

REGINA MIGLIAVACCA

**ANÁLISE DE REUSO DE EFLUENTE ORIUNDO DE CABINE DE
PINTURA TRATADO POR FLOCODECANTAÇÃO E PROCESSO DE
SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS**

REGINA MIGLIAVACCA

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DE REUSO DE EFLUENTE ORIUNDO DE CABINE DE PINTURA TRATADO POR FLOCODECANTAÇÃO E PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Proposta para Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade de Passo Fundo.

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

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.

RESUMO

Cada vez mais, práticas de tratamento de efluente vêm sendo aplicadas, afim de reduzir o uso de fontes naturais, e realizar o reaproveitamento da água. Sendo assim, realizou-se um estudo de viabilidade técnica para o reuso de um efluente oriundo de cabine de pintura com cortina de água. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do tratamento físico-químico e do tratamento por membrana de nanofiltração, a fim de verificar a melhor técnica de tratamento para fins de reuso deste efluente. Para que se fizesse possível analisar a melhor condição do tratamento, foram realizados ensaios laboratoriais comparando o efluente bruto com os efluentes tratados, a fim de comparar os resultados obtidos. Para isso, realizaram-se análises de pH, DQO, sólidos totais, turbidez e cor. O melhor resultado obtido para o tratamento físico-químico, foi utilizando o coagulante Sulfato de Alumínio, na concentração de 1735 mg/L, juntamente com o floculante hidróxido de sódio, na concentração de 1597 mg/L. Já, para a nanofiltração o melhor resultado obteve-se na filtração do efluente no tempo de 40 minutos. Os resultados das técnicas de tratamento foram comparadas ao efluente bruto, e também, com estudos realizados na literatura.

Palavras-chaves: Cabine de pinturas; Reuso; Físico-químico; Membranas.

MIGLIAVACCA, REGINA. Reuse analysis of effluent from a paint booth treated by floccantation and membrane separation process. 2022. 40f. Completion of course work (Environmental and Sanitary Engineering) - University of Passo Fundo, Passo Fundo. 2022.

ABSTRACT

Increasingly, effluent treatment practices have been applied in order to reduce the use of natural sources and to reuse water. Therefore, a technical feasibility study was carried out for the reuse of an effluent from a paint booth with a water curtain. The present work aimed to evaluate and perform the treatment of the nanofiltration membrane, in order to verify the best treatment technique for the efficiency of the physicochemical treatment. In order to be treated with the best study, practical tests were carried out on the effluent obtained, in order to compare the results. To do this, compare pH, DQ, total solids, turbidity and color. The best result obtained for the physical-chemical treatment was using the chemical Aluminum coagulant 1735 mg/L7, with the concentrated hydroxide flocculant, at a concentration of 159 mg/L. Already, for nanofiltration, the best result is in the filtration and in the time of 40 minutes. The results of the treatment techniques were studied in the effluent, as well as in the literature.

Key-words: Paint booth; Reuse; Physico-chemical; Membrane.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais leis relacionadas ao tratamento de efluentes	20
Tabela 1- Variáveis analisadas	24
Tabela 3- Concentração e densidade dos químicos utilizados	26
Tabela 4- Valores de caracterização do efluente bruto.....	29
Tabela 5- Requisitos indicados para reutilização de água recuperada	30
Tabela 6- Teste de amostragens com diferentes coagulantes e quantidades	30
Tabela 7- Resultados dos parâmetros obtidos em cada análise	30
Tabela 8- Característica da nanofiltração conforme o fluxo para o teste 1 com membranas...	33
Tabela 9- Valores obtidos para as análises no teste 1 com nanofiltração.....	33
Tabela 10- Característica da nanofiltração conforme o fluxo para o teste 2 com membranas.	34
Tabela 11- Valores obtidos para as análises no teste 2 com nanofiltração.....	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de cabine de pintura com cortina de água	13
Figura 2- Etapas do processo de tratamento físico-químico.....	17
Figura 3- Representação esquemática dos tipos de filtração por membranas	18
Figura 4- Processos de separação por membranas que utilizam gradiente de pressão como força motriz.....	18
Figura 5- Representação do esquema do módulo em espiral	19
Figura 6- Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.....	22
Figura 7- Amostra da análise do tratamento físico-químico	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Sulfato de Alumínio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
PAC	Policloreto de Alumínio
pH	Potencial Hidrogenionico
SMEWW	Standard Methods for Examination of Water & Wastewater
SST	Sólidos Suspensos Totais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 ESCASSEZ HÍDRICA E O REUSO DA ÁGUA	10
2.2 EFLUENTES INDUSTRIAIS.....	10
2.2.1 Efluentes oriundos das cabines de pintura.....	11
2.2.2 Considerações do processo de pintura na empresa em estudo.....	12
2.2.3 Parâmetros a serem avaliados	14
2.3 TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	14
2.4 Tratamento físico-químico	14
2.4.1 Coagulação e floculação	15
2.4.2 Flocculação.....	16
2.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS (PSM).....	17
2.5.1 Nanofiltração.....	19
2.6 LEGISLAÇÕES AMBIENTAIS.....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1 ORIGEM DO EFLUENTE	22
3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS PARA EXECUÇÃO DO ESTUDO.....	22
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE.....	23
3.4 DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS	23
3.4.1 Procedimentos de análises.....	24
3.4.2 Cálculo de eficiência de remoção de DQO	25
3.5 TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO	26
3.6 TRATAMENTO POR SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	26
3.6.1 Limpeza da membrana	27
3.6.2 Fluxo de permeado.....	27
3.7 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO	29
4.2 REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA REUSO DO EFLUENTE	29
4.3 RESULTADOS DO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO	30
4.4 RESULTADOS DOS TESTES COM MEMBRANA DE NANOFILTRAÇÃO.....	32
5 CONCLUSÕES.....	36
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os problemas ambientais têm se tornado cada vez mais frequentes e críticos, principalmente devido ao crescimento descontrolado das populações e atividades industriais. Dada à realidade da escassez de água em muitas partes do mundo, o uso excessivo da mesma tornou-se uma preocupação crescente, considerando que há apenas 2,5% de água doce para consumo humano no planeta (SOUZA, 2020).

Segundo a ONU (Organização das Nações Unidas, 2019) a perspectiva de aumento da população mundial é de até 2 bilhões de pessoas nos próximos 30 anos, existindo assim, a necessidade de outras fontes alternativas para suprir a demanda. A escassez de água nos grandes centros urbanos e o aumento de custos para sua captação e posterior tratamento, devido ao elevado grau de poluição das fontes, faz do reuso um tema de enorme importância. Através deste, é possível preservar água potável exclusivamente para atendimento de necessidades que exigem a sua potabilidade.

O tratamento de efluentes mostra-se uma alternativa viável e eficaz no combate a escassez hídrica. As estações de tratamento são projetadas a fim de reduzir a carga poluidora dos despejos industriais, atendendo os padrões de exigências de lançamento no corpo receptor sem degradar o meio ambiente, tendo a possibilidade do reuso do efluente tratado para fins menos nobres. Considerando que os efluentes gerados nas indústrias não são semelhantes entre si, suas características físicas, químicas e biológicas, portanto, variam de acordo com o tipo de operação.

As águas residuais provenientes de cabines de pintura, tem despertado grande interesse na comunidade científica, uma vez que para a fabricação da tinta são necessários grandes variedades de produtos químicos nos seus processos, além de uma quantidade significativa de água (CETESB, 2008). Além disso, estas águas apresentam elevada coloração, turbidez, odor forte, e contém cargas elevadas de substâncias químicas orgânicas e tóxicas, tais como agentes tensoativos, bactericidas, óleos, solventes, e agentes conservantes (VERMA *et al.*, 2012).

O tratamento do efluente de cabine de pintura com cortina de água, além de ser uma solução para a contaminação ambiental, torna-se ainda, uma forma de realizar o reuso. Através disto é possível reduzir o consumo de água, tornar mais eficiente a desagregação dos contaminantes ao corpo hídrico e reduzir os gastos envolvidos ao descarte do lodo formado por empresas especializadas, além de ocasionar o avanço ambiental nas empresas.

Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo geral analisar a viabilidade de reuso do efluente oriundo de processo de cabines de pinturas com cortina de água em uma empresa localizada na cidade de Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul/Brasil. Já, como objetivos específicos, tem-se a realização das análises para obter a caracterização do efluente bruto, a comparação dos resultados com os diferentes tipos de tratamento, além de verificar a eficácia de cada tratamento e assim, abordar o melhor resultado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESCASSEZ HÍDRICA E O REUSO DA ÁGUA

A água por muito tempo foi considerada um recurso inesgotável. Com o aumento da população e da demanda por este bem, cresce em todo o mundo a preocupação com o uso racional e a necessidade do controle de perdas e desperdícios.

Quando fala-se em disponibilidade hídrica, o Brasil é considerado um país privilegiado, pois detém 53% do manancial de água doce disponível na América do Sul (TOMASELLI, 2014). Além disso, os climas que atuam sobre o território, proporcionam elevados índices pluviométricos. No entanto, mesmo com grande disponibilidade de recursos hídricos, o país sofre com a escassez de água potável em alguns lugares. A água doce disponível em território brasileiro está irregularmente distribuída: 72% dos mananciais estão presentes na região amazônica, restando 27% na região Centro-Sul e apenas 1% na região Nordeste do país (CERQUEIRA, 2017).

Através disto e nestas condições expostas, o conceito de fontes alternativas mostra-se cada vez mais presente, como uma possibilidade eficiente para satisfazer as demandas menos restritivas, liberando as águas de melhor qualidade somente para usos mais nobres, como por exemplo, para o abastecimento doméstico. As águas de qualidade inferior, tais como as de processos industriais, podem ser consideradas fontes alternativas para usos menos restritivos. O uso de tecnologias apropriadas para o desenvolvimento dessas fontes, se constitui hoje, em conjunção com a melhoria da eficiência do uso e o controle da demanda, na estratégia básica para a solução do problema da falta universal de água (SANTOS, 2009).

2.2 EFLUENTES INDUSTRIAIS

O tratamento de efluentes vem tornando-se um assunto de grande importância e revela grandes benefícios ao mundo, sendo declarado como uma das necessidades urgentes para enfrentar o problema da poluição de recursos hídricos e uma solução para escassez de água, fornecendo diferentes possibilidades de reuso (BICUDO *et al.*, 2010)

Segundo a norma brasileira da ABNT - NBR 9800/1987, que estabelece os critérios para lançamento de efluentes no sistema coletor público de esgoto sanitário, define-se que efluentes industriais 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 (NBR 9800/1987).

O efluente industrial possui características próprias, inerentes aos processos fabris (CAVALCANTI, 2012). Suas propriedades químicas, físicas e biológicas variam de acordo com o ramo de atividade da indústria, operação, matérias-primas e demais processos utilizados durante a fabricação. Conhecer o processo de produção, bem como as características do efluente gerado é de fundamental importância para que se possa escolher o tipo de tratamento adequado.

Atualmente, com a legislação vigente e a conscientização da preservação do meio ambiente cada vez mais as indústrias tendem a optar por processos de tratamento de seus efluentes para evitar a contaminação do solo, ar, rios, lagos, oceanos, uma vez que o descarte inadequado destes é um problema que afeta o desenvolvimento urbano, bem como o avanço industrial das empresas que utilizam recursos naturais para produção de bens e serviços (AUGUSTIN, 2019). Essa situação, punida por lei, gera danos ao meio ambiente e riscos às empresas geradoras responsáveis pelos seus resíduos.

2.2.1 Efluentes oriundos das cabines de pintura

De modo geral, a água é o recurso natural mais empregado na fabricação das tintas, e se dá em larga escala e para diversos fins (CETESB 2008). Além desta, utilizam-se também produtos auxiliares como: resinas, pigmentos, solventes, aditivos, dentro outros. Sendo que, várias destas matérias-primas possuem propriedades tóxicas, irritantes e corrosivas o que torna essencial o conhecimento de seus efeitos potenciais sobre a saúde humana e meio ambiente, assim como as possibilidades e procedimentos de tratamento a serem tomados.

Os principais impactos ambientais relacionados às tintas, está associado diretamente aos efluentes gerados no próprio uso do produto. Para caracterizar um efluente são necessários diferentes tipos de análises, mas sabe-se que em sua maioria, os efluentes contendo pigmentos necessitam de um tratamento complexo. Isto porque, as tintas e corantes presentes nos pigmentos, trazem em sua composição hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos, oriundos dos solventes e corantes orgânicos, além de íons de metais pesados de pigmentos inorgânicos. Estes compostos permanecem nos efluentes industriais e conferem características de toxicidade aos mesmos (CETESB, 2008).

Normalmente, os efluentes derivados dos processos de pinturas, nos mais variados segmentos, possuem algumas substâncias presentes que, de modo geral, podem ocorrer em concentrações acima das permitidas em legislação específica para lançamento sem tratamento

prévio. Dentre estas substâncias, pode-se citar os seguintes poluentes e efeitos adversos associados:

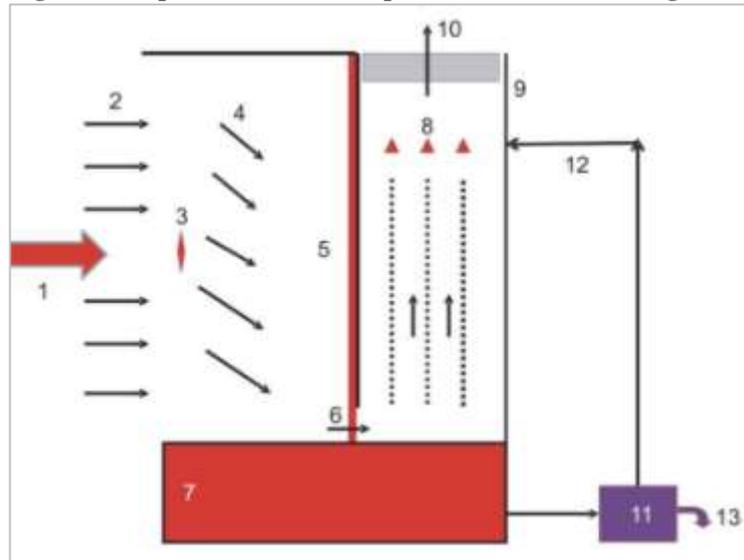
- **Óleos e graxas:** a pequena solubilidade dos óleos e graxas prejudica sua degradação em estações de tratamento de efluentes por processos biológicos e, quando presentes em mananciais utilizados para abastecimento público, podem causar problemas no tratamento d'água, além de impedir a transferência do oxigênio da atmosfera para o meio hídrico, trazendo problemas para a vida aquática.
- **Solventes:** são tóxicos e tendem a contribuir para a contaminação do solo caso sejam manipulados de forma inadequada, além de causar desequilíbrio do pH, quando lançados em corpos d'água.
- **Pigmentos:** os que contêm metais pesados devem, quando possível, serem substituídos por outros produtos no processo de fabricação, sendo que a neutralização antes do lançamento, pode ser uma boa prática para evitar possíveis contaminações.
- **Fosfatos:** Presentes na formulação de algumas tintas, podem, em altas concentrações, levar a proliferação de algas e plantas aquáticas, e provocar o fenômeno da eutrofização dos corpos d'água, que causa o desequilíbrio no pH do corpo aquoso, bem como grandes oscilações nas concentrações de oxigênio dissolvido.

2.2.2 Considerações do processo de pintura na empresa em estudo

A empresa em estudo possui o processo de pintura spray em cabines com cortina de água. Esse processo consiste na aspersão de gotículas de tinta em forma de spray que fixam-se na peça desejada, formando-se através de ar comprimido e/ou pressão da bomba de alimentação.

Neste tipo de cabine de pintura que possui a cortina de água, a mesma atua como filtro atmosférico para absorção do *over-spray* formado, e a partir disto tem-se a ocorrência da formação do lodo, essa formação deve ser controlada, a fim de evitar incrustações, que podem gerar pontos de corrosão (POSSAMAI *et al.*, 2018) na peça. Além disso, a cortina de água, tem como objetivo remover contaminantes para o meio ambiente, pois criam um fluxo de ar ideal para que o *over spray* da tinta seja conduzido para retenção ou lavagem antes de serem dispersos na atmosfera (ACCI, 2018).

Figura 1- Esquema de cabine de pintura com cortina de água



Fonte: Pacheco, 2015.

A Figura 1 mostra de forma simplificada os componentes básicos de uma cabine de pintura com cortina de água. Os índices representam: [1] a pistola de pintura, [2] escoamento do ar externo na face de entrada da cabine, [3] objeto sendo pintado, [4] perfil do escoamento do ar e do *over-spray* no interior da cabine, [5] cortina de água, [6] fresta com lâmina de água, [7] reservatório de coleta da água, [8] chuveiros, [9] eliminador de gotas, [10] escoamento do ar pelo ventilador (não mostrado) e deste para atmosfera, [11] extrator de borra sobrenadante ou sedimentada, [12] retorno de água para alimentação de chuveiros e cortina de água, [13] saída da borra.

Através disto, a dificuldade que a empresa em estudo enfrenta neste processo está relacionada a formação da borra de tinta que, com o passar do tempo, pode causar possíveis pontos de corrosão e incrustações. Com o intuito de evitar esse tipo de dano, a empresa adiciona diretamente no reservatório de coleta de água um *blend* - formado por polímero e coagulante, não especificados - com o objetivo de melhorar a sedimentabilidade do lodo. Através desta adição, nota-se cada vez mais formação da borra de tinta que, formada em excesso prejudica o sistema, fazendo que limpezas diárias sejam realizadas.

A necessidade da realização das limpezas diárias afeta diretamente o processo de produção, pois o mesmo é interrompido neste período. A empresa ainda necessita da disponibilidade de dois colaboradores, 2 horas por dia e 8 horas no último dia útil de cada semana, para que os mesmos possam realizar a limpeza do local.

Além disso, atualmente o efluente gerado é descartado como resíduo, requerendo alto custo para o transporte e o descarte do mesmo, não tendo nenhuma parcela de reaproveitamento.

Com isso, mesma busca analisar a viabilidade técnica do reuso do efluente gerado nesse processo.

2.2.3 Parâmetros a serem avaliados

Os métodos para avaliação de toxicidade dos efluentes industriais são ferramentas importantes de caracterização e controle da poluição, e a estratégia mais eficiente é o uso integrado de análises físicas, químicas que respondem como, quais e em que níveis os efluentes podem prejudicar a saúde humana e ecossistemas.

Como o efluente em estudo em questão é oriundo do processo de cabine de pintura com cortina de água, levando em consideração estudos já realizados e a composição do efluente, algumas análises são fundamentais, a fim de evidenciar o melhor tratamento, visando o reuso. Dentre estas análises destacam-se a de pH (potencial hidrogeniônico), DQO (Demanda Química de Oxigênio), SST (Sólidos Suspensos Totais), cor e turbidez.

2.3 TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Existem atualmente, diversos processos de tratamento de efluentes, sendo que a aplicação destes 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 (VON SPERLING, 1996). A remoção dos contaminantes presentes em efluentes industriais é realizada através de métodos físicos, químicos e biológicos, no qual envolvem vários processos e operações unitárias, que podem ser utilizadas separadamente ou em uma multiplicidade de combinações.

A escolha da técnica ou da combinação de diferentes técnicas de tratamento é o que irá definir o sistema de tratamento, e sendo assim, deve-se basear no conhecimento do potencial de cada técnica, além de todos os mecanismos envolvidos na redução do contaminante em questão (RICHTER, 2009).

2.4 TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO

Os poluentes que não podem ser removidos por processos biológicos convencionais, geralmente são removidos pelo tratamento físico-químico. Este tipo de tratamento também é usado para reduzir a carga orgânica antes do tratamento biológico. Normalmente, o tratamento

físico-químico serve para retirar poluentes inorgânicos, materiais insolúveis, metais pesados, material orgânico não biodegradável, sólidos em suspensão, cor, nitrogênio, Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), bactérias, sólidos coloidais, dentre outros (NUNES, 2012).

Os processos convencionais de tratamento físico-químicos, também conhecido como tratamento primário, objetivam aglutinar partículas em suspensão contidas em águas residuais mediante adição de coagulantes ou floculantes de modo a promover a redução de sólidos em suspensão e coloidais, carga orgânica e de alguns tipos de poluentes (RICHTER, 2009). Para que o tratamento primário ocorra de maneira correta, é necessário realizar uma séria de fases sequenciais, a fim de que a combinação das mesmas, propicie o tratamento mais adequado.

2.4.1 Coagulação e floculação

Segundo Cavalcanti (2012), a coagulação é o processo de aglomeração de partículas em suspensão, ou em estado coloidal, através da adição de um coagulante apropriado. Este, contribui para formação de flocos em um líquido, pela ação de um coagulante químico que, em solução, fornece carga orgânica oposta as partículas coloidais. Geralmente, os efluentes de cabine de pintura, possuem grandes quantidade de partículas em suspensão, sendo assim, para efetuar-se a separação destas, é necessário promover a coagulação de maneira que se tornem partículas de tamanho maior e que sedimentem com maior velocidade.

Os ensaios de coagulação destinam-se à obtenção de informações fundamentais para o dimensionamento de estações de tratamento de efluentes industriais. Através deles obtém-se dados como tipos e dosagens de reagentes, tempos de detenção, gradientes de velocidades, volumes e características de lodos, bem como performance de processo quanto à remoção de poluentes específicos (CAVALCANTI, 2009).

Para que se obtenha uma boa coagulação é fundamental escolher o coagulante mais indicado, sendo que para escolha, deve-se tomar como base um estudo em termos de rendimento, custos, consumo de produtos, auxiliares para ajuste de pH, facilidade de manipulação entre outros (RICHTER, 2009). Normalmente, os coagulantes mais utilizados nos processos de coagulação, são compostos por cátions polivalentes, como o sulfato de alumínio, sulfato férrico, cloreto férrico, entre outros.

Segundo Richter (2009), a coagulação envolve inicialmente a mistura rápida do coagulante com a água e, em seguida, a agitação lenta do material coagulado para a formação dos flocos. Sendo assim, a floculação é a operação complementar à coagulação, e visa dar

densidade as partículas coloidais neutralizadas, tornando-as maiores e de maior peso. É realizada através da adição de moléculas de cadeia longa (polímeros), cujas subunidades são ionizáveis (polieletrólitos), produzindo a união de partículas por adsorção e formação de pontes (CAVALCANTI, 2012). Juntamente com a coagulação, a floculação desempenha um papel dominante na cadeia de processos de tratamento de água e efluentes, principalmente na preparação da decantação ou da flotação e, assim, na filtração que se segue.

Devido às complexas reações que ocorrem em um tratamento físico-químico é essencial estabelecer um pH ótimo de floculação, bem como determinar a dosagem de coagulante necessária para separação de poluentes originariamente em suspensão ou emulsão (CAVALCANTI, 2009). Além disso, a escolha dos flocculantes utilizados, também auxilia na eficácia do tratamento.

2.4.2 Flocculação

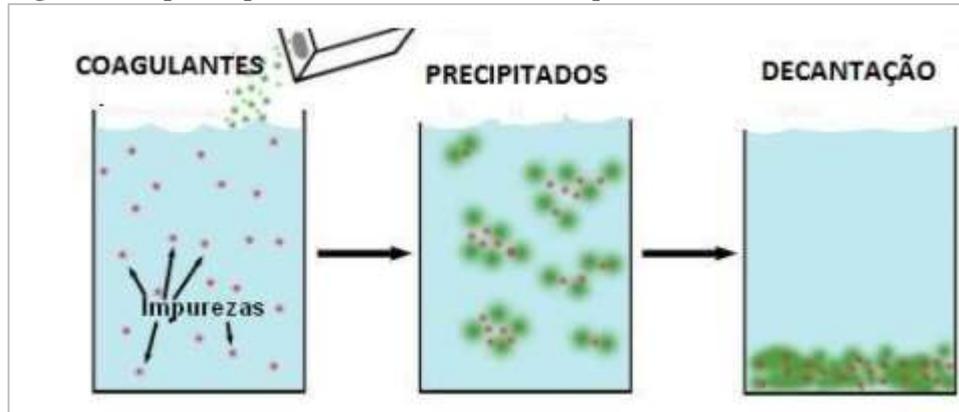
Sedimentação é a separação de partículas sólidas em suspensão da água, por sedimentação gravitacional, que são mais pesadas do que a água. É uma das operações unitárias mais amplamente utilizada no tratamento de águas residuais.

A decantação baseia-se na velocidade de precipitação das partículas sólidas que caracterizam um determinado efluente líquido e na maioria dos casos, tem como objetivo primário produzir um efluente clarificado, mas esta etapa também é necessária para a produção de lodo com concentração de sólidos que podem ser facilmente manuseados e tratados. A eficiência da decantação é reduzida a medida que ocorra um funcionamento ou dosagens inadequadas de coagulantes e flocculantes, causando problemas de operação (LOPES, 2014).

Através dos ensaios de coagulação realizados, é possível obter informações fundamentais para o dimensionamento de um ETE, pois assim, consegue-se obter dados como tipo e dosagem de reagentes, tempo de detenção, volumes e características do lodo, além da performance do processo quanto a remoção de poluentes específicos.

A imagem abaixo é representada as etapas destes processos físico-químicos. Inicialmente há a adição do coagulante no efluente, após os coagulantes formam os precipitados, e então os coagulantes e impurezas se depositam. Sendo que estas etapas ocorrem uma em sequência imediata uma da outra, tornando-se essenciais para o início do tratamento de efluentes industriais

Figura 2- Etapas do processo de tratamento físico-químico



Fonte: NaturalTec.

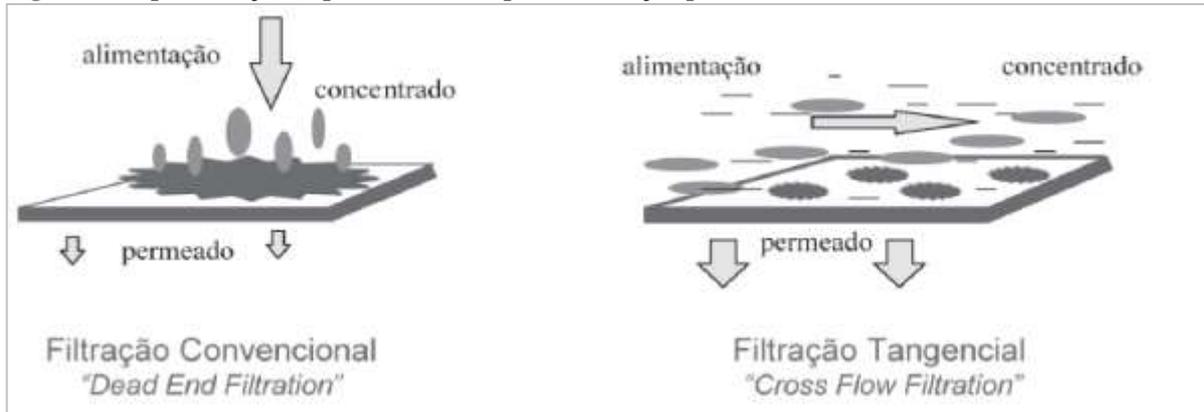
2.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS (PSM)

O processo de separação por membranas é uma variação dos processos convencionais de filtração clássica. Membranas podem ser definidas como "uma barreira que separa duas fases e que restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases" (HABERT *et al.*, 2006).

As tecnologias de filtração e separação por membranas utilizadas comercialmente, permitem remover substâncias que variam desde sólidos em suspensão até elementos iônicos, que baseiam-se na aplicação de uma força motriz utilizando a pressão hidráulica para promover a separação de fases. O fluido é transportado através da membrana pela ação de uma força motriz, que pode ser provocada por vários tipos de gradientes: de concentração, de potencial elétrico, de pressão de vapor e de pressão hidráulica. Esse último é o mais utilizado no tratamento de água (HABERT *et al.*, 2006).

A filtração por membranas pode ocorrer de duas maneiras distintas: filtração frontal ou filtração tangencial (Figura 3). Na filtração frontal, a alimentação e o permeado escoam perpendicularmente à superfície da membrana. Já na filtração tangencial, a alimentação e o concentrado escoam paralelamente à superfície da membrana, enquanto o permeado é transportado transversalmente à ela, sendo que está se divide em duas correntes, uma que permeia através da membrana, dando origem ao permeado e a outra que é retida por ela, tendo-se assim o retentado. A vantagem, neste caso é que o fluxo paralelo à membrana arrasta consigo uma parte das partículas retidas, de maneira que a deposição de material na superfície da membrana é menor que na filtração frontal.

Figura 3- Representação esquemática dos tipos de filtração por membranas

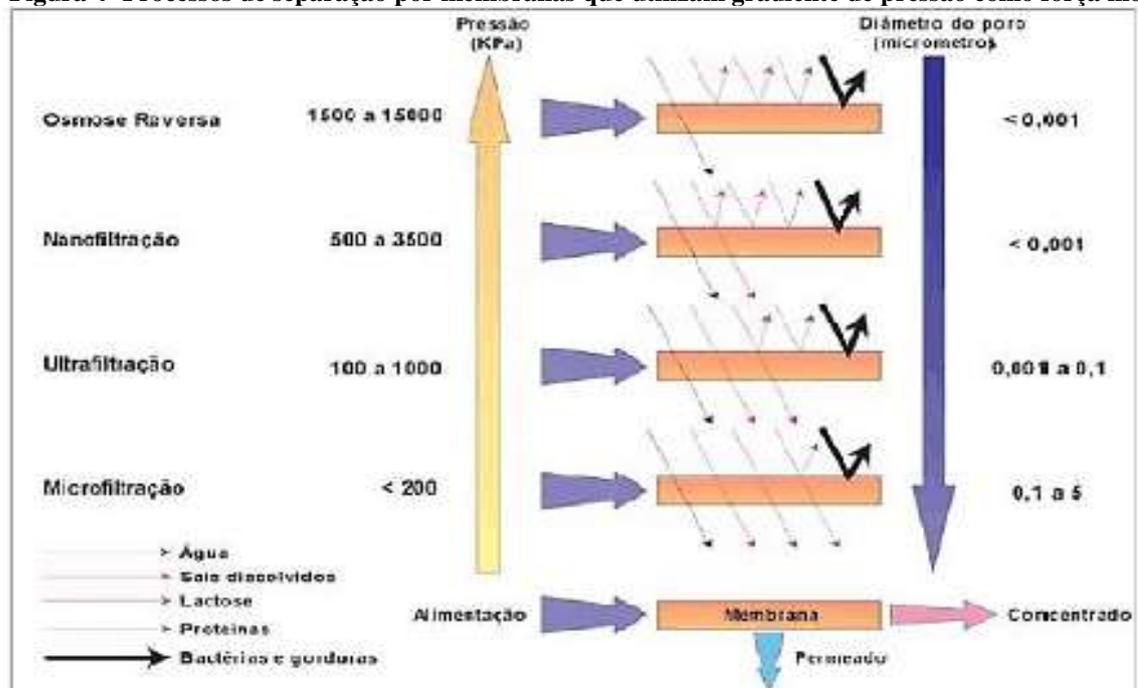


Fonte: Habert, Borges e Nóbrega, 2006.

Os processos utilizando membranas são conhecidos como microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa, onde, o que varia é o tamanho da partícula retida em cada meio filtrante (CAVALCANTI, 2012).

A figura 4 apresenta uma visão geral dos processos de separação por membranas que utilizam o gradiente de pressão como força motriz.

Figura 4- Processos de separação por membranas que utilizam gradiente de pressão como força motriz



Fonte: Mierzwa e Hespanhol, 2005.

2.5.1 Nanofiltração

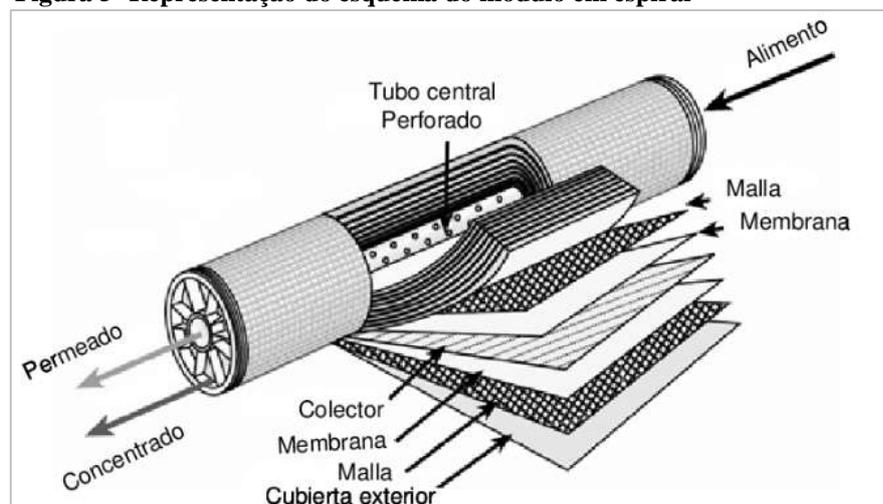
A nanofiltração é um processo intermediário entre a osmose reversa e a ultrafiltração. É utilizada, normalmente na separação de solutos orgânicos de baixo peso molecular e na desmineralização de parcial de correntes líquidas, para a remoção de sais polivalentes.

O princípio básico da nanofiltração, é semelhante ao dos demais processos com membranas, onde a solução a tratar circula sob pressão em contato com uma membrana microporosa. Sob efeito desta pressão o solvente (geralmente água), juntamente com sais e moléculas de baixa massa molecular, atravessam a membrana, e dão origem ao permeado, enquanto as moléculas de maior massa molecular não permeiam a membrana.

Os mecanismos de transporte que atuam na NF são os de difusão (tal como na osmose reversa), a exclusão molecular (tal como na ultrafiltração) e também interações eletrostáticas. Geralmente o diâmetro de poros é da ordem de $0,001\mu\text{m}$ e sendo que a pressão de operação varia de 500 a 3500 Kpa.

Quando fala-se em escala industrial, a separação com nanofiltração requerem extensas áreas de membranas, para isto, as mesmas são projetadas em módulos (STREIT, 2011). Estes módulos dividem-se em: planar, tubular, fibra ocas e em espiral. Neste trabalho utilizou-se para as análises o módulo em espiral. Este, é um dos mais comuns nas indústrias que operam com processos de separação por membranas. É constituída por membranas planares, suportes e espaçadores que são fixados e enrolados em redor de um tubo central por onde flui o permeado.

Figura 5- Representação do esquema do módulo em espiral



Fonte: Adaptado de Chemtreat, 2022.

2.6 LEGISLAÇÕES AMBIENTAIS

Conforme mencionado anteriormente, nas indústrias, alguns setores e atividades específicas são vistos como geradores de um volume considerável de efluentes, principalmente pela utilização de água durante algumas etapas do processo produtivo como na fabricação, lavagem e retenção de materiais.

O correto manejo desses efluentes é orientado por rígidas leis, pois seu descarte sem o tratamento adequado pode implicar em riscos para a saúde humana, além da degradação do meio ambiente em geral. Isso porque, dependendo do setor de atuação, esses resíduos líquidos contêm metais pesados ou substâncias altamente perigosas em sua composição, como é caso de efluentes oriundos das cabines de pintura (SILVA, 2021).

Para assegurar a preservação do ambiente e dos seres vivos em geral, criou-se leis federais, estaduais e municipais que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, além de definir ainda a responsabilidade de pessoas jurídicas, permitindo a autuação criminal pelos danos causados por suas operações e a aplicação de multas, suspensão parcial ou total de atividades. A tabela abaixo apresenta as principais leis relacionadas ao lançamento e tratamento de efluentes.

Tabela 1- Principais leis relacionadas ao tratamento de efluentes

Lei Genérica	Área	Resumo
Lei Federal nº 6.938/1981	Recursos hídricos	Dispõe sobre a política nacional do meio ambiente e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
CONSEMA 355/2017	Recursos hídricos	Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul.
Resolução CONSEMA nº 419 de 2020	Recursos hídricos	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.
Lei nº 9.433 de 1997	Recursos Hídricos	Conhecida como Lei das águas, determina todo o processo de gestão dos recursos hídricos brasileiros para o uso múltiplo das águas.
ABNT NBR 10.004 de 2004	Resíduos Sólidos	Classifica os resíduos sólidos quanto aos seus potenciais poluidores ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.
Lei nº 12.183, de 2005 – São Paulo	Recursos hídricos	Dispõe sobre a cobrança pela utilização dos recursos hídricos do domínio do Estado de São Paulo, os procedimentos para fixação dos seus limites, condicionantes e valores e dá outras providências.
ABNT NBR 13.696 de 1997	Reuso	Aborda sobre a reutilização de água no país como uma opção à destinação de esgotos de origem doméstica ou com características similares.

Fonte: Autora, 2022.

Além das leis existentes no país Brasileiro, quando fala-se em tratamento de efluentes, deve-se considerar a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (Environmental Protection Agency – EPA). Esta é uma agência federal do governo dos Estados Unidos da América, é encarregada de proteger a saúde humana e o meio ambiente em toda sua complexidade; ar, água e terra.

A Lei maior que rege a gestão de recursos hídricos nos Estados Unidos da América (EUA) é a Lei Federal de Controle de Poluição da Água (Federal Water Pollution Control Act ou “Clean Water Act - CWA”). O CWA está diretamente relacionado à gestão da qualidade da água, ao lançamento de efluentes e à outorga para lançamento de efluentes. Sendo que os critérios de qualidade da água devem ser adotados pelos estados em conformidade com os critérios estabelecidos pelo EPA. As diretrizes e padrões para lançamento de efluentes nos corpos hídricos são definidos pelo EPA para mais de 50 tipologias industriais, contendo os padrões para lançamento por tipologia industrial.

Além de padrões para o lançamento de efluentes, o EPA também traz em questão o reuso de alguns efluentes industriais. Neste, é abordada a qualidade da água recuperada e os requisitos de tratamento que variam de acordo com o uso final da água recuperada e potencial de exposição. Um exemplo disso é a Califórnia, que tem requisitos diferentes para o uso de água recuperada. Já, na Carolina do Norte, a água recuperada produzida pelas instalações industriais não é obrigada a atender a critérios de reutilização se a mesma for usada em um processo que não há acesso público (EPA, 2012).

No caso da turbidez para reuso industrial, em processos de oxidação, coagulação, filtração ou desinfecção, no estado da Califórnia, encontraram-se valores de uma média 2 NTU para filtros médios e máximo de 10 NTU para filtros médios, e 0,5 NTU sendo a máxima turbidez para filtros de membrana (EPA, 2012). Sendo que não foram encontrados padrões de reuso industrial para cor, e o parâmetro de sólidos suspensos não é especificado pelo regulamento estadual de reutilização. Vale ressaltar, que estes parâmetros de reuso, variam conforme os processos unitários de tratamento, bem como para qual finalidade é o reuso final do efluente, e em qual estado será feito o tratamento para este reuso.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ORIGEM DO EFLUENTE

O efluente em estudo neste trabalho, é proveniente de uma empresa localizada na cidade de Porto Alegre/RS. A empresa é uma das principais fabricantes de equipamentos para terminais e movimentação de granéis sólidos, além de produtos como elevadores de caçamba, pallets, carregadores de navio, entre outros.

O efluente em questão é oriundo do processo de pintura em cabine com cortina de água, sendo que atualmente a empresa trata o efluente como resíduo, tendo um elevado custo para sua disposição final. Com isso, realizou-se um estudo, a fim de verificar a viabilidade de reuso deste efluente, para que após o tratamento o mesmo volte a cabine, atuando novamente como a cortina de água.

3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS PARA EXECUÇÃO DO ESTUDO

O presente estudo foi realizado através de uma sequência de etapas, descritas na Figura 6.

Figura 6- Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Autora, 2022.

A primeira etapa realizada após o recebimento do efluente, foi a caracterização do efluente bruto. Para isso, realizaram-se as análises de pH, cor, turbidez, sólidos suspensos totais e demanda química de oxigênio, com a amostra de efluente bruto.

Após iniciaram-se os testes com o tratamento físico químico. Assim, executou-se o Jar – test, que é um método utilizado para remoção dos poluentes. Este, ocorreu em laboratório e teve como o objetivo simular a coagulação/floculação com diferentes doses e diferentes produtos químicos. Após a realização de diversas análises, averiguando as características de pH e decantação dos mesmos, selecionou-se os dois melhores coagulantes. Posteriormente, realizaram-se novamente os Jar-test, a fim de selecionar a quantidade ideal de cada um, para assim, obter a melhor eficiência de tratamento.

Sendo definindo essas dosagens de coagulantes e floculantes, foram iniciadas as análises físico-químicas, a fim de averiguar os parâmetros selecionados. Após, compararam-se os resultados do efluente bruto e do efluente após o tratamento físico-químico.

Na sequência, testou-se o tratamento do efluente por processo de separação por membranas. Optou-se por utilizar o efluente bruto, pois o mesmo apresentava características consideradas aceitáveis para a passagem na membrana, não requerendo assim, nenhum tipo de pré-tratamento. Com a obtenção dos dados, os resultados foram comparados para analisar a viabilidade de cada tratamento.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

A caracterização do efluente, foi realizada através de coletas realizadas in loco, diretamente na saída da cabine de pintura.

Após a coleta, as amostras foram colocadas em recipientes apropriados e acondicionadas em caixa de isopor e resfriadas com gelo, preservando a amostra a 4°C seguindo as normas da NBR 9898 (Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores) e encaminhadas para o Laboratório de Ensino Engenharia Ambiental e Sanitária FEAR - G2, onde após foram analisadas, seguindo o protocolo do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

3.4 DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS

As análises necessárias para o estudo foram realizadas no laboratório do curso de engenharia ambiental e sanitária da UPF – G2. As metodologias de análises ambientais

realizadas foram baseadas nos processos descritos no Standard Methods for Examination of Water & Wastewater - SMEWW (APHA, 2005). As variáveis seguem descritas na Tabela 2.

Tabela 1- Variáveis analisadas

Variável	Método	Unidade
Cor	SMWW, 23RD Edição, Método 2120B	µH
Turbidez	SMWW, 23RD Edição, Método 2130B	NTU
Demanda química de oxigênio (DQO)	SMWW, 23rd Edição, Método 5210D.	mg/L
Sólidos Suspensos Totais (SST)	SMWW, 23rd Edição, Método 2540D	mg/L
pH	SMWW, 23RD Edição, Metodo 2580 B	-

Fonte: Autora, 2022.

3.4.1 Procedimentos de análises

A medição do pH foi realizada com o auxílio de um pHmetro de bancada digital da marca DIGIMED, disponível em laboratório, a fim de detectar o grau de acidez ou alcalinidade da amostra.

Já a turbidez foi obtida através de leitura instrumental em turbidímetro, que é a leitura proporcionada pelo espalhamento e absorção da luz que atravessa a amostra, sendo que o valor dado já é o resultado final de turbidez.

A cor foi obtida através de leitura instrumental em colorímetro, sendo que este é um instrumento que mede a absorção de uma solução em uma frequência específica de luz.

Os sólidos foram obtidos através do método de filtração, onde sólidos suspensos são as partículas que ficam retidos no papel de filtro, após a passagem da amostra líquida. Para o cálculo de SST, deve-se realizar a seguinte equação abaixo:

$$SSF = \frac{(m2 - m1) * 1000}{V} \quad (1)$$

Onde:

SSF = sólidos suspensos totais [mg/L];

m2 = massa da cápsula com resíduo total [mg];

m1 = massa da cápsula vazia [mg];

V = volume da amostra em [mL];

Já, a Demanda Química de Oxigênio foi realizada pelo método da titulação, onde após realizada a titulação, anotou-se o valor de sulfato ferroso amoniacal padronizado utilizado na mesma. O valor de DQO foi calculado conforme a Equação 2:

$$DQO = \frac{Br - Am \times Nsfa \times 8000}{Vam} \quad (2)$$

Onde:

Br = volume de sulfato ferroso amoniacal padronizado utilizado na titulação do branco;

Am = volume de sulfato ferroso amoniacal padronizado utilizado na titulação da amostra;

Nsfa (N2) = fator de correção da padronização do sulfato ferroso amoniacal;

V am = volume inicial de amostra;

O método utilizado para remoção dos poluentes foi o de aeração, coagulação e floculação, buscando a quantidade ideal de coagulante e do floculante utilizados. Na realização do experimento, foi utilizada a bancada de tratamento de água ou efluentes, processo físico - químico do Laboratório do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária.

Com o efluente coletado, dividiram-se as amostras, colocando 1000 mL de efluente bruto em beakers diferentes. Em cada becker foi realizado os devidos ensaios de coagulação/floculação em batelada investigando a melhor relação entre o efluente e as soluções coagulante e floculante. Durante a adição do coagulante e floculante, realizou-se medidas do pH, e também foram observadas as mudanças dos seguintes parâmetros: cor, turbidez e sólidos.

Selecionados os melhores ensaios, realizaram-se análises de DQO, pH, cor, turbidez e sólidos a fim de verificar qual teste obteve os melhores resultados.

3.4.2 Cálculo de eficiência de remoção de DQO

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um parâmetro utilizado para indicação da qualidade de água e efluente, correspondente à capacidade de consumo de oxigênio por oxidação química da matéria orgânica presente em uma amostra. Através do resultado da análise da DQO realiza-se o cálculo de eficiência da remoção, apresentado pela equação 3, no qual a resposta é dada em %.

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

3.5 TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO

Inicialmente fizeram-se os testes para averiguar a eficácia do tratamento físico-químico. Assim, realizaram-se diversos testes com diferentes coagulantes e floculantes, além de diferentes dosagens. Após, escolheram-se dois coagulantes que obtiveram melhor decantação (Sulfato de Alumínio e Policloreto de Alumínio) juntamente com o floculante (hidróxido de sódio). Em seguida, realizaram-se análises a fim de verificar a eficiência de remoção dos parâmetros, além disso analisaram-se também a quantidade de coagulante e floculante utilizados.

Na realização dos testes físico-químicos utilizou-se as dosagens das soluções em mL. Porém, após os testes, realizaram-se os cálculos para obter a concentração em mg/L. Para isso, utilizou-se a concentração dos coagulantes e do floculante utilizados, além da densidade de cada um, como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3- Concentração e densidade dos químicos utilizados

Coagulante/Floculante	Concentração	Densidade (g/cm ³)
Policloreto de Alumínio	18%	1,40
Sulfato de Alumínio	50%	2,67
Hidróxido de Sódio	50%	2,13

Fonte: Autoria própria, 2022.

Assim, multiplica-se a densidade pela quantidade de solução utilizada (mL), após faz-se a porcentagem da concentração, neste caso de 18% para o Policloreto de Alumínio, e 50% para o Sulfato de Alumínio e o Hidróxido de Sódio. Após realizar o cálculo da porcentagem de concentração, obtém-se o resultado em g/L, e por fim, multiplica-se por 1000 para termos o valor de concentração em mg/L.

3.6 TRATAMENTO POR SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Além do tratamento físico-químico, realizou-se o tratamento de separação por membranas. A membrana utilizada foi a de nanofiltração, disponível no laboratório de operações da faculdade de engenharia química da Universidade de Passo Fundo.

Após os testes executados, foram realizadas novamente análises físico-químicas, para verificar a comparação do efluente bruto com o efluente que passou pelo processo de tratamento por membranas.

3.6.1 Limpeza da membrana

Antes e após a utilização da membrana de nanofiltração, a mesma precisa ser lavada para que assim, se evite o *fouling*. O termo *fouling* inclui diferentes processos, tais como a deposição de substâncias na superfície da membrana, bloqueio total ou parcial dos poros, adsorção de macromoléculas na superfície da membrana, além de outros problemas que geram um aumento da resistência à permeação e conseqüentemente, uma queda do fluxo do permeado (HUISMAN *et al.*, 1998).

Para isso, antes e após a realização dos testes, fez-se a limpeza da membrana. Para as membranas de nanofiltração, conforme especificações do fabricante, foi adicionada uma solução de hidróxido de sódio em 30 litros de água no tanque de alimentação. Essa solução ficava recirculando por meia hora no sistema e, em seguida, era filtrada água limpa isenta de cloro para limpeza dos resíduos da solução. Logo após, era recirculada uma solução de ácido cítrico a pH 4, também por meia hora e, em seguida, filtrada água limpa isenta de cloro para limpeza dos vestígios da última solução.

3.6.2 Fluxo de permeado

O fluxo do permeado se dá em função das características da membrana, tais como espessura, tamanho dos poros, porosidade, entre outros, bem como a característica da solução a ser processada e das condições de operação. Ele representa a vazão do permeado por unidade de área da membrana. E se dá pela equação 4.

$$Jp = \frac{V}{A \times t} \quad (4)$$

Onde:

Jp= fluxo do permeado [L.m⁻².s⁻¹];

V= volume de permeado coletado [L];

A= Área permeável do modulo da membrana [m²];

T = tempo para coletar o permeado [s];

O fluxo do permeado foi realizado antes e após a passagem do efluente, para que fosse possível fazer a comparação antes e após o teste.

3.7 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Após a realização de todas as análises, e a verificação de todos os parâmetros, comparou-se a caracterização do efluente bruto com o efluente que recebeu tratamento, a fim de verificar se houve a remoção dos parâmetros. Além disso, os resultados também foram conferidos em estudos encontrados na literatura que abordam o reuso do efluente de cabine de pintura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO

Após as análises realizadas, obterem-se os resultados do efluente bruto, que podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4- Valores de caracterização do efluente bruto

Análise	Resultado
pH	7,7
DQO	2724,245 mg/L
SST	200 mg/L
Cor	120 µH
Turbidez	83 NTU

Fonte: Autoria própria, 2022.

Com a caracterização do efluente bruto pode-se perceber que o mesmo possui uma DQO elevada, sendo que a mesma está diretamente associada ao material solúvel ou coloidal, que por sua vez, também está associada ao teor de sólidos suspensos totais presentes na amostra de caracterização do efluente bruto.

4.2 REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA REUSO DO EFLUENTE

Como não há legislações ambientais para o reuso específico de efluente oriundo de cabine de pintura, realizaram-se os testes para que a obtenção dos melhores resultados possíveis. Como sabe-se, na obtenção do potencial de reuso de efluentes deve-se considerar, inicialmente, as atividades nas quais pode-se utilizar o efluente disponível, a demanda de água exigida e os requisitos de qualidade para a mesma. No caso da indústria estudada, a principal atividade com potencial para aplicação da prática de reuso do efluente seria para o próprio processo de cortina de água na cabine de pintura.

Através disto, o critério adotado para o reuso da água recuperado foi baseado em estudos da literatura. O estudo no qual comparou-se os parâmetros foi realizado segundo Airton (2007), que usa como critérios informações encontrados em literaturas (FLORENCIO, 2006; EPA 2004; METCALF, EDDY, 2003). As mesmas estão descritas na tabela abaixo.

Tabela 5- Requisitos indicados para reutilização de água recuperada

Parâmetros	Unidade	Valor
pH	-	6-8
Cor	µH	≤ 20
Turbidez	NTU	≤ 2
DQO	mg/L	≤ 50
SST	Mg/L	≤ 5

Fonte: Adaptado de Airton, 2007.

4.3 RESULTADOS DO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO

Após vários testes, selecionaram-se os que apresentaram melhor decantação visivelmente, sendo que o tipo de coagulante e floculante, bem como as respectivas dosagens se encontram na Tabela 6.

Tabela 6- Teste de amostragens com diferentes coagulantes e quantidades

Amostra	Coagulante	(mL)	Concentração (mg/L)	Floculante	(mL)	Quantidade (mg/L)
1	PAC	1	252	NaOH	0,1	106
2	PAC	0,5	126	NaOH	0,1	106
3	Al ₂ (SO ₄) ₃	1	1335	NaOH	1	1065
4	Al ₂ (SO ₄) ₃	0,5	667	NaOH	1	1065
5	PAC	1,3	327	NaOH	1,5	1597
6	PAC	0,7	176	NaOH	0,8	852
7	Al ₂ (SO ₄) ₃	1,3	1735	NaOH	1,5	1597
8	Al ₂ (SO ₄) ₃	0,7	934	NaOH	0,8	852

Fonte: Autoria própria, 2022.

Após a execução dos testes, foram realizadas as análises a fim de obter qual a melhor concentração e o melhor tipo de coagulante para remoção dos parâmetros acima mencionados. Os resultados podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7- Resultados dos parâmetros obtidos em cada análise

Amostra	pH	Valor DQO (mg/L)	Turbidez (NTU)	Cor (µH)	SST (mg/L)
1	7,30	1321,5488	15	20	100
2	7,69	1460,6592	15,2	20	144
3	6,78	695,178667	2,7	15	-
4	7,03	1275,178667	10,1	5	34
5	7,30	571,1701	12,1	15	-
6	7,69	990,80533	18,7	15	20
7	6,78	349,696	2,0	5	-
8	7,03	839,2704	7,0	10	-

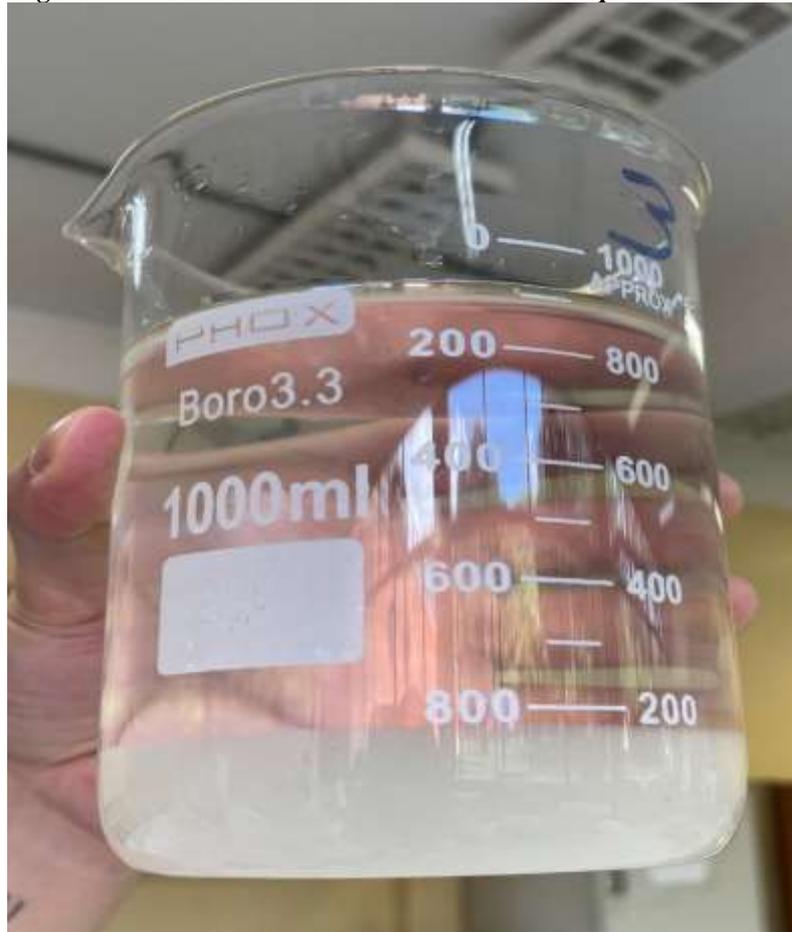
Fonte: Autoria própria, 2022.

Quando comparadas as análises com o efluente bruto todas as amostras apresentaram redução os parâmetros. Como pode-se observar, a amostra 3, obteve 74% de eficiência de remoção de DQO. Já, a amostra 7 apresentou 87% de redução em DQO, além disso os demais

parâmetros também mostraram resultados efetivos. Enquanto a amostra 5 também apresentou uma redução significativa para DQO, tendo 79% de remoção.

Além disto, as amostras também apresentaram redução nos parâmetros de turbidez, cor e sólidos suspensos totais, sendo que nas amostras 3,5,7 e 8, não obteve-se mais resultados nas análises de sólidos, indicando que os tratamentos possuíram uma boa decantação.

Figura 7- Amostra da análise do tratamento físico-químico



Fonte: Autoria própria, 2022.

A amostra 7 foi a que apresentou os melhores resultados, se comparada as outras análises, indicando que o Sulfato de Alumínio na concentração de 1735 mg/L, traz excelente redução em todos os parâmetros.

Quando comparados os valores de efluentes tratados pelo tratamento físico-químico com a tabela 5 (requisitos indicados para reuso do efluente), tem-se que a análise 3 possui os parâmetros de pH e cor dentro dos comparados com a literatura, enquanto a turbidez está 0,7 NTU acima. Já a amostra 7 também ficou dentro dos parâmetros se comparados com a literatura, incluindo a turbidez. Em ambas as análises, verificou-se que não obteve-se mais sólidos suspensos.

Pode-se observar que a DQO em todas análises manteve-se acima do valor buscado na literatura e comparado para estes parâmetros. Porém, por tratar-se deste tipo de reuso, não há legislações estaduais e federais que indiquem que os valores de DQO obtidos sejam restritivos quando ao reuso do efluente. Além disso, a EPA que foi usada como base no trabalho, também não traz informações de valores para este efluente.

Porém, dependendo do estado, a EPA indica que a água recuperada produzida pelas instalações industriais não é obrigada a atender a critérios de reutilização se a mesma for usada em um processo que não há acesso público (EPA, 2012), o que também indica que o valor de DQO não é um impeditivo para o reuso. Tendo em vista que ocorreu uma redução significativa no valor da DQO, podendo alcançar 87% de remoção, conclui-se que os valores para demanda química de oxigênio também mostram redução eficazes, não acarretando problemas no reuso do efluente.

4.4 RESULTADOS DOS TESTES COM MEMBRANA DE NANOFILTRAÇÃO

Além do tratamento físico-químico também realizaram-se análises para averiguar a viabilidade técnica do tratamento por membrana de nanofiltração. Para este tratamento adotou-se pressão constante de 5 bar, pois é considerada a pressão ideal de trabalho da membrana utilizada, uma vez que pressões muito altas podem tender a causar incrustações e prejudicar a membrana.

Inicialmente calculou-se o fluxo do permeado. O mesmo foi calculado conforme a fórmula 4, levando em consideração a área da membrana. O fluxo foi calculado com permeado no antes do teste e pode ser observado na fórmula 5.

$$Jp = \frac{2L}{34m^2 \times 6,163s} \quad (5)$$

$$Jp = 0,009544 \text{ L. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Após isto, iniciaram-se os testes com efluente. Inicialmente mediu-se o fluxo, a vazão e a temperatura. Após, realizou-se a correção do fluxo com relação a temperatura. Onde, através da temperatura, é possível achar o fluxo. Após, multiplica-se o valor do fluxo pela vazão (m³/h), e então obtém-se a correção do fluxo. Esta correção foi realizada com o auxílio de uma tabela

dos fatores de correção da temperatura para o fluxo de permeado com água, disponível no laboratório de operações, onde realizou-se os testes. Os valores encontram-se na tabela 8.

Tabela 8- Característica da nanofiltração conforme o fluxo para o teste 1 com membranas

Fluxo	Pressão (Bar)	Vazão (m ³ /h)	Temperatura medida (°C)	Correção do fluxo (m ³ /h)
Água (1 minutos)	5	1,16820 m ³ /h	20,0	1,3142
Efluente Inicial (10 minutos)	5	1,183 m ³ /h	21,2	1,2989
Efluente (30 minutos)	5	1,3645 m ³ /h	24,1	1,3958
Efluente final (40 minutos)	5	1,5179	25	1,5179

Fonte: Autoria própria, 2022.

Como pode-se observar, a vazão (m³/h) foi aumentando conforme o tempo do efluente na membrana, sendo que no tempo final a vazão foi de 1,5179 m³/h. Além disso, também pode-se averiguar o aumento da temperatura com o funcionamento da membrana.

No total a membrana manteve-se em funcionamento por cerca de 40 minutos e durante este tempo realizaram-se diferentes coletas, sendo que a coleta do efluente tratado foi realizado após estes 40 minutos de funcionamento, para que posteriormente foram realizadas as análises.

Tabela 9- Valores obtidos para as análises no teste 1 com nanofiltração

Análises	pH	DQO (mg/L)	Cor (uH)	Turbidez (NTU)
Efluente bruto	7,6	494,567	30	25
Tratado (30 minutos)	6,70	191,1008	5	0,30
Tratado final (40 minutos)	6,68	111,104	3	0,15
Concentrado final	6,80	405,5296	15	0,65
Rejeito final	6,88	449,9712	15	0,66

Fonte: Autoria própria, 2022.

Em cada parte do processo da membrana foram retiradas amostras do efluente, a fim de verificar a diferença entre as mesmas. Como pode-se observar o efluente tratado final que ficou cerca de 40 minutos na membrana, foi o que obteve os melhores resultados se comparado ao efluente bruto.

Se os parâmetros forem comparados com a tabela 5 (requisitos indicados para reutilização de água), tem-se que todos os parâmetros ficam dentro dos limites estabelecidos para pH, cor, turbidez. Vale ressaltar que não obteve-se resultados significantes para análises de sólidos suspensos totais, indicando que os mesmos ficaram retidos na membrana de nanofiltração.

Os testes com a membrana de nanofiltração foram realizadas em duas etapas, para garantir a eficácia dos resultados, sendo que nesta o tempo de funcionamento da mesma foi somente de 35 minutos. A pressão manteve-se constante em 5 bar, os demais valores podem ser identificados na tabela 10.

Tabela 10- Característica da nanofiltração conforme o fluxo para o teste 2 com membranas

Fluxo	Pressão (Bar)	Vazão (m³/h)	Temperatura (°C)	Correção do fluxo (m³/h)
Água	5	1,16820 m³/h	20,1	1,3142
Efluente Inicial	5	1,1832 m³/h	21,8	1,2683
Efluente (após 20 min)	5	1,2926 m³/s	23	1,3533
Efluente final (após 35 min)	5	1,4594 m³/s	24	1,4929

Fonte: Autoria própria, 2022.

Como pode-se observar, novamente houve um aumento da temperatura e da vazão conforme o aumento no tempo de funcionamento da membrana. A tabela 11 apresenta os parâmetros analisados, bem como os respectivos valores dos mesmos.

Tabela 11- Valores obtidos para as análises no teste 2 com nanofiltração

Análises	pH	DQO (mg/L)	Cor (uH)	Turbidez (NTU)
Efluente bruto	7,7	687,234	25	30
Tratado (10 minutos)	7,13	433,2992	10	0,47
Tratado final (35 minutos)	6,90	222,308	5	0,40
Concentrado final	6,99	616,6272	5	0,74
Rejeito final	6,73	666,624	25	1,80

Fonte: Autoria própria, 2022.

O efluente tratado final foi o que obteve os melhores resultados se comparado ao efluente bruto.

Se os parâmetros forem comparados com a tabela 5 (requisitos mínimos para reutilização de água), tem-se que os parâmetros para pH e turbidez ficam de acordo com os comparados pela literatura. Já, para cor o rejeito final fica acima de 20 que seria o ideal para reuso, porém isto não seria impeditivo, uma vez que o reuso seria feito do efluente tratado e este estaria dentro em todos parâmetros.

Como visto, em todas as análises o padrão de DQO ficou acima se comparado aos dados de literatura, porém isto não é impeditivo de reuso, uma vez que não são identificados valores máximos para de DQO para reuso, e que tanto no tratamento físico-químico como no tratamento por nanofiltração obteve-se resultados positivos na remoção da mesma.

Ainda, após a realização de todos os testes, calculou-se novamente o fluxo do permeado, para realizar a comparação dos resultados antes e após a passagem do efluente pela membrana.

$$Jp = \frac{2L}{34m^2 \times 6,246s} \quad (6)$$

$$Jp = 0,00941 \text{ L. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Se comparados o valor do fluxo de permeado antes e após o tratamento, tem-se um valor muito parecido. Pois antes da passagem do efluente pela membrana o fluxo era de $0,0095 \text{ L.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, e após a passagem do efluente o fluxo é de $0,0094 \text{ L.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, indicando assim, que o efluente não prejudicou a membrana, que encontra-se com o mesmo fluxo antes e após a filtração do efluente.

5 CONCLUSÕES

Através do trabalho exposto, das análises realizadas e dos resultados obtidos, conclui-se que tanto o tratamento físico-químico, quanto o tratamento por nanofiltração apresentaram redução dos parâmetros averiguados.

Para o tratamento por flocculação tem-se que a dosagem o coagulante Sulfato de Alumínio é a que apresenta melhor resultado, com uma remoção de DQO de cerca de 87%. Já, para a membrana de nanofiltração a amostra que obteve melhor resultado foi a amostra que ficou cerca de 40 minutos na membrana de nanofiltração, obtendo os melhores valores de redução em todos parâmetros.

Sendo assim, tem-se que realizar o reuso do efluente na própria cabine de pintura é viável tecnicamente, uma vez que ambos tratamentos apresentam a viabilidade do reuso. Além disso, aplicando estas técnicas consequentemente ocorrerá a diminuição da borra de lodo que ocorre em excesso, prejudicando a operação da cabine e requerendo alto tempo de limpeza.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisando-se a literatura em geral, atualmente já foram elaborados estudos para reaproveitar a própria tinta nestas cabines de pintura, através do processo de separação por membranas, utilizando a ultrafiltração. Como sugestão pode-se realizar ensaios utilizando a ultrafiltração a fim de reusar a própria tinta solúvel e evitar desperdícios.

Além disso, para obter melhores resultados na redução de parâmetros, pode-se realizar um tratamento físico-químico, seguido de nanofiltração. Assim, pode-se obter ainda maior remoção em todos os parâmetros.

Por fim, pode-se testar a remoção dos parâmetros por outra membrana de separação, como por exemplo, a membrana de osmose inversa, que possui características parecidas com a nanofiltração, e que também pode resultar em uma boa capacidade de desempenho.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Alice. **Nanofiltration and reverse osmosis evaluation in gold acid mine drainage treatment aiming water reuse**. 2015. 97f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio ambiente e Recursos hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- BAGGIO, C. **Membranas no tratamento e reciclagem de efluentes industriais – estudos de casos**: apresentação oral. Trabalho apresentado no 7º - Curso de Extensão Internacional em Meio Ambiente – PPGMAUI, Alemanha: Universität Stuttgart, ISWA, 2015.
- BICUDO, Carlos E. M.; TUNDISI, José Galizia; SCHEUENSTUHL, Marcos C. Barnsley. **Águas do Brasil: análises estratégicas**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010. 224p. Disponível em: <http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-6820.pdf>. Acesso em: 23 fev. 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.
- CASAGRANDE, Cíntia. **Análise dos riscos ambientais na operação de pintura em cabine da natreb indústria e comércio de máquinas LTDA**. 2014. 68f. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, 2014.
- CAVALCANTI, José. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. 2. ed. 2012.
- CONAMA. Conselho Nacional Do Meio Ambiente. **Resolução nº. 357**. 2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 23 fev. 2022.
- CONSEMA, Conselho Estadual Do Meio Ambiente. **Resolução nº. 355**. 2017. Disponível em: http://www.laboratoriogreenlab.com.br/images/pdf_gerais/Consema_355-2017.pdf. Acesso em: 23 fev. 2022.
- CÔRTEZ, Rafael. **Avaliação de riscos de segurança em uma cabine de pintura automotiva utilizando princípios do método fmea**. 2015. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17592/1/CT_CEEEST_XXX_2015_32.pdf. Acesso em: 23 fev. 2022.
- FORTINO, Patricia. **Pós-tratamento de efluente têxtil usando coagulação/floculação combinado com processo de separação por membranas**. 2012. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- HABERT, Alberto; BORGES, Cristiano Piacsek; NOBREGA, Ronaldo. **Processos de separação por membranas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2006. 180p. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/231989298/HABERT-Processos-de-Separacao-Por-Membranas-UNLOCKED>. Acesso em: 23 fev. 2022.

HANSEN, Everton; RODRIGUES, Marco Antônio Siqueira; AQUIM, Patrice Monteiro. Wastewater reuse in a cascade based system of a petrochemical industry for the replacement of losses in cooling towers. **Revista de Gestão Ambiental**, v. 181, p. 157-162, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971630353X>. Acesso em: 25 fev. 2022.

MOREIRA, Marcelo Felipe. **Análise de instalação de uma cabine de pintura com sistemas de exaustão para empresas de funilaria com demanda reduzida**. 2018. 36f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2018.

NÓBREGA, Romerito Moraes. **Eficiência de membranas filtrantes de nanofiltração e osmose inversa no pós-tratamento de esgoto doméstico**. 2016. 48f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

OENNING JUNIOR, Airton; PAWLOWSKI, Urivald. Avaliação de tecnologias avançadas para reuso de água na indústria mecânica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 3, p. 305-316, 2007. Disponível em: http://old.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522007000300010&script=sci_abstract&tlng=en. Acesso em: 29 maio 2022.

PERCIVAL, Robert. *et al.* Environmental Regulation. **Law, Science and Policy**, 7. ed. New York: Wolters Kluwer Law & Business.

RICHTER, Carlos A. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. 1991.

RODRIGUES, Cristiane Oliveira; KULZER, Bruna Natasha. Geração e processos físico-químicos de efluentes líquidos contendo pigmentos. **Holos Environment**, v. 16, n. 1, 2016. Disponível em: <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/10166/>. Acesso em: 23 fev. 2022.

SANTOS, André. *et al.* Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. **Tecnologia de biorecursos**, v. 98, p. 2369-2385, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852406006043>. Acesso em: 25 fev. 2022.

SANTOS, Anselmo. **Caracterização e tratabilidade dos efluentes gerados em cabines de pintura de indústria moveleira**. 2008. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

SANTOS, Samuel. *et al.* Reúso de água: estudo de caso em uma fábrica de cabines de caminhões. **Revista DAE**, n. 217, v. 67, 2019. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_217_n_1780.pdf. Acesso em: 22 fev. 2022.

SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. 2005.

STREIT, Katia. **Estudo de aplicação de processo de separação com membranas no tratamento de efluentes de curtume, nanofiltração e eletrodialise**. 2011. 182f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TUNDISI, José. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. Estudos **Avançados**, v. 22, n. 63, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/7gyMPtTzfkYfWwsMHqVLTqm/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 23 fev. 2022.

WANG, Zhi. *et al.* Study of integrated membrane systems for the treatment of wastewater from cooling towers. **Dessalinização**, v. 191, p. 117-124, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916406001731>. Acesso em: 25 fev. 2022.

YUJIANG, Xia. *et al.* Performance analysis of electroplating wastewater treatment system combining air compression expansion cycle with spray drying tower. **Engenharia Térmica Aplicada**, v. 184, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431120337364>. Acesso em: 25 fev. 2022.