anti-incrustante polimérico. Além disso, baseado em 3 estudos pilotos, as seguintes normas foram propostas por este pesquisador a fim de se utilizar um dispersante polimérico para o controle de sílica:

1. Manter a concentração de sílica abaixo de 240 ppm, como sílica solúvel (SiO_2).
2. Para pH menor do que 7,5 manter o produto das concentrações entre Mg e Si menor do que 220000; e para pH maior do que 7,5 manter o produto das concentrações entre Mg e Si menor do que 110000, (onde a concentração de magnésio é expressa como ppm de CaCO_3 e a concentração de sílica é expressa como ppm de SiO_2).
3. As concentrações de ferro e alumínio não devem exceder 0,05 ppm na água de alimentação.

Os resultados de análises da água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, mostradas na Tabela III.1 do Capítulo III indicaram, em 3 amostras coletadas, concentrações de alumínio bastante superiores a 0,05 ppm. Os resultados das análises para a corrente do concentrado da OR mostraram valores de aproximadamente 0,9 ppm de alumínio.

VI . CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para futuras pesquisas.

VI.1 Conclusões

Antes de listar as conclusões principais deste trabalho, alguns aspectos pertinentes aos procedimentos experimentais estão ressaltados a seguir, com o intuito de delimitar a validade das conclusões no âmbito deste trabalho.

Nos experimentos realizados envolvendo oxidação por cloro livre catalisada por ferro e alumínio foram utilizadas soluções sintéticas e os resultados obtidos não devem ser estendidos para soluções reais utilizadas em plantas industriais de OR, mas podem ser diretamente comparados entre si, já que foram realizados nas mesmas condições experimentais.

As soluções utilizadas nos experimentos envolvendo limpeza química foram preparadas nas mesmas condições daquelas que seriam preparadas industrialmente.

Nos experimentos envolvendo tratamentos de rejuvenescimento a performance das membranas foi avaliada utilizando-se soluções sintéticas contendo 2000 ppm de NaCl e água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ. Soluções reais de correntes de alimentação, sem nenhuma dúvida, reproduzem as reais condições particulares de cada sistema de OR, por outro lado, soluções sintéticas podem ser padronizadas e os resultados obtidos em diferentes experimentos podem ser comparados diretamente.

Com base nos resultados obtidos nos experimentos realizados, utilizando membranas de PA de OR ACM1 e BW30, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- As oxidações por cloro livre nas membranas foram catalisadas em presença de ferro e alumínio, isto é, tiveram suas taxas de reação aumentadas, elevando o fluxo de permeado e reduzindo a retenção da camada seletiva. Apesar do alumínio não ser um metal de transição os resultados obtidos nas oxidações em presença deste metal mostraram taxas levemente superiores às taxas de oxidações por cloro livre em presença de ferro.

- As taxas de oxidações por cloro livre aumentaram à medida que aumentaram as concentrações de ferro e alumínio presentes. As membranas foram mais rapidamente oxidadas nos experimentos com as maiores concentrações de metais.
- Solução ácida contendo 1,7% de ácido cítrico e solução alcalina contendo 0,5% de LSS e hidróxido de sódio não reduziram a performance de membranas novas, após a realização de limpezas químicas utilizando estas soluções.
- Solução alcalina contendo 0,5% de LSS e hidróxido de sódio degradou a superfície de membranas previamente oxidadas por cloro livre, reduzindo a performance de retenção de NaCl e aumentando o fluxo de permeado destas membranas, após a realização de limpeza química utilizando esta solução. Solução ácida contendo 1,7% de ácido cítrico e solução alcalina contendo hidróxido de sódio sem adição de LSS não degradaram a superfície de membranas, mesmo que previamente oxidadas por cloro livre.
- Os ácidos orgânicos tânico, maléico e gálico foram utilizados em tratamentos de rejuvenescimento e recuperaram a retenção de NaCl pelas membranas a valores superiores a 98%, sobre membranas preliminarmente degradadas e com retenção de NaCl reduzida a aproximadamente 90,4%.
- Diferentes valores de pressão e pH da corrente de alimentação não aumentaram a eficiência dos tratamentos de rejuvenescimento quando soluções contendo 80 ppm de ácido tânico foram utilizadas.
- Maiores valores de concentração de ácido tânico, 160, 240 e 400 ppm, melhoraram a eficiência do tratamento de rejuvenescimento recuperando a retenção de NaCl pelas membranas a valores superiores a 98,5%, sobre membranas preliminarmente degradadas e com retenção de NaCl reduzida a aproximadamente 90,4%. Entretanto, a eficiência dos tratamentos de rejuvenescimento utilizando 240 e 400 ppm de ácido tânico obtiveram praticamente os mesmos valores de retenção de NaCl, o que sugere um limite de 240 ppm de concentração, acima do qual a eficiência não foi aumentada.
- Membranas menos degradadas, com valores de retenção de NaCl menos reduzidos, obtiveram suas performances de retenção de NaCl recuperadas a valores mais altos após tratamento de rejuvenescimento utilizando soluções contendo 240 ppm de ácido tânico.

- A Membrana rejuvenescida no módulo para membranas planas, utilizando ácido tânico, manteve constante os valores de retenção de NaCl, durante 15 horas de avaliação utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.
- Membrana rejuvenescida no módulo para membranas planas, utilizando ácido tânico, manteve constante os valores de retenção de sais, durante 15 horas de avaliação utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, e os valores de retenção de sílica reduziram em 1,6% durante as 3 primeiras horas de avaliação, permanecendo constante nas 12 horas subseqüentes de operação.
- Membrana módulo em espiral BW30, rejuvenescida utilizando ácido tânico, manteve constante os valores de retenção de NaCl, durante 15 horas de avaliação utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.
- Membrana módulo em espiral BW30, rejuvenescida utilizando ácido tânico, teve os valores de retenção de sais reduzidos em aproximadamente 0,6%, durante 30 dias de avaliação contínua utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, e os valores de retenção de sílica foram reduzidos em aproximadamente 5,7% durante o mesmo tempo de avaliação.
- Este trabalho possibilitou estudar algumas condições de operação em que membranas de PA de OR foram agredidas e degradadas, diminuindo suas performances de retenção de sais, e principalmente estudar a recuperação destas membranas degradadas por meio de tratamento químico de rejuvenescimento utilizando ácido tânico. As avaliações da ação de rejuvenescimento do ácido tânico sobre as superfícies das membranas obtiveram resultados significativos no aumento da retenção de sais e de sílica solúvel, e esta ação foi levemente diminuída ao longo do tempo de operação.

VI.2 Sugestões

A partir dos resultados e conclusões obtidas neste trabalho, algumas sugestões para futuros estudos estão apresentadas a seguir:

- Avaliação de oxidações por cloro livre utilizando soluções reais de alimentação de plantas industriais.

- Distinguir e caracterizar a ação de catálise dos íons ferroso e férrico em processos de oxidações por cloro livre.
- Estudar a ação de cloraminas como agentes oxidantes de membranas de OR, e principalmente a catálise destas oxidações utilizando ferro, alumínio e outros metais comuns em águas de alimentação de sistemas de OR industriais.
- Estudar a influência de condições operacionais, tais como: temperatura e tempo de tratamento, em relação à eficiência obtida com a aplicação dos tratamentos de rejuvenescimento.
- Avaliação da ação do tratamento de rejuvenescimento utilizando outros produtos químicos, detendo-se sobretudo, na otimização da ação de rejuvenescimento em tempos prolongados de operação.
- Avaliação da influência da pressão da corrente de alimentação da solução utilizada no tratamento de rejuvenescimento a respeito da duração da ação de rejuvenescimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMJAD, Z.; WORKMAN, K. R. and CASTETE, D. R., In: Amjad Z., *Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial applications*, Chapman & Hall, Chapter 7, Considerations in Membrane Cleaning, 1992.
2. BRADLEY, R., In: Amjad Z., *Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial applications*, Chapman & Hall, Chapter 4, Design Considerations for Reverse Osmosis Systems, 1992.
3. BRANDT, D. C., *Seawater Reverse Osmosis – An Economic Alternative to Distillation*, Desalination, p. 177 – 185, 1985.
4. BRANDT, D. C.; LEITNER, G. F. And LEITNER, W. E., In: Amjad Z., *Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial applications*, Chapman & Hall, Chapter 1, Reverse Osmosis Membranes State of the Art, p. 1-35, 1992.
5. BUECKER, B., *Fundamental of Steam Generation Chemistry*, Penn Well Corporation, Chapter 3, Makeup Water Treatment, 2000.
6. BUKAY, M., *Membranes – The Basics of Monitoring Reverse Osmosis Systems – Part I*, Ultrapure Water – October, p.58-66, 1992.
7. BUKAY, M., *Reverse Osmosis Fundamentals*, Michael Bukay and Associates, p. 25-26, 1996.
8. BURNS and ROE Inc., *Development of Improved Cleaning and Surface Regeneration Methods and Economics Analysis of these Methods for Seawater Membrane*, OWRT Contract N° 14-34-0001-9524, Office of Water Research and Technology, Washington DC, 1981.
9. BYRNE, W., *Reverse Osmosis – A practical guide for Industrial Users*, Tall Oaks Publishing Inc., 1995.
10. CADOTTE, J. E.; KING, R. S.; MAJERLE, R.; HULTMAN, C. and PETERSEN, R. J., *Posttreatment Process for Reverse Osmosis Membranes*, Report N° W82-02454, Office of Water Research and Technology, Washington DC, 1981.
11. CHERYAN, M., *Ultrafiltration Handbook*, Technomic Publishing Inc., p. 1-2, 1986.
12. CHUNG, K. T.; WONG, T.Y.; WEI, C. Y.; HUANG, Y. Y. and LIN, Y.Y., *Tannins and Human Health*, available online 13 November, 1999.
13. CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E. and EATON, A. D., *Standard Methods*, 20th Edition, Chapter 3, p.3-37 – 3-43, 1998.

14. COMB, L. F., *Silica – Silica Chemistry and Reverse Osmosis*, Ultrapure Water – January/February, p.41-43, 1996.
15. DALTON, G. L.; PIENAAR, H. S. and SANDERSON, R. D., *Supplemental Polymer Coatings in Reverse Osmosis Membrane Improvement and Regeneration*, Desalination, 24 (235), 1977.
16. EBRAHIM, S., *Cleaning and Regeneration of Membranes in desalination and Wastewater Applications: State of the Art*, Desalination, 96 (225-238), 1994.
17. FEIGL, F., *Spot Tests in Organic Analysis*, 7th Edition, Elsevier London, p. 171, 1966.
18. FLEMMING, H., In: Amjad Z., *Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications*, Chapman & Hall, Chapter 6, Mechanistic Aspects of Reverse Osmosis Membrane Biofouling and Prevention, p.163-209, 1992.
19. FRAGNITO, H. L.; CRUZ, C. H. B.; COSTA, I. F. e MELLO, B. A., *Guia para Física Experimental – Caderno de Laboratório, Gráficos e erros*, Capítulo 4 Erros: Versão avançada, Instituto de Física – Unicamp, disponível online www.ifi.unicamp.br/brito/graferr.pdf, 1997.
20. FUTSELAAR, H., *The Transverse Flow Membrane Module: Construction, Performance and Applications*, Cip-Gegevens Koninklijke, Chapter 5, Enschede, The Netherlands, 1993.
21. GAUWBERGEN, D. and BAEYENS, J., *Modelling and Scale-up of Reverse Osmosis Separation*, Desalination, 139 (275), 2001.
22. HENLEY, M., *Membranes – Greater Chlorine Tolerance Can Mean Different Performance Characteristics*, Ultrapure Water – March, p.16-20, 1996.
23. HENRY, J. D.; PRUDICH, M. E.; EYKAMP, W.; HATTON, T. A.; JONHSTON, K. P.; LEMERT, R. M.; LEMLICH, R.; MOYERS, C. G.; NEWMAN, J.; POHL, H. A.; POLLOCH, K. and THIEN, M. P., In: PERRY, R. H. and GREEN, D. W., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7th Edition, Section 22, Alternative Separation Process, p. 22-49, New York: McGraw–Hill, 1997.
24. HOOLEY, J. P.; PITTNER, G. A. and AMJAD, Z., In: Amjad Z., *Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications*, Chapman & Hall, Chapter 5, The Importance of Water Analysis for Reverse Osmosis Design and Operation, 1992.
25. ISAIAS, N. P., *Experience in Reverse Osmosis Pretreatment*, Desalination, 139 (57-64), 2001.
26. ISNER, J. D. and WILLIAMS, R. C., In: Amjad Z., *Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications*, Chapman & Hall, Chapter 8, Analytical Techniques for Identifying Reverse Osmosis Foulants, 1992.

27. KIM, Y. H., *Coagulants and Flocculants – Theory and Practice*, Tall Oaks Publishing Inc. Chapter 2, Coagulation and Flocculation, p. 3-15, 1995.
28. KOLTHOFF, I. M., *Treatise on Analytical Chemistry*, Volume 2, Wiley Interscience, p. 125, 1971.
29. LAWLESS, H. T.; CORRIGAN, C. J. and LEE, C. B., *Interactions of Astringent Substances*, Chemical Senses, Volume 19, Issue 2, p. 141-154, 1994.
30. LISDONK, C. A. C.; RIETMAN, B. M.; HEIJMAN, S. G. J.; STERK, G. R. and SCHIPPERS, J. C., *Prediction of Supersaturation and Monitoring of Scaling in Reverse Osmosis and Nanofiltration Membrane Systems*, Desalination, 138 (259-270), 2001.
31. MACÊDO, A. B., *Águas & Águas*, Ortofarma – Laboratório de Controle da Qualidade, Juiz de Fora – MG, p. 20, 2000.
32. MATSUURA T., In: Amjad Z., *Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications*, Chapman & Hall, Chapter 2, Future Trends in Reverse Osmosis Membrane Research and Technology, 1992.
33. MERCK INDEX, 9th Edition, *An Encyclopedia of Chemicals and Drugs*, Merck and Co. Inc., p.1172-1173, 1976.
34. MOHAMMADI, T., *Chemical Cleaning of a Polyamide Membrane*, Desalination, 139 (381), 2001.
35. MULDER, M., *Basic Principles of Membrane Technology*, Kluwer Academic Publishers Group, 1996.
36. PARISE, P. L., *Back to Basics – RO System Troubleshooting: Diagnoses and Remedies – Part 2*, Ultrapure Water – December, p. 54-60, 1996.
37. PAUL, D. H., *Fouling, Scaling and Chemical Cleaning of Reverse Osmosis Systems*, David H. Paul Inc., p. 30, 1995.
38. PITTNER, G. A., In: Amjad Z., *Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications*, Chapman & Hall, Chapter 11, High Purity water Production Using Reverse Osmosis technology, p. 334-363, 1992.
39. RAUTENBACH, R. and ALBRECHT R., *Membrane Processes*, John Wiley & Sons, Chapter 1, 1989.
40. SANTOS FILHO, D. F., *Tecnologia de Tratamento de Água*, Livraria Nobel, Capítulo 1, Grandezas e Unidades Usadas em Controle de Qualidade de Águas, 1981.
41. SCHAEFER, J., *Reliable Water Supply by Reusing Wastewater after Membrane Treatment*, Desalination, 138 (91), 2001.

42. SHEIKHOLESLAMI, R.; AL-MUTAZ, I. S.; KOO, T. and YOUNG, A., *Pretreatment and the Effect of Cations and Anions on Prevention of Silica Fouling*, *Desalination*, 139 (83-95), 2001.
43. SOWALSKY, R. A. and NOBLE, A. C., *Comparison of the Effects of Concentration, pH and Anion Species on Astringency and Sourness of Organic Acids*, *Chemical Senses*, Volume 23, Issue 3, p. 343-349, available online, 1998.
44. SUBCASKY, W. J. and SEGOVIA, G., *Determination of the Surface and Colloidal Conditions which Can Lead to High Salt Rejection Reverse Osmosis Polymer Membranes*, Prepared for OSW, Water Research and Development Progress Report N° 466, 1971.
45. TCHOBANOGLIOUS, G. and SCHROEDER, E. D., *Water Quality Management*, Addison Wesley publishing Company Inc., p.560-571, 1985.
46. VROUWENVELDER, J. S. and KOOIJ, D., *Diagnosis, Prediction and Prevention of Biofouling of NF and RO Membranes*, *Desalination*, 139 (65-71), 2001.
47. WILF, M. and GLUECKSTERN, P., *Restoration of Commercial Reverse Osmosis Membranes under Field Conditions*, *Desalination*, 54 (343-350), 1985.

ANEXO A

OPERAÇÃO DO SISTEMA DE OSMOSE REVERSA EM BANCADA

O sistema de OR, Figura IV.1, foi operado seguindo-se a seqüência de operações descritas a seguir:

1. A membrana plana é cortada em forma de retângulo com dimensões de aproximadamente 5,1 cm por 11,0 cm. A membrana cortada é colocada no módulo de OR (4) e este é então fechado. Em experimentos onde se utilizou membrana módulo em espiral esta foi carregada no interior do vaso de pressão do sistema de OR fornecido pela FLUID SYSTEMS.
2. Com o sistema previamente limpo a solução de alimentação é adicionada no tanque de alimentação (1) com a válvula V1 fechada. Se for necessário preparar a solução dentro do tanque de alimentação, é adicionado primeiramente água destilada, tomando como referência a graduação externa orientativa de volume do tanque de alimentação, e com as válvulas V1 e V2 fechadas procede-se a adição dos solutos e a homogeneização da solução, ajustando-se os parâmetros de concentrações e pH nos valores desejados. O volume morto do restante do sistema deve ser considerado para a preparação das soluções, este volume foi estimado em 2 litros, e posteriormente quando for misturado com a solução do tanque de alimentação novos ajustes de concentrações e pH deverão ser realizados.
3. A temperatura do banho termostático (5) é ajustada no valor desejado para o experimento e é então ligado.
4. Com as válvulas V1, V6 e V7 fechadas, e as válvulas V2, V3, V4, V5 abertas a bomba (2) é acionada. Essa operação faz com que todo o fluido bombeado alimente a recirculação, retornando ao tanque de alimentação, sem contato com a membrana contida no módulo (4), a fim de que o tempo requerido para a estabilização da temperatura seja alcançado.
5. Posteriormente a válvula V7 é aberta, fazendo com que o módulo contendo a membrana seja alimentado com a solução. Nesta etapa de homogeneização de todo o sistema são realizados os últimos ajustes físico-químicos da solução, tais como pH,

temperatura e concentrações. Com todas as condições ajustadas ao valores desejados é iniciado a pressurização do sistema, combinando as posições de fechamento das válvulas agulha V3 e V7 até obter-se a vazão e pressão de alimentação desejadas. A vazão de alimentação é considerada com sendo a própria vazão de concentrado, já que a vazão de permeado é desprezível quando comparada com a vazão de concentrado, e esta vazão é determinada pelo tempo de enchimento de uma proveta de 1 litro. Com todos os parâmetros ajustados e estabilizados é marcado o tempo de início do experimento.

6. Nos momentos desejados são realizadas as medidas das concentrações da alimentação e do permeado e a medida de vazão de permeado. A medida da concentração da alimentação é realizada utilizando-se solução coletada diretamente do tanque de alimentação. As medidas de vazão de permeado são realizadas pelo tempo de enchimento de provetas com volumes adequados. Para medidas da vazão do permeado quando estiver em operação o módulo para membrana plana é utilizada uma proveta de 10 mL, já que a vazão é extremamente baixa. Para medidas de vazão do permeado quando a membrana módulo em espiral estiver em operação é utilizada uma proveta de 50 ou de 100 mL. As medidas de concentrações do permeado são realizadas aproveitando-se a mesma amostra coletada na proveta.
7. Após o término de cada experimento a bomba (2) e o banho termostático (5) são desligados e procede-se a limpeza do sistema, como descrito a seguir.
8. Fechar a válvula V2 e abrir a válvula V1 para drenar a solução do tanque de alimentação para fora do sistema. Com o tanque de alimentação vazio a válvula V1 é fechada e procede-se um enxágüe com água destilada do interior do tanque de alimentação, e este volume é novamente drenado abrindo a válvula V1. O tanque de alimentação é então completado com água destilada a fim de enxaguar o restante do sistema. As válvulas V2, V3, V4, V5 e V7 são abertas e, com os retornos de concentrado e recirculação previamente direcionados para fora do tanque de alimentação, a bomba é acionada. Por conter menor volume, a recirculação é enxaguada rapidamente e redirecionada para dentro do tanque de alimentação, a corrente de concentrado deve permanecer sendo drenada para fora do sistema até possuir características da água destilada. A bomba é então desligada e a mangueira da

corrente do concentrado é novamente direcionada para o interior do tanque de alimentação.

ANEXO B

DADOS EXPERIMENTAIS

Tabela B.1 – Experimento 1.1, oxidação de membrana ACM1 utilizando solução contendo 500 ppm de cloro livre.

Tempo (horas)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado $(m^3.m^{-2}.s^{-1}).10^{-5}$	Condutividade da alimentação $(\mu S.cm^{-1})$	Conc. de NaClO na alimentação (ppm de NaClO)	Condutividade do permeado $(\mu S.cm^{-1})$	Conc. de NaClO no permeado (ppm de NaClO)	Retenção de NaClO (%)
0,33	418	0,43	4240	2659,17	47,4	22,60	99,15
1	411	0,43	4260	2672,01	50,0	24,05	99,10
2	394	0,45	4260	2672,01	53,3	25,92	99,03
3	388	0,46	4260	2672,01	61,0	30,19	98,87
4	380	0,47	4220	2646,33	67,1	33,61	98,73
5	370	0,48	4230	2652,75	74,8	37,93	98,57
6	365	0,49	4230	2652,75	86,6	44,57	98,32

Tabela B.2 – Experimento 1.2, oxidação de membrana ACM1 utilizando solução contendo 500 ppm de cloro livre e 0,05 ppm de alumínio.

Tempo (horas)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado $(m^3.m^{-2}.s^{-1}).10^{-5}$	Condutividade da alimentação $(\mu S.cm^{-1})$	Conc. de NaClO na alimentação (ppm de NaClO)	Condutividade do permeado $(\mu S.cm^{-1})$	Conc. de NaClO no permeado (ppm de NaClO)	Retenção de NaClO (%)
0,33	420	0,42	4250	2665,59	51,3	24,79	99,07
1	401	0,44	4240	2659,17	53,6	26,06	99,02
2	386	0,46	4250	2665,59	56,6	27,72	98,96
3	370	0,48	4260	2672,01	60,5	29,93	98,88
4	366	0,49	4260	2672,01	65,3	32,60	98,78
5	357	0,50	4250	2665,59	70,8	35,72	98,66
6	342	0,52	4260	2672,01	93,9	48,63	98,18

Tabela B.3 – Experimento 1.3, oxidação de membrana ACM1 utilizando solução contendo 500 ppm de cloro livre e 0,10 ppm de alumínio.

Tempo (horas)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado $(m^3.m^{-2}.s^{-1}).10^{-5}$	Condutividade da alimentação $(\mu S.cm^{-1})$	Conc. de NaClO na alimentação (ppm de NaClO)	Condutividade do permeado $(\mu S.cm^{-1})$	Conc. de NaClO no permeado (ppm de NaClO)	Retenção de NaClO (%)
0,33	416	0,43	4250	2665,59	49,4	23,72	99,11
1	395	0,45	2270	1394,48	30,7	13,25	99,05
2	378	0,47	4230	2652,75	55,4	27,06	98,98
3	361	0,49	4210	2639,91	60,3	29,83	98,87
4	355	0,50	4220	2646,33	67,1	33,61	98,73
5	348	0,51	4230	2652,75	80,9	41,38	98,44
6	336	0,53	4220	2646,33	105,3	55,04	97,92

Tabela B.4 – Experimento 1.4, oxidação de membrana ACM1 utilizando solução contendo 500 ppm de cloro livre e 0,26 ppm de alumínio.

Tempo (horas)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3.m^{-2}.s^{-1}).10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S.cm^{-1}$)	Conc. de NaClO na alimentação (ppm de NaClO)	Condutividade do permeado ($\mu S.cm^{-1}$)	Conc. de NaClO no permeado (ppm de NaClO)	Retenção de NaClO (%)
0,33	417	0,43	4230	2652,75	49,7	23,87	99,10
1	396	0,45	4230	2652,75	51,6	24,94	99,06
2	370	0,48	4240	2659,17	53,6	26,06	99,02
3	360	0,50	4230	2652,75	54,9	26,79	98,99
4	350	0,51	4220	2646,33	66,6	33,34	98,74
5	334	0,53	4230	2652,75	92,8	48,01	98,19
6	329	0,54	4230	2652,75	133,5	70,83	97,33

Tabela B.5 – Experimento 1.5, oxidação de membrana ACM1 utilizando solução contendo 500 ppm de cloro livre e 0,05 ppm de ferro total.

Tempo (horas)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3.m^{-2}.s^{-1}).10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S.cm^{-1}$)	Conc. de NaClO na alimentação (ppm de NaClO)	Condutividade do permeado ($\mu S.cm^{-1}$)	Conc. de NaClO no permeado (ppm de NaClO)	Retenção de NaClO (%)
0,33	412	0,43	4240	2659,17	46,9	22,34	99,16
1	403	0,44	4230	2652,75	52,1	25,20	99,05
2	386	0,46	4250	2665,59	56,1	27,46	98,97
3	376	0,47	4240	2659,17	59,3	29,25	98,90
4	368	0,48	4230	2652,75	63,9	31,83	98,80
5	362	0,49	4230	2652,75	73,4	37,14	98,60
6	361	0,49	4210	2639,91	89,1	45,93	98,26

Tabela B.6 – Experimento 1.6, oxidação de membrana ACM1 utilizando solução contendo 500 ppm de cloro livre e 0,10 ppm de ferro total.

Tempo (horas)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3.m^{-2}.s^{-1}).10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S.cm^{-1}$)	Conc. de NaClO na alimentação (ppm de NaClO)	Condutividade do permeado ($\mu S.cm^{-1}$)	Conc. de NaClO no permeado (ppm de NaClO)	Retenção de NaClO (%)
0,33	421	0,42	4220	2646,33	47,2	22,49	99,15
1	412	0,43	4220	2646,33	51,9	25,14	99,05
2	391	0,46	4230	2652,75	54,0	26,26	99,01
3	371	0,48	4210	2639,91	59,4	29,30	98,89
4	363	0,49	4210	2639,91	61,3	30,36	98,85
5	356	0,50	4210	2639,91	77,8	39,60	98,5
6	350	0,51	4220	2646,33	106,3	55,57	97,9

Tabela B.7 – Experimento 1.7, oxidação de membrana ACM1 utilizando solução contendo 500 ppm de cloro livre e 0,26 ppm de ferro total.

Tempo (horas)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaClO na alimentação (ppm de NaClO)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaClO no permeado (ppm de NaClO)	Retenção de NaClO (%)
0,33	413	0,43	4260	2672,01	49,0	23,51	99,12
1	396	0,45	4270	2678,43	51,5	24,91	99,07
2	388	0,46	4270	2678,43	53,9	26,25	99,02
3	371	0,48	4260	2672,01	57,6	28,32	98,94
4	356	0,50	4240	2659,17	59,3	29,25	98,90
5	351	0,51	4250	2665,59	83,7	42,92	98,39
6	343	0,52	4250	2665,59	117,5	61,84	97,68

Tabela B.8 – Experimento 2.1, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	260	0,69	3210	1997,93	28,2	12,88	99,36
12	262	0,68	3210	1997,93	28,2	12,88	99,36
18	261	0,68	3200	1991,52	28,3	12,95	99,35
24	260	0,69	3210	1997,93	28,1	12,85	99,36
30	261	0,68	3200	1991,52	28,1	12,85	99,35

Tabela B.9 – Experimento 2.1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 10 h de limpeza com solução ácida.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	253	0,70	3210	1997,93	26,8	12,22	99,39
12	253	0,70	3220	2004,35	27,2	12,42	99,38
18	254	0,70	3210	1997,93	27,0	12,32	99,38
24	253	0,70	3210	1997,93	27,2	12,42	99,38
30	254	0,70	3210	1997,93	26,9	12,27	99,39

Tabela B.10 – Experimento 2.2, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	271	0,66	3210	1997,93	28,9	13,24	99,34
12	271	0,66	3210	1997,93	29,0	13,29	99,33
18	271	0,66	3210	1997,93	28,8	13,19	99,34
24	271	0,66	3210	1997,93	28,8	13,19	99,34
30	272	0,66	3210	1997,93	28,9	13,24	99,34

Tabela B.11 – Experimento 2.2, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 10h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	266	0,67	3210	1997,93	28,5	13,05	99,35
12	266	0,67	3210	1997,93	28,3	12,95	99,35
18	265	0,67	3210	1997,93	28,6	13,10	99,34
24	265	0,67	3220	2004,35	28,4	13,00	99,35
30	265	0,67	3210	1997,93	28,3	12,95	99,35

Tabela B.12 – Experimento 2.3, avaliação da membrana ACM1 3 anos OR/empresa AZ utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	294	0,61	3210	1997,93	31,1	14,31	99,28
12	295	0,60	3210	1997,93	31,0	14,26	99,29
18	295	0,60	3210	1997,93	31,0	14,26	99,29
24	295	0,60	3220	2004,35	31,2	14,36	99,28
30	295	0,60	3230	2010,77	31,0	14,26	99,29

Tabela B.13 – Experimento 2.3, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 10h de limpeza com solução ácida.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	275	0,65	3210	1997,93	30,2	13,87	99,31
12	275	0,65	3210	1997,93	30,1	13,82	99,31
18	276	0,65	3220	2004,35	30,1	13,82	99,31
24	275	0,65	3210	1997,93	30,0	13,78	99,31
30	275	0,65	3210	1997,93	30,1	13,82	99,31

Tabela B.14 – Experimento 2.4, avaliação da membrana ACM1 3 anos OR/empresa AZ utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	298	0,60	3210	1997,93	31,3	14,41	99,28
12	298	0,60	3210	1997,93	31,4	14,46	99,28
18	298	0,60	3220	2004,35	31,5	14,50	99,28
24	297	0,60	3220	2004,35	31,3	14,41	99,28
30	298	0,60	3210	1997,93	31,3	14,41	99,28

Tabela B.15 – Experimento 2.4, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 10h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	277	0,64	3210	1997,93	30,3	13,92	99,30
12	276	0,65	3200	1991,52	30,3	13,92	99,30
18	277	0,64	3220	2004,35	30,4	13,97	99,30
24	277	0,64	3230	2010,77	30,5	14,02	99,30
30	278	0,64	3200	1991,52	30,4	13,97	99,30

Tabela B.16 – Experimento 2.5, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	257	0,69	3210	1997,93	28,6	13,10	99,34
12	258	0,69	3230	2010,77	28,8	13,19	99,34
18	259	0,69	3220	2004,35	28,6	13,10	99,35
24	260	0,69	3210	1997,93	28,7	13,14	99,34
30	259	0,69	3200	1991,52	28,6	13,10	99,34

Tabela B.17 – Experimento 2.5, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	60	2,97	3210	1997,93	115	60,46	96,97
12	59	3,02	3220	2004,35	116	61,02	96,96
18	59	3,02	3210	1997,93	115	60,46	96,97
24	59	3,02	3210	1997,93	116	61,02	96,95
30	60	2,97	3200	1991,52	116	61,02	96,94

Tabela B.18 – Experimento 2.5, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 10h de limpeza com solução ácida.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	61	2,92	3210	1997,93	101	52,62	97,37
12	61	2,92	3210	1997,93	101	52,62	97,37
18	60	2,97	3220	2004,35	102	53,18	97,35
24	60	2,97	3210	1997,93	102	53,18	97,34
30	61	2,92	3200	1991,52	100	52,06	97,39

Tabela B.19 – Experimento 2.6, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	264	0,68	3210	1997,93	29,6	13,58	99,32
12	264	0,68	3210	1997,93	29,7	13,63	99,32
18	264	0,68	3210	1997,93	29,7	13,63	99,32
24	264	0,68	3200	1991,52	29,5	13,53	99,32
30	264	0,68	3200	1991,52	29,6	13,58	99,32

Tabela B.20 – Experimento 2.6, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	62	2,88	3210	1997,93	121	63,82	96,81
12	62	2,88	3210	1997,93	122	64,38	96,78
18	61	2,92	3210	1997,93	121	63,82	96,81
24	61	2,92	3220	2004,35	121	63,82	96,82
30	61	2,92	3200	1991,52	121	63,82	96,80

Tabela B.21 – Experimento 2.6, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 10h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	31	5,75	3210	1997,93	550	304,13	84,78
12	30	5,94	3210	1997,93	551	304,69	84,75
18	30	5,94	3220	2004,35	551	304,69	84,80
24	30	5,94	3230	2010,77	550	304,13	84,87
30	30	5,94	3220	2004,35	551	304,69	84,80

Tabela B.22 – Experimento 2.7, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	277	0,64	3210	1997,93	30,1	13,82	99,31
12	278	0,64	3220	2004,35	30,2	13,87	99,31
18	279	0,64	3230	2010,77	30,4	13,97	99,31
24	279	0,64	3220	2004,35	30,4	13,97	99,30
30	278	0,64	3210	1997,93	30,3	13,92	99,30

Tabela B.23 – Experimento 2.7, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	57	3,13	3210	1997,93	117	61,58	96,92
12	57	3,13	3210	1997,93	118	62,14	96,89
18	57	3,13	3220	2004,35	118	62,14	96,90
24	58	3,07	3210	1997,93	119	62,70	96,86
30	57	3,13	3200	1991,52	118	62,14	96,88

Tabela B.24 – Experimento 2.7, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 10h de limpeza com solução alcalina (sem LSS).

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	56	3,18	3220	2004,35	119	62,70	96,87
12	56	3,18	3230	2010,77	119	62,70	96,88
18	57	3,13	3230	2010,77	118	62,14	96,91
24	56	3,18	3220	2004,35	117	61,58	96,93
30	57	3,13	3220	2004,35	118	62,14	96,90

Tabela B.25 – Experimento 3.A1, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	276	0,65	3210	1997,93	30,2	13,87	99,31
12	277	0,64	3210	1997,93	30,0	13,78	99,31
18	277	0,64	3220	2004,35	30,1	13,82	99,31
24	277	0,64	3210	1997,93	30,4	13,97	99,30
30	276	0,65	3190	1985,10	30,3	13,92	99,30

Tabela B.26 – Experimento 3.A1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	57	3,13	3210	1997,93	118	62,14	96,89
12	57	3,13	3210	1997,93	117	61,58	96,92
18	57	3,13	3210	1997,93	118	62,14	96,89
24	57	3,13	3210	1997,93	117	61,58	96,92
30	57	3,13	3200	1991,52	117	61,58	96,91

Tabela B.27 – Experimento 3.A1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	35	5,09	3210	1997,93	349	191,54	90,41
12	35	5,09	3210	1997,93	350	192,10	90,39
18	34	5,24	3210	1997,93	348	190,98	90,44
24	34	5,24	3220	2004,35	351	192,66	90,39
30	35	5,09	3210	1997,93	350	192,10	90,39

Tabela B.28 – Experimento 3.A1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 80 ppm de ácido tânico.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	65	2,74	3210	1997,93	73,1	36,99	98,15
12	65	2,74	3210	1997,93	73,3	37,10	98,14
18	64	2,79	3210	1997,93	73,1	36,99	98,15
24	64	2,79	3210	1997,93	73,2	37,04	98,15
30	65	2,74	3200	1991,52	73,1	36,99	98,14

Tabela B.29 – Experimento 3.A2, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	280	0,64	3210	1997,93	28,8	13,19	99,34
12	280	0,64	3210	1997,93	28,6	13,10	99,34
18	280	0,64	3210	1997,93	28,5	13,05	99,35
24	281	0,63	3210	1997,93	28,5	13,05	99,35
30	280	0,64	3220	2004,35	28,6	13,10	99,35

Tabela B.30 – Experimento 3.A2, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	62	2,88	3210	1997,93	113	59,34	97,03
12	62	2,88	3210	1997,93	112	58,78	97,06
18	62	2,88	3220	2004,35	112	58,78	97,07
24	62	2,88	3210	1997,93	111	58,22	97,09
30	61	2,92	3220	2004,35	112	58,78	97,07

Tabela B.31 – Experimento 3.A2, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	36	4,95	3220	2004,35	349	191,54	90,44
12	36	4,95	3210	1997,93	350	192,10	90,39
18	36	4,95	3210	1997,93	352	193,22	90,33
24	35	5,09	3200	1991,52	351	192,66	90,33
30	36	4,95	3200	1991,52	348	190,98	90,41

Tabela B.32 – Experimento 3.A2, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 80 ppm de ácido gálico.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	61	2,92	3200	1991,52	58,2	28,64	98,56
12	61	2,92	3210	1997,93	58,4	28,75	98,56
18	61	2,92	3210	1997,93	58,0	28,53	98,57
24	61	2,92	3220	2004,35	58,0	28,53	98,58
30	61	2,92	3200	1991,52	58,1	28,59	98,56

Tabela B.33 – Experimento 3.A3, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	262	0,68	3210	1997,93	31,0	14,26	99,29
12	262	0,68	3210	1997,93	31,2	14,36	99,28
18	261	0,68	3210	1997,93	31,3	14,41	99,28
24	261	0,68	3210	1997,93	31,3	14,41	99,28
30	261	0,68	3210	1997,93	31,4	14,46	99,28

Tabela B.34 – Experimento 3.A3, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	60	2,97	3210	1997,93	118	62,14	96,89
12	61	2,92	3210	1997,93	117	61,58	96,92
18	61	2,92	3210	1997,93	117	61,58	96,92
24	61	2,92	3210	1997,93	118	62,14	96,89
30	60	2,97	3220	2004,35	119	62,70	96,87

Tabela B.35 – Experimento 3.A3, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	32	5,57	3210	1997,93	347	190,42	90,47
12	32	5,57	3210	1997,93	345	189,30	90,53
18	32	5,57	3210	1997,93	345	189,30	90,53
24	32	5,57	3220	2004,35	348	190,98	90,47
30	32	5,57	3210	1997,93	346	189,86	90,50

Tabela B.36 – Experimento 3.A3, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 80 ppm de ácido maléico.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	65	2,74	3210	1997,93	74,1	37,55	98,12
12	65	2,74	3220	2004,35	74,3	37,66	98,12
18	65	2,74	3220	2004,35	74,4	37,72	98,12
24	66	2,70	3210	1997,93	74,1	37,55	98,12
30	65	2,74	3210	1997,93	74,4	37,72	98,11

Tabela B.37 – Experimento 3.B1, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	269	0,66	3210	1997,93	30,7	14,12	99,29
12	269	0,66	3210	1997,93	30,5	14,02	99,30
18	269	0,66	3210	1997,93	30,9	14,21	99,29
24	268	0,67	3210	1997,93	31,0	14,26	99,29
30	269	0,66	3230	2010,77	31,2	14,36	99,29

Tabela B.38 – Experimento 3.B1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	57	3,13	3210	1997,93	118	62,14	96,89
12	57	3,13	3180	1978,68	117	61,58	96,89
18	57	3,13	3210	1997,93	118	62,14	96,89
24	57	3,13	3200	1991,52	117	61,58	96,91
30	57	3,13	3200	1991,52	117	61,58	96,91

Tabela B.39 – Experimento 3.B1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	32	5,57	3220	2004,35	350	192,10	90,42
12	32	5,57	3220	2004,35	350	192,10	90,42
18	32	5,57	3210	1997,93	348	190,98	90,44
24	32	5,57	3200	1991,52	347	190,42	90,44
30	32	5,57	3210	1997,93	349	191,54	90,41

Tabela B.40 – Experimento 3.B1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo ácido tânico em pH=3,0.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	68	2,62	3200	1991,52	73,4	37,16	98,13
12	69	2,58	3210	1997,93	73,6	37,27	98,13
18	68	2,62	3200	1991,52	73,3	37,10	98,14
24	68	2,62	3210	1997,93	73,2	37,04	98,15
30	68	2,62	3220	2004,35	73,4	37,16	98,15

Tabela B.41 – Experimento 3.B2, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	268	0,67	3210	1997,93	28,3	12,95	99,35
12	268	0,67	3210	1997,93	28,3	12,95	99,35
18	267	0,67	3210	1997,93	28,5	13,05	99,35
24	267	0,67	3210	1997,93	28,6	13,10	99,34
30	267	0,67	3200	1991,52	28,2	12,90	99,35

Tabela B.42 – Experimento 3.B2, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	59	3,02	3200	1991,52	115	60,46	96,96
12	59	3,02	3220	2004,35	117	61,58	96,93
18	59	3,02	3210	1997,93	117	61,58	96,92
24	59	3,02	3210	1997,93	115	60,46	96,97
30	59	3,02	3210	1997,93	116	61,02	96,95

Tabela B.43 – Experimento 3.B2, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	35	5,09	3190	1985,10	345	189,30	90,46
12	34	5,24	3190	1985,10	345	189,30	90,46
18	35	5,09	3210	1997,93	347	190,42	90,47
24	34	5,24	3210	1997,93	348	190,98	90,44
30	35	5,09	3210	1997,93	347	190,42	90,47

Tabela B.44 – Experimento 3.B2, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo ácido tânico em pH=5,0.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	67	2,66	3200	1991,52	73,7	37,32	98,13
12	67	2,66	3210	1997,93	73,6	37,27	98,13
18	67	2,66	3210	1997,93	73,7	37,32	98,13
24	67	2,66	3220	2004,35	73,4	37,16	98,15
30	67	2,66	3200	1991,52	73,6	37,27	98,13

Tabela B.45 – Experimento 3.B3, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	262	0,68	3210	1997,93	31,8	14,65	99,27
12	262	0,68	3210	1997,93	31,5	14,50	99,27
18	262	0,68	3210	1997,93	31,4	14,46	99,28
24	262	0,68	3210	1997,93	31,5	14,50	99,27
30	262	0,68	3210	1997,93	31,5	14,50	99,27

Tabela B.46 – Experimento 3.B3, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	59	3,02	3210	1997,93	112	58,78	97,06
12	60	2,97	3220	2004,35	113	59,34	97,04
18	60	2,97	3210	1997,93	112	58,78	97,06
24	59	3,02	3190	1985,10	111	58,22	97,07
30	59	3,02	3220	2004,35	113	59,34	97,04

Tabela B.47 – Experimento 3.B3, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	33	5,40	3210	1997,93	342	187,62	90,61
12	33	5,40	3210	1997,93	341	187,06	90,64
18	33	5,40	3210	1997,93	341	187,06	90,64
24	33	5,40	3200	1991,52	340	186,50	90,64
30	34	5,24	3190	1985,10	340	186,50	90,61

Tabela B.48 – Experimento 3.B3, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo ácido tânico em pH=2,4.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	49	3,64	3220	2004,35	219	118,72	94,08
12	48	3,71	3220	2004,35	219	118,72	94,08
18	49	3,64	3210	1997,93	218	118,16	94,09
24	49	3,64	3200	1991,52	217	117,60	94,10
30	49	3,64	3210	1997,93	218	118,16	94,09

Tabela B.49 – Experimento 3.B4, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	273	0,65	3210	1997,93	29,4	13,48	99,33
12	273	0,65	3210	1997,93	29,4	13,48	99,33
18	273	0,65	3210	1997,93	29,2	13,39	99,33
24	273	0,65	3210	1997,93	29,1	13,34	99,33
30	273	0,65	3210	1997,93	29,0	13,29	99,33

Tabela B.50 – Experimento 3.B4, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	61	2,92	3220	2004,35	120	63,26	96,84
12	61	2,92	3210	1997,93	119	62,70	96,86
18	61	2,92	3200	1991,52	118	62,14	96,88
24	61	2,92	3200	1991,52	118	62,14	96,88
30	61	2,92	3210	1997,93	119	62,70	96,86

Tabela B.51 – Experimento 3.B4, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	35	5,09	3200	1991,52	349	191,54	90,38
12	34	5,24	3210	1997,93	350	192,10	90,39
18	33	5,40	3220	2004,35	351	192,66	90,39
24	34	5,24	3220	2004,35	350	192,10	90,42
30	34	5,24	3200	1991,52	348	190,98	90,41

Tabela B.52 – Experimento 3.B4, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo ácido tânico em pH=2,1.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	53	3,36	3210	1997,93	142	75,58	96,22
12	53	3,36	3200	1991,52	141	75,02	96,23
18	53	3,36	3200	1991,52	141	75,02	96,23
24	54	3,30	3230	2010,77	143	76,14	96,21
30	53	3,36	3200	1991,52	141	75,02	96,23

Tabela B.53 – Experimento 3.B5, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	276	0,65	3210	1997,93	30,4	13,97	99,30
12	276	0,65	3190	1985,10	30,8	14,16	99,29
18	275	0,65	3210	1997,93	30,9	14,21	99,29
24	275	0,65	3220	2004,35	30,8	14,16	99,29
30	276	0,65	3210	1997,93	31,0	14,26	99,29

Tabela B.54 – Experimento 3.B5, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	59	3,02	3210	1997,93	115	60,46	96,97
12	59	3,02	3210	1997,93	114	59,90	97,00
18	59	3,02	3210	1997,93	115	60,46	96,97
24	60	2,97	3220	2004,35	116	61,02	96,96
30	60	2,97	3210	1997,93	114	59,90	97,00

Tabela B.55 – Experimento 3.B5, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	34	5,24	3220	2004,35	358	196,58	90,19
12	34	5,24	3200	1991,52	357	196,02	90,16
18	35	5,09	3210	1997,93	357	196,02	90,19
24	34	5,24	3210	1997,93	357	196,02	90,19
30	34	5,24	3200	1991,52	355	194,90	90,21

Tabela B.56 – Experimento 3.B5, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo ácido tânico sob pressão de $6,0 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	69	2,58	3200	1991,52	72,1	36,43	98,17
12	69	2,58	3190	1985,10	71,8	36,26	98,17
18	69	2,58	3210	1997,93	71,9	36,32	98,18
24	69	2,58	3220	2004,35	72,1	36,43	98,18
30	69	2,58	3210	1997,93	72,2	36,48	98,17

Tabela B.57 – Experimento 3.B6, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	269	0,66	3200	1991,52	31,9	14,70	99,26
12	268	0,67	3210	1997,93	31,8	14,65	99,27
18	269	0,66	3210	1997,93	31,7	14,60	99,27
24	268	0,67	3220	2004,35	31,7	14,60	99,27
30	269	0,66	3200	1991,52	31,5	14,50	99,27

Tabela B.58 – Experimento 3.B6, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	62	2,88	3210	1997,93	112	58,78	97,06
12	62	2,88	3230	2010,77	113	59,34	97,05
18	62	2,88	3200	1991,52	112	58,78	97,05
24	62	2,88	3210	1997,93	111	58,22	97,09
30	62	2,88	3190	1985,10	110	57,66	97,10

Tabela B.59 – Experimento 3.B6, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	34	5,24	3210	1997,93	341	187,06	90,64
12	35	5,09	3200	1991,52	340	186,50	90,64
18	35	5,09	3210	1997,93	342	187,62	90,61
24	35	5,09	3220	2004,35	343	188,18	90,61
30	35	5,09	3210	1997,93	341	187,06	90,64

Tabela B.60 – Experimento 3.B6, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo ácido tânico sob pressão de $8,0 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	66	2,70	3200	1991,52	74,0	37,49	98,12
12	66	2,70	3200	1991,52	74,1	37,55	98,11
18	66	2,70	3200	1991,52	73,8	37,38	98,12
24	65	2,74	3210	1997,93	74,1	37,55	98,12
30	66	2,70	3210	1997,93	74,2	37,60	98,12

Tabela B.61 – Experimento 3.B7, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	273	0,65	3210	1997,93	29,4	13,48	99,33
12	273	0,65	3220	2004,35	29,9	13,73	99,32
18	273	0,65	3210	1997,93	29,2	13,39	99,33
24	274	0,65	3210	1997,93	29,4	13,48	99,33
30	274	0,65	3210	1997,93	29,4	13,48	99,33

Tabela B.62 – Experimento 3.B7, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	59	3,02	3210	1997,93	117	61,58	96,92
12	60	2,97	3210	1997,93	117	61,58	96,92
18	60	2,97	3200	1991,52	115	60,46	96,96
24	59	3,02	3210	1997,93	116	61,02	96,95
30	60	2,97	3220	2004,35	117	61,58	96,93

Tabela B.63 – Experimento 3.B7, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	32	5,57	3210	1997,93	349	191,54	90,41
12	32	5,57	3220	2004,35	351	192,66	90,39
18	33	5,40	3210	1997,93	349	191,54	90,41
24	32	5,57	3210	1997,93	350	192,10	90,39
30	33	5,40	3210	1997,93	352	193,22	90,33

Tabela B.64 – Experimento 3.B7, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo ácido tânico sob pressão de $2,0 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	62	2,88	3220	2004,35	75,1	38,11	98,10
12	61	2,92	3210	1997,93	74,8	37,94	98,10
18	62	2,88	3220	2004,35	74,7	37,88	98,11
24	62	2,88	3230	2010,77	74,6	37,83	98,12
30	62	2,88	3210	1997,93	74,6	37,83	98,11

Tabela B.65 – Experimento 3.B8, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	275	0,65	3210	1997,93	29,9	13,73	99,31
12	274	0,65	3220	2004,35	30,1	13,82	99,31
18	274	0,65	3220	2004,35	30,0	13,78	99,31
24	274	0,65	3210	1997,93	29,8	13,68	99,32
30	274	0,65	3220	2004,35	29,6	13,58	99,32

Tabela B.66 – Experimento 3.B8, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	60	2,97	3190	1985,10	114	59,90	96,98
12	60	2,97	3230	2010,77	116	61,02	96,97
18	59	3,02	3210	1997,93	115	60,46	96,97
24	59	3,02	3210	1997,93	116	61,02	96,95
30	60	2,97	3220	2004,35	117	61,58	96,93

Tabela B.67 – Experimento 3.B8, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). 10^{-5}	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	33	5,40	3210	1997,93	354	194,34	90,27
12	33	5,40	3220	2004,35	356	195,46	90,25
18	33	5,40	3220	2004,35	354	194,34	90,30
24	33	5,40	3210	1997,93	353	193,78	90,30
30	32	5,57	3200	1991,52	352	193,22	90,30

Tabela B.68 – Experimento 3.B8, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 160 ppm de ácido tânico.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). 10^{-5}	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	64	2,79	3210	1997,93	59,4	29,31	98,53
12	64	2,79	3220	2004,35	60,0	29,65	98,52
18	64	2,79	3230	2010,77	60,3	29,82	98,52
24	64	2,79	3220	2004,35	60,1	29,71	98,52
30	64	2,79	3220	2004,35	59,8	29,54	98,53

Tabela B.69 – Experimento 3.B9, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). 10^{-5}	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	269	0,66	3210	1997,93	27,9	12,76	99,36
12	269	0,66	3220	2004,35	28,3	12,95	99,35
18	268	0,67	3220	2004,35	28,5	13,05	99,35
24	268	0,67	3220	2004,35	28,6	13,10	99,35
30	268	0,67	3220	2004,35	28,2	12,90	99,36

Tabela B.70 – Experimento 3.B9, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). 10^{-5}	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	60	2,97	3220	2004,35	123	64,94	96,76
12	60	2,97	3210	1997,93	121	63,82	96,81
18	60	2,97	3210	1997,93	121	63,82	96,81
24	60	2,97	3240	2017,19	124	65,50	96,75
30	60	2,97	3220	2004,35	122	64,38	96,79

Tabela B.71 – Experimento 3.B9, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	35	5,09	3220	2004,35	349	191,54	90,44
12	34	5,24	3200	1991,52	346	189,86	90,47
18	34	5,24	3210	1997,93	345	189,30	90,53
24	34	5,24	3210	1997,93	345	189,30	90,53
30	34	5,24	3210	1997,93	347	190,42	90,47

Tabela B.72 – Experimento 3.B9, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 240 ppm de ácido tânico.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	71	2,51	3210	1997,93	54,4	26,51	98,67
12	72	2,48	3210	1997,93	54,1	26,35	98,68
18	71	2,51	3210	1997,93	54,0	26,29	98,68
24	72	2,48	3230	2010,77	54,3	26,46	98,68
30	71	2,51	3220	2004,35	54,4	26,51	98,68

Tabela B.73 – Experimento 3.B10, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	278	0,64	3210	1997,93	31,9	14,70	99,26
12	277	0,64	3210	1997,93	31,6	14,55	99,27
18	278	0,64	3210	1997,93	31,4	14,46	99,28
24	278	0,64	3220	2004,35	31,2	14,36	99,28
30	278	0,64	3220	2004,35	31,5	14,50	99,28

Tabela B.74 – Experimento 3.B10, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	63	2,83	3230	2010,77	126	66,62	96,69
12	62	2,88	3210	1997,93	123	64,94	96,75
18	62	2,88	3190	1985,10	122	64,38	96,76
24	62	2,88	3220	2004,35	125	66,06	96,70
30	63	2,83	3220	2004,35	125	66,06	96,70

Tabela B.75 – Experimento 3.B10, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	33	5,40	3210	1997,93	343	188,18	90,58
12	33	5,40	3210	1997,93	342	187,62	90,61
18	32	5,57	3220	2004,35	344	188,74	90,58
24	32	5,57	3220	2004,35	344	188,74	90,58
30	32	5,57	3220	2004,35	344	188,74	90,58

Tabela B.76 – Experimento 3.B10, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 400 ppm de ácido tânico.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	73	2,44	3190	1985,10	54,4	26,51	98,66
12	73	2,44	3210	1997,93	54,3	26,46	98,68
18	74	2,41	3210	1997,93	54,6	26,63	98,67
24	74	2,41	3210	1997,93	54,8	26,74	98,66
30	74	2,41	3210	1997,93	55,0	26,85	98,66

Tabela B.77 – Experimento 3.C1, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	265	0,67	3210	1997,93	32,6	15,04	99,25
12	265	0,67	3210	1997,93	33,0	15,23	99,24
18	264	0,68	3220	2004,35	33,2	15,33	99,24
24	264	0,68	3230	2010,77	32,9	15,18	99,24
30	264	0,68	3220	2004,35	32,8	15,14	99,24

Tabela B.78 – Experimento 3.C1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	57	3,13	3210	1997,93	132	69,98	96,50
12	56	3,18	3210	1997,93	133	70,54	96,47
18	57	3,13	3210	1997,93	131	69,42	96,53
24	57	3,13	3210	1997,93	130	68,86	96,55
30	58	3,07	3220	2004,35	132	69,98	96,51

Tabela B.79 – Experimento 3.C1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 15h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	11	16,20	3210	1997,93	1615	973,99	51,25
12	11	16,20	3230	2010,77	1610	970,78	51,72
18	11	16,20	3200	1991,52	1612	972,06	51,19
24	11	16,20	3220	2004,35	1610	970,78	51,57
30	11	16,20	3220	2004,35	1611	971,42	51,53

Tabela B.80 – Experimento 3.C1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 240 ppm de ácido tânico.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	28	6,37	3210	1997,93	682	375,03	81,23
12	28	6,37	3210	1997,93	684	376,31	81,16
18	28	6,37	3210	1997,93	685	376,96	81,13
24	28	6,37	3220	2004,35	683	375,67	81,26
30	28	6,37	3220	2004,35	683	375,67	81,26

Tabela B.81 – Experimento 3.C2, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	281	0,63	3230	2010,77	33,7	15,57	99,23
12	279	0,64	3220	2004,35	33,2	15,33	99,24
18	279	0,64	3220	2004,35	33,1	15,28	99,24
24	279	0,64	3210	1997,93	33,5	15,48	99,23
30	279	0,64	3220	2004,35	33,5	15,48	99,23

Tabela B.82 – Experimento 3.C2, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	63	2,83	3200	1991,52	118	62,14	96,88
12	63	2,83	3190	1985,10	116	61,02	96,93
18	62	2,88	3200	1991,52	118	62,14	96,88
24	62	2,88	3210	1997,93	119	62,70	96,86
30	63	2,83	3220	2004,35	119	62,70	96,87

Tabela B.83 – Experimento 3.C2, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 11h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	20	8,91	3180	1978,68	660	360,91	81,76
12	20	8,91	3180	1978,68	663	362,83	81,66
18	20	8,91	3190	1985,10	664	363,47	81,69
24	20	8,91	3180	1978,68	662	362,19	81,70
30	20	8,91	3200	1991,52	662	362,19	81,81

Tabela B.84 – Experimento 3.C2, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 240 ppm de ácido tânico.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	42	4,24	3220	2004,35	291	159,05	92,06
12	42	4,24	3210	1997,93	289	157,93	92,10
18	43	4,15	3210	1997,93	288	157,37	92,12
24	42	4,24	3230	2010,77	292	159,61	92,06
30	43	4,15	3220	2004,35	288	157,37	92,15

Tabela B.85 – Experimento 3.C3, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	269	0,66	3220	2004,35	32,7	15,09	99,25
12	269	0,66	3230	2010,77	32,4	14,94	99,26
18	269	0,66	3220	2004,35	31,9	14,70	99,27
24	268	0,67	3220	2004,35	32,4	14,94	99,25
30	269	0,66	3220	2004,35	32,6	15,04	99,25

Tabela B.86 – Experimento 3.C3, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	61	2,92	3210	1997,93	113	59,34	97,03
12	61	2,92	3220	2004,35	113	59,34	97,04
18	61	2,92	3230	2010,77	114	59,90	97,02
24	61	2,92	3230	2010,77	114	59,90	97,02
30	61	2,92	3230	2010,77	113	59,34	97,05

Tabela B.87 – Experimento 3.C3, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 10h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	30	5,94	3200	1991,52	542	299,65	84,95
12	30	5,94	3200	1991,52	542	299,65	84,95
18	30	5,94	3210	1997,93	544	300,77	84,95
24	31	5,75	3220	2004,35	543	300,21	85,02
30	30	5,94	3220	2004,35	543	300,21	85,02

Tabela B.88 – Experimento 3.C3, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 240 ppm de ácido tânico.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	58	3,07	3210	1997,93	89,8	46,34	97,68
12	58	3,07	3210	1997,93	90,1	46,51	97,67
18	58	3,07	3210	1997,93	90,2	46,57	97,67
24	58	3,07	3210	1997,93	90,0	46,46	97,67
30	58	3,07	3220	2004,35	90,3	46,62	97,67

Tabela B.89 – Experimento 3.C4, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	276	0,65	3200	1991,52	29,8	13,68	99,31
12	277	0,64	3220	2004,35	29,7	13,63	99,32
18	277	0,64	3220	2004,35	29,6	13,58	99,32
24	276	0,65	3230	2010,77	29,6	13,58	99,32
30	276	0,65	3210	1997,93	29,4	13,48	99,33

Tabela B.90 – Experimento 3.C4, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	61	2,92	3210	1997,93	111	58,22	97,09
12	61	2,92	3210	1997,93	110	57,66	97,11
18	61	2,92	3210	1997,93	112	58,78	97,06
24	61	2,92	3230	2010,77	111	58,22	97,10
30	62	2,88	3220	2004,35	110	57,66	97,12

Tabela B.91 – Experimento 3.C4, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 0,25h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	59	3,02	3220	2004,35	123	64,94	96,76
12	60	2,97	3210	1997,93	122	64,38	96,78
18	60	2,97	3220	2004,35	122	64,38	96,79
24	59	3,02	3220	2004,35	121	63,82	96,82
30	59	3,02	3210	1997,93	120	63,26	96,83

Tabela B.92 – Experimento 3.C4, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 240 ppm de ácido tânico.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	145	1,23	3200	1991,52	30,5	14,02	99,30
12	144	1,24	3210	1997,93	30,7	14,12	99,29
18	144	1,24	3210	1997,93	30,8	14,16	99,29
24	144	1,24	3220	2004,35	30,6	14,07	99,30
30	144	1,24	3210	1997,93	30,3	13,92	99,30

Tabela B.93 – Experimento 3.D1, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	276	0,65	3210	1997,93	28,8	13,19	99,34
12	277	0,64	3210	1997,93	29,1	13,34	99,33
18	276	0,65	3220	2004,35	29,4	13,48	99,33
24	277	0,64	3220	2004,35	29,1	13,34	99,33
30	277	0,64	3210	1997,93	29,3	13,44	99,33

Tabela B.94 – Experimento 3.D1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot 10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	61	2,92	3210	1997,93	110	57,66	97,11
12	61	2,92	3210	1997,93	111	58,22	97,09
18	61	2,92	3210	1997,93	108	56,54	97,17
24	61	2,92	3210	1997,93	109	57,10	97,14
30	61	2,92	3210	1997,93	112	58,78	97,06

Tabela B.95 – Experimento 3.D1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). 10^{-5}	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	37	4,82	3230	2010,77	337	184,82	90,81
12	37	4,82	3220	2004,35	336	184,26	90,81
18	37	4,82	3210	1997,93	336	184,26	90,78
24	37	4,82	3220	2004,35	335	183,69	90,84
30	37	4,82	3200	1991,52	333	182,57	90,83

Tabela B.96 – Experimento 3.D1, avaliação da membrana ACM1 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 240 ppm de ácido tânico.

Tempo (horas)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). 10^{-5}	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
0,25	70	2,55	3210	1997,93	58,0	28,53	98,57
0,5	70	2,55	3200	1991,52	57,8	28,42	98,57
1	70	2,55	3210	1997,93	58,1	28,59	98,57
2	70	2,55	3210	1997,93	57,7	28,36	98,58
3	69	2,58	3220	2004,35	57,5	28,25	98,59
4	70	2,55	3220	2004,35	57,6	28,31	98,59
5	69	2,58	3220	2004,35	57,3	28,14	98,60
6	69	2,58	3230	2010,77	57,3	28,14	98,60
7	69	2,58	3230	2010,77	57,5	28,25	98,60
8	68	2,62	3230	2010,77	57,2	28,08	98,60
9	68	2,62	3230	2010,77	57,3	28,14	98,60
10	68	2,62	3240	2017,19	57,1	28,03	98,61
11	68	2,62	3230	2010,77	57,2	28,08	98,60
12	68	2,62	3210	1997,93	57,0	27,97	98,60
13	68	2,62	3230	2010,77	57,0	27,97	98,61
14	68	2,62	3230	2010,77	57,3	28,14	98,60
15	68	2,62	3230	2010,77	57,1	28,03	98,61

Tabela B.97 – Experimento 3.D2, avaliação da membrana ACM1 nova utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ: pH 5,94, 112 $\mu S \cdot cm^{-1}$ e 13,5 ppm de sílica.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). 10^{-5}	Condutividade da alimentação ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Condutividade do permeado ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Conc. de Sílica na alimentação (ppm de Si)	Conc. de Sílica no permeado (ppm de Si)	Retenção de sais (%)	Retenção de Si (%)
6	235	0,76	112	4,70	13,50	0,30	97,48	97,78
12	235	0,76	112	4,71	13,55	0,31	97,47	97,71
18	235	0,76	113	4,72	13,51	0,31	97,48	97,71
24	235	0,76	112	4,69	13,52	0,30	97,48	97,78
30	235	0,76	113	4,72	13,50	0,30	97,48	97,78

Tabela B.98 – Experimento 3.D2, avaliação da membrana ACM1 utilizando água de alim. do sist. de OR da empresa AZ: pH 5,94, 112 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ e 13,5 ppm de sílica, após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}).10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Conc. de Sílica na alimentação (ppm de Si)	Conc. de Sílica no permeado (ppm de Si)	Retenção de sais (%)	Retenção de Si (%)
6	52	3,43	113	10,9	13,47	1,84	92,42	86,34
12	52	3,43	113	10,7	13,47	1,84	92,59	86,34
18	52	3,43	112	10,6	13,45	1,82	92,60	86,47
24	52	3,43	112	10,9	13,45	1,84	92,35	86,32
30	52	3,43	114	11,1	13,45	1,84	92,33	86,32

Tabela B.99 – Experimento 3.D2, avaliação da membrana ACM1 utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ: pH 5,94, 112 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ e 13,5 ppm de sílica, após 3,5h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}).10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Conc. de Sílica na alimentação (ppm de Si)	Conc. de Sílica no permeado (ppm de Si)	Retenção de sais (%)	Retenção de Si (%)
6	29	6,15	113	18,5	13,45	3,30	86,20	75,46
12	29	6,15	112	18,4	13,46	3,32	86,15	75,33
18	28	6,37	112	18,3	13,45	3,32	86,23	75,32
24	28	6,37	112	18,3	13,44	3,32	86,23	75,30
30	29	6,15	112	18,3	13,46	3,32	86,23	75,33

Tabela B.100 – Experimento 3.D2, avaliação da membrana ACM1 utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ: pH 5,94, 112 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ e 13,5 ppm de sílica após rejuvenescimento utilizando solução contendo 240 ppm de ácido tânico.

Tempo (horas)	Fluxo de permeado 10 mL (s)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}).10^{-5}$)	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Conc. de Sílica na alimentação (ppm de Si)	Conc. de Sílica no permeado (ppm de Si)	Retenção de sais (%)	Retenção de Si (%)
0,25	101	1,76	112	5,27	13,45	0,60	97,00	95,54
0,5	92	1,94	113	5,16	13,44	0,65	97,12	95,16
1	90	1,98	112	5,10	13,46	0,70	97,14	94,80
2	89	2,00	112	5,09	13,45	0,77	97,15	94,28
3	89	2,00	113	5,09	13,44	0,80	97,18	94,05
4	89	2,00	113	5,10	13,44	0,80	97,17	94,05
5	88	2,03	113	5,07	13,44	0,78	97,20	94,20
6	89	2,00	112	5,08	13,44	0,80	97,16	94,05
7	90	1,98	113	5,08	13,46	0,78	97,19	94,21
8	90	1,98	113	5,09	13,44	0,78	97,18	94,20
9	89	2,00	114	5,09	13,44	0,80	97,21	94,05
10	89	2,00	114	5,11	13,46	0,80	97,19	94,06
11	90	1,98	114	5,08	13,44	0,82	97,21	93,90
12	91	1,96	113	5,08	13,46	0,82	97,19	93,91
13	90	1,98	114	5,09	13,44	0,82	97,21	93,90
14	89	2,00	113	5,09	13,46	0,82	97,18	93,91
15	89	2,00	113	5,10	13,46	0,80	97,17	94,06

Tabela B.101 – Experimento 3.D3, avaliação da membrana nova BW30 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 100 mL (s)	Fluxo de permeado $(m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}) \cdot 10^{-5}$	Condutividade da alimentação $(\mu S \cdot cm^{-1})$	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado $(\mu S \cdot cm^{-1})$	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	36	0,40	3220	2004,35	36,3	16,84	99,16
12	36	0,40	3230	2010,77	36,0	16,69	99,17
18	36	0,40	3220	2004,35	36,1	16,74	99,16
24	36	0,40	3230	2010,77	35,9	16,64	99,17
30	36	0,40	3240	2017,19	36,2	16,79	99,17

Tabela B.102 – Experimento 3.D3, avaliação da membrana BW30 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após oxidação por cloro livre.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 100 mL (s)	Fluxo de permeado $(m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}) \cdot 10^{-5}$	Condutividade da alimentação $(\mu S \cdot cm^{-1})$	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado $(\mu S \cdot cm^{-1})$	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	12	1,21	3230	2010,77	115	60,46	96,99
12	12	1,21	3220	2004,35	114	59,90	97,01
18	12	1,21	3220	2004,35	115	60,46	96,98
24	12	1,21	3220	2004,35	115	60,46	96,98
30	12	1,21	3220	2004,35	116	61,02	96,96

Tabela B.103 – Experimento 3.D3, avaliação da membrana BW30 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após 2h de limpeza com solução alcalina + 0,5% de LSS.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 100 mL (s)	Fluxo de permeado $(m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}) \cdot 10^{-5}$	Condutividade da alimentação $(\mu S \cdot cm^{-1})$	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado $(\mu S \cdot cm^{-1})$	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
6	8	1,82	3210	1997,93	520	287,32	85,62
12	8	1,82	3210	1997,93	521	287,88	85,59
18	8	1,82	3210	1997,93	520	287,32	85,62
24	8	1,82	3220	2004,35	522	288,45	85,61
30	8	1,82	3220	2004,35	522	288,45	85,61

Tabela B.104 – Experimento 3.D3, avaliação da membrana BW30 utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl após rejuvenescimento utilizando solução contendo 240 ppm de ácido tânico.

Tempo (horas)	Fluxo de permeado 100 mL (s)	Fluxo de permeado $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot 10^{-5}$	Condutividade da alimentação $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	Conc. de NaCl na alimentação (ppm de NaCl)	Condutividade do permeado $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	Conc. de NaCl no permeado (ppm de NaCl)	Retenção de NaCl (%)
0,25	14	1,04	3220	2004,35	105	54,86	97,26
0,5	14	1,04	3220	2004,35	103	53,74	97,32
1	14	1,04	3220	2004,35	103	53,74	97,32
2	15	0,97	3230	2010,77	103	53,74	97,33
3	14	1,04	3240	2017,19	104	54,30	97,31
4	15	0,97	3240	2017,19	104	54,30	97,31
5	14	1,04	3210	1997,93	104	54,30	97,28
6	14	1,04	3220	2004,35	103	53,74	97,32
7	14	1,04	3210	1997,93	103	53,74	97,31
8	14	1,04	3210	1997,93	103	53,74	97,31
9	14	1,04	3210	1997,93	102	53,18	97,34
10	14	1,04	3220	2004,35	102	53,18	97,35
11	14	1,04	3220	2004,35	102	53,18	97,35
12	14	1,04	3220	2004,35	102	53,18	97,35
13	14	1,04	3200	1991,52	101	52,62	97,36
14	14	1,04	3200	1991,52	102	53,18	97,33
15	14	1,04	3210	1997,93	102	53,18	97,34

Tabela B.105 – Experimento 3.D4, avaliação da membrana BW30 utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ: pH 5,94, 112 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ e 13,5 ppm de sílica após limpeza química, conforme descrita no Capítulo III, onde o LSS foi suprimido da solução alcalina.

Tempo (min)	Fluxo de permeado 100 mL (s)	Fluxo de permeado $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot 10^{-5}$	Condutividade da alimentação $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	Condutividade do permeado $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	Conc. de Sílica na alimentação (ppm de Si)	Conc. de Sílica no permeado (ppm de Si)	Retenção de sais (%)	Retenção de Si (%)
6	9	1,62	113	16,4	13,56	3,84	87,92	71,68
12	9	1,62	113	16,2	13,55	3,89	88,08	71,29
18	9	1,62	113	15,8	13,60	3,90	88,41	71,32
24	9	1,62	114	16,1	13,58	3,88	88,28	71,43
30	9	1,62	113	16,3	13,58	3,94	88,00	70,99

Tabela B.106 – Experimento 3.D4, avaliação da membrana BW30 utilizando continuamente água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, após rejuvenescimento utilizando solução contendo 240 ppm de ácido tânico.

Tempo (dias)	Temperatura da alimentação (°C)	Pressão da alimentação (bar)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). 10^{-5}	Condutividade da alimentação ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Condutividade do permeado ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Concentração de sílica na alimentação (ppm de Si)	Concentração de sílica no permeado (ppm de Si)	Retenção de sais (%)	Retençã de Si (%)
0	19,5	10,5	0,32	108,5	4,4	18,7	0,7	97,64	96,26
1	19,4	10,5	0,30	104,0	4,9	18,5	1,0	97,09	94,59
2	19,7	10,0	0,32	102,5	5,4	18,7	1,2	96,59	93,58
3	19,6	*	0,30	112,0	5,5	18,5	1,4	96,81	92,43
4	19,8	*	0,32	116,5	6,1	18,3	1,6	96,47	91,26
7	19,0	*	0,35	119,0	5,9	18,0	1,7	96,70	90,56
8	18,8	10,5	0,27	120,5	5,2	17,7	1,4	97,28	92,09
9	19,0	7,0	0,36	110,0	5,5	17,8	1,8	96,75	89,89
10	19,5	6,6	0,36	105,7	5,9	17,8	1,9	96,26	89,33
11	19,0	10,0	0,45	111,3	5,1	17,2	1,4	97,13	91,86
14	20,0	10,0	0,56	115,5	5,1	16,9	*	97,24	*
15	19,7	6,5	0,36	128,0	6,3	16,7	1,8	96,66	89,22
16	19,1	10,5	0,45	128,3	5,6	16,8	1,4	97,17	91,67
17	18,8	10,7	0,46	115,5	5,2	17,1	1,4	97,16	91,81
18	19,4	10,5	0,49	118,5	5,3	18,0	2,3	97,16	87,22
21	20,4	10,7	0,57	137,5	4,4	*	*	98,17	*
22	20,6	10,6	0,59	141,5	5,7	*	*	97,38	*
23	20,1	9,8	0,59	141,3	4,6	16,7	1,6	98,09	90,42
28	18,5	9,5	1,00	132,2	6,0	16,4	1,5	96,98	90,85
29	17,9	7,5	0,92	122,5	5,9	16,0	1,7	96,80	89,38
30	16,2	10,0	1,01	104,7	5,0	15,9	1,5	97,02	90,57

ANEXO C

TESTE DE FUJIWARA – FEIGL (1966) e KOLTHOFF (1971)

Uma gota da solução a ser testada ou aproximadamente 1 cm² de membrana (exposta ao cloro livre) é colocada num tubo de ensaio com 2 gotas de piridina e 1 gota de hidróxido de sódio 5N, e subsequente aquecido em água até aproximadamente 80°C por 30 segundos.

Uma resposta positiva é indicada pelo aparecimento de uma coloração avermelhada ou rosada na camada de piridina por 2 segundos. Aquecimento prolongado desbota a coloração para marrom ou amarelo.

A coloração rosada é formada quando formas cloradas, bromadas, iodadas, ou membranas compostas cloradas por cloro livre são aquecidas com piridina.

ANEXO D

ARTIGOS SUBMETIDOS AO XIV COBEQ (Congresso Brasileiro de Engenharia Química)

AVALIAÇÃO DE OXIDAÇÕES EM MEMBRANAS DE POLIAMIDA DE OSMOSE REVERSA CAUSADA POR ATAQUES DE CLORO LIVRE CATALISADOS POR ÍON ALUMÍNIO

João Batista A. da Silva, Isabel C. Tessaro e Keiko Wada

Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
CEP: 90040-040 – Porto Alegre – RS – Brasil
Telefone: +55 5133163666 – Fax: +55 5133163277 – E-mail: isabel@enq.ufrgs.br

RESUMO – As características da água de alimentação geralmente ditam o adequado pré-tratamento necessário para minimizar o acúmulo de incrustantes sobre as membranas de osmose reversa (OR). Muitos tratamentos de água, municipais e industriais, utilizam sulfato de alumínio a fim de que sólidos suspensos coagulem e sedimentem. Se for permitido que o íon alumínio passe para a corrente de alimentação da OR, incrustações sobre as membranas podem ocorrer. Assim como os metais de transição, tal como o ferro, o alumínio pode catalisar e aumentar o potencial de oxidação por cloro livre. Os experimentos foram realizados em uma unidade de bancada com módulo para membrana plana, utilizando-se membranas de poliamida e várias concentrações de alumínio, ferro e cloro livre. Fluxo de permeado e retenção de hipoclorito de sódio foram analisados durante os experimentos a fim de determinar o nível que as membranas de OR foram oxidadas por cloro livre.

PALAVRAS-CHAVE: osmose reversa (OR); oxidação; cloro livre; alumínio.

ABSTRACT – The feed water characteristics usually dictate the appropriate pre-treatment necessary to minimize the accumulation of fouling on the reverse osmosis (RO) membranes. Many water treatment, municipal and industrial, utilize aluminum sulfate in order to coagulate and sediment suspended solids. If aluminum is allowed to pass into the RO feed water stream, fouling on the membranes may occur. As the transition metals, such as iron, the aluminum can catalyze and increase the free chlorine oxidation potential. The experiments were carried out in a flat sheet laboratory scale RO equipment, utilizing polyamide membranes and several concentrations of aluminum, iron and free chlorine. Permeate flux and sodium hypochlorite retention have been analyzed during the experiments in order to determine the extend that RO membranes were oxidized by free chlorine.

KEY WORDS: reverse osmosis (RO); membrane oxidation; free chlorine; aluminum.

1. INTRODUÇÃO

Processos de separação por membranas (PSM) são utilizados por indústrias que necessitam separar, concentrar ou purificar substâncias químicas. Dentre os muitos processos convencionais utilizados para os mesmos fins, os PSM caracterizam-se por utilizar membranas semi-permeáveis como

barreiras seletivas. Os PSM ampliam o conceito de filtração convencional, permitindo que solutos dissolvidos sejam separados de correntes líquidas.

O processo de osmose reversa (OR) é uma valiosa operação de PSM, e tornou-se uma tecnologia comum em muitas indústrias que requerem separação de solutos de baixo peso molecular, normalmente sais, dissolvidos em correntes líquidas.

Águas originárias das mais variadas fontes podem receber tratamento adequado possibilitando alimentar sistemas de OR. A fim de remover partículas e contaminantes de origem orgânica e inorgânica, uma seqüência de operações podem ser requeridas. Clarificação, filtrações, ultrafiltração, ajustes de pH, remoção de agentes oxidantes e injeção de produtos anti-incrustantes e dispersantes podem ser utilizadas, entre outras operações.

Sob condições normais, clarificação é necessária quando a fonte de captação fornece água com turbidez elevada e com grande concentração de contaminantes. Segundo KIM (1995), a operação de clarificação permite que um grande percentual de contaminantes seja precipitado rapidamente. Devido às características de carga das partículas suspensas, muitas estações de tratamento utilizam substâncias que contêm ferro ou alumínio como agentes coagulantes para dissipar as cargas negativas das partículas suspensas na água, permitindo que se aglomerem e precipitem da suspensão. BYRNE (1995) ressalta que o alumínio e o ferro possuem muitas semelhanças em suas tendências para reagir. Assim como o ferro, o alumínio se combina com oxigênio para formar um óxido insolúvel. Ambos os metais são capazes de complexar com colóides orgânicos carregados negativamente, precipitando prontamente quando silicatos estão presentes. Características de valência e tamanho fazem do alumínio um íon metálico com alta densidade de carga, o que o torna muito reativo.

Cloro livre é utilizado em operações de tratamento de águas como biocida e agente oxidante de contaminantes. Devido ao cloro livre ser um oxidante a quantidade requerida para a desinfecção é uma função da concentração de todos os materiais oxidáveis, principalmente materiais orgânicos. Concentração de cloro livre residual é definida como a soma das concentrações de hipoclorito e ácido hipocloroso. Estações de tratamento de água buscam adicionar quantidades de cloro suficientes para obterem cloro livre residual, garantindo que o “*breakpoint*” seja alcançado. Entretanto, já que as membranas poliméricas em geral sofrem oxidação em contato com cloro livre este deve ser removido da corrente de alimentação de sistemas de OR.

1.1. Oxidações por Cloro Livre

Com exceção de algumas novas membranas de polissulfona, que são utilizadas em limitadas aplicações, BRADLEY (1992) constata que as membranas de OR são suscetíveis à degradação por agentes oxidantes, especialmente por cloro livre. Membranas de AC são mais resistentes ao contato com agentes oxidantes que as membranas de PA, que são mais facilmente oxidadas.

BYRNE (1995) e HENLEY (1996) relatam a habilidade de metais de transição, como o ferro, o manganês, o cobre e o zinco, de mudar seus estados de valência catalisando e aumentando o potencial de oxidação de agentes oxidantes, como o cloro livre, sobre a superfície de membranas de OR, especialmente a de PA. Quando estes metais e cloro livre estão presentes ao mesmo tempo sobre a superfície da membrana, elétrons são mais agressivamente retirados da estrutura da membrana. Devido a maior ocorrência em fontes de captação de águas, bem como na composição de tubulações e equipamentos, a presença de ferro é comum na corrente de água de alimentação de sistemas de OR. Portanto, a ação catalítica do íon ferro na oxidação de membranas por cloro livre tem sido um assunto digno de atenção.

BYRNE (1995) recomenda que a concentração de ferro não ultrapasse 0,05 ppm em águas afluentes a sistemas de OR.

2.MATERIAIS E MÉTODOS

A descrição dos materiais utilizados abrange: as membranas, os produtos químicos e o equipamento de OR.

2.1. Materiais

Foram utilizadas membranas compostas de OR comerciais, assimétricas de poliamida, carregadas negativamente e suportadas em polissulfona. As membranas foram provenientes do fabricante TRISEP, e de acordo com este fabricante, as características das membranas estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características da membrana TRISEP ACM1-TSA.

Membrana	TRISEP ACM1-TSA
Pressão Máxima de Operação (bar)	41,37
Temperatura Máxima de Operação (°C)	45
pH de Operação	4 - 11
Tolerância ao Cloro Livre (ppm)	<0,1

Os ensaios de oxidação das membranas foram realizados com hipoclorito de sódio (10 – 12 %) da LABORPEQ. As soluções de ferro (total) e de alumínio foram preparadas a partir de sulfato de ferro (II) heptahidratado (pureza analítica) da MERCK e sulfato de alumínio (pureza analítica) da REAGEN, respectivamente.

O sistema de OR em bancada utilizado é composto por um módulo para membrana para membrana plana, uma bomba de engrenagens, um tanque de alimentação, um banho termostático com serpentina, pré-filtro, manômetros, termopar e válvulas agulha e esfera. Um desenho esquemático do sistema de OR em bancada utilizado está representado conforme mostra a Figura 1.

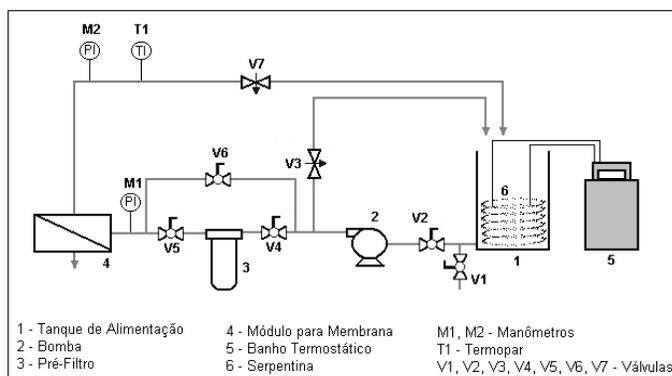


Figura 1 – Desenho esquemático do sistema de Osmose Reversa.

Conforme mostra a Figura 2 está representada uma foto do equipamento.

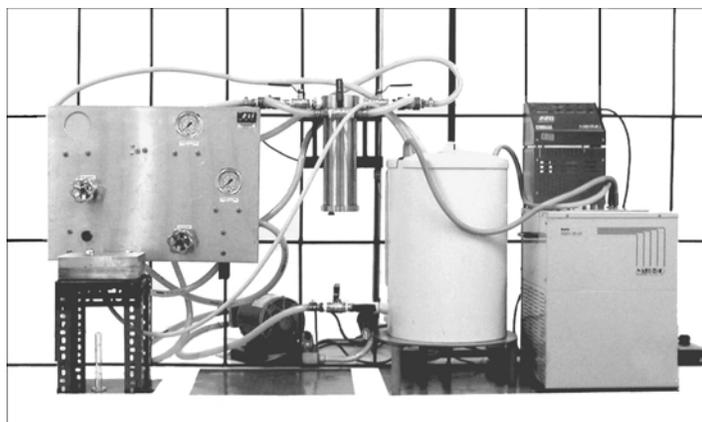


Figura 2 – Fotografia do equipamento do sistema de OR, com módulo para membrana plana.

2.2. Métodos

A descrição dos métodos empregados abrange: a metodologia experimental e os experimentos realizados, as análises de condutividade, pH e análises espectrofotométricas.

Metodologia experimental: Em vista de não terem sido encontradas referências na literatura consultada atribuindo tal característica ao alumínio, experimentos também foram realizados com o ferro, nas mesmas condições de operação e concentrações daquelas dos experimentos com o alumínio. Os resultados, nas condições dos experimentos, referentes aos dois metais, ferro e alumínio, podem ser comparados quantitativamente.

As condições de operação durante os experimentos foram escolhidas de modo a aproximá-las das condições normais de operação de um sistema industrial de OR. A vazão de operação da alimentação foi mantida em $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, com temperatura de 25°C e pressão de $7,85 \text{ bar}$ ($8,0 \text{ kgf/cm}^2$). Cada experimento foi realizado com uma membrana nova.

Os experimentos foram realizados com soluções de 500 ppm de cloro livre, as quais foram preparadas utilizando hipoclorito de sódio (NaClO). Devido ao pequeno tempo de duração dos experimentos, 6 horas, foi adotada uma alta concentração de cloro livre, a fim de que fosse possível detectar a oxidação causada nas membranas pelo método analítico empregado, ao longo de cada avaliação.

Experimentos realizados: Foram realizados 7 ensaios experimentais conforme descrito a seguir:

- Exp. 1 – 500 ppm de cloro livre.
- Exp. 2 – 0,05 ppm de Al^{+3} + 500 ppm de cloro livre.
- Exp. 3 – 0,10 ppm de Al^{+3} + 500 ppm de cloro livre.
- Exp. 4 – 0,26 ppm de Al^{+3} + 500 ppm de cloro livre.
- Exp. 5 – 0,05 ppm de Fe total ($\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$) + 500 ppm de cloro livre.
- Exp. 6 – 0,10 ppm de Fe total ($\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$) + 500 ppm de cloro livre.
- Exp. 7 – 0,26 ppm de Fe total ($\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$) + 500 ppm de cloro livre.

O pH foi mantido em 10,8, valor das soluções preparadas com 500 ppm de cloro livre.

Durante a realização de cada experimento a performance da membrana foi avaliada utilizando a própria solução oxidante, em relação ao fluxo de permeação e em relação à retenção de hipoclorito de sódio.

Os métodos analíticos e equipamentos utilizados estão descritos a seguir.

Análises de condutividade: As medidas de condutividade foram realizadas com condutímetro DIGIMED DM-31, com eletrodo modelo DMC-010M. O erro relativo máximo das medidas realizadas por este equipamento, conforme dados fornecidos pelo fabricante é de 3,16%.

Análises de pH: Para determinação dos valores de pH foi utilizado um pHmetro DIGIMED, modelo DM-20. O erro relativo máximo das medidas realizadas por este equipamento, conforme dados fornecidos pelo fabricante é de 1,97%.

Análises de alumínio, ferro total e cloro livre: Para análise destes elementos foi utilizado o espectrofotômetro Spectroquant NOVA 60, juntamente com conjuntos de reagentes da MERCK, específicos para cada elemento a ser analisado neste equipamento. Os erros relativos máximos das medidas realizadas são de 1,3, 1,02 e 2,0%, para as análises de alumínio, ferro total e cloro livre, respectivamente.

Análise da concentração de hipoclorito de sódio: As concentrações de NaClO, nas correntes de alimentação e permeado, foram determinadas indiretamente pelas medidas de condutividade elétrica.

3.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos experimentos das oxidações por cloro livre em presença de alumínio e ferro estão apresentados em gráficos de performance ao longo das seis horas de avaliação experimental, onde a própria solução oxidante de hipoclorito de sódio (NaClO) foi utilizada para as medições de retenção e fluxo de permeado. Os resultados dos experimentos estão representados nas Figuras 1 e 2 em termos de retenção de NaClO, e nas Figuras 3 e 4 em termos de fluxo de permeado.

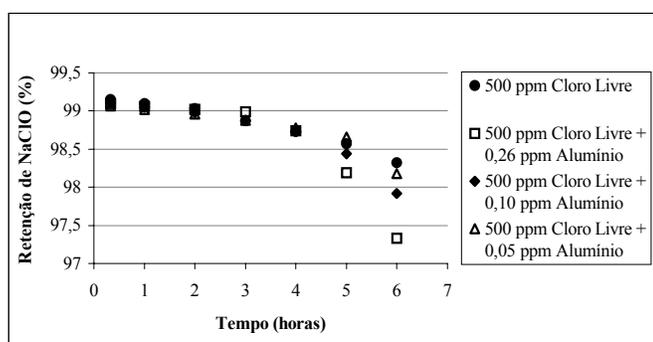


Figura 1 - Gráfico de retenção utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por alumínio.

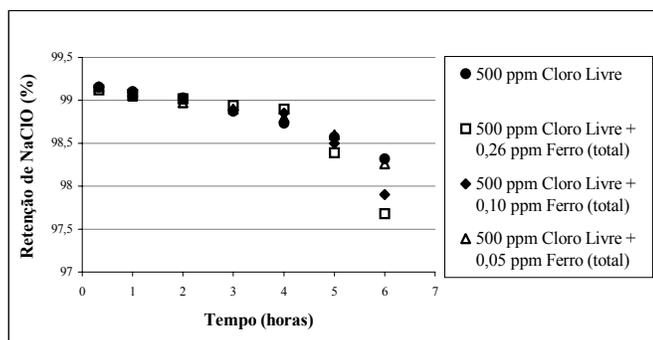


Figura 2 - Gráfico de retenção utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por ferro.

Segundo BYRNE (1995), membranas oxidadas têm suas retenções de sais reduzidas e seus fluxos de permeado aumentados. O que representa uma maior facilidade de passagem, tanto de sais quanto de solvente, pela camada seletiva da membrana e essas conseqüências serão proporcionais aos níveis de oxidações sofridos pelas membranas.

Nas Figuras 1 e 2 observam-se as reduções de retenção de NaClO causadas pelas oxidações sofridas pelas membranas, ao longo das seis horas de cada experimento, nas três concentrações de alumínio e ferro avaliadas. É possível notar que tanto nos experimentos com ferro quanto nos experimentos com alumínio as membranas reduziram suas performances de retenção, indicando que sofreram oxidação. As duas figuras mostram que os efeitos das oxidações foram tanto maiores quanto

maiores foram as concentrações de metal adicionadas em cada experimento, sendo que com 0,26 ppm de metal adicionado aos 500 ppm de cloro livre obteve-se os maiores níveis de oxidação.

As Figuras 3 e 4 representam os aumentos de fluxo de permeado provocados pelas oxidações sofridos pelas membranas, ao longo das seis horas de cada experimento. Similarmente à tendência dos gráficos das Figuras 1 e 2, os efeitos das oxidações foram mais acentuados para as maiores concentrações de metal adicionadas.

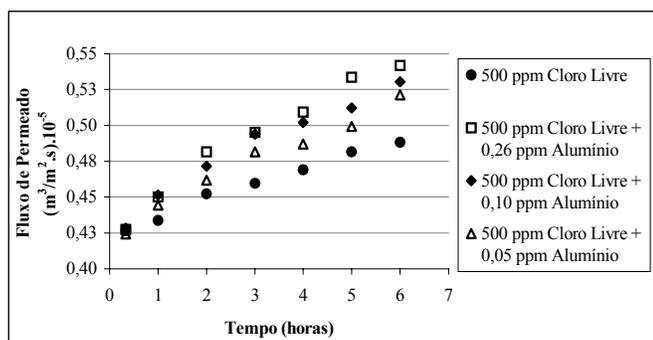


Figura 3 - Gráfico de fluxo de permeado utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por alumínio.

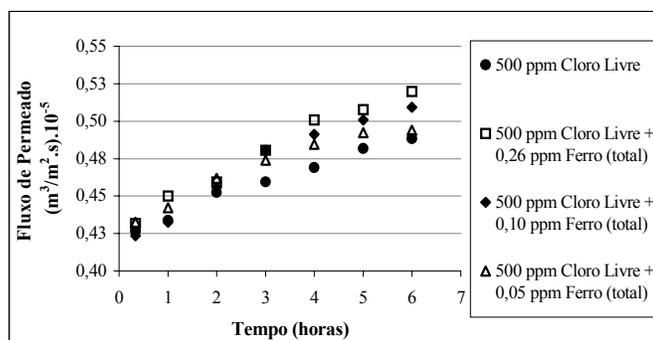


Figura 4 - Gráfico de fluxo de permeado utilizando solução oxidante de NaClO, ao longo de oxidação por cloro livre catalisada por ferro.

Conforme autores como BYRNE (1995), a catálise por ferro em oxidações por cloro livre é prevista ocorrer em membranas de OR. Os resultados dos gráficos das Figuras 2 e 4 mostram que as oxidações foram catalisadas pelo ferro, nas condições dos experimentos realizados. Quanto maior a concentração de ferro adicionada aos 500 ppm de cloro livre maior foi a taxa de oxidação observada nos experimentos.

Os resultados dos gráficos das Figuras 1 e 3 revelam que, similarmente ao ferro, o alumínio mostrou um poder de catálise sobre as oxidações por cloro livre em membranas de PA de OR, nas condições experimentais realizadas. Conforme já citado na Introdução, BYRNE (1995) expõe diversas semelhanças entre o ferro e o alumínio e suas tendências para reagir.

Os efeitos de catálise nas oxidações podem ser melhor observados nas Figuras 3 e 4, onde as taxas de oxidação se mostram diferentes desde o início de cada experimento realizado.

Comparando os resultados dos gráficos das Figuras 1, 2, 3 e 4, é possível atribuir ao alumínio um poder de catálise levemente superior ao do ferro, nas condições em que foram realizados os experimentos. Nas três concentrações de metal adicionadas, as taxas de oxidação foram levemente maiores para os experimentos com o alumínio, o que pode ser visualizado nas figuras em termos de redução de retenção e em termos de aumento de fluxo de permeado.

4.CONCLUSÕES

A análise dos resultados possibilita as seguintes conclusões:

- As oxidações por cloro livre nas membranas foram catalisadas em presença de ferro e alumínio, isto é, tiveram suas taxas de reação aumentadas, elevando o fluxo de permeado e reduzindo a retenção da camada seletiva. Apesar do alumínio não ser um metal de transição os resultados obtidos nas oxidações em presença deste metal mostraram taxas levemente superiores às taxas de oxidações por cloro livre em presença de ferro.
- As taxas de oxidações por cloro livre aumentaram à medida que aumentaram as concentrações de ferro e alumínio presentes. As membranas foram mais rapidamente oxidadas nos experimentos com as maiores concentrações de metais.

5.BIBLIOGRAFIA

BRADLEY, R. In: Amjad Z., Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial applications, Chapman & Hall, Chapter 7, Considerations in Membrane Cleaning, 1992.

BYRNE, W. Reverse Osmosis – A practical guide for Industrial Users, Tall Oaks Publishing Inc., 1995.

HENLEY, M. Membranes – Greater Chlorine Tolerance Can Mean Different Performance Characteristics, Ultrapure Water – March, p.16 – 20, 1996.

KIM, Y. H. Coagulants and Flocculants – Theory and Practice, Tall Oaks Publishing Inc. Chapter 2, Coagulation and Flocculation, p. 141-154, 1994.

REJUVENESCIMENTO DE MEMBRANAS DE POLIAMIDA DE OSMOSE REVERSA POR MEIO DE TRATAMENTO COM ÁCIDO TÂNICO

João Batista A. da Silva, Isabel C. Tessaro e Keiko Wada

Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
CEP: 90040-040 – Porto Alegre – RS – Brasil
Telefone: +55 5133163666 – Fax: +55 5133163277 – E-mail: isabel@enq.ufrgs.br

RESUMO – Osmose reversa (OR) é uma técnica eficiente e bastante utilizada para remover sais dissolvidos da água. Ao longo do tempo de uso, as membranas têm a retenção de sais diminuída. Denomina-se de rejuvenescimento o procedimento de aplicação de um tratamento químico sobre a superfície de membranas semi-permeáveis que busca o aumento de suas características de retenção. O objetivo deste trabalho é estudar a eficiência de técnicas de rejuvenescimento aplicadas sobre membranas de osmose reversa de poliamida (PA) utilizando ácido tânico como agente de rejuvenescimento. Os experimentos foram realizados em uma unidade de bancada com módulo para membranas planas ou em espiral. As variáveis estudadas foram: concentração e pH da solução de rejuvenescimento, e pressão da corrente de recirculação. Retenção de NaCl e sílica, e fluxo de permeado foram os parâmetros utilizados para avaliação da eficiência do processo.

PALAVRAS-CHAVE: osmose reversa (OR); rejuvenescimento; ácido tânico.

ABSTRACT – Reverse osmosis (RO) is an efficient techniques and of large use to remove dissolved salts from water. During operation the membranes retention of dissolved salts decrease. It's called rejuvenation the application procedure of a chemical treatment on semipermeable membrane surface in reason to improve its characteristics retention. The aim of this work is study the efficiency of rejuvenation techniques by tannic acid as rejuvenation agent applied on polyamide reverse osmosis membranes. The experiments were carried out in a laboratory scale using a flat sheet module or spiral wound. The variables studied were concentration and pH from rejuvenation solution and pressure of recirculation stream. NaCl and silica retention, and permeate flow were the parameters used to evaluate of process efficiency.

KEY WORDS: reverse osmosis (RO); rejuvenation; tannic acid.

1. INTRODUÇÃO

O processo de osmose reversa (OR) vem ampliando seu campo de aplicações com o desenvolvimento de membranas mais robustas, resistentes à ampla faixa de pH, elevadas temperaturas e a produtos químicos agressivos, além de apresentarem fluxos de permeados mais elevados.

Assim, a OR tornou-se uma tecnologia importante em muitas indústrias que necessitam de água desmineralizada para o seu processo.

O problema que advém do uso mais intenso de OR é que as membranas possuem um tempo de vida útil determinada pelas condições operacionais.

De acordo com BUECKER (2000) membranas de OR podem operar com condições satisfatórias de performance de 3 a 7 anos. Segundo AMJAD et al. (1992), durante o tempo de vida útil das membranas de OR, degradação gradual de performance é verificada. Procedimentos de limpeza química geralmente possuem vários graus de sucesso. Em alguns casos, perdas perceptíveis de retenção de sais pela membrana podem ocorrer, devido a fatores como: defeitos na superfície, danos por abrasão, ataques químicos (produtos utilizados em limpeza química e agentes oxidantes), e/ou hidrólise. Para restaurar as perdas de características de retenção de sais pela membranas, agentes químicos de rejuvenescimento podem ser utilizados.

1.1. Rejuvenescimento

BYRNE (1995) ressalta que as membranas podem responder diferentemente a tratamentos de rejuvenescimento, dependendo dos tipos e origens das degradações, dos níveis dos danos e do estado de limpeza da superfície. O tratamento tem pouco efeito se o dano causado na membrana for mecânico, tal como lesões na camada seletiva ou rompimento da colagem dos envelopes de membranas. É muito improvável obter bons resultados de rejuvenescimento em casos de degradações de membranas que tenham a retenção de sais reduzida a níveis inferiores a 75%.

Dois mecanismos, de acordo com AMJAD et al. (1992), têm sido propostos para explicar o efeito de rejuvenescimento: “tratamento superficial”, adicionando uma cobertura na superfície da membrana, e “tamponamento de orifícios”.

BYRNE (1995) acrescenta que a membrana deve estar livre de "fouling" ou incrustações para o tratamento químico de rejuvenescimento aderir à sua superfície. Sistemas de OR deveriam passar por uma limpeza química antes de receber um tratamento de rejuvenescimento. A efetividade da limpeza química sobre a superfície das membranas pode ditar o sucesso do tratamento de rejuvenescimento aplicado. O tempo que o tratamento superficial permanece aderido à membrana é imprevisível e depende de uma combinação de fatores, tais como: condições físicas das membranas, compatibilidade entre o agente químico utilizado e a membrana, procedimento de aplicação do tratamento, configuração das membranas e condições de operação do sistema de OR.

Tratamentos de rejuvenescimento podem ser aplicados de diferentes maneiras sobre as membranas. Alguns procedimentos podem ser realizados com o sistema de OR em operação normal, sendo que o agente químico de rejuvenescimento é injetado na própria corrente de alimentação. Tratamentos de rejuvenescimento também podem ser realizados em procedimentos com condições particulares de operação, assim como são realizadas as limpezas químicas em suas condições específicas de operação.

Técnicas de rejuvenescimento foram estudadas por fabricantes de membranas durante a década de 1970 e meados da década de 80. AMJAD et al. (1992) citam alguns produtos químicos utilizados como agentes de rejuvenescimento, entre eles o ácido tânico. O polivinil metil éter “PVME” (da BASF) e o ácido tânico mostraram-se efetivos em restaurar as características de retenção de sais de módulos de fibras ocas B-9 e B-10, fabricados pela DUPONT com membranas de PA. Diminuição de fluxo de permeado menor que 5%, e pequeno aumento, geralmente insignificante, da pressão diferencial entre a corrente de alimentação e de concentrado podem ocorrer.

O ácido tânico é obtido da fermentação de vegetais e representa um polifenol solúvel em água. A estrutura orgânica e fórmula química podem possuir pequenas variações dependendo do vegetal que o originou, sendo normalmente obtido como $C_{14}H_{10}O_9$ ou $C_{76}H_{52}O_{46}$.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A descrição dos materiais utilizados abrange: as membranas, os produtos químicos e os equipamentos de OR.

2.1. Materiais

Foram utilizadas membranas compostas de OR comerciais, assimétricas de poliamida, carregadas negativamente e suportadas em polissulfona. Nos experimentos onde se utilizou o módulo para membrana plana, as membranas foram provenientes do fabricante TRISEP, e no experimento em que foi utilizado módulo em espiral a membrana foi fornecida pelo fabricante FILMTEC. De acordo com os fabricantes, as características das membranas estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das membranas utilizadas.

Membrana	TRISEP ACM1-TSA	FILMTEC BW30-2514
Pressão Máxima de Operação (bar)	41,37	41,37
Temperatura Máxima de Operação (°C)	45	45
pH de Operação	4 - 11	2 - 11
Tolerância ao Cloro Livre (ppm)	<0,1	<0,1

As soluções de rejuvenescimento utilizadas foram preparadas com ácido tânico comercial (C₁₄H₁₀O₉) da VERONESE.

As soluções utilizadas para limpeza química das membranas de OR foram preparadas a partir de hidróxido de sódio (pureza analítica) da SYNTH e lauril sulfato de sódio (LSS) da HENKEL.

Os ensaios de oxidação das membranas foram realizados com hipoclorito de sódio (10 – 12 %) da LABORPEQ.

Para avaliações de performance das membranas nos experimentos foram utilizadas duas soluções:

- Solução sintética contendo 2000 ppm de NaCl (pureza analítica) da MERCK.
- Água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, com características físico-químicas variáveis, mas tipicamente com pH entre 5,8 – 6,0, condutividade de 110 mS/cm e concentração de 13 ppm de sílica.

A solução sintética com 2000 ppm de NaCl foi utilizada em todos os experimentos realizados, a fim de padronizar avaliações de retenção deste sal pelas membranas. A água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ foi utilizada apenas no experimento onde se julgou necessária a avaliação da retenção de sílica solúvel pela membrana. Com exceção da água de alimentação da OR da empresa AZ, todas as soluções foram preparadas utilizando água destilada como solvente.

Foram utilizados nos experimentos dois sistemas de OR em bancada. Os dois sistemas diferem basicamente na geometria das membranas utilizadas: sistema utilizando módulo para membrana plana e sistema utilizando módulo para membrana em espiral.

Os sistemas de OR em bancada utilizados são compostos por dois diferentes módulos para membrana (um para membrana plana e outro para membrana em espiral), uma bomba de engrenagens, um tanque de alimentação, um banho termostático com serpentina, pré-filtro, manômetros, termopar e válvulas agulha e esfera. Os dois sistemas fazem uso, em momentos distintos, dos seguintes equipamentos: o tanque de alimentação com serpentina, bomba de engrenagens, banho termostático, termopar e pré-filtro.

O sistema de OR em bancada com módulo para membrana em espiral utiliza um sistema fornecida pela FLUID SYSTEMS, o qual é constituída por um conjunto independente de módulo para membrana em espiral de 6,10 cm (2,4 polegadas) de diâmetro, válvulas e manômetros.

Um desenho esquemático, comum aos dois sistemas de OR em bancada utilizados, está apresentado conforme mostra a Figura 1.

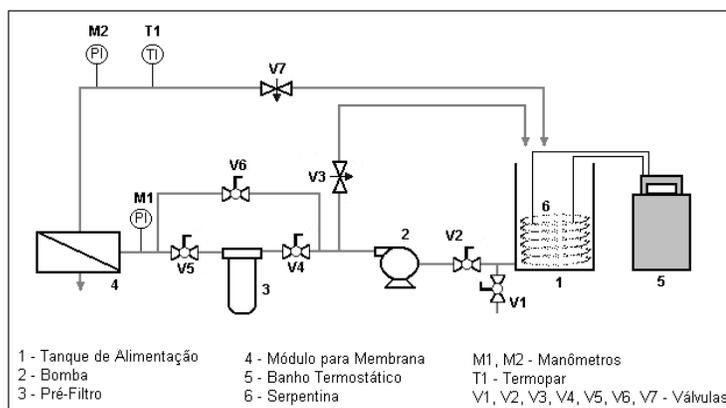


Figura 1 – Desenho esquemático do sistema de Osmose Reversa.

Conforme mostram as Figuras 2 e 3 estão apresentadas fotos dos equipamentos onde é possível visualizar os constituintes compartilhados pelos dois sistemas.

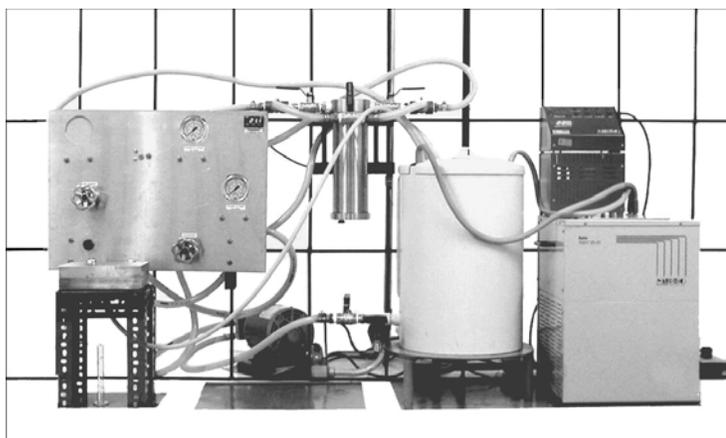


Figura 2 – Fotografia do equipamento do sistema de OR, com módulo para membrana plana.

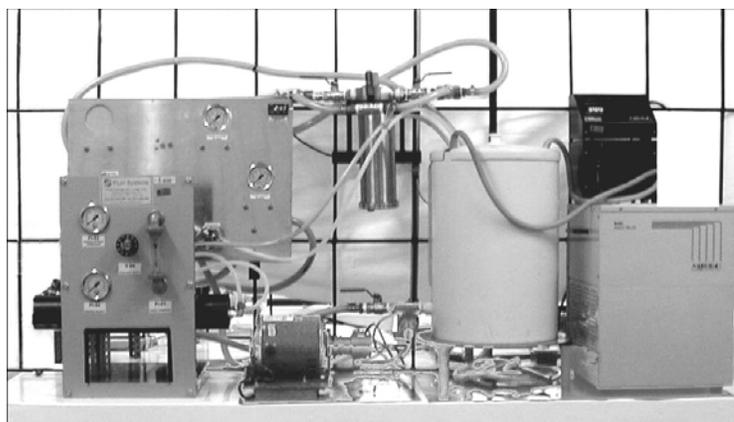


Figura 3 – Fotografia equipamento do sistema de OR, com módulo para membrana em espiral.

2.2. Métodos

A descrição dos métodos empregados abrange: a metodologia experimental e os experimentos realizados, as análises de condutividade, pH e análises espectrofotométricas utilizadas para a determinação das concentrações nas correntes de permeado e alimentação.

Metodologia experimental: A fim de reduzir a performance de retenção de sais das membranas utilizadas nos experimentos, foram realizados dois procedimentos, descritos a seguir. Primeiramente as membranas foram oxidadas por 8 horas com solução contendo 500 ppm de cloro livre, nas seguintes condições de operação: temperatura de 25°C, vazão de $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e pressão de 7,85 bar ($8,0 \text{ kgf/cm}^2$). Este procedimento reduziu a retenção de NaCl aproximadamente de 99,35% para 97,0%. Posteriormente foram realizadas 3,5 horas de recirculação de solução alcalina, pH 11,0, contendo hidróxido de sódio + 0,5% de LSS, vazão de alimentação com $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ a 40 °C e 1,96 bar (2 kgf/cm^2), o que reduziu a retenção de NaCl aproximadamente de 97,0% para aproximadamente 90,5%.

Em cada experimento, após a redução da performance de retenção de sais das membranas o procedimento de tratamento de rejuvenescimento foi realizado e sua eficiência avaliada.

Experimentos realizados: Foram realizados 13 experimentos, divididos em 2 fases. Numa primeira fase, com o intuito de otimizar o procedimento, foram avaliadas a concentração e o pH da solução de rejuvenescimento e pressão da corrente de recirculação. Nesta fase foram utilizadas membranas planas ACM1, e estas foram avaliadas antes e depois de cada procedimento de rejuvenescimento utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl. As performances das membranas foram medidas em relação ao fluxo de permeado e em relação à retenção de NaCl, em condições padronizadas de operação: com vazão de alimentação mantida em $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ a 25°C e 11,77 bar ($12,0 \text{ kgf/cm}^2$). As medidas de fluxo de permeado e retenção de NaCl foram realizadas em intervalos de 6 minutos, durante 30 minutos de avaliação.

Numa segunda fase, foram avaliados os tempos de campanha da ação rejuvenescedora em membrana em espiral. Nesta fase utilizou-se água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ para avaliação da performance das membranas rejuvenescidas.

Os métodos analíticos e equipamentos utilizados estão descritos a seguir.

Análises de condutividade: As medidas de condutividade foram realizadas com condutivímetro DIGIMED DM-31, com eletrodo modelo DMC-010M. O erro relativo máximo das medidas realizadas por este equipamento, conforme dados fornecidos pelo fabricante é de 3,16%.

As medidas de condutividade do último experimento, realizado na estação de tratamento de água da empresa AZ durante 30 dias, foram realizadas utilizando um condutivímetro ORION modelo 125. O erro relativo máximo das medidas realizadas por este equipamento, conforme dados fornecidos pelo fabricante é de 2,5%.

Análises de pH: Para determinação dos valores de pH foi utilizado um pHmetro DIGIMED, modelo DM-20. O erro relativo máximo das medidas realizadas por este equipamento, conforme dados fornecidos pelo fabricante é de 1,97%.

Análises de sílica solúvel e cloro livre: Para análise destes elementos foi utilizado o espectrofotômetro Spectroquant NOVA 60, juntamente com conjuntos de reagentes da MERCK, específicos para cada elemento a ser analisado neste equipamento. Os erros relativos máximos das medidas realizadas são de 2,0 e 1,7%, para as análises de cloro livre e sílica, respectivamente.

As análises de sílica do último experimento, realizado na Estação de Tratamento de Água da empresa AZ durante 30 dias, foram realizadas com o espectrofotômetro de emissão em plasma de argônio indutivamente acoplado, THERMO JARRELL Ash Icap 61, do laboratório da empresa AZ. Foi utilizado o método SM 3120 B - 93 – *Inductively Coupled Plasma (ICP) Method*, de acordo com CLESCERI et al. (1998). Estas medidas possuem um erro relativo máximo de 0,94%, conforme dados fornecidos pelo laboratório da empresa AZ.

Análise da concentração de NaCl: As concentrações de NaCl, nas correntes de alimentação e permeado, foram determinadas indiretamente pelas medidas de condutividade elétrica. A fim de converter medidas de condutividade elétrica em equivalente concentração de NaCl foi utilizada uma curva experimental de calibração, previamente preparada. A condutividade elétrica da água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ foi convertida em equivalente concentração de NaCl, para os cálculos de retenção de sais daquela água.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os experimentos de rejuvenescimento foram realizados tomando-se como base parâmetros pré-definidos de operação; a vazão de alimentação foi mantida em $30,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, o pH da solução foi reduzido para 4,0 com adição de ácido cítrico, a temperatura em $40 \text{ }^\circ\text{C}$, a pressão em $2,94 \text{ bar}$ (3 kgf/cm^2) e o tratamento de rejuvenescimento foi realizado em 60 minutos de recirculação. As soluções de alimentação foram preparadas com 80 ppm de ácido. Nos experimentos de otimização do procedimento de rejuvenescimento foi variado um único parâmetro por vez, sendo que os demais parâmetros operacionais e físico-químicos permaneceram inalterados.

As avaliações de fluxo de permeado e retenção de NaCl, ao longo dos 30 minutos de avaliação, apresentam diferenças muito pequenas entre as cinco medidas realizadas. Os resultados dos experimentos estão mostrados em tabelas onde os valores de fluxo de permeado e retenção de NaCl representam uma média aritmética entre as cinco medidas realizadas ao longo dos 30 minutos de avaliação experimental.

Tabela 2 – Resultados dos experimentos da fase “A”, onde foram variados o pH das soluções de rejuvenescimento.

Exp.	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$). 10^{-5}
A .1	Inicial	$99,29 \pm 0,03$	$0,66 \pm 0,01$
	Após Oxidação	$96,90 \pm 0,14$	$3,13 \pm 0,05$
	Após 3,5h de Limp. alcalina e LSS	$90,43 \pm 0,43$	$5,57 \pm 0,08$
	Após Rejuvenescimento (pH 3,0)	$98,14 \pm 0,08$	$2,61 \pm 0,04$
A .2	Inicial	$99,30 \pm 0,03$	$0,65 \pm 0,01$
	Após Oxidação	$96,91 \pm 0,14$	$3,13 \pm 0,05$
	Após 3,5h de Limp. alcalina e LSS	$90,39 \pm 0,43$	$5,09 \pm 0,08$
	Após Rejuvenescimento (pH 4,0)	$98,14 \pm 0,08$	$2,74 \pm 0,04$
A .3	Inicial	$99,35 \pm 0,03$	$0,67 \pm 0,01$
	Após Oxidação	$96,95 \pm 0,14$	$3,02 \pm 0,05$
	Após 3,5h de Limp. alcalina e LSS	$90,46 \pm 0,43$	$5,15 \pm 0,08$
	Após Rejuvenescimento (pH 5,0)	$98,13 \pm 0,08$	$2,66 \pm 0,04$
A .4	Inicial	$99,27 \pm 0,03$	$0,68 \pm 0,01$
	Após Oxidação	$97,05 \pm 0,13$	$3,00 \pm 0,05$
	Após 3,5h de Limp. alcalina e LSS	$90,63 \pm 0,42$	$5,37 \pm 0,08$
	Após Rejuvenescimento (pH 2,4)	$94,08 \pm 0,26$	$3,65 \pm 0,05$
A .5	Inicial	$99,33 \pm 0,03$	$0,65 \pm 0,01$
	Após Oxidação	$96,87 \pm 0,14$	$2,92 \pm 0,04$
	Após 3,5h de Limp. alcalina e LSS	$90,40 \pm 0,43$	$5,24 \pm 0,08$
	Após Rejuvenescimento (pH 2,1)	$96,23 \pm 0,17$	$3,35 \pm 0,05$

Observando os resultados do experimento A.4 da Tabela 2, quando o pH foi reduzido para 2,4 a retenção de NaCl após o rejuvenescimento também foi reduzida sensivelmente, quando comparada ao procedimento de rejuvenescimento com pH 3,0, 4,0 e 5,0 do experimentos A.1, A.2 e A.3, respectivamente. Os resultados do experimento A.5, onde o pH foi reduzido para 2,1, mostram que a performance do rejuvenescimento também foi reduzida. Por outro lado, a performance do procedimento com pH 2,1 foi superior ao com pH 2,4.

Valores de pH inferiores a 2,1 não foram experimentados por estarem muito abaixo do valor mínimo de pH de operação, especificado pelo fabricante da membrana ACM1.

Tabela 3 – Resultados dos experimentos da fase “A”, onde foram variados a pressão da corrente de recirculação das soluções de rejuvenescimento.

Exp.	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado ($m^3/m^2.s$). 10^{-5}
A.6	Inicial	99,29 ± 0,03	0,65 ± 0,01
	Após Oxidação	96,98 ± 0,13	3,00 ± 0,05
	Após 3,5h de Limp. alcalina e LSS	90,19 ± 0,44	5,21 ± 0,08
	Após Rejuvenesc. (6,0 kgf/cm ²)	98,18 ± 0,08	2,58 ± 0,04
A.7	Inicial	99,27 ± 0,03	0,66 ± 0,01
	Após Oxidação	97,07 ± 0,13	2,88 ± 0,04
	Após 3,5h de Limp. alcalina e LSS	90,63 ± 0,42	5,12 ± 0,08
	Após Rejuvenesc. (8,0 kgf/cm ²)	98,12 ± 0,08	2,71 ± 0,04
A.8	Inicial	99,32 ± 0,03	0,65 ± 0,01
	Após Oxidação	96,93 ± 0,14	2,99 ± 0,04
	Após 3,5h de Limp. alcalina e LSS	90,40 ± 0,43	5,50 ± 0,08
	Após Rejuvenesc. (2,0 kgf/cm ²)	98,11 ± 0,08	2,88 ± 0,04

Os resultados dos experimentos A.6, A.7 e A.8, representados na Tabela 3, mostram que os procedimentos de rejuvenescimento obtiveram performance muito similares ao do experimento A.2, que foi realizado com 2,94 bar (3,0 kgf/cm²), e também com pH 4,0.

Tabela 4 – Resultados dos experimentos da fase “A”, onde foram variados a concentração de ácido tânico das soluções de rejuvenescimento.

Exp.	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado ($m^3/m^2.s$). 10^{-5}
A.9	Inicial	99,31 ± 0,03	0,65 ± 0,01
	Após Oxidação	96,96 ± 0,14	2,99 ± 0,04
	Após 3,5h de Limp. alcalina e LSS	90,28 ± 0,43	5,44 ± 0,08
	Após Rejuvenesc. (160 ppm)	98,52 ± 0,07	2,79 ± 0,04
A.10	Inicial	99,35 ± 0,03	0,66 ± 0,01
	Após Oxidação	96,78 ± 0,14	2,97 ± 0,04
	Após 3,5h de Limp. alcalina e LSS	90,49 ± 0,43	5,21 ± 0,08
	Após Rejuvenesc. (240 ppm)	98,68 ± 0,06	2,50 ± 0,04
A.11	Inicial	99,27 ± 0,03	0,64 ± 0,01
	Após Oxidação	96,72 ± 0,15	2,86 ± 0,04
	Após 3,5h de Limp. alcalina e LSS	90,59 ± 0,42	5,50 ± 0,08
	Após Rejuvenesc. (400 ppm)	98,67 ± 0,06	2,42 ± 0,04

Observando a Tabela 4, os resultados dos experimentos indicam que utilizando concentrações maiores de ácido tânico a eficiência do rejuvenescimento aumentou, quando comparados com a eficiência do rejuvenescimento utilizando 80 ppm, do procedimento do experimento A.2.

No experimento A.9 a eficiência do rejuvenescimento com 160 ppm de ácido tânico aumentou consideravelmente, em termos de retenção de NaCl passou os (98,14 ± 0,08)% do experimento A.2 para um valor de (98,52 ± 0,07)%. No experimento A.10 a eficiência do rejuvenescimento utilizando 240 ppm de ácido tânico aumentou para (98,68 ± 0,06)%. Comparando os resultados dos experimentos A.10 e A.11 nota-se que foi insignificante a diferença entre as eficiências dos rejuvenescimentos utilizando 240 e 400 ppm.

Nos experimentos da fase “B” foi utilizado o melhor procedimento obtido com os resultados da fase “A”, ou seja, do procedimento inicial foi alterado somente a concentração de ácido tânico de 80 para 240 ppm. Nos experimentos desta fase a membrana módulo em espiral BW30 foi utilizada.

Tabela 6 – Resultados do experimento B.1, antes do rejuvenescimento.

Exp.	Etapa Avaliada	Retenção de NaCl (%)	Fluxo de permeado ($m^3/m^2.s$). 10^{-5}
B.1	Inicial	99,17 ± 0,04	0,40 ± 0,01
	Após Oxidação	96,99 ± 0,13	1,21 ± 0,02
	Após 2h de Limp. alcalina e LSS	85,61 ± 0,64	1,82 ± 0,03

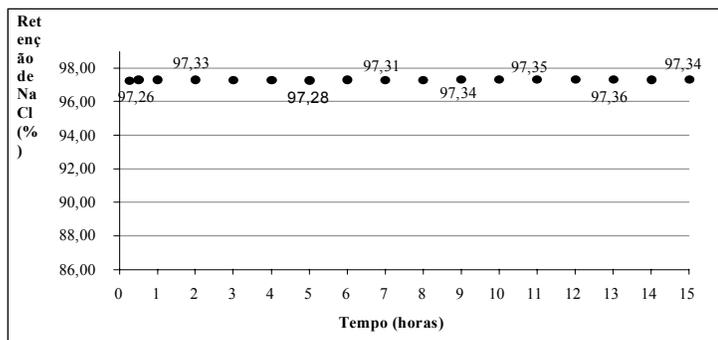


Figura 4 – Gráfico de retenção de NaCl utilizando solução contendo 2000 ppm de NaCl, avaliação do rejuvenescimento do experimento B.1.

A performance de retenção de NaCl do experimento B.1, conforme mostrado na Figura 4, manteve-se constante nas 15 horas de avaliação.

Após a realização do experimento B.1 foi realizada uma limpeza química na membrana BW30. As médias dos resultados da limpeza química da membrana BW30 estão representadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do experimento B.2, antes do rejuvenescimento.

Exp.	Etapa Avaliada	Retenção de Sais (%)	Retenção de Si (%)	Fluxo de permeado ($m^3/m^2.s$). 10^{-5}
B.2	Após Limp. Quím.	88,14 ± 0,42	71,34 ± 0,69	1,62 ± 0,02

A membrana BW30 foi novamente rejuvenescida para avaliação do experimento B.2. Nesta avaliação o sistema de OR em bancada com módulo para membrana em espiral, que utiliza um sistema fornecida pela FLUID SYSTEMS, foi deslocado para ETA da empresa AZ a fim de ser alimentado continuamente pela água de alimentação do sistema de OR. As condições de operação durante este experimento acompanharam as oscilações da água de alimentação daquele sistema.

A avaliação foi realizada em 30 dias de operação, e as variações da temperatura e pressão da corrente de alimentação estão mostradas na Tabela 8. A vazão da corrente de alimentação foi mantida em aproximadamente $1 \times 10^{-4} m^3/s$. Conforme mostra a Figura 5, os resultados do experimento B.2 estão representados em termos de retenção de sais e de sílica.

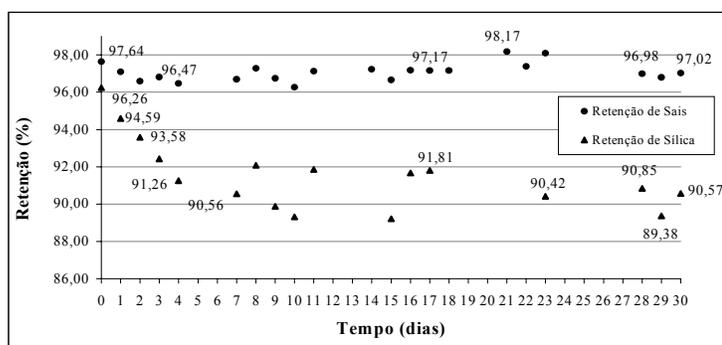


Figura 5 – Gráfico de retenção de sais e sílica utilizando água de alimentação do sistema de OR da empresa AZ, avaliação do rejuvenescimento do experimento B.2.

Tabela 8 – Condições de operação do experimento B.2, realizado na ETA da empresa AZ.

Tempo (dias)	Temp. da alim. (°C)	Pressão da alim. (bar)	Tempo (dias)	Temp. da alim. (°C)	Pressão da alim. (bar)
0	19,5	10,5	15	19,7	6,5
1	19,4	10,5	16	19,1	10,5
2	19,7	10,0	17	18,8	10,7
4	19,8	*	18	19,4	10,5
7	19,0	*	21	20,4	10,7
8	18,8	10,5	22	20,6	10,6
9	19,0	7,0	23	20,1	9,8
10	19,5	6,6	28	18,5	9,5
11	19,0	10,0	29	17,9	7,5
14	20,0	10,0	30	16,2	10,0

Conforme os resultados mostrados na Figura 5, a retenção de sais permaneceu praticamente constante ao longo dos 30 dias de avaliação, iniciando com $(97,64 \pm 0,08)\%$ e atingindo o trigésimo dia com $(97,02 \pm 0,11)\%$ de retenção de sais. A retenção de sílica sofreu um decréscimo nos 4 primeiros dias, e permaneceu praticamente constante nos outros 26 dias de avaliação.

O decréscimo observado na retenção de sílica pela membrana foi, possivelmente, efeito do desprendimento do ácido tânico da superfície da membrana. Apesar dos valores de retenção de sílica pela membrana terem decrescido com o tempo de operação, comparando com os dados da Tabela 7 é interessante notar que a retenção de sílica da membrana degradada era de $(71,34 \pm 0,69)\%$, e a retenção de sais era de $(88,14 \pm 0,42)\%$ antes do rejuvenescimento, valores inferiores aos resultados de performance do trigésimo dia de avaliação do rejuvenescimento da membrana do experimento B.2.

4. CONCLUSÕES

A análise dos resultados possibilita as seguintes conclusões:

- O ácido tânico foi utilizado em tratamentos de rejuvenescimento e recuperou a valores superiores a 98% a retenção de NaCl de membranas preliminarmente degradadas e com retenção de NaCl reduzida a aproximadamente 90,4%.
- Diferentes valores de pressão e pH da corrente de alimentação não aumentaram a eficiência dos tratamentos de rejuvenescimento utilizando soluções contendo 80 ppm de ácido tânico.
- A eficiência do tratamento de rejuvenescimento utilizando ácido aumentou quando foram utilizadas maiores concentrações do ácido. Mas, parece existir um limite de concentração acima do qual a eficiência não foi mais aumentada, nas condições experimentais realizadas.
- Membrana módulo em espiral BW30, rejuvenescida utilizando ácido tânico, teve os valores de retenção de sais reduzidos em 0,63%, após 30 dias de avaliação contínua utilizando água de alimentação

do sistema de OR da empresa AZ, e os valores de retenção de sílica reduziram em 5,9% durante o mesmo tempo de avaliação.

5. BIBLIOGRAFIA

AMJAD, Z.; WORKMAN, K. R. and CASTETE, D. R. In: Amjad Z., Reverse Osmosis – Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial applications, Chapman & Hall, Chapter 7, Considerations in Membrane Cleaning, 1992.

BUECKER, B. Fundamental of Steam generation Chemistry, Penn Well Corporation, Makeup Water Treatment, 2000.

BYRNE, W. Reverse Osmosis – A practical guide for Industrial Users, Tall Oaks Publishing Inc., 1995.

CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E. and EATON, A. D. Standard Methods, 20th Edition, Chapter 3, p.3-37 – 3-43, 1998.

APÊNDICE A

DADOS DOS FABRICANTES SOBRE AS MEMBRANAS

FILMTEC
2.5" Brackish Water RO Element Specifications

	Product Water Flow Rate GPD (m ³ /D)	Minimum Salt Rejection Cl ⁻ (%)	Typical salt Rejection Cl ⁻ (%)
BW30-2514	150 (0.6)	96	98
BW30-2521	250 (0.95)	96	98
BW30-2540	600 (2.4)	96	98

1. Permeate flow and salt rejection based on the following test conditions: 2000 PPM NaCl, 225 PSI (1.6 MPa), 77°F (25°C), pH 8, and recovery as indicated below. 2. Flow rates for individual elements may vary 15%

Operating Conditions

Membrane Type	Thin-Film Composite
Maximum Operating Pressure	800 PSI (4.1 MPa)
Maximum Operating Temperature	113°F (45°C)
Maximum Feed turbidity	1 NTU
Free Chlorine Tolerance	<0.1 PPM
pH Range:	
Continuous operation	2 - 11
Short-term (30 min) Cleaning	1 - 12
Maximum Feed Flow	6 GPM (23 LPM)
Maximum Feed Silt Density index	SDI 5

Single Element Recovery (Permeate Flow to Feed Flow)	Recovery	Dimensions (inches)			
		A	B	C	D
BW30-2514	0.05	14.0	1.1	0.75	2.4
BW30-2521	0.08	21.0	1.1	0.75	2.4
BW30-2540	0.15	40.0	1.1	0.75	2.4

3. Consult Filmtec's most recent DESIGN GUIDELINES for multiple element applications and recommended element recovery rates for various feed sources.
4. For more information, contact a Film Tec representative.
5. Element to fit 2.45 inch I.D. pressure vessel.

609-08010

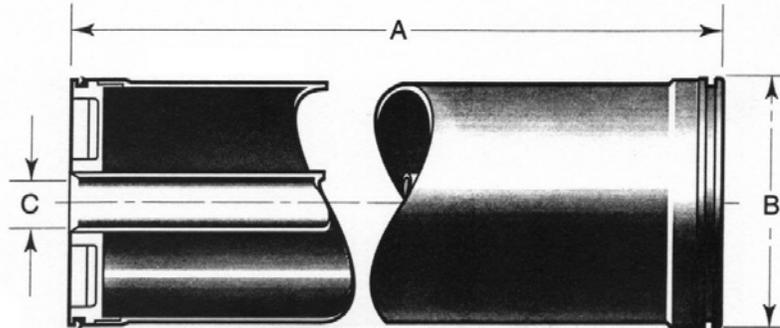


PRODUCT SPECIFICATION

8" ACM™ RO Element Series

Model	Permeate flow GPD (m ³ /day)*	Average Salt Rejection (%)	Minimum Salt Rejection (%)
8040-ACM1-TSA	7,500 (28)	99.5	99.0
8040-ACM2-TSA	9,000 (34)	99.5	99.0
8040-ACM3-TSA	10,500 (39.7)	99.2	98.5

Performance based on the following test conditions: 2000 ppm NaCl, 225 psi, 25°C, 15% recovery, pH 8, 30 minutes operation.



DESIGN DATA

Membrane Type.....	ACM™ Fully Aromatic Polyamide Advanced Composite Membrane
Configuration.....	Spiral Wound, Fiberglass Outer Wrap
Recommended Applied Pressure.....	100 - 300 psi (0.7 - 2.1 MPa)
Maximum Applied Pressure.....	600 psi (4.1 MPa)
Recommended Operating Temperature.....	35 - 113°F (2 - 45°C)
Feedwater pH Range.....	4 - 11 continuous
Chlorine Tolerance.....	<0.1 ppm
Maximum Feed Flow.....	80 GPM (18 m ³ /hr)
Minimum Brine Flow / Permeate Flow Ratio.....	5:1
Maximum SDI (15 minutes).....	5.0
Maximum Turbidity.....	1 NTU

Element Weight	Length (A)	Diameter (B)	Permeate Tube (C)
45 (20)	40.0 (1016)	7.9 (202)	1.5 (38.1)

Units in pounds and inches, units in parenthesis in kg. and mm.

* Permeate flow is clean water flux at standard conditions above. Not applicable for all feedwater conditions. Individual element's permeate flow may vary ± 15%.

TriSep Corporation

93 South La Patera Lane • Goleta, California 93117, U.S.A.
Phone: (805) 964-8003 • Fax: (805) 964-1235 • E-Mail: apps@trisep.com

(5/97)