

ANDRÉIA MATTER

**VIABILIDADE TÉCNICA PARA REUSO DE EFLUENTE ORIUNDO DE  
LAVAGEM DE VEÍCULOS TRATADO POR ELETRÓLISE E OSMOSE  
INVERSA**

ANDRÉIA MATTER

**VIABILIDADE TÉCNICA PARA REUSO DE EFLUENTE ORIUNDO DE  
LAVAGEM DE VEÍCULOS TRATADO POR ELETRÓLISE E OSMOSE  
INVERSA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentada ao curso de Engenharia  
Ambiental da Universidade de Passo  
Fundo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo  
Hemkemeier

Passo Fundo

2022

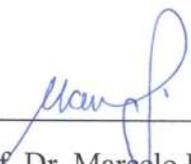
ANDRÉIA MATTER

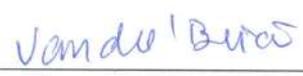
**VIABILIDADE TÉCNICA PARA REUSO DE EFLUENTE ORIUNDO DE  
LAVAGEM DE VEÍCULOS TRATADO POR ELETRÓLISE E OSMOSE INVERSA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentada ao curso de Engenharia  
Ambiental da Universidade de Passo  
Fundo, como requisito para obtenção do  
título de Engenheiro (a) Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo  
Hemkemeier

BANCA EXAMINADORA

  
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Hemkemeier  
Universidade de Passo Fundo

  
Prof. Dr. Vandré Barbosa Brião  
Universidade de Passo Fundo

  
Prof. Me. Edesnei Barbosa Brião  
Universidade de Passo Fundo

Passo Fundo

2022

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo presente da vida, por me sustentar e me dar forças para chegar até aqui e alcançar esse objetivo.

Agradeço muito a minha mãe, pelo amor incondicional, carinho, cuidado e dedicação, e por estar ao meu lado em todos os momentos, me apoiando e me incentivado a crescer cada vez mais.

Agradeço ao meu irmão Marcelo, pelo amor, apoio e conhecimento que sempre me transmitiu, além do auxílio nas coletas do efluente.

Agradeço ao meu irmão Márcio (*in memoriam*) que é uma inspiração de amor, determinação, fé e luta.

Agradeço as minhas sobrinhas Antônia e Martina, pelo amor, carinho e compreensão pela minha ausência durante esta jornada.

Quero agradecer especialmente ao meu orientador, professor Marcelo, pelo apoio, confiança, incentivo, ensinamentos e por ter acreditado no meu potencial.

Agradeço a minha banca, composta pelos professores Edesnei e Vandr e, pelos ensinamentos e pelo tempo disponibilizado.

Agradeço em especial ao meu amigo Jean que me apoiou durante toda a faculdade e me auxiliou nos momentos mais difíceis.

Agradeço as minhas amigas Denise, Franciele e Marine que sempre me apoiaram nesta trajetória, e também ao meu amigo Dennys pelo auxílio prestado.

Agradeço a funcionária dos laboratórios da UPF, Fernanda, pela companhia nos laboratórios, pela amizade e ensinamentos.

Agradeço a coordena o do curso, professores, funcionários e demais pessoas, que de alguma forma colaboraram para me tornar Engenheira Ambiental.

Por fim, agradeço a todos aqueles que estiveram ao meu lado e que de alguma maneira contribuíram positivamente durante minha graduação, saibam que marcaram minha história. Levo todos no meu coração com muito carinho!

MATTER, Andréia. **Viabilidade técnica para reuso de efluente oriundo de lavagem de veículos tratado por eletrólise e osmose inversa**. 2022. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo. 2022.

## RESUMO

A lavagem de veículos produz um efluente carregado de impurezas que estão impregnadas nos veículos, juntamente com detergentes que alteram as características desse efluente, constituindo uma fonte significativa de DQO. Devido à crescente demanda e escassez de água em todo o mundo, diversas soluções vêm sendo estudadas para promover o reuso desta água residuária, evitando o desperdício de água potável e promovendo redução de custos às empresas. O tratamento físico-químico destes efluentes não atinge os parâmetros necessários para reuso, porém há diversas tecnologias eficientes para esta finalidade. Com isso, este estudo propôs a combinação do processo de tratamento através da eletrólise e da osmose inversa, a fim de avaliar tecnicamente a viabilidade de reuso do efluente gerado em uma lavagem de veículos. O tratamento eletrolítico utiliza corrente elétrica para realizar a remoção dos poluentes, e a separação por membranas consiste na remoção de substâncias utilizando membranas de filtração, esta técnica possui grande potencial de aplicação em sistemas de reuso, pois produz um efluente tratado com altos níveis de clarificação. O efluente foi caracterizado em função dos parâmetros físico-químicos, posteriormente foi aplicado o processo eletrolítico, avaliando a melhor condição de tratamento em função do TDH aplicado, e na sequência o efluente previamente tratado passou pela membrana de osmose inversa. Posteriormente foram avaliados pH, cor, turbidez, fósforo, sólidos suspensos totais, demanda química de oxigênio e matéria orgânica de modo a comparar os resultados do efluente tratado com os parâmetros de reuso de acordo com a legislação vigente. A combinação dos tratamentos apresentou valores superiores a 80% na remoção de demanda química de oxigênio e matéria orgânica e eficiência na remoção de cor, turbidez, sólidos suspensos totais e fósforo acima de 99%. Realizando alguns ajustes no processo, estes resultados possibilitam alcançar os parâmetros exigidos pela legislação, permitindo o reuso do efluente no processo de lavagem de veículos.

**Palavras-chaves: tratamento eletrolítico; separação por membranas; reuso de efluentes.**

MATTER, Andréia. **Technical feasibility for reusing effluent from vehicle washing treated by electrolysis and reverse osmosis.** 2022. 57p. Course Conclusion Paper (Environmental Engineering) - University of Passo Fundo, Passo Fundo. 2022.

### **ABSTRACT**

Car washing produces an effluent loaded with impurities that are impregnated in vehicles, together with detergents that change the characteristics of this effluent, constituting a significant source of COD. Due to the growing demand and scarcity of water all over the world, several solutions have been studied to promote the reuse of this effluent, avoiding the waste of drinking water and promoting cost reduction for companies. The physical-chemical treatment used in the treatment of these effluents does not reach the necessary parameters for reuse, but there are several efficient treatment technologies for this purpose. Thus, this study proposed the combination of the treatment process through electrolysis and reverse osmosis, in order to technically evaluate the feasibility of reusing the effluent generated in a vehicle wash. Electrolytic treatment uses electric current to remove pollutants, and membrane separation consists of removing substances using filtration membranes, this technique has great potential for application in reuse systems, as it produces a treated effluent with high levels of clarification. The effluent was characterized according to the physical-chemical parameters, then the electrolytic process was applied, evaluating the best treatment condition according to the THD applied, and then the previously treated effluent passed through the reverse osmosis membrane. Subsequently, pH, color, turbidity, phosphorus, total suspended solids, chemical oxygen demand and organic material were evaluated in order to compare the results of the treated effluent with the reuse parameters in accordance with current legislation. The combination of treatments showed values greater than 80% in the removal of chemical oxygen demand and organic material and efficiency in the removal of color, turbidity, total suspended solids and phosphorus above 99%. Making some adjustments in the process, these results make it possible to reach the requirements demanded by the legislation, allowing the reuse of the effluent in the process of washing vehicles.

**Key-words: electrolytic treatment; membrane separation; effluent reuse.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificação das águas de reuso e seus usos preponderantes segundo a NBR 13969/1997 .....	14
Figura 2: Critério de qualidade da água de reuso segundo a NBR 13969/1997.....	15
Figura 3: Parâmetros característicos para água de reuso classe 1- Sistema Fiesp.....	16
Figura 4: Padrões de qualidade para água de reuso para fins urbanos da Resolução CONSEMA Nº 419/2020 do Estado do Rio Grande do Sul .....	17
Figura 5: Representação esquemática geral da eletrocoagulação.....	20
Figura 6: Representação ilustrativa dos métodos de filtração convencional e tangencial.....	23
Figura 7: Processos de separação por membranas que utilizam gradiente de pressão como força motriz.....	23
Figura 8: Processo de colmatção das membranas (Fouling).....	24
Figura 9: Fluxograma das etapas para elaboração da pesquisa .....	27
Figura 10: Protótipo utilizado para o tratamento do efluente .....	31
Figura 11: Protótipo utilizado para o tratamento do efluente .....	31
Figura 12: Representação de um módulo de membrana em espiral .....	34
Figura 13: Características físico-químicas do Efluente Bruto - Amostra 01.....	38
Figura 14: Resultados físico-químicos após tratamento eletrolítico - Amostra 01 .....	38
Figura 15: Resultados físico-químicos do tratamento eletrolítico da amostra 02 – Teste A....	40
Figura 16: Resultados físico-químicos do tratamento eletrolítico da amostra 02 – Teste B ...	41
Figura 17: Comparação dos parâmetros físico-químicos do efluente bruto e efluente tratado por eletrólise .....	44
Figura 18: Comparação dos parâmetros físico-químicos do efluente bruto e efluente tratado por eletrólise e osmose inversa .....	46
Figura 19: Comparação dos parâmetros físico-químicos do efluente bruto e efluente tratado por osmose inversa.....	47
Figura 20: Aspecto visual do efluente bruto x efluente tratado.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização físico-química do Efluente Bruto.....	37
Tabela 2: Comparação dos resultados Teste A e Teste B.....	42
Tabela 3: Capacidade de vazão da membrana.....	45
Tabela 4: Parâmetros de qualidade para reuso do efluente tratado .....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CIESP	Centro das Indústrias do Estado de São Paulo
CIRRA	Centro Internacional de Referência em Reuso de Água
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EC	Eletrocoagulação
EF	Eletroflotação
EPA	Environmental Protection Agency
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
MO	Matéria Orgânica
NTU	Unidade de Turbidez Nefelométrica
OI	Osmose Inversa
PCU	Unidades de Cobalto de Platina
pH	Potencial Hidrogeniônico
SMEWW	Standard Methods for Examination of Water & Wastewater
SST	Sólidos Suspensos Totais
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
UPF	Universidade de Passo Fundo

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
2.1 Efluentes Líquidos Gerados pela Lavagem de Veículos .....	12
2.2 Parâmetros de água para reuso.....	14
2.3 Tratamento de Efluentes Industriais .....	17
2.4 Eletrólise .....	19
2.5 Vantagens e Desvantagens da Eletrólise.....	21
2.6 Processos de separação por membranas .....	22
2.7 Limpeza das membranas.....	24
2.8 Colmatação / Fouling .....	24
2.9 Osmose Inversa.....	25
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
3.1 Coleta do efluente .....	27
3.2 Local da pesquisa.....	28
3.3 Caracterização do efluente .....	28
3.4 Procedimento das análises físico-químicas.....	28
3.5 Tratamento eletrolítico.....	30
3.6 Tratamento através de osmose inversa .....	33
3.7 Análise dos resultados .....	34
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>36</b>
4.1 Condições gerais dos ensaios e caracterização do efluente bruto.....	36
4.1.1 Resultados físico-químicos do efluente bruto .....	36
4.2 Caracterização do efluente tratado pelo processo de eletrólise .....	37
4.2.1 Resultados físico-químicos após eletrólise da amostra 01 .....	38
4.2.2 Resultados físico-químicos após eletrólise da amostra 02 .....	39
4.2.3 Resultados físico-químicos após eletrólise da amostra 03 .....	43
4.3 Caracterização do efluente tratado pelo processo osmose inversa .....	45
4.3.1 Resultados físico-químicos após tratamento por osmose inversa .....	46
4.4 Requisitos necessários para reuso do efluente .....	49
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>51</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos assuntos mais discutidos do século XXI trata da crise hídrica em todo o mundo, a escassez de água potável já é uma realidade em diversos países, inclusive no Brasil, alguns estados já enfrentam a falta d'água e o racionamento em determinadas épocas do ano. A indisponibilidade, a poluição, a má gestão na distribuição e o desperdício de água é um problema socioambiental de graves consequências para a humanidade, visto que 2,1 bilhões de pessoas não tem acesso a água potável de acordo com dados divulgados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e o Fundo de Emergência Internacional das Nações Unidas para a Infância (UNICEF).

O processo de lavagem de veículos utiliza em média de 215 à 560 litros de água por veículo, produzindo um efluente com características específicas, devido aos detergentes utilizados. Este efluente possui em sua composição: matéria orgânica, sólidos sedimentáveis, óleos e graxas, tensoativos e presença de combustível, pois durante o processo de lavagem, todas estas impurezas que estão impregnadas nos veículos são carregadas junto com a água de lavagem.

De acordo com o Ministério da Infraestrutura, o Brasil registrou em julho de 2022 uma frota de 113.406.884 veículos. Com o aumento do número de veículos em circulação, verifica-se também o aumento das manutenções, bem como os processos de lavagem. Com isso, as empresas de lavagem de veículos têm se desenvolvido rapidamente nos últimos anos, gerando impactos negativos ao meio ambiente.

Milhares de litros de água potável são desperdiçados nesta prática, e uma das formas de reuso de água que vem ganhando destaque em muitos países, é a água destinada à lavagem de veículos. Com isso, diversas tecnologias vêm sendo estudadas de modo a promover a substituição da água potável por uma água não potável, porém capaz de atender aos requisitos de qualidade para esta aplicação, de acordo com parâmetros de qualidade exigidos pela legislação, visando não causar danos aos veículos e aos operadores dos sistemas e também para que esta prática se torne uma tarifa atrativa aos empresários.

A água de reuso é gerada após o tratamento do efluente, esta atividade já é utilizada em alguns países e possui como base o conceito de substituição de fontes. Esta substituição é possível em função da qualidade requerida, pois para atender à esta finalidade, a água utilizada na lavagem dos veículos pode abdicar dos parâmetros de potabilidade. No Brasil a Lei 3.812/2006 torna obrigatório o reaproveitamento da água utilizada nos postos de lavagem de

veículos e a Resolução nº 54/2005 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água, onde o artigo terceiro destaca a modalidade de reuso para fins urbanos, no qual destaca-se a lavagem de veículos. No Rio Grande do Sul, a Resolução CONSEMA nº 419/2020 é responsável por estabelecer diretrizes para a aplicação de água de reuso, onde o processo de lavagem de veículos está inserido na Classe A.

Atualmente a maioria das lavagens de veículos apresenta o tratamento de seus efluentes de modo a atender a legislação para disposição no recurso hídrico, de acordo com a Resolução Consema N° 128/06, de modo a obter a licença de operação. Assim, verifica-se a necessidade de estudar tratamentos que auxiliem no enquadramento adequado para descarte e também soluções que permitam a reutilização deste efluente para manutenção do processo de lavagem, otimizando custos e reduzindo o desperdício de água potável.

De acordo com Brouwn (2002), o tratamento físico-químico composto por caixas de areia, caixa de equalização e caixa separadora água/óleo costuma ser o método mais utilizado no tratamento de efluentes das lavagens de veículos, porém a qualidade do efluente gerado por este processo não atinge os parâmetros necessários para reuso. Há diversas tecnologias disponíveis de tratamento, que se mostram mais eficientes para este tipo de efluente, dentre as possibilidades, destaca-se o processo de eletrólise, no qual utiliza-se corrente elétrica para realizar a remoção da carga poluidora. Rodrigues (2008), cita que o tratamento eletrolítico é avaliado como uma alternativa limpa, pois não necessita da adição de produtos químicos, possui facilidade na operação e demanda menor tempo de tratamento, destaca-se também o baixo custo de implantação e operação, pois permite realizar o processo fazendo uso de energia renovável.

Também é possível associar a técnica de tratamento por eletrólise com outros métodos de tratamento, como por exemplo a separação por membranas. A osmose inversa é um processo de separação com membranas e consiste na remoção de substâncias que variam desde sólidos em suspensão até elementos iônicos, por este motivo, possui grande potencial de aplicação em sistemas que visam o reuso da água, pois resultam em um efluente tratado com altos níveis de clarificação.

A fim de conter o desperdício de água potável e reduzir os custos da empresa, o objetivo geral deste estudo é associar as técnicas de tratamento através do processo de eletrólise seguido de osmose inversa de modo a ser capaz de se produzir um efluente tratado, com qualidade suficiente para promover o reuso no processo de lavagem de veículos.

Os objetivos específicos para desenvolvimento deste trabalho são:

- a) Obter a caracterização dos efluentes bruto e tratado em função dos parâmetros físico-químicos como pH, cor, turbidez, fósforo, sólidos suspensos totais, demanda química de oxigênio – DQO e matéria orgânica.
- b) Identificar as melhores condições de tratamento do efluente através do processo eletrolítico em função do tempo de detenção hidráulica;
- c) Aplicar a osmose inversa no efluente do reator eletrolítico para fins de atendimento aos padrões de qualidade para reuso do efluente.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Efluentes Líquidos Gerados pela Lavagem de Veículos**

O processo de lavagem de veículos exige um grande volume de água, em média de 215 à 560 litros de água por veículo de acordo com dados da CASAN, gerando assim, uma elevada quantidade de águas residuárias, o que evidencia a necessidade de investimentos em tecnologias que possibilitem o tratamento e reuso dessas águas residuárias na própria empresa, de modo a reduzir os impactos das cargas poluidoras que seriam descarregadas nos recursos hídricos. Além do mais, o reuso deste efluente tratado também reduz o uso de água de boa qualidade para lavagem de veículos.

O efluente proveniente das lavagens de automóveis pode conter quantidades significativas de óleos e graxas, sólidos em suspensão, metais, surfactantes, substâncias orgânicas, também pode haver fluido hidráulico e óleo proveniente do motor e sistema de freios. Por isso sua composição é bastante complexa, constituindo uma fonte significativa de DQO. (TEIXEIRA, 2003).

De acordo com Jordão e Pessoa (2009), as águas residuárias que provém das lavagens de veículos podem causar diversos impactos ambientais se forem lançadas no meio ambiente sem o devido tratamento, verifica-se neste tipo de efluente, concentrações de óleos e graxas e surfactantes, que podem promover a formação de camada de óleo e escumas que dificultam as trocas gasosas necessárias à respiração e fotossíntese da vida aquática. Além disso, se estas águas residuárias forem encaminhadas ao sistema de tratamento de efluentes do município, podem acarretar em entupimentos nas tubulações das redes coletoras, gerando prejuízos econômicos e sociais.

Os detergentes utilizados no processo de lavagem são constituídos por surfactantes, que ao serem lançados no meio ambiente sem tratamento podem causar sérios problemas aos corpos aquáticos, como a diminuição da concentração de oxigênio dissolvido, devido à diminuição da tensão superficial da água, a diminuição da permeabilidade à luz, pois mantém as partículas em suspensão e também participam da aceleração do processo de eutrofização, devido à presença de fosfatos na sua composição.

Também é importante salientar os problemas que são enfrentados no desenvolvimento e instalação de tecnologias para o tratamento da água de lavagem de veículos, dentre os quais, destacam-se:

- a) Área: Geralmente os locais destinados à lavagem de veículos são espaços pequenos, dessa forma, o sistema de tratamento de efluentes deve ser compacto, de modo a não gerar muita interferência na infraestrutura do empreendimento.
- b) Odores: é necessário realizar o controle dos odores que podem ser gerados em caso de proliferação de microrganismos nas águas armazenadas para reuso.
- c) Lodo: Os sistemas de tratamento de efluentes em sua maioria geram lodo como resíduo após o tratamento, este lodo deve ser armazenado e descartado de maneira adequada de acordo com a legislação, pois contém substâncias tóxicas em sua composição.
- d) Custo de implantação: O valor para instalação e manutenção do tratamento deste efluente deve ser competitivo, de forma a ser uma alternativa viável em relação ao uso de água potável, recuperando-se o investimento em curto/médio prazo.
- e) Manutenção e operação do sistema: A escolha da tecnologia para o tratamento do efluente a ser implementada na empresa, terá a simplicidade na operação e manutenção do sistema como um dos principais fatores de decisão. Um sistema mais simples pode ser operado pelos próprios funcionários da lavagem, sem a necessidade de auxílio de empresas terceirizadas.
- f) Concentração de sólidos dissolvidos: Conforme a água recircula pelo sistema de lavagem, pode haver concentração de alguns poluentes, que não foram totalmente removidos durante o tratamento.
- g) Diluição: Se ocorrer aumento na concentração de determinados poluentes, a diluição torna-se indispensável para manter a qualidade necessária da água a ser reciclada.

## 2.2 Parâmetros de água para reuso

A Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency - EPA) dos Estados Unidos desenvolveu um guia com diretrizes para reuso da água (Guidelines for Water Reuse, 2012), o qual estabelece uma série de parâmetros para o uso de águas residuárias, este guia serve de referência para muitos países elaborarem suas próprias legislações.

Este documento descreve como exemplo um caso de sucesso em Porto Alegre / RS, e cita que a qualidade da água para lavagem de veículos deve atender os seguintes critérios: evitar danos aos veículos e equipamentos de lavagem, eliminar os riscos à saúde dos usuários e operadores, ser esteticamente aceitável, possuir pH na faixa de 6.0-9.0, não haver odor e possuir turbidez de menos de 2 NTU.

No Brasil, a Norma Brasileira da Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT) - NBR 13.969 de 1997 é um dos principais instrumentos utilizados para a prática de reuso que define parâmetros que classifica o reuso local, de acordo com parâmetros físico-químicos de qualidade e também a sua adequada aplicação de acordo com quatro classes determinadas, de acordo com as tabelas a seguir:

Figura 1: Classificação das águas de reuso e seus usos preponderantes segundo a NBR 13969/1997

<b>Classe</b>	<b>Usos Preponderantes</b>
<b>1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lavagem de carros; e</li> <li>• Outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador incluindo chafarizes.</li> </ul>
<b>2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lavagem de pisos, calçadas e irrigação dos jardins;</li> <li>• Manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes.</li> </ul>
<b>3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reúso nas descargas dos vasos sanitários.</li> </ul>
<b>4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reúso nos pomares, cereais, forragens, pastagem para gado; e</li> <li>• Outros cultivos através de escoamento superficial ou sistema de irrigação pontual.</li> </ul>

Fonte: ABNT NBR 13969, 1997.

Figura 2: Critério de qualidade da água de reuso segundo a NBR 13969/1997

Parâmetro	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Turbidez (UT)	< 5	< 5	< 10	-
CTer (NMP/100 mL)	< 200	< 500	< 500	< 5000
SDT (mg/L)	< 200	-	-	-
pH	Entre 6,0 e 8,0	-	-	-
Cloro residual (mg/L)	Entre 0,5 e 1,5	> 0,5	-	-
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	-	-	-	2,0
CTer: coliformes termotolerantes pH: potencial hidrogeniônico SDT: Sólidos Dissolvidos Totais				

Fonte: ABNT NBR 13969, 1997.

Em 2005, o Sistema Fiesp (Federação das Indústrias do Estado de São Paulo) e Ciesp (Centro das Indústrias do Estado de São Paulo) elaboraram um manual de orientações para o setor industrial com o objetivo de disponibilizar a melhor e mais adequada orientação aos usuários industriais na implantação de programas de conservação e reuso de água. Foi um trabalho desenvolvido em parceria com a ANA (Agência Nacional de Águas), buscando a excelência do conhecimento do CIRRA (Centro Internacional de Referência em Reuso de Água), e da DTC Engenharia.

De acordo com este manual prático para uso e conservação da água em edificações, as exigências mínimas para o uso da água não-potável para lavagem de veículos são apresentadas a seguir:

- a) Não deve apresentar mau-cheiro;
- b) Não deve ser abrasiva;
- c) Não deve manchar superfícies;
- d) Não deve conter sais ou substâncias remanescentes após secagem;
- e) Não deve propiciar infecções ou a contaminação por vírus ou bactérias prejudiciais à saúde humana.

A condição de restrição para esta classe de atividade é a exposição do público, usuários e operários que manuseiam ou tenham algum contato com os sistemas de distribuição de água reciclada.

Outro fator com relação ao reuso da água diz respeito aos aspectos estéticos, exigindo grau de transparência, ausência de odor, cor, espuma ou quaisquer formas de substâncias ou componentes flutuantes. Nesse sentido, os parâmetros característicos foram selecionados segundo o uso mais restritivo entre os acima relacionados, e estão apresentados na Figura 3.

É necessário salientar que o uso da água de reuso Classe 1 pode gerar problemas de sedimentação, o que causaria odores devido à decomposição de matéria orgânica, obstrução e presença de materiais flutuantes. Como solução, o manual cita as seguintes instruções:

- a) Detecção de cloro residual combinado em todo o sistema de distribuição;
- b) Controle de agentes tensoativos, devendo seu limite ser  $\leq 0,5$  mg/L.

Na Figura 3 encontram-se os parâmetros característicos para água de reuso classe 1 elaborados pelo Sistema Fiesp no manual de conservação e reuso da água em edificações.

Figura 3: Parâmetros característicos para água de reuso classe 1- Sistema Fiesp

Parâmetros	Concentrações
Coliformes fecais <sup>1</sup>	Não detectáveis
pH	Entre 6,0 e 9,0
Cor (UH)	$\leq 10$ UH
Turbidez (UT)	$\leq 2$ UT
Odor e aparência	Não desagradáveis
Óleos e graxas (mg/L)	$\leq 1$ mg/L
DBO <sup>2</sup> (mg/L)	$\leq 10$ mg/L
Compostos orgânicos voláteis <sup>3</sup>	Ausentes
Nitrato (mg/L)	$< 10$ mg/L
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	$\leq 20$ mg/L
Nitrito (mg/L)	$\leq 1$ mg/L
Fósforo total <sup>4</sup> (mg/L)	$\leq 0,1$ mg/L
Sólido suspenso total (SST) (mg/L)	$\leq 5$ mg/L
Sólido dissolvido total <sup>5</sup> (SDT) (mg/L)	$\leq 500$ mg/L

1. Esse parâmetro é prioritário para os usos considerados.  
 2. O controle da carga orgânica biodegradável evita a proliferação de microrganismos e cheiro desagradável, em função do processo de decomposição, que podem ocorrer em linhas e reservatórios de decomposição.  
 3. O controle deste composto visa evitar odores desagradáveis, principalmente em aplicações externas em dias quentes.  
 4. O controle de formas de nitrogênio e fósforo visa evitar a proliferação de algas e filmes biológicos, que podem formar depósitos em tubulações, peças sanitárias, reservatórios, tanques etc.  
 5. Valor recomendado para lavagem de roupas e veículos.

Fonte: Conservação e Reuso da água em Edificações - Fiesp, 2005.

Já em âmbito estadual, foi publicada a Resolução CONSEMA n° 419/2020, que estabelece critérios e procedimentos para a utilização de água de reuso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul.

A água de reuso para fins urbanos é dividida em duas classes de qualidade:

I - Classe A: água de reuso destinada à irrigação paisagística em locais de acesso irrestrito, lavagem de logradouros públicos e lavagem de veículos;

II - Classe B: água de reuso destinada à irrigação paisagística em locais de acesso limitado ou restrito, ao abatimento de poeira, aos usos na construção civil e em estações de tratamento de efluente e à desobstrução de redes de esgoto pluvial e/ou cloacal.

A lavagem de veículos encontra-se na Classe A, que deverá atender aos parâmetros de padrão de qualidade para reuso de acordo com a Figura 4:

Figura 4: Padrões de qualidade para água de reuso para fins urbanos da Resolução CONSEMA N° 419/2020 do Estado do Rio Grande do Sul

Parâmetro	Classe A	Classe B
Coliforme Termotolerante	< 200 NMP/100 mL	< 10 <sup>3</sup> NMP/100 mL
Ovos de helmintos	< 1 ovo/L	Não se aplica
Cloro Residual Total	< 1 mg/L	
Condutividade elétrica	< 3,0 dS/m	

Fonte: Resolução CONSEMA N° 419/2020 do Estado do Rio Grande do Sul, 2020.

Os empreendimentos que tiverem práticas de reutilização de água, deverão atender aos parâmetros regulados por esta resolução, sendo que o não atendimento da legislação poderá acarretar em autuações.

### 2.3 Tratamento de Efluentes Industriais

A norma brasileira da ABNT - NBR 9800/1987 estabelece critérios para o lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público do esgoto sanitário, e dispõem que os efluentes de processo industrial são despejos líquidos provenientes das áreas de processamento industrial, incluindo os originados nos processos de produção, as águas de

lavagem de operação de limpeza e outras fontes, que comprovadamente apresentem poluição por produtos utilizados ou produzidos no estabelecimento industrial.

O tratamento de um efluente através do emprego de produtos químicos é denominado de processo físico-químico. Neste método de tratamento são adicionados determinados produtos ao efluente com a finalidade de aumentar a eficiência na remoção de elementos e substâncias, modificar seu estado ou estrutura ou alterar suas características químicas.

Os processos físico-químicos aplicados com o objetivo de clarificar efluentes são baseados na desestabilização dos colóides por coagulação seguido da floculação e separação de fases por sedimentação ou flotação.

De acordo com Cavalcanti (2009) para realizar o processo de clarificação do efluente através de um processo físico-químico são necessárias quatro fases: neutralização, coagulação, floculação e sedimentação ou flotação.

A neutralização se dá através da eliminação das cargas eletrostáticas superficiais responsáveis pela repulsão entre as partículas carregadas eletricamente devido à adsorção de íons, principalmente hidroxilas, presentes na água.

A coagulação é o processo onde ocorre a aglomeração de partículas em suspensão divididas de acordo com seu estado coloidal, através da adição de um coagulante. A técnica da coagulação consiste na formação de flocos em um líquido através da ação deste coagulante químico que fornece carga iônica oposta à das partículas coloidais.

A floculação, e posterior separação de fases, é induzida através da neutralização das forças eletrostáticas repulsivas que impedem a aglomeração de partículas e a precipitação.

Por fim, a suspensão formada neste processo de coagulação e floculação possui tendência a decantar ou a flotar, podendo inclusive ocorrer em ambas as situações ao mesmo tempo, e com isso, agregar uma fase intermediária de flocos com pouca mobilidade, ainda em suspensão com densidade praticamente igual à da água. Os flocos formados possuem uma grande área superficial por unidade de volume, e são capazes de absorver partículas causadoras de turbidez, matéria orgânica e bactérias.

Os processos físico-químicos aplicados com o objetivo de clarificar efluentes são baseados na desestabilização dos colóides por coagulação seguido da floculação e separação de fases por sedimentação ou flotação. Este processo pode ser ocorrer por diversos meios: o calor; a agitação; agentes coagulantes químicos; processos biológicos; passagem de corrente elétrica (eletrocoagulação), ou ainda a eletrocoagulação com a adição de coagulantes químicos.

Von Sperling (1996) destaca que dentre os diversos processos de tratamento de efluentes, a escolha do método mais eficiente deve levar em conta uma série de fatores como: eficiência, segurança, simplicidade, formação de lodo, custos de construção e operação, espaço requerido e impacto no meio receptor.

## 2.4 Eletrólise

Dentre as diversas tecnologias disponíveis para o tratamento de efluentes encontra-se a eletrólise. Trata-se de um processo físico-químico que utiliza a energia elétrica de uma fonte de alimentação para promover reações não espontâneas em um determinado sistema eletroquímico.

Brächer (2018) cita que o uso de processos eletroquímicos para o tratamento de águas residuárias iniciou em 1889 em Londres, na Inglaterra, onde foi implementada uma estação de tratamento de efluentes urbanos através da adição de água do mar e emprego da eletricidade. Também em 1889, em Salford (Inglaterra) foi implementada uma estação de tratamento para água de canal, onde o tratamento eletroquímico era realizado por meio de eletrodos de ferro e adição de água do mar.

Este processo de tratamento físico-químico foi muito difundido no século XX, porém aos poucos foram sendo desativados devido aos custos de operação elevados, principalmente em relação à energia elétrica. Porém, nas últimas décadas o processo de eletrólise vem despertando interesse na comunidade científica, devido às novas tecnologias provenientes de energias renováveis, este processo vem se tornando um método atrativo de tratamento.

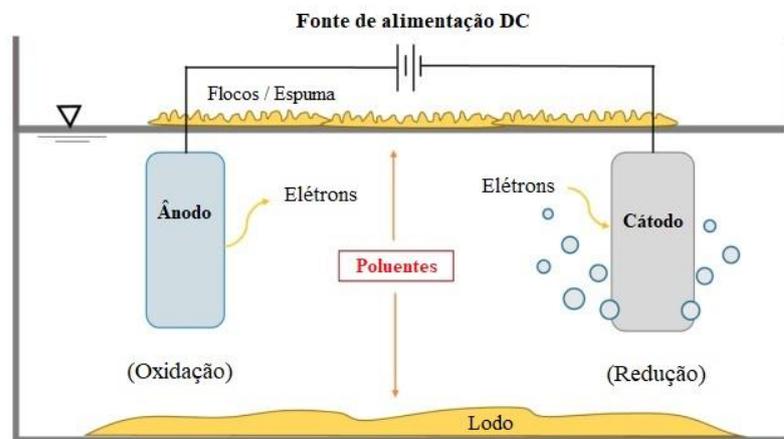
De acordo com Feltre (2012), a eletrólise é um método para obter reações de oxirredução, com a produção de reações químicas através da passagem de corrente elétrica contínua por uma solução de eletrólitos que podem ser ácidos, bases ou sais, em solução aquosa que contém íons presentes. Quando a água está na sua forma pura é má condutora de eletricidade, assim dificilmente conseguirá realizar sua composição eletrolítica, sendo necessário elevar a corrente elétrica ou dissolver algum soluto que contenha mais íons reativos que os da água.

Brächer elucida que o sistema eletroquímico é constituído por dois ou mais eletrodos, sendo um ânodo e um cátodo, que estão conectados por meio de uma fonte de alimentação e imersos no efluente que deverá ser tratado, denominado de solução eletrolítica (Figura 5). A diferença de potencial imposta entre os eletrodos na solução (tensão elétrica), através da fonte

de energia, induz a ocorrência da oxidação de compostos da solução no eletrodo positivo (ânodo), enquanto promove a redução de compostos no eletrodo negativo (cátodo).

O fluxo de elétrons entre os eletrodos não ocorre livremente na solução eletrolítica, a corrente elétrica é produto de reações intermitentes de oxirredução dos compostos químicos presentes na solução, assim como o transporte eletrostático e hidrodinâmico de íons e moléculas. Os mecanismos de depuração do efluente irão depender principalmente da composição do efluente a ser tratado e do tipo de eletrodos utilizados (BRÄCHER, 2018).

Figura 5: Representação esquemática geral da electrocoagulação



Fonte: Adaptado de Treatment of Produced Water in the Permian Basin for Hydraulic Fracturing: Comparison of Different Coagulation Processes and Innovative Filter Media, 2020.

Conforme Rodrigues (2008), há três estágios de operação no processo de eletrólise, com isso, é comum a referência ao processo utilizando-se os termos: electrocoagulação, eletrofloculação e eletroflotação:

- a) **Eletrocoagulação:** Formação de um agente coagulante, através da oxidação eletrolítica do eletrodo de sacrifício, geralmente alumínio ou ferro, ocasionando a neutralização das cargas superficiais das partículas coloidais, desestabilizando-as e quebrando emulsões.
- b) **Eletrofloculação:** Aglutinação das partículas desestabilizadas pelas hidroxilas formadas no cátodo, que favorecem a formação de hidróxidos de ferro e alumínio, que são coagulantes naturais, favorecendo a formação e o crescimento dos flocos.

- c) **Eletroflotação:** Geração de microbolhas de hidrogênio no cátodo, que sobem até a superfície colidindo e sendo adsorvidos pelos flocos, carreando por arraste as partículas e impurezas em suspensão no meio, promovendo a clarificação do efluente.

## 2.5 Vantagens e Desvantagens da Eletrólise

O tratamento de efluentes por meio da eletrólise está sendo cada vez mais empregado devido à sua grande eficiência, baixo custo e facilidade de operação.

Alguns autores apresentam vantagens e desvantagens no tratamento de efluentes utilizando este método de tratamento (Peres, 2018; Tesolini, Gomes, Porto e Freitas, 2019; Rodrigues, 2008), os quais destacam-se:

### **Vantagens:**

- a) Tempo de operação e manutenção reduzido;
- b) Baixo custo de operação e instalação;
- c) Baixa produção de lodo;
- d) Facilidade na operação e manutenção;
- e) Aproveitamento de energia solar;
- f) Flocos são mais estáveis, havendo a possibilidade de remoção através de filtração mais facilmente;
- g) Menor risco de acidentes associados aos resíduos de coagulantes químicos;

### **Desvantagens:**

- a) Necessidade de substituição dos eletrodos desgastados, gerando aumento nos custos;
- b) Custo energético quanto ao uso da eletricidade em determinadas regiões;
- c) Cátodo pode oxidar, influenciando na diminuição da eficiência do processo;
- d) Custos com as substâncias necessárias no processo (coagulantes);
- e) Requer alta condutividade do efluente;

## 2.6 Processos de separação por membranas

O tratamento de efluente objetiva inicialmente atender aos padrões exigidos pela legislação para lançamento nos recursos hídricos, visando a prevenção de danos no ecossistema, evitando assim as alterações das características do solo e da água, além da poluição e da contaminação dos recursos naturais. O reuso do efluente proporciona a redução de custos às empresas que adotam este sistema em sua rotina de trabalho, protegem o meio quanto à descarga de poluentes tóxicos na rede de esgotos e/ou corpos hídricos e a economia de água potável. Para obter o efluente tratado com as qualidades necessárias para reuso, é necessário complementar o sistema de tratamento existente, a fim de garantir a qualidade deste efluente tratado com a do uso requerido, também observando as normas vigentes que possuem parâmetros específicos para cada finalidade.

De acordo com Fappi (2015), as atuais tecnologias disponíveis buscam conseguir uma maior eficiência de remoção dos parâmetros físicos, químicos e eventualmente biológicos para água de reuso. Dentre os métodos de tratamento disponíveis destaca-se o uso de separação por membranas.

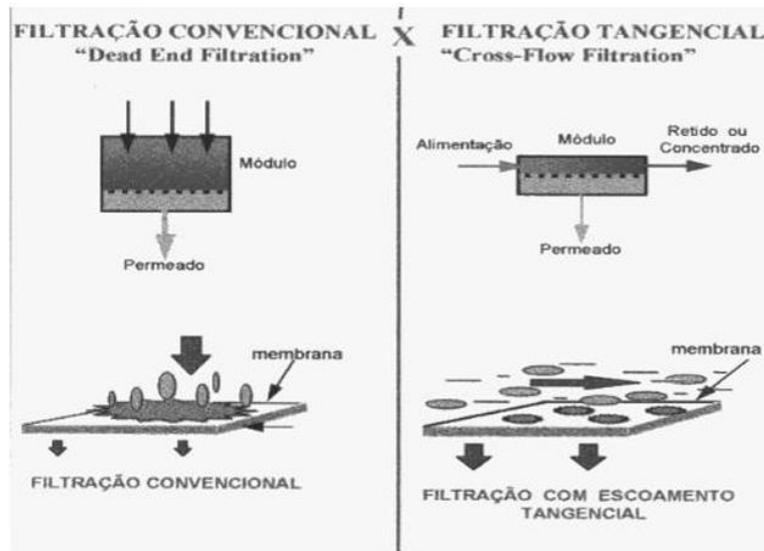
Cavalcanti (2009), elucida que as membranas são utilizadas para separar fases e baseiam-se na aplicação de uma força motriz utilizando-se a pressão hidráulica para promover a separação de fases. Os processos utilizando membranas são conhecidos como microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI), o que os diferencia é o tamanho da partícula retida em cada meio filtrante.

Bonamigo (2014) destaca que o uso das membranas para tratamento de água e efluentes popularizou-se na década de 1960, visando o abastecimento urbano através da tecnologia de osmose inversa para dessalinização da água de mar e poços. As tecnologias de filtração e separação por membranas porosas utilizadas comercialmente permitem remover substância que variam desde sólidos em suspensão até elementos iônicos. Atualmente as membranas são utilizadas para a separação de sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos em água.

A filtração por membranas pode ocorrer através de dois métodos: filtração convencional ou filtração tangencial. No método frontal, a alimentação e o permeado escoam de forma perpendicular à membrana, com isso, há deposição de materiais sólidos e o processo de filtração fica comprometido. Já no método tangencial, o fluxo é paralelo à membrana, promovendo assim, a autolimpeza da superfície da membrana.

A fração da corrente de alimentação que permeia através da membrana é denominada de permeado e a fração retida de concentrado, conforme exemplificado na Figura 6.

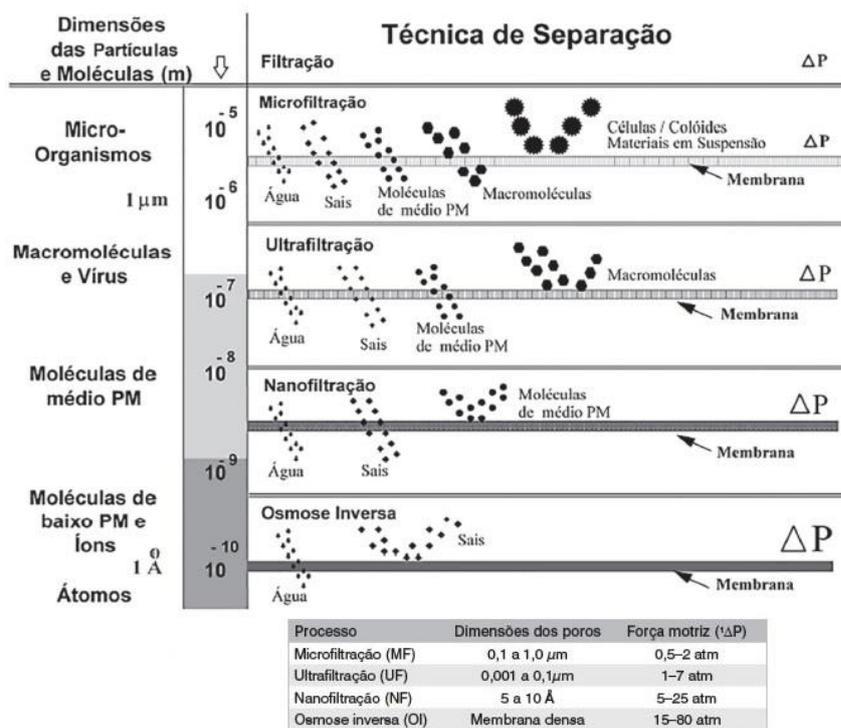
Figura 6: Representação ilustrativa dos métodos de filtração convencional e tangencial



Fonte: Adaptado de Serra, 2017.

A técnica mais comercializada é a que utiliza o gradiente de pressão como força motriz. Os processos de separação por membranas que utilizam a pressão como força motriz podem ser classificados de acordo com a Figura 7.

Figura 7: Processos de separação por membranas que utilizam gradiente de pressão como força motriz



Fonte: Adaptado de Galvão; Gomes, 2015.

## 2.7 Limpeza das membranas

Cavalcanti (2009), destaca que para preservar as membranas é necessário que sejam realizadas limpezas periódicas através de produtos químicos. A limpeza consiste em retirar o material que não pode ser removido através de retrolavagem.

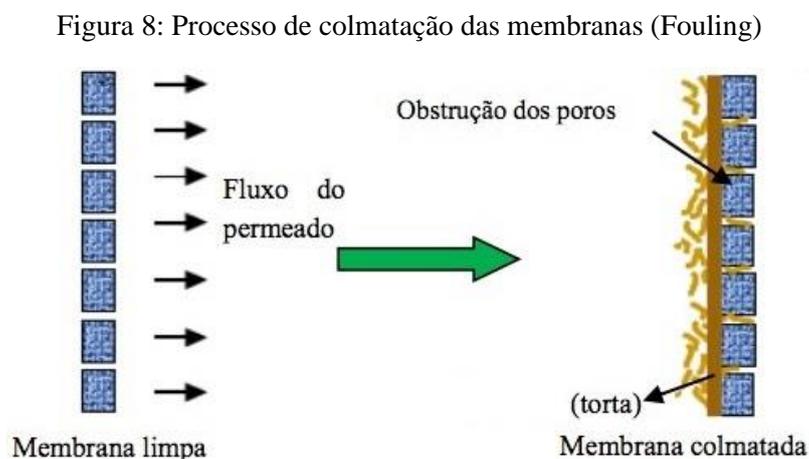
A diminuição do fluxo de água através das membranas ocorre principalmente devido à formação de camadas de material retido na superfície das membranas, denominados de tortas de filtro, ou devido ao acúmulo de géis ou camadas de sais precipitados e também limo ou biofilmes formados na superfície das membranas.

## 2.8 Colmatação / Fouling

A colmatação ou *fouling* é uma das principais limitações dos processos de separação por membranas. A redução do fluxo do permeado ocorre devido ao aumento da resistência da membrana à transferência de massa devido à redução da porosidade, acúmulo de solutos na superfície ou formação de camada de gel (CAVALCANTI, 2009).

Nos casos em que a colmatação não é reversível, fazendo com que o desempenho da membrana não possa ser restaurado, nem mesmo após a etapa de limpeza, é necessário realizar a substituição das membranas.

A Figura 8 representa o processo de colmatação das membranas, acarretando na dificuldade do efluente em passar pela membrana ao longo do tempo devido à deposição de partículas, que se adere à membrana causando uma barreira para o fluxo do permeado.



Fonte: Adaptado de Belli, 2014.

## 2.9 Osmose Inversa

A Osmose Inversa (OI) é um processo de separação com membranas que apresentam poros com diâmetro menor que  $0,001\mu\text{m}$ , e possui essa nomenclatura devido ao solvente fluir do meio mais concentrado para o menos concentrado, o inverso do que ocorre naturalmente durante a osmose, onde a água flui de um meio menos concentrado para outro mais concentrado. Para ocorrer o processo de osmose inversa é necessário imprimir uma pressão sobre a solução mais concentrada, isto é, com mais contaminantes, a fim de que ela seja forçada a atravessar a membrana em direção à solução menos concentrada.

Cavalcanti (2009) explica que a pressão exercida varia desde 1500 kPa até valores próximos a 15000 kPa, porém não é possível realizar a separação de sólidos dissolvidos em sua totalidade, devido ao tamanho e carga dos íons. É muito utilizada para remoção de substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas em águas residuárias industriais, pois trata-se de um processo com grande potencial de aplicação em sistemas que visam o reuso da água, visto que resultam em um permeado com altos níveis de clarificação.

De acordo com Galvão; Gomes (2015), nos processos de separação por membranas, o fluxo do permeado é independente do tempo, dependendo especificamente do potencial de pressão aplicado ou então da difusão pelo material da membrana. Esse fator indica a estabilidade mecânica da membrana, da pureza do solvente e da sua baixa interação com o material de fabricação da membrana. Quando não há observação de uma dessas condições, o fluxo permeado irá diminuir com o tempo, indicando que ocorre alguma alteração com a membrana, que pode ocorrer devido deformação mecânica, o inchamento da matriz mecânica, a interação do solvente com o material da membrana ou então pela presença de impurezas no solvente que causa o entupimento dos poros, provando a colmatação da membrana.

Em função da qualidade requerida para o permeado e com o intuito de se obter o maior nível de tratamento de água, as membranas podem ser agrupadas em arranjo ou dispostas em série. Os diferentes tipos de módulos utilizados são os de pratos planos, tubulares, em espiral e os de fibras ocas. Nestes módulos a alimentação passa de forma tangencial à membrana, permitindo a remoção de material acumulado na superfície. No módulo em espiral, que será utilizado neste estudo, a solução escoia sobre a membrana e o permeado flui para um sistema coletor, através de um tubo interno (CAVALCANTI, 2009).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Após a revisão bibliográfica, foram realizadas as coletas das amostras para análise em laboratório, em seguida foi obtida a caracterização do efluente de acordo com suas características físico-químicas.

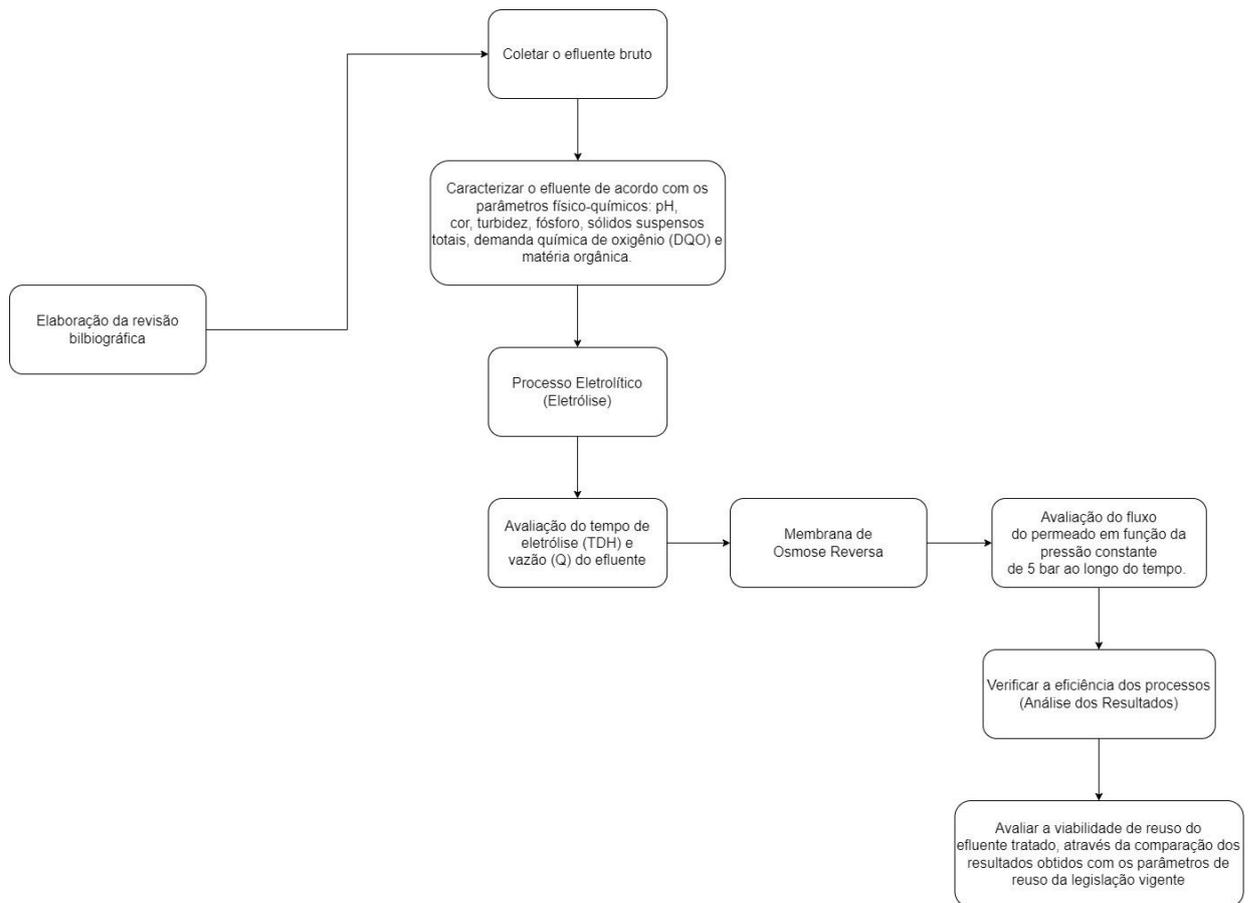
O tratamento se deu em duas etapas:

A primeira etapa consiste em identificar as melhores condições de tratamento do efluente utilizando a eletrólise, o efluente bruto foi caracterizado de modo a determinar seus parâmetros iniciais para posterior comparação com os parâmetros obtidos no pós tratamento eletrolítico.

A segunda etapa foi realizada através de osmose inversa, o efluente tratado através do processo de eletrólise foi submetido à filtração por membranas, de modo a gerar uma água residuária capaz de atender aos parâmetros da legislação para água não potável, e assim ser reutilizado no processo de lavagem dos veículos.

As etapas para elaboração do estudo estão dispostas conforme exemplificado no fluxograma a seguir:

Figura 9: Fluxograma das etapas para elaboração da pesquisa



Fonte: Autor, 2022.

### 3.1 Coleta do efluente

Para a execução desta pesquisa, foi realizada a coleta do efluente bruto em uma concessionária localizada na cidade de Passo Fundo / RS, que possui área destinada à lavagem dos veículos. As amostras foram armazenadas em frascos e temperatura adequados de acordo com a norma técnica ABNT NBR 9898 (Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores).

As amostras do efluente bruto foram adquiridas no decorrer dos meses de setembro e outubro, foram realizadas coletas em diferentes dias da semana, de modo a verificar se existem diferenças significativas em relação aos parâmetros físico-químicos de acordo com a demanda de diferentes veículos para lavagem, e também de acordo com a incidência de precipitação pluviométrica.

### **3.2 Local da pesquisa**

O estudo foi realizado nos Laboratórios de Aulas e Operações localizados no Prédio L1 da Faculdade de Engenharia da Universidade de Passo Fundo - Campus I, que dispõem dos equipamentos necessários para execução do projeto, onde foi realizada a caracterização do efluente bruto, e posterior aplicação do tratamento através do processo de eletrólise, associado à filtração através de membranas, de modo a promover um tratamento eficiente deste efluente para posterior reutilização.

### **3.3 Caracterização do efluente**

Atualmente a empresa conta com um sistema de tratamento para os efluentes gerados composto por caixas de areia e caixa separadora Água/Óleo, o efluente gerado no processo de lavagem dos veículos é tratado e descartado. O efluente empregado neste estudo foi coletado após a passagem pela caixa separadora Água/Óleo.

O efluente foi caracterizado através dos padrões definidos pela Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, em função dos parâmetros físico-químicos como: pH, cor, turbidez, fósforo, sólidos suspensos totais (SST), demanda química de oxigênio (DQO) e matéria orgânica (MO).

### **3.4 Procedimento das análises físico-químicas**

Foi efetuada a medição do pH através de um pHmetro de bancada digital, a fim de identificar o grau de acidez ou alcalinidade da amostra.

Os dados de cor da amostra foram obtidos através de leitura instrumental em colorímetro, instrumento disponível em laboratório, que mede a absorção de uma solução em uma frequência de comprimento de onda de luz. Este colorímetro reporta a cor da água de 0 a 500 PCU (Unidades de Cobalto de Platina).

Para a identificação dos valores de turbidez, foi realizada a leitura instrumental através de um turbidímetro, que mede o desvio de luz gerado pelas partículas existentes na amostra, exibindo os valores em NTU (Unidade de Turbidez Nefelométrica).

A determinação de fósforo é realizada através de espectrofotometria de absorção molecular, após realização de preparo das amostras, é realizada a leitura de absorbância em espectrofotômetro a 880 nm. Também é necessário elaborar a curva-padrão do fósforo, que

corresponde à relação gráfica entre os valores de absorvância ( $A$ ) e os de concentração (mg/L). Com base na análise gráfica, é possível calcular os valores de concentração de contaminante na amostra.

Os sólidos suspensos totais foram obtidos através do método de filtração, onde sólidos suspensos são as partículas que ficam retidos em papel de filtro, após a passagem da amostra líquida. Para determinação deste parâmetro, é necessário realizar o cálculo de acordo com a Equação 1:

$$SST = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (1)$$

Onde:

SST = sólidos suspensos totais [mg/L];

$m_2$  = massa do papel depois da filtração [mg];

$m_1$  = massa do papel tarado [mg];

$V$  = volume da amostra [mL];

Para identificar os valores de Demanda Química de Oxigênio foi realizado o método de titulação com solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal, onde após realizada a titulação, registrou-se o valor de sulfato ferroso amoniacal padronizado utilizado. O valor de DQO foi calculado conforme a Equação 2:

$$DQO = \frac{(Br - Am) \times N_{sfa} \times 8000}{V_{am}} \quad (2)$$

Onde:

$Br$  = Volume de sulfato ferroso amoniacal padronizado utilizado na titulação do Branco [mL];

$Am$  = Volume de sulfato ferroso amoniacal padronizado utilizado na titulação da amostra [mL];

$N_{sfa}$  ( $N_2$ ) = Fator de correção da padronização do sulfato ferroso amoniacal;

$V_{am}$  = Volume inicial de amostra [mL].

A DQO correspondente à capacidade de consumo de oxigênio por oxidação química da matéria orgânica presente em uma amostra. Para identificar a eficiência de remoção da DQO é necessário realizar o cálculo apresentado na Equação 3, obtendo-se o resultado em porcentagem.

$$Eficiência (\%) = \frac{DQO (entrada) - DQO (saída)}{DQO (entrada)} \times 100 \quad (3)$$

A determinação da matéria orgânica presente nas amostras também foi realizada através do procedimento de titulação, utilizando-se solução de permanganato de potássio 0,0025 mol/L. A concentração de oxigênio consumido é expressa em mg/L, determinada através do cálculo expresso na Equação 4:

$$Mg \frac{O_2}{L} = \frac{\{1,25 \times [(V_p \times F_c - V_o) - (V_b \times F_c - V_{ob})] \times 0,0025 \times 32 \times 1000\}}{V} \quad (4)$$

Onde:

$V_p$  = Volume de permanganato total na amostra (digestão + titulação) [mL];

$F_c$  = Fator de correção da solução de permanganato;

$V_o$  = Volume de oxalato total na amostra [mL];

$V_b$  = Volume de permanganato total utilizado no branco (digestão + titulação) [mL];

$V_{ob}$  = Volume de oxalato utilizado no branco [mL];

$V$  = Volume da amostra [mL].

### 3.5 Tratamento eletrolítico

Para a determinação da melhor condição de tratamento aplicando o processo de eletrólise, foi desenvolvido um reator similar ao protótipo experimental que foi idealizado nos laboratórios da UPF, pelo autor Schenkel (2022), visto que o protótipo disponível não foi capaz de atender a demanda de efluente necessária para tratamento.

O protótipo demonstrado nas Figuras 10 e 11 é composto pelos seguintes itens:

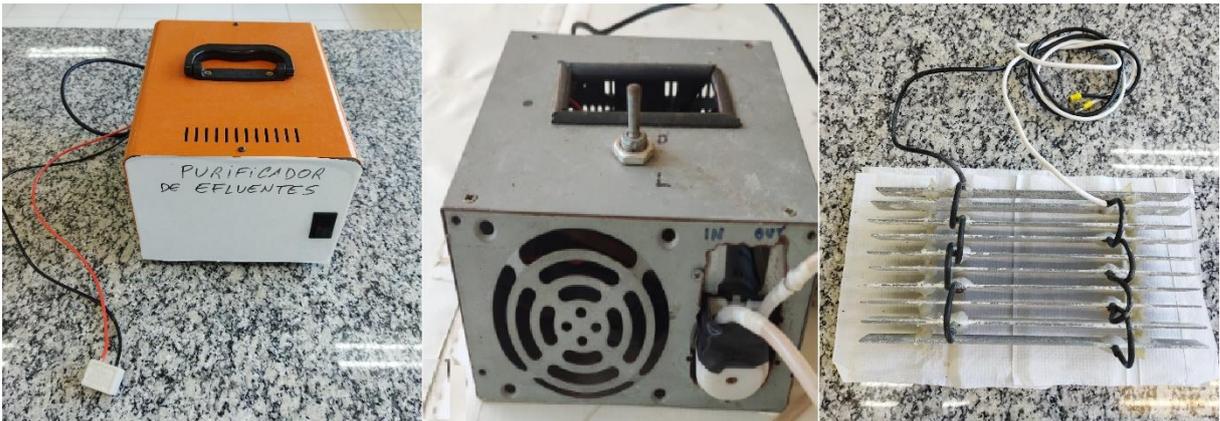
- a) 1 reservatório com capacidade de 13 litros;
- b) 1 conjunto de tubulação em PVC rígido, com válvula para ajuste das vazões;
- c) 1 fonte inversora de 220V/6Ah, responsável pelo fornecimento de corrente aos eletrodos;
- d) 1 bomba de sucção peristáltica;
- e) 1 colmeia de eletrodos fabricada em alumínio, com as placas ligadas em série.

Figura 10: Protótipo utilizado para o tratamento do efluente



Reator / Reservatório com capacidade de 13 litros

Figura 11: Protótipo utilizado para o tratamento do efluente



Fonte 220V/6Ah

Bomba de sucção

Eletrodos de alumínio

Fonte: Autor, 2022.

Os processos de coagulação e floculação se deram através do desgaste dos eletrodos de alumínio, estes eletrodos de sacrifício produzem o coagulante *in situ*. O tratamento eletrolítico foi executado em regime transiente até o acionamento da bomba, e de forma contínua após transferência do efluente bruto ao reator de acordo com a vazão especificada, em função do tempo de eletrólise (TDH) como variável de análise.

O processo de lavagem de veículos produz um efluente onde a carga poluidora varia de acordo com a demanda de diferentes tipos de veículos ou em períodos chuvosos. Dessa forma,

foram realizados ensaios com diferentes amostras de efluente, sendo uma amostra com menor carga poluidora, coletada em período com incidência de precipitação pluviométrica e outra amostra proveniente de dias de sol, onde o efluente estava mais carregado.

As amostras de efluentes foram submetidas ao processo eletrolítico através de uma fonte de energia 220V, com densidade de corrente contínua de 6Ah, sob as seguintes condições:

- a) Teste A: Tempo de eletrólise (TDH) de 65 minutos, com vazão de 12L/h.
- b) Teste B: Tempo de eletrólise (TDH) de 43,5 minutos, com vazão de 18L/h.

Foram utilizados dois valores referentes ao tempo de detenção hidráulica do efluente (TDH) a fim de verificar a influência na qualidade do efluente tratado, pois conforme Schenkel (2022), quando o tempo de residência aumenta, a taxa de remoção da carga poluidora alcançada é maior, pois aumenta também a concentração de íons e seus flocos de hidróxidos. Outro fator importante associado ao TDH está relacionado com o tamanho do reator, é necessário estabelecer a melhor condição de tratamento, de modo a dimensionar o reator de maneira a suprir a demanda de efluente gerado.

Para determinar o tempo de detenção hidráulica, foi utilizado o cálculo conforme Equação 5:

$$TDH = \frac{V}{Q} \times 60 \text{ min} \quad (5)$$

Onde:

V = Volume do Reator;

Q = Vazão de Entrada do Efluente.

O efluente bruto foi acondicionado em um reservatório para tratamento e outra parte (13L) foi disposta no reator eletrolítico em processo de tratamento. Assim que o TDH determinado era atingido, ligava-se a bomba de sucção, e o efluente bruto que estava no reservatório era transferido ao reator de acordo com a respectiva vazão definida. Com isso, o reator opera de forma transiente até o acionamento da bomba, e no momento em que o efluente começa a ser transferido ao reator, o processo torna-se contínuo. Retirou-se então, amostras para análises físico-químicas.

No Teste A, com TDH de 65 minutos e vazão de 12L/h, foram realizadas quatro coletas nos respectivos tempos após acionamento da bomba de sucção: 20 minutos, 45 minutos, 65 minutos e 85 minutos.

Já no Teste B, com TDH de 43,5 minutos e vazão de 18L/h, foram realizadas três coletas de efluente tratado: com 15 minutos, 30 minutos e 45 minutos após o acionamento da bomba.

Após a finalização do tratamento eletrolítico, o lodo gerado durante o processo foi removido e direcionado pra descarte, e o efluente tratado por eletrólise foi transferido para tratamento complementar através das membranas de filtração.

### **3.6 Tratamento através de osmose inversa**

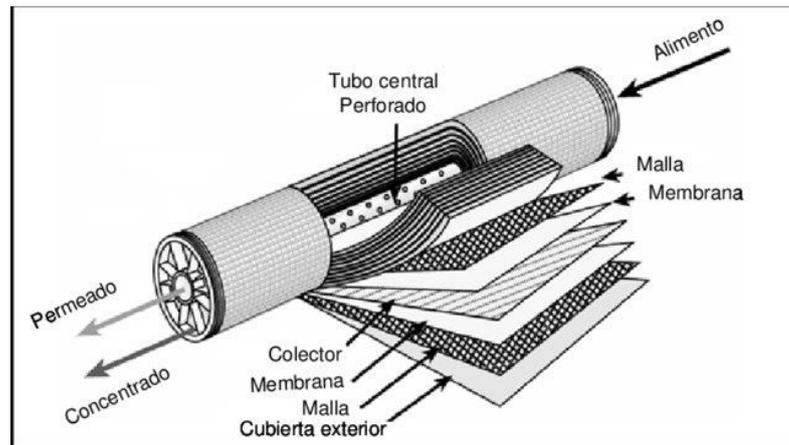
Para complementar o tratamento eletrolítico, foi aplicado o tratamento de separação por membranas. A membrana utilizada foi a de osmose inversa, disponível nos laboratórios da faculdade de engenharia da Universidade de Passo Fundo.

O tratamento por osmose inversa foi operado através do fluxo do permeado em função da pressão ao longo do tempo. Utilizou-se pressão constante de 5 bar, pois conforme dados da revisão bibliografia, pressões muito altas podem causar incrustações e prejudicar a membrana.

O fluxo do permeado se dá em função das características da membrana, como: espessura, diâmetro dos poros, porosidade, camada de concentração e polarização, entre outros, bem como a característica da solução a ser processada e das condições de operação, e representa a vazão do permeado por unidade de área da membrana.

Foi utilizado o módulo de membrana em espiral (Figura 12), pois este modelo permite agregar uma grande área de membranas em um pequeno volume, são operadas através de fluxo tangencial, onde parte da água é permeada, ou seja, atravessa as membranas e o restante é arrastado e direcionado para fora dos filtros, este material é denominado de concentrado.

Figura 12: Representação de um módulo de membrana em espiral



Fonte: Adaptado de Díaz, 2008.

Outro aspecto a ser considerado é a lavagem da membrana, que deve ser realizada antes e após a utilização da membrana, de modo a prevenir a possibilidade de colmatação. Para realização deste estudo, utilizou-se uma membrana nova, dessa forma, inicialmente foi realizada apenas a passagem de água limpa e isenta de sais e cloro, para então dar início a passagem do efluente. Após finalização do tratamento do efluente, foi adicionada uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) em 20 litros de água em um tanque de alimentação, essa solução ficou recirculando por 30 minutos no sistema, conforme especificações do fabricante. Em seguida, foi novamente filtrada água limpa, isenta de sais e cloro para limpeza dos resíduos da solução, verificou-se então, se a vazão da membrana sofreu alterações devido ao efluente filtrado.

Após a obtenção do permeado, foram realizadas novamente análises físico-químicas, para fins de comparação do efluente bruto com o efluente que passou pelos processos de tratamento e por fim avaliar a qualidade para reuso, comparando os resultados obtidos do efluente tratado com os padrões de acordo com a legislação vigente.

### 3.7 Análise dos resultados

Após a aplicação dos tratamentos através eletrólise e da osmose inversa, foi realizada a análise dos resultados obtidos, através da comparação com os valores do efluente bruto coletado na lavagem de veículos e com a legislação vigente, a fim de determinar a eficiência dos tratamentos aplicados em conjunto.

A observação dos dados foi realizada de forma estatística, através da análise de variância, utilizando um software estatístico para interpretação dos resultados. Após a obtenção destes resultados foi possível obter as considerações para o problema da pesquisa, determinando se a combinação de ambos os tratamentos é capaz de produzir um efluente tratado adequadamente para promover o reuso no processo de lavagem dos veículos.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das análises laboratoriais.

### **4.1 Condições gerais dos ensaios e caracterização do efluente bruto**

Para a realização do experimento foram coletadas seis amostras de efluente em diferentes períodos, os quais apresentaram características de qualidade diferentes, que alteraram de acordo com a demanda de diferentes tipos de veículos para lavagem, ocorrência de precipitação pluviométrica e também lavagens mais pesadas de veículos que são destinados para revenda.

Foram selecionados três resultados destes ensaios para estudo e comparação, os quais serão apresentados e identificados como amostra 01, amostra 02 e amostra 03.

#### **4.1.1 Resultados físico-químicos do efluente bruto**

A amostra 01 foi coletada dois dias após um período de quatro dias de incidência de precipitação pluviométrica, a fim de verificar se o efluente estaria menos carregado conforme informações da revisão bibliográfica.

A segunda coleta de efluente foi realizada para fins de comparação dos resultados, porém esta amostra foi obtida em uma semana onde houve apenas incidência solar.

Uma terceira amostra foi coletada, onde o efluente apresentou características de qualidade bem divergente das amostras anteriores, esta coleta também foi realizada em um período em que não houve precipitação pluviométrica.

Os testes foram realizados em triplicata e os resultados de média e desvio padrão estão expressos na Tabela 1:

Tabela 1: Caracterização físico-química do Efluente Bruto

Efluente Bruto	Amostra 01 (Média e DP)	Amostra 02 (Média e DP)	Amostra 03 (Média e DP)
pH	7,08 ± 0,01	7,08 ± 0,01	5,97 ± 0,11
Cor (PCU)	1630 ± 17,32	2666,66 ± 125,83	2866,67 ± 76,38
Turbidez (NTU)	361 ± 1,53	465 ± 7,00	600 ± 2,65
DQO (mg/L)	399,17 ± 5,22	455,92 ± 11,12	1.052,80 ± 271,14
Fósforo (mg/L)	4,66 ± 0,34	4,039 ± 0,08	70,48 ± 0,001
SST (mg/L)	-	1.280 ± 144,22	1.549,67 ± 25,58
MO (mg O <sub>2</sub> /L)	-	28,37 ± 0,08	42,08 ± 0,04

Fonte: Autor, 2022.

A partir da segunda amostra, verificou-se que o efluente já estava mais carregado de poluentes em comparação com a amostra anterior, uma possível explicação para este aumento nos valores se deve ao fato de que os veículos estavam mais sujos, sendo necessário maior aplicação de produtos para a lavagem, e também por não ter ocorrido uma pré-lavagem dos veículos pela chuva.

Através da caracterização do efluente bruto da amostra 03 pode-se identificar que todos os parâmetros apresentaram valores distintos das amostras anteriores. Verifica-se um aumento significativo da DQO, sendo que este parâmetro está diretamente associado ao material solúvel ou coloidal presente no efluente, que por sua vez, também está associado à matéria orgânica e ao teor de sólidos suspensos totais presentes na amostra.

Identificou-se também um acréscimo expressivo de fósforo nesta amostra, parâmetro que está diretamente relacionado à presença de tensoativos, o que evidencia uma adição de produtos químicos na lavagem dos veículos neste período superior ao usual, identificado nas amostras anteriores.

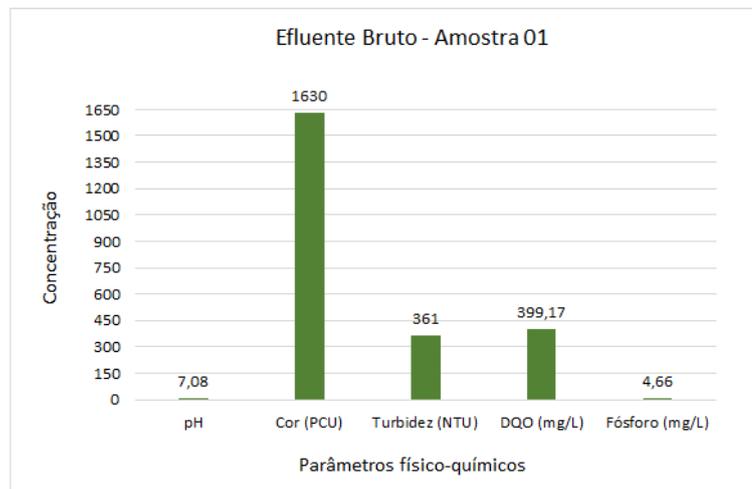
#### 4.2 Caracterização do efluente tratado pelo processo de eletrólise

As três amostras de efluente selecionadas para estudo, apresentadas anteriormente e denominadas de amostra 01, amostra 02 e amostra 03 passaram pelo tratamento eletrolítico, a seguir serão apresentados os resultados das análises físico-químicas.

#### 4.2.1 Resultados físico-químicos após eletrólise da amostra 01

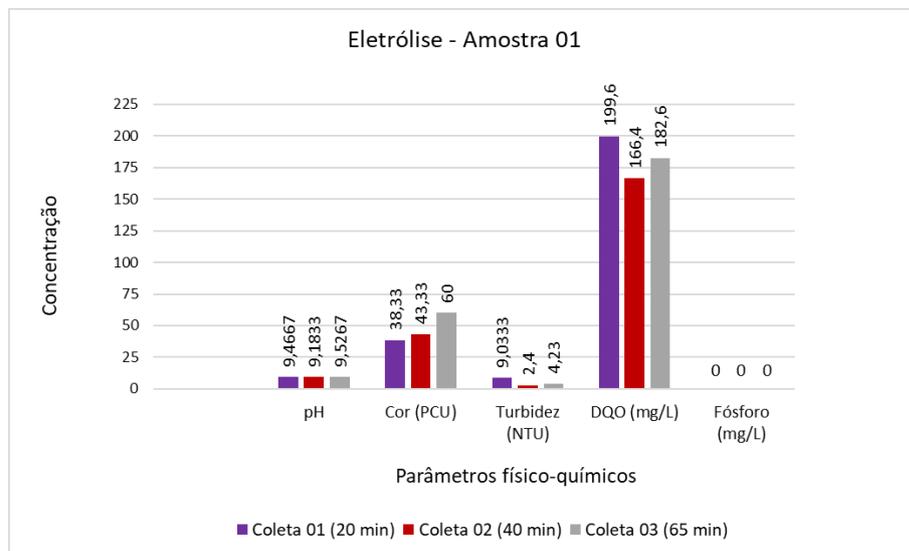
Para realização do tratamento eletrolítico referente a amostra 01, foi utilizada a vazão de 12L/h e TDH de 65 minutos, de acordo com o Teste A. Foram realizadas três coletas do efluente tratado para análise físico-química, nos respectivos tempos: 20 minutos, 40 minutos e 65 minutos, após acionamento da bomba de sucção. A figura 13 demonstra os valores referente a caracterização físico-química do efluente bruto, e a figura 14 apresenta os resultados obtidos após aplicação da eletrólise:

Figura 13: Características físico-químicas do Efluente Bruto - Amostra 01



Fonte: Autor, 2022.

Figura 14: Resultados físico-químicos após tratamento eletrolítico - Amostra 01



Fonte: Autor, 2022.

Os resultados obtidos após o tratamento referente a Amostra 01 demonstram a eficiência do sistema de tratamento e também apresentam variações ao decorrer do tempo de detenção hidráulica.

O valor do pH não apresentou elevação significativa entre as coletas, porém em comparação com o efluente bruto, identifica-se um aumento de aproximadamente 22%, fator que ocorre devido à geração dos íons  $\text{OH}^-$  durante o processo de eletrólise.

Em relação aos parâmetros de Cor, Turbidez e DQO, considerando os maiores resultados apresentados nas coletas, a eficiência no tratamento foi de 96% de remoção de cor, 97,5% para remoção de turbidez e 50% de eficiência na remoção da DQO.

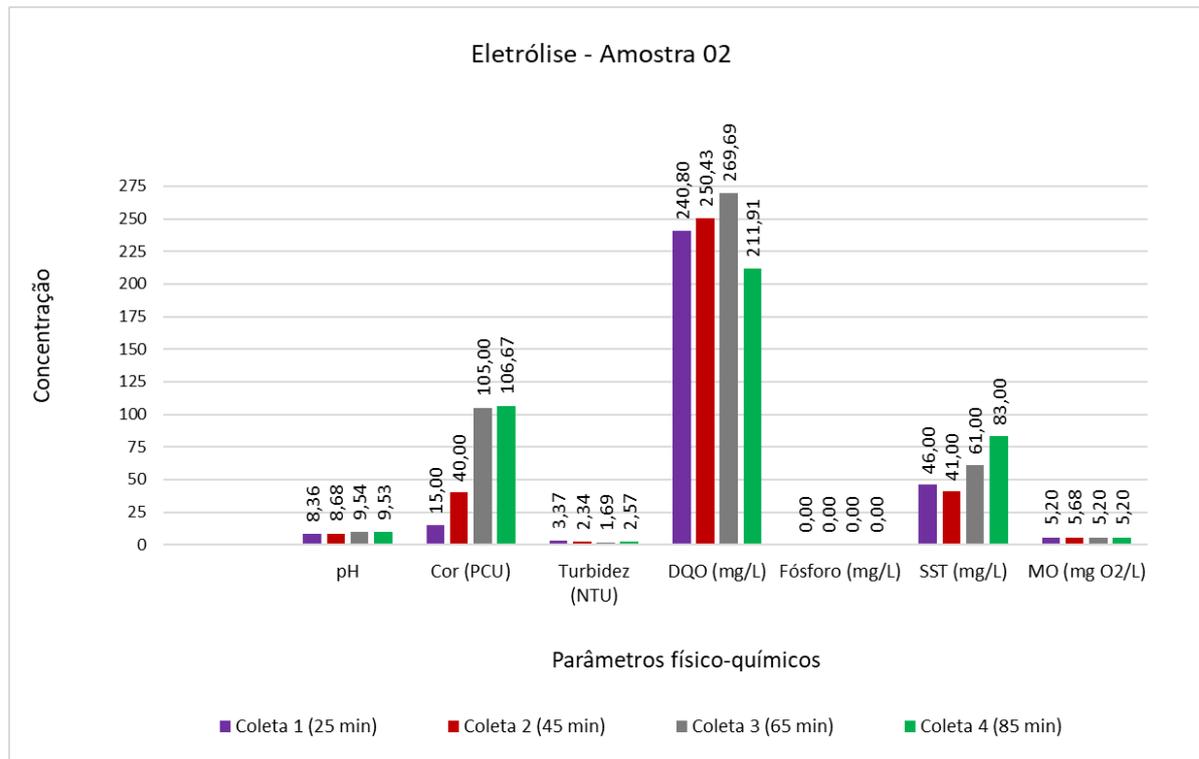
O valor do fósforo presente no efluente bruto era de 4,66 mg/L e após o tratamento eletrolítico, não se identificou valores significativos de fósforo nas amostras coletadas, evidenciando-se novamente a eficiência do processo.

#### **4.2.2 Resultados físico-químicos após eletrólise da amostra 02**

A amostra de efluente 02 foi utilizada através da aplicação dos Testes A e B, ou seja, com vazão de 12L/h e tempo de detenção hidráulica de 65 minutos e também com a vazão de 18L/h e tempo de detenção hidráulica de 43,5 minutos, de modo a identificar as melhores condições de tratamento do efluente.

No Teste A, foram coletadas 04 amostras, nos respectivos tempos: 25 minutos, 45 minutos, 65 minutos e 85 minutos, após acionamento da bomba de sucção. A figura 15 apresenta os resultados dos parâmetros físico-químicos do efluente tratado:

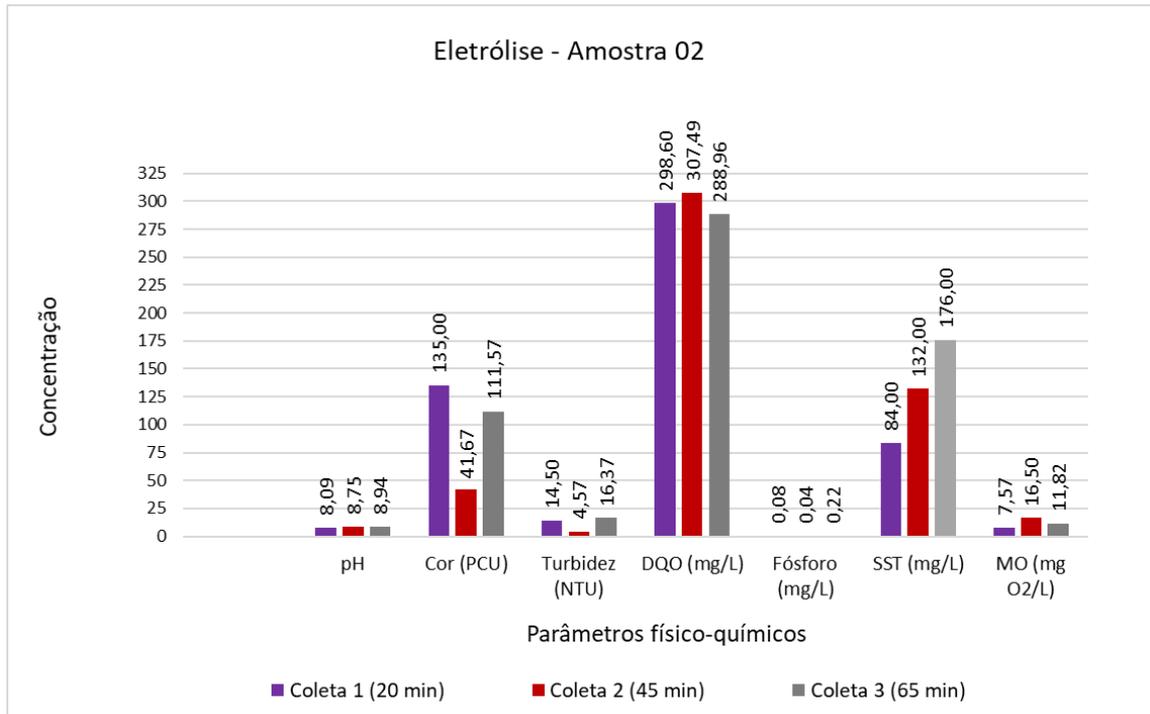
Figura 15: Resultados físico-químicos do tratamento eletrolítico da amostra O2 – Teste A



Fonte: Autor, 2022.

Para realização do Teste B, foram coletadas 03 amostras, nos respectivos tempos: 20 minutos, 45 minutos e 65 minutos, após acionamento da bomba de sucção, utilizando a vazão de 18L/h e tempo de detenção hidráulica de 43,5 minutos para realização do tratamento. A figura 16 apresenta os resultados dos parâmetros físico-químicos do efluente tratado:

Figura 16: Resultados físico-químicos do tratamento eletrolítico da amostra O2 – Teste B



Fonte: Autor, 2022.

Para fins de comparação entre os dois testes, adotou-se como parâmetro de análise, o TDH estipulado nos testes A e B, tendo em vista que as vazões de entrada do efluente e o tempo de permanência do efluente no reator eram diferentes.

No teste A serão analisados os valores obtidos na coleta 03, onde o TDH definido era de 65 minutos. Já no teste B, os resultados para fins de comparação serão obtidos da coleta 02, que possuía o tempo de 45 minutos para detenção hidráulica do efluente.

Os testes foram realizados em triplicata e os resultados estão evidenciados na Tabela 2:

Tabela 2: Comparação dos resultados Teste A e Teste B

Parâmetros	Efluente Bruto	Teste A	Teste B
pH	7,08	9,54	8,75
Cor (PCU)	2667	105	41,67
Turbidez (NTU)	465	1,69	4,57
DQO (mg/L)	456	269,69	307,49
Fósforo (mg/L)	4,039	0,00	0,04
SST (mg/L)	1.280	61,00	132
MO (mg O <sub>2</sub> /L)	28,37	5,20	16,50

Fonte: Autor, 2022

De acordo com valores obtidos após o processo eletrolítico, é possível afirmar que quanto maior é o tempo de residência do efluente no reator, a taxa de remoção da carga poluidora alcançada é maior, pois intensifica a concentração de íons e flocos de hidróxidos, promovendo a geração de mais coagulantes.

Tanto nos testes A e B, houve aumento no valor do pH, devido à formação dos íons OH<sup>-</sup> durante o processo de eletrólise. Como o TDH é maior no teste A, consequentemente o valor de pH também é maior, pois ocorreu maior formação de hidroxilas (OH<sup>-</sup>).

Os resultados referentes as análises de cor e turbidez foram satisfatórias nas duas amostras, apresentando eficiência de remoção de turbidez acima de 99% e redução de cor de 96,06% e 98,44% nos Testes A e B, respectivamente.

A DQO expressa a quantidade de oxigênio necessária para degradar os compostos orgânicos, através de reações químicas de oxidação, indiretamente também apresenta a quantidade de matéria orgânica presente no efluente. Observa-se que devido ao aumento da vazão de entrada do efluente, diminui-se a eficiência do processo, pois reduz a concentração de coagulantes gerados pelo alumínio. As taxas de remoção de DQO apresentou eficiência de 40,85% no teste A e 32,55% no teste B, por consequência, a redução de matéria orgânica nestas amostras foi de 81,67% e 41,84%, nesta ordem. Além disso, a presença de material solúvel ou coloidal também está diretamente associado a DQO, da mesma maneira, o teste A também apresentou eficiência 5,5% maior de remoção para este parâmetro em comparação com o teste B.

Em relação a análise do fósforo, o teste B apresentou 99% de remoção, enquanto no teste A, não foi identificada a presença deste contaminante nas amostras analisadas após o tratamento eletrolítico.

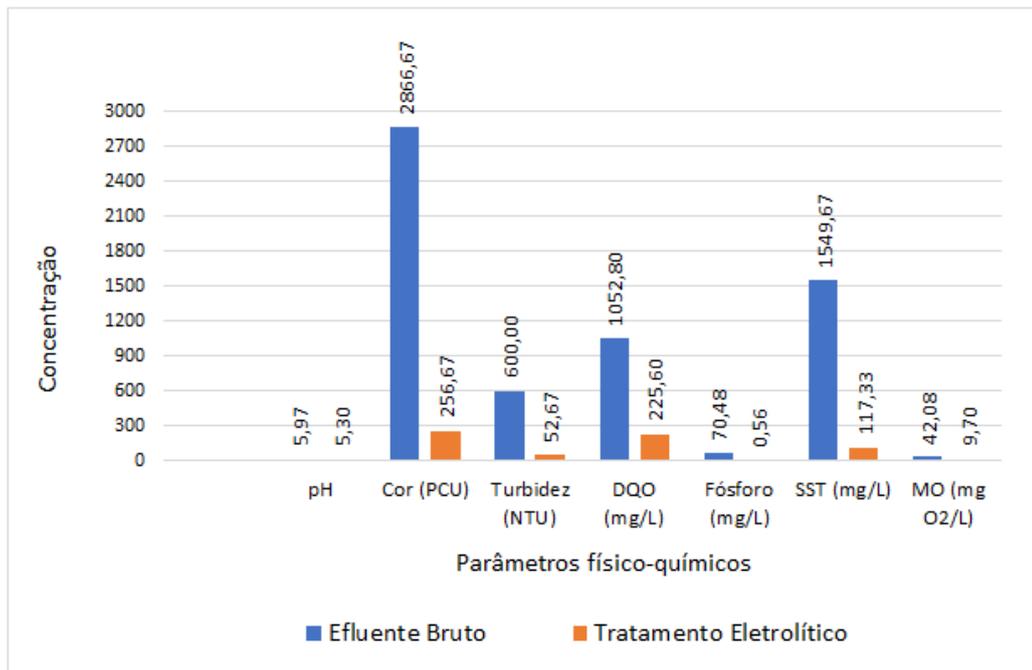
#### **4.2.3 Resultados físico-químicos após eletrólise da amostra 03**

Mediante os resultados obtidos na amostra 02, conclui-se que a melhor condição para o tratamento deste efluente é através do Teste A, utilizando a vazão de 12L/h e tempo de detenção hidráulica de 65 minutos.

Realizou-se o tratamento eletrolítico com a amostra 03, porém conforme dados de caracterização do efluente bruto, esta amostra apresentava características muito diferentes das amostras anteriores, o efluente tratado ainda apresentava valores significativos de cor e turbidez, 460 PCU e 127 NTU respectivamente.

A amostra 03 foi selecionada para realização do experimento completo, o que inclui o tratamento por membranas. Dessa maneira, a fim de manter o mesmo padrão de análise, e de forma a obter valores similares aos testes anteriores, foi necessário realizar o tratamento através da eletrólise duas vezes. O efluente tratado pelo reator eletrolítico foi armazenado e passou por um novo tratamento, utilizando os mesmos valores de vazão e TDH, o qual apresentou melhores resultados. Os valores estão expressos através da Figura 17:

Figura 17: Comparação dos parâmetros físico-químicos do efluente bruto e efluente tratado por eletrólise



Fonte: Autor, 2022.

Embora o processo de tratamento por eletrólise tenha sido realizado duas vezes, resultando em um TDH de 130 minutos, a remoção de cor e turbidez apresentou 91% de eficiência, valor inferior ao apresentado nas amostras anteriores, em que o TDH era de 65 minutos, fato que ocorreu devido a esta amostra de efluente apresentar maiores índices de contaminantes.

Por outro lado, a remoção de material solúvel apresentou maior efetividade, com remoção de 92% dos sólidos suspensos totais, 77% de matéria orgânica e 78,5% de redução de DQO. Esta maior redução destes parâmetros se deve ao fato da presença de uma quantidade maior de coagulantes no meio, visto que o processo de tratamento ocorreu duas vezes.

Novamente a eletrólise se mostrou muito eficiente na remoção do fósforo, apresentando 99% de remoção deste parâmetro. Com base na literatura, o tratamento utilizando eletrodos de alumínio possibilita bons resultados no tratamento de efluentes com elevada concentração de surfactantes, que está diretamente associado à presença de fosfatos na composição dos detergentes utilizados nas lavagens.

Corroborando a diferença na qualidade deste efluente bruto em comparação com as amostras anteriores, o pH do efluente tratado sofreu redução de 11,2% em relação ao bruto, fato que está associado as diferentes condições de sujidade dos veículos lavados neste período e

quantidade de detergentes utilizados, bem como em modificações que podem ocorrer no sistema de tratamento da empresa ou até mesmo variações no processo eletrolítico.

### 4.3 Caracterização do efluente tratado pelo processo osmose inversa

Após a determinação da melhor condição experimental e aplicação do tratamento por eletrocoagulação, prosseguiu-se com o processo de separação por membranas, de modo a complementar a remoção de poluentes que não foram removidos pela eletrólise, e polir a amostra final através da retenção de microrganismos ou moléculas orgânicas responsáveis por cor ou toxicidade.

Foi utilizada pressão constante de 5 bar para a realização do tratamento, pois conforme dados apresentados em outros estudos, esta é considerada a pressão ideal de trabalho de modo a evitar a formação de incrustações. A membrana manteve-se em funcionamento por cerca de 45 minutos para obtenção do efluente tratado, e posteriormente foram realizadas as análises físico-químicas.

Determinou-se também a capacidade de vazão da membrana, identificando quantos litros de efluente a membrana é capaz de filtrar por hora. O cálculo foi realizado inicialmente com água deionizada, posteriormente identificou-se a vazão no início e no fim da passagem do efluente e por fim, após a limpeza da membrana, foi realizado novo teste utilizando água livre de minerais.

A tabela 3 apresenta os resultados de vazão da membrana de osmose inversa Vontron ULP 1812-75:

Tabela 3: Capacidade de vazão da membrana

Água Deionizada	Início do Tratamento	Fim do Tratamento	Água Deionizada
6,10 L/h	5,37 L/h	4,62 L/h	6,10 L/h

Fonte: Autor, 2022

Como pode-se observar, a vazão (L/h) foi diminuindo conforme a passagem do efluente, a redução no fluxo permeado durante a filtração ocorre devido à deposição de partículas na superfície da membrana. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de limpeza da membrana para prevenir a possibilidade de colmatação.

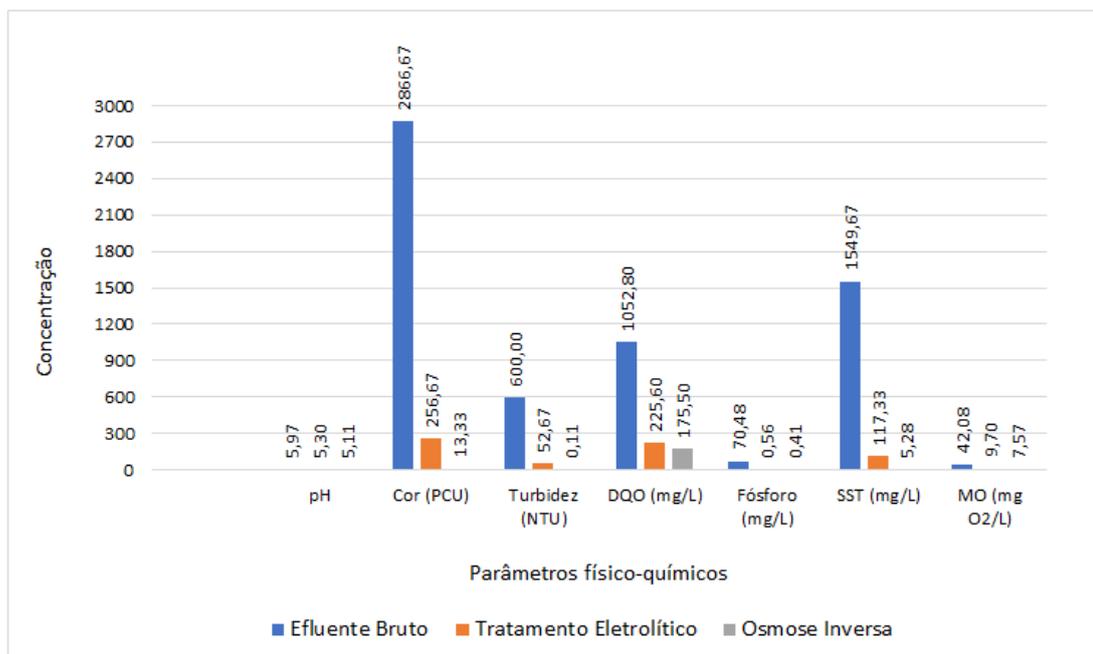
Conforme os dados apresentados, após a limpeza da membrana utilizando hidróxido de sódio (NaOH), constata-se que o efluente não prejudicou a membrana, visto que a capacidade de vazão da membrana não sofreu alteração após a filtração do efluente.

#### 4.3.1 Resultados físico-químicos após tratamento por osmose inversa

Para realização do processo de osmose inversa foi utilizado o efluente referente a amostra 03, após pré-tratamento através da eletrólise. Conforme relatado anteriormente, foi necessário realizar o tratamento eletrolítico duas vezes, ou seja, o TDH aplicado nesta amostra foi de 130 minutos. Por fim, o efluente foi filtrado pela membrana, com o objetivo de atingir os parâmetros necessários para reutilização no processo de lavagem dos veículos.

Os resultados após análise físico-química estão demonstrados nas Figura 18 e 19:

Figura 18: Comparação dos parâmetros físico-químicos do efluente bruto e efluente tratado por eletrólise e osmose inversa



Fonte: Autor, 2022.

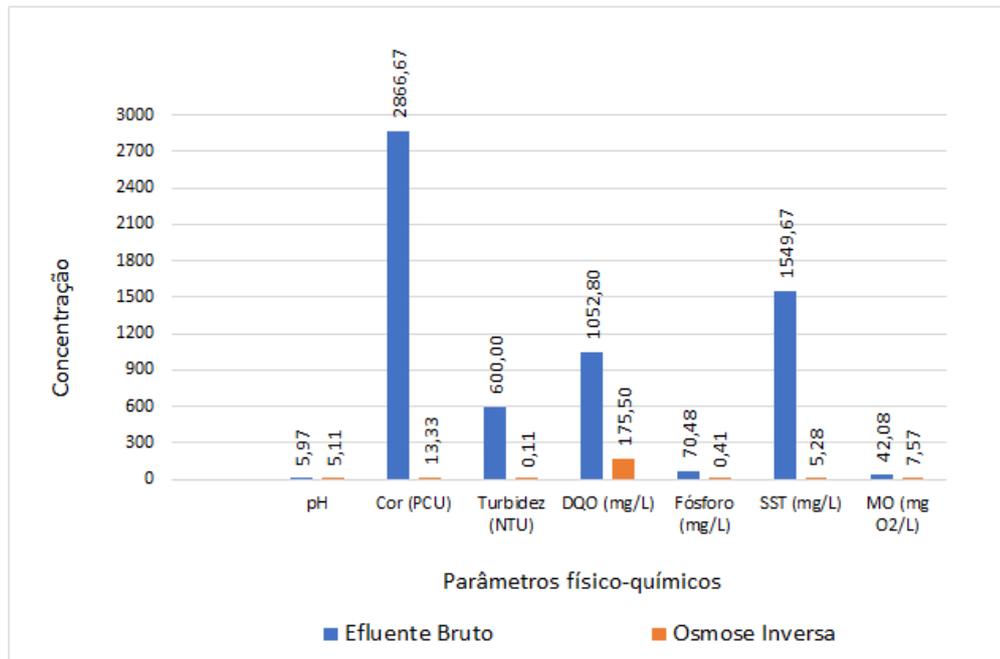
Após passagem da amostra pela membrana, o valor do pH sofreu uma redução de 3,5% em comparação com o efluente tratado por eletrólise, devido à remoção de partículas coloidais que ficaram retidas pela membrana. Em relação aos parâmetros de cor e turbidez, a eficiência

no tratamento foi de 94,80% para remoção de cor e 99,7% na remoção de turbidez, estes valores de redução estão associados a remoção de material suspenso e coloidal.

Quanto à DQO, verificou-se uma remoção de 22,20% após a filtração por osmose inversa, e 21,95% de redução nos valores de matéria orgânica presentes na amostra, valores que também estão associados à remoção dos sólidos suspensos totais, que apresentou eficiência de remoção de 99,5%.

Novamente, houve redução nos valores de fósforo presentes na amostra, identificou-se 26,70% de eficiência de remoção através da membrana, comparando com o resultado do efluente tratado obtido através do processo eletrolítico.

Figura 19: Comparação dos parâmetros físico-químicos do efluente bruto e efluente tratado por osmose inversa



Fonte: Autor, 2022.

Quando comparados os resultados do efluente tratado com o efluente bruto, verifica-se que todas as amostras apresentaram excelente redução dos parâmetros, evidenciando a capacidade de tratamento do efluente através da associação dos processos.

O efluente final, tratado por eletrólise e complementado pela membrana de osmose inversa apresentou redução de 14,40% de pH em comparação com o efluente bruto. Os parâmetros de cor e turbidez apresentaram resultados expressivos, a eficiência no tratamento

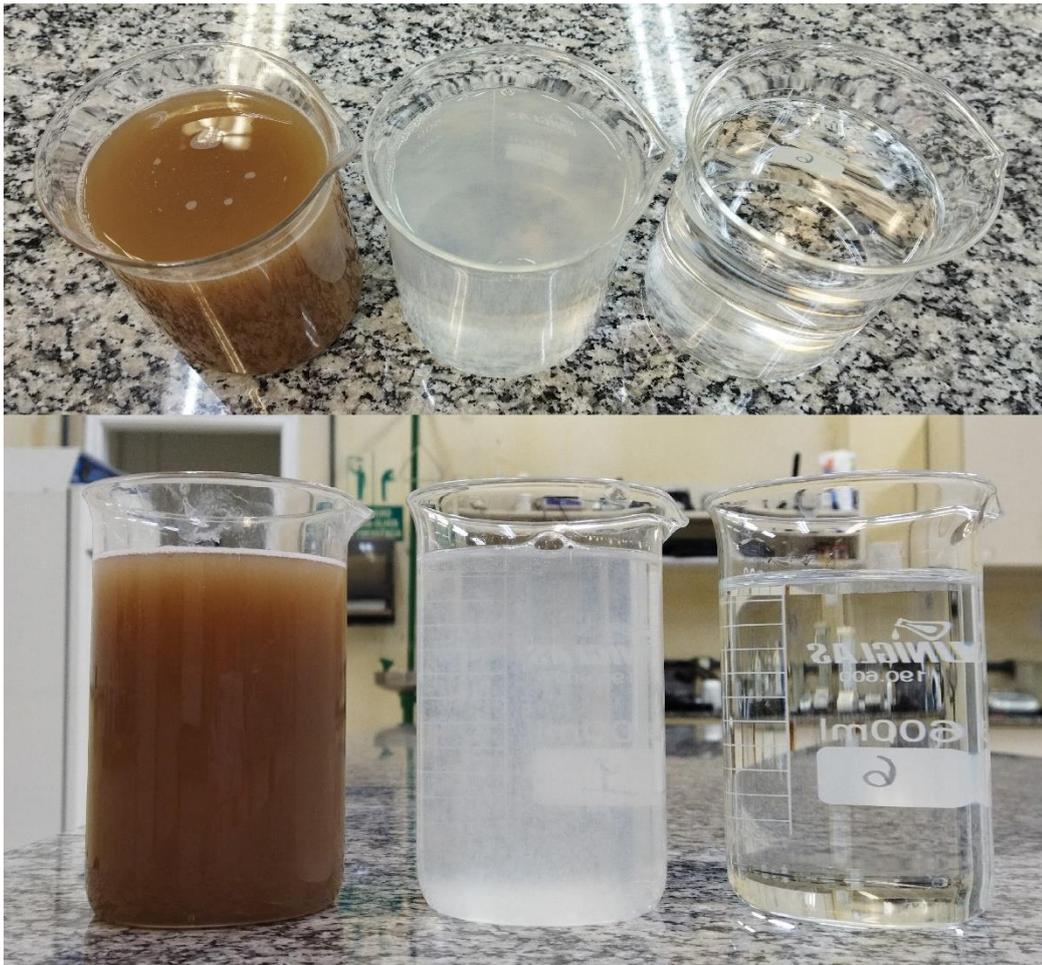
foi de 99,5% para remoção de cor e 99,98% na remoção de turbidez, valores que estão associados a remoção de material suspenso e coloidal.

Após obtenção do permeado, os resultados referentes a remoção de sólidos suspensos totais apresentaram eficiência de remoção de 99,66%, atrelado a este resultado, identifica-se também ótimos valores para remoção de DQO, com redução de 83,35% e 82% na redução de matéria orgânica presentes no efluente bruto.

As taxas de remoção do fósforo novamente apresentaram resultados notáveis, a eficiência de remoção foi de 99,42% em comparação com o efluente bruto, demonstrando a efetividade na aplicação dos tratamentos.

A figura 20 representa as amostras de efluente bruto à esquerda, do efluente tratado por eletrólise ao centro, e do efluente tratado por osmose inversa à direita.

Figura 20: Aspecto visual do efluente bruto x efluente tratado



Fonte: Autor, 2022



parte dos parâmetros exigidos pela legislação, porém neste caso, duas situações precisam ser analisadas.

A primeira delas é que o sistema Fiesp (2005) apresenta a maior quantidade de parâmetros de qualidade para água de reuso, porém verifica-se que os valores são muito restritivos, os valores de referência para turbidez é  $\leq 2UT$  e para cor é  $\leq 10UH$ . Enquanto os padrões de potabilidade de água para consumo humano de acordo com a Portaria N° 888, exigem valores de  $\leq 5UH$  para turbidez e  $\leq 15 UH$  para cor, ou seja, a legislação está requerendo valores mais restritivos para água de reuso, do que para padrões de potabilidade. Então se forem admitidos os padrões para água potável, os valores de cor obtidos após o tratamento aplicado neste efluente, atendem sim a legislação, visto que a água utilizada no processo de lavagem dos veículos é proveniente de abastecimento público e atendem aos padrões acima dos dados estipulados pelo sistema Fiesp (2005).

Outra questão que precisa ser analisada neste estudo está em relação as características de qualidade do efluente, conforme elucidado anteriormente, esta amostra apresentou características de qualidades muito distintas das demais amostras.

Analisando os resultados obtidos da amostra 01 e a eficiência de remoção dos contaminantes pela membrana demonstrada durante os testes, todos os parâmetros analisados iriam atender à legislação, considerando que os valores de pH, cor e turbidez já apresentaram ótima redução no tratamento eletrolítico e onde também não foi detectado a presença de fósforo na amostra tratada, o tratamento complementar com a membrana de osmose inversa iria permitir o reuso do efluente com esta amostra.

Da mesma maneira, é possível admitir que no teste A com a amostra 02, será possível atender aos critérios estabelecidos para reuso, pois o pH já se apresenta dentro dos critérios da legislação. De acordo com a eficiência acima de 90% da membrana para remoção de cor, turbidez e SST também é possível estimar que os resultados irão se enquadrar dentro dos valores estabelecidos. Nesta amostra o valor do fósforo também já estava bem próximo ao valor aceito para reuso, então aplicando o tratamento pela membrana, possivelmente este contaminante não será mais detectado na amostra.

Com base nestas informações verifica-se a necessidade de analisar diferentes amostras do efluente, e nos casos em que o efluente estiver mais carregado, como é o caso da amostra 03, será necessário aplicar o tratamento por mais tempo, para atingir maior remoção da carga poluidora, de modo a não prejudicar a membrana que será utilizada para finalizar o tratamento e por fim promover o reuso no processo de lavagem dos veículos.

## 5. CONCLUSÕES

Comparando os resultados obtidos neste estudo com a literatura, concluiu-se que apesar das características de qualidade deste efluente sofrerem muitas variações no decorrer do período analisado, a eletrólise se mostrou realmente eficaz no tratamento do efluente, apresentando eficiência na remoção de todos os parâmetros analisados.

O tratamento eletrolítico apresentou o melhor resultado no tratamento do efluente através do Teste A, utilizando o tempo de detenção hidráulica de 65 minutos, onde a eficiência do processo apresentou resultado acima de 99% na remoção de fósforo, 91% de eficiência na remoção de cor e turbidez, 92% de redução de sólidos suspensos totais, 77% de matéria orgânica e valores acima de 40,85% na remoção de DQO. Desta forma, este processo apresenta-se como um tratamento de efluente de alta qualidade, com baixo custo de implantação e execução e menor tempo de operação e manutenção. Porém somente este método de tratamento não proporciona os valores aceitáveis pela legislação para reuso deste efluente tratado.

Empregando o tratamento através da membrana de osmose inversa, obteve-se um polimento desta água tratada, promovendo resultados que pode viabilizar o reuso no sistema de lavagem da empresa, desde que sejam realizadas algumas alterações. Para atingir os valores exigidos pela legislação, será necessário aumentar o tempo de detenção hidráulica do efluente no reator de eletrólise, acarretando maior quantidade de coagulantes no meio e assim realizar uma maior redução dos parâmetros necessários para reuso, pois o TDH de 65 minutos mostrou-se eficiente para amostras com menor carga poluidora, porém nos casos onde o efluente se encontra mais carregado, será necessário intensificar o tempo de tratamento.

Outra possível medida para estes casos, seria adotar um padrão máximo de valores para tratamento dos parâmetros analisados, através da caracterização do efluente bruto. Quando a amostra apresentar altos índices de contaminantes, ou seja, ultrapassar os valores pré-determinados, realiza-se então o descarte desta amostra, eliminando assim maiores custos para tratamento deste efluente.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para obtenção de melhores resultados dos parâmetros físico-químicos, através de uma maior remoção de contaminantes do efluente tratado, é possível realizar testes utilizando o tratamento eletrolítico com maior tempo de detenção hidráulica do efluente, também seguido por osmose inversa.

Outros parâmetros podem ser avaliados em novos experimentos, como óleos e graxas e surfactantes, de modo a analisar a correlação entre eles e também para realizar a comparação destes parâmetros com a legislação.

Outro importante estudo está relacionado ao tratamento e descarte adequado da torta de lodo produzida durante o tratamento eletrolítico, pois é onde ficam retidos a maior parte dos contaminantes.

Também é possível aprofundar os testes através da membrana de separação, realizando análises de fluxo do permeado, verificando a eficiência com diferentes amostras e tempos de coleta do efluente e também o desgaste da membrana através da incrustação dos contaminantes.

## REFERÊNCIAS

ANA/FIESP/SINDUSCON-SP. **Conservação e reuso de água em edificações**. São Paulo, Prol Editora Gráfica, 2005. Disponível em: <<http://az545403.vo.msecnd.net/uploads/2014/08/conservacao-e-reuso-de-aguas-2005.pdf>>. Acesso em: 12 de ago de 2022.

As particularidades do tratamento físico-químico de efluentes. **Ação Consultoria Ambiental**, Curitiba, 23 de mar de 2018. Disponível em: <<https://acaoconsultoriaambiental.com.br/as-particularidades-do-tratamento-fisico-quimico-de-efluentes/#:~:text=O%20objetivo%2C%20ent%C3%A3o%2C%20do%20tratamento,depois%20retir%C3%A1%2Dlas%20mais%20facilmente>>. Acesso em: 12 de ago de 2022.

ASHA M.N.; CHANDAN H.P.; HARISH S.; NIKHILESWARREDDY S.; SHARATH K.S.; MINI LIZA G.; **Recycling of waste water collected from automobile service station**. Procedia Environmental Sciences, International Conference on Solid Waste Management. Science Direct, Elsevier, India, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 13.969/97: **Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final de efluentes líquidos - Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 9898/87: **Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

BRÄCHER, Gustavo Holz. **Análise do desempenho de um sistema de eletrocoagulação-flotação para o tratamento de esgoto doméstico visando reuso**. Santa Maria - RS. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2018.

BRASIL. **Frota de Veículos - 2022. Ministério da Infraestrutura**, Publicado em 02/03/2022. Atualizado em 09/08/2022. Disponível em: < <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2022>> Acesso em 13 de ago de 2022.

BRASIL. PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, Ed 85, Seção: 1, p. Publicado em 07/05/2021.

BRASÍLIA (DF). Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Resolução Nº 54, de 28 de novembro de 2005 - **Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências**. Brasília, 2005. Disponível em: <<https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2054.pdf>>. Acesso em: 14 de ago de 2022.

BRASÍLIA (DF). Lei Nº 3.812, de fevereiro de 2006. **Dispõe sobre a obrigatoriedade do reaproveitamento da água utilizada nos postos de lavagem de veículos**. Disponível em: <<http://www.sema.df.gov.br/wp-conteudo/uploads/2017/09/Lei-Distrital-n%C2%BA-3.812-de-2006.pdf>> Acesso em: 14 de ago de 2022.

BRIÃO, Edesnei. **Eletrocoagulação seguida de ultrafiltração para pós tratamento de esgoto para reuso urbano não potável**. 2015. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.

BROWN, C., 2002. **Water use in the Professional Car Wash Industry**. Report for International Car Wash Association, Washington D.C., USA.

CAN, O. T. et al. **Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation**. *Chemosphere*, v. 62, n. 2, p. 181-187, 2006.

CASAN. ESTIAGEM: **Casan alerta para necessidade de economia no uso da água**. 18/02/2022. Disponível em: <<https://www.casan.com.br/noticia/index/url/estiagem-casan-alerta-para-necessidade-de-economia-no-uso-da-agua#0>>. Acesso em: 02 de nov de 2022.

CAVALCANTI, J. E. W. de A. **Manual de Tratamento de Efluentes Industriais**. São Paulo: Engenho Editora Técnica Ltda, 2009.

CHEN, Xueming; CHEN, Guohua; YUE, Po Lock. **Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation**. *Separation and purification technology*, v. 19, n. 1, p. 65-76, 2000.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução 357/2005**. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 13 de ago de 2022.

CONSEMA - CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n° 128**, de 24 de novembro de 2006. Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. Secretaria do Meio Ambiente, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2006.

CURY, Rafael Sadock de Freitas. **Tratamento de efluentes oriundos da lavagem de veículos oriundos da coleta de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica/Escola de Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

DALABONA, Vanessa. **Tratamento Físico-Químico por flocculação de efluente de retífica de motores**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. Ed. São Carlos: Rima Editora, 2005. V. 2. 1584 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Produtos Químicos. Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2011. p. 65-94

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tecnologias de Tratamento, Processos e Operações. Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2011. p. 97-153.

FARIAS, Caroline Menegaz. **Proposta de ajuste técnico de uma estação de tratamento de efluentes para correção do parâmetro de surfactantes residuais**. 2018. Graduação em Engenharia Química, Universidade do Sul de Santa Catarina, Santa Catarina, 2018.

FELTRE, R. **Fundamentos de Química**. São Paulo: Moderna, v. único, p. 646, 1996.

GALVÃO, Douglas Felipe; GOMES, Eliane Rodrigues dos Santos. **Os processos de separação por membranas e sua utilização no tratamento de efluentes industriais da indústria de laticínios: revisão bibliográfica**. Rev. Inst. Laticínios Cândido Tostes, Juiz de Fora, v. 70, n. 6, p. 349-360, nov/dez, 2015.

GIORDANO, G. **Avaliação ambiental de um balneário e estudo de alternativa para controle da poluição utilizando o processo eletrolítico para o tratamento de esgotos**. Niterói – RJ, 1999. 137 p. Dissertação de Mestrado (Ciência Ambiental) Universidade Federal Fluminense, 1999.

HOLT, Peter K.; BARTON, Geoffrey W.; MITCHELL, Cynthia A. **The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology**. Chemosphere, v. 59, n. 3, p. 355-367, 2005.

JORDÃO; E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. ABES: Rio de Janeiro, 5 ed., 2009. 940 p.

METCALF & EDDY, **Wastewater engineering: treatment and reuse**, McGraw- Hill – Boston, 2003. 1819p.

MIGLIAVACCA, Regina. **Análise de reuso de efluente oriundo de cabine de pintura tratado por flocculação e processo de separação por membranas**. 2022. 40f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo. 2022.

MOLLAH, M. Y. A.; SCHENNACH, R.; PARGA, J. R.; COCKE, D. L., **Electrocoagulation (EC); science and applications**. Journal of Hazardous Materials, v.84, p. 29-41, 2001.

PHILIPPI, A. J. et al. (2004), (Ed.) **Curso de Gestão Ambiental**, 1 ed., Manole, Barueri.

PIOVESAN, Maurício. **Tratamento de efluentes industriais utilizando eletrofloculação com eletrodos de alumínio e ferro**. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, 2017.

RIO GRANDE DO SUL. **RESOLUÇÃO CONSEMA nº 419/2020**, de 13 de fevereiro de 2020 - Estabelece critérios e procedimentos para a utilização de água de reúso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul.

RODRIGUEZ, Alfredo Zendejas; WANG, Huiyao; HU, Lei; ZHANG, Yanyan; XU, Pei. **Treatment of Produced Water in the Permian Basin for Hydraulic Fracturing: Comparison of Different Coagulation Processes and Innovative Filter Media**. Water International 2020, 12, 770. mar, 2020.

ROSA, L. G.; SOUSA, J. T.de.; LIMA, V. L. A. de.; ARAUJO, G. H.; SILVA, L. M. A. da.; LEITE, V. D. **Caracterização de águas residuárias oriundas de empresas de lavagem de veículos e impactos ambientais.** *AmbiÁgua*, Taubaté, v. 6, n. 3, p. 179-199, 2011.

SCHENKEL, Raul. **Desenvolvimento experimental de um equipamento para o tratamento de efluentes de lavagem de carros por eletrólise.** Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2022.

SOTTO, Arcadio. **Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos.** 2022.

STREIT, Katia Fernanda. **Estudo da aplicação de processos de separação com membranas no tratamento de efluentes de curtume: nanofiltração e eletrodialise.** Dissertação (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TEIXEIRA, Priscila C., **Emprego da filtração por ar dissolvido no tratamento de efluentes de lavagem de veículos visando a reciclagem da água,** Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas – S.P., 2003. 199p.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guidelines for Water Reuse,** 2012. Washington, D.C.: USEPA, 2012. (Report No. EPA/600/R-12/618). Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf>>. Acesso em 12 de ago de 2022.

VAZ, Luiz Gustavo de Lima: **Performance do processo de coagulação/floculação no tratamento de efluente líquido gerado na galvanoplastia.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Toledo - PR, 2009.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; v.1. 1996.