

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
UNIVERSIDAD AXIAS DO SUL
UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL



Trabalho de Conclusão de Curso de
Engenharia Química

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE
MEMBRANA DE OSMOSE INVERSA NO
TRATAMENTO DE EFLUENTE GALVÂNICO**

Semestre Letivo 2022-02

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

Nome: Isabele Gil Pimel

Orientação: Profa. Dra. Venina dos Santos

Curso: **Engenharia Química**

Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias

Campus / Núcleo: **Cidade Universitária**

ISABELE GIL PIMEL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MEMBRANA DE OSMOSE INVERSA
NO TRATAMENTO DE EFLUENTE GALVÂNICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora Profa. Dra. Venina dos Santos.

CAXIAS DO SUL

2022

ISABELE GIL PIMEL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MEMBRANA DE OSMOSE INVERSA
NO TRATAMENTO DE EFLUENTE GALVÂNICO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Química, e aprovado em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Engenharia Química em 7 de julho de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Venina dos Santos.
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof^a. Dra. Camila Baldasso
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Luís Rafael Bonetto
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por toda força que me foi dada para a realização deste trabalho e ao longo de toda a minha graduação.

A minha querida orientadora Dra. Venina dos Santos por toda paciência, orientações e ideias para a realização desse trabalho.

Agradeço aos meus pais, Silvio e Marta, minhas irmãs Maiara e Andressa por serem a minha base, me apoiando em toda a minha trajetória de vida.

Ao meu noivo Felipe, pela paciência, carinho, conselhos e por ser o meu suporte nos momentos mais difíceis.

A Indústria Química Mascia, aos meus chefes e colegas, por todo incentivo na minha trajetória acadêmica.

As queridas Laís e Juciana, por todo apoio, conselhos e contribuições para este trabalho.

A Jocelei do laboratório LAMEM, por todo carinho, paciência e ajuda ao longo dos testes deste trabalho.

A todos os professores da graduação, obrigada pelas contribuições para a minha formação.

Aos meus queridos professores de Yoga Samanta e Israel, que nos momentos mais difíceis dessa jornada, me ajudaram a relaxar e por um momento silenciar a minha mente.

Enfim, a todos os amigos e colegas da graduação, que tornaram essa trajetória mais divertida, leve e enriquecedora, a minha eterna gratidão.

RESUMO

O elevado consumo de água do processo galvânico resulta em uma grande quantidade de geração de efluente, havendo a necessidade de realizar o tratamento do mesmo para que os seus parâmetros estejam de acordo com as legislações ambientais, possibilitando o seu descarte no meio ambiente. Porém a sua complexidade dificulta o tratamento, pois esse tipo de efluente é rico em diversos metais tóxicos e outros contaminantes. Uma técnica que tem se mostrado bastante eficiente para tratamento de efluentes mais complexos, é o processo de separação por membranas, como a osmose inversa (OI). Neste contexto, o principal objetivo do presente estudo é avaliar a remoção de determinados metais, como cobre, zinco e níquel e outros contaminantes, como DQO, DBO, sólidos totais e cianeto usando membrana de osmose inversa, analisando alguns parâmetros do efluente e verificando a possibilidade do seu reuso em outros processos. O módulo de membrana utilizado neste estudo foi espiral de poliamida da Metagoal, com camada seletiva de polissulfona e com uma pressão máxima de trabalho de 6,89 bar. A membrana de OI obteve resultados de remoção de 76,42 % de demanda bioquímica de oxigênio, 82,92 % de cianeto total, 66,67 % de demanda química de oxigênio, 91,18 % de sólidos totais, 95 % de alumínio total, 68,53 % de cobre total, quase total remoção de níquel e 60 % de zinco. Após o tratamento, apesar da membrana apresentar uma boa seletividade para os tipos de contaminantes avaliados, alguns parâmetros como cianeto total, sólidos totais e cobre total ficaram um pouco acima do estipulado nos requisitos das legislações ambientais. Com relação aos testes com a membrana de OI, apresenta fluxos de permeado após a compactação entre 4,8 L/m²h e 4,9 L/m²h. A permeabilidade hidráulica resultante na membrana é de 4,92 L/m².h.bar. O teste com o efluente galvânico apresentou permeação somente a partir de 1,5 bar. É observado uma redução do fluxo com o passar do tempo, indicando a formação de fouling e polarização por concentração na membrana. A comparação da permeabilidade hidráulica antes da limpeza química, 4,92 L/m².h.bar e após 7,13 L/m².h.bar demonstra que pode ter ocorrido falhas nas limpezas químicas realizadas em testes anteriores. Porém observou-se que houve recuperação do fluxo do permeado, o que confirma que a limpeza química realizada no presente trabalho foi eficaz na remoção de incrustações geradas pelo fouling. De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, o tratamento do efluente galvânico utilizando membrana de osmose inversa obteve bons resultados, uma vez que houve redução de todos os parâmetros analisados. Conclui-se ainda que, os parâmetros que ficaram um pouco acima do permitido pela legislação ambiental (cianeto, cobre e sólidos totais), podem ser facilmente corrigidos realizando um pré-tratamento do efluente mais eficiente.

Palavras chaves: Osmose inversa, legislação ambiental, efluente galvânico e remoção.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efluente tratado com coagulante e floculante.	14
Figura 2 - Processo galvânico.	16
Figura 3 - Solubilidade de metais em função do pH.....	21
Figura 4 - Processo de separação de uma membrana.	24
Figura 5 - Comparação entre o processo de filtração convencional e tangencial.	25
Figura 6 - Representação de uma membrana espiral	26
Figura 7 – Comparação da capacidade de retenção de cada membrana.....	28
Figura 8 – Esquema de funcionamento do fenômeno de osmose inversa.....	29
Figura 9 – Exemplo de estrutura de uma membrana de OI	30
Figura 10 - Redução do fluxo do permeado ocasionado pela polarização por concentração.....	31
Figura 11 - Comparativo entre o processo de tratamento atual e o proposto pelo estudo.....	35
Figura 12 - PSM com membrana de OI.....	38
Figura 13 – Resultado do ensaio de compactação da membrana de OI.....	43
Figura 14 – Fluxo do permeado com água destilada em função da pressão.	44
Figura 15 – Fluxo do permeado do efluente galvânico em função do tempo.	45
Figura 16 – Fluxo do permeado em função da pressão	45
Figura 17 – Permeabilidade hidráulica antes e após a limpeza química.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros estabelecidos pelas legislações nacional e estadual para lançamento de efluente líquido.....	18
Tabela 2 - Potenciais de oxidação de alguns agentes oxidantes.....	22
Tabela 3 - Especificações da membrana de OI.....	36
Tabela 4 - Soluções para realização da limpeza química da membrana de OI.....	36
Tabela 5 - Resultados análises efluentes bruto e tratado.	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características dos principais PSM.....	26
Quadro 2 - Reagente utilizado para cada tipo de contaminante.....	32
Quadro 3 - Estado da arte relacionados ao tema do presente trabalho.	33
Quadro 4 - Parâmetros avaliados no efluente bruto e após a OI e metodologias.	37

LISTA DE SIGLAS, TERMOS E ABREVIações

A	Área da membrana
AFB	Aniônica fortemente básica
AfB	Aniônica fracamente básica
ANA	Agência Nacional de águas
atm	Atmosfera
bar	Unidade de pressão, equivalente a 1 atmosfera
°C	Graus celsius
Cd	Cádmio
CFA	Catiônica fortemente ácida
CfA	Catiônica fracamente ácida
$C_2H_2O_4$	Ácido oxálico
$C_6H_8O_7$	Ácido cítrico
CN^-	Cianeto livre
CNO^-	Cianato
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
Cu	Cobre
Da	Dalton, equivalente a unidade de massa atômica
DAM	Drenagem ácida de mina
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ED	Eletrodiálise
Fe^{2+}	Ferro II
h	Horas
HCl	Ácido clorídrico
HNO_3	Ácido nítrico
J_p	Fluxo de permeado
kPa	Quilopascal
LAMEM	Laboratório de Membranas e Materiais
LAPAM	Laboratório de Análises e Pesquisas Ambientais
L	Litros

L_P	Permeabilidade hidráulica
m^2	Metros quadrados
m^3	Metros cúbicos
MF	Microfiltração
mm	Milímetro
Mn	Manganês
NaClO	Hipoclorito de sódio
NaCl	Cloreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NF	Nanofiltração
Ni	Níquel
OH-R-NH ₂	Poliamina
OI	Osmose inversa
Pb	Chumbo
pH	Potencial de hidrogênio
POA's	Processos oxidativos avançados
PSM	Processo de separação por membranas
R-SO ₃ H	Radicais de ácido sulfônico
R-COOH	Carboxilato
R-N(CH ₃) ₃ ⁺	Amina quaternária
s	Segundos
Sn	Estanho
ST	Sólidos Totais
T	Tempo
UF	Ultrafiltração
v	Volume
V	Volt
Zn	Zinco
ΔP	Pressão transmembrana
μm	Micrómetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO GERAL.....	13
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	EFLUENTE INDUSTRIAL	14
2.2	GALVANOPLASTIA	15
2.3	EFLUENTES GALVÂNICOS	17
2.3.1	Legislação ambiental	17
2.3.2	Tratamento de efluentes galvânicos	20
2.3.2.1	Processos oxidativos avançados.....	21
2.3.2.2	Trocadores iônicos	22
2.4	PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS (PSM)	24
2.4.1	Classificação dos processos de separação de membranas	26
2.4.2	Osmose inversa	28
2.4.3	Mecanismos de interferência do funcionamento de PSM	30
2.4.3.1	Limpeza química	32
2.5	ESTADO DA ARTE	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	MATERIAIS	36
3.1.1	Limpeza química	36
3.2	MÉTODOS	37
3.2.1	Caracterização do efluente	37
3.2.2	Caracterização da membrana e testes	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	40
4.1.1	Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	40
4.1.2	Cianeto total	41
4.1.3	Demanda química de oxigênio (DQO)	41
4.1.4	Sólidos totais	41
4.1.5	Alumínio total	42
4.1.6	Cobre total	42

4.2	COMPACTAÇÃO DA MEMBRANA.....	42
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA MEMBRANA.....	43
4.4	FLUXO DO PERMEADO COM O EFLUENTE GALVÂNICO	44
4.5	PERMEABILIDADE HIDRÁULICA	46
5	CONCLUSÃO	47
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Segundo pesquisa realizada pela Agência Nacional de Águas (ANA) em 2015, a vazão de água consumida pela indústria brasileira foi de 104,92 m³/s, sendo que o estado do Rio Grande do Sul consumiu 10,05 m³/s. Esta alta demanda de água na indústria gera uma grande quantidade de efluente que necessitam ser tratados para então serem descartados no meio ambiente ou reaproveitados em outros processos.

As galvanicas, que atuam no tratamento de superfícies metálicas de peças e acessórios, utilizam uma grande quantidade de água e energia em seus processos (ACKERMANN et al., 2004). Em uma indústria galvânica localizada na serra gaúcha que produz uma quantidade de 1,5 toneladas de peça por mês, foram tratados em média 35 m³ de efluente por mês em 2021. O efluente gerado na galvanoplastia é derivado das fases de lavagem e trocas de banhos, fato que o caracteriza como um efluente rico em metais, tornando o tratamento mais dispendioso e complexo uma vez que nem sempre pode ser tratado apenas com tratamentos convencionais, tais como, floculação, coagulação, sedimentação, etc. (RIANI, 2008). Mesmo associando tratamentos físico-químicos com outras técnicas como colunas de troca iônica para adsorção de metais de transição, o efluente final não apresenta uma qualidade suficiente para atender as legislações ambientais vigentes e para ser reutilizado em outros processos. A legislação ambiental para o descarte de efluentes é muito severa, uma vez que é necessário que todos os parâmetros estejam dentro das faixas de concentração preconizadas.

Uma das alternativas para minimizar esse problema é utilizar o processo de separação por membranas (PSM), como a osmose inversa. Esse tipo de tratamento é capaz de remover os metais e aditivos que os outros tratamentos não removem, possibilitando o reuso do efluente, gerando economia, pois o consumo de água e energia no processo diminui e a geração de resíduos que são enviados para aterros industriais é reduzida (BENVENUTI, 2012).

Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar a utilização de membrana de osmose inversa no tratamento de um efluente pré-tratado proveniente de uma central de tratamento de efluentes de uma galvânica da serra gaúcha.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a remoção de metais (cobre, níquel e zinco) e outros contaminantes (DBO, DQO, sólidos totais e cianeto) presentes no efluente de uma indústria galvânica a partir do processo de separação por membrana de osmose inversa.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) investigar os parâmetros do efluente antes e após o processo de separação por membrana;
- b) avaliar o desempenho da membrana para a remoção de metais, DQO, DBO e cianeto do efluente;
- c) determinar um fluxo máximo e a permeabilidade hidráulica da membrana de acordo com o fluido a ser tratado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 EFLUENTE INDUSTRIAL

O aumento populacional e industrial nos últimos anos ocasionou o aumento da poluição e contaminação de rios, lagos, mares e águas subterrâneas. A maioria dos processos industriais consomem um grande volume de água, gerando uma quantidade de efluente que precisa ser tratado para então ser descartado no meio ambiente ou, em alguns casos, reutilizados em outros processos (STRAIOTO, 2019).

Em função da competitividade do mercado atual, as empresas buscam cada vez mais aprimorar os seus processos procurando por novas maneiras de atender as normas ambientais vigentes (STRAIOTO, 2019). O reuso do efluente gerado pela própria empresa é uma das formas de minimizar os impactos ambientais, uma vez que o consumo de água pode ser reduzido, gerando maior economia. Porém, para possibilitar a sua reutilização, é necessário realizar um tratamento. A Figura 1 mostra um efluente clarificado, onde foi realizado um processo de coagulação e floculação. Esse tratamento depende muito do tipo de efluente, mas normalmente é composto por coagulação, floculação, flotação e filtração (SCHMIDT, 2014).

Figura 1 – Efluente tratado com coagulante e floculante.



Fonte: O Autor (2021).

O efluente gerado em processos galvânicos é um efluente muito complexo para ser tratado visando atingir os parâmetros desejados e impostos pelas legislações ambientais (STRAIOTO, 2019).

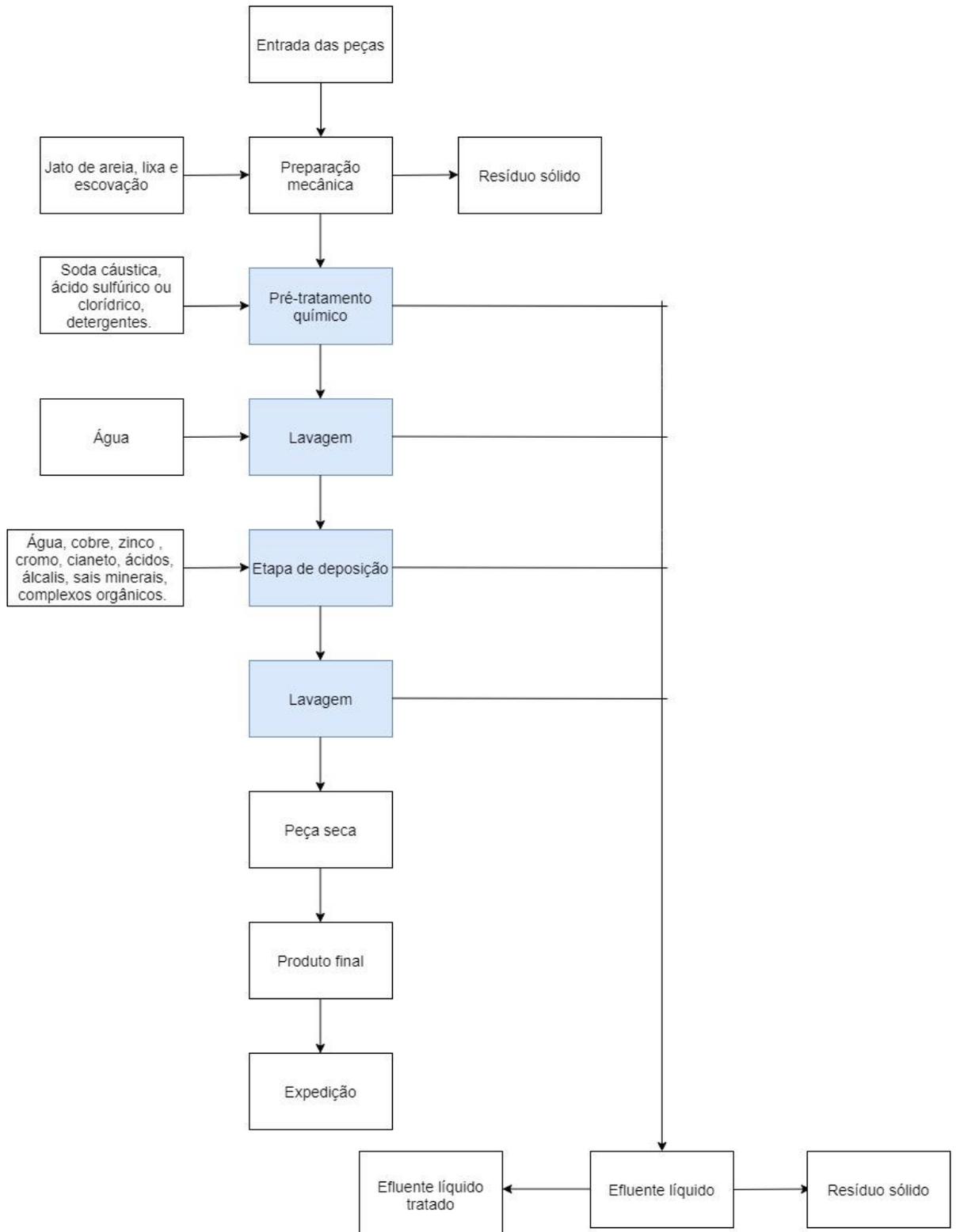
2.2 GALVANOPLASTIA

O processo de recobrimento de superfícies com metais é chamado de galvanização. Esse revestimento pode ser feito por meios eletroquímicos ou químicos, usando soluções aquosas contendo metais (BENVENUTI, 2012). Pode ser utilizado para recobrir peças de diversos setores, tais como a indústria de bijuterias, automobilística e de utensílios domésticos (SESI, 2007).

Um dos principais objetivos da galvanoplastia é proteger as peças contra o processo de corrosão, impedindo a sua interação com o ar, o que impede a oxidação do ferro, aumentando a sua durabilidade (ALMEIDA, 2019). Outras melhorias podem ser conferidas, como aumento da dureza, redução do desgaste e do atrito da peça (MOREIRA, 2010). O processo galvânico torna peças de metais mais baratas em peças com maior valor agregado, uma vez que a sua aparência melhora bastante (NETO, et al., 2008).

O processo galvânico possui várias etapas (Figura 2), sendo a primeira a preparação mecânica da peça, onde o substrato é lixado com a finalidade de remover rebarbas, soldas e irregularidades. Em seguida, a peça é submetida ao desengraxe alcalino para remoção de óleos e gorduras presentes com a finalidade de proteção periódica (VAZ, 2009). Após o processo de desengraxe, as peças são levadas para etapa de decapagem para a remoção das oxidações presentes na superfície metálica empregando banhos em soluções ácidas contendo ácido sulfúrico ou clorídrico, onde permanecem por um tempo determinado (MOREIRA, 2010). Uma vez que as peças foram preparadas, elas então sofrem deposição de finas camadas metálicas nas suas superfícies, podendo ser por meio químico ou eletroquímico (MOREIRA, 2010). Entre um banho galvânico e outro, é necessário realizar lavagens das peças com o propósito de remover o excesso de íons livres da superfície revestida e para evitar a contaminação entre os banhos, permitindo um substrato limpo para a deposição metálica (MOREIRA, 2010).

Figura 2 - Processo galvânico.



Fonte: Adaptado VAZ, 2009.

Geração de efluente.

Conforme apresentado na Figura 2, o processo galvânico resulta em uma grande quantidade de efluente, sendo ele rico em metais pesados, com um alto

potencial poluidor. Esse setor possui um custo de fabricação elevado, pois a maioria dos banhos ocorrem por meio de imersão, resultando num gasto adicional elevado para tratar por completo o efluente gerado (VAZ, 2009). Os metais pesados que o efluente galvânico possui necessitam de grande atenção, pois uma vez que são lançados de forma irregular em corpos hídricos, podem ser absorvidos pelos tecidos animais e vegetais (MOREIRA, 2010). Dessa forma, é necessário realizar tratamentos físico-químicos nesse efluente, deixando todos os parâmetros adequados conforme legislação ambiental vigente (BERNARDES et al., 2000; VAZ, 2009).

2.3 EFLUENTES GALVÂNICOS

Os efluentes de indústrias galvânicas são compostos basicamente pelas seguintes espécies químicas (metais, contaminantes e íons metálicos): cromo trivalente (Cr^{3+}), chumbo (Pb), ferro II (Fe^{2+}), zinco (Zn), manganês (Mn), estanho (Sn), cádmio (Cd), níquel (Ni), cianeto, entre outros contaminantes (SANCHES, 2016). Dependendo do processo galvânico, esses metais e íons metálicos não necessariamente estão todos presentes no efluente, podendo ocorrer a presença de alguns. Para realizar o lançamento desse tipo de efluente em corpos hídricos, é obrigatório seguir os parâmetros descritos nas legislações ambientais.

2.3.1 Legislação ambiental

A partir dos princípios fundamentais tratados na Conferência da Nações Unidas de 1972, a Constituição Brasileira de 1988 foi pioneira em tratar dos assuntos de meio ambiente de forma mais aprofundada (PEDRO, 2010).

Em nível federal, as exigências para lançamento de efluentes em corpos de água receptores são estabelecidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA 430 de 2011, o qual trata sobre as condições, parâmetros, padrões e diretrizes do efluente gerado.

No caso de lançamento de efluentes no estado do Rio Grande do Sul, incluindo o lançamento de efluentes galvânicos, o Conselho Estadual do Meio Ambiente – CONSEMA 355 de 2017 trata sobre os critérios e padrões para emissão

de efluentes líquidos com lançamento em águas superficiais. A Tabela 1 mostra os limites estabelecidos em nível nacional e estadual.

Tabela 1 - Parâmetros estabelecidos pelas legislações nacional e estadual para lançamento de efluente líquido

(continua)

Parâmetro	CONAMA 430	CONSEMA 355
Alumínio Total	p.n.e	10 mg/L
Arsênio total	0,5 mg/L	0,1 mg/L
Bário total	5,0 mg/L	5,0 mg/L
Benzeno	1,2 mg/L	p.n.e
Boro total	5,0 mg/L	5,0 mg/L
Cádmio total	0,2 mg/L	0,1 mg/L
Chumbo total	0,5 mg/L	p.n.e
Cianeto total	1,0 mg/L	0,2 mg/L
Cianeto livre (destilável por ácidos fracos)	0,2 mg/L	p.n.e
Clorofórmio	1,0 mg/L	p.n.e
Cobalto total	p.n.e	0,5 mg/L
Cobre dissolvido	1,0 mg/L	p.n.e
Cobre total	p.n.e	0,5 mg/L
Cor	p.n.e	Não deve conferir mudança de coloração (cor verdadeira) ao corpo hídrico receptor
Cromo hexavalente	0,1 mg/L	0,1 mg/L
Cromo trivalente	1,0 mg/L	p.n.e
Cromo total	p.n.e	0,5 mg/L
Chumbo total	p.n.e	0,2 mg/L
Dicloroetano	1,0 mg/L	p.n.e
Espumas	p.n.e	Virtualmente ausentes
Estanho total	4,0 mg/L	4,0 mg/L
Estireno	0,07 mg/L	p.n.e
Etilbenzeno	0,84 mg/L	p.n.e
Fenóis total	0,5 mg/L	0,1 mg/L
Ferro dissolvido	15,0 mg/L	p.n.e
Ferro total	p.n.e	10 mg/L
Fluoreto	10,0 mg/L	10,0 mg/L

Lítio total	p.n.e	10 mg/L
Manganês dissolvido	1,0 mg/L	p.n.e
Manganês total	p.n.e	1,0 mg/L
Materiais flutuantes	p.n.e	Ausentes
Mercúrio total	0,01 mg/L	0,01 mg/L
Molibdênio total	p.n.e	0,5 mg/L
Níquel total	2,0 mg/L	1,0 mg/L
Nitrogênio amoniacal	20,0 mg/L	p.n.e
Odor	p.n.e	Livre de odor desagradável
Óleos e graxas: mineral	p.n.e	≤ 10 mg/L
Óleos e graxas: vegetal ou animal	p.n.e	≤ 30 mg/L
pH	p.n.e	Entre 6,0 e 9,0
Prata total	0,1 mg/L	0,1 mg/L
Selênio total	0,30 mg/L	0,05 mg/L
Sólidos sedimentáveis	p.n.e	≤ 1,0 mL/L em teste de 1 (uma) hora em cone Imhoff
Substâncias tensoativas que reagem ao azul de metileno	p.n.e	2,0 mg MBAS/L
Sulfeto	1,0 mg/L	0,2 mg/L
Temperatura	p.n.e	40 °C
Tetracloroeto de carbono	1,0 mg/L	p.n.e
Tolueno	1,2 mg/L	p.n.e
Tricloroeteno	1,0 mg/L	p.n.e
Vanádio total	p.n.e	1,0 mg/L
Xileno	1,6 mg/L	p.n.e
Zinco total	5,0 mg/L	2,0 mg/L

p.n.e – parâmetro não estabelecido. Fonte: O Autor (2021).

Para buscar atingir esses parâmetros, é necessário realizar alguns tratamentos, como processos oxidativos avançados, trocadores iônicos e processo de separação por membranas.

2.3.2 Tratamento de efluentes galvânicos

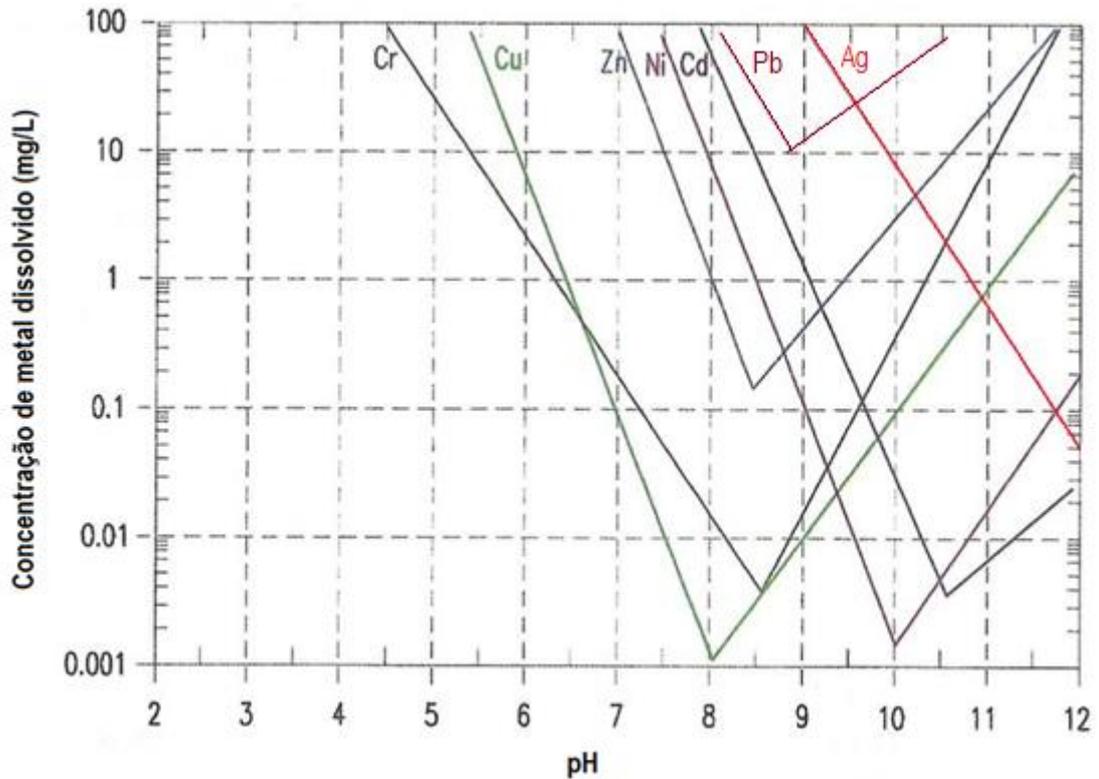
O tratamento de efluente galvânico passa por diversas etapas, tais como, gradeamento, armazenamento e tratamento físico-químico.

O gradeamento é uma espécie de filtro, que serve para captar sólidos sobrenadantes contidos no efluente bruto por meio de grades com diâmetro menor que o diâmetro dos sólidos que serão retidos (SANCHES, 2016). Após passar pelo processo de gradeamento, o efluente é separado em 3 tanques de armazenamento diferentes, ácido, neutro e alcalino. Essa separação é importante para que o processo de tratamento possa ser otimizado, uma vez que, ao misturar os efluentes, são formados compostos com uma alta complexidade (PEREIRA, 2008).

O tratamento físico-químico possibilita a remoção dos metais pesados solúveis do efluente, ocorrendo na forma de hidróxidos ou de sulfetos (CAVALCANTI, 2016). No tanque ácido, é realizada a redução dos ânions de cromo e no tanque alcalino ocorre a oxidação do cianeto livre (CN^-) em cianato (CNO^-), o qual é menos tóxico (PEDRO, 2010). Os demais metais são tratados no tanque neutro. O cianeto, embora seja extremamente tóxico, ainda é muito utilizado, pois resulta em uma excelente eletrodeposição e apresenta um baixo custo operacional (MARTINS, 2009).

A diminuição de solubilidade dos íons metálicos se dá pela alteração do equilíbrio químico a partir da adição de coagulantes que, ao reagirem com os metais presentes no efluente, formam um precipitado (CAVALCANTI, 2016). O processo de floculação complementa o processo de coagulação, permitindo a aglutinação dos metais (WEIHERMANN et al., 2009). Porém, a total sedimentação dos metais é bastante complexa, uma vez que cada um deles possui uma faixa de pH adequado para sua precipitação (CAVALCANTI, 2016). A Figura 3 ilustra essa ideia, apresentando a solubilidade de alguns metais em função do pH.

Figura 3 - Solubilidade de metais em função do pH.



Fonte: Cavalcanti (2016).

Para que a degradação da matéria orgânica seja possível, uma das alternativas a ser aplicada em conjunto com a coagulação/floculação são os processos oxidativos avançados (POA's) (ZELINSKI, 2018).

2.3.2.1 Processos oxidativos avançados

O uso de processos oxidativos avançados tem aumentado muito, pois é considerada uma tecnologia limpa, uma vez que não gera lodo. Os POA's transformam um determinado composto orgânico em gás carbônico e água. Na reação de oxidação química as ligações químicas são quebradas, ocorrendo a transferência dos elétrons do contaminante para o oxidante (CAVALCANTI, 2016). Essa reação pode ser denominada como uma reação de oxidação-redução, uma vez em que há a oxidação do contaminante enquanto o oxidante receptor de elétrons é reduzido (CAVALCANTI, 2016). A Tabela 2 apresenta os potenciais de oxidação de alguns agentes oxidantes.

Tabela 2 - Potenciais de oxidação de alguns agentes oxidantes.

Oxidantes	Potencial de oxidação eletroquímico (V)
Flúor	3,06
Radical hidroxila (\bullet OH)	2,80
Ozônio	2,20
Peróxido de hidrogênio	1,78
Permanganato de potássio	1,70
Hipoclorito	1,49
Cloro	1,36
Dióxido de cloro	1,27

Fonte: Cavalcanti (2016).

De acordo com Cavalcanti (2016), para que ocorra a obtenção do radical livre reativo, é necessário utilizar combinações entre oxidantes fortes: (a) peróxido de hidrogênio + ozônio; (b) ozônio + ultravioleta; (c) dióxido de titânio + luz ultravioleta; (d) peróxido de hidrogênio + ozônio + ultravioleta e (e) oxidação em combinação com eletrólise.

Os oxidantes mais utilizados são os que envolvem ozônio, peróxido de hidrogênio e ultravioleta, pois são eficazes e ágeis (CAVALCANTI, 2016).

Os POA's podem resultar subprodutos que consomem elevadas quantidades de radicais de hidroxila, formando compostos oxigenados como aldeídos, ácidos carboxílicos e dióxido de carbono, o que diminui a degradação efetiva dos poluentes (METCALF et al., 2003).

Apesar dos processos oxidativos avançados apresentarem uma excelente performance, eles não removem os íons dissolvidos por completo (ZELINSKI, 2018). Dessa forma, pode-se utilizar os trocadores iônicos para a remoção desses íons.

2.3.2.2 Trocadores iônicos

A troca iônica é um processo muito usado e eficaz para a remoção de substâncias perigosas em baixas concentrações, como metais solúveis em efluentes industriais (BENVENUTI, 2012).

O processo unitário de troca iônica transfere o componente de uma fase líquida para uma fase sólida, na qual é insolúvel (MIERZWA et al., 2005). Essa técnica

promove a troca de íons de uma determinada carga que estão solubilizados no efluente por quantidades equivalentes de outros íons de cargas iguais (CAVALCANTI, 2016).

Os trocadores iônicos são constituídos por resinas catiônicas do tipo fortemente e fracamente ácidas e resinas aniônicas do tipo fortemente e fracamente básicas, com leitos organizados de forma alternadas, promovendo assim a redução da carga iônica e permitindo o reuso do efluente industrial (CAVALCANTI, 2016; RIANI, 2008).

As resinas utilizadas no processo de troca iônica são produzidas a partir de uma matriz polimérica (poliestireno e divinilbenzeno ou poliacrílica) e por grupos funcionais (CAVALCANTI, 2016). Dentre os grupos de resinas catiônica e aniônicas, há ainda os subgrupos abaixo, onde cada um deles é indicado para remoção de íons específicos e possuem peculiaridades diferentes (MIERZWA et al., 2005):

- a) resina catiônica fortemente ácida (CFA): formada por uma estrutura química de estireno e divinilbenzeno, possui grupos funcionais de radicais de ácido sulfônico ($R-SO_3H$) e podem operar em uma ampla faixa de pH;
- b) resina catiônica fracamente ácida (CfA): possui grupo funcional de carboxilato ($R-COOH$) e trabalha com uma variação de pH que vai do neutro ao alcalino;
- c) resina aniônica fortemente básica (AFB): conta com o grupo funcional de amina quaternária ($R-N(CH_3)_3^+$) e pode trabalhar com uma faixa de pH entre 1 e 13;
- d) resina aniônica fracamente básica (AfB): são eficazes na remoção de ânions de ácido forte, como o cloreto, sulfato e nitrato, formando grupos funcionais de poliamina ($OH-R-NH_2$) e funciona somente numa faixa de pH ácido.

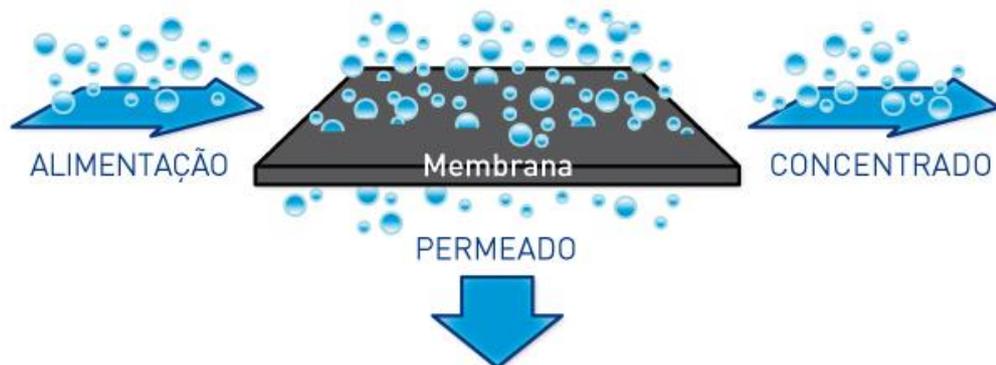
Apesar do processo de troca iônica, comparado ao processo físico-químico, possuir vantagens como a remoção seletiva dos íons dissolvidos, a sua regeneração utiliza produtos químicos e consome uma elevada quantidade de água (MIERZWA et al., 2005). Uma técnica bastante eficiente para o tratamento de efluente galvânico, o processo de separação por membranas vem sendo cada mais utilizado, pois é capaz de remover sólidos em suspensão e até elementos iônicos, permitindo que águas de lavagens possam ser reutilizadas (CAVALCANTI, 2016).

2.4 PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS (PSM)

Muito utilizado nas últimas décadas, o processo de separação por membranas possui inúmeras vantagens se comparadas aos processos convencionais de separação, pois apresentam uma seletividade boa, podem ser utilizadas no fracionamento de termolábeis e possuem uma operação simplificada (PICOLI, 2018).

O funcionamento das membranas se baseia na separação de fases de um fluido, separando pequenas partículas sólidas, óleos emulsificados, microrganismos, gases e íons (CAVALCANTI, 2016). A corrente contendo a substância a qual deseja-se filtrar é encaminhada para a membrana e, após passar pelos seus poros, resulta em duas correntes diferentes, o permeado e o concentrado (BELELI, 2019; MIERZWA et al., 2005). O permeado é a corrente na qual os contaminantes foram removidos e o concentrado é a corrente onde os contaminantes estão presentes. A Figura 4 ilustra o funcionamento de uma membrana.

Figura 4 - Processo de separação de uma membrana.



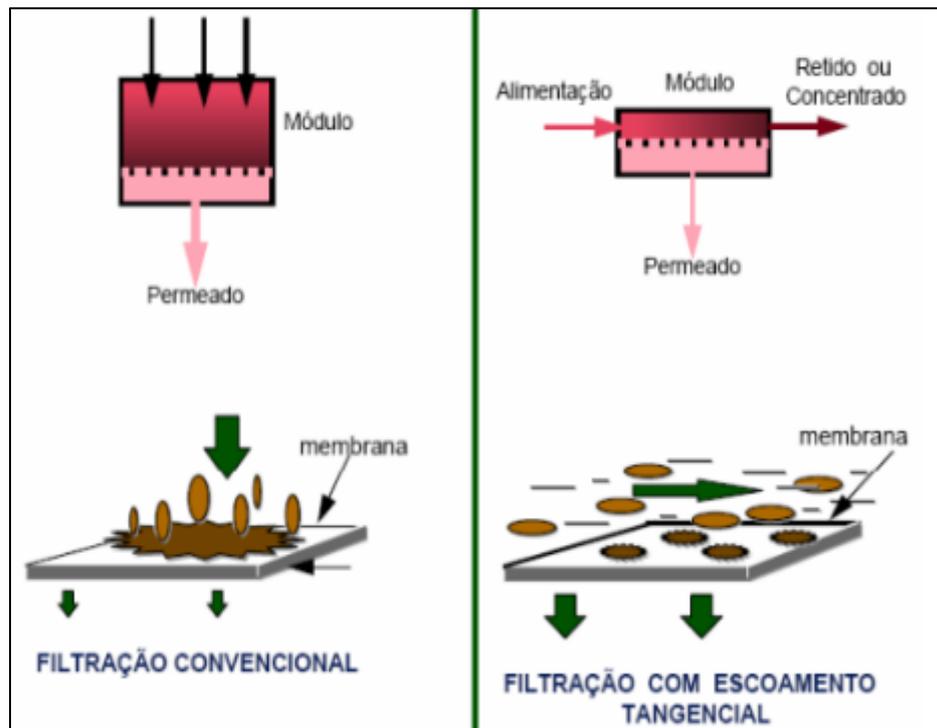
Fonte: Adaptado de Pentair X-Flow (2021).

A separação é possibilitada por meio de uma força motriz, podendo ser por pressões diferentes entre as extremidades da membrana, afinidade química entre a substância a ser filtrada e a membrana, entre outros (MCCABE et al., 1993).

O processo de filtração pode ser classificado de duas formas, tangencial e transversal (Figura 5). O escoamento tangencial (*cross flow*) é caracterizado por apresentar um fluxo paralelo a membrana, configuração essa que permite que a formação de precipitado na superfície da membrana seja reduzida, mantendo assim um fluxo constante por um maior período de tempo (RIPPERGER et al., 2002). Já o

escoamento transversal (convencional) possui um fluxo perpendicular a membrana, resultando num depósito de partículas na superfície chamado de torta (HABERT et al.,2006). Segundo Mulder (1996), essa configuração é mais suscetível a colmatagem, ou seja, quando as partículas em suspensão penetram nos poros da membrana, causando a redução do diâmetro desses poros.

Figura 5 - Comparação entre o processo de filtração convencional e tangencial.



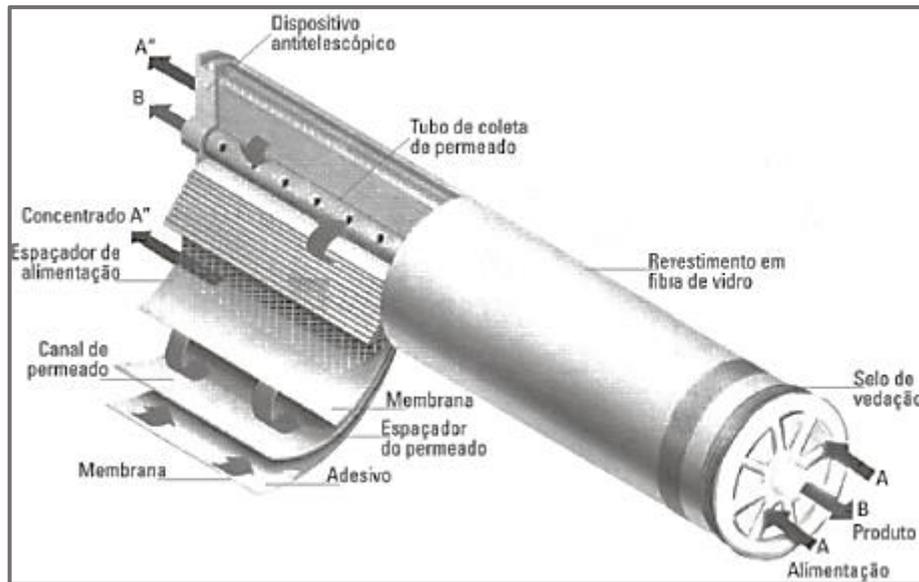
Fonte: Habert et al. (2006).

Para permitir o seu correto funcionamento, as membranas precisam ser acondicionadas em módulos os quais possuem diversas formas geométricas (ALMEIDA, 2002). Segundo Cavalcanti (2016), os principais tipos de módulos são:

- a) módulos espirais: formado por um conjunto de tubos, onde em seu interior são inseridas membranas com a forma espiral (Figura 6). Podem ser utilizados em processos com pressões intermediárias e altas;
- b) módulos com fibra oca: membranas com diâmetro menor que 0,5 mm. Essa geometria permite que módulos compactos sejam inseridos numa grande área de filtração;

- c) módulos tubulares: a membrana é acondicionada em tubos. Podem suportar uma quantidade maior de sólidos em suspensão e emulsões oleosas;
- d) módulos com placas planas: membranas no formato plano são dispostas em camadas de placas de suporte, podendo ser empilhadas na vertical ou horizontal.

Figura 6 - Representação de uma membrana espiral



Fonte: MIERZWA et al. (2005).

2.4.1 Classificação dos processos de separação de membranas

Os processos de separação por membranas podem ser divididos em diversos tipos, sendo eles microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF), osmose inversa (OI) e eletrodialise (ED) (MIERZWA et al., 2005; CAVALCANTI, 2006). O Quadro 1 contempla as principais diferenças entre esses tipos de processos.

Quadro 1 - Características dos principais PSM

(continua)

Processo	Força Motriz	Material retido	Material que permeia	Aplicações
Microfiltração (MF)	ΔP (0,5-2 atm)	Material em suspensão, bactérias. Massa molar > 500 kDa (0,01 μm)	Água e sólidos dissolvidos	Esterilização bacteriana, clarificação de vinhos e sucos

(conclusão)

Ultrafiltração (UF)	ΔP (1-7 atm)	Colóides, macromoléculaM assa molar > 5000 Da	Águas (solvente), sais solúveis de baixa massa molar	Fracionamento/concentração de proteínas e recuperação de pigmentos
Nanofiltração (NF)	ΔP (5-25 atm)	Moléculas de massa molar média de 500 < MM < 2000 Da	Água, sais e moléculas de baixa massa molar	Purificação de enzimas, biorreatores de membrana
Osmose Inversa (OI)	ΔP (15-80 atm)	Todo material solúvel ou em suspensão	Águas (solventes)	Dessanilização e desmineralização de água
Eletrodiálise (ED)	ΔE volts	Macromoléculas e compostos não iônicos	Íons	Concentração de soluções salinas; purificação de águas

Fonte: Adaptado de HABERT et al. (2006).

Segundo Cavalcanti (2016), a microfiltração é um processo de separação realizado por meio de membranas porosas, que apresentam poros com diâmetro que variam de 0,02 até 10 μm . Esse tipo de membrana opera com uma faixa de pressão de 7 a 170 kPa e retêm sólidos suspensos e bactérias (CAVALCANTI, 2016).

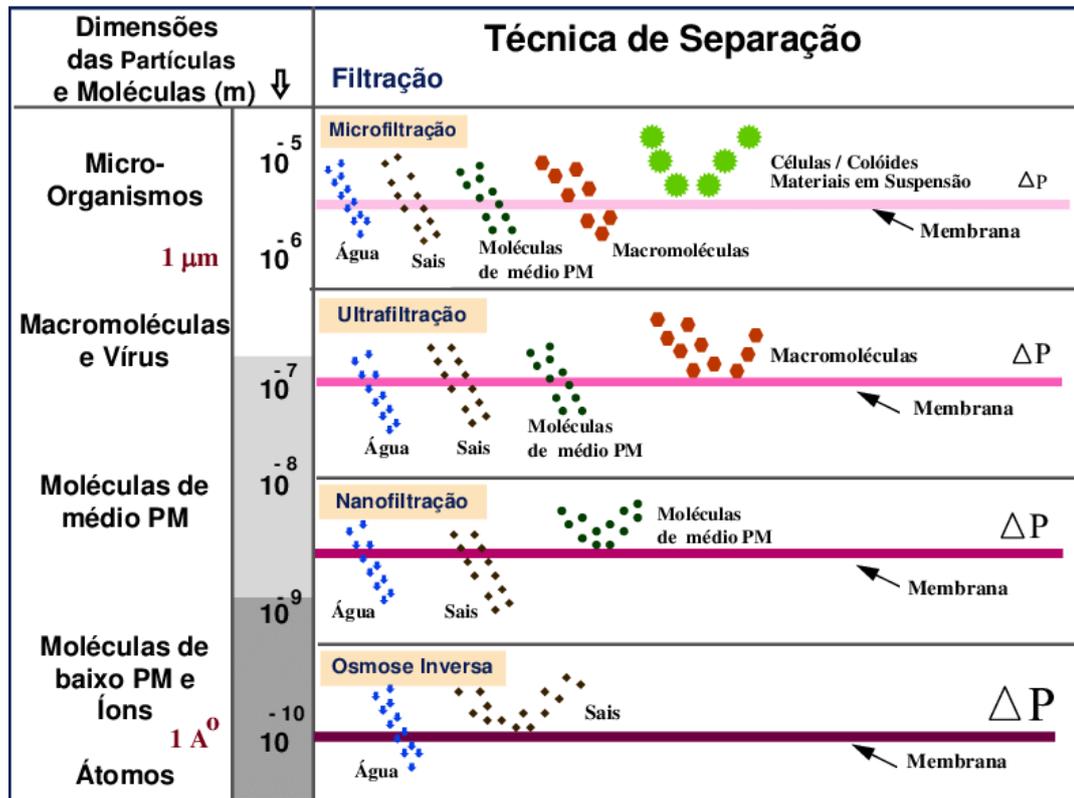
Com diâmetro de poros variando entre 0,002 a 0,2 μm , as membranas de ultrafiltração precisam de uma pressão maior quando comparada com as de microfiltração, de 1 a 10 bar. O processo de separação com membranas UF são eficazes para remoção de coloides e compostos orgânicos de elevada massa molar (MIERZWA et al., 2005).

As membranas de nanofiltração trabalham com pressão de 5 a 35 bar e possuem diâmetro de poros na faixa de 0,00009 a 0,008 μm . São capazes de remover alguns sais e compostos orgânicos de massa molar de 250 até 1000 g/mol (MIERZWA et al., 2005; CAVALCANTI, 2016).

No sistema de eletrodiálise, a transferência de massa ocorre por meio de uma membrana semipermeável, por diferença de potencial elétrico entre as membranas (MIERZWA et al., 2005). É muito utilizada para separar composto iônicos, porém não é eficaz na remoção de compostos moleculares e sólidos em suspensão (MIERZWA et al., 2005). As membranas semipermeáveis catiônicas e aniônicas utilizadas na eletrodiálise permitem que os íons negativos sejam transferidos para o ânodo e os íons positivos para o cátodo, a partir de um campo elétrico. Durante essa transferência os ânions passam pela membrana aniônica, mas ficam retidos na membrana

catiônica, o mesmo ocorre os cátions (STREIT, 2011). A Figura 7 faz uma comparação entre as membranas, demonstrando a capacidade de retenção de cada uma delas.

Figura 7 – Comparação da capacidade de retenção de cada membrana.



Fonte: HABERT et al. (2006).

2.4.2 Osmose inversa

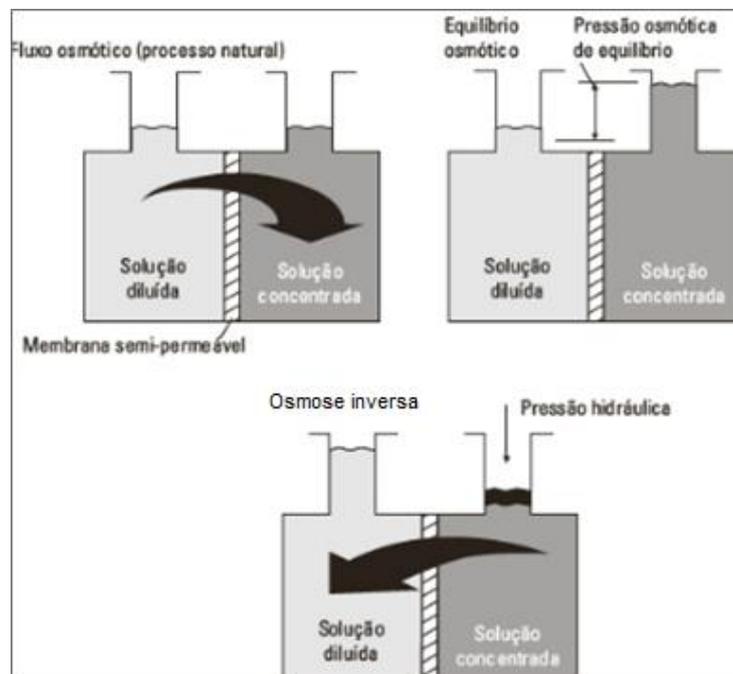
Entre todos os processos de separação por membranas, o processo por osmose inversa (OI) é um dos mais utilizados. Se comparado aos processos de dessalinização, como por exemplo a troca iônica ou a evaporação, é o mais econômico (MIERZWA et al., 2005). É utilizada em processos que exigem a obtenção de um permeado com alto grau de qualidade, pois é capaz de impedir a passagem de grande parte dos sais dissolvidos ou moléculas inorgânicas e orgânicas (MIERZWA et al., 2005).

Esse tipo de PSM é baseado no fenômeno natural da osmose, onde a água passa por uma membrana semipermeável contendo uma solução salina diluída, seguindo para uma solução de maior concentração, de tal maneira que seja atingido um equilíbrio. O nível da solução concentrada é então elevado, resultando em uma

diferença de nível entre as soluções, onde essa diferença de nível é denominada de pressão osmótica de equilíbrio (MIERZWA et al., 2005). Para que o processo de osmose inversa ocorra, uma pressão superior à pressão osmótica deve ser fornecida à solução com maior concentração. Essa pressão fornece força para a sua passagem através da membrana, seguindo para a solução de menor concentração (CAVALCANTI, 2016). A Figura 8 mostra esse fenômeno.

Segundo Habert et al. (2006), a pressão de trabalho do PSM de osmose inversa opera na faixa de 15 a 80 atm.

Figura 8 – Esquema de funcionamento do fenômeno de osmose inversa.



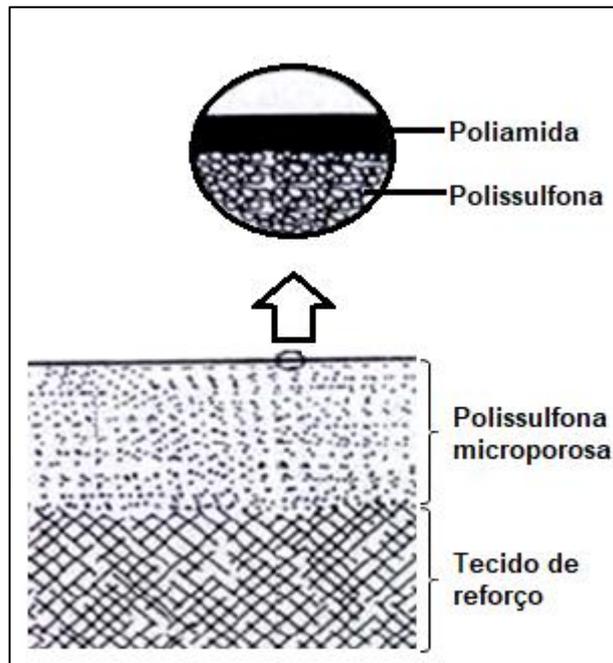
Fonte: Adaptado de MIERZWA et al. (2005).

De acordo com Cavalcanti (2006), a osmose inversa possui diversas aplicações, sendo algumas delas:

- a) remoção de salinidade de tratamentos biológicos;
- b) remoção de compostos orgânicos e inorgânicos tóxicos;
- c) obtenção de água para reuso;
- d) remoção de microrganismos;
- e) remoção de metais pesados, como zinco (Zn), níquel (Ni) e cobre (Cu).

A maioria das membranas de OI existentes no mercado possuem como material o polímero orgânico poliamida (PICOLI, 2018; CAVALCANTI, 2016). A estrutura da membrana é formada por três partes: tecido de poliéster, suporte de tecido e polissulfona e uma película de poliamida que promove uma barreira seletiva (SCHNEIDER, TSUTIYA, 2001). A Figura 9 demonstra essa estrutura.

Figura 9 – Exemplo de estrutura de uma membrana de OI



Fonte: Adaptado de SCHNEIDER, TSUTIYA (2001).

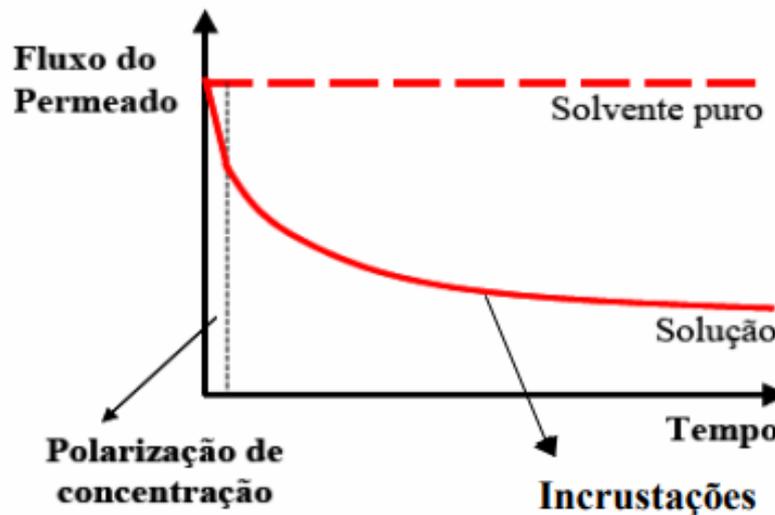
A membrana de OI está sendo muito utilizada no tratamento de efluentes industriais, pois além da viabilidade econômica, ela permite que tanto o permeado quanto o concentrado possam ser reutilizados em outros processos (BALDASSO, 2011). Além disso, consomem uma quantidade menor de produtos químicos e geram uma quantidade menor de lodo se comparado a outros processos de tratamento de efluentes (ZELINSKI, 2018). Porém, alguns fatores como *fouling* e polarização por concentração, podem comprometer o desempenho dos PSM.

2.4.3 Mecanismos de interferência do funcionamento de PSM

O fenômeno de polarização por concentração ocorre quando há um aumento da concentração de solutos na interface da membrana, causado pela transferência do solvente (BALDASSO, 2011; MARTINS, 2012). Segundo Martins (2012), a polarização por concentração pode ocasionar o aumento da pressão osmótica na

alimentação da membrana, o que reduz a força motriz e por fim reduz o fluxo do permeado. A Figura 10 mostra a redução do fluxo do permeado ocasionado pela polarização de concentração e pela formação de incrustações.

Figura 10 - Redução do fluxo do permeado ocasionado pela polarização por concentração.



Fonte: OLIVEIRA (2007).

O *fouling* é uma camada que se forma na superfície da membrana que causa o bloqueio de poros. Sua formação se dá por partículas dissolvidas, suspensas ou coloidais e ocorre principalmente nos processos contendo membranas de MF e UF, pois essas são mais porosas (MULDER, 1996). As membranas com menor porosidade (NF e OI) também podem ser afetadas por esse problema devido a cristalização de íons na superfície, causando uma diminuição do fluxo por cargas inorgânicas e saturando o sistema, amplificando a precipitação dos sais (ZELINSKI, 2018). A formação do *fouling* pode ser dividido por fatores químicos, envolvendo géis camadas de sais precipitados, ou biológico, causado pelo surgimento de limo ou biofilmes (CAVALCANTI, 2016).

Segundo Baldasso (2011), os principais fatores que influenciam na formação de *fouling* são:

- a) as reações físico-químicas com o material da membrana, podendo ocorrer a adsorção das moléculas na sua superfície ou ainda no seu interior;
- b) a obstrução dos poros causado por moléculas ou partículas em suspensão, podendo ocorrer na superfície da membrana e também no seu interior;

c) formação de torta na superfície da membrana causada pela deposição de material em suspensão.

No caso das membranas de OI, os principais tipos de constituintes que oferecem risco de formação de incrustação na superfície são: cálcio, magnésio, alumínio, bário, manganês, ferro, sílica, bicarbonatos, hidróxidos, sulfatos e fosfatos (CAVALCANTI, 2016).

Para minimizar ou adiar a formação do *fouling*, uma das técnicas que pode ser aplicada é o pré-tratamento da corrente de alimentação, incluindo tratamentos como a remoção metais, adição de agentes para minimizar a concentração de sílica e o controle do pH do meio (MARTINS, 2012; CAVALCANTI, 2016). Para recuperar o desempenho e proporcionar um aumento da vida útil da membrana, deve-se realizar limpezas químicas.

2.4.3.1 Limpeza química

A limpeza química das membranas deve ser realizada periodicamente e tem como função a remoção de óxidos de ferro, sedimentos, carvão, sílica, entre outros, que não são removíveis pela retrolavagem (CAVALCANTI, 2016). A variação de tempo da limpeza muda de acordo com tipo de entupimento. Desta forma, a fase de projeto de implantação de um sistema de osmose inversa, assim como qualquer outro tipo de PSM, necessita de análise prévia das substâncias que a água de alimentação possui e que podem precipitar na superfície da membrana (CAVALCANTI, 2016).

Segundo Baldasso (2011), o processo de limpeza química envolve uma grande variedade de agentes químicos, podendo ser utilizados separadamente ou em conjunto. Os reagentes químicos utilizados no processo de limpeza dependem do tipo de contaminante (Quadro 2).

Quadro 2 - Reagente utilizado para cada tipo de contaminante.

(continua)

Contaminante	Reagente
Microrganismos/bactérias e algas	Hipoclorito de sódio (NaClO)
Incrustações inorgânicas	Ácido clorídrico (HCl), ácido nítrico (HNO ₃), ácido oxálico (C ₂ H ₂ O ₄) e ácido cítrico (C ₆ H ₈ O ₇).
Óxidos de ácidos insolúveis	Ácido oxálico (C ₂ H ₂ O ₄)

(conclusão)

Substâncias hidrofóbicas	Reagente específico
Íons insolúveis (Fe^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Ba^{+2} , etc.)	EDTA-Na
Coloides	Cloreto de sódio (NaCl)
Óxidos de substâncias orgânicas	Hidróxido de sódio (NaOH)

Fonte: Adaptado de CAVALCANTI (2016).

2.5 ESTADO DA ARTE

Há diversos estudos que abordam a utilização de membranas para tratamento de efluentes. O Quadro 3 apresenta alguns resultados obtidos em artigos publicados a respeito do tema.

Quadro 3 - Estado da arte relacionados ao tema do presente trabalho.

(Continua)

Tema	Metodologia	Fonte
Estudo da reutilização de um efluente originado de uma indústria de acabamentos metálicos utilizando membranas de ultrafiltração e osmose inversa.	Visando a reutilização do efluente em outros processos industriais, foi empregada a combinação de duas membranas, a de ultrafiltração como pré tratamento para remover sólidos suspensos e a de osmose inversa para remover metais e compostos orgânicos/inorgânicos. O conjunto de membranas possibilitou a remoção de DBO, sólidos totais e níquel. A eficiência do conjunto de membranas atingiu valores 91,3 % a 99,8 %, atendendo assim os critérios de remoção de contaminantes, possibilitando a reutilização desse efluente.	Petrinic et al. (2015)
Avaliação da eficácia da remoção de compostos orgânicos e inorgânicos de um lixiviado de aterro sanitário usando membrana de osmose inversa.	O processo iniciou pelo filtro de areia para remoção de partículas suspensas maiores que 50 μm . Em seguida utilizou-se um filtro para remover partículas suspensas maiores que 10 μm , posteriormente foi realizado ajuste de pH. Por fim, o efluente passou membrana de osmose inversa. Dentre os parâmetros analisados, a remoção de cianeto foi de 99 % e a de DQO foi de 97 %.	Talalaj (2015)

(Conclusão)

Avaliação do processo de separação de membranas de osmose inversa no tratamento da drenagem ácida de mina (DAM) resultante da mineração.	Pelo fato do DAM apresentar elevada concentração de sulfato e cobre, foram realizados testes com a alimentação contendo soluções sintéticas de CuSO_4 nas concentrações de 1,6, 16 e 160 mol/L. Cloreto de sódio e bicarbonato de amônio foram utilizados como soluções de extração, dando início ao processo de tratamento da DAM por meio da membrana de osmose inversa. Com esse processo, foi possível obter uma remoção de alumínio (99,8 %), cobre (98,9 %) e zinco (99,5 %).	Vital et al. (2018)
--	--	---------------------

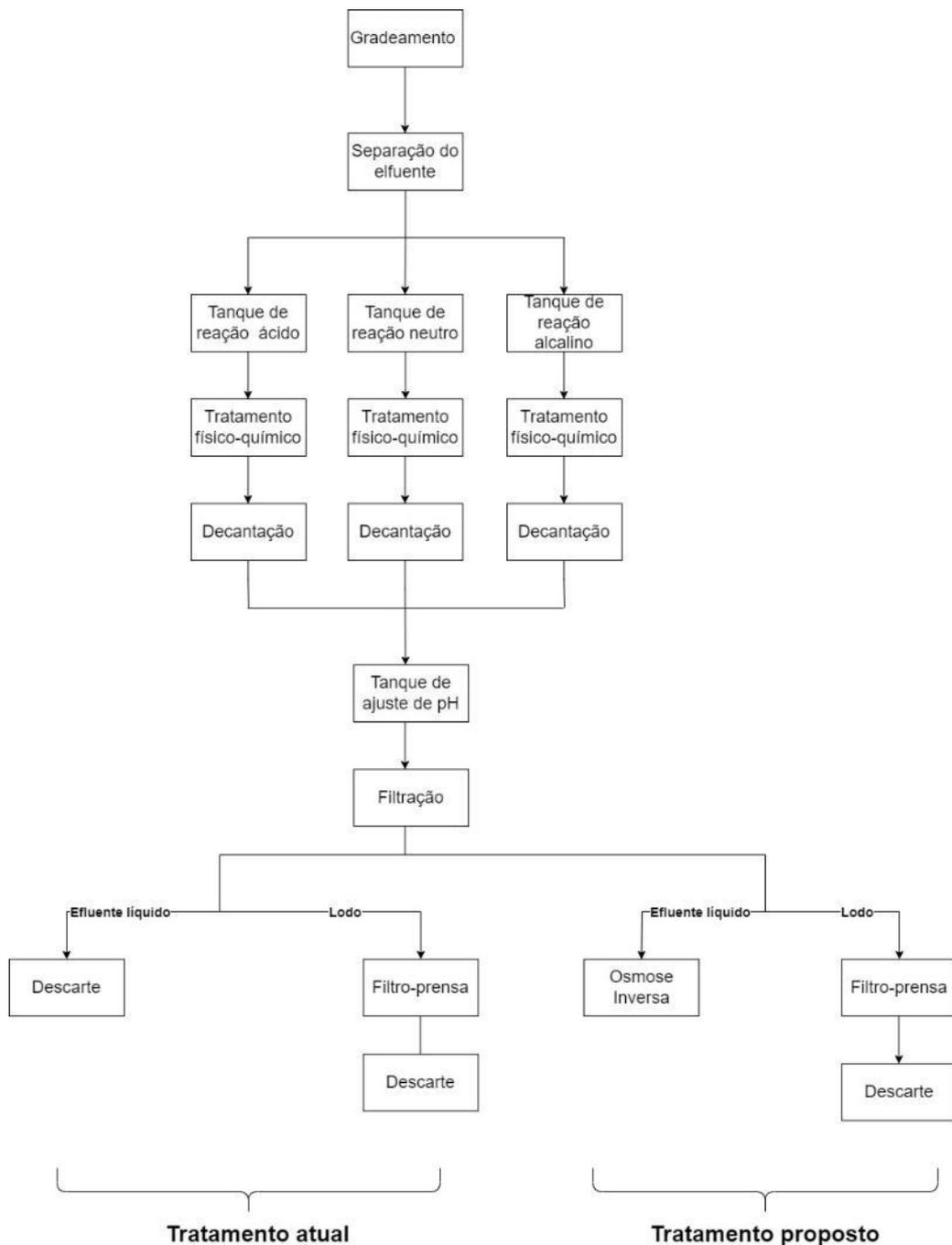
Fonte: O Autor (2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo irá apresentar a metodologia que será aplicada durante a execução do estudo, bem como todos os materiais utilizados.

A Figura 11 mostra um comparativo entre o processo atual para tratar o efluente e a estratégia proposta pelo presente trabalho.

Figura 11 - Comparativo entre o processo de tratamento atual e o proposto pelo estudo



Fonte: O Autor (2021).

3.1 MATERIAIS

As amostras de efluente foram fornecidas por uma indústria galvânica localizada na serra gaúcha. Foram coletadas amostras do efluente antes dele passar pela membrana de osmose inversa e após, afim de comparar os resultados obtidos.

A membrana de osmose inversa utilizada foi uma membrana do tipo plana espiral e apresenta as seguintes especificações fornecidas pelo fabricante (Tabela 3).

Tabela 3 - Especificações da membrana de OI.

Material da membrana	Poliamida
Fabricante	Metagoal®
Diâmetro médio do poro	0,0001 µm
Temperatura máxima de trabalho	45 °C
pH	2 - 11
Área	0,35 m ²
Pressão máxima	6,89 bar

Fonte: O Autor (2021).

3.1.1 Limpeza química

Com o objetivo de recuperar o fluxo, foram realizadas limpezas químicas na membrana após a finalização dos testes, seguindo o procedimento e utilizando os agentes indicados na Tabela 4.

Tabela 4 - Soluções para realização da limpeza química da membrana de OI.

Solução de limpeza	Concentração (mol/L)	Tempo
Água destilada	-	5 minutos
Ácido cítrico	0,08	15 minutos
Água destilada	-	5 minutos
Hidróxido de sódio	0,025	15 minutos
Água destilada	-	5 minutos

Fonte: O Autor (2022).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Caracterização do efluente

O efluente foi caracterizado por meio de processos químicos e físicos, como: Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Sólidos Totais (ST), pH, metais como cobre (Cu), níquel (Ni), zinco (Zi) e íons cianeto para posteriormente ser comparado com a legislação. Todos os métodos estão descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. O Quadro 4 mostra as metodologias que foram utilizadas para determinar os parâmetros citados. As análises foram realizadas no Laboratório de Análises e Pesquisas Ambientais – LAPAM da Universidade de Caxias do Sul.

Quadro 4 - Parâmetros avaliados no efluente bruto e após a OI e metodologias.

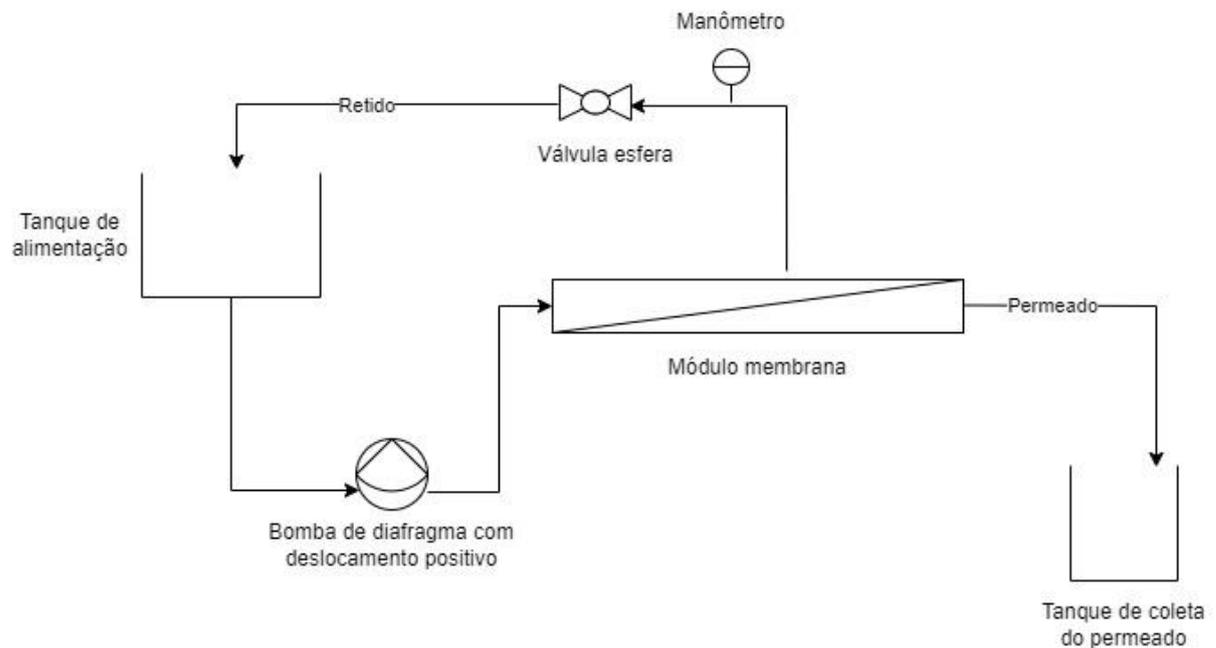
Parâmetro	Metologia
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	SMEWW – Método 5220 D
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	SMEWW – Método 5210 D
Sólidos Totais (ST)	SMEWW – Método 2540 D
pH	SMEWW – Método 4500-H+
Cobre total	SMEWW – Método 3030-E/311-B
Níquel total	SMEWW – Método 3030-E/3111-B
Zinco total	SMEWW – Método 3030-E/3111-B
Cianeto total	SMEWW – Método 4500-CN-B, C, E

Fonte: O Autor (2021).

3.2.2 Caracterização da membrana e testes

Os testes com a membrana de osmose inversa foram realizados no Laboratório de Membranas e Materiais – LAMEM da UCS. O sistema de PSM utilizado para a membrana de osmose inversa é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - PSM com membrana de OI.



Fonte: O Autor (2021).

Os testes foram feitos em regime de batelada com um determinado fluxo. Para determinação do fluxo de permeado, foi utilizada a Equação (1):

$$J_P = \frac{V}{A \times t} \quad (1)$$

Sendo: J_P o fluxo de permeado ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), V o volume do permeado (L), A a área da membrana (m^2) e t é o intervalo de tempo entre as coletas do permeado (h).

A permeabilidade hidráulica foi calculada por meio da Equação (2):

$$L_P = \frac{J_P}{\Delta P} \quad (2)$$

Sendo: L_P a permeabilidade hidráulica ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot bar^{-1}$) e ΔP a pressão transmembrana (bar).

A seletividade da membrana foi calculada pela Equação (3):

$$R = \frac{C_A - C_P}{C_A} \times 100 \quad (3)$$

Sendo: R a retenção percentual do analito (%), C_A a concentração do analito na alimentação e C_P é a concentração do analito no permeado.

Antes de iniciar os testes com a membrana, foram realizados ensaios de permeação utilizando água destilada, a fim de obter a compactação da membrana e o fluxo utilizando pressões 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 e 6 bar, coletando amostras em triplicata para obtenção do fluxo. Posteriormente, foram realizados os testes com o efluente galvânico, utilizando as mesmas pressões e coletando amostras em triplicata. Para determinação da permeabilidade hidráulica foram feitos ensaios utilizando água destilada, com uma variação de pressão de 0 a 6 bar, antes da realização dos testes com o efluente e após a finalização.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes com a membrana de osmose inversa e as discussões.

4.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

No presente trabalho, foram analisados os parâmetros demanda bioquímica de oxigênio (DBO), cianeto total, demanda química de oxigênio (DQO), pH, sólidos totais, alumínio total, cobre total, níquel total e zinco total. As análises foram realizadas no efluente bruto e no efluente tratado. Os resultados estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados análises efluentes bruto e tratado.

Parâmetros	Efluente bruto	Efluente tratado final
DBO (mg O ₂ /L)	10,60	2,50
Cianeto total (mg CN ⁻ /L)	21,45	3,67
DQO (mg O ₂ /L)	90,00	30,00
pH	9,38	10,18
Sólidos totais (mg/L)	4782,00	422,00
Alumínio total (mg Al/L)	7,24	0,36
Cobre total (mg Cu/L)	17,16	5,40
Níquel total (mg Ni/L)	0,03	< L.Q.
Zinco total (mg Zn/L)	0,10	0,04

Fonte: O Autor (2022).

A determinação da redução da concentração do efluente, ou seja, da seletividade da membrana, foi calculada usando a Equação (3) (item 3.2.2).

4.1.1 Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)

O resultado pós-tratamento com a membrana de OI foi de 2,50 mg O₂/L, o que representa uma redução de 76,42 % da DBO presente no efluente, considerado um valor satisfatório em relação as legislações ambientais, que determinam que a concentração permitida para realizar o descarte do efluente no meio ambiente varia entre 40 e 120 mg/L (CONSEMA 355, 2017).

4.1.2 Cianeto total

A concentração de cianeto encontrada no efluente após o tratamento com a membrana de OI foi de 3,67 mg/L, uma redução de 82,92 % em relação ao efluente bruto. Apesar da redução apresentada, esse parâmetro não atende ao valor permitido pela legislação ambiental estadual, cujo padrão de emissão máximo de cianeto total é de 0,2 mg/L (CONSEMA 355, 2017). Segundo Pedro (2010), o cianeto deve ser tratado ainda na fase do tratamento físico-químico, onde o mesmo é convertido em cianato. Alguns desvios no tratamento físico-químico do efluente bruto analisado podem ter contribuído para o alto valor de cianeto encontrado.

4.1.3 Demanda química de oxigênio (DQO)

O resultado de DQO presente no efluente tratado foi de 30 mg O₂/L, ocasionando uma redução de 66,67 %. Esse parâmetro já estava em conformidade com a legislação ambiental estadual antes mesmo do tratamento com a membrana de OI, onde, segundo a Consema 355 de 2017, para realizar o descarte do efluente no meio ambiente, é necessário que ele apresente valores entre 150 e 330 mg/L.

4.1.4 Sólidos totais

A quantidade de sólidos totais presentes no efluente tratado foi de 422 mg/L, representando uma redução percentual de 91,18 %. Embora tenha ocorrido redução, essa diminuição em sólidos totais presentes não é o suficiente para se enquadrar na legislação ambiental estadual, que determina valores que variam de 50 a 140 mg/L (CONSEMA 355, 2017). No estudo realizado por Petrinic et al. (2015), houve uma remoção total dos sólidos suspensos do efluente. Esse resultado foi possível em função do pré-tratamento realizado no efluente, onde foi utilizada uma membrana de ultrafiltração para remover os sólidos presentes no efluente. Esse resultado reforça a importância da realização do pré-tratamento do efluente, uma vez que o mesmo eleva o desempenho geral do sistema tornando-o mais estável e aumentando a vida útil da membrana de OI (PETRINIC, 2015).

4.1.5 Alumínio total

A redução de alumínio obtida após o tratamento com a membrana de OI foi de 0,36 mg/L, apresentando uma redução percentual de mais de 95 %. O valor encontrado ficou dentro do permitido na legislação ambiental estadual Consema 355 de 2017, que estipula valores inferiores a 10 mg/L para descarte no meio ambiente. O valor obtido nesse estudo se confirma se comparado ao encontrado em outros estudos, como no de Vital et al. (2018) que obteve uma redução desse parâmetro de 99,87 %.

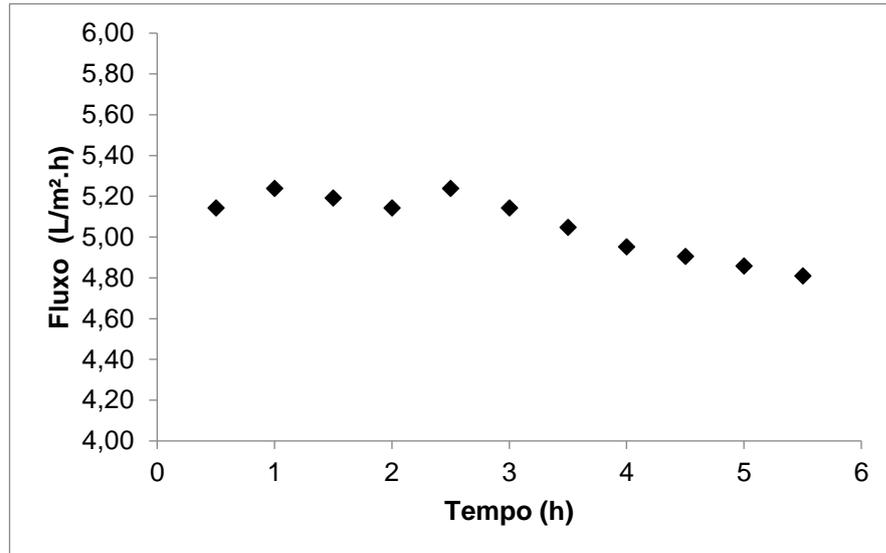
4.1.6 Cobre total

Apresentando um valor de 5,4 mg Cu/L, o parâmetro de cobre mostra uma redução percentual de 68,53 %. Esse valor não atende a legislação ambiental estadual a Consema 355 de 2017, que estabelece valores de cobre de 0,5 mg/L para descarte no meio ambiente. Segundo Cavalcanti (2016), para obter a sedimentação do cobre na fase do pré-tratamento físico-químico é necessário que o pH do meio esteja em 8. A devida realização do pré-tratamento interfere diretamente no resultado final do tratamento com a membrana.

4.2 COMPACTAÇÃO DA MEMBRANA

Inicialmente, antes dos testes de OI, foi realizado a compactação da membrana utilizando água destilada, com uma pressão de 6 bar, até atingir um fluxo constante. A Figura 13 demonstra os resultados do ensaio de compactação.

Figura 13 – Resultado do ensaio de compactação da membrana de OI.



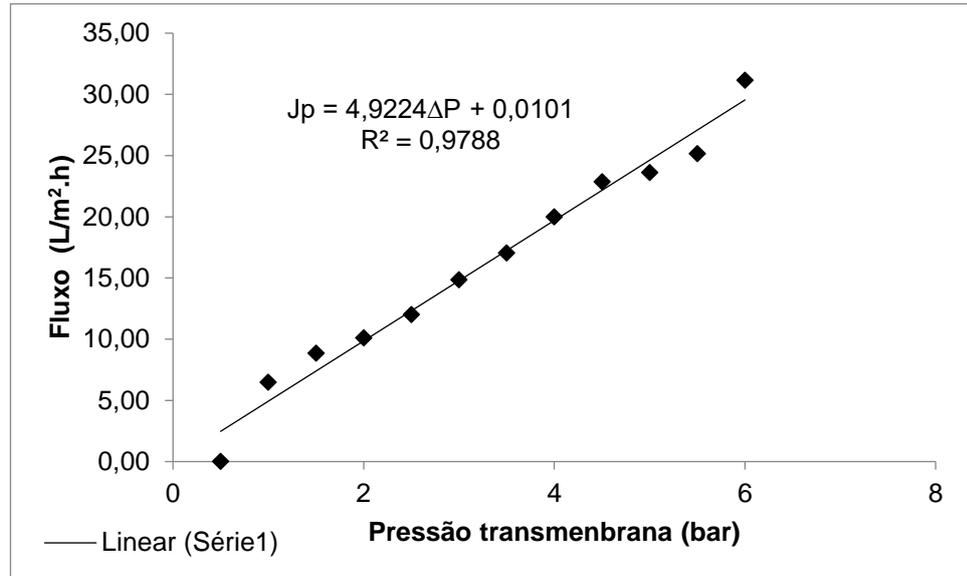
Fonte: O Autor (2022).

Percebe-se que, com o passar do tempo, os valores de fluxos ficaram aproximadamente constantes, entre 4,8 L/m²h e 4,9 L/m²h, fato que sinaliza a compactação da membrana. A diminuição do fluxo de água ao longo do tempo ocorreu em função do adensamento da microestrutura da membrana, motivo pelo qual deve-se realizar a compactação da membrana antes de iniciar os testes (BALDASSO, 2011).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA MEMBRANA

As características da membrana de osmose inversa foram determinadas a partir do fluxo do permeado e da permeabilidade hidráulica. A Figura 14 apresenta os resultados para a caracterização da membrana com água destilada.

Figura 14 – Fluxo do permeado com água destilada em função da pressão.



Fonte: O Autor (2022).

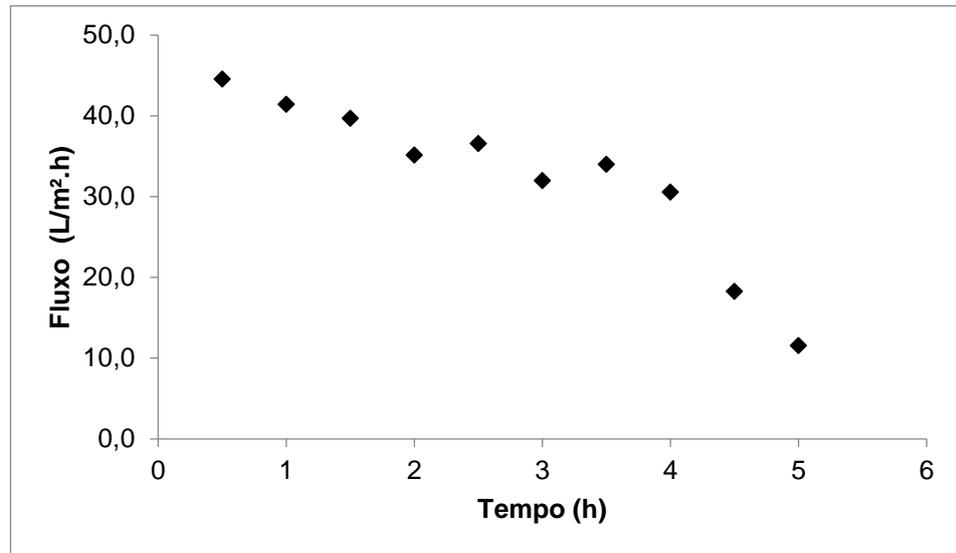
Pode-se observar que conforme a pressão de trabalho aumenta, o fluxo do permeado aumentou, apresentando um comportamento linear. Esse comportamento ocorre apenas em testes com água destilada, pois é um líquido em que não há a presença de sujidades ou partículas capazes de incrustar a membrana (PERTILE, 2013). A permeabilidade hidráulica resultou em 4,92 L/m².h.bar e foi calculada por meio da relação direta com o coeficiente angular da reta, uma vez que o fluxo do permeado é diretamente proporcional a pressão do sistema, conforme descrito na Equação 2 (item 3.2.2).

As características da membrana podem ser afetadas por diversos fatores, como a sua morfologia, composição do material, a espessura, porosidade e formação de incrustação durante o processo (PERTILE, 2013).

4.4 FLUXO DO PERMEADO COM O EFLUENTE GALVÂNICO

Para o fluxo do permeado do efluente, foram realizados testes na membrana de OI com as mesmas pressões utilizadas na água destilada, de 0,5 a 6 bar. A permeação ocorreu a partir da pressão 1,5 bar. A Figura 15 demonstra os resultados do fluxo de permeado do efluente galvânico.

Figura 15 – Fluxo do permeado do efluente galvânico em função do tempo.

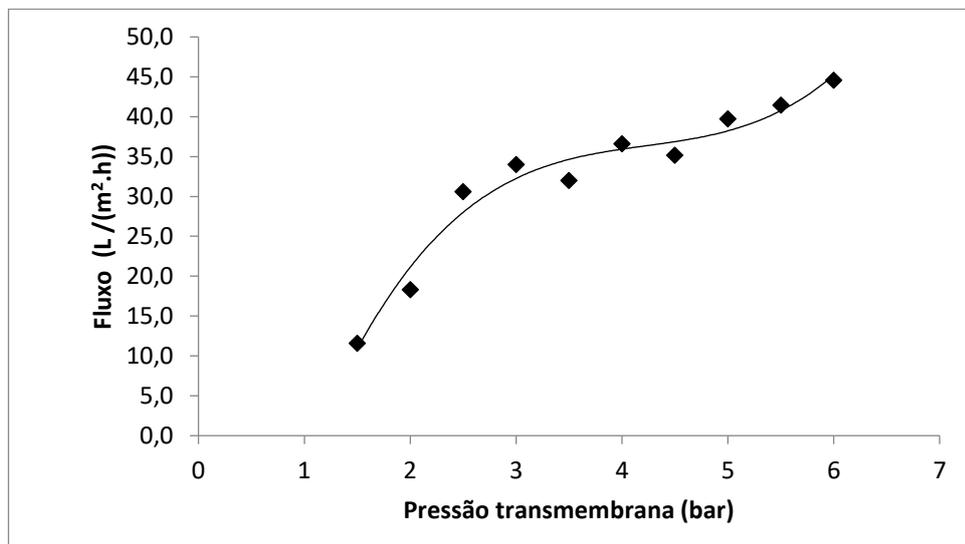


Fonte: O Autor (2022).

É possível observar que ocorreu a diminuição do fluxo com o decorrer do tempo. Isso acontece em função da formação de *fouling* e pela polarização por concentração (MARTINS, 2012).

A Figura 16 representa a variação do fluxo em função da pressão.

Figura 16 – Fluxo do permeado em função da pressão

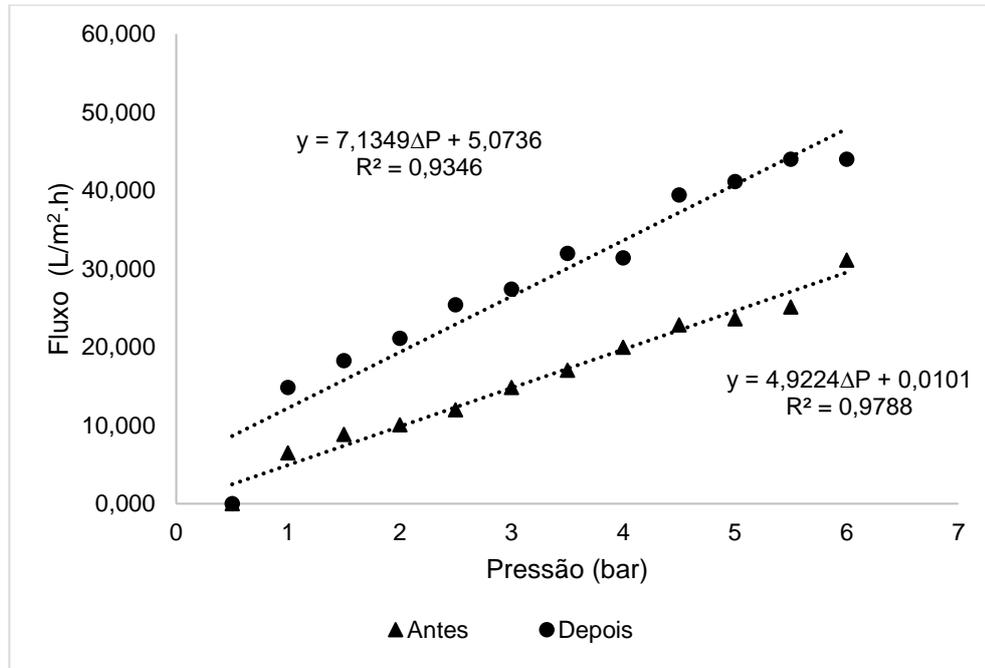


Fonte: O Autor (2022).

4.5 PERMEABILIDADE HIDRÁULICA

A Figura 17 demonstra o gráfico a permeabilidade hidráulica antes e após a limpeza química.

Figura 17 – Permeabilidade hidráulica antes e após a limpeza química.



Fonte: O Autor (2022).

A permeabilidade hidráulica com água destilada obtida antes e após a limpeza química foram de 4,92 L/m².h.bar e 7,13 L/m².h.bar, respectivamente. Diferente dos resultados obtidos nos trabalhos de Zelinski (2018) e Ghiggi (2011), observou-se que o fluxo ficou maior depois da limpeza do que antes. Isso pode ocorrer em função da limpeza realizada na membrana em testes anteriores não ter sido eficaz.

Como houve uma recuperação do fluxo do permeado, pode-se comprovar que a limpeza química realizada na membrana foi eficaz, havendo a remoção das incrustações geradoras do *fouling*.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho possibilitou realizar uma análise mais aprofundada da alternativa de utilização de membrana de OI para tratamento de efluente galvânico, avaliando a sua eficiência para a remoção de metais e outros contaminantes a fim de verificar o seu atendimento dos parâmetros com as legislações ambientais.

Todos os parâmetros analisados do efluente são reduzidos pelo PSM de OI, porém os parâmetros cianeto total, sólidos totais e cobre total ainda não atendem os requisitos da legislação ambiental estadual (CONSEMA 355, 2017).

Nos testes realizados com o sistema de membrana OI observa-se a permeação do efluente a partir de 1,5 bar. Além disso, há uma redução do fluxo de permeado com o decorrer do tempo, resultado que indica a formação de *fouling* e polarização por concentração na membrana.

A recuperação do fluxo de permeado indica que a limpeza química da membrana é eficiente.

Os resultados obtidos com a membrana de osmose inversa demonstram que a mesma possui boa seletividade para os parâmetros analisados, tendo em vista que houve a redução de todos eles. Os resultados de cianeto total, cobre total e sólidos totais, apesar de apresentarem uma boa redução, ainda não atendem às legislações ambientais estaduais, o que inviabiliza o descarte desse efluente do meio ambiente. Contudo, esses parâmetros podem ser facilmente corrigidos na fase do pré-tratamento. Sendo assim, pode-se concluir que a membrana de osmose inversa pode ser uma excelente alternativa para tratamento de fluente galvânico e que o pré-tratamento realizado no efluente é um importante fator, que pode interferir diretamente no bom funcionamento da membrana.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A realização de estudos para este trabalho apontam algumas melhorias para que a eficiência da membrana de osmose inversa possa ser maximizada, tornando viável a sua utilização para tratamento de efluentes galvânicos, sendo elas:

- a) utilização de outra membrana como a de ultrafiltração para pré-tratamento do efluente;
- b) realização dos testes com a membrana em triplicata afim de obter resultados mais reprodutíveis;
- c) realizar um estudo de viabilidade econômica da implementação da membrana em escala industrial.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, V. F., KRAUSPENHAR, T., KORZENOWSKI, C., & SIQUEIRA, M. A. **Tratamento de Soluções Contendo Ouro-Cianeto pela Técnica de Eletrodiálise.** In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. 2004. p. 17-20, 2004.
- ALMEIDA, G. P. de. **Avaliação do uso de coagulantes orgânicos e inorgânicos no tratamento de efluente de galvanoplastia.** 2019. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.
- ANA (Agência Nacional de Águas). **Estudo da Agência Nacional de Águas aborda uso da água no setor industrial.** Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/estudo-da-agencia-nacional-de-aguas-aborda-uso-da-agua-no-setor-industrial>. Acesso em: 04 dez. 2021.
- BALDASSO, C. **Fracionamento dos Componentes do Soro de Leite através da Tecnologia de Separação por Membranas.** 2011. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Curso de Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- BELELI, Y. S. **Tratamento de águas residuais da indústria de petróleo pelo processo de separação por membranas.** 2019. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2019.
- BENVENUTI, T. **Avaliação da eletrodialise no tratamento de efluentes de processos de eletrodeposição de níquel.** 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.
- BERNARDES, A. M.; SCHINEIDER, V. E. **Manual de orientação básica para minimização de efluente e resíduo na indústria galvânica.** Porto Alegre: SENAI, 2000. 62p.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília, 13 mai. 2011. Disponível em: http://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA_n.430.2011.pdf. Acesso em: 2 out. 2021.
- CAVALCANTI, J. E. W. de A. **Manual de tratamento de efluentes industriais.** 3. ed. ampl. São Paulo, SP: Engenho editora técnica Ltda., 2016.

CONSEMA (Conselho Estadual do Meio Ambiente). Resolução nº 355 de 13 de julho de 2017. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 13 jul. 2017. Disponível em:

<https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201707/19110149-355-2017-criterios-e-padroes-de-emissao-de-efluentes-liquidos.pdf>. Acesso em: 2 out. 2021.

CRISTOFOLI, K. **Clarificação de vinho branco por microfiltração utilizando diferentes membranas cerâmicas e compósitas**. 2016. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, 2016.

GHIGGI, F. F. **Tratamento de águas para consumo doméstico com membranas de ultrafiltração**. 2011. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HABERT, S. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de Separação por Membranas**. 1 ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, E-papers, 2006.

FEINI, L. I. U., ZHANG, G., QIN, M. E. N. G., & ZHANG, H. Performance of Nanofiltration and Reverse Osmosis Membranes in Metal Effluent Treatment** Supported by the National Natural Science Foundation of China (20476096, 20776133), Zhejiang Provincial Bureau of Science & Technology (2005C33040) and Bureau of Education (Key Discipline of Environmental Engineering 56310503014). **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 16, n. 3, p. 441-445, 2008.

MARTINS, D. F.; **Estudo de banhos ácidos para a substituição de banhos alcalinos cianídricos na eletrodeposição de zinco sobre pregos**. 2009. 142 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MARTINS, N. C. **Estudo de limpeza química em membranas de osmose inversa**. 2012. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MCCABE, W. L., SMITH J. C., & HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**, v. 5. New York: McGraw-hill, 1993.

METCALF AND EDDY INC. **Water Reuse Issue, Technology and Applications**, 1 ed, New York: McGraw-Hill, 2007.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria: uso racional e reúso**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2005.

MOREIRA, D. R. **Desenvolvimento de absorventes naturais para tratamento de efluentes de galvanoplastia**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

MULDER, M. **Basic Principles of Membrane Technology**. Kluwer Academic Publ.: London, 2003.

NETO, A. P.; BRETZ, J. de S.; MAGALHÃES, F. S.; MANSUR, M. B.; ROCHA, S. D. F. Alternativas para o tratamento de efluentes da indústria galvânica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Belo Horizonte, v. 13, n. 3, p. 263-270, jul./set. 2008.

OLIVEIRA, D. R. de; **Pré-tratamento do processo de osmose inversa utilizando microfiltração e investigação de técnicas de limpeza e recuperação de membranas**. 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado em ciências em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

PEDRO, J. P. BORGES. **Medidas de produção mais limpa e otimização de tratamento de efluentes líquidos em indústrias galvânicas da região metropolitana de Florianópolis**. 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

PETRINIC, I., KORENAK, J., POVODNIC, D and Helix – Nielsen, C. “A feasibility study of ultrafiltration/reverse osmosis (UF/RO)-based wastewater treatment and reuse in the metal finishing industry”, **Journal of Cleaner Producton**, 101, pp 292-300. 2015.

PEREIRA, F. V. **Remoção de íons zinco (II) de efluentes derivados de processos de galvanoplastia utilizando rejeitos de fibras vegetais modificadas quimicamente**. 2008.113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

PERTILE, Carine. **Avaliação de processos de separação por membranas como alternativas no tratamento de lixiviado de aterro sanitário**. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2013.

PENTAIR X-FLOW – **Membrane separation**. Disponível em: <https://xflow.pentair.com/pt-pt/spectrum/membrane-technology-in-general/membrane-separation#>. Acesso em: 16 out. 2021.

PICOLI, L. **Avaliação de reuso da água de purga de caldeira a partir de processos de separação por membranas**. 2018. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2018.

RIPPERGER, S.; ALTMANN, J. **Crossflow microfiltration – state of the art**. Separation and Purification Technology, v. 26, p. 19-31, 2002.

RIANI, J. C. **Utilização de resinas de troca-iônica em efluentes de galvanoplastia**. 2008. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

- SANCHES, D. J. C.; **Tratamento de efluentes de indústrias galvanicas**. 2016. 49 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Faculdade Oswaldo Cruz. São Paulo, 2016.
- SCHMIDT, A. R. **Análise da utilização de policloreto de alumínio (PAC) e sulfato de alumínio na eliminação de turbidez de água de abastecimento**. 2014. 42 f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2014.
- SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso**. 1. ed. São Paulo: ABES, 2001.
- SESI – **Manual de Segurança e Saúde no Trabalho**. Gerência de Segurança e Saúde no Trabalho – São Paulo, 2007.
- STRAIOTO, H. **Tratamento de efluente de indústria de reciclagem de plástico por processo físico-químico em escala de bancada com coagulantes orgânicos e inorgânicos**. 2019. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica do Paraná. Londrina, 2019.
- STREIT, K. F. **Estudo da aplicação de processos de separação com membranas no tratamento de efluentes de curtume: nanofiltração e eletrodialise**. 2011. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.
- VAZ, Luiz Gustavo de Lima. **Performance do processo de coagulação/floculação no tratamento do efluente líquido gerado na galvanoplastia**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de PósGraduação em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2009.
- TALALAJ, I.A. Removal of organic and inorganic compounds from landfill leachate using reverse osmosis. **Int. J. Environ. Sci. Technol.** v. 12, p. 2791–2800, 2015.
- WEIHERMANN, Eduarda; et al. **Cloreto férrico e sulfato de alumínio: importância dos coagulantes/floculantes no tratamento de efluentes galvanicos**. Centro Universitário SOCIESC – UNISOCIESC, 2009.
- VITAL, B., BARTACEK, J., ORTEGA-BRAVO, J. C., JEISON, D. Treatment of acid mine drainage by forward osmosis: Heavy metal rejection and reverse flux of draw solution constituents. **Chemical Engineering Journal**, v. 332, p. 85-91, 2018
- ZELINSKI, R. **Avaliação do emprego de processos de separação por membranas em uma central de tratamento de efluentes galvanicos**. 2018. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2018.