

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
(CEFET-MG)**

**Fernanda Alves Silva**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE PERMEADO OBTIDO DE PROCESSOS DE  
SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS APLICADOS A EFLUENTES DE  
LAVANDERIA DE *JEANS* VISANDO REÚSO DA ÁGUA**

**Belo Horizonte (MG)**

**2025**

**Fernanda Alves Silva**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE PERMEADO OBTIDO DE PROCESSOS DE  
SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS APLICADOS A EFLUENTES DE  
LAVANDERIA DE *JEANS* VISANDO REÚSO DA ÁGUA**

**Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como requisito parcial  
para a obtenção do título de Bacharel  
em Química Tecnológica.**

**Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Patricia Sueli de  
Rezende**

**Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luzia  
Sergina de França Neta**

**CEFET-MG**

**Belo Horizonte (MG)**

**2025**

**Fernanda Alves Silva**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE PERMEADO OBTIDO DE PROCESSOS DE  
SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS APLICADOS A EFLUENTES DE  
LAVANDERIA DE *JEANS* VISANDO REÚSO DA ÁGUA**

**Trabalho de conclusão de curso do Bacharelado  
em Química Tecnológica  
CEFET-MG**

**Belo Horizonte, 07 de fevereiro de 2025**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Patricia Sueli de Rezende  
(orientador – CEFET-MG)**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luzia Sergina de França Neta  
(co-orientadora – CEFET-MG)**

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Lucilaine Valéria de Souza Santos  
(avaliadora – CEFET-MG)**

**Prof. Ms. Reginaldo Ferreira de Oliveira  
(avaliador – CEFET-MG)**

“Um cientista no seu laboratório não é apenas um técnico: é, também, uma criança colocada à frente de fenômenos naturais que impressionam como se fossem um conto de fadas”

*(Marie Curie)*

## RESUMO

**SILVA. F.A.; REZENDE. P.S.; NETA.L.S.F.**

### **Avaliação da qualidade de permeado obtido de processos de separação por membranas aplicados a efluentes de lavanderia de *jeans* visando reúso da água**

A crescente escassez de recursos hídricos e o aumento de exigências ambientais nos últimos anos demandam soluções tecnológicas inovadoras para a gestão e reutilização da água em processos industriais. Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a eficiência de sistemas integrados de Ultrafiltração (UF) e Osmose Inversa (OI) na remoção de contaminantes presentes em efluentes de lavanderias de *jeans*, visando sua reutilização de maneira segura e sustentável. O estudo considera os impactos ambientais gerados pelo setor têxtil, que se destaca pelo elevado consumo hídrico e pela geração de efluentes com alto potencial poluidor. Foram realizadas 3 amostragens em dias diferentes para obtenção de amostras de efluentes em diferentes etapas do processo industrial. As amostras devidamente armazenadas seguiram para os testes laboratoriais de caracterização e permeação pelos sistemas UF e OI. Entre os parâmetros estudados, contemplou-se a determinação de ânions empregando a técnica instrumental de cromatografia iônica. A UF foi aplicada como etapa preliminar, com ênfase na remoção de turbidez e sólidos suspensos totais (SST), enquanto a OI foi empregada para remoção de compostos dissolvidos, como íons divalentes e monovalentes, e, surfactantes. Os resultados indicaram elevada eficiência da conjugação dos processos, com redução das concentrações dos parâmetros estudados superiores a 90%, incluindo a eliminação completa de Demanda Química de Oxigênio (DQO), cor verdadeira e aparente, e a redução significativa de sólidos dissolvidos totais (SDT). A eficiência do sistema foi comprovada mesmo diante de variações nas características das amostras coletadas, demonstrando a robustez do método aplicado. Além disso, o permeado final atendeu às normas de reúso vigentes, tornando-o adequado para aplicações como reúso de água não potável, com potencial de ser utilizado também na lavagem de tecidos em diferentes partes do processo produtivo. O estudo também ressaltou os benefícios econômicos e ambientais da adoção dessas tecnologias, promovendo um ciclo produtivo mais limpo e eficiente. A integração entre UF e OI demonstrou ser uma solução tecnicamente viável para a reutilização de água em conformidade com as exigências regulatórias, contribuindo diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, 9 e 12, que visam a conservação de recursos hídricos, inovações na indústria e a produção responsável.

**Palavras-chave:** efluentes têxteis, lavanderia de *jeans*, reúso de água, ultrafiltração, osmose inversa.

## ABSTRACT

**SILVA, F.A.; REZENDE, P.S.; NETA, L.S.F.**

**Evaluation of the quality of permeate obtained from separation processes by separation processes applied to *jeans* laundry effluents with a view to water reuse**

The growing scarcity of water resources and the increase in environmental requirements in recent years demand innovative technological solutions for the management and reuse of water in industrial processes. The general aim of this work is to evaluate the efficiency of integrated Ultrafiltration (UF) and Reverse Osmosis (RO) systems in removing contaminants from *jeans* laundry effluents, with a view to their safe and sustainable reuse. The study takes into account the environmental impacts generated by the textile sector, which is notable for its high water consumption and the generation of effluents with a high polluting potential. Three samples were taken on different days to obtain effluent samples from different stages of the industrial process. The duly stored samples were sent for laboratory characterization and permeation tests using the UF and OI systems. The parameters studied included the determination of anions using the instrumental technique of ion chromatography. UF was applied as a preliminary stage, with emphasis on removing turbidity and total suspended solids (TSS), while OI was used to remove dissolved compounds, such as divalent and monovalent anions, and surfactants. The results indicated efficiencies of over 90% in the removal of the parameters studied, including the complete elimination of Chemical Oxygen Demand (COD), true and apparent color, and a significant reduction in total dissolved solids (TDS). The efficiency of the system was proven even in the face of variations in the characteristics of the samples collected, demonstrating the robustness of the method applied. In addition, the final permeate met current reuse standards, making it suitable for applications such as the reuse of non-potable water, with the potential to also be used for washing fabrics in different parts of the production process. The study also highlighted the economic and environmental benefits of adopting these technologies, promoting a cleaner and more efficient production cycle. The integration of UF and OI proved to be a technically viable solution for reusing water in compliance with regulatory requirements, contributing directly to Sustainable Development Goals (SDGs) 6, 9 and 12, which aim to achieve conservation, innovations in industry and responsible production responsible.

**Keywords:** water reuse, ultrafiltration, reverse osmosis, industrial sustainability, effluent treatment.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1: Processo produtivo de uma indústria têxtil</b>	15
<b>Figura 2: Consumo de água na produção de uma calça <i>jeans</i></b>	17
<b>Figura 3: Efluente gerado pelos processos de lavagens de <i>jeans</i></b>	19
<b>Figura 4: Lodo do tratamento de efluentes de Lavanderia de <i>jeans</i></b>	21
<b>Figura 5: Estrutura molecular do corante Índigo blue</b>	22
<b>Figura 6: Tipos de membranas e retenção de compostos</b>	30
<b>Figura 7: Diagrama esquemático do sistema de ultrafiltração</b>	34
<b>Figura 8: Sistema de ultrafiltração em escala laboratorial</b>	34
<b>Figura 9: Módulo de permeação de ultrafiltração e seção transversal do módulo de permeação.</b>	35
<b>Figura 10: Diagrama esquemático do sistema de Osmose Inversa</b>	35
<b>Figura 11: Sistema de Osmose Inversa utilizado</b>	36
<b>Figura 12: Fotomicrografias da seção transversal da fibra oca: a) transição da superfície macroporosa (1) para uma superfície esponjosa (2) aumento de 12.000x; b) superfície esponjosa com aumento de 12.000x</b>	37
<b>Figura 13: Cromatógrafo DIONEX INTEGRION HPIC</b>	39
<b>Figura 14: Gráfico de compactação da membrana de ultrafiltração</b>	41
<b>Figura 15: Fluxo permeado em função da pressão para determinação da permeabilidade hidráulica da membrana de UF</b>	42
<b>Figura 16: Gráfico de Compactação da membrana de Osmose Inversa</b>	43
<b>Figura 17: Fluxo permeado em função da pressão para determinação da permeabilidade hidráulica da membrana de OI.</b>	44
<b>Figura 18: Amostra 1 - Comparação entre 1) Efluente bruto, 2) Permeado da UF e 3) Permeado da UF+OI</b>	45
<b>Figura 19: Amostra 2 - Comparação entre 1) Efluente bruto, 2) Permeado da UF e 3) Permeado da UF+OI</b>	46
<b>Figura 20: Amostra 3- Comparação entre 1) Efluente bruto, 2) Permeado da UF e 3) Permeado da UF+OI</b>	46
<b>Figura 21: Remoção percentual dos parâmetros avaliados nas amostras de efluente de lavanderia de <i>jeans</i> empregando UF e UF+OI</b>	52

<b>Figura 22: Remoção percentual dos íons cloreto, sulfato e ortofosfato na Amostra 1 de efluente de lavanderia de jeans empregando UF e UF+OI</b>	55
<b>Figura 23: Remoção percentual dos íons cloreto e sulfato na Amostra 2 de efluente de lavanderia de <i>jeans</i> empregando UF e UF+OI</b>	55
<b>Figura 24: Remoção percentual dos íons cloreto, sulfato e ortofosfato na Amostra 3 de efluente de lavanderia de jeans empregando UF e UF+OI</b>	56
<b>Figura 25: Cromatograma do Branco analisado (Água Ultra pura)</b>	71
<b>Figura 26: Cromatograma do padrão de referência (Specsol)</b>	71
<b>Figura 27: Amostra 1 - Efluente Bruto</b>	71
<b>Figura 28: Amostra 1 - Permeado da UF</b>	72
<b>Figura 29: Amostra 1 - Permeado da UF+OI</b>	72
<b>Figura 30: Amostra 2 - Efluente Bruto</b>	72
<b>Figura 31: Amostra 2 - Permeado da UF</b>	73
<b>Figura 32: Amostra 2 - Permeado da UF+OI</b>	73
<b>Figura 33: Amostra 3 - Efluente Bruto</b>	73
<b>Figura 34: Amostra 3 - Permeado da UF</b>	74
<b>Figura 35: Amostra 3 - Permeado da UF+OI</b>	74

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Parâmetros físico-químicos medidos na Amostra 1 bruta e em seus permeados UF e UF+OI	47
Tabela 2: Parâmetros físico-químicos medidos na Amostra 2 bruta e em seus permeados UF e UF+OI	48
Tabela 3: Parâmetros físico-químicos medidos na Amostra 3 bruta e em seus permeados UF e UF+OI	49
Tabela 4: Parâmetros de qualidade da água para uso na indústria têxtil	58
Tabela 5: Análise físico-química da água da COPASA	59
Tabela 6: Parâmetros Físico-químico dos permeados encontrados na literatura	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento
CETESB	Centro Tecnológico de Saneamento Básico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EDTA	<i>Ethylenediaminetetraacetic acid</i> (ácido etilenodiamino tetra-acético)
HIPC	<i>High Pressure Ion Chromatography</i>
IEA	Agência Internacional de Energia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NF	Nanofiltração
OI	Osiose inversa
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PA	Poliamida
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNRS	Política Nacional de Recursos Hídricos
POAs	Processos Oxidativos Avançados
PSM	Processo de Separação por Membranas
PVC	Policloreto de Vinila
PVDF	Fluoreto de polivinilideno
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SNGRA	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNGRH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
UF	Ultrafiltração

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2.OBJETIVOS</b>	<b>14</b>
<b>3.REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>15</b>
<b>3.1.Indústria têxtil e geração de efluentes líquidos</b>	<b>15</b>
<b>3.1.1.A lavanderia de <i>jeans</i></b>	<b>17</b>
<b>3.1.2.Tratamento convencionais de efluentes</b>	<b>20</b>
<b>3.2.Reúso de água</b>	<b>23</b>
<b>3.2.1.Legislação de reúso no Brasil</b>	<b>26</b>
<b>3.3.Tecnologias Emergentes em ETEs industriais</b>	<b>28</b>
<b>3.3.1. Processo de Separação por Membranas</b>	<b>29</b>
<b>3.3.1.1.Membranas de Ultrafiltração</b>	<b>30</b>
<b>3.3.1.2.Membranas de Osmose inversa</b>	<b>31</b>
<b>4.METODOLOGIA</b>	<b>33</b>
<b>4.1.Amostragem</b>	<b>33</b>
<b>4.2.Procedimento operacional</b>	<b>33</b>
<b>4.2.1.Montagem e operação do sistema de filtração</b>	<b>33</b>
<b>4.2.2.Determinação da permeabilidade hidráulica das membranas</b>	<b>36</b>
<b>4.2.3.Caracterização do efluente</b>	<b>37</b>
<b>4.2.3.1.Demanda Química de Oxigênio (DQO)</b>	<b>37</b>
<b>4.2.3.2.Cor, pH, condutividade e turbidez</b>	<b>38</b>
<b>4.2.3.3.Determinação da concentração dos ânions</b>	<b>38</b>
<b>4.2.3.4.Série de sólidos</b>	<b>39</b>
<b>4.2.3.5.Determinação de surfactantes aniônicos</b>	<b>39</b>
<b>4.2.3.6.Determinação da dureza total das amostras</b>	<b>40</b>

<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>41</b>
<b>5.1. Permeabilidade hidráulica</b>	<b>41</b>
<b>5.1.1. Membranas de Ultrafiltração</b>	<b>41</b>
<b>5.1.2. Membrana de Osmose Inversa</b>	<b>43</b>
<b>5.2. Avaliação da Qualidade do permeado</b>	<b>44</b>
<b>5.2.1. Análise sensorial</b>	<b>44</b>
<b>5.2.2. Análises Físico-Químicas</b>	<b>47</b>
<b>5.2.3. Avaliação da viabilidade de Reúso da água tratada pelo sistema integrado UF e OI na indústria parceira</b>	<b>57</b>
<b>6.CONCLUSÃO</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>71</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria têxtil destaca-se como uma das principais consumidoras de água e geradoras de efluentes industriais, especialmente no segmento das lavanderias de *jeans*, também conhecida como beneficiamento, a qual é uma etapa da produção do *jeans* em que há elevado consumo hídrico e pela geração de efluentes com alto potencial poluente. Estima-se que o setor seja responsável por aproximadamente 20% da poluição global da água, com destaque para os processos de tingimento e tratamento de tecidos, considerando as proporções e consequências dos danos causados (Li *et al.*, 2021; Ji *et al.*, 2021). Segundo Levi Strauss & Co. (2009), cada calça *jeans* produzida consome de 3.000 a 11.000 litros de água ao longo de seu ciclo de vida, considerando desde o cultivo do algodão até os processos de lavanderia.

A crescente demanda mundial por recursos hídricos, impulsionada pelo aumento populacional e pela intensificação da industrialização, tem tornado a gestão eficiente da água uma questão crítica e urgente. No Brasil, existe uma crescente integração da política de reúso de água com a Política Nacional de Recursos Hídricos, promovendo o manejo integrado e a cooperação entre diferentes esferas governamentais e privadas. A Lei Federal 9.433 de 8 de janeiro de 1997, conhecida como Lei das Águas, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, na qual foram estabelecidas as bases para a administração sustentável de utilização dos recursos hídricos e, embora não trate especificamente do reúso, incentiva práticas que priorizem a conservação e o uso racional (Costa e Rocha, 2019).

Os tratamentos convencionais utilizados nas lavanderias de *jeans*, como os processos físico-químicos e biológicos, têm se mostrado insuficientes para alcançar a qualidade necessária da água para reúso, especialmente no caso de águas coloridas. Embora sejam eficientes na redução da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), esses métodos apresentam baixa eficácia na remoção de sais e na descoloração. Os corantes presentes nesses efluentes representam um grande desafio, devido à sua estrutura complexa, alta massa molecular e baixa biodegradabilidade, o que dificulta sua remoção por esses processos (Kim *et al.*, 2004). Além disso, o uso intensivo de coagulantes nesses tratamentos não só eleva os custos, mas também gera impactos ambientais significativos (Verma *et al.*, 2012).

A redução do consumo de água e o cumprimento de regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas representam desafios significativos para a indústria têxtil. Nesse cenário, tecnologias emergentes, como os processos de separação por membranas, têm se destacado como algumas das soluções promissoras para a gestão de efluentes industriais. Membranas de ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI) apresentam capacidade de remover contaminantes como corantes e metais, possibilitando a reutilização da água tratada nos próprios processos produtivos. Isso promove maior sustentabilidade no setor têxtil, ao mesmo tempo em que reduz a dependência de produtos químicos e a geração de resíduos (Li *et al.*, 2021; Alvarenga, 2009). Além disso, essas tecnologias contribuem para um ciclo produtivo mais limpo e eficiente (Ji *et al.*, 2021; Couto, 2016).

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência da associação de processos de separação por membranas por ultrafiltração e por osmose inversa no processamento de efluentes oriundos de lavanderias de jeans, com foco na remoção de contaminantes e na viabilidade do reúso da água tratada em conformidade com as normas ambientais e industriais vigentes. Pretende-se não apenas verificar a eficácia dessas tecnologias, mas também fomentar a adoção de práticas mais sustentáveis na indústria têxtil, alinhadas aos regulamentos de reutilização de água e à necessidade de aprimorar a gestão de recursos hídricos no setor, contribuindo para a implementação de ações que levem à redução da pegada hídrica nesse setor.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

- Avaliar a eficiência dos processos de separação por membrana por ultrafiltração e por osmose inversa na remoção de poluentes presentes nos efluentes de lavanderia de *jeans*.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Verificar por meio da caracterização em cada etapa de tratamento se o permeado obtido atende aos padrões de qualidade exigidos para o reúso da água em lavanderias de *jeans*.
- Avaliar a remoção dos íons cloreto, sulfato e ortofosfato utilizando cromatografia iônica.

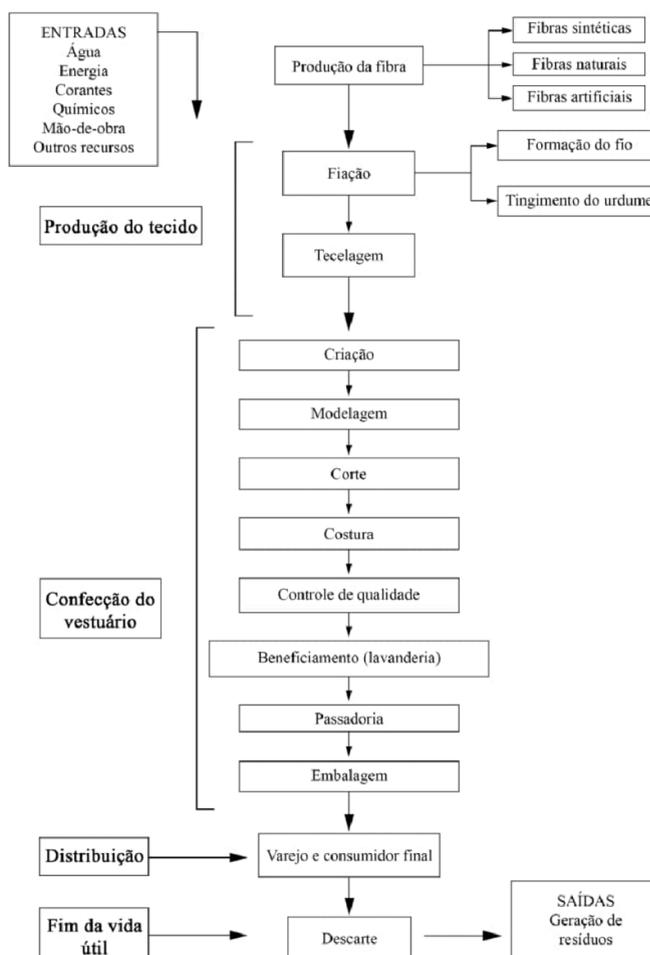
### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1. Indústria têxtil e geração de efluentes líquidos

O setor têxtil brasileiro desempenha um papel essencial na economia do país, gerando um faturamento expressivo de R\$ 203,9 bilhões em 2023. Ele é responsável por mais de 1,3 milhões de empregos diretos e cerca de 8 milhões de empregos indiretos, com grande parte desses postos ocupados por mulheres (ABIT, 2024). Além disso, o Brasil se destaca globalmente como um dos maiores produtores de vestuário e têxteis, sendo referência em peças como jeans, moda praia e lingerie (ABIT, 2024).

O processo produtivo da indústria têxtil é complexo, abrangendo várias etapas que se interligam, desde a produção da matéria-prima até o produto final, como mostrado na Figura 1.

**Figura 1: Processo produtivo de uma indústria têxtil**



Fonte: Wnchholz, 2023

Em termos gerais, este ciclo inicia-se com o fornecimento das fibras têxteis, as quais podem ser naturais (exemplo: algodão), artificiais (exemplo: viscose) e sintéticas (exemplo: poliéster). Após a produção da fibra, segue-se o processo de fiação, onde as fibras são transformadas em fios e, em seguida, a tecelagem, levando ao tecido. Após estas etapas, segue o acabamento, o tingimento e as operações de beneficiamento, que conferem características específicas às peças. Finalmente, estas são modeladas, cortadas, costuradas, passam pelo controle de qualidade, para em seguida serem embaladas e distribuídas (Wnchholz, 2023). No que diz respeito à produção de jeans, o tecido denim utilizado é confeccionado a partir de algodão e é submetido a um processo de tingimento específico com o corante Índigo Blue. Aplica-se esse processo de tingimento para apresentar a coloração característica da peça e acabamentos finais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017).

A indústria têxtil é uma das principais consumidoras de água no setor industrial, além de ser responsável pela geração de grandes volumes de efluentes com características químicas complexas. Durante a produção, uma parte significativa dos corantes utilizados, cerca de 10%, não se fixa adequadamente às fibras e acaba sendo descartada, contribuindo para a poluição de cursos d'água e agravamento de muitos impactos ambientais negativos (Chen; Li; Gu, 2011).

Os efluentes têxteis contêm corantes, sólidos suspensos, compostos orgânicos variados e contaminantes inorgânicos, sendo que alguns podem apresentar elevada toxicidade, afetando diretamente os ecossistemas aquáticos, dificultando processos fotossintéticos e impactando na fauna e flora locais. A presença de corantes resistentes, conhecidos como recalcitrantes, agrava ainda mais os desafios no tratamento dessas águas. Pesquisas destacam que tecnologias avançadas, como os processos de oxidação química, têm potencial para mitigar esses efeitos, promovendo práticas mais sustentáveis (Carvalho, 2020).

Considerando estes desafios, nos países em desenvolvimento, a ausência de fiscalização rigorosa e o descarte inadequado de efluentes tornam a situação ainda mais crítica. A implementação de regulamentações ambientais e a adoção de tecnologias inovadoras são fundamentais para minimizar os impactos causados por esse setor e garantir uma gestão sustentável dos recursos hídricos (Guo; Ma; Shen, 2018).

### 3.1.1. A lavanderia de *jeans*

O beneficiamento do *jeans* desempenha um papel indispensável na cadeia produtiva têxtil, sendo responsável pela transformação do tecido bruto em peças com acabamentos visuais e texturais que atendem às demandas de um mercado cada vez mais diversificado. Essas operações incluem etapas que vão desde lavagens mecânicas até processos químicos sofisticados, que conferem às peças efeitos como desgaste, suavidade e tonalidades únicas. No entanto, esses benefícios têm um custo ambiental elevado, especialmente devido ao consumo intensivo de água e produtos químicos (Paul, 2015). Na Figura 2 está ilustrado o consumo de água durante o processo de produção de um par de jeans na Empresa Vicunha. A Vicunha é uma indústria preocupada com a questão da pegada hídrica, os valores informados estão relacionados a um processo em que já se usa reúso e práticas sustentáveis, indicando que em processos convencionais os valores são em maiores.

Figura 2: Consumo de água na produção de uma calça *jeans*



Fonte: Vicunha Têxtil, 2019.

O processo de lavagem ocorre após a montagem da peça, já próximo do resultado final do produto. É nessa etapa que acontecem todos os tipos de

processamento físico-químico de acabamentos da peça sendo as etapas posteriores somente referentes ao preparo para a embalagem do produto.

Os efluentes gerados apresentam características químicas complexas o que dificulta o tratamento. A presença de corantes sintéticos, compostos orgânicos recalcitrantes contribuem para uma elevada carga de DQO que exige tratamentos mais eficientes do que os métodos convencionais. Por isso, tecnologias inovadoras como os Processo de Separação por Membranas (PSM) e os Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm ganhado espaço como alternativas para minimizar os impactos ambientais e atender às exigências de qualidade para reúso de água (Buscio *et al.*, 2015).

No processo de lavagem, etapas como desengomagem, tingimento e acabamento utilizam enzimas, detergentes, corantes e abrasivos, que resultam em uma composição complexa de resíduos. A desengomagem, por exemplo, é responsável por remover resíduos de goma e aditivos usados na tecelagem. Já o tingimento, frequentemente realizado com o corante Índigo Blue, gera efluentes ricos em compostos orgânicos de difícil degradação (Souza, 2020).

Além disso, técnicas como o "*stone washing*", que utilizam pedra-pomes, geram partículas sólidas no efluente, enquanto agentes clareadores, como hipoclorito de sódio, adicionam compostos químicos de alta toxicidade ao resíduo líquido (Silva *et al.*, 2019; Ferreira; Santos, 2020). O tratamento eficiente desses efluentes é essencial para atender às normas ambientais e garantir a reutilização da água, reduzindo impactos ambientais. Tecnologias como membranas de ultrafiltração e osmose inversa têm se mostrado eficazes nessa tarefa de reduzir os volumes administrados, sendo considerado uma boa solução para o ramo têxtil (Lopes, 2019).

Entre os principais componentes dos efluentes da lavanderia de *jeans* está o corante Índigo Blue, essencial para conferir a coloração tradicional do jeans. Apesar de sua importância estética, esse corante é conhecido por sua baixa solubilidade em água e alta resistência à degradação, o que dificulta sua remoção nos tratamentos convencionais. Estudos mostram que entre 10% e 15% do Índigo Blue utilizado no tingimento não se fixa ao tecido e é liberado no efluente durante a etapa de lavagem do tecido, intensificando a carga orgânica e a coloração da água residual (Figura 3) (Saravanan *et al.*, 2021). Isso pode causar impactos ambientais severos, como a redução

da penetração de luz em corpos d'água, comprometendo os processos fotossintéticos e a biodiversidade aquática (Moura, 2018).

**Figura 3: Efluente gerado pelos processos de lavagens de jeans**



Fonte: Souza, 2023

Outro grupo de compostos presente nos efluentes são os surfactantes, amplamente utilizados em detergentes e agentes de lavagem. Esses produtos ajudam a remover sujidades e uniformizar o tingimento, mas também aumentam a carga poluente da água e podem prejudicar sistemas avançados de tratamento, como os PSMs, ao contribuir para formação de incrustações, reduzindo a eficiência do desempenho desses processos (Souza, 2020).

Os sólidos suspensos também representam uma parcela significativa dos resíduos. Eles incluem partículas de tecido liberadas durante a lavagem, resíduos de pedra-pomes usadas em técnicas como o "*stone washing*" e sedimentos de produtos químicos. Esses sólidos aumentam a turbidez da água e podem obstruir os sistemas de tratamento, elevando os custos operacionais e a manutenção dos equipamentos (Oliveira et al., 2019).

Além desses componentes, agentes clareadores como hipoclorito de sódio e peróxido de hidrogênio são comumente usados para descoloração e efeitos de desgaste no jeans. Embora sejam eficientes, esses compostos geram subprodutos tóxicos, como organoclorados, que exigem tratamentos avançados para garantir a segurança ambiental (Carvalho, 2020). Outro destaque são as enzimas, como as celulases, que suavizam as

fibras e melhoram texturas. Embora consideradas mais sustentáveis em relação aos produtos químicos convencionais, seu uso demanda controle rigoroso de condições, como temperatura e pH, para maximizar a eficiência e evitar desperdícios (Pereira; Silva, 2020).

Os produtos de acabamento, por sua vez, conferem características adicionais às peças, como resistência a manchas, redução de encolhimento e impermeabilização. No entanto, esses aditivos introduzem moléculas complexas aos efluentes, dificultando sua remoção nos tratamentos convencionais (Martins; Oliveira, 2019).

Por fim, metais como cádmio, chumbo e cobre, também podem estar presentes nos efluentes, seja pela corrosão de equipamentos ou pelo uso de pigmentos específicos. Esses elementos são especialmente preocupantes devido à sua toxicidade, exigindo tecnologias avançadas, como membranas de ultrafiltração e osmose inversa, para garantir sua remoção eficiente (Gomes; Ferreira, 2018).

Em um cenário em que as demandas ambientais e as regulamentações se tornam cada vez mais rigorosas, o uso de alternativas biodegradáveis e tecnologias de tratamento avançado emergem como solução indispensável. Com essas práticas, é possível minimizar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade no setor têxtil, equilibrando inovação e responsabilidade ecológica.

### **3.1.2. Tratamento convencionais de efluentes**

Os tratamentos físico-químicos, como coagulação e floculação, são amplamente utilizados para reduzir sólidos suspensos e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em efluentes industriais. Apesar de sua eficiência inicial, esses métodos apresentam limitações significativas na remoção de corantes e compostos orgânicos persistentes, especialmente aqueles com alta massa molecular, que são comuns nos efluentes de lavanderias *jeans* (Kim *et al.*, 2004).

A coagulação-floculação é um processo de tratamento de efluentes que utiliza coagulantes, como sulfato de alumínio ou cloreto férrico, para neutralizar as cargas das

partículas suspensas, promovendo sua aglomeração em flocos maiores. Esses flocos podem então ser removidos por sedimentação ou flotação. Embora seja eficaz na remoção de sólidos suspensos e redução de matéria orgânica particulada, pode ser menos eficiente na remoção de compostos dissolvidos e metais (Metcalf & Eddy, 2013).

Após a coagulação-floculação, a sedimentação separa os flocos do líquido mediante ação da força gravitacional, permitindo que os flocos mais densos se depositem no fundo dos tanques e a água clarificada seja coletada na superfície. Esta técnica é fundamental para remover partículas maiores e flocos, sendo uma etapa essencial no tratamento primário de efluentes (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2014).

Porém, essa técnica não atua na eliminação de substâncias dissolvidas, como corantes e detergentes, que são comuns no efluente de lavanderias de jeans. Além disso, esse tipo de tratamento gera grandes volumes de lodo, como apresentado na Figura 4, o que demanda disposição adequada e tratamento adicional. Além disso, a aplicação de reagentes químicos aumenta os custos operacionais e, frequentemente, resulta na formação de lodo químico que precisa ser tratado ou descartado de maneira ambientalmente correta (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2014).

**Figura 4: Lodo do tratamento de efluentes de Lavanderia de jeans**

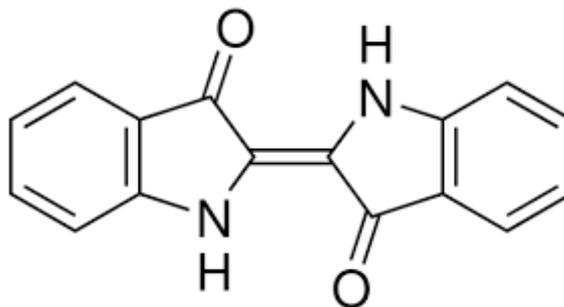


Fonte: Souza, 2023

Os tratamentos biológicos, por sua vez, enfrentam desafios relacionados à baixa biodegradabilidade de muitos dos contaminantes presentes nesses efluentes, como corantes sintéticos e naturais. Um exemplo de corante utilizado na indústria têxtil é o

*Índigo blue*, corante que apresenta dois anéis aromáticos e uma ligação dupla no ponto central da molécula (Figura 5), conferindo a ela uma alta estabilidade química e difícil degradabilidade (Albuquerque *et al.*, 2025). Além disso, esses métodos dependem de condições específicas para que os microrganismos degradem os compostos, o que pode limitar sua aplicação em larga escala (Verma *et al.*, 2012).

**Figura 5: Estrutura molecular do corante Índigo blue**



Fonte: Sigma Aldrich

O processo de lodos ativados é um tratamento biológico aeróbio que utiliza microrganismos para degradar a matéria orgânica presente no efluente. Em um reator aerado, os microrganismos consomem essa matéria orgânica, convertendo-a em dióxido de carbono, água e biomassa (em condições ideais), em casos de efluentes mais complexos, pode ocorrer a geração de produtos de degradação. O lodo ativado, resultante deste processo, é separado por sedimentação e pode ser reciclado ou descartado. Este método é eficaz para a remoção de compostos orgânicos biodegradáveis, mas pode não ser tão eficiente na eliminação de substâncias recalcitrantes, como certos corantes e metais (Henze *et al.*, 2008).

Diante dessas limitações, os Processos de Separação por Membranas têm emergido como uma solução promissora. Estudos demonstram que membranas de ultrafiltração e nanofiltração são capazes de remover eficientemente sólidos, corantes e compostos orgânicos, tornando o permeado adequado para reúso em diversas aplicações industriais (Aouni *et al.*, 2012; Ramutshatsha; Nomngongo, 2022). Estudos na área são apresentados no Quadro 1.

**Quadro 1: Estudo sobre a aplicação de processos de separação por membranas**

<b>Autores</b>	<b>Tipo de Membrana</b>	<b>Uso do Efluente Tratado</b>
Aouni et al. (2012)	Ultrafiltração	<i>Reúso em aplicações industriais diversas</i>
Ramutshatsha e Nomngongo (2022)	Nanofiltração	<i>Reúso em processos industriais após remoção de corantes e compostos orgânicos</i>
Ströher et al. (2012)	Ultrafiltração (membranas cerâmicas, porosidade 0,01 µm)	<i>Reúso na indústria têxtil após redução de DBO, DQO e remoção de corantes</i>
Qua Group (2015)	Ultrafiltração (fibra oca)	<i>Reciclagem de água para reutilização em processos de produção industrial</i>
Hernandes (2019)	Ultrafiltração	<i>Pré-tratamento essencial para processos subsequentes, como osmose inversa</i>
Costa et al. (2020)	Osmose inversa e nanofiltração	<i>Produção de água para torres de resfriamento e caldeiras após remoção de ânions e cor</i>
Santos e Menezes (2021)	Ultrafiltração e osmose inversa	<i>Reúso de água em diversas atividades industriais</i>
Souza (2023)	Ultrafiltração e osmose inversa	<i>Uso de processo de separação por membrana aplicado a efluente de lavanderia jeans para fins de reúso</i>
Silva (2020)	Microfiltração e Ultrafiltração	<i>Tratamento de efluente da indústria de papel</i>
Galvão (2015)	Microfiltração e Ultrafiltração	<i>Reúso na indústria de laticínios</i>

Fonte: Autoria própria, 2025.

### 3.2. Reúso de água

O reúso de água tem ganhado destaque como uma estratégia indispensável para enfrentar a crescente demanda por recursos hídricos e os desafios impostos pelas

mudanças climáticas. Trata-se de uma prática que consiste na reutilização de águas residuais tratadas ou não para diferentes finalidades, como irrigação agrícola, processos industriais e até mesmo recarga de aquíferos (Barros; Gonçalves, 2023).

No Brasil, regulamentações como a Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelecem limites máximos para o lançamento de efluentes em corpos hídricos, enquanto a Deliberação Normativa nº 65/2020, de Minas Gerais, incentiva o reúso em aplicações não potáveis, promovendo práticas mais sustentáveis na indústria. Essa prática reduz o consumo de água doce, alivia a pressão sobre fontes naturais e diminui a carga poluente descartada no meio ambiente.

Especificamente no setor têxtil, o reúso de água contribui para otimizar os processos produtivos, como o tingimento e a lavagem, ao mesmo tempo em que atende às exigências legais e reduz custos operacionais. A adoção de tecnologias avançadas, como os PSMs, tem garantido a qualidade do permeado, assegurando sua segurança de tratamento e eficácia para fins de reúso (Pereira; Santos; Souza, 2022).

A qualidade requerida da água destinada ao reúso varia conforme a finalidade, pode ser avaliada pela determinação de alguns parâmetros como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), turbidez e presença de metais tóxicos. Normas, como as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS), estabelecem padrões específicos para garantir a segurança e eficácia do reúso em diferentes aplicações (OMS, 2020), como mostrado no Quadro 2.

**Quadro 2: Tipos de reúso e parâmetros de análises específicos importantes**

<b>Tipo de reúso</b>	<b>Descrição</b>	<b>Parâmetros específicos importantes</b>	<b>Fonte</b>
Reúso em processos produtivos	Utilização da água tratada no tingimento, lavagem e outros processos que não demandam água completamente isenta de impurezas.	Turbidez, Cor, Condutividade Sólidos Suspensos Totais.	CETESB (2013)
Lavagem de pisos e equipamentos	Uso da água para limpeza das instalações e máquinas, onde a qualidade microbiológica não é crítica.	Demanda Bioquímica de Oxigênio, Sólidos Suspensos Totais e pH.	CETESB (2013)
Refrigeração de máquinas	Uso da água tratada em sistemas de resfriamento. Geralmente não requer remoção de cor, mas a condutividade e SDT devem ser controlados para evitar incrustações.	Sólidos Dissolvidos Totais, Condutividade, pH.	ISO 20426 (2021)
Irrigação de áreas externas	Reúso em jardins e paisagismo dentro das instalações. Exige baixa carga microbiológica e ausência de contaminantes perigosos.	Coliformes Totais, Demanda Bioquímica de Oxigênio e alguns Metais.	ABNT NBR 13969 (1997)
Descarga em sanitários	Uso da água tratada em vasos sanitários e mictórios, sem contato humano direto.	Coliformes Totais, Turbidez, pH.	ABNT NBR 15527 (2007)
Reúso em caldeiras	Água tratada para geração de vapor. Exige alta qualidade devido ao risco de incrustações e corrosões, sendo necessária a remoção de sólidos dissolvidos e controle de pH.	Demanda Química de Oxigênio, Sólidos Dissolvidos Totais, pH, Condutividade.	ISO 20426 (2021)

Fonte: Autoria própria, 2025

O monitoramento contínuo da qualidade da água é fundamental para assegurar a segurança e eficácia do reúso, especialmente em aplicações que envolvem contato humano direto ou indireto. A adoção de tecnologias avançadas de tratamento e monitoramento contribui para a confiabilidade dos sistemas de reúso (Souza, 2021).

Cada tipo de reúso requer níveis distintos de tratamento. Por exemplo, o reaproveitamento para fins industriais exige a remoção eficaz de sólidos e contaminantes químicos, enquanto, para irrigação essa reciclagem pode permitir maior flexibilidade nos parâmetros de qualidade, desde que não comprometa a saúde pública e o meio ambiente (Barros; Gonçalves, 2023).

### **3.2.1. Legislação de reúso no Brasil**

A Lei Federal nº 9.433/1997, conhecida como Lei das Águas, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH). São objetivos da PNRH: assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; a utilização racional e integrada dos recursos hídricos; a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais; e, incentivar e promover a captação, a preservação e o aproveitamento de águas pluviais. Para que tais objetivos sejam alcançados, a PNRH assume como diretrizes principais a gestão sistemática dos recursos hídricos e a integração da gestão dos recursos hídricos com a gestão ambiental. Neste contexto, há a forte valorização e recomendação de uso racional e sustentável da água, incentivando o reaproveitamento em diferentes setores produtivos.

Em meio à crescente pressão hídrica, emergiram nos últimos anos normatizações visando reúso de água em vários países. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 54/2005 estabeleceu modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. Nesta resolução foram compreendidas as seguintes modalidades de reúso:

I - fins urbanos: utilização de água de reúso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações, combate a incêndio, dentro da área urbana;

II - fins agrícolas e florestais: aplicação de água de reúso para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas;

III - fins ambientais: utilização de água de reúso para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente;

IV - fins industriais: utilização de água de reúso em processos, atividades e operações industriais; e,

V - reúso na aquicultura: utilização de água de reúso para a criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos.

A Resolução CONAMA nº 54/2005 definiu que os critérios e parâmetros específicos para as modalidades de reúso fossem estipuladas posteriormente pelos órgãos competentes. Posteriormente, alguns estados brasileiros aprovaram normativas relacionadas às práticas de reúso de água. O Decreto nº 62.973/2017 de São Paulo, têm promovido incentivos fiscais para empresas que implementam tecnologias de reúso, resultando em benefícios econômicos e ambientais (Santos, 2020).

Em Minas Gerais, a Deliberação Normativa CERH-MG nº 65, de 18 de junho de 2020, estabelece diretrizes, modalidades e procedimentos para o reúso direto de água não potável proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETE) para fins urbanos, industriais, agrícolas e ambientais. Essa normativa visa garantir a segurança sanitária e ambiental na utilização de águas de reúso, definindo critérios de qualidade e monitoramento para diferentes modalidades de uso (SIAM,2020).

No estado de São Paulo, a Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01, de 13 de fevereiro de 2020, disciplina o reúso direto não potável de água para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário. Essa resolução atualiza normas anteriores e estabelece parâmetros de qualidade, responsabilidades dos produtores e usuários, além de procedimentos de monitoramento e controle para assegurar a segurança do reúso de água em atividades urbanas.

O Projeto Aquapolo Ambiental é uma iniciativa de destaque no Brasil, sendo o maior empreendimento para produção de água de reúso industrial na América do Sul.

Localizado na região metropolitana de São Paulo, o projeto é resultado de uma parceria entre a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) e a empresa privada BRK Ambiental. O Aquapolo produz até 1.000 litros por segundo de água de reúso, destinada principalmente ao Polo Petroquímico do ABC Paulista, contribuindo para a conservação dos recursos hídricos e servindo como modelo para futuras iniciativas de reúso no país (Aquapolo.2025).

A experiência internacional também oferece exemplos notáveis. Países como Israel e Singapura lideram práticas de reúso. Israel reutiliza cerca de 90% de suas águas residuais tratadas, principalmente para agricultura, enquanto o programa *NEWater* de Singapura transforma águas residuais em recursos de alta qualidade para uso industrial e recarga de aquíferos (Cohen; Rosenthal, 2019; Lim; Chong, 2017). Essas iniciativas demonstram o potencial do reúso para enfrentar desafios de escassez hídrica e promover a sustentabilidade.

### **3.3. Tecnologias Emergentes em ETEs industriais**

As Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) industriais enfrentam desafios cada vez maiores para lidar com a complexidade dos efluentes gerados. Além das exigências regulatórias mais rigorosas, cresce a necessidade de adotar soluções que sejam ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis. Nesse cenário, tecnologias emergentes têm se destacado por oferecer alternativas mais eficientes em comparação aos tratamentos tradicionais.

Uma dessas alternativas são os Processos Oxidativos Avançados (POAs), que utilizam substâncias altamente reativas, como ozônio e peróxido de hidrogênio, além de métodos como a radiação ultravioleta. Esses processos promovem a quebra de compostos orgânicos complexos, tornando-os menos prejudiciais e mais fáceis de remover. Os POAs têm demonstrado alta eficácia na descoloração de efluentes e na redução de carga orgânica, como a Demanda Química de Oxigênio (DQO). Contudo, seu custo operacional ainda é elevado, o que limita a aplicação isolada em larga escala (Buscio *et al.*, 2015). Além disso, a maioria dos POAs não consegue promover a mineralização completa dos compostos, podendo gerar subprodutos tóxicos, o que exige etapas adicionais de tratamento para garantir a segurança ambiental do efluente tratado.

Outra alternativa importante são os sistemas biológicos avançados, como os biorreatores de membrana (MBRs), que combinam processos naturais de biodegradação com tecnologias de filtração. Esse tipo de sistema não apenas remove sólidos suspensos e matéria orgânica, mas também produz um efluente de alta qualidade, adequado para reúso em atividades industriais ou para descarte seguro. Além disso, os MBRs ajudam a reduzir a geração de lodo, o que representa um benefício ambiental significativo (Tiozzi; Simon, 2021).

A combinação de diferentes tecnologias é uma abordagem que vem ganhando espaço nas ETEs. Por exemplo, integrar POAs com sistemas de membranas pode aumentar a eficiência do tratamento, garantindo a remoção de compostos persistentes e proporcionando água tratada com qualidade suficiente para reúso. Essa abordagem integrada permite que as estações atendam a uma maior variedade de desafios, como a presença de corantes têxteis recalcitrantes e metais (Souza, 2023).

Entre as soluções tecnológicas mais promissoras, os Processos de Separação por Membranas (PSM) merecem destaque. Utilizando barreiras semipermeáveis, esses processos removem seletivamente contaminantes, sem a necessidade de produtos químicos em grandes quantidades. Aplicações práticas, como o uso de ultrafiltração e nanofiltração, demonstraram ser especialmente eficazes na recuperação de água em processos industriais. Além disso, os PSM são considerados sustentáveis, uma vez que contribuem para a economia de recursos hídricos e reduzem significativamente os resíduos líquidos descartados no meio ambiente (Drioli; Giorno, 2016; Ramutshatsha; Nomngongo, 2022).

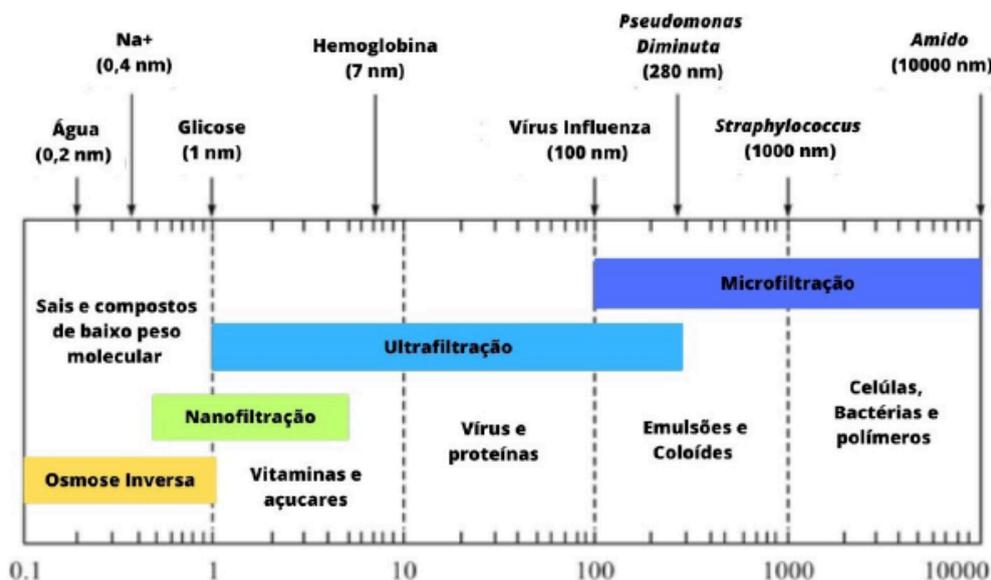
### **3.3.1. Processo de Separação por Membranas**

Os Processos de Separação por Membranas, como microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa, são amplamente utilizados no gerenciamento de águas e efluentes. Cada um deles possui aplicações específicas, dependendo da natureza do efluente e dos objetivos da separação e manuseio (Alves, 2022).

A osmose inversa, por exemplo, é indicada para a remoção de sais e sólidos dissolvidos, sendo eficaz na obtenção de água de alta pureza. Por sua vez, a ultrafiltração é eficiente na retenção de partículas maiores (Figura 6), como

microrganismos e macromoléculas, contribuindo para a clarificação e desinfecção da água (Souza, 2021).

**Figura 6: Tipos de membranas e retenção de compostos**



Fonte Adaptado de Nath ,2017.

Avanços na fabricação de membranas têm permitido maior durabilidade e eficiência, reduzindo custos operacionais e aumentando a viabilidade econômica de sua aplicação em larga escala (Alves, 2022).

### 3.3.1.1. Membranas de Ultrafiltração

As membranas de ultrafiltração (UF) são reconhecidas por sua eficiência na remoção de partículas em suspensão, colóides, bactérias e vírus, desempenhando um papel importante no gerenciamento de água e efluentes. Essas membranas possuem poros entre 3 e 50 nanômetros, capazes de reter macromoléculas e permitir a passagem de moléculas menores, como água e alguns sais dissolvidos. No manuseio de água, a ultrafiltração contribui para melhorar a qualidade microbiológica, sendo frequentemente utilizada como etapa preliminar em sistemas mais complexos, como a osmose inversa (Frank, 2018).

Na indústria de alimentos, as membranas de UF são amplamente empregadas para concentrar e isolar proteínas, como as do soro do leite, ajudando no desenvolvimento de produtos com maior valor agregado (Silva; Costa, 2020). Além

disso, estudos mostram a eficiência dessas membranas na separação de efluentes industriais. Por exemplo, o estudo realizado por Martins et al. (2019), revelou que o uso de UF resultou na remoção de 92,4% dos sólidos suspensos totais, 96,5% DQO e 92,2% da DBO, possibilitando o reúso da água em processos produtivos.

Ströher *et al.* (2012) demonstraram a eficácia do uso de membranas cerâmicas com porosidade de 0,01  $\mu\text{m}$  no gerenciamento de efluentes provenientes da indústria têxtil. O estudo revelou uma redução significativa na DBO, DQO e na turbidez, além de uma considerável remoção de corantes. O trabalho de Qua Group (2015) investigou uma planta industrial na Índia e evidenciou que membranas de UF de fibra oca foram eficazes na reciclagem de água para reutilização no processo de produção. Além disso, Hernandez (2019) destacou que a UF é uma etapa essencial para remover partículas em suspensão e compostos de alta massa molecular, contribuindo para o sucesso de processos subsequentes, como a osmose inversa.

### **3.3.1.2. Membranas de Osmose Inversa**

As membranas de osmose inversa (OI) são essenciais em processos de separação que demandam a remoção de contaminantes menores, como sais e moléculas orgânicas de baixa massa molecular. Com poros entre 0,1 e 1 nanômetro, essas membranas são amplamente utilizadas na dessalinização de água do mar e salobra, permitindo o acesso a água potável em regiões de escassez hídrica (Pereira, 2017). Além disso, a osmose inversa é aplicada na produção de água ultrapura para indústrias, como a farmacêutica e de eletrônicos (Souza; Almeida, 2019).

No contexto de efluentes industriais, as membranas de OI têm sido usadas para remover íons e compostos orgânicos dissolvidos, viabilizando o reúso da água em processos produtivos. Estudos mostram que membranas de osmose inversa e nanofiltração foram capazes de tratar esgoto doméstico, gerando água compatível com os padrões exigidos para torres de resfriamento e caldeiras, com redução significativa de ânions, cor e carbono orgânico dissolvido (Costa *et al.*, 2020).

Entretanto, as membranas de osmose inversa apresentam desafios, como a formação de incrustações, que podem comprometer a eficiência e a vida útil do sistema. Pesquisas recentes têm buscado modificar essas membranas para aumentar sua

resistência ao acúmulo de contaminantes e melhorar seu desempenho (Gomes, 2018). Outra alternativa sustentável envolve o reaproveitamento de membranas descartadas para aplicações menos exigentes, reduzindo custos e resíduos (Lima; Santos, 2022).

A integração das tecnologias de ultrafiltração e osmose inversa tem se mostrado uma solução eficiente para a gestão de água e efluentes. Nesse arranjo, a UF funciona como uma etapa de pré-separação, removendo sólidos suspensos e microrganismos que poderiam danificar ou reduzir a eficiência das membranas de OI. Essa combinação não apenas melhora a qualidade da água tratada, mas também prolonga a vida útil dos equipamentos (Santos; Menezes, 2021).

Além de otimizar os processos, essa integração é uma estratégia sustentável, permitindo o reaproveitamento da água tratada em diversas atividades. Inovações recentes, como o reaproveitamento de membranas descartadas e o desenvolvimento de tecnologias com menor consumo energético, têm ampliado a viabilidade técnica e econômica desses sistemas, destacando sua relevância para a gestão sustentável dos recursos hídricos (Ferreira *et al.*, 2022).

Amorim (2004) enfatizou que o uso integrado dessas tecnologias permite maior flexibilidade na gestão, atendendo às especificidades de diferentes tipos de efluentes. Hernandez (2019) destacou que o sistema combinado é eficiente na remoção de uma ampla gama de contaminantes, promovendo o reúso de água em níveis elevados de pureza. Qua Group (2015) também relatou que essa integração contribuiu significativamente para a sustentabilidade de operações industriais na Índia, reduzindo o consumo de água fresca.

Diante dos desafios impostos pela escassez hídrica e pela necessidade de reduzir os impactos ambientais gerados pela indústria têxtil, este estudo reafirma a relevância do uso integrado de processos de separação por membranas, como ultrafiltração e osmose inversa, no tratamento de efluentes. Essas tecnologias oferecem uma alternativa eficiente e sustentável, contribuindo para a melhoria da qualidade da água tratada e possibilitando seu reúso em diferentes etapas produtivas. Ao integrar inovação tecnológica e proteção ambiental, este trabalho busca fomentar práticas industriais mais responsáveis, alinhadas às demandas por um desenvolvimento sustentável e à preservação dos recursos naturais.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Amostragem

As amostras de efluente foram obtidas diretamente do setor de acabamento de *jeans* do processo de beneficiamento do *jeans*. As amostragens simples foram realizadas em diferentes dias de acordo com a disponibilidade da empresa e o planejamento da realização das análises em até 24 horas após a coleta., como descrito no Quadro 3, utilizando frascos de polietileno de 5 litros. Para garantir a integridade das amostras, estas foram armazenadas sob refrigeração (4°C). Antes de submeter a amostra ao processo de ultrafiltração, o efluente passou por uma filtração grosseira, com filtro de café para remover sólidos de maior tamanho. Uma alíquota de 40,0 mL de cada amostra coletada e preservada com a adição de 4 gotas de ácido sulfúrico 1:1 foi reservada para ser submetida à análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO).

**Quadro 3: Características da amostragem**

Amostra	Dia	Turno	Informações da empresa
1	21/11/2024	Manhã	Início do processo, alta concentração de corantes e goma
2	26/11/2024	Tarde	Odor característico de amaciante devido ao processo de lavagem principal
3	10/12/2024	Final da Tarde	Amostra mais clara devido à ozonização

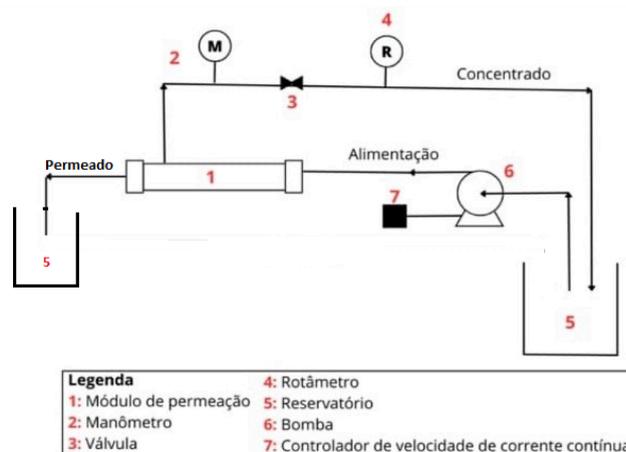
Fonte: Autoria própria, 2025

### 4.2. Procedimento operacional

#### 4.2.1. Montagem e operação do sistema de filtração

O sistema de filtração em escala laboratorial foi configurado utilizando módulos de filtração, ou seja, a peça do sistema em que se localiza o meio filtrante, construídos com membranas de ultrafiltração arranjadas em um módulo de permeação na configuração de um trocador de calor casco e tubo. Os módulos foram fixados em tubos de PVC com resina epóxi. O sistema também incluiu componentes como manômetro, rotâmetro, bomba de escoamento positivo e válvula agulha, como mostra o esquema apresentado nas Figura 7 e Figura 8 .

**Figura 7: Diagrama esquemático do sistema de ultrafiltração**



Fonte: Adaptado de Souza, 2023

**Figura 8: Sistema de ultrafiltração em escala laboratorial**



Fonte: Souza, 2023

O módulo foi produzido com 26 fibras ocas de membranas de ultrafiltração, constituídas de fluoreto de polivinilideno (PVDF). É possível visualizar na Figura 9 o módulo de filtração e corte transversal do mesmo, evidenciando as membranas de fibra oca utilizadas. A confecção da peça resultou em uma área superficial de  $0,03755 \text{ m}^2$  de área de membrana e uma densidade de empacotamento de  $719 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . As membranas foram fornecidas pela Vitaltec Engenharia empresa do Rio de Janeiro, atuante na purificação de água e tratamento de efluente.

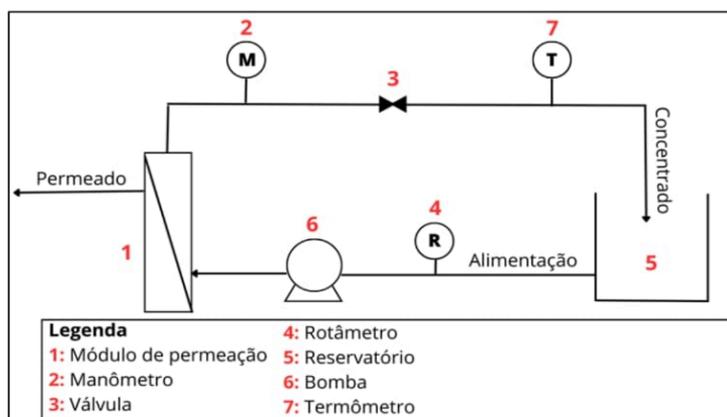
**Figura 9: Módulo de permeação de ultrafiltração e seção transversal do módulo de permeação.**



Fonte: Autoria própria, 2025

Os permeados gerados no sistema de ultrafiltração foram encaminhados para o sistema de osmose inversa. Este sistema é constituído por um tanque de alimentação, um rotâmetro para medição da vazão de alimentação, uma bomba, uma válvula para ajuste da pressão, um manômetro e um medidor de temperatura. O diagrama esquemático dos componentes desse sistema está representado na Figura 10, enquanto o sistema utilizado é ilustrado na Figura 11.

**Figura 10: Diagrama esquemático do sistema de Osmose Inversa**



Fonte: Souza, 2023

**Figura 11: Sistema de Osmose Inversa utilizado**



Fonte Autoria própria, 2025

Utilizou-se no processo uma membrana do modelo TW30-1812-100HR, plana, constituída por um filme de poliamida (PA) e produzidas pela empresa DOW/ Filmtech. O sistema operou com uma pressão de 7,0 bar e uma vazão de  $1,5 \text{ L min}^{-1}$ , utilizando uma membrana plana com área de permeação de  $1,13 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  (DUARTE, 2022). A etapa de osmose inversa foi realizada em circuito fechado, com recirculação do concentrado e recuperação do permeado nas taxas de 50% e 75%. O permeado resultante da osmose inversa foi posteriormente caracterizado.

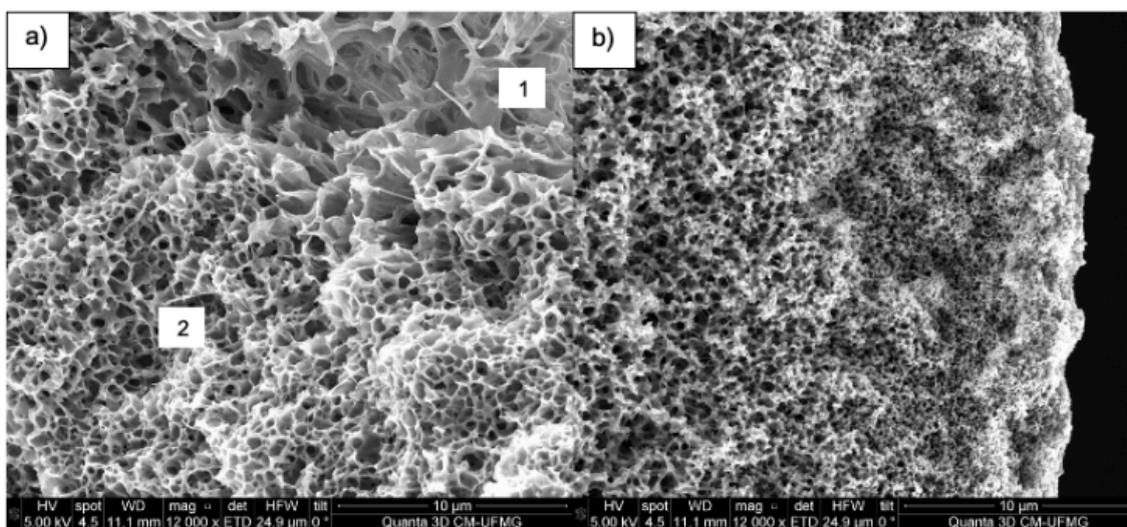
Antes de iniciar os testes, os módulos de filtração foram submetidos a um rigoroso processo de limpeza com solução de hipoclorito de sódio a  $13,4 \text{ g L}^{-1}$ . Esse procedimento visou remover qualquer resíduo presente na membrana em que a solução foi circulada em cada sistema por 15 minutos antes da operação. O módulo de filtração após a utilização foi deixado submerso na solução de limpeza e a membrana de osmose submersa em água destilada.

#### **4.2.2. Determinação da permeabilidade hidráulica das membranas**

A determinação da permeabilidade hidráulica das membranas foi realizada por meio de testes de fluxo permeado em função da pressão de operação. Inicialmente, as membranas de ultrafiltração foram compactadas a uma pressão de 2,0 bar em um intervalo de tempo de 1 hora para acomodação dos macrovazios presentes na estrutura

da membrana, como mostrado na Figura 12. Em seguida, a permeabilidade hidráulica foi definida medindo o fluxo de água destilada através das membranas sob diferentes pressões (0,5 a 2,0 bar). A relação entre o fluxo e a pressão permitiu calcular o coeficiente de permeabilidade hidráulica.

**Figura 12: Fotomicrografias da seção transversal da fibra oca: a) transição da superfície macroporosa (1) para uma superfície esponjosa (2) aumento de 12.000x; b) superfície esponjosa com aumento de 12.000x**



Fonte: Souza, 2023

Para as membranas de osmose inversa, a compactação ocorreu em um intervalo de tempo de 2,0 horas a uma pressão de 10,0 bar, em seguida, a permeabilidade hidráulica foi calculada medindo o fluxo de água destilada através da membrana sob diferentes pressões de operação (2,0; 4,0; 6,0; 8,0 e 10,0 bar).

### 4.2.3. Caracterização do efluente

#### 4.2.3.1. Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) foi determinada pelo método de refluxo fechado com dicromato de potássio. Para tanto, 2,50 mL da amostra foram adicionados a um digestor contendo dicromato de potássio a  $0,0347 \text{ mol L}^{-1}$  para faixa alta (curva com limite mais alto) e  $0,00347 \text{ mol L}^{-1}$  para a faixa baixa (curva com limite mais baixo) e uma solução catalítica de sulfato de prata ( $0,0324 \text{ mol L}^{-1}$ ). As amostras

foram aquecidas a 150 °C por 2 horas em um bloco digestor. Após o resfriamento dos tubos, as medições foram realizadas em um espectrofotômetro UV-Vis (Hack- DR900) a 420 nm e 600 nm. (APHA, AWWA, & WEF, 2022, p.5-4).

#### **4.2.3.2. Cor, pH, condutividade e turbidez**

Os parâmetros imediatos, ou seja, pH, condutividade e turbidez foram medidos rapidamente após o procedimento. O pH e a condutividade foram medidos com um pHmetro da marca Digmed (modelo DM-23) e condutivímetro da fabricante Hanna (modelo HI2003-02) calibrados. A turbidez foi medida com um turbidímetro Hanna (modelo HI98703-02) calibrado e verificado com soluções de formazina, na faixa de 0 a 4000 UNT (Unidade Nefelométrica de Turbidez). A cor foi avaliada de duas maneiras: a cor aparente foi medida com um colorímetro óptico Del Lab (modelo DLNH-100), e a cor verdadeira foi analisada após o processo de filtração, com o sobrenadante sendo analisado em um espectrofotômetro UV-Vis (Hack- DR900) a 455 nm. (APHA, AWWA, & WEF, 2022, p.2-5).

#### **4.2.3.3. Determinação da concentração dos ânions**

A concentração de ânions foi determinada por cromatografia iônica com detector de condutividade, permitindo a identificação e quantificação de cloreto, sulfato, nitrato e ortofosfato. As amostras foram verificadas quanto à condutividade e diluídas para não exceder 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Após a diluição, foram filtradas com filtros de seringa de 0,45  $\mu\text{m}$  e armazenadas em vials para análise no cromatógrafo DIONEX INTEGRION HPIC (Figura 13), conforme o método APHA, AWWA e WEF (2022, p.4-5). A coluna cromatográfica utilizada foi a Dionex IonPac AS19, o eluente KOH (Hidróxido de Potássio) em um fluxo de 0,25  $\text{mL min}^{-1}$ , a 30°C, com injeção de 2,5  $\mu\text{L}$ .

**Figura 13: Cromatógrafo *DIONEX INTEGRION HPIC***



Fonte: Autoria própria, 2025

Para a realização da análise, montou-se uma curva de calibração em que as concentrações usadas e o coeficiente linear encontrado para cada curva estão evidenciados no apêndice.

#### **4.2.3.4. Série de sólidos**

A concentração de sólidos totais, sólidos suspensos totais (SST), sólidos dissolvidos totais (SDT) e sólidos voláteis foi medida de acordo com os procedimentos descritos nos *Standard Methods*. Os sólidos totais foram medidos por filtração a vácuo das amostras, com retenção de sólidos suspensos em uma membrana com massa conhecida, e pesada após secagem em estufa. O sobrenadante foi colocado em estufa a 180°C, e a massa excedente foi considerada como sólidos dissolvidos. Os sólidos totais foram calculados pela soma dos sólidos suspensos e dissolvidos (APHA, AWWA & WEF, 2022, p.2-62).

#### **4.2.3.5. Determinação de surfactantes aniônicos**

A concentração de surfactantes foi determinada pelo método do azul de metileno, de acordo APHA, AWWA e WEF (2022, p.5-50). Utilizou-se espectrofotometria para quantificação, analisando a interação entre clorofórmio, a amostra e o corante azul de metileno. A presença de surfactantes foi identificada pela

formação de uma fase de clorofórmio azul, após agitação e quantificada com o auxílio de um espectrofotômetro UV-Vis (Hack- DR900).

#### **4.2.3.6. Determinação da dureza total das amostras**

O método para determinar a dureza total da água descrito no APHA, AWWA e WEF (2022, p.2-37) é uma técnica de titulação com EDTA (ácido etilenodiaminotetracético). Nesse processo, os íons cálcio e magnésio, responsáveis pela dureza da água, formam complexos estáveis com o EDTA.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

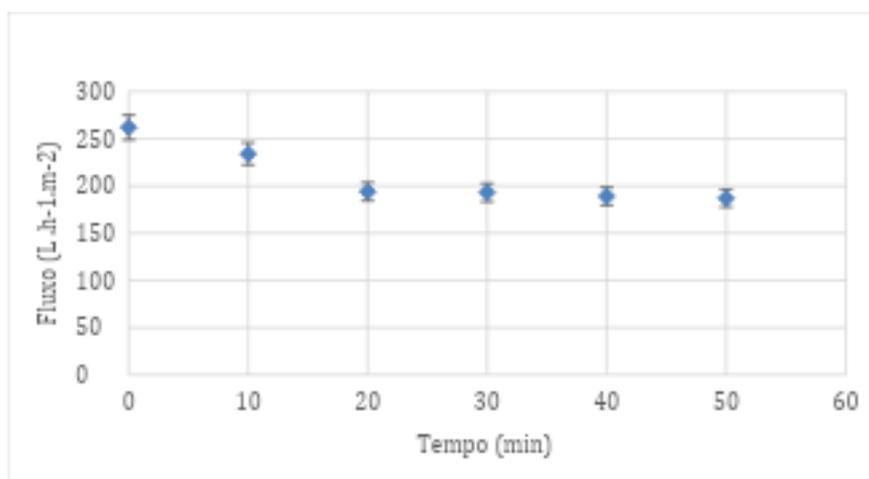
Serão apresentados e discutidos os dados obtidos nos experimentos realizados. Esses resultados foram analisados tanto de forma qualitativa quanto quantitativa, sendo também comparados com informações disponíveis na literatura. Essa análise é essencial para avaliar se os objetivos estabelecidos neste estudo foram alcançados.

### 5.1. Permeabilidade hidráulica

#### 5.1.1. Membranas de Ultrafiltração

A permeabilidade da membrana foi determinada após a compactação da membrana a uma pressão constante de 2,0 bar, para que ocorresse a completa acomodação dos macrovazios. A compactação impede que ocorra variações no fluxo permeado ao longo do ensaio para determinação da permeabilidade. O gráfico obtido a partir dos dados do comportamento do fluxo permeado em relação ao tempo está apresentado na Figura 14.

**Figura 14: Gráfico de compactação da membrana de ultrafiltração**

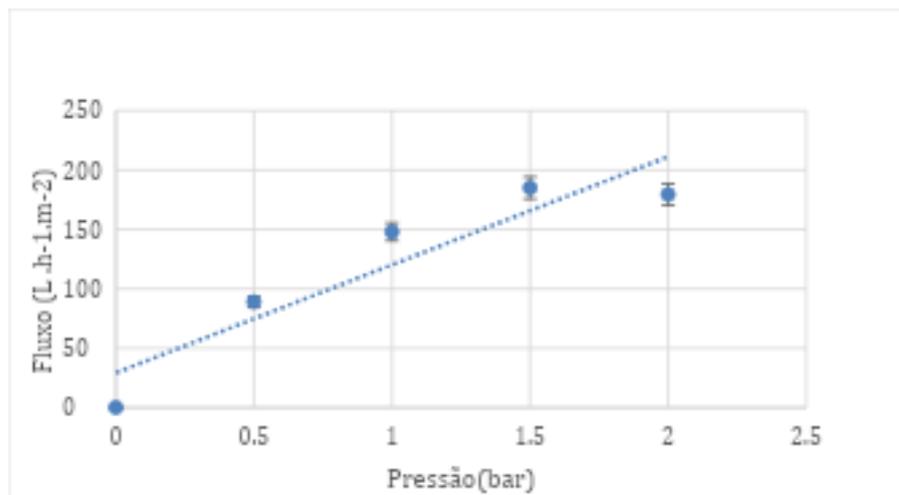


Fonte: Autoria própria, 2025

O comportamento do fluxo permeado constante a partir de 30 minutos é indicativo da compactação da membrana. A redução do fluxo permeado em função do tempo ocorre devido à reorganização e a acomodação da estrutura dos poros da membrana poliméricas (Mulder, 1996).

Após a compactação da membrana, foi realizado teste de permeabilidade conforme citado no item 4.2.2. De posse dos dados, calculou-se a permeabilidade hidráulica da membrana por meio da determinação do coeficiente angular da reta obtida a partir do gráfico do fluxo permeado *versus* variação de pressão de operação, como apresentado no gráfico da Figura 15.

**Figura 15: Fluxo permeado em função da pressão para determinação da permeabilidade hidráulica da membrana de UF**



Fonte: Autoria própria, 2025.

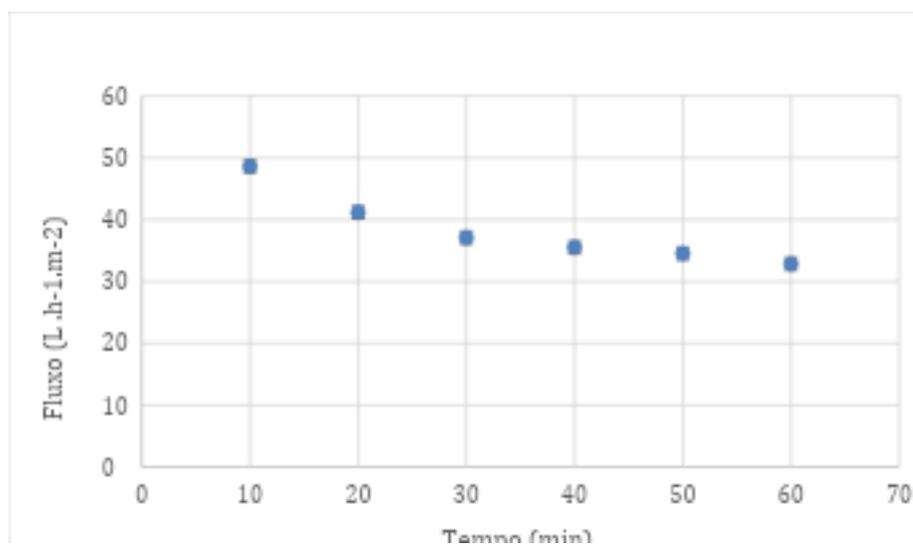
A permeabilidade hidráulica é a propriedade que determina a capacidade de uma membrana de permitir a passagem do fluxo de água sob pressão aplicada. Nas membranas de ultrafiltração, essa característica é tipicamente elevada devido à maior dimensão dos poros, com valores variando entre 50 e 500 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> bar<sup>-1</sup>, dependendo do material e da aplicação (Souza, 2020).

O valor obtido para a permeabilidade hidráulica do módulo foi de 110,52 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> bar<sup>-1</sup>. Esse valor deve ser estudado uma vez que a relação entre as características da membrana e os solventes utilizados interfere no fluxo quando aplicada força no sistema. O coeficiente de correlação foi de 0,9518 o que significa que o fluxo se manteve proporcional à elevação da pressão.

### 5.1.2. Membrana de Osmose Inversa

De forma semelhante à membrana de ultrafiltração, a membrana de osmose inversa foi submetida à compactação e em seguida ao ensaio de determinação da permeabilidade hidráulica. O comportamento do fluxo de água permeado em relação ao tempo com a pressão de 10 bar está representado no gráfico da Figura 16.

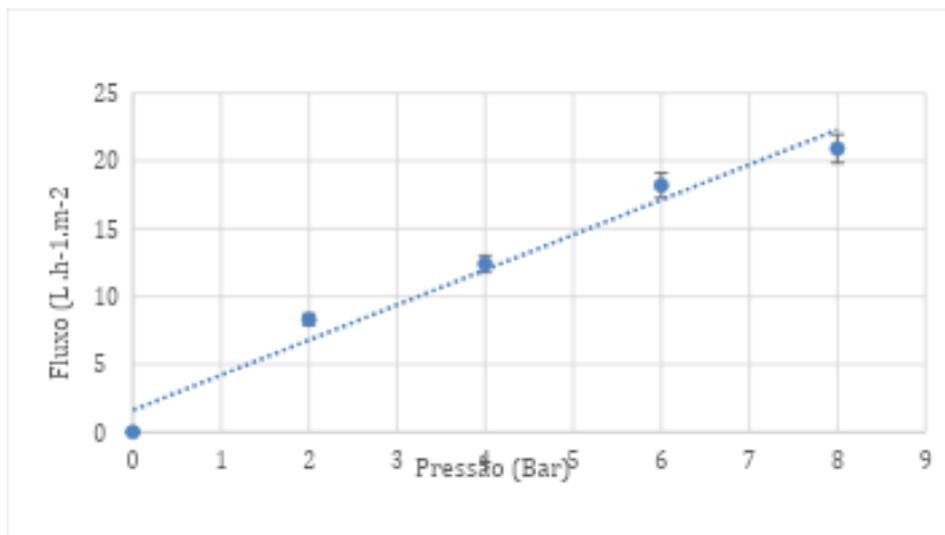
**Figura 16: Gráfico de Compactação da membrana de Osmose Inversa**



Fonte: Autoria própria, 2025

Verificou-se que a partir de 30 minutos, o sistema apresentou fluxo permeado constante evidenciando a compactação. Em relação ao teste de permeabilidade hidráulica, realizou-se procedimento semelhante ao sistema de ultrafiltração (UF) e de posse dos dados, calculou-se a permeabilidade hidráulica da membrana por meio da determinação do coeficiente angular da reta obtida a partir do gráfico do fluxo permeado *versus* variação de pressão de operação, como apresentado no gráfico da Figura 17.

**Figura 17: Fluxo permeado em função da pressão para determinação da permeabilidade hidráulica da membrana de OI.**



Fonte: Autoria própria, 2025

O valor de permeabilidade hidráulica obtido foi de  $2,6 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2} \text{ bar}^{-1}$ . É possível notar, assim como no módulo de ultrafiltração, a linearidade dos pontos, ou seja, o aumento do fluxo proporcional com um coeficiente de correlação de 0,97. O valor encontrado está conforme a faixa esperada de permeabilidade. As membranas de osmose inversa, projetadas para rejeitar sais e contaminantes em escala molecular, apresentam permeabilidade hidráulica significativamente menor, com valores que oscilam entre  $1 \text{ e } 10 \text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2} \text{ bar}^{-1}$  (Raquel, 2020; Ahmed et al., 2020). A diferença entre os valores encontrados na UF e OI decorre da alta densidade da camada seletiva das membranas de osmose inversa, que, embora eficiente na rejeição de partículas, restringe drasticamente o fluxo permeado de água.

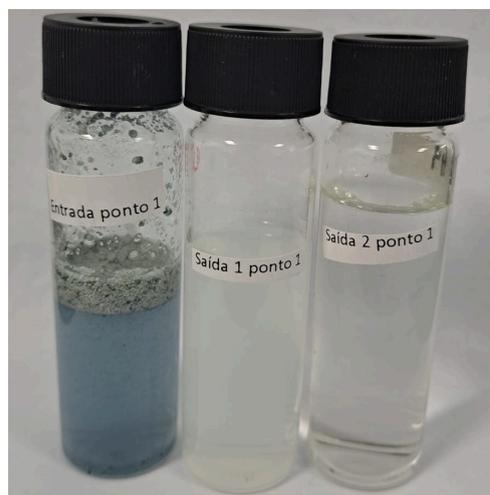
## 5.2. Avaliação da Qualidade do permeado

### 5.2.1. Análise sensorial

Efluentes provenientes de lavanderia *jeans* apresentam alta variabilidade de composição e concentração de substâncias, pois decorrem das produções de itens que requerem diferentes insumos e adição de produtos químicos em diferentes concentrações. Posto isto, este trabalho prezou por realizar ensaios com 3 amostras coletadas em dias diferentes e horários diferentes, visando trabalhar com efluentes de diferentes composições e características.

A primeira amostra foi coletada na parte da manhã, momento em que o processo de desengomagem estava sendo realizado, ou seja, na primeira etapa de lavagem. Na indústria têxtil, a engomagem é uma etapa fundamental que visa melhorar a resistência dos fios antes da tecelagem. Esse processo envolve a aplicação de substâncias como amido (de milho ou mandioca), formando uma camada protetora que reduz a formação de pelos e previne rupturas durante a produção do tecido. Após a tecelagem, é necessário remover essa camada por meio do processo de lavagem (Medeiros, 2023). O efluente coletado emitia odor forte com presença notória de corante. Após a ultrafiltração boa parte do corante ficou retida na membrana, mas a presença de goma no permeado foi identificada na alíquota preservada, pois apresentou coloração esbranquiçada devido ao ácido sulfúrico usado como preservante para análise de DQO. O permeado após a separação usando o sistema de osmose inversa não apresentou cor na amostra. Pode-se observar na Figura 18 a imagem comparativa de alíquotas do efluente bruto, permeado proveniente do sistema de UF e do sistema de OI.

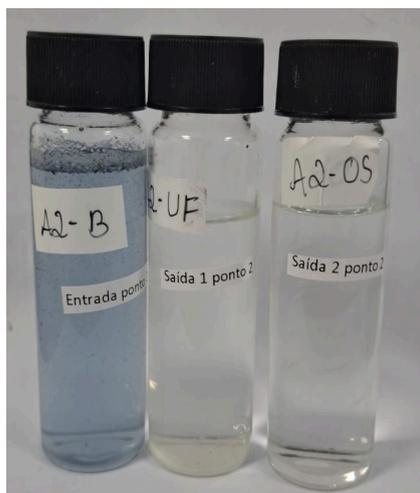
**Figura 18: Amostra 1 - Comparação entre 1) Efluente bruto, 2) Permeado da UF e 3) Permeado da UF+OI**



Fonte: Autoria própria, 2025

A segunda amostra foi coletada na parte da tarde, momento em que o *jeans* já está próximo das últimas etapas de acabamento. O odor de amaciante estava presente. Também se podia notar visualmente a presença de corante, porém em intensidade menor quando comparada à primeira amostra. Diferente da alíquota da amostra anterior, neste ensaio o efluente proveniente da separação por sistema de UF não reagiu com o preservante utilizado na amostra, mas apresentou coloração amarelada. Na Figura 19 pode ser vista a comparação da amostra bruta com os permeados da UF e da OI.

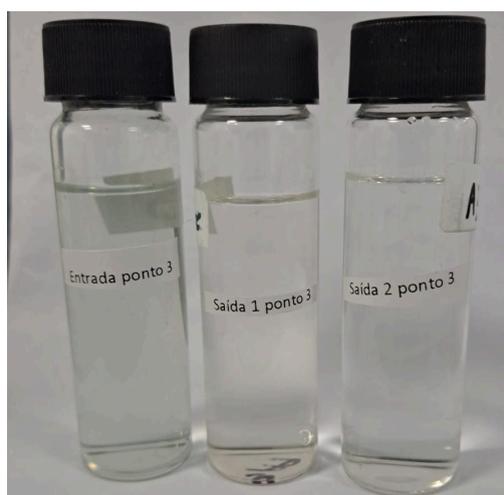
**Figura 19: Amostra 2 - Comparação entre 1) Efluente bruto, 2) Permeado da UF e 3) Permeado da UF+OI**



Fonte: Autoria própria, 2025

O efluente referente à terceira amostra foi coletado no final do processo de lavagem quando a maior concentração de produtos adicionados para o acabamento e boa parte do corante já fora extraído, sendo assim com maior presença de produtos químicos. Observou-se o odor mais forte de efluente com alta carga orgânica, cheiro de esgoto, quando comparado às amostras anteriores, mas que foi retirado no primeiro procedimento, assim como os resquícios de cor. A comparação visual das frações bruta, permeado UF e permeados pós UF+OI pode ser observada na Figura 20.

**Figura 20: Amostra 3- Comparação entre 1) Efluente bruto, 2) Permeado da UF e 3) Permeado da UF+OI**



Fonte: Autoria própria, 2025

### 5.2.2. Análises Físico-Químicas

Os resultados das análises físico-químicas das amostras 1, 2 e 3 encontram-se sumarizados nas Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente.

**Tabela 1:** Parâmetros físico-químicos medidos na Amostra 1 bruta e em seus permeados UF e UF+OI

Unidade	Parâmetros	Amostra 1		
		B	UF	UF+OI
-	pH	8,97 ±0,11	8,89 ±0,09	8,34 ±0,08
μS cm <sup>-1</sup>	Condutividade	934 ±6	767 ±4	64±2
UNT	Turbidez	58 ±2	2,26 ±1,23	0,53±0,08
	DQO	944 ±8	278±2	<LD*
	Cor aparente	280	40	<LD*
	Cor verdadeira	173±10	56±2	<LD*
	Sólidos Dissolvidos	607±22	498±16	42±6
	Sólidos Suspensos	1960± 54	150± 32	<LD*
mg L <sup>-1</sup>	Sólidos Totais	2567±234	648±165	42±11
	Surfactantes	14,4± 1,2	0,19± 0,01	0,12±0,01
	Cloreto	158±15	133±12	10±1
	Sulfato	97± 8	11± 1	4,2± 0,4
	Ortofosfato	5,2±0,4	<LD*	<LD*
	Dureza	74±6	54±4	6,0±0,6

\*LD (Limite de detecção): cor aparente (5 mg L<sup>-1</sup>), cor verdadeira (5,00 mg L<sup>-1</sup>), DQO (10,00 mg L<sup>-1</sup>), Ortofosfato (0,01 mg L<sup>-1</sup>), Sólidos Suspensos (2 mg L<sup>-1</sup>).

Fonte: Autoria própria, 2025

**Tabela 2:** Parâmetros físico-químicos medidos na Amostra 2 bruta e em seus permeados UF e UF+OI

Unidade	Parâmetro	Amostra 2		
		B	UF	UF+OI
-	pH	7,90±0,69	7,99±0,85	8,21±1,11
$\mu\text{S cm}^{-1}$	Condutividade	1863±45	1711±34	124±12
UNT	Turbidez	43±5	5,9±0,3	0,60±0,02
	DQO	255±25	92± 22	<LD*
	Cor aparente	200	20	<LD*
	Cor verdadeira	154±9	48±2	<LD*
	Sólidos Dissolvidos	1211±53	1112±46	81±11
	Sólidos Suspensos	350±34	2,0± 0,9	<LD*
$\text{mg L}^{-1}$	Sólidos Totais	1561±57	1114±4	8±23
	Surfactantes	10,9±1,2	1,2±0,4	0,12±0,01
	Cloreto	452±40	413±36	29±2
	Sulfato	86±	78±6	2,6±0,2
	Ortofosfato	<LD*	<LD*	<LD*
	Dureza	83±8	72±7	6,95±0,67

\*LD (Limite de detecção): cor aparente (5  $\text{mg L}^{-1}$ ), cor verdadeira (5,00  $\text{mg L}^{-1}$ ), DQO (10,00  $\text{mg L}^{-1}$ ), Ortofosfato (0,01  $\text{mg L}^{-1}$ ), Sólidos Suspensos (2  $\text{mg L}^{-1}$ ).

Fonte: Autoria própria, 2025

**Tabela 3:** Parâmetros físico-químicos medidos na Amostra 3 bruta e em seus permeados UF e UF+OI

Unidade	Parâmetro	Amostra 3		
		B	UF	UF+OI
-	pH	6,89±0,70	6,83±0,45	8,07±0,78
$\mu\text{S cm}^{-1}$	Condutividade	3470±26	3320±367,	229±13
UNT	Turbidez	115±11	20±2	0,72±0,08
	DQO	240±21	192±15	<LD*
	Cor aparente	150	40	<LD*
	Cor verdadeira	134± 23	37±3	<LD*
	Sólidos Dissolvidos	2255±123	2158±99	149±13
	Sólidos Suspensos	210±35	43±8	<LD*
$\text{mg L}^{-1}$	Sólidos Totais	2465±112	2201±98	149±13
	Surfactantes	11,1±0,1	0,84±0,02	0,15±0,02
	Cloreto	1071±89	908±70	52,88±0,01
	Sulfato	44,32±3	43,79±3	0,84±0,01
	Ortofosfato	12±1	10,89±0,96	0,06±0,01
	Dureza	96±9	86±8	4,97±0,48

\*LD (Limite de detecção): cor aparente (5  $\text{mg L}^{-1}$ ), cor verdadeira (5,00  $\text{mg L}^{-1}$ ), DQO (10,00  $\text{mg L}^{-1}$ ), Ortofosfato (0,01  $\text{mg L}^{-1}$ ), Sólidos Suspensos (2  $\text{mg L}^{-1}$ ).

Fonte: Autoria própria, 2025

Os resultados das análises realizadas evidenciaram que o uso combinado de ultrafiltração (UF) e osmose inversa (OI) alcançam melhora significativa da qualidade do permeado, tornando-o adequado para reutilização em diferentes usos, podendo incluir até mesmo algumas aplicações industriais. A eficiência do sistema foi observada em parâmetros como cor, turbidez e condutividade, que apresentaram melhorias expressivas após o processo de separação.

No caso da cor e turbidez, os dados mostraram que o sistema foi capaz de eliminar completamente as partículas e compostos dissolvidos que conferem coloração ao efluente. Isso é crucial para atender às normas de reúso de água na *indústria* têxtil, setor em que a estética e a qualidade do permeado têm impacto direto na produção. Estudos como o de Serqueira (2019), reforçam essa eficácia, destacando a capacidade da osmose inversa em remover corantes e outros poluentes complexos. Além disso, a UF desempenhou um papel importante como etapa inicial, reduzindo significativamente a turbidez e contribuindo para a proteção das membranas de OI.

Quanto ao pH, as pequenas variações observadas demonstram a eficiência do sistema integrado em estabilizar esse parâmetro, mesmo com diferenças nas condições iniciais do efluente. Esse equilíbrio é essencial para evitar problemas em processos industriais sensíveis a mudanças de acidez ou alcalinidade. A condutividade, por sua vez, apresentou uma redução expressiva, indicando a remoção de íons dissolvidos que poderiam comprometer equipamentos e processos industriais. Esse desempenho condiz com os achados de Serqueira (2019), que destacam a importância da osmose inversa na obtenção de água com baixa condutividade, ideal para aplicações industriais críticas.

A determinação de DQO evidenciou a remoção de toda a matéria orgânica após o sistema de osmose inversa. Esse resultado é particularmente relevante para aplicações industriais, em que a qualidade da água reutilizada precisa atender a critérios rigorosos para evitar problemas como incrustações, crescimento microbológico e falhas nos equipamentos. Dessa forma, a eliminação total da matéria orgânica evidencia o potencial da osmose inversa como uma solução sustentável e eficaz para o reaproveitamento de água em processos industriais, contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais e o aumento da eficiência operacional.

O parâmetro cor aparente está relacionado à cor presente na amostra incluindo as partículas suspensas e coloidais. Já a cor verdadeira é mensurada em relação aos componentes que se encontram dissolvidos, ou seja, após a remoção de sólidos suspensos. Todas as amostras estudadas alcançaram remoção total de cor, aparente e real, após passarem pela associação UF-OI. Em relação à série de sólidos, também houve remoção de todos os sólidos suspensos após passagem pela OI. Observou-se também redução expressiva de sólidos dissolvidos pelo processo de OI. Os valores

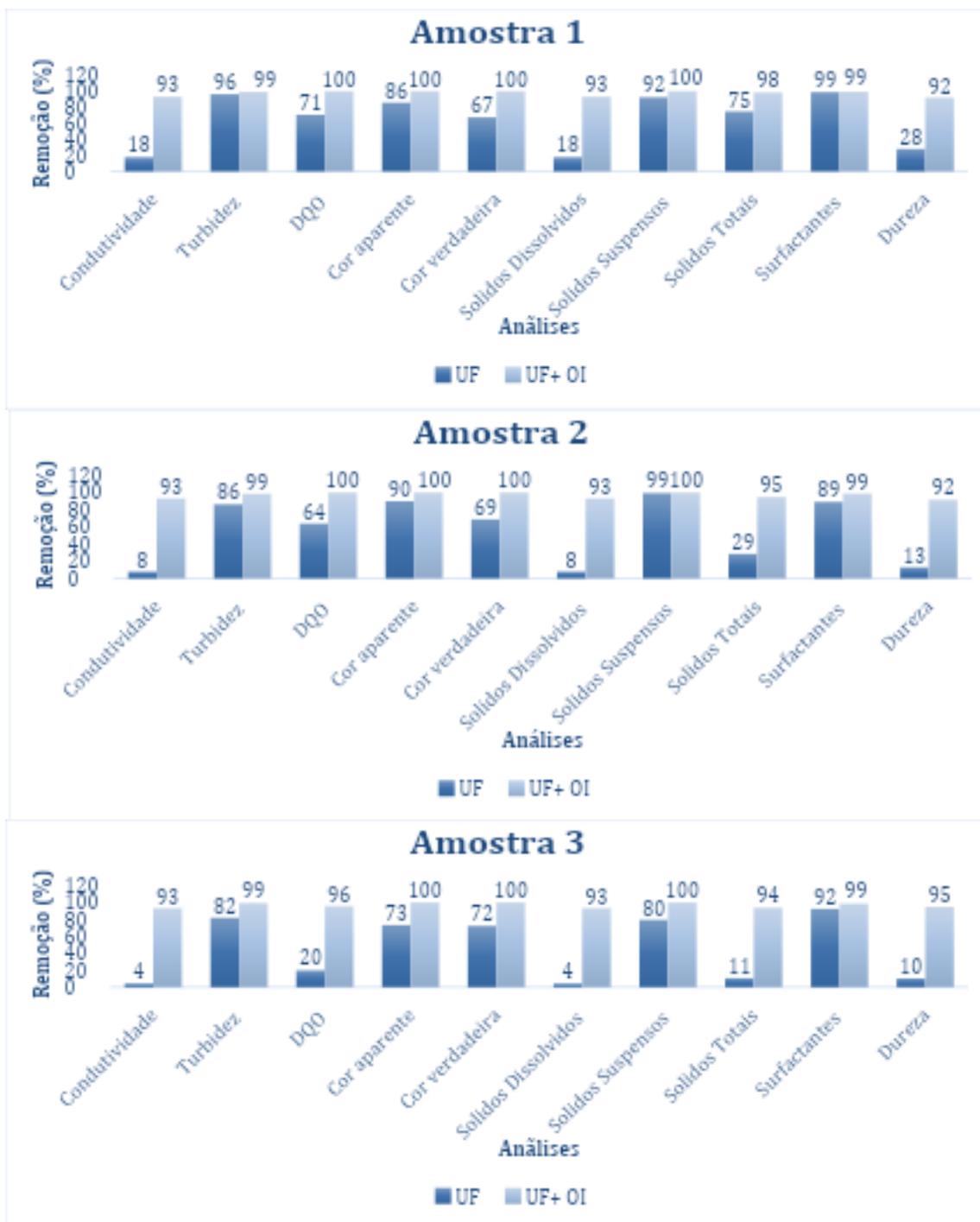
encontrados para SDT e condutividade se mostraram coerentes, pois apesar de serem análises distintas, estão relacionadas por apontar a presença de íons em solução.

A quantidade de surfactantes das amostras sofreu redução principalmente no sistema de ultrafiltração. Tal fato se mostra concordante com os resultados obtidos por Nunes (2018), que testaram a remoção de tais contaminantes em membranas menos porosas como as de microfiltração.

O processo produtivo de uma lavanderia de *jeans* utiliza muita água não somente no setor de acabamentos, mas também em caldeiras. A análise de dureza foi realizada a fim de testar a quantidade de íons presentes que possam interferir causando danos às caldeiras.

Com os dados obtidos foi possível avaliar a eficiência de remoção dos sistemas adotados em relação ao efluente bruto. Na Figura 21 são apresentados os gráficos referentes às três amostras e suas respectivas porcentagens de remoção para cada parâmetro estudado.

**Figura 21: Remoção percentual dos parâmetros avaliados nas amostras de efluente de lavanderia de jeans empregando UF e UF+OI**



Fonte: Autoria Própria. 2025

A integração das tecnologias de ultrafiltração (UF) e osmose inversa (OI) demonstrou alta eficiência na remoção de contaminantes presentes nos efluentes têxteis. Essa abordagem é consistente com estudos que destacam a eficácia das membranas no processamento de efluentes industriais. Segundo Santos e Menezes (2021), a

combinação de UF e OI pode alcançar remoções superiores a 90% de sólidos dissolvidos e compostos orgânicos, tornando o permeado adequado para nova utilização.

A UF foi eficaz na remoção de turbidez e sólidos suspensos, como também observado por Frank (2018), que destacou a eficiência desse processo na retenção de partículas e microrganismos. No entanto, a UF apresentou limitações na remoção de íons, como cloretos e sulfatos, como esperado devido as características da membrana, porém esse parâmetro foi superado pela OI. De acordo com Costa et al. (2020), a OI é essencial para a remoção de sais e compostos dissolvidos, sendo amplamente utilizada para garantir água de alta pureza, como evidenciado nos resultados deste estudo.

As diferenças nos níveis de eficiência observadas entre as amostras analisadas podem ser atribuídas às variações nas características iniciais do efluente, como concentração de sólidos dissolvidos e surfactantes. Andrade et al. (2018) relatam que efluentes com elevada carga inicial podem exigir maior esforço das membranas de UF, influenciando a eficiência do sistema. Contudo, a OI demonstrou robustez na remoção de contaminantes residuais, independentemente das condições iniciais ou das características da amostra bruta coletada.

A eliminação completa da carga orgânica pela OI confirma a eficácia do sistema na remoção de compostos orgânicos. Estudos de Costa et al. (2020) e Santos e Menezes (2021) apontam que a OI é capaz de reduzir a DQO a níveis não detectáveis, corroborando os resultados obtidos no presente trabalho. A UF reduziu a turbidez e os sólidos suspensos em mais de 90%, alinhando-se aos achados de Frank (2018). Essa etapa preliminar foi fundamental para proteger as membranas de OI contra incrustações, prolongando sua vida útil e otimizando o desempenho do sistema.

Embora a UF tenha contribuído para a redução inicial de surfactantes, a etapa de OI garantiu a completa remoção desses compostos. Martins et al. (2019) observaram resultados semelhantes, destacando a importância da integração de UF e OI para tratar efluentes com altos níveis de compostos surfactantes.

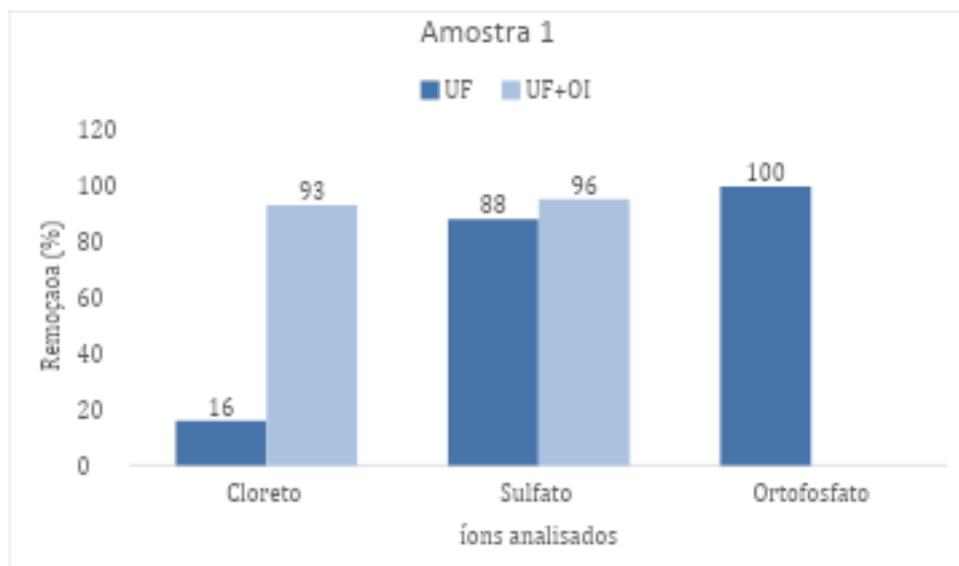
A dureza da água, causada pela presença de íons como cálcio e magnésio, é um desafio comum em processos industriais. Esses íons podem formar incrustações em equipamentos, comprometendo sua eficiência e aumentando os custos de manutenção. No presente estudo, o sistema integrado de UF e OI mostrou-se extremamente eficaz na

redução da dureza do efluente tratado, tornando-o adequado para reutilização em aplicações como alimentação de caldeiras e sistemas de refrigeração.

O sistema de UF desempenhou um papel relevante na remoção inicial de partículas e coloides associados à dureza, alcançando reduções de até 28%. Embora tenha limitações na remoção de íons dissolvidos, a UF foi fundamental para proteger as membranas de osmose inversa, como também destacado por Frank (2018). Essa etapa preliminar ajuda a prolongar a vida útil do sistema, garantindo maior eficiência ao longo do tempo. Já a osmose inversa foi responsável pela eliminação quase total de cálcio e magnésio, com taxas de remoção superiores a 95%. Esse resultado está alinhado aos estudos de Drioli e Giorno (2016), que apontam a OI como indispensável para alcançar os altos padrões de pureza necessários na indústria. Além disso, a redução da dureza contribui diretamente para prevenir problemas como incrustações, aumentando a eficiência dos processos produtivos e reduzindo custos operacionais.

Trazendo o foco para a remoção de íons na amostra 1, a UF reduziu os níveis de cloretos em aproximadamente 15%, enquanto a etapa de OI elevou a eficiência de remoção para mais de 93%, como pode ser visto na Figura 22. De maneira similar, os sulfatos foram reduzidos em cerca de 88% pela UF e praticamente eliminados pela OI (96%), evidenciando que estava majoritariamente na forma de sulfato livre. Os íons ortofosfato, que apresentavam concentrações iniciais significativas, foram completamente removidos após a etapa de OI. Esses resultados corroboram o estudo de Costa *et al.*, (2020), que relatou remoções superiores a 90% para cloretos e sulfatos em sistemas integrados de UF e OI.

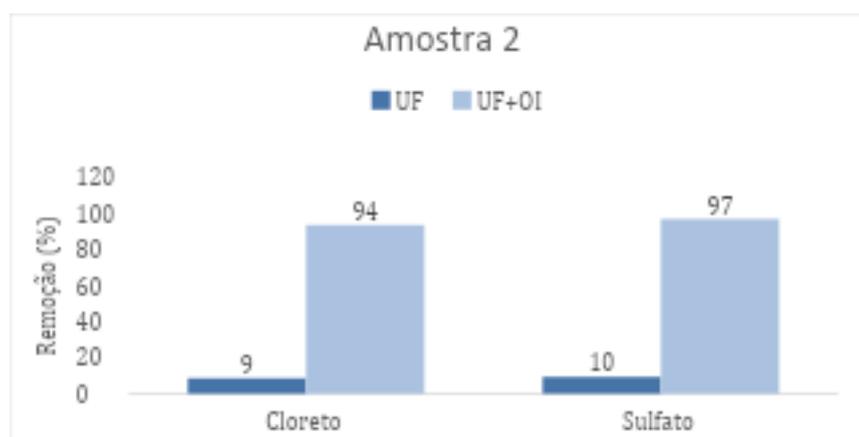
**Figura 22: Remoção percentual dos íons cloreto, sulfato e ortofosfato na Amostra 1 de efluente de lavanderia de jeans empregando UF e UF+OI**



Fonte: Autoria própria, 2025

A análise da Amostra 2 (Figura 23) indica um comportamento diferente, com a UF reduzindo os níveis de cloretos para cerca de 8,56%, enquanto a OI completou a remoção, atingindo mais de 93,58%. Para os sulfatos, a UF proporcionou uma redução inicial de 9,5%, e a OI garantiu a eliminação de 97,2%. Os ortofosfatos não foram detectados nesta amostra.

**Figura 23: Remoção percentual dos íons cloreto e sulfato na Amostra 2 de efluente de lavanderia de jeans empregando UF e UF+OI**

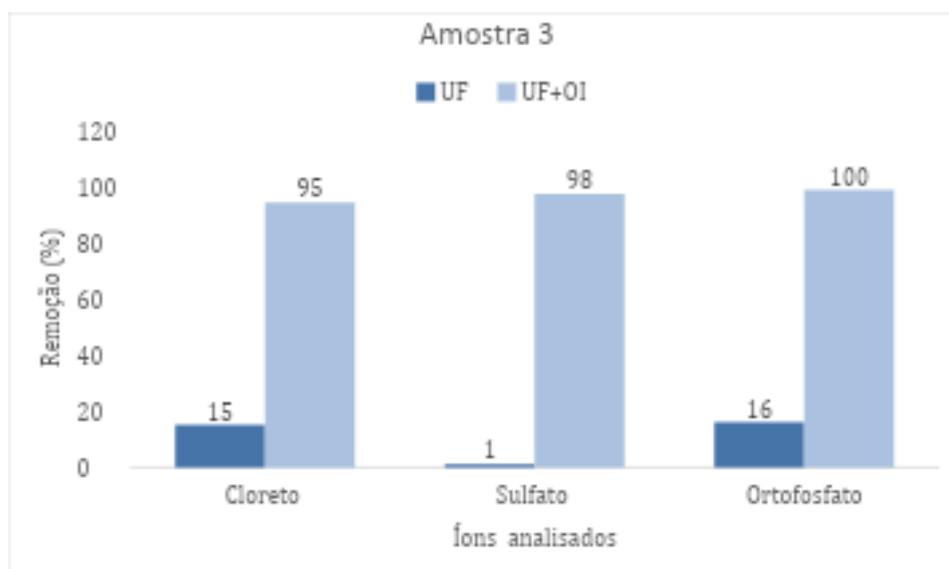


Fonte: Autoria própria, 2025

Na Amostra 3 (Figura 24), que apresentava os maiores níveis iniciais de contaminantes, a UF alcançou uma redução de 80% nos cloretos, enquanto a OI

eliminou mais de 99%. Os sulfatos tiveram comportamento consistente com as amostras anteriores, com remoções de 70% pela UF e praticamente 100% pela OI. Para os ortofosfatos, os gráficos indicam uma eliminação total após a OI, confirmando a robustez do sistema integrado. Estudos como o de Santos e Menezes (2021) também demonstraram alta eficiência da OI em casos de efluentes com elevada carga de compostos dissolvidos.

**Figura 24: Remoção percentual dos íons cloreto, sulfato e ortofosfato na Amostra 3 de efluente de lavanderia de jeans empregando UF e UF+OI**



Fonte: Autoria própria, 2025

Os resultados obtidos reforçam que a conjugação dos sistemas de UF e OI atendem aos limites estabelecidos por normas como a Resolução CONAMA n° 430/2011 para descarte e a ISO 20426:2018 (Gestão e Avaliação de Riscos para a Saúde na reutilização de água não potável). A capacidade de remover praticamente a totalidade de cloretos, sulfatos e ortofosfatos torna a água tratada viável para aplicações industriais críticas, como caldeiras, resfriamento e lavagem de tecidos, contribuindo significativamente para a sustentabilidade no setor industrial.

Estudos como os de Ferreira *et al.* (2022) e Costa *et al.* (2020) destacam ainda que a integração de UF e OI não apenas melhora a qualidade do efluente tratado, mas também otimiza custos operacionais e reduz o impacto ambiental. A remoção quase total dos íons estudados neste trabalho, evidenciada pelos dados experimentais, demonstra a eficiência e viabilidade dessas tecnologias para gestão e reúso de efluentes industriais. Os ortofosfatos, considerando que estão entre os contaminantes mais críticos

em função do seu impacto ambiental, foram praticamente eliminados na etapa de OI, apresentando remoção superior a 99%. Esse desempenho também foi observado pelos autores Santos e Menezes (2021), que apontaram a capacidade da OI separar efluentes de alta carga e de compostos dissolvidos.

A remoção eficaz destes íons garante que o permeado final esteja adequado para várias aplicações industriais, tais como lavagem de tecidos, sistemas de caldeiras e refrigeração de equipamentos. Os resultados observados reafirmam a importância da implementação de UF e OI como uma alternativa eficaz e sustentável para o manuseio de efluentes industriais (CETESB, 2013).

### **5.2.3. Avaliação da viabilidade de Reúso da água tratada pelo sistema integrado UF e OI na indústria parceira**

A indústria de *jeans* parceira, que doou amostras reais para o estudo, localizada na Região Metropolitana de Belo Horizonte, utiliza processos convencionais de tratamento de efluentes baseados em separações físico-químicas e biológicas. Essas técnicas demandam o uso intensivo de produtos químicos, como policloreto de alumínio, soda ou alcalinizante para ajuste de pH, polímeros e biocidas. Além disso, geram lodo, cujo descarte adequado implica custos adicionais. Apesar de sua eficiência básica, esses métodos são frequentemente considerados ambientalmente obsoletos, pois apenas transferem poluentes de um meio para outro, sem promover um ciclo fechado de reúso.

Os dados obtidos indicam uma redução significativa de diversos parâmetros de qualidade da água, incluindo íons como cloretos, sulfatos e ortofosfatos. Os percentuais de remoção demonstram que, na etapa de ultrafiltração (UF), houve uma redução inicial dos níveis desses íons, e que na etapa de Osmose Inversa (OI) se observou uma remoção quase completa. Essa eficiência reforça o potencial dos sistemas combinados UF e OI para atender aos padrões de reúso, como exigido pela CNI (2017) (Tabela 5), que estabelece limites para efluentes tratados. Estudos anteriores, como Ferreira et al. (2022), também destacam que a OI é essencial para garantir a remoção de sais dissolvidos, especialmente em aplicações que demandam água de alta pureza.

**Tabela 4:** Parâmetros de qualidade da água para uso na indústria têxtil

Processo/ Parâmetro	Branqueamento	Engomagem	Lavagem	Tingimento	UF	UF+OI
<b>Cor</b> (mg L <sup>-1</sup> )	5	5	5	5	Todas amostras conforme	Todas amostras conforme
<b>Dureza</b> (mg L <sup>-1</sup> )	25	25	25	25	Não conforme	Todas amostras conforme
<b>pH</b>	2,0-10,50	6,5-10,0	3,0-10,5	3,5-10,0	Todas amostras conforme	Todas amostras conforme
<b>Sólidos Totais</b> (mg L <sup>-1</sup> )	100	100	100	100	Não conforme	2 amostras conforme
<b>Sólidos Suspensos</b> (mg L <sup>-1</sup> )	5	5	5	5	2 amostras conforme	Todas amostras conforme

Fonte: Adaptado de CNI (2017)

Além disso, os resultados experimentais confirmam a relevância da separação integrada para processos industriais sensíveis, como a lavagem de tecidos e a refrigeração de equipamentos, em que presença de íons residuais pode comprometer a eficiência ou causar danos operacionais. A análise dos gráficos evidencia que o permeado final está bem abaixo dos limites exigidos para essas aplicações, tornando o sistema viável e eficiente.

Em relação à qualidade da água, o beneficiamento de *jeans* utiliza água fornecida pela COPASA, que apresenta os parâmetros de qualidade que incluem cor (limite de 15 mg L<sup>-1</sup>) e turbidez (limite de 5,0 UNT). Apesar de a água para lavagem não exigir alta qualidade, o uso de altas temperaturas (até 100°C) contribui para a esterilização, eliminando patógenos, como bactérias, vírus, fungos e esporos (Archanjo et al., 2012; Paul, 2015). Dessa forma o efluente tratado obtido, pode ser considerado apto em relação à alimentação do processo produtivo. Uma amostra de água coletada da COPASA foi analisada, considerando os mesmos parâmetros avaliados nesses estudos. Os valores obtidos estão dispostos na Tabela 5.

**Tabela 5:** Análise físico-química da água da COPASA

Unidade	Analises	Água (COPASA)	Amostra 1 UF+OI	Amostra 2 UF+OI	Amostra 3 UF+OI
-	pH	6,98±0,20	8,34±0,8	8,21±1,11	8,07±0,78
$\mu\text{s cm}^{-1}$	Condutividade	95±7	64±2	125±12	230±13
UNT	Turbidez	0,31±0,01	0,53±0,08	0,60±0,02	0,72±0,08
	DQO	<LD	<LD	<LD	<LD
	Cor aparente	<LD	<LD	<LD	<LD
	Cor verdadeira	<LD	<LD	<LD	<LD
	Sólidos Dissolvidos	61±5	42±6	81±11	149±13
	Sólidos Suspensos	<LD	<LD	<LD	<LD
	Sólidos Totais	61±5	42±6	81±11	149±13
mg L <sup>-1</sup>	Surfactantes	<LD	0,12±0,01	0,12±0,01	0,15±0,01
	Cloreto	7±1	10±1	29±2	52±1
	Sulfato	15,84± 1,66	4,2±0,4	2,58±0,22	0,84±0,01
	Ortofosfato	<LD	<LD	<LD	0,06±0,01
	Fluoreto	2,44±1	0,03±0,01	0,01±0,01	0,01±0,01
	Nitrato	1,16±0,08	<LD	<LD	<LD
	Dureza	15±1	6±1	7±1	5±1

LD\*LD (Limite de detecção): cor aparente (5 mg L<sup>-1</sup>), cor verdadeira (5,00 mg L<sup>-1</sup>), DQO (10,00 mg L<sup>-1</sup>), Ortofosfato (0,01 mg L<sup>-1</sup>), Sólidos Suspensos (2 mg L<sup>-1</sup>).

Fonte: Autoria própria, 2025

Comparados aos resultados do processo de separação por membranas, os dados obtidos a partir da aplicação de UF+OI às amostras de efluente de lavanderia de *jeans* neste estudo, evidencia-se que a combinação de UF+OI é hábil para viabilizar o reuso de efluentes de lavanderia de *jeans*. A concentração de íons presentes no permeado é menor e menos variável, além de também ter se mostrado eficiente na redução de dureza, a qual ficou menor em relação ao padrão de abastecimento. Outros parâmetros avaliados pela COPASA são o cloro, adicionado para prevenir contaminações, que pode variar até 250 mg L<sup>-1</sup> e alterar a concentração de cloreto, e, também o fluoreto, que auxilia na redução de cáries. No entanto, esses componentes têm relevância limitada para o processo de lavagem de *jeans*, porém justificam a presença de fluoreto nos cromatogramas presentes no anexo.

Em relação a estudos encontrados na literatura, a Tabela 6, apresenta o comparativo de resultados em PSM com o setor estudado ou com o mesmo processo de PSM.

Tabela 6: Parâmetros Físico-químico dos permeados encontrados na literatura

Estudo/Parâmetro		Autora (UF)	Autora (UF + OI)	Nunes (2018)	Souza (2023) UF	Souza (2023) UF+NF	Silva (2022)
<b>pH</b>	Amostra 1	8,89± 09	8,34 ± 0,08	Não avaliado	~7,5	~7,0	7,5
	Amostra 2	7,99±0,85	8,21±1,11				
	Amostra 3	6,83±0,45	8,07±0,78				
<b>Condutividade (µS/cm)</b>	Amostra 1	767±4	64±2	Redução >90%	1.200	100	Reduzida para ~70 µS/cm
	Amostra 2	1711± 34	124±12				
	Amostra 3	3320±367	229±13				
<b>Turbidez (UNT)</b>	Amostra 1	2±1	0,53±0,08	Reduzida para 0,5 UNT	10 UNT	0,5	0,3 UNT
	Amostra 2	5,90±0,34	0,60 ± 0,02				
	Amostra 3	20±2	0,72 ± 0,08				
<b>DQO (mg/L)</b>	Amostra 1	278±2	<LD*	Redução >90%, para <5 mg/L	500	10	Não avaliado
	Amostra 2	92±22	<LD *				
	Amostra 3	192±15	<LD *				
<b>Cloretos (mg/L)</b>	Amostra 1	133± 12	10 ±1	Não avaliado	50	5	Não avaliado
	Amostra 2	413±36	29±2				
	Amostra 3	908±70	52 ± 0,01				
<b>Sulfatos (mg/L)</b>	Amostra 1	11±1	4,28 ±0,4	Não avaliado	30	2	Não avaliado
	Amostra 2	78±6	2,58±0,22				
	Amostra 3	44±3	0,84 ± 0,01				
<b>Ortofosfato (mg/L)</b>	Amostra 1	<LD*	<LD*	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado
	Amostra 2	<LD*	<LD*				
	Amostra 3	12±	0,06±				
<b>Surfactantes (mg/L)</b>	Amostra 1	0,19±0,01	0,12±0,01	Redução para <0,1 mg/L	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado
	Amostra 2	1,18± 0,43	0,12±0,01				
	Amostra 3	0,84±0,02	0,15±0,02				

\*LD (Limite de detecção): DQO (10,00 mg L<sup>-1</sup>), Ortofosfato (0,01 mg L<sup>-1</sup>)

Fonte: Aatoria própria, 2025

Quando comparado ao trabalho de Nunes (2018), que utilizou membranas para tratar a água de lavadoras, é possível perceber diferenças importantes. Nunes alcançou bons resultados na remoção de turbidez (0,5 UNT e DQO (abaixo de 5 mg/L), mas com foco em aplicações menos exigentes, como o reúso doméstico. Além disso, o estudo não avaliou parâmetros como cloretos e sulfatos, o que limita sua aplicabilidade em contextos industriais mais rigorosos, como o presente estudo.

O estudo de Souza (2023), por sua vez, utilizou UF e nanofiltração (NF) para tratar efluentes de lavanderias de *jeans*. Embora os resultados sejam relevantes, a eficiência foi um pouco menor em relação ao presente estudo, especialmente na remoção de cloretos e DQO. A nanofiltração mostrou ser uma alternativa interessante em termos de custo, por operar com pressões mais baixas, mas a osmose inversa demonstrou maior eficácia na obtenção de água de alta pureza, essencial para aplicações industriais. Isso ocorre porque as membranas de osmose inversa possuem poros extremamente pequenos, capazes de reter quase todos os íons dissolvidos, moléculas orgânicas e partículas. Em contrapartida, a nanofiltração tem menor eficiência na remoção de sais monovalentes, como os cloretos. Além disso, a osmose inversa alcança uma rejeição de quase 99% dos sólidos dissolvidos totais (SDTs), garantindo a pureza necessária para processos industriais que exigem padrões rigorosos, como caldeiras e sistemas de refrigeração, em que a prevenção de incrustações e corrosão é fundamental. Embora tenha um custo operacional mais elevado, sua capacidade de remover contaminantes críticos torna essa tecnologia indispensável em situações em que a qualidade da água é uma prioridade (Santos; Menezes, 2021).

Já o trabalho de Silva (2022) apresentou um foco mais amplo, voltado para o desenvolvimento de membranas porosas aplicáveis a diferentes tipos de efluentes. Embora tenha mostrado eficiência na remoção de turbidez (0,3 NTU), o estudo não analisou compostos como DQO ou íons, que são parâmetros essenciais para o reúso na indústria têxtil. Isso faz com que sua contribuição seja mais voltada ao avanço tecnológico das membranas do que ao tratamento específico de efluentes.

De maneira geral, as análises realizadas se destacam pela abordagem mais ampla e pelos resultados consistentes em parâmetros essenciais para a possível reutilização de água em processos industriais. Enquanto os trabalhos de Nunes e Souza (2018) têm

limitações relacionadas à abrangência e à eficiência, o de Silva (2022) contribui mais para a inovação técnica. Assim, o presente trabalho demonstra o potencial de eficácia das membranas no tratamento de efluentes têxteis, mas também reforça sua importância como solução sustentável para a indústria.

## 6. CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa demonstram a eficiência do sistema integrado de ultrafiltração e osmose inversa como uma tecnologia promissora para a promoção de reúso de água na indústria, especialmente no setor têxtil. A capacidade do sistema combinado UF+OI em remover sólidos suspensos, turbidez e compostos dissolvidos, como cloretos e sulfatos, com alta eficiência, atende aos objetivos específicos do estudo e demonstra sua aplicabilidade na geração de água de alta qualidade para reúso industrial.

A caracterização do permeado por cromatografia iônica confirmou a adequação do efluente tratado para reúso em lavanderias de jeans, contribuindo para a redução do consumo de água doce e a diminuição da carga poluidora nos corpos d'água. Além dos benefícios ambientais, a implementação dessa tecnologia pode gerar ganhos econômicos significativos para as empresas, através da redução dos custos operacionais e do aumento da competitividade.

Este trabalho contribui para o avanço do conhecimento na área de separação e gerenciamento de efluentes e demonstra o potencial da tecnologia de membranas como uma solução sustentável para a indústria. No entanto, são necessárias pesquisas adicionais para avaliar o desempenho do sistema em escala industrial e para explorar outras aplicações, como o processamento e gestão de efluentes de outros setores industriais. Sugere-se, por exemplo, a análise do impacto econômico da implementação do sistema em diferentes cenários, bem como a otimização dos processos de membrana para diferentes tipos de efluentes.

Em conclusão, os resultados obtidos neste estudo evidenciam a viabilidade técnica e econômica da integração da ultrafiltração e da osmose inversa para atenuar o elevado volume de efluentes industriais, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis, a redução da pegada hídrica e a transição para uma economia circular.

## REFERÊNCIAS

- ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. *Perfil do setor*. 2024. Disponível em: < <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor> >. Acesso em: 23 de janeiro de 2024
- ABNT NBR 13969:1997. Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ABNT NBR 15527:2007. Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007
- ALVES, R. F. Tecnologias de separação por membranas: Aplicações e perspectivas no Brasil. São Paulo: Blucher, 2022.
- AMORIM, A. L. Tratamento de efluentes na indústria têxtil. São Paulo: Editora Ambiental, 2004.
- ANDRADE, L. H. et al. Advanced oxidation processes for wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, v. 338, p. 101–123, 2018.
- AOUNI, A. et al. Ultrafiltration and nanofiltration processes for the treatment of olive mill wastewater. *Desalination*, v. 204, p. 219–226, 2012.
- APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23rd ed. Washington: American Public Health Association, 2022.
- AQUAPOLO AMBIENTAL. Sobre o projeto. Disponível em: < <https://www.aquapolo.com.br/> >. Acesso em: 23 jan. 2025.
- ARCHANJO, A. et al. **Tratamento térmico em processos industriais de lavanderias**. *Revista Técnica de Engenharia Química*, v. 10, n. 4, p. 45-58, 2012.
- BARROS, L.; GONÇALVES, F. **Reúso de água em processos industriais: desafios e oportunidades**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2023.
- BARROS, P. S.; GONÇALVES, R. A. Reúso de água: Desafios e oportunidades no contexto de mudanças climáticas. *Gestão e Produção*, v. 28, n. 3, p. 123-137, 2023. DOI: 10.1590/0104-530X-1591-21.
- BUSCIO, V. et al. Comparison between conventional and advanced oxidation processes for the removal of dyes in water: Efficiency and economic study. *Journal of Cleaner Production*, v. 86, p. 36–44, 2015.
- CARVALHO, P. R. **Reúso de água na indústria têxtil: avanços e desafios**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Guia de sustentabilidade para o setor têxtil*. São Paulo: CETESB, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 5 jan. 2025.

CETESB. **Guia de Sustentabilidade para o Setor Têxtil**. São Paulo, 2022.

CHEN, H.; LI, X.; GU, G. Research on advanced treatment of dyeing wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 18, p. 1455–1462, 2011.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. Indicadores da indústria 2017. Brasília: CNI, 2017. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br>. Acesso em: 23 jan. 2025.

COHEN, E.; ROSENTHAL, A. Israel's water management: Policy and strategy. Tel Aviv: University Press, 2019.

CONAMA. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece critérios para o reúso de água no Brasil. Diário Oficial da União, Brasília, 29 nov. 2005.

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais. Relatório de atividades 2024. Belo Horizonte: COPASA, 2024. Disponível em: <https://www.copasa.com.br>. Acesso em: 15 jan. 2025.

COSTA, A. P.; ALMEIDA, J. F.; PEREIRA, M. L. O uso de membranas de osmose inversa no tratamento de efluentes industriais. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 25, n. 4, p. 321-335, 2020.

COSTA, R. M.; ROCHA, A. S. Lei das Águas e gestão sustentável de recursos hídricos. Brasília: MMA, 2019.

COSTA, R.; PEREIRA, J.; SANTOS, M. **Tratamento de efluentes por osmose inversa e ultrafiltração**. *Revista de Engenharia Ambiental*, v. 12, n. 3, p. 115-128, 2020.

COUTO, D. Tecnologias emergentes no tratamento de efluentes têxteis. Porto Alegre: Editora Universitária, 2016.

DRIOLI, E.; GIORNO, L. *Membrane Operations: Innovative Separations and Transformations*. John Wiley & Sons, 2016.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *A new textiles economy: Redesigning fashion's future*. Ellen MacArthur Foundation, 2017.

FERREIRA, A.; SILVA, P.; REZENDE, P. **Eficiência de sistemas integrados no tratamento de efluentes industriais**. *Journal of Industrial Water Management*, v. 9, n. 2, p. 45-57, 2022.

FERREIRA, L. R.; OLIVEIRA, P. S.; MARTINS, R. L. Integração de processos de membranas no tratamento de água. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2022.

- FRANK, A. Ultrafiltração no tratamento de águas residuais: fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora Engenharia, 2018.
- GOMES, L.; FERREIRA, P. Avanços no tratamento de efluentes têxteis. São Paulo: Ed. Ambiental, 2018.
- GUO, J.; MA, F.; SHEN, X. A review on advanced treatment of textile wastewater. *Journal of Cleaner Production*, v. 202, p. 129–140, 2018.
- HENZE, M.; WEGMAN, J. F.; GRAHAM, N. Biological treatment of industrial effluents. 2. ed. Berlin: Springer, 2008.
- HERNANDES, L. Aplicações da ultrafiltração e osmose inversa na indústria têxtil. São Paulo: Editora Sustentável, 2019.
- ISO 20426:2021. Water reuse for irrigation. Genebra: International Organization for Standardization, 2021.
- JI, S. et al. Technological advancements in water treatment for textile effluents. *Journal of Industrial Wastewater Treatment*, v. 25, n. 4, p. 104–118, 2021.
- KIM, T. H. et al. Effects of particle sizes on coagulation pretreatment of wastewater from a dye manufacturing plant. *Water Research*, v. 38, p. 1839–1846, 2004.
- LEVI STRAUSS & CO. *Water Less Initiative*. Disponível em: [www.levistrauss.com](http://www.levistrauss.com). Acesso em: 19 jan. 2025.
- LI, D.; JI, Y.; ZHANG, H. Sustainable water management in the textile sector. *Journal of Environmental Sustainability*, v. 35, p. 112–125, 2021.
- LIM, L. T.; CHONG, K. L. Innovative water reuse strategies for sustainable development. *Journal of Water Resources*, v. 16, p. 78–84, 2017.
- LIMA, T. C.; SANTOS, D. R. Reaproveitamento de membranas descartadas no tratamento de efluentes. *Revista Engenharia Sustentável*, v. 12, n. 3, p. 225-240, 2022.
- LOPES, G. **Estudos avançados em efluentes têxteis**. Belo Horizonte: Editora Sustentável, 2019.
- MARTINS, E. C.; RIBEIRO, F. J.; SILVA, L. G. Uso de biorreatores de membrana de ultrafiltração em efluentes industriais. *Revista Química e Engenharia Ambiental*, v. 15, n. 1, p. 12-25, 2019.
- MARTINS, T. et al. **Reúso de água tratada em processos industriais: estudo de caso**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 24, n. 3, p. 321-334, 2019.
- MEDEIROS, Anna. *Uso de métodos de desengomagem para avaliação da uniformidade de cilindros de engomadeiras na indústria têxtil*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

METCALF & EDDY. Wastewater engineering: Treatment and resource recovery. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2013.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Deliberação Normativa CERH-MG nº 65, de 18 de junho de 2020. Estabelece diretrizes, modalidades e procedimentos para o reúso direto de água não potável proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETE).

MMA (Ministério do Meio Ambiente). Programa Água Doce: diretrizes e resultados. Brasília: MMA, 2017.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Brasília: MMA, 2011.

MOURA, L. **Tratamento de efluentes e sustentabilidade**. Recife: Editora Nordestina, 2018.

MULDER, M. Basic principles of membrane technology. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic, 1996.

NATH, K. Membrane separation processes: Principles and applications. 2. ed. Nova Delhi: McGraw-Hill Education, 2017.

NUNES, Roberta Frinhani. Utilização de membranas para purificação e reúso da água de lavadoras de roupas. 2018. Disponível em:  
<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/12811/1/RobertaFrinhaniNunes-min.pdf>.

OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater**. Genebra: OMS, 2020. Disponível em:  
<https://www.who.int/>. Acesso em: 5 jan. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Transformando o Nosso Mundo. 2015. Disponível em:  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment>. Acesso em: 19 jan. 2025.

PAUL, R. *Denim: Manufacture, Finishing and Applications*. Elsevier, 2015.

PEREIRA, L. A.; SANTOS, T. R.; SOUZA, J. F. Tecnologias para tratamento de efluentes industriais: Uma revisão crítica. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 12, n. 4, p. 45-58, 2022. DOI: 10.18540/12345678.

PEREIRA, S. A. Tratamento de água do mar utilizando osmose inversa. Rio de Janeiro: Interciência, 2017.

PINTO, A. Gestão ambiental na indústria têxtil. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. QUA GROUP, 2015

QUA GROUP. Membrane filtration systems for industrial applications. India: Qua Group, 2015.

RAMUTSHATSHA, V. F.; NOMNGONGO, P. N. Removal of dyes from textile wastewater using membrane-based processes. *Environmental Technology Reviews*, v. 11, p. 65–79, 2022.

RAQUEL, F. **Compactação de membranas: desafios operacionais**. *Revista de Engenharia Química*, v. 12, p. 78-89, 2020.

SANTOS, F. L. Análise da política de reúso de água no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, p. 58–72, 2020.

SANTOS, F. L.; MENEZES, A. C. Integração de membranas de ultrafiltração e osmose inversa no tratamento de água. *Revista de Tecnologia Ambiental*, v. 18, n. 4, p. 45-55, 2021.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado da Saúde; Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01, de 13 de fevereiro de 2020. Disciplina o reúso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário.

SARAVANAN, S.; DAS, A.; SINGH, R. Advanced wastewater treatment technologies for the textile industry. *Water Research*, v. 123, p. 98–107, 2021.

SEQUEIRA, T. Reúso de água em processos industriais: Avanços e desafios. *Journal of Industrial Water*, v. 7, p. 235–248, 2019.

ŠEREŠ, Z. et al. Advances in water reuse systems for industrial applications. *Journal of Environmental Management*, v. 300, p. 113-120, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.111325.Serqueira,2019

SILVA, J. R.; COSTA, P. N. Aplicações da ultrafiltração na indústria de alimentos. *Revista Ciência dos Alimentos*, v. 9, n. 3, p. 67-78, 2020.

SILVA, Marcella Maximiano Viana. Aplicação de ultrafiltração e osmose reversa para reúso de efluente terciário como pré-tratamento na produção de água desmineralizada em indústria de papel e celulose. 2022. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br>.

SOUZA, A. L.; ALMEIDA, J. M. Desempenho de membranas de osmose inversa na produção de água ultrapura. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 19, n. 2, p. 123-135, 2019.

SOUZA, M. C. Gestão de recursos hídricos em ambientes semiáridos. 2. ed. Recife: Editora Universitária, 2021.

SOUZA, Raquel. Uso de processo de separação por membrana aplicado a efluente de lavanderia jeans para fins de reúso. 2023.

SOUZA, V. **Avanços no tratamento de efluentes da indústria têxtil**. Belo Horizonte: Editora CEFET-MG, 2020.

STRÖHER, M. et al. Evaluation of ceramic membranes for textile wastewater treatment. *Water Science and Technology*, v. 66, n. 10, p. 2204–2212, 2012.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. *Metcalf & Eddy: Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

TIOSSI, R.; SIMON, P. Economia Circular: Um modelo para o futuro. *Gestão Sustentável*, v. 3, p. 112–128, 2021.

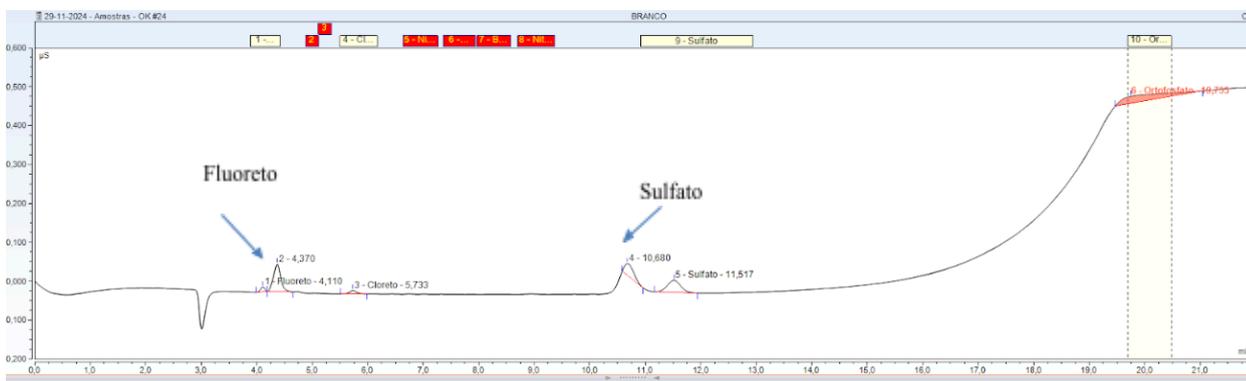
VERMA, A. K.; DASH, R. R.; BHUNIA, P. Removal of dyes using advanced oxidation processes. *Journal of Environmental Management*, v. 92, p. 218–249, 2012.

VICUNHA TÊXTIL. Sustentabilidade e eficiência no uso de recursos hídricos. São Paulo: Vicunha Têxtil, 2019. Disponível em: <https://www.vicunha.com.br>. Acesso em: 23 jan. 2025.

WNCHHOLZ, F. Processos de tratamento de efluentes na indústria têxtil. 2023. Disponível em: <https://www.industriatextil.com.br>. Acesso em: 23 jan. 2025

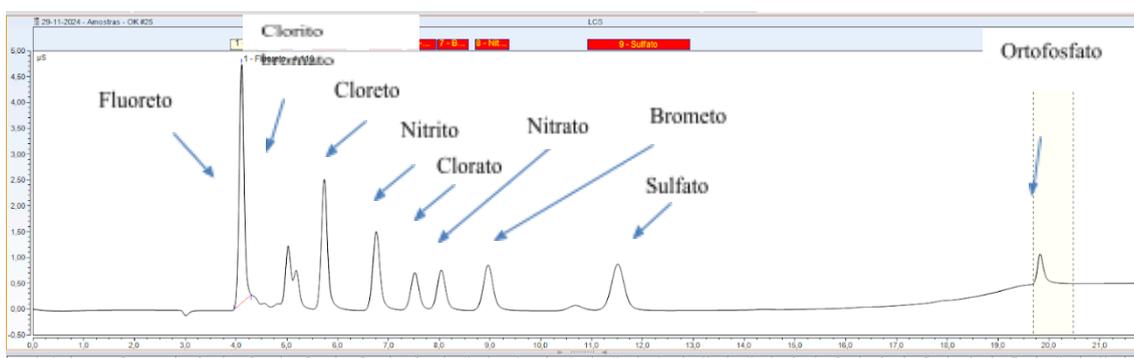
## APÊNDICE

**Figura 25: Cromatograma do Branco analisado (Água Ultra pura)**



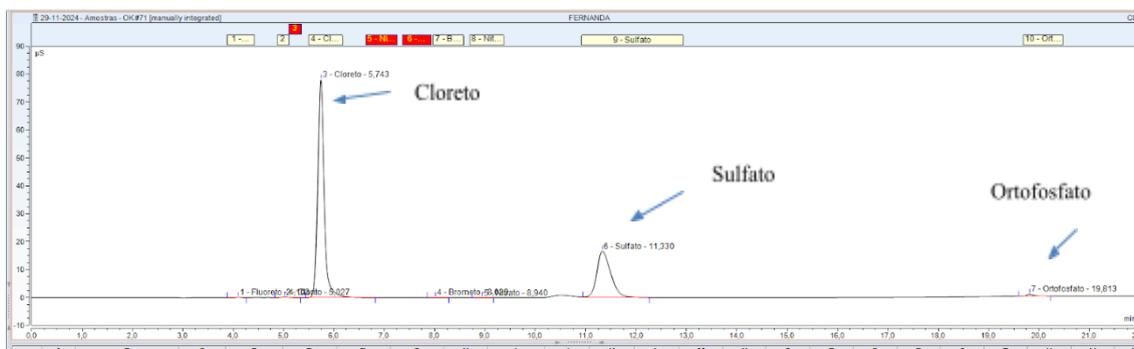
Fonte: Autoria própria, 2025

**Figura 26: Cromatograma do padrão de referência (Specsol)**



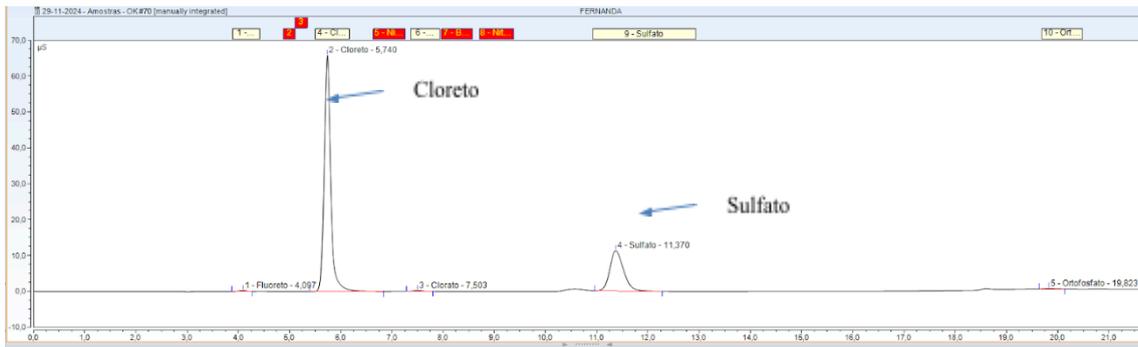
Fonte: Autoria própria, 2025

**Figura 27: Amostra 1 - Efluente Bruto**



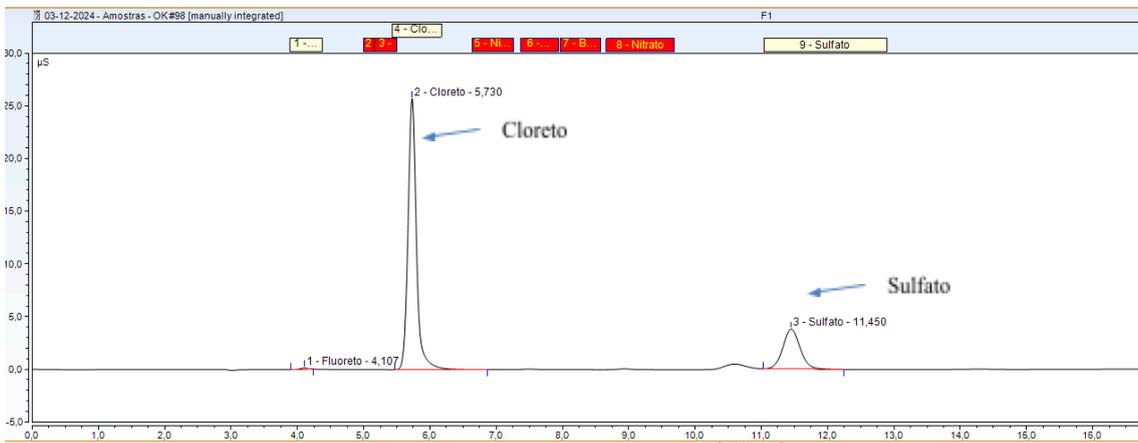
Fonte: Autoria própria, 2025

**Figura 28: Amostra 1 - Permeado da UF**



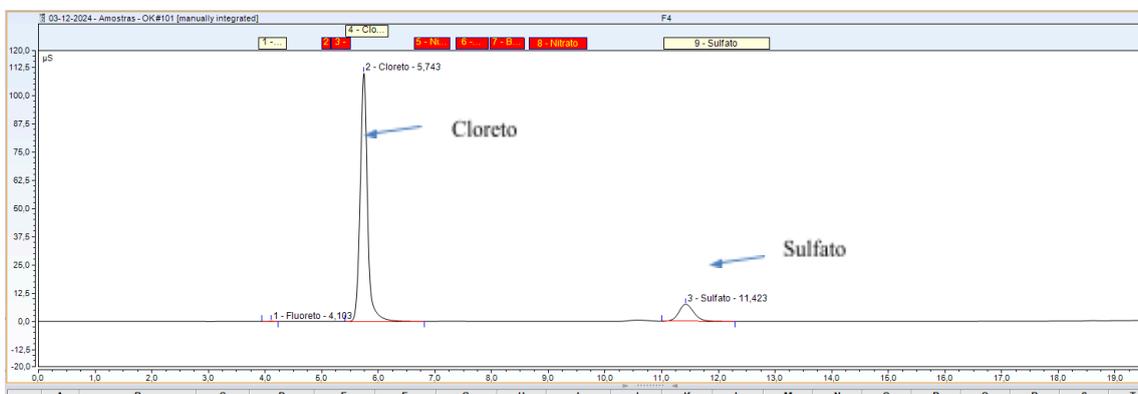
Fonte: Autoria própria, 2025

**Figura 29: Amostra 1 - Permeado da UF+OI**



Fonte: Autoria própria, 2025

**Figura 30: Amostra 2 - Efluente Bruto**



Fonte: Autoria própria, 2025

**Figura 31: Amostra 2 - Permeado da UF**



Fonte: Autoria própria, 2025

**Figura 32: Amostra 2 - Permeado da UF+OI**



Fonte: Autoria própria, 2025

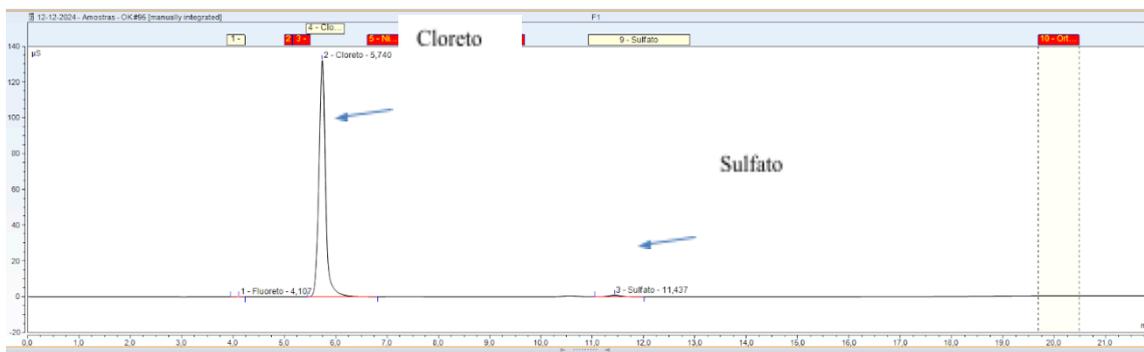
**Figura 33: Amostra 3 - Efluente Bruto**



Fonte: Autoria própria, 2025

**Figura 34: Amostra 3 - Permeado da UF**

Fonte: Autoria própria, 2025

**Figura 35: Amostra 3 - Permeado da UF+OI**

Fonte: Autoria própria, 2025

**Planejamento e execução da curva de calibração da Cromatografia Iônica**

<b>Pontos</b>	<b>Íons/ concentração</b>	<b>Cloreto</b>	<b>Sulfato</b>	<b>Ortofosfato</b>	<b>Fluoreto</b>	<b>Nitrito</b>	<b>Nitrato</b>	<b>Clorato</b>	<b>Clorito</b>	<b>Brometo</b>	<b>Bromato</b>
<b>1</b>	0,010	0,101	0,510	0,041	0,009	0,090	0,012	0,011	0,060	0,012	0,012
<b>2</b>	0,020	0,119	0,061	0,032	0,016	0,021	0,018	0,021	0,010	0,023	0,026
<b>3</b>	0,050	0,128	0,080	0,048	0,043	0,048	0,065	0,048	0,042	0,049	0,049
<b>4</b>	0,100	9,160	0,117	0,103	0,090	0,098	0,120	0,096	0,089	0,060	0,098
<b>5</b>	0,250	0,323	0,279	0,258	0,232	0,244	0,272	0,239	0,221	0,241	0,248
<b>6</b>	0,500	0,593	0,517	0,449	0,505	0,500	0,523	0,487	0,491	0,488	0,482
<b>7</b>	1,000	1,005	0,958	0,928	0,987	0,990	0,982	0,967	0,964	0,968	0,993
<b>8</b>	2,000	1,999	1,985	1,944	2,033	2,004	1,986	1,976	1,986	1,975	1,965
<b>9</b>	5,000	2,978	2,956	2,937	3,025	2,984	2,909	2,965	2,974	2,967	2,670
<b>10</b>	5,000	4,996	5,034	5,081	4,974	5,010	5,023	5,039	5,031	5,038	5,037
<b>11</b>	10,000	10,053	10,092	9,174	10,650	11,279	9,965	9,906	10,761	9,870	10,624
<b>12</b>	20,000	20,089	20,073	18,240	20,196	21,813	19,989	20,014	21,154	19,974	21,665
<b>13</b>	30,000	29,237	23,321	29,520	31,840	30,818	29,151	29,231	30,196	29,179	30,831
<b>14</b>	40,000	40,074	40,093	40,593	40,685	40,835	40,042	40,111	40,363	40,098	41,240
<b>15</b>	50,000	49,799	49,817	50,396	49,768	49,467	49,810	49,797	49,730	49,828	49,678
<b>16</b>	60,000	60,452	60,388	59,888	58,554	58,590	90,561	60,488	50,149	60,518	58,318
<b>Coefficiente linear</b>		<b>0,9996</b>	<b>0,9997</b>	<b>0,9992</b>	<b>0,9998</b>	<b>0,9999</b>	<b>0,9997</b>	<b>0,9998</b>	<b>0,9998</b>	<b>0,9998</b>	<b>0,9998</b>

Fonte: Autoria própria, 2025