



## PREPARAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE MEMBRANAS EM ELETRODIÁLISE PARA DESSALINIZAÇÃO DE EFLUENTE

**Naiara Camila Martins** – [naiara.martins@gmail.com](mailto:naiara.martins@gmail.com)

Universidade Feevale

Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas

Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais

ERS-239, 2755

93525-075 – Novo Hamburgo – RS

**Laura Bittencourt Rodrigues** – [rodrigueslaurab@gmail.com](mailto:rodrigueslaurab@gmail.com)

Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale

**Marco Antônio Siqueira Rodrigues** – [marcor@feevale.br](mailto:marcor@feevale.br)

Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale

**Ricardo Martins de Martins** – [ricardomartins@feevale.br](mailto:ricardomartins@feevale.br)

Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale

**Resumo:** A crise hídrica é uma realidade não só brasileira, mas mundial. Desta forma, o desenvolvimento e o aprimoramento de tecnologias limpas para o tratamento de águas e efluentes são necessários. Neste sentido, este trabalho visa a preparação e a caracterização de membranas de troca iônica a serem aplicadas em eletrodialise, bem como a avaliação de seu desempenho quanto à dessalinização de um efluente, segundo aplicação da referida técnica. Membranas heterogêneas, catiônicas e aniônicas, foram preparadas a partir de resinas de troca iônica e de um polímero base (policloreto de vinila). As membranas apresentaram capacidade de troca iônica, absorção de água e condutividade inferiores às membranas HDX100 e HDX200, membranas estas comerciais utilizadas como referência, mas superiores a outras reportadas na literatura. Quanto aos ensaios de dessalinização de efluente por eletrodialise, quando utilizadas as membranas comerciais, houve uma redução do conteúdo de sais igual a 47%, enquanto que para as membranas sintetizadas, este valor foi de 37% sob as mesmas condições de ensaio. Apesar de os resultados para as membranas desenvolvidas neste trabalho serem inferiores aos obtidos para as membranas comerciais utilizadas como referência, eles são promissores, pois validam os materiais empregados e apontam para a possibilidade de obterem-se melhores resultados com a continuidade da pesquisa.

**Palavras-chave:** Eletrodialise, membrana de troca iônica, tratamento de efluente.



## MEMBRANE PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION IN ELECTRODIALYSIS FOR WASTEWATER DESALINATION

**Abstract:** *The water crisis is a reality not only in Brazil, but worldwide. Thus, the development and improvement of clean technologies for treatment of water and wastewater are needed. In this subject, this work aims the preparation and characterization of ion exchange membranes to be applied in electrodialysis. It will be evaluated the membranes performance in effluent desalination from this technique. Heterogeneous membranes, cationic and anionic, were prepared from ion exchange resins and a base polymer (polyvinyl chloride). The prepared membranes showed ion exchange capacity, water absorption and conductivity lower than HDX100 and HDX200 membranes, commercial available ones used as reference, but superior to others reported in the literature. Concerning the effluent desalination by electrodialysis, when used commercial membranes, the desalination was 47% whereas for the synthesized membranes this value was 37%, under the same test conditions. Although the results for the membranes developed in this work are lower than those obtained for the commercial membranes used as reference, they are promising because validate the used materials and point out to the possibility of obtaining better results in the continuity of this research.*

**Keywords:** *Electrodialysis, ion exchange membrane, wastewater treatment*

### 1. INTRODUÇÃO

Embora mais de 70% do planeta sejam constituídos de água, somente cerca de 3% do total se encontram disponíveis para consumo. Além disso, a exploração industrial, urbana, agrícola e o avanço das ciências médicas têm contribuído para o aumento populacional, o qual eleva a necessidade de consumo de água, tornando-a escassa (MOTA, 2000). Desta forma, a necessidade de tratamento faz-se cada vez mais necessária, seja para consumo, para reutilização ou para atingir parâmetros legais de lançamento de efluentes em corpos hídricos. Neste contexto, os processos de separação por membranas constituem o mais avançado tipo de tratamento de água e efluentes (VOGEL & MEIER-HAACK, 2014), sendo a primeira grande inovação desde o desenvolvimento das tecnologias convencionais de tratamento de água no início do século passado (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

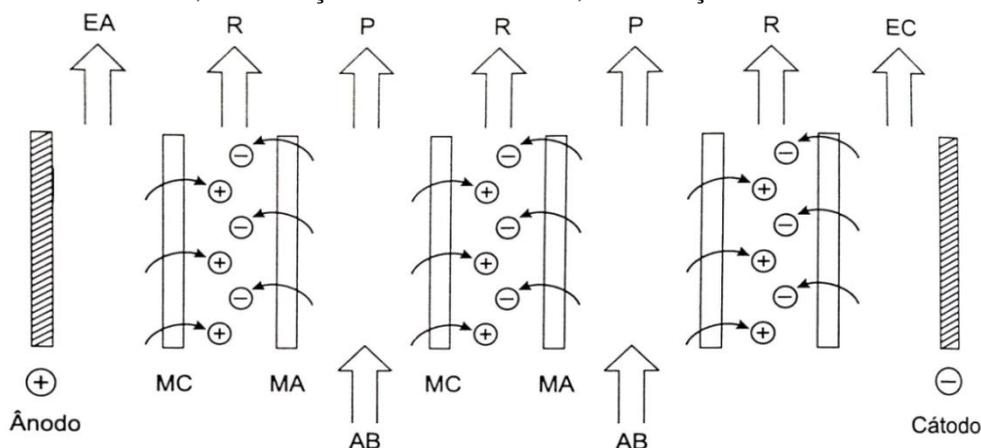
Atualmente, membranas de troca iônica são utilizadas em sistemas de eletrodialise (ED), em escala industrial, na dessalinização de água do mar, no processamento de água salobra e no tratamento de efluentes, além de aplicações na área de biotecnologia e em setores de alimentação (GARCIA-VASQUEZ *et al.*, 2013). O uso da eletrodialise no tratamento de águas e de efluentes não apenas torna os processos mais limpos e mais eficientes energeticamente, como também possibilita a recuperação de íons de interesse (XU, 2005).

As membranas de troca iônica representam um papel importante em um sistema de eletrodialise, e seu desempenho depende fortemente das características destas membranas (TANAKA, 2015). Entretanto, no Brasil, as membranas utilizadas são importadas, pois não há produção nacional. Assim, o desenvolvimento deste tipo de membrana dentro do país faz com que a tecnologia esteja cada vez mais ao alcance das empresas de tratamento de água e das empresas que necessitam de tecnologias mais limpas para tratamento de águas de reúso ou de efluentes.

## 1.1. A eletrodialise

A eletrodialise é um processo de separação por membranas em que espécies iônicas em solução são transportadas através de membranas íons seletivas sob a influência de um campo elétrico. Desta forma, a solução original é dividida em duas correntes: uma mais concentrada e outra mais diluída (MÜLLER, 2013). A Figura 1 mostra esquematicamente um sistema de eletrodialise.

Figura 1 - Representação esquemática de um sistema de eletrodialise. MC: membrana catiônica, MA: membrana aniônica, AB: água bruta ou alimentação, P: permeado ou diluído, R: rejeito ou concentrado, EA: solução formada do ânodo, EC: solução formada no cátodo.



Fonte: Schneider & Tsutiya (2001).

O sistema de eletrodialise consiste em um conjunto de membranas de troca iônica catiônicas (MC) e aniônicas (MA) dispostas de forma alternada entre dois eletrodos: um cátodo e um ânodo. Quando uma solução iônica é colocada no sistema e um potencial elétrico é aplicado, os cátions tendem a migrar para o cátodo e os ânions para o ânodo. As membranas catiônicas, que possuem cargas negativas, permitem a passagem dos cátions, contudo, impedem a passagem de ânions; o contrário ocorre com as membranas aniônicas. A alimentação de solução a ser tratada é realizada em compartimentos alternados, obtendo-se, assim, soluções concentrada e diluída em íons (MÜLLER, 2013; SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

Quando a eletrodialise é comparada a processos convencionais de tratamentos de água e efluentes, as principais vantagens incluem a não necessidade do uso de produtos químicos, a possibilidade de remoção de substâncias iônicas não removidas em processos convencionais e o tratamento de efluentes sem que poluentes mudem de fase. Além disso, o processo pode ser realizado de forma contínua e com altas taxas de fluxo e sem a necessidade de regeneração periódica das membranas, como ocorre em processos com resinas de troca iônica (BENVENUTI, 2012).

## 1.2. Membranas de troca iônica

Uma membrana de troca iônica é definida como uma camada densa, não porosa, que é carregada ionicamente por grupos catiônicos e/ou aniônicos. Quando submetidas à pressão hidráulica, estas membranas transportam íons em função de uma diferença de potencial elétrico aplicada, não sendo permeáveis a gases ou solventes (SATA, 2004). De maneira prática, estas membranas consistem em pequenas partículas de troca iônica envolvidas por uma matriz polimérica inerte (STRATHMANN, 2010).

Membranas heterogêneas são obtidas pela incorporação de resinas de troca iônica na forma de pó em filmes de polímeros termoplásticos (SATA, 2004). A quantidade de resina e seu

tamanho afetam as propriedades mecânicas e eletroquímicas das membranas, sendo que, no que concerne ao tamanho, o recomendado é que este seja menor do que 80  $\mu\text{m}$ . Por outro lado, o uso de partículas com diâmetro inferior a 30  $\mu\text{m}$  pode resultar em membranas quebradiças, caso tais partículas sejam adicionadas em elevada quantidade ao polímero base (VYAS *et al.*, 2001).

Este trabalho tem como objetivo preparar e caracterizar membranas de troca iônica heterogêneas, catiônicas e aniônicas. Ademais, objetiva-se avaliar o desempenho destas membranas em um sistema de eletrodialise de bancada para a dessalinização de um efluente sintético de sulfato de sódio.

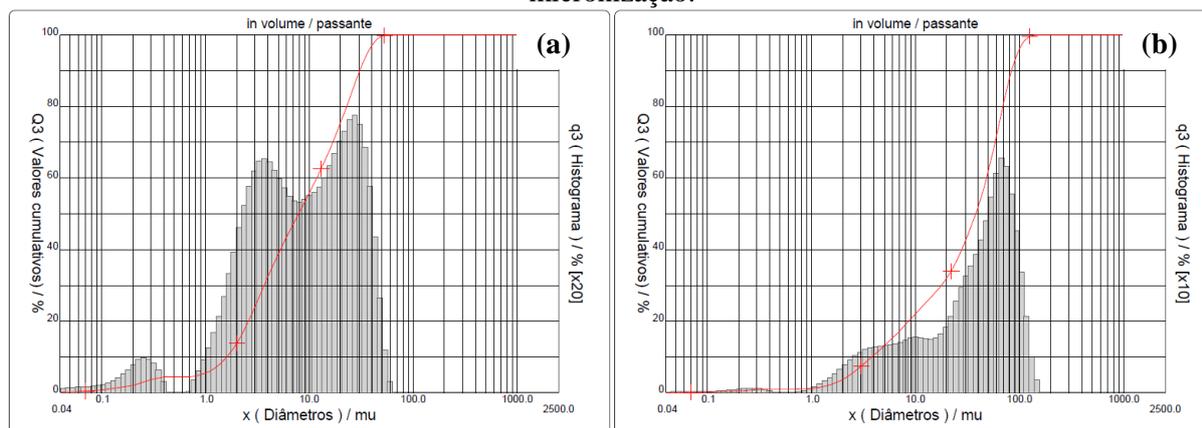
## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Membranas de troca iônica heterogêneas, catiônicas e aniônicas, foram preparadas e então caracterizadas de acordo com o descrito a seguir. Finalmente, foi avaliado o desempenho destas membranas em uma célula de eletrodialise de bancada. Todos os resultados são comparados àqueles obtidos para membranas comerciais heterogêneas, de fabricação chinesa, HDX100 e HDX200, catiônica e aniônica, respectivamente.

### 2.1. Preparação das membranas

As resinas de troca catiônica e aniônica, respectivamente C100 e A400, foram obtidas da Purolite®. Segundo informações do fabricante, as resinas possuem, ambas, diâmetro de partículas entre 300  $\mu\text{m}$  e 1.200  $\mu\text{m}$  quando com umidade de 40 a 50%. Por sua vez, quando secas, a faixa de tamanhos é da ordem de 200  $\mu\text{m}$  a 860  $\mu\text{m}$ , ou seja, maiores do que o recomendado para a utilização em membranas de troca iônica. Desta forma, antes de sua utilização, estas resinas foram secas em estufa com circulação de ar a 40°C por 24 horas, micronizadas e, então, secas novamente sob a mesma temperatura e durante o mesmo tempo. Para a determinação do tamanho final das partículas, foram realizadas análises de distribuição granulométrica em equipamento Cilas 1180 com range de 0,04  $\mu\text{m}$  a 2.500,00  $\mu\text{m}$ . A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica das resinas C100 e A400 após a micronização.

Figura 2 - Análise de distribuição granulométrica das resinas C100 (a) e A400 (b) após micronização.



A análise distribuição granulométrica após a micronização das resinas fornece que, para a resina catiônica C100, o diâmetro médio das partículas é de 12,50  $\mu\text{m}$ , sendo o diâmetro de 90% delas inferior a 30,68  $\mu\text{m}$ . Para a resina aniônica A400 o diâmetro médio é de 41,15  $\mu\text{m}$  e o diâmetro a 90% é de 83,98  $\mu\text{m}$ .



Após a adequação dos tamanhos de partícula das resinas de troca iônica, as membranas foram preparadas pelo método de laminação por espalmagem. O método consiste na mistura do polímero base com plastificantes e resina de troca iônica micronizada, catiônica ou aniônica dependendo do tipo da membrana, e posterior processamento sob aquecimento. Ao final do processo, as membranas foram imersas em água deionizada para hidratação. O polímero utilizado foi policloreto de vinila (PVC) da série Norvic® P55LM fornecido pela Braskem®.

## 2.2. Caracterização das membranas

As membranas foram caracterizadas em função da capacidade de troca iônica, da absorção de água e da condutividade. As análises foram realizadas para três amostras de cada membrana e serão apresentados os valores médios no capítulo de resultados e discussão.

As membranas foram caracterizadas em função da capacidade de troca iônica, da absorção de água e da condutividade. As análises foram realizadas para três amostras de cada membrana e serão apresentados os valores médios no capítulo de resultados e discussão.

A capacidade de troca iônica, CTI, indica o número de sítios ativos, ou pontos de troca iônica, presentes em 1,0 g de massa seca de membrana. Para a quantificação deste parâmetro nas membranas catiônicas, as amostras foram secas em estufa e, após esfriarem em dessecador, suas massas foram determinadas. Posteriormente, foram imersas em solução aquosa de HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> por 72 horas e então lavadas com água destilada. Na etapa seguinte, as amostras foram imersas em solução de NaCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> por 48 horas. A CTI foi determinada por titulação com NaOH 0,005 mol L<sup>-1</sup>, utilizando-se fenolftaleína como indicador (HOSSEINI *et al.*, 2012).

Para as membranas aniônicas, a CTI foi mensurada a partir de amostras secas, esfriadas em dessecador até massa constante, determinadas suas massas novamente e equilibradas em água deionizada por 72 horas. Então, as amostras foram submersas por 48 horas em solução de KOH 1,0 mol L<sup>-1</sup>, lavadas para remoção do excesso de OH<sup>-</sup> e então imersas em solução 0,02 mol L<sup>-1</sup> de HCl por 24 horas. Finalmente, a CTI foi determinada por titulação com solução de NaOH 0,005 mol L<sup>-1</sup> utilizando-se, também, fenolftaleína como indicador (HWANG & OHYA, 1998).

A absorção de água foi determinada como a diferença de massa entre amostras de membranas secas (M<sub>seca</sub>) e equilibradas em água (M<sub>úmida</sub>). As amostras foram secas a 40°C por 24 horas, esfriadas em dessecador até massa constante e então pesadas. Após equilíbrio em água destilada em temperatura ambiente por 72 horas, as amostras tiveram novamente suas massas determinadas (HOSSEINI *et al.*, 2012).

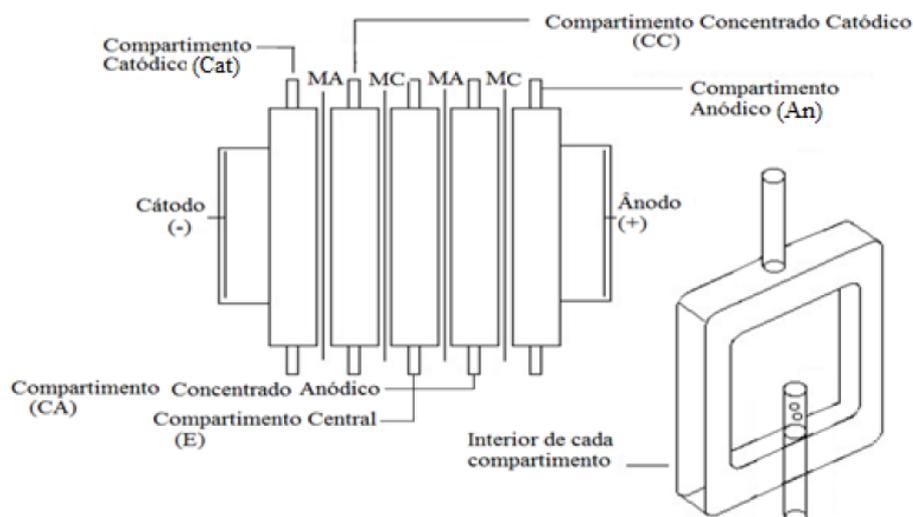
No que tange à condutividade das membranas, o referido parâmetro foi calculado a partir de medidas de impedância realizadas em equipamento Solartron 1260 com módulo/software Zplot® em modo de varredura de frequências entre 1 Hz e 1x10<sup>7</sup> Hz. Amostras de membranas foram inseridas em uma célula eletroquímica para ensaios em temperatura de 20°C e a 100% de umidade relativa (GALAMA *et al.*, 2016). Por fim, a Equação (1) foi utilizada para determinação da condutividade:

$$\sigma = \frac{C}{R \cdot E \cdot L} \quad (1)$$

na qual:  $\sigma$  é a condutividade (S cm<sup>-1</sup>); C representa o comprimento da célula de medição; E e L correspondem à espessura e à largura da amostra, respectivamente; e R equivale à resistência oriunda das medições de impedância (MIKHAILENKO *et al.*, 2004).

O desempenho das membranas na dessalinização de um efluente sintético em sistema de eletrodialise de bancada foi avaliado, utilizando-se uma célula de cinco compartimentos com eletrodos de TiRuO<sub>2</sub>, como ânodo e cátodo. A Figura 3 apresenta uma representação esquemática da célula.

Figura 3 - Representação da célula de eletrodialise de bancada de cinco compartimentos.



Fonte: Müller (2013).

A solução utilizada no início do ensaio nos compartimentos de efluente (E), concentrado catódico (CC) e concentrado anódico (CA), foi  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $1\text{ g L}^{-1}$ . Nos compartimentos dos eletrodos, cátodo (Cat) e ânodo (An), foi utilizada uma solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $4\text{ g L}^{-1}$ . Este procedimento é semelhante ao utilizado por Chakrabarty *et al* (2011).

Com uma fonte, Hikari modelo HF-3003S, foi aplicada tensão ao sistema de forma que se atingisse densidade de corrente contínua de  $2\text{ mA.cm}^{-2}$ . No decorrer do ensaio, os ânions presentes na solução do efluente foram transportados através da membrana aniônica para o compartimento CA, e os cátions, através da membrana catiônica, migraram para o compartimento CC. Com isto, a condutividade no compartimento E diminui ao longo do ensaio, enquanto o mesmo parâmetro aumenta nos compartimentos CA e CC.

Os ensaios foram realizados em duplicata para os dois conjuntos de membranas, a saber: membranas desenvolvidas neste trabalho, MC e MA, e membranas comerciais, HDX100 e HDX200. Cada ensaio teve duração de 3 horas e 30 minutos, tempo em que se calculou a redução percentual de condutividade no compartimento do efluente sintético em relação ao valor inicial.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para a caracterização quanto à CTI, absorção de água e condutividade das membranas preparadas, catiônica MC e aniônica MA, e das membranas comerciais HDX-100 e HDX-200, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades das membranas.

	Membranas Catiônicas		Membranas Aniônicas	
	HDX100	MC	HDX200	MA
CTI ( $\text{mmol.g}^{-1}$ )	2,00	0,83	1,80	1,39
Absorção de água (%)	50,0	29,6	59,0	43,4
Condutividade ( $\text{S.cm}^{-1}$ )	$3,87.10^{-3}$	$3,61.10^{-5}$	$3,75.10^{-3}$	$1,10.10^{-4}$

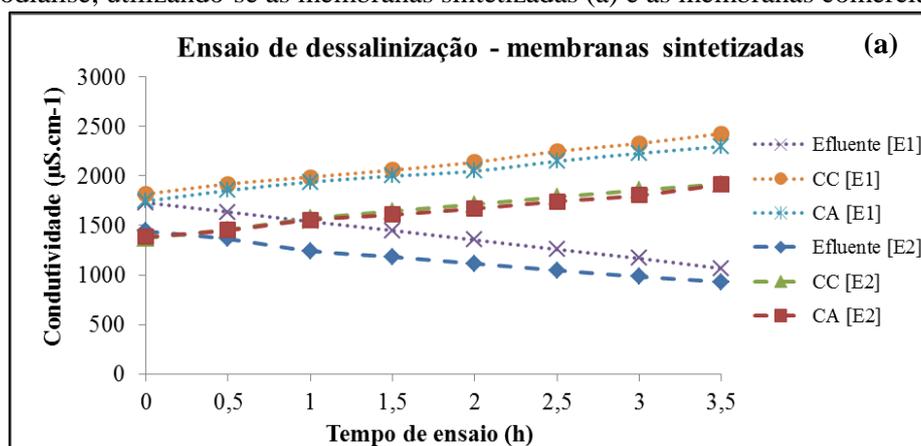
A partir dos dados apresentadas na Tabela 1, observa-se que para todos os parâmetros avaliados as membranas preparadas apresentam valores inferiores com relação às membranas comerciais. Segundo Strathmann (2010), as propriedades das membranas de troca iônica são substancialmente determinadas pelo polímero base e pelo tipo e quantidade de resina de troca iônica contida na mesma. Enquanto o polímero determina propriedades químicas e mecânicas, a quantidade e o tipo de resina de troca iônica definem a seletividade, a resistência ou condutividade elétrica, além de influenciar, igualmente, algumas propriedades mecânicas. As partículas de resina de troca iônica também são as responsáveis pela absorção de água e pela capacidade de troca iônica; quanto maior a quantidade de resina, maiores a CTI, a absorção de água e a condutividade (KARIDURAGANAVAR *et al.*, 2006; VYAS *et al.*, 2000).

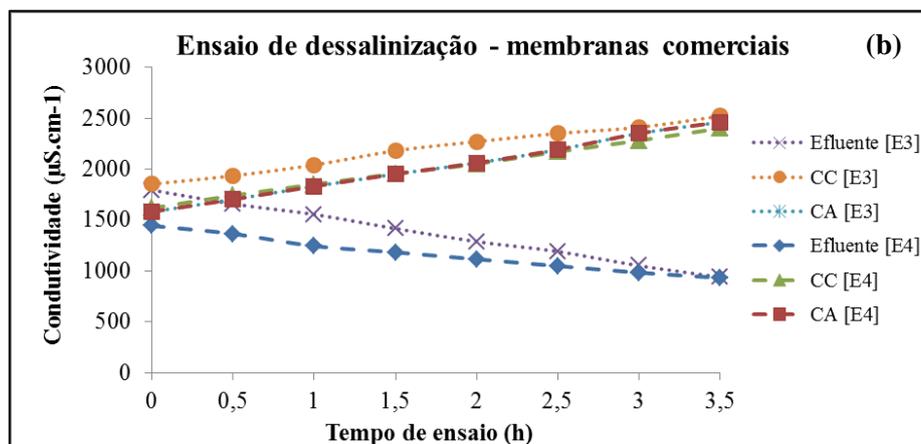
As membranas deste estudo foram preparadas contendo 35% de resina de troca iônica apesar de a literatura recomendar quantidades em torno de 60% (OREN *et al.*, 2004), pois este material é de elevado valor agregado e define o custo final das membranas. Desta forma, em razão da menor quantidade de sítios ativos, já era esperado que, para as propriedades avaliadas, os valores encontrados para as membranas desenvolvidas fossem inferiores. Por outro lado, as membranas deste trabalho apresentam CTI e absorção de água superiores a de membranas heterogêneas HGC e HGA, respectivamente catiônica e aniônica, disponíveis comercialmente. Estas membranas, produzidas na Índia por CSMCRI, apresentam CTI na faixa de 0,67 a 0,77 mmol.g<sup>-1</sup> para membrana HGC e de 0,4 a 0,5 mmol.g<sup>-1</sup> para HGA e absorção de água entre 22% e 25% para ambas as membranas (NAGARALE *et al.*, 2006).

Quanto aos ensaios em sistema de eletrodialise de bancada, foram mensuradas as condutividades e os valores de pH de cada um dos cinco compartimentos ao início do processo e a cada trinta minutos. A Figura 4 apresenta a evolução da condutividade elétrica nos compartimentos do efluente sintético, CC e CA durante os quatro ensaios, dois utilizando as membranas desenvolvidas neste trabalho e outros dois, membranas comerciais.

Quanto aos ensaios em sistema de eletrodialise de bancada, foram mensuradas as condutividades e os valores de pH de cada um dos cinco compartimentos ao início do processo e a cada trinta minutos. A Figura 4 apresenta a evolução da condutividade elétrica nos compartimentos do efluente sintético, CC e CA durante os quatro ensaios, sendo que em dois, foram empregadas as membranas desenvolvidas neste trabalho e nos outros dois, membranas comerciais.

Figura 4 - Avaliação da condutividade durante ensaios de dessalinização de efluente em eletrodialise, utilizando-se as membranas sintetizadas (a) e as membranas comerciais (b).





Avaliando-se os gráficos da Figura 4, observa-se que o efluente teve sua condutividade reduzida gradativamente com o decorrer dos ensaios, independente do tipo de membrana utilizada. A dessalinização ocorreu quando os testes foram realizados com membranas comerciais e também quando com as membranas desenvolvidas neste estudo. A redução da condutividade do efluente, utilizando-se as membranas preparadas, evidencia que estas apresentam a propriedade de transportar íons. Para fins de quantificação do desempenho das membranas, a redução de condutividade do efluente foi calculada em termos percentuais e é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de dessalinização de efluente.

Ensaio	Dessalinização (%)	Dessalinização média (%)
Membranas MC e MA – Ensaio 1	38,5	37,0
Membranas MC e MA – Ensaio 2	35,5	
Membranas comerciais – Ensaio 3	46,4	47,0
Membranas comerciais – Ensaio 4	47,7	

No compartimento do cátodo, que é delimitado de um lado pelo eletrodo e do outro por uma membrana aniônica, há redução dos ânions que migram em sentido ao ânodo através da membrana aniônica. Um raciocínio análogo é aplicado ao compartimento do ânodo. Assim, espera-se uma redução da condutividade nos compartimentos dos eletrodos. Contudo, as condutividades elevaram-se em torno de 13% no cátodo e 11% no ânodo em cada um dos ensaios. Este aumento pode ser atribuído às reações que ocorrem junto aos eletrodos, com formação de espécies iônicas  $H^+$  ou  $OH^-$ , as quais produzem um aumento na condutividade das soluções. As reações citadas serão descritas mais adiante.

Quanto às medições de pH, antes de iniciarem os ensaios, as soluções dos 5 compartimentos encontravam-se com este parâmetro entre 6,0 e 6,5. A Tabela 3 apresenta os valores médios para os ensaios 1 e 2 e para os ensaios 3 e 4 de todos os compartimentos ao final de 3,5 horas de experimento.

Tabela 3 - Avaliação do pH nos ensaios de dessalinização.

Compartimento	pH médio ao final dos ensaios	
	Membranas MC e MA Ensaio 1 e 2	Membranas comerciais Ensaio 3 e 4
Cátodo	11,25	11,47
CC	8,33	8,29
Efluente	6,31	5,95
CA	3,63	3,31
Ânodo	2,64	2,72

Observa-se que o efluente não apresentou variação representativa no pH. Por outro lado, os compartimentos CC e CA apresentaram diferenças influenciadas pelos compartimentos adjacentes (os compartimentos dos eletrodos), os quais apresentam grande variação no pH devido às reações de eletrodo. No cátodo, quando em meio ácido, a acidez da solução tende a reduzir gradativamente devido ao consumo dos  $H^+$ . Em pH neutro, a solução tende a se alcalinizar devido a formação de  $OH^-$ , em ambas as condições, há liberação de  $H_2$  (KORZENOWSKI, 2007). Por outro lado, no ânodo, ocorre a liberação de  $O_2$  e acidificação da solução. As reações são apresentadas na Tabela 4.

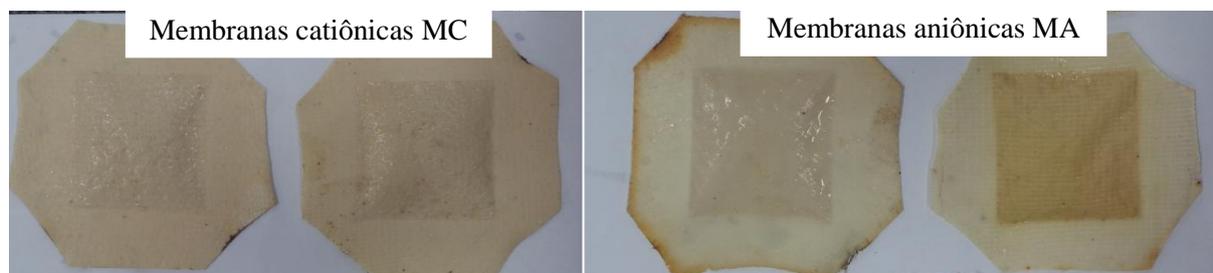
Tabela 4 - Equações químicas vinculadas aos eletrodos.

Cátodo em meio ácido	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow$
Cátodo em meio não ácido	$2 H_2O + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow + 2OH^-$
Ânodo	$2 H_2O \rightarrow O_2\uparrow + 4H^+ + 4e^-$

Com o intuito que não ocorra acidificação ou alcalinização das soluções de eletrodos, pode-se utilizar a mesma solução recirculando em ambos os compartimentos. Desta forma, um efeito neutraliza a ação do outro (KORZENOWSKI, 2007). De maneira análoga, as soluções dos compartimentos CC e CA podem ser misturadas e utilizadas conjuntamente nestes compartimentos, ou seja, os compartimentos concentrados em íons.

Por fim, as membranas preparadas MC e MA, utilizadas nos ensaios de dessalinização em eletrodialise, são apresentadas nas fotografias da Figura 5. As imagens mostram que as membranas permaneceram íntegras mesmo após sua utilização.

Figura 5 - Fotografias das membranas após ensaio de dessalinização em eletrodialise.





Os ensaios em eletrodialise mostraram que as membranas preparadas possuem capacidade de dessalinização do efluente avaliado. A redução na salinização ocorreu sem alteração do pH do efluente e sem a necessidade de adição de nenhum tipo de produto químico, apenas em função da aplicação de uma diferença de potencial elétrico no sistema de eletrodialise. Além disso, as membranas permaneceram íntegras após os ensaios.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, membranas de troca iônica foram preparadas, caracterizadas e seu desempenho foi avaliado para a dessalinização de um efluente sintético em eletrodialise. As membranas sintetizadas apresentaram propriedades inferiores às de membranas comerciais utilizadas como referência. Por outro lado, estas mesmas propriedades são superiores a de outras membranas reportadas na literatura. Quanto aos ensaios para dessalinização de efluente, as membranas preparadas apresentaram desempenho inferior, mas resultados satisfatórios com efetiva redução da condutividade do efluente sem alteração do pH do mesmo. Os resultados positivos validam as resinas de troca iônica e o polímero base como materiais para o desenvolvimento deste tipo de membranas e fornecem informações importantes para a continuidade dos estudos neste sentido.

#### REFERÊNCIAS

BENVENUTI, T. **Avaliação da eletrodialise no tratamento de efluentes de processos de eletrodeposição de níquel**. Porto Alegre, 130 p., 2012 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CHAKRABARTY, T. *et al.* Stable ion-exchange membranes for water desalination by electro dialysis. **Desalination**, v. 282, p. 2-8, 2011.

GALAMA, A. H.; HOOG, N. A.; YNTEMA, D. R. Method for determining ion exchange membrane resistance for electro dialysis systems. **Desalination**, v. 380, p. 1-11, 2016.

GARCIA-VASQUEZ, W. *et al.* Evolution of anion-exchange membrane properties in a full scale electro dialysis stack. **Journal of Membrane Science**, v. 446, p. 255-265, 2013.

HOSSEINI, S. M. *et al.* Preparation and characterization of poly (vinyl chloride)-blend-poly (carbonate) heterogeneous cation exchange membrane: Investigation of solvent type and ratio effects. **Desalination**, v. 285, p. 253-262, 2012.

HWANG, G.-J.; OHYA, H. Preparation of anion-exchange membrane based on block copolymers. **Journal of Membrane Science**, v. 140, n. 2, p. 195-203, 1998.

KARIDURAGANAVAR, M. Y. *et al.* Ion-exchange membranes: preparative methods for electro dialysis and fuel cell applications. **Desalination**, v. 197, p. 225-246, 2006.

KORZENOWSKI, C. **Estudo da recuperação de cromo hexavalente contendo íons Al(III) e Fe(III) através da eletrodialise e efeito da incorporação de íons na degradação de membranas catiônicas**. Porto Alegre, 230 p., 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MIKHAILENKO, S. D. *et al.* Proton conducting membranes based on cross-linked sulfonated poly(ether ether ketone) (SPEEK). **Journal of Membrane Science**, v. 233, n. 1-2, p. 93-99, 2004.



MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 2000. 416p.

MÜLLER, F. **Membranas poliméricas íon seletivas aniônicas e catiônicas para uso em eletrodiálise**. Porto Alegre, 130 p., 2013. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

NAGARALE, R. K.; GOHIL, G. S.; SHAHI, V. K. Recent developments on ion-exchange membranes and electro-membrane processes. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 119, p. 97-130, 2006.

OREN, Y.; FREGER, V.; LINDER, C. Highly conductive ordered heterogeneous ion-exchange membranes. **Journal of Membrane Science**, v. 239, n. 1, p. 17-26, 2004.

SATA, T. **Ion Exchange Membranes: Preparation, Characterization, Modification and Application**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2004.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso**. São Paulo: Associação brasileira de engenharia sanitária e ambiental, 2001.

STRATHMANN, H. Ion-Exchange Membrane Processes in Water Treatment. **Sustainability Science and Engineering**, Amsterdam, v. 2, p. 141-199, 2010.

TANAKA, Y. Fundamental Properties of Ion Exchange Membranes. In: **Ion Exchange Membranes**. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 29-65.

VOGEL, C.; MEIER-HAACK, J. Preparation of ion-exchange materials and membranes. **Desalination**, v. 342, p. 156-174, 2014.

VYAS, P. V. *et al.* Studies on heterogeneous cation-exchange membranes. **Reactive and Functional Polymers**, v. 44, n. 2, p. 101-110, 2000.

VYAS, P. V. *et al.* Characterization of heterogeneous anion-exchange membrane. **Journal of Membrane Science**, v. 187, p. 39-46, 2001.

XU, T. Ion exchange membranes: State of their development and perspective. **Journal of Membrane Science**, v. 263, p. 1-29, 2005.