



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE – UFS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

## **Tratamento Primário da Água Produzida com Coagulação Lastreada utilizando Microareia**

Derivania Silva de Jesus

SÃO CRISTÓVÃO, 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE – UFS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

## **Tratamento Primário da Água Produzida com Coagulação Lastreada utilizando Microareia**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de Engenharia  
Ambiental da Universidade Federal de  
Sergipe, como parte integrante dos  
requisitos para obtenção de título de  
Bacharel em Engenharia Ambiental e  
Sanitária.

---

Orientador(a)

Derivania Silva de Jesus

SÃO CRISTÓVÃO, 2026

Trabalho apresentado e aprovado em 10 de agosto de 2026, pelo Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Sergipe para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

---

Prof. Dr. Jefferson Arlen Freitas

Orientador

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Jefferson Arlen Freitas

Universidade Federal de Sergipe – DEAM

---

Prof. Dra. Rosivania da Paixão Silva

Oliveira

Universidade Federal de Sergipe – DEPET

---

Prof. Dr. José Jailton Marques

Universidade Federal de Sergipe – DEAM

## SUMÁRIO

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                   | <b>1</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS .....</b>                                                    | <b>4</b>  |
| 2.1. Geral .....                                                             | 4         |
| 2.2. Específicos .....                                                       | 4         |
| <b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                         | <b>5</b>  |
| 3.1. Água Produzida: origem e definição.....                                 | 5         |
| 3.2. Volume de produção.....                                                 | 6         |
| 3.3. Composição da água produzida por região.....                            | 9         |
| 3.4. Tratamento da Água Produzida.....                                       | 15        |
| 3.4.1. Coagulação/floculação e sedimentação .....                            | 18        |
| 3.4.2. Coagulação/floculação lastreada e sedimentação .....                  | 22        |
| 3.4.3. Coagulantes .....                                                     | 24        |
| <b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                          | <b>26</b> |
| 4.1. Água Produzida .....                                                    | 26        |
| 4.2. Caracterização da água produzida (AP) .....                             | 27        |
| 4.3. Ensaio de Coagulação/Floculação de Água Produzida.....                  | 27        |
| 4.3.1. Preparo das Soluções de Sulfato de Alumínio e Hidróxido de Sódio..... | 27        |
| 4.3.2. Material de lastro.....                                               | 28        |
| 4.3.3. Ajuste do pH da Água Produzida .....                                  | 28        |
| 4.3.4. Ensaio de Jar Test.....                                               | 28        |
| <b>5. RESULTADO E DISCUSSÃO.....</b>                                         | <b>31</b> |
| 5.1. Caracterização da água produzida (AP) .....                             | 31        |
| 5.2. Tratamento da Água Produzida (AP).....                                  | 34        |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.1. Tratamento convencional com sulfato de alumínio para remoção de turbidez .....                                                     | 34 |
| 5.2.2. Tratamento convencional lastreado com microareia e com o coagulante sulfato de alumínio para remoção de turbidez. ....             | 37 |
| 5.2.3. Comportamento do tratamento convencional em relação aos ST e SS .....                                                              | 40 |
| 5.2.4. Comportamento do tratamento convencional, apenas com o sulfato de alumínio e em conjunto com a microareia em relação aos SST. .... | 43 |
| 5.2.5. Comportamento do tratamento em relação a remoções de Turbidez e de SST .....                                                       | 46 |
| 6. CONCLUSÃO.....                                                                                                                         | 49 |
| 7. RECOMENDAÇÕES.....                                                                                                                     | 50 |
| REFERÊNCIAS .....                                                                                                                         | 51 |

## RESUMO

A água produzida (AP) é o efluente da indústria petrolífera produzido em maior volume nas atividades de exploração e produção (*upstream*) de petróleo. Além do alto volume gerado, apresenta em sua composição diversos contaminantes, como compostos orgânicos, inorgânicos e metálicos provenientes da formação geológica do reservatório e dos aditivos químicos inseridos durante o processo de produção. Em razão de sua composição, esse efluente requer tratamento adequado antes da reinjeção nos poços, para fins de estimulação da produção, ou do lançamento em corpos hídricos, visando mitigar possíveis impactos associados ao seu descarte e garantir o cumprimento da legislação ambiental vigente. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho da coagulação/floculação convencional, utilizando sulfato de alumínio (coagulante), e da coagulação/floculação lastreada com microareia no tratamento primário da água produzida proveniente do campo petrolífero de Carmópolis, Sergipe. Os ensaios foram realizados em *jar test*, empregando sulfato de alumínio ( $0,2 \text{ g.L}^{-1}$ ), em pH 7,0 e 9,0, exclusivamente com o agente coagulante e associado à microareia ( $0,5 \text{ g.L}^{-1}$  e  $5,0 \text{ g.L}^{-1}$ ). Os resultados demonstraram elevada eficiência na remoção de turbidez, variando de 86,45 % - 98,39%, sendo os melhores desempenhos obtidos nas condições lastreadas em pH 9,0. A incorporação da microareia favoreceu a formação de flocos mais densos e sedimentáveis e, em ambas as dosagens avaliadas, o desempenho de remoção de turbidez foi semelhante, indicando potencial para a redução do consumo de insumos, sem prejuízo à eficiência do tratamento. Em relação aos sólidos suspensos totais (SST), verificou-se redução após o tratamento, embora em menor magnitude quando comparado à remoção de turbidez, evidenciando que esses parâmetros devem ser interpretados de forma complementar na avaliação da eficiência do processo. Assim, conclui-se que a coagulação/floculação convencional e a coagulação/floculação lastreada com microareia constituem alternativas promissoras para o tratamento da água produzida. Entre as condições avaliadas, o tratamento conduzido em pH, 9,0, utilizando sulfato de alumínio ( $0,2 \text{ g.L}^{-1}$ ) e microareia ( $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ ). apresentou melhor equilíbrio entre eficiência de remoção de turbidez e consumo de insumos.

**Palavras-chave:** Água produzida. Coagulação/floculação. Microareia. Turbidez. Sólidos Suspensos.

## ABSTRACT

Produced water (PW) is the effluent from the oil industry produced in the largest volume during upstream oil exploration and production activities. In addition to the high volume generated, its composition includes various contaminants, such as organic, inorganic, and metallic compounds originating from the geological formation of the reservoir and chemical additives added during the production process. Due to its composition, this effluent requires adequate treatment before reinjection into wells for production stimulation purposes, or before discharge into water bodies, aiming to mitigate potential impacts associated with its disposal and compliance with current environmental legislation. In this context, this study aimed to evaluate the performance of conventional coagulation/flocculation, using aluminum sulfate (coagulant), and coagulation/flocculation ballasted with microsand in the primary treatment of produced water from the Carmópolis oil field, Sergipe. The tests were carried out in a Jar Test, using aluminum sulfate ( $0.2 \text{ g.L}^{-1}$ ), at pH 7.0 and 9.0, exclusively with the coagulant agent and associated with microsand ( $0.5 \text{ g.L}^{-1}$  and  $5.0 \text{ g.L}^{-1}$ ). The results demonstrated high efficiency in turbidity removal, ranging from 86.45% to 98.39%, with the best performance obtained under conditions ballasted at pH 9.0. The incorporation of microsand favored the formation of denser and more settleable flocs, and in both dosages evaluated, the turbidity removal performance was similar, indicating potential for reducing input consumption without compromising treatment efficiency. Regarding total suspended solids (TSS), a reduction was observed after treatment, although to a lesser extent compared to turbidity removal, highlighting that these parameters should be interpreted complementarily in evaluating the efficiency of the process. Thus, it is concluded that conventional coagulation/flocculation and microsand-based coagulation/flocculation constitute promising alternatives for the treatment of Produced water. Among the conditions evaluated, the treatment conducted at pH 9.0, using aluminum sulfate ( $0.2 \text{ g.L}^{-1}$ ) and microsand ( $0.5 \text{ g.L}^{-1}$ ), presented the best balance between turbidity removal efficiency and input consumption.

**Keywords:** Produced water. Coagulation/flocculation. Microsand. Turbidity. Suspended solids.

## LISTA DE ABREVIATURAS

|        |                                                            |
|--------|------------------------------------------------------------|
| AP     | Água Produzida                                             |
| ANP    | Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível |
| AP – B | Água Produzida Bruta                                       |
| AS     | Sulfato de Alumínio                                        |
| BETEX  | Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos                    |
| CONAMA | Conselho Nacional de Meio Ambiente                         |
| CE     | Condutividade Elétrica                                     |
| CF     | Cloreto Férrico                                            |
| COVs   | Compostos Orgânicos Voláteis                               |
| DEAM   | Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária           |
| DQO    | Demanda Química de Oxigênio                                |
| ETA    | Estação de Tratamento de Água                              |
| HAPAs  | Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos                    |
| ND     | Não foi Determinado                                        |
| PAC    | Policloreto de Alumínio                                    |
| POAs   | Processos Oxidativos Avançados                             |
| pH     | Potencial de Hidrogênio                                    |
| TOG    | Teor de Óleos e Graxas                                     |
| SS     | Sólidos sedimentáveis                                      |
| TS     | Sólidos Totais                                             |
| TDS    | Sólidos Totais Dissolvidos                                 |
| TSS    | Sólidos Totais Suspensos                                   |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> - Design típico de um reservatório de petróleo e gás natural.....                                                                        | 5  |
| <b>Figura 2</b> - Produção global de AP com projeção estimada até 2030.....                                                                              | 6  |
| <b>Figura 3</b> – Produção nacional de AP no período de 2009 a 2025. ....                                                                                | 7  |
| <b>Figura 4</b> - Produção de AP e óleo em Sergipe no período de 2009 a 2025.....                                                                        | 7  |
| <b>Figura 5</b> - Produção de AP no período de 2009 a 2025 para campo Carmópolis/SE.....                                                                 | 8  |
| <b>Figura 6</b> - Perfil de produção de óleo e AP em reservatórios convencionais e não convencionais. ....                                               | 9  |
| <b>Figura 7</b> - Fluxograma dos processos e técnicas empregados no tratamento de água produzida .....                                                   | 16 |
| <b>Figura 8</b> - Estrutura da dupla camada elétrica. ....                                                                                               | 19 |
| <b>Figura 9</b> - Mecanismos de coagulação/floculação: (A) Neutralização de cargas, (B) Varredura e adsorção (C) Formação de pontes interpartículas..... | 20 |
| <b>Figura 10</b> - Coagulação/floculação lastreada com microareia. ....                                                                                  | 22 |
| <b>Figura 11</b> - Mapa de localização do Campo Petrolífero de Carmópolis no estado de Sergipe. ....                                                     | 26 |
| <b>Figura 12</b> - Procedimento experimental realizado em escala de bancada <b>Erro! Indicador não definido.</b>                                         |    |
| <b>Figura 13</b> - Remoção de turbidez da água produzida apenas com o agente coagulante. ....                                                            | 36 |
| <b>Figura 14</b> - Remoção de turbidez da AP com o tratamento lastreada em pH do meio igual a 7,0. ....                                                  | 39 |
| <b>Figura 15</b> - Remoção de turbidez da AP com o tratamento lastreada em pH do meio igual a 9,0. ....                                                  | 39 |
| <b>Figura 16</b> - Imagem dos flocos dispersos no efluente em pH 7,0 após 30 min sedimentação. ....                                                      | 45 |
| <b>Figura 17</b> - Imagem dos flocos dispersos no efluente em pH 9,0 após 30 min sedimentação                                                            | 46 |
| <b>Figura 18</b> - Recipientes com óleos, graxas e sólidos retidos nas paredes. ....                                                                     | 48 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> - Composição iônica de quatro campos produtores de petróleo do Mar do Norte Dinamarquês.....                                                                                  | 10 |
| <b>Tabela 2</b> - Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) presentes na água produzida do Mar do Norte, Golfo do México, Plataforma Continental Escocesa e Grandes Bancos, Canadá ..... | 12 |
| <b>Tabela 3</b> - Diferentes metais presentes na água produzida do Mar do Norte, Golfo do México, Plataforma Continental Escocesa e Grandes Bancos, Canadá .....                              | 13 |
| <b>Tabela 4</b> - Componentes da água produzida nos estados do Rio Grande do Norte e Sergipe.                                                                                                 | 14 |
| <b>Tabela 5</b> - Determinados compostos orgânicos presentes na água produzida numa escala global .....                                                                                       | 15 |
| <b>Tabela 6</b> - Procedimento experimental.....                                                                                                                                              | 30 |
| <b>Tabela 7</b> - Caracterização da água produzida do campo petrolífero de Carmópolis/SE. ....                                                                                                | 31 |
| <b>Tabela 8</b> - Turbidez residual e percentual de remoção com a aplicação de 0,2 g.L <sup>-1</sup> do agente coagulante.....                                                                | 35 |
| <b>Tabela 9</b> - Representação dos valores de sólidos totais (ST).....                                                                                                                       | 41 |

## 1. INTRODUÇÃO

Durante a extração de petróleo de reservatórios subterrâneos, realizada por meio da perfuração de poços em operações *onshore* e *offshore*, o fluido produzido chega à superfície sob a forma de uma mistura de água, óleo e gás (Amakiri *et al.*, 2022). Na superfície, essas três fases são separadas, de modo que o gás e o óleo são encaminhados às unidades de processamento, enquanto a fração aquosa é direcionada às estações de tratamento. Posteriormente, essa água pode ser reinjetada nos poços ou descartada em corpos hídricos (Junior *et al.*, 2023).

Essa fração aquosa, denominada água produzida, provém tanto da água naturalmente presente nas formações rochosas quanto da água injetada nos poços durante as atividades de perfuração e produção de petróleo (Beyer *et al.*, 2020). Em razão das características próprias das operações petrolíferas, esse efluente é gerado em grandes volumes, constituindo o efluente produzido em maior escala pela indústria petrolífera (Klemz *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021).

Além do elevado volume de geração, a composição da água produzida contribui para sua caracterização como efluente oleoso. Entre os compostos orgânicos presentes, destacam-se os hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos, os asfaltenos e as resinas (Goswami *et al.*, 2023). Esse efluente também contém espécies inorgânicas, como cloretos, sulfetos e outras formas de enxofre, além de íons metálicos, a exemplo de bário, zinco, ferro e manganês (Liu *et al.*, 2021).

Essa composição química complexa, associada ao elevado volume gerado, faz com que o descarte da água produzida em ambientes aquáticos ou terrestres possa ocasionar impactos significativos aos ecossistemas. Quando lançada em corpos hídricos, por exemplo, a água produzida pode contribuir para o acúmulo de materiais radioativos, como o rádio (Ra), nos sedimentos aquáticos e em organismos bentônicos (Pankratz e Warner, 2024).

Somam-se a esse impacto os efeitos decorrentes da presença de compostos tóxicos nos efluentes oleosos. Quando descartados em corpos hídricos, esses componentes podem comprometer a qualidade da água, afetar a saúde dos organismos e promover a perda da biodiversidade no ecossistema receptor (Tudararo-Aherobo e Egieya, 2023). No ambiente terrestre, o contato com esse efluente pode provocar a compactação do solo e dificultar a respiração dos organismos presentes nesse meio (Zhao *et al.*, 2020).

Diante desses potenciais impactos, torna-se imprescindível que o lançamento da água produzida atenda aos padrões de emissão estabelecidos pela legislação ambiental vigente. Essa medida é fundamental para reduzir os riscos associados ao descarte desse efluente e preservar a qualidade dos ecossistemas aquáticos e terrestres.

No Brasil, o atendimento a essas exigências requer a observância das resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), especialmente da Resolução CONAMA nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água, o enquadramento e as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementada e alterada pela Resolução CONAMA nº 430/2011. Especificamente para o descarte contínuo de água produzida em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, deve-se considerar também a Resolução CONAMA nº 393/2007, que estabelece condições, padrões e exigências para essa prática.

Assim, para atender à legislação vigente e minimizar os impactos ambientais decorrentes do descarte da água produzida, é fundamental que esse efluente seja submetido a um tratamento adequado antes de seu lançamento no corpo receptor. Com essa finalidade, diversas técnicas de tratamento têm sido estudadas e aplicadas, podendo ser classificadas em processos convencionais e não convencionais (Silva *et al.*, 2022).

Entre os processos convencionais, a coagulação/floculação, geralmente empregada como etapa do tratamento primário, destaca-se por sua ampla aplicação no tratamento de águas residuárias. Sua utilização está relacionada à eficiência na remoção de contaminantes e à relação custo-benefício favorável (Das *et al.*, 2023). Entretanto, buscando aprimorar a formação e a sedimentação dos flocos, a coagulação/floculação lastreada tem sido investigada como uma alternativa ao processo convencional.

Essa técnica consiste na adição de um agente de lastro, como a microareia, ao sistema convencional de tratamento. A presença desse material favorece a formação de flocos maiores e mais densos, contribuindo para o aumento de sua velocidade de sedimentação e para a melhoria da separação sólido-líquido (Cui *et al.*, 2020).

O desempenho desses processos depende, entre outros fatores, da seleção adequada do coagulante e do agente de lastro. Nesse sentido, diversos coagulantes têm sido empregados no tratamento de efluentes oleosos, destacando-se os coagulantes químicos metálicos, como os sulfatos e cloretos de ferro e de alumínio, além dos compostos poliméricos (Amakiri *et al.*, 2022; Junior *et al.*, 2023). Entre os coagulantes químicos mais utilizados no tratamento de águas residuárias, destaca-se o sulfato de alumínio (AS), devido à sua relação custo-benefício, facilidade de aquisição e eficiência na remoção de contaminantes (Jagaba *et al.*, 2020).

Diante desse cenário, este trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho dos processos de coagulação/floculação convencional e de coagulação/floculação lastreada, ambos seguidos da etapa de sedimentação, no tratamento de água produzida gerada nas atividades de *upstream* da indústria petrolífera.

Para atingir esse objetivo, foram conduzidos ensaios de coagulação/floculação convencional e lastreada, seguidos da etapa de sedimentação, utilizando amostras de água produzida provenientes de um campo petrolífero localizado no município de Carmópolis, estado de Sergipe. No tratamento convencional, empregou-se o sulfato de alumínio (AS) como coagulante químico, enquanto, no processo lastreado, adicionou-se microareia como agente de lastro. A eficiência de ambos os tratamentos foi avaliada com base na remoção de sólidos suspensos totais (SST).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Avaliar o desempenho dos processos convencional e lastreado de coagulação/floculação, seguidos da etapa de sedimentação, no tratamento primário de água produzida (AP) proveniente do campo petrolífero de Carmópolis, localizado no estado de Sergipe.

### **2.2. Específicos**

- Caracterizar a água produzida (AP) proveniente do campo petrolífero de Carmópolis, localizado no estado de Sergipe.
- Realizar ensaios de coagulação/floculação convencional e de coagulação/floculação lastreada, seguidos da etapa de sedimentação, no tratamento da AP.
- Comparar a eficiência dos processos de coagulação/floculação convencional e lastreado quanto à remoção de sólidos suspensos totais (SST).

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este item apresenta uma revisão sobre a origem, a geração e a complexidade composicional da água produzida (AP), menciona as principais técnicas empregadas em suas etapas de tratamento primário, secundário e terciário. Confere-se ênfase aos processos convencionais de coagulação/floculação e àqueles assistidos por microareia, tema do presente trabalho de conclusão de curso, incluindo os coagulantes mais utilizados nessas operações.

#### 3.1. Água Produzida: origem e definição

Os principais produtos da exploração e produção de petróleo são o óleo e o gás natural. Entretanto, essas atividades também geram volumes expressivos de água produzida (AP), definida pela Resolução CONAMA nº 393/2007 como a “água normalmente produzida junto com o petróleo” (Candido *et al.*, 2021; CONAMA, 393/2007, p. 1). Essa corrente é constituída principalmente pela água de formação, naturalmente retida nos poros das rochas reservatórias e associada aos hidrocarbonetos (Figura 1) (Al-Ghouti, 2019), e pela água previamente injetada para a manutenção da pressão ou a estimulação dos poços, que retorna à superfície durante a produção.

**Figura 1-** Design típico de um reservatório de petróleo e gás natural



Fonte: Candido *et al.* (2021).

A água destinada à injeção pode ser captada em mananciais superficiais, como rios e lagos, em fontes subterrâneas, como poços freáticos e artesianos, ou adquirida de concessionárias públicas e empresas privadas. Na Petrobras, esses recursos são utilizados nas atividades de exploração e produção de petróleo e gás (Petrobras, 2023). Após o tratamento, a água recuperada pode ser reinjetada nos reservatórios em estado líquido ou na forma de vapor,

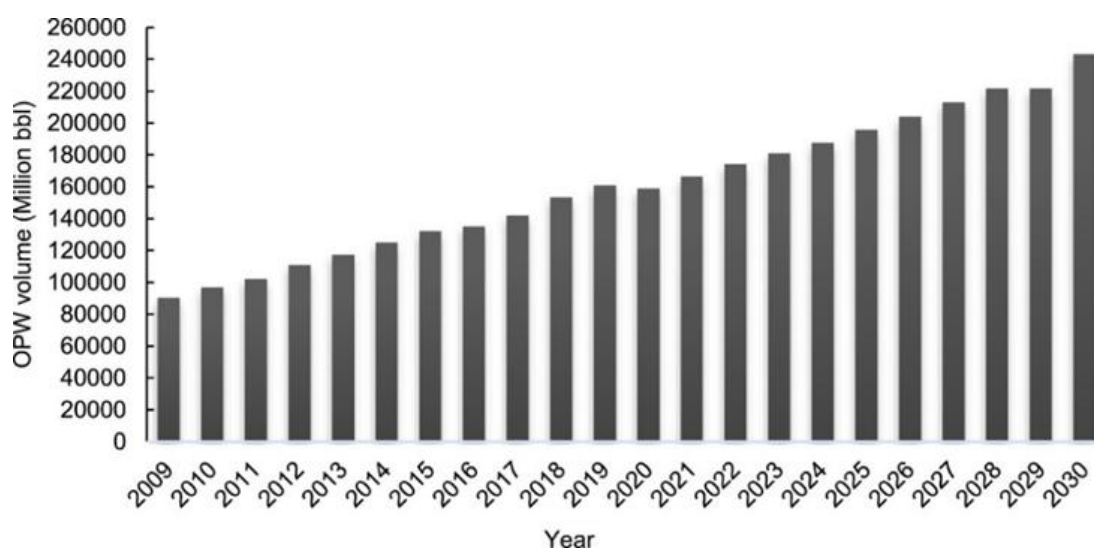
contribuindo para a continuidade e o aumento da produção (Dudek *et al.*, 2020). Na literatura, a água produzida também é denominada água residual de petróleo (Ullattumpoyil, 2023).

### 3.2. Volume de produção

A água produzida (AP) constitui um efluente inerente às atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural (Dudek *et al.*, 2020; Eyitayo *et al.*, 2023). Seu volume é influenciado pelas características da rocha-mãe (Al-Ghouti *et al.*, 2019), pelas condições dos poços (Eyitayo *et al.*, 2023), pela quantidade de água injetada nos reservatórios (Seif *et al.*, 2024) e pelo acúmulo de águas pluviais nas áreas de exploração e produção (Rajbongshi *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a geração de AP tem aumentado significativamente ao longo dos anos, conforme indicado pela projeção global apresentada na Figura 2 (Amakiri *et al.*, 2023).

**Figura 2** - Produção global de AP com projeção estimada até 2030.



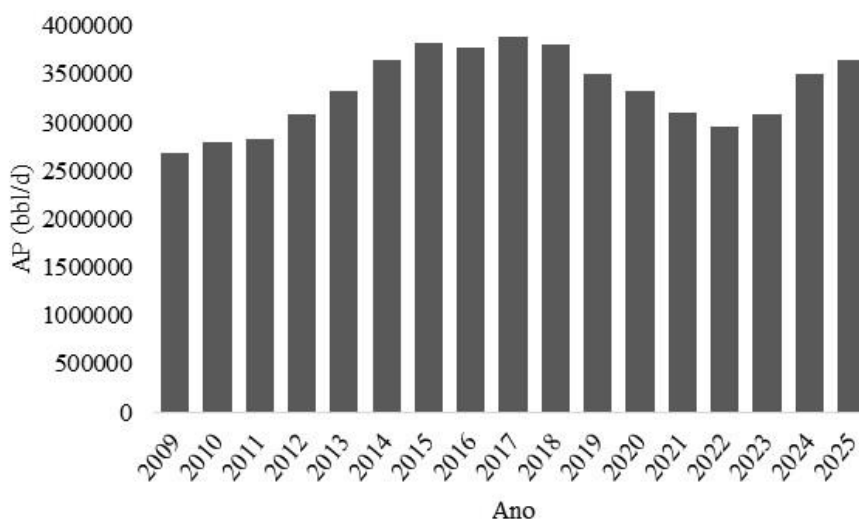
Fonte: *Produced Water Society* (2020), *apud* Amakiri *et al.* (2023).

Ao observar o gráfico da Figura 2, verifica-se que a estimativa do volume global de água produzida (AP) para 2030 corresponde a aproximadamente o dobro do valor registrado em 2014. Segundo Amakiri *et al.* (2023), esse crescimento está associado ao aumento da demanda mundial por combustíveis fósseis.

No Brasil, dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) também evidenciam a evolução do volume de AP, conforme apresentado na Figura 3, embora com comportamento distinto daquele observado no cenário global. Em 2014, o volume nacional foi de aproximadamente 3.652.449,95 barris por dia (bbl/d), enquanto, no início de

2025, alcançou cerca de 3.650.719,14 bbl/d (ANP, 2025), configurando uma dinâmica diferente da tendência global indicada por Amakiri *et al.* (2023) (Figura 2).

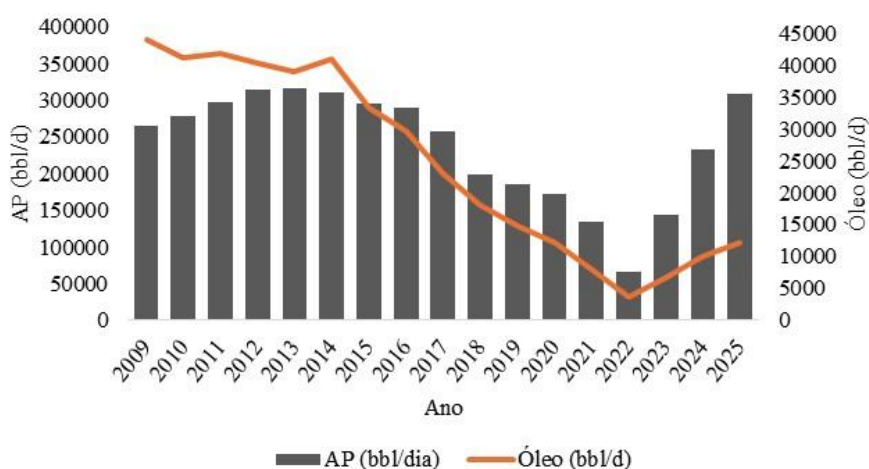
**Figura 3** – Produção nacional de AP no período de 2009 a 2025.



Fonte: Elaborado pela autora (2026) com base em dados da ANP (2025).

Considerando que este estudo se concentra no tratamento da AP gerada pela exploração de petróleo e gás em Sergipe, torna-se pertinente detalhar a geração desse efluente no estado. Assim, a Figura 4 apresenta dados da ANP (2025) referentes aos volumes de AP e à produção de óleo em Sergipe.

**Figura 4** - Produção de AP e óleo em Sergipe no período de 2009 a 2025



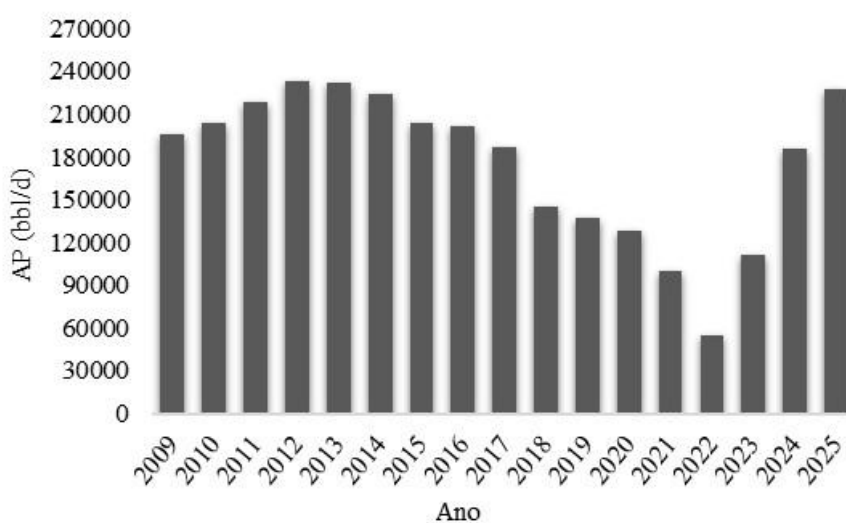
Fonte: Elaborado pela autora (2026) com base em dados da ANP (2025).

A partir da Figura 4, observa-se em 2022, uma queda acentuada no volume de AP, acompanhada pela redução da produção de óleo. Esta passou de 12.191,47 bbl/d, em 2020, para 7.953,90 bbl/d, em 2021, e 3.758,58 bbl/d, em 2022, configurando o menor volume registrado no estado nos últimos 20 anos (ANP, 2025). Dessa forma, a redução da AP pode ser associada à retração da produção de petróleo e gás natural no período de 2020 a 2022. Com a retomada da produção, em janeiro de 2025, a produção de óleo atingiu 12.082,55 bbl/d, enquanto o volume de AP alcançou 308.655,06 bbl/d (ANP, 2025).

Embora a produção de óleo em 2025 tenha sido próxima à registrada em 2020, o volume de AP praticamente dobrou, passando de 172.644,95 bbl/d (ANP, 2020) para 308.655,06 bbl/d (ANP, 2025). Esse comportamento evidencia que a geração de AP não depende exclusivamente do volume de óleo produzido, mas também de fatores associados às características dos campos e dos reservatórios.

Nesse contexto, a idade do campo e dos poços constitui um fator relevante, uma vez que campos com maior tempo de produção tendem a gerar quantidades mais elevadas de água residual (Rajbongshi, 2024). A Figura 5 apresenta o mapeamento da AP gerada no campo de Carmópolis, localizado no município homônimo, em Sergipe. Em atividade desde 1963, o campo apresentou volume médio de AP de 178.376,04 bbl/d no período de 2009 a 2025 (ANP, 2025).

**Figura 5** - Produção de AP no período de 2009 a 2025 para campo Carmópolis/SE.

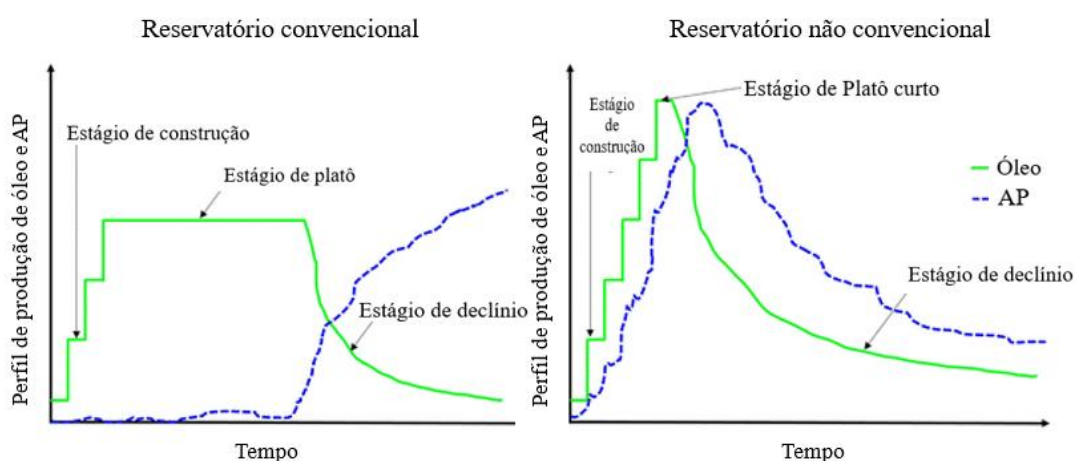


Fonte: Elaborado pela autora (2026) com base em dados da ANP (2025).

Entre 2021 e 2023, verificou-se uma redução no volume de AP no campo de Carmópolis. Já em 2025, esse volume aumentou, acompanhando o comportamento da produção média estadual no mesmo ano.

Além da idade do campo, as características do reservatório também influenciam a geração de AP. Eyitayo *et al.* (2023) analisaram a produção desse efluente em poços perfurados em reservatórios convencionais e não convencionais. Os autores consideraram convencionais aqueles formados por “arenito, calcário, dolomita ou areias mistas” e não convencionais os constituídos por “areia compactada, folhelho betuminoso, gás ou carbonatos com porosidade vugular” (Eyitayo *et al.*, 2023, p. 513). Verificou-se que, nos reservatórios não convencionais, a geração de AP ocorria progressivamente desde o início da extração, enquanto, nos convencionais, apresentava comportamento mais previsível, com aumento somente após a irrupção de água, conforme ilustrado na Figura 6.

**Figura 6** - Perfil de produção de óleo e AP em reservatórios convencionais e não convencionais.



Fonte: Adaptado de Eyitayo, *et al.* (2023).

Diante do exposto, evidencia-se que o volume de AP gerado nas atividades de exploração e produção de petróleo é crescente e preocupante. Como esse efluente deve ser tratado antes do descarte, o conhecimento de sua composição é fundamental para a seleção da técnica de tratamento mais adequada.

### 3.3. Composição da água produzida por região

A composição da água produzida varia significativamente de acordo com as características geológicas semelhantes às do reservatório e dos hidrocarbonetos extraídos, além disso, a AP contém substâncias químicas adicionadas durante a perfuração e a extração de

petróleo, como surfactantes e inibidores de corrosão e incrustação (Alomar *et al.*, 2022; Ullattumpoyil, 2023).

Em uma revisão de diferentes tecnologias de tratamento, Abdelhamid *et al.* (2024) destacaram a elevada salinidade e condutividade elétrica (CE) da AP, além de concentrações significativas de sólidos totais dissolvidos (TDS), ácidos orgânicos, ceras, compostos orgânicos voláteis (COVs), óleo, metais pesados e material radioativo de ocorrência natural (NORM), entre outros. Segundo os autores, a identificação dos componentes presentes é essencial para a seleção da técnica de tratamento mais adequada.

A composição físico-química e as concentrações dos constituintes da AP variam conforme a região de exploração de petróleo e gás, como demonstrado nos estudos sobre sua gestão (Pampanin *et al.*, 2013; Amakiri *et al.*, 2022; Ullattumpoyil, 2023; Abdelhamid *et al.*, 2024).

Como exemplo dessa variabilidade, a Tabela 1 apresenta as concentrações dos componentes iônicos presentes na AP de campos petrolíferos do Mar do Norte Dinamarquês. Esses campos estão localizados a aproximadamente 55 km de distância entre si. O estudo considerou o tempo de produção, as estratégias de desenvolvimento dos campos, as características geológicas de cada reservatório e uma série histórica de produção abrangendo o período de 1972 a 2015 (Bergfors *et al.*, 2020).

**Tabela 1** - Composição iônica da AP de quatro campos produtores de petróleo do Mar do Norte Dinamarquês.

| Íons (mg/L)                    | Reservatórios/Início da produção |                     |                 |                    |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------|--------------------|
|                                | Dan Halfdan S<br>(1972)          | Halfdan N<br>(1999) | Kraka<br>(1991) | Valdemar<br>(1993) |
| Bário ( $\text{Ba}^{2+}$ )     | 1,0                              | 12,0                | 1,0             | 45,0               |
| Cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )    | 2611,0                           | 891,0               | 2671,0          | 371,0              |
| Cloreto ( $\text{Cl}^-$ )      | 47023,0                          | 27003,0             | 70493,0         | 16881,0            |
| Estrôncio ( $\text{Sr}^{2+}$ ) | 328,0                            | 91,0                | 363,0           | 65,0               |
| Magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ )  | 408,0                            | 210,0               | 514,0           | 100,0              |
| Potássio ( $\text{K}^+$ )      | 210,0                            | 154,0               | 210,0           | 122,0              |
| Sódio ( $\text{Na}^+$ )        | 26648,0                          | 15931,0             | 41546,0         | 10211,0            |
| Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) | 560,0                            | 42,0                | 482,0           | 36,0               |

Fonte: Adaptado de Pampanin *et al.* (2013) e Bergfors *et al.* (2020).

Rajbongshi e Gogoi (2024) analisaram a composição da água produzida e as tecnologias empregadas em seu tratamento, destacando que tanto o volume quanto a composição desse efluente variam de acordo com a maturidade dos poços e as características dos reservatórios.

Nesse contexto, a compreensão da dinâmica de produção e da qualidade da água produzida é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de tratamento eficientes.

Além de íons inorgânicos, a água produzida contém compostos orgânicos, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) e benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX). As concentrações desses compostos podem variar significativamente em função das características geológicas dos reservatórios e das regiões de exploração (Salem e Tiemann, 2022).

Essa complexidade composicional é corroborada por Neff *et al.* (2011), que identificaram, além dos HAPs (Tabela 2), a presença expressiva de metais (Tabela 3), reforçando a necessidade de tratamento adequado desse efluente.

**Tabela 2** - Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) presentes na AP do Mar do Norte, Golfo do México, Plataforma Continental Escocesa e Grandes Bancos, Canadá.

| Componentes<br>(µg/L)   | Regiões                        |                                             |                                                  |                               |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
|                         | Grã-Bretanha<br>(Mar do Norte) | América do<br>Norte<br>(Golfo do<br>México) | Plataforma<br>Continental<br>Escocês<br>(Canadá) | Grandes<br>Bancos<br>(Canadá) |
| Naftalina               | 237- 394                       | 5,3 - 90,2                                  | 1512,0                                           | 131                           |
| C1-Naftalenos           | 123 – 354                      | 4,2 - 73,2                                  | 499,0                                            | 186                           |
| C2-Naftalenos           | 26,1 – 260                     | 4,4 - 88,2                                  | 92,0                                             | 163                           |
| C3-Naftalenos           | 19,3 - 81,3                    | 2,8 - 82,6                                  | 17,0                                             | 97,2                          |
| C4-Naftalenos           | 1,1 - 75,7                     | 1,0 - 52,4                                  | 3,0                                              | 54,4                          |
| Acenaftileno            | ND                             | ND - 1,1                                    | 1,3                                              | 2,3                           |
| Acenafteno              | 0,37 - 4,1                     | ND - 0,1                                    | ND                                               | ND                            |
| Bifenil                 | 12,1 - 51,7                    | 0,36 - 10,6                                 | ND                                               | ND                            |
| Fluoreno                | 2,6 - 21,7                     | 0,06 - 2,8                                  | 13,0                                             | 16,5                          |
| C1-Fluorenos            | 1,1 - 27,3                     | 0,09 - 8,7                                  | 3,0                                              | 23,7                          |
| C2-Fluorenos            | 0,54 - 33,2                    | 0,20 - 15,5                                 | 0,35                                             | 4,8                           |
| C3-Fluorenos            | 0,30 - 25,5                    | 0,27 - 17,6                                 | ND                                               | ND                            |
| Antraceno               | ND                             | ND - 0,45                                   | 0,26                                             | ND                            |
| Fenantreno              | 1,3 - 32,0                     | 0,11 - 8,8                                  | 4,0                                              | 29,3                          |
| C1-Fenantrenos          | 0,86 - 51,8                    | 0,24 - 25,1                                 | 1,3                                              | 45                            |
| C2-Fenantrenos          | 0,41 - 51,8                    | 0,25 - 31,2                                 | 0,55                                             | 37,1                          |
| C3-Fenantrenos          | 0,20 - 34,3                    | ND - 22,5                                   | 0,37                                             | 24,4                          |
| Fluoranteno             | 0,01 - 1,1                     | ND - 0,12                                   | 0,39                                             | 0,51                          |
| Pireno                  | 0,03 - 1,19                    | 0,01 - 0,29                                 | 0,36                                             | 0,94                          |
| C1-Fluoranteno/Pirenos  | 0,07 - 10,3                    | ND - 2,4                                    | 0,43                                             | 5,8                           |
| C2-Fluoranteno/Pirenos  | 0,21 - 11,6                    | ND - 4,4                                    | ND                                               | 9,1                           |
| Benz[a]antraceno        | 0,01 - 0,74                    | ND - 0,20                                   | 0,32                                             | 0,6                           |
| Criseno                 | 0,02 - 2,4                     | ND - 0,85                                   | ND                                               | 3,6                           |
| C1-Crisenos             | 0,06 - 4,4                     | ND - 2,4                                    | ND                                               | 6,3                           |
| C2-Crisenos             | 1,3 - 5,9                      | ND - 3,5                                    | ND                                               | 18,8                          |
| C3-Crisenos             | 0,68 - 3,5                     | ND - 3,3                                    | ND                                               | 6,7                           |
| Benzo[b]fluoranteno     | 0,01 - 0,54                    | ND - 0,03                                   | ND                                               | 0,61                          |
| Benzo[k]fluoranteno     | 0,006 - 0,15                   | ND - 0,07                                   | ND                                               | ND                            |
| Benzo[e]pireno          | 0,01 - 0,82                    | ND - 0,10                                   | ND                                               | 0,83                          |
| Benzo[a]pireno          | 0,01 - 0,41                    | ND - 0,09                                   | ND                                               | 0,38                          |
| Perileno                | 0,005 - 0,11                   | 0,04 - 2,0                                  | ND                                               | ND                            |
| Indeno[1,2,3-cd] pirene | 0,022 - 0,23                   | ND - 0,01                                   | ND                                               | ND                            |
| Dibenz[a,h]antraceno    | 0,012 - 0,10                   | ND - 0,02                                   | ND                                               | 0,21                          |
| Benzo[g,h,j]perileno    | 0,01 - 0,28                    | ND - 0,03                                   | ND                                               | 0,17                          |
| Total de HAPs           | 419 – 1559                     | 40 - 600                                    | 2148                                             | 845                           |

ND – Não determinado

Fonte: Neff *et al.* (2011).

**Tabela 3** - Diferentes metais presentes na AP do Mar do Norte, Golfo do México, Plataforma Continental Escocesa e Grandes Bancos, Canadá.

| Componentes metálicos (µg/L) | Regiões                     |                              |                                          |                         |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|
|                              | Grã-Bretanha (Mar do Norte) | EUA/México (Golfo do México) | Plataforma Continental Escocesa (Canadá) | Grandes Bancos (Canadá) |
| Arsênio                      | 0,96 - 1,0                  | 81000 - 342000               | 90,0                                     | <10,0                   |
| Bário                        | 107000 - 228000             | NA                           | 13500,0                                  | 301,0 – 354             |
| Cádmio                       | 0,45 - 1,0                  | <0,05 - 1,0                  | <10,0                                    | <0,02 - 0,04            |
| Cromo                        | 5,0 - 34,0                  | <0,1 - 1,4                   | <1,0 - 10                                | <1,0                    |
| Cobre                        | 12,0 - 60,0                 | <0,1                         | 137,0                                    | <5,0                    |
| Ferro                        | 4200 -11300                 | 10000 - 37000                | 12000 - 28000                            | 1910 – 3440             |
| Chumbo                       | 0,4 - 10,2                  | <0,1 - 28,0                  | <0,1 - 45,0                              | 0,09 - 0,62             |
| Manganês                     | NA                          | 1000 - 7000                  | 1300 - 2300                              | 81,0 - 565,0            |
| Merúrio                      | 0,017 - 2,74                | <0,01 - 0,2                  | <10                                      | NA                      |
| Molibdênio                   | NA                          | 0,3 - 2,2                    | NA                                       | <1,0                    |
| Níquel                       | 22 ,0 - 176,0               | <1,0 - 7,0                   | <0,1 - 420,0                             | 1,7 - 18,0              |
| Vanádio                      | NA                          | <1,2                         | NA                                       | <0,1 - 0,6              |
| zinco                        | 10,0 - 340,0                | 621188,0                     | 10 - 26000                               | <1,0 - 27,0             |

NA - Não analisado

Fonte: Neff *et al.* (2011).

A caracterização dos contaminantes presentes no efluente é fundamental para a seleção da técnica de tratamento mais adequada, o gerenciamento dos riscos associados, a mitigação de impactos ambientais e a avaliação de seu potencial de reuso (GWPC, 2023). Considerando que este trabalho aborda o tratamento da água produzida (AP) no Nordeste brasileiro, apresentam-se, a seguir, dados de caracterização desse efluente em campos petrolíferos da região.

Com foco no reuso agrícola, particularmente na irrigação, Barbosa *et al.* (2019) caracterizaram a AP de 20 poços de petróleo ativos em Mossoró/RN, na região de exploração petrolífera do Rio Grande do Norte (Tabela 4). Os resultados indicaram que alguns parâmetros, incluindo bicarbonato, óleos e graxas, cálcio, magnésio, cloretos e potássio, não atendiam aos valores estabelecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2018) para irrigação, evidenciando a necessidade de tratamento prévio ao reuso.

De forma complementar, Campos *et al.* (2012) avaliaram as principais tecnologias empregadas no tratamento da AP e destacaram que a seleção do processo depende da composição do efluente e da finalidade prevista após o tratamento. Os autores também apresentaram a caracterização da AP da Bacia Sergipe-Alagoas, realizada pela Petrobras em 2009, com dados referentes ao estado de Sergipe, igualmente apresentados na Tabela 4.

Com base nessa análise, Campos *et al.* (2012) ressaltaram que a combinação de diferentes métodos de tratamento pode aumentar a eficiência de remoção dos contaminantes e produzir um efluente adequado tanto ao reuso quanto ao descarte.

**Tabela 4** - Componentes da AP nos estados do Rio Grande do Norte e Sergipe

| Componentes             | Mossoró             |        | Sergipe               |         |
|-------------------------|---------------------|--------|-----------------------|---------|
|                         | Rio Grande do Norte |        | Bacia Sergipe-Alagoas |         |
|                         | Máximo              | Mínimo | Máximo                | Mínimo  |
| pH                      | 7,5                 | 7,0    | 7,2                   | 6,4     |
| Condutividade (µs/cm)   | 1246,0              | 577,0  | ND                    | ND      |
| TDS (mg/L)              | 834,8               | 386,6  | ND                    | ND      |
| Salinidade (mg/L)       | 600,0               | 200,0  | 142914,0              | 28445,0 |
| Alcalinidade (mg/L)     | 221,9               | 73,3   | 638,0                 | 72,0    |
| Carbonato (mg/L)        | ND                  | ND     | ND                    | ND      |
| Bicarbonato (mg/L)      | 70,7                | 98,4   | 684,0                 | 88,0    |
| Cálcio (mg/L)           | 101,2               | 7,8    | 17808,0               | 1318,0  |
| Magnésio (mg/L)         | 44,8                | 4,7    | 1440,0                | 459,0   |
| Sódio (mg/L)            | 57,2                | 26,3   | 60348,0               | 13009,0 |
| Potássio (mg/L)         | 19,6                | 13,1   | 1149,0                | 245,0   |
| Dureza (mg/L)           | 417,5               | 38,8   | 50336,0               | 5240,0  |
| Cloreto (mg/L)          | 382,1               | 39,2   | 86614,0               | 17240,0 |
| Sulfato (mg/L)          | 18,5                | 5,0    | 227,0                 | 5,0     |
| Nitrato (mg/L)          | 0,1                 | 0,0    | ND                    | ND      |
| Ferro total (mg/L)      | ND                  | ND     | 46,2                  | 0,2     |
| Ferro Dissolvido (mg/L) | 0,0                 | 0,0    | ND                    | ND      |
| Cádmio (mg/L)           | ND                  | ND     | 0,0                   | <0,0    |
| Cobre (mg/L)            | 0,0                 | 0,0    | 0,2                   | <0,0    |
| Chumbo (mg/L)           | ND                  | ND     | 0,1                   | <0,0    |
| Cromo (mg/L)            | ND                  | ND     | 0,1                   | <0,0    |
| Manganês (mg/L)         | 0,2                 | 0,0    | 20,5                  | 0,6     |
| Níquel (mg/L)           | 0,0                 | 0,0    | 2,4                   | <0,0    |
| Zinco (mg/L)            | 0,1                 | 0,0    | 0,0                   | <0,0    |
| Alumínio (mg/L)         | 1,0                 | 0,1    | 7,7                   | 3,2     |
| Estrôncio (mg/L)        | ND                  | ND     | 846,0                 | 25,0    |
| Bário (mg/L)            | ND                  | ND     | 868,0                 | 10,0    |
| TOG (mg/L)              | 584,6               | 1,8    | 500,0                 | 100,0   |

ND – Não definido

Fonte: Barbosa *et al.* (2019); Campos *et al.* (2012).

Em complemento à composição da AP , apresentada nas Tabelas 3 e 4 que se referem a localidades específicas, a Tabela 5 reúne alguns dos principais compostos orgânicos presentes nesse efluente em escala global.

**Tabela 5** - Compostos orgânicos presentes na água produzida numa escala global.

| Compostos Orgânicos        | Concentração<br>(mg L <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------|---------------------------------------|
| Carbono Orgânico           | 0,1 - 11,0                            |
| Ácidos Orgânicos           | 0,0 - 10,0                            |
| Hidrocarbonetos Alifáticos | 17,0 – 3,0                            |
| BTEX                       | 0,1 -578,0                            |
| HAPs                       | 0,0 - 3,0                             |
| Esteranos e Triterpanos    | 0,1 - 0,2                             |
| Cetonas                    | 1,0 - 2,0                             |
| Fenóis                     | 0,4 - 0,2                             |

Fonte: Elaboração a partir de Neff e Lee (2011).

Em virtude das características apresentadas acerca da AP, como origem, volume de produção, composição e necessidade de tratamento, é relevante analisar as diferentes técnicas de tratamento utilizadas pela indústria de exploração e produção de petróleo para reduzir a carga poluidora do efluente gerado em seus processos.

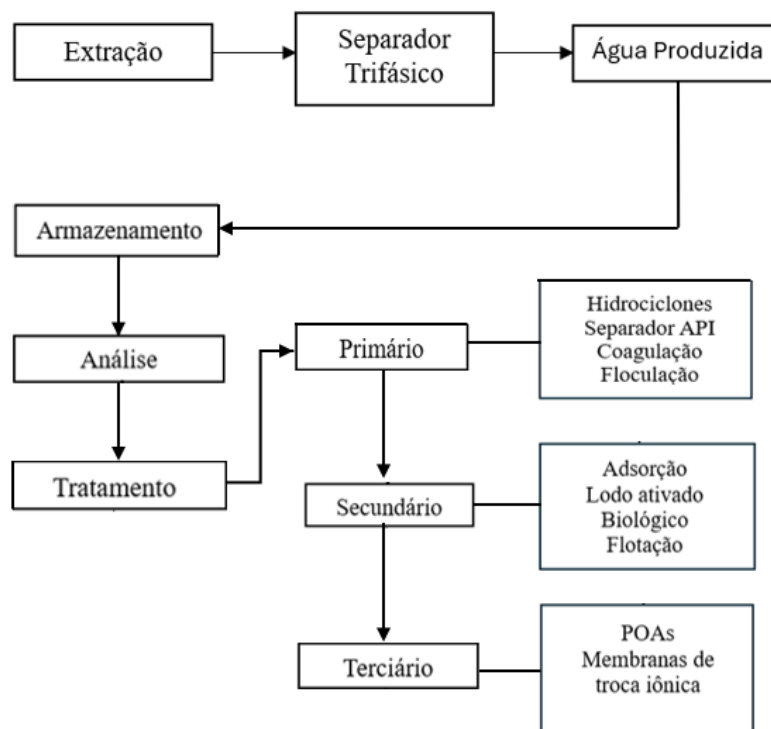
### 3.4. Tratamento da Água Produzida

Em razão do elevado volume gerado, da complexidade dos contaminantes presentes e dos impactos ambientais associados ao descarte da água produzida, seu tratamento é indispensável. Além de mitigar os riscos aos ecossistemas, esse processo viabiliza sua disposição em poços subterrâneos (Xiao *et al.*, 2021) e sua reutilização segura na cadeia produtiva de petróleo e gás (Alomar *et al.*, 2022), nos setores energético, agrícola, de irrigação e industrial (Gray, 2020; Salem e Thiemann, 2022).

Nesse contexto, a literatura reúne diferentes métodos para o tratamento de efluentes oleosos, orientados à remoção de contaminantes, ao descarte sustentável, à reutilização segura e à otimização da relação custo-benefício (Jabri *et al.*, 2025). As tecnologias empregadas no tratamento de efluentes provenientes da exploração e produção de petróleo e gás natural são classificadas em convencionais e não convencionais (Silva *et al.*, 2022). As convencionais compreendem os tratamentos primário e secundário, enquanto as não convencionais, também denominadas terciárias, incluem tecnologias avançadas de tratamento (Amakiri *et al.*, 2022).

A Figura 7 sintetiza essas etapas por meio de um fluxograma que relaciona as principais técnicas de tratamento ao processo de extração de petróleo e gás natural. Após a extração, a mistura é conduzida ao separador trifásico, no qual são segregadas as fases oleosa, gasosa e aquosa. A água produzida é então encaminhada à estação de armazenamento, onde é analisada e submetida ao tratamento adequado.

**Figura 7** - Fluxograma dos processos e técnicas empregados no tratamento de água produzida



Fonte: Adaptado de Amakiri *et al.* (2022).

Conforme apresentado no fluxograma da Figura 7, o tratamento da água produzida (AP) é constituído por etapas primária, secundária e terciária, que empregam diferentes mecanismos de remoção de contaminantes. O tratamento primário compreende operações físicas, como a separação por hidrociclones e por separadores do Instituto Americano de Petróleo (API), utilizados para promover a separação óleo-água com base na diferença de densidade entre as fases (Liu *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022). Nessa etapa, também pode ser empregada a coagulação/floculação, processo físico-químico que remove partículas coloidais por meio da adição de agentes coagulantes, seguida de sedimentação gravitacional (Amakiri *et al.*, 2022).

No tratamento secundário, destacam-se a flotação por ar dissolvido, a adsorção e a filtração (Junior *et al.*, 2023). Na flotação, as bolhas de ar aderem às partículas sólidas e às gotículas de óleo dispersas, conduzindo-as à superfície do efluente; na adsorção, os contaminantes são transferidos para a superfície de um material adsorvente por meio de interações, incluindo forças eletrostáticas (Silva *et al.*, 2022; Yousef *et al.*, 2020). Além dessas técnicas, os processos biológicos integram o tratamento secundário e são aplicados à remoção de compostos orgânicos e amônia, mediante a ação metabólica de microrganismos aeróbios ou anaeróbios (Silva *et al.*, 2022).

Embora o tratamento biológico apresente potencial para a remoção de hidrocarbonetos, solventes e outras substâncias químicas presentes na AP, sua eficiência depende da composição do efluente e da concentração dos contaminantes. Compostos como BTEX e HAPs, por exemplo, podem ser degradados por microrganismos aeróbios com relativa facilidade, enquanto compostos halogenados e clorados tendem a apresentar maior resistência à biodegradação (Scanlon *et al.*, 2020).

Em uma etapa complementar, o tratamento terciário emprega processos oxidativos avançados (POAs), membranas e processos de troca iônica para a remoção de óleo disperso, compostos orgânicos dissolvidos, substâncias tóxicas e turbidez (Amakiri *et al.*, 2022). Entre essas alternativas, os POAs são considerados promissores para a degradação de compostos orgânicos recalcitrantes, devido à rápida remoção, à ausência de geração de lodo e ao elevado potencial de mineralização. Entretanto, sua aplicação ainda é limitada pelos custos de instalação, operação e manutenção, além da necessidade de estudos adicionais voltados especificamente ao tratamento da AP (Zhang *et al.*, 2024).

A comparação entre POAs e adsorção evidencia a complementaridade entre essas tecnologias. A adsorção apresenta maior eficiência na remoção de óleo e íons inorgânicos, incluindo metais pesados e sólidos dissolvidos totais (SDT), além de possibilitar a recuperação do adsorvente. Os POAs, por sua vez, são eficientes na remoção de BTEX e HAPs, embora ainda sejam necessários estudos sobre sua aplicação à remoção de metais pesados, compostos fenólicos e aditivos químicos empregados na exploração e produção de petróleo. Assim, a combinação entre POAs e adsorção pode ampliar a eficiência de remoção dos contaminantes e melhorar a relação custo-benefício do tratamento (Alomar *et al.*, 2022).

A eficiência dos processos de separação por membranas depende da tecnologia empregada, incluindo microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa (Silva *et al.*, 2022). Contudo, ao avaliarem o tratamento da AP destinada ao reuso, Samuel *et al.* (2022) observaram que nenhuma tecnologia, quando utilizada isoladamente, é suficientemente eficiente. Nesse sentido, a associação de diferentes técnicas torna-se necessária para garantir maior segurança ao tratamento. Embora a ultrafiltração seja amplamente empregada, a osmose reversa apresenta maior adequação à remoção de compostos orgânicos (Samuel *et al.*, 2022).

A necessidade de integrar diferentes mecanismos de tratamento também tem motivado o aprimoramento da coagulação/floculação. Ao revisarem estratégias para otimizar esse processo, Cui *et al.* (2020) destacaram a coagulação aprimorada por oxidação química e a pré-ozonização, empregadas como etapas de intensificação do tratamento convencional. Os autores também mencionaram a adição de agentes de lastro, como a microareia, durante a mistura

rápida, configurando um processo integrado de coagulação/floculação lastreada e sedimentação.

Embora existam outras técnicas aplicáveis ao tratamento de efluentes oleosos, este trabalho concentra-se no tratamento primário da AP, especificamente no processo físico-químico de coagulação/floculação lastreada, seguido de sedimentação, conforme apresentado nos itens subsequentes.

### 3.4.1. Coagulação/floculação e sedimentação

A coagulação/floculação é um dos processos físico-químicos mais utilizados no tratamento de águas residuais (Sukmana *et al.*, 2021), incluindo a água produzida nas operações *upstream* da indústria de petróleo e gás (Ullattumpoyil, 2023). Sua ampla aplicação está associada à simplicidade operacional, ao custo-benefício e à eficiência na remoção de diversos poluentes, como sólidos suspensos totais (SST), turbidez, óleos e graxas, cor e matéria orgânica (Zhao *et al.*, 2021; Sukmana *et al.*, 2021; Mansour *et al.*, 2024).

Essas técnicas são complementares e ocorrem de forma sequencial. Na coagulação, a adição de um agente coagulante promove a desestabilização das partículas coloidais presentes no efluente. Em seguida, durante a floculação, ocorre a agregação e o crescimento dos flocos formados, favorecendo sua remoção por sedimentação sob a ação da gravidade (Alsalem e Thiemann, 2022).

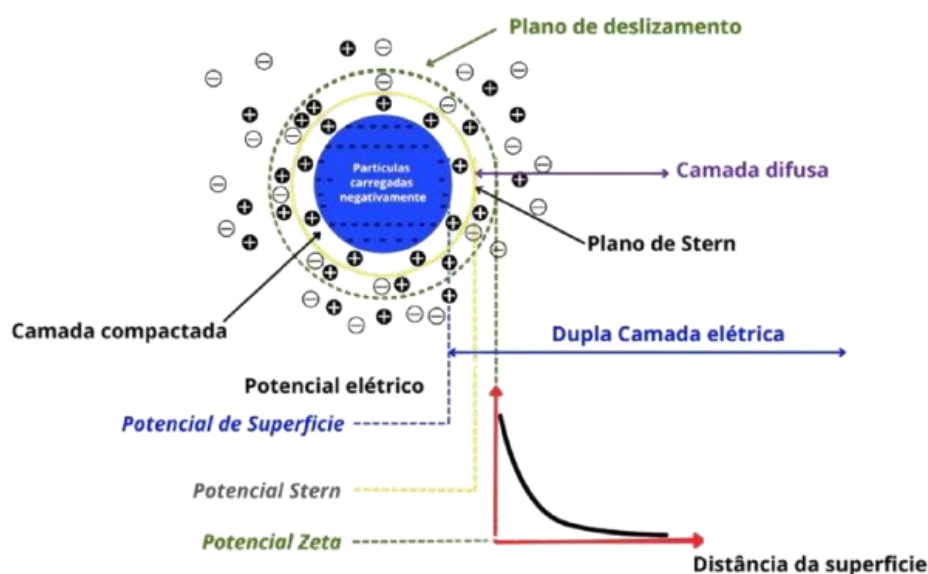
As partículas coloidais, por apresentarem reduzido tamanho e, geralmente, carga superficial negativa, permanecem estáveis devido à repulsão eletrostática, o que dificulta sua coalescência. Para superar essa estabilidade, são empregados agentes químicos ou naturais capazes de neutralizar ou reduzir parcialmente as cargas superficiais, atenuando as forças repulsivas e favorecendo a agregação das partículas por meio das forças de *van der Waals* (Alsalem e Thiemann, 2022).

A desestabilização coloidal durante a coagulação pode ocorrer por quatro mecanismos principais: compressão da dupla camada elétrica; adsorção e neutralização de cargas; varredura; e formação de pontes interpartículas (Sheng *et al.*, 2023). Entre esses mecanismos, a dupla camada elétrica desempenha papel fundamental na estabilidade das partículas. A superfície predominantemente negativa dos coloides atrai contra íons presentes no meio, formando uma camada compacta de íons nas proximidades da partícula, denominada camada de Stern (Libanio, 2016; Sheng *et al.*, 2023).

Simultaneamente, a distribuição de íons no meio líquido origina uma camada difusa, na qual os contra íons permanecem sob a influência da atração eletrostática da superfície e da

repulsão exercida por íons de mesma carga. A associação entre as camadas de Stern e difusa constitui a dupla camada elétrica, cuja representação é apresentada na Figura 8 (Sheng *et al.*, 2023).

**Figura 8** - Estrutura da dupla camada elétrica.



Fonte: Adaptado de Sheng *et al.* (2023).

Conforme ilustrado na Figura 8, a diferença de potencial entre a superfície da camada de Stern e o limite da camada difusa corresponde ao potencial Zeta (Sheng *et al.*, 2023). A coagulação tem como objetivo reduzir esse potencial e, conseqüentemente, as forças de repulsão entre as partículas coloidais. Nesse processo, a adição de espécies hidrolisáveis, capazes de liberar íons positivos, eleva a concentração iônica do meio e promove a compressão da dupla camada elétrica. A redução da repulsão eletrostática desestabiliza os colóides, favorecendo sua aproximação e agregação por meio das forças de *Van der Waals*, com conseqüente formação de coágulos maiores (Sheng *et al.*, 2023).

Além da compressão da dupla camada elétrica, a desestabilização das partículas pode ocorrer por adsorção e neutralização de cargas. Nesse mecanismo, as espécies hidrolisadas adsorvem-se à superfície dos colóides, reduzindo a repulsão entre eles e favorecendo sua aproximação. Como resultado, formam-se flocos que se agregam, tornam-se mais densos e sedimentam (Libanio, 2016).

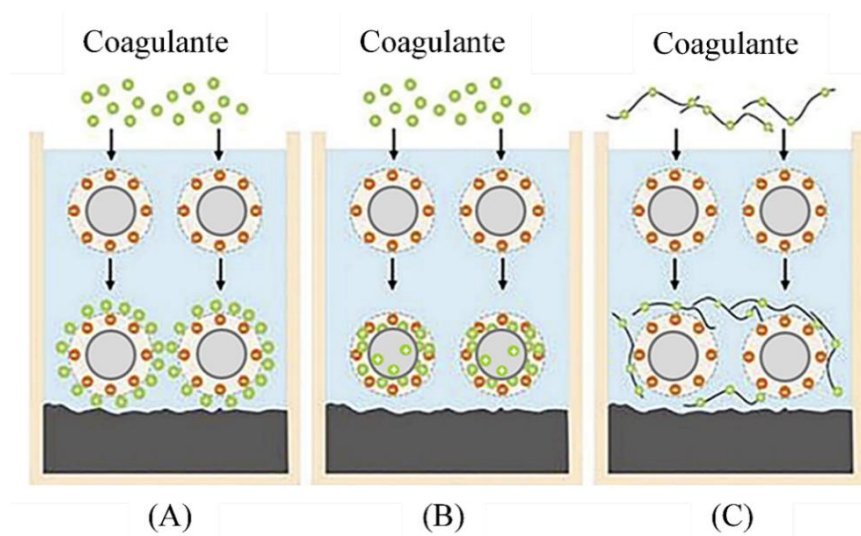
Outro mecanismo relevante é a varredura, cuja eficiência depende do pH do meio e da dosagem do coagulante. Em concentrações elevadas de espécies hidrolisáveis, ocorre a

formação de um precipitado insolúvel que envolve as partículas coloidais e origina flocos mais densos, favorecendo sua sedimentação. Entretanto, esse mecanismo requer dosagens elevadas de coagulante e valores de pH mais altos (Libanio, 2016; Sheng *et al.*, 2023).

A formação de pontes interpartículas, por sua vez, é promovida pela adição de polímeros de cadeia longa e superfície ativa. Esses polímeros adsorvem-se às partículas coloidais e estabelecem ligações com diferentes superfícies, formando estruturas ramificadas que favorecem a união dos flocos durante a floculação. Esse processo resulta na formação de agregados maiores e mais densos, que posteriormente podem ser removidos por sedimentação (Libanio, 2016; Ghernaout *et al.*, 2020; Sheng *et al.*, 2023).

A sedimentação constitui, portanto, um mecanismo físico subsequente à coagulação e à floculação, no qual a ação da gravidade promove a deposição dos flocos no fundo do tanque de sedimentação (Libanio, 2016). A Figura 9 sintetiza os principais mecanismos de desestabilização das partículas coloidais, formação dos flocos e sua subsequente remoção.

**Figura 9** - Mecanismos de coagulação/floculação: (A) Neutralização de cargas, (B) Varredura e adsorção (C) Formação de pontes interpartículas.



Fonte: Adaptado de Al-Sahari *et al.* (2020).

O processo de coagulação/floculação aplicado ao tratamento de água produzida promove a remoção de partículas de óleo dispersas, suspensas e emulsionadas, mediante a desestabilização das cargas negativas dessas partículas por coagulantes, como os sais de alumínio. Entretanto, a remoção de óleo dissolvido requer a aplicação de técnicas de tratamento mais avançadas (Fard *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2020).

Apesar de amplamente utilizado no tratamento de efluentes, esse processo apresenta limitações para a remoção de determinados contaminantes, especialmente metais pesados, cuja concentração residual pode permanecer acima dos padrões legais de lançamento em corpos hídricos (Oladimeji *et al.*, 2024). Essa limitação foi observada por Xiao *et al.* (2021) no tratamento da água produzida do campo petrolífero de Bakken, em Dakota do Norte, Estados Unidos, onde os métodos convencionais se mostraram insuficientes para a remoção desses contaminantes.

Nesse contexto, Gahrouei *et al.* (2024), ao revisarem diferentes técnicas aplicadas à remoção de metais pesados de ambientes aquáticos, concluíram que a coagulação/floculação e a sedimentação são mais eficientes quando associadas a uma etapa subsequente de filtração. Os autores destacaram a aplicabilidade da filtração por membranas, das técnicas eletroquímicas, da adsorção, da troca iônica e da fitorremediação, ressaltando a adsorção como uma das técnicas mais utilizadas em razão de sua facilidade operacional e elevada capacidade de sorção.

Embora a coagulação/floculação seguida de sedimentação apresente potencial para o tratamento de efluentes oleosos, sua aplicação envolve algumas desvantagens, como a geração de grandes volumes de lodo residual, frequentemente tóxico em razão de sua composição; a baixa seletividade para determinados metais; a reduzida eficiência na remoção de contaminantes emergentes; os elevados custos operacionais a longo prazo; o consumo significativo de reagentes químicos; e a necessidade de gerenciamento adequado do lodo gerado (Dayarathne *et al.*, 2020; Razzak *et al.*, 2022; Zaki *et al.*, 2023; Gahrouei *et al.*, 2024).

A eficiência do processo depende não apenas da seleção do coagulante, mas também de sua dosagem e das características do efluente, incluindo pH, temperatura e concentração de agentes tóxicos. Além disso, parâmetros operacionais, como a velocidade do processo, o tempo de sedimentação e o mecanismo de coagulação empregado, devem ser cuidadosamente controlados (Lv *et al.*, 2019).

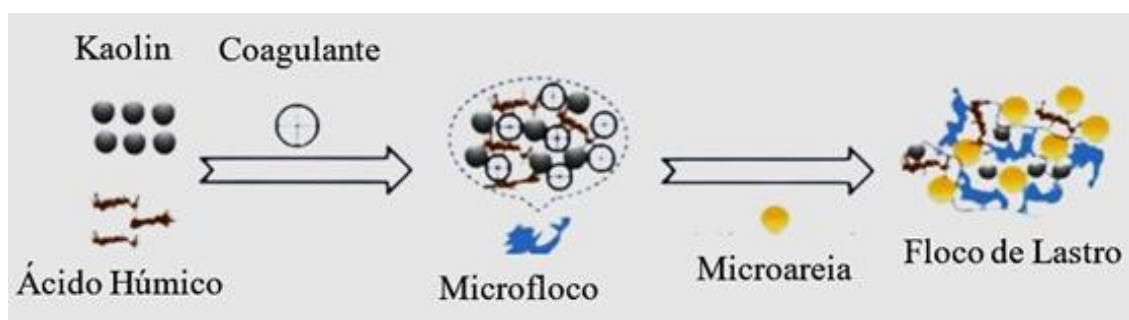
Assim, estudos demonstram que a aplicação isolada do tratamento convencional a efluentes da indústria petrolífera é limitada para a remoção de contaminantes como metais pesados e compostos halogenados (Scanlon *et al.*, 2020; Xiao *et al.*, 2021). Torna-se, portanto, necessário aprimorar esse tratamento ou associá-lo a técnicas complementares, como a adsorção, a fim de ampliar a remoção desses poluentes presentes na água produzida (Gahrouei *et al.*, 2024). Nesse contexto, a coagulação/floculação lastreada, seguida de sedimentação, constitui uma alternativa para otimizar a eficiência do tratamento convencional e será discutida no item seguinte.

### 3.4.2. Coagulação/floculação lastreada e sedimentação

A coagulação/floculação lastreada é uma técnica desenvolvida na década de 1990 para aumentar a eficiência das etapas de coagulação e floculação no tratamento de água potável e efluentes. Comercialmente denominada ACTFLO, consiste na adição de um material de lastro ao processo convencional, favorecendo o crescimento e a densificação dos flocos e, consequentemente, aumentando sua velocidade de sedimentação. Esse mecanismo contribui para a maior remoção de poluentes e para a otimização integrada das etapas de coagulação, floculação e sedimentação (Dejardins *et al.*, 2002; Lapointe e Barbeau, 2016; Cui *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a Figura 10 apresenta o mecanismo da floculação lastreada com microareia, destacando a formação e o crescimento dos flocos de lastro.

**Figura 10** - Coagulação/floculação lastreada com microareia.



Fonte: Adaptado de He *et al.* (2024).

A Figura 10 ilustra o mecanismo de coagulação/floculação lastreada em uma amostra de água sintética contendo caulim e ácido húmico, utilizados como representativos de partículas coloidais e matéria orgânica, respectivamente. A adição do agente coagulante AS promove a desestabilização dos colóides e a formação de microflocos. Posteriormente, a incorporação da microareia favorece sua agregação a essas estruturas, originando flocos lastreados mais densos e, consequentemente, com maior facilidade de sedimentação (He *et al.*, 2024).

Assim como no tratamento convencional, a eficiência da coagulação/floculação lastreada depende do estabelecimento de condições operacionais adequadas, especialmente das dosagens do coagulante e do material de lastro. Também é fundamental considerar as características do efluente e os objetivos do tratamento (He *et al.*, 2024). Embora diversos estudos tenham investigado o emprego de materiais inertes, como a microareia, a maior parte das pesquisas concentra-se no tratamento de água potável, enquanto aplicações em água

produzida de petróleo (AP) ainda são limitadas (Qasim *et al.*, 2019; Zafisah *et al.*, 2020; He *et al.*, 2024; Lapointe *et al.*, 2019; Lapointe *et al.*, 2025; Suzuki *et al.*, 2025).

Nesse contexto, Zafisah *et al.* (2020) avaliaram a influência da microareia na formação de flocos durante o tratamento convencional destinado à remoção de sólidos suspensos totais. Utilizando um floculante polimérico em pH neutro, os autores observaram remoção significativa da turbidez, atribuída à incorporação da microareia aos flocos e à consequente formação de estruturas maiores e mais densas, capazes de sedimentar rapidamente. Entretanto, a aplicação excessiva do material de lastro pode prejudicar a formação dos flocos e provocar sua sedimentação prematura.

De modo semelhante, Saththasivam *et al.* (2024) investigaram o uso da microareia em conjunto com a quitosana no tratamento de água sintética contendo turbidez e óleo emulsionado. A remoção máxima de óleo, de 94%, foi obtida com 0,1 g L<sup>-1</sup> de quitosana e 0,5 g L<sup>-1</sup> de microareia, em pH 8,0 e tempo de sedimentação de 15 min. Sem a adição do material de lastro, o mesmo desempenho exigiu 90 min. Esses resultados demonstram que a microareia contribui para a formação de flocos mais densos, acelerando a sedimentação e favorecendo a clarificação de efluentes oleosos.

Além da dosagem e da taxa de sedimentação, o tamanho das partículas de lastro constitui um fator determinante para a eficiência do processo (Lapointe e Barbeu, 2019; Qasim *et al.*, 2020; He *et al.*, 2019; Cui *et al.*, 2020). Lapointe e Barbeu (2019), ao avaliarem partículas de areia de sílica durante a coagulação/floculação com amido ativado, verificaram que as menores partículas proporcionaram maior remoção de turbidez e sólidos, em razão de sua maior incorporação aos flocos.

Embora a microareia seja frequentemente utilizada de forma isolada, sua associação com adsorventes porosos, como o carvão ativado, constitui uma alternativa promissora para promover simultaneamente o crescimento dos flocos e a adsorção de poluentes (Suzuki *et al.*, 2025). Nessa perspectiva, Okoro *et al.* (2021) aplicaram a floculação lastreada com microareia à remoção de BTEX de águas superficiais contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo, utilizando alume e sulfato de ferro como coagulantes. A microareia aumentou a densidade dos flocos e reduziu o tempo de sedimentação, mas não promoveu remoção significativa dos compostos-alvo. Por isso, os autores destacaram a necessidade de incorporar um adsorvente eficiente, como o carvão ativado em pó, especialmente para a remoção de benzeno.

Em conjunto, os estudos indicam que a coagulação/floculação lastreada apresenta potencial para a remoção de diferentes poluentes, uma vez que a utilização da microareia, isoladamente ou associada a um adsorvente, favorece a formação de flocos mais densos e

acelera sua sedimentação (Cui *et al.*, 2020). Entretanto, ainda são necessários estudos específicos sobre sua aplicação no tratamento de água produzida de petróleo. Dessa forma, considerando a influência dos agentes coagulante e de lastro no desempenho do processo, torna-se pertinente apresentar os principais coagulantes e materiais de lastro empregados na coagulação/floculação, com ênfase no sulfato de alumínio e na microareia, objetos deste estudo.

### 3.4.3. Coagulantes

Os coagulantes químicos são agentes que, quando adicionados ao meio aquoso, favorecem a formação de espécies hidrolisadas e precipitados insolúveis, promovendo a desestabilização, a agregação e o arraste de coloides e partículas suspensas presentes no efluente (Libânio, 2016). Nesse contexto, a coagulação/floculação constitui uma das principais técnicas empregadas no tratamento de efluentes oleosos, com destaque para o uso de sulfato de alumínio, cloreto férrico e policloreto de alumínio (Jabbar *et al.*, 2021; Ovuoraye *et al.*, 2021; Das *et al.*, 2023). O sulfato de alumínio figura entre os coagulantes mais utilizados, embora coagulantes naturais de origem orgânica, especialmente os obtidos de plantas, venham sendo investigados como alternativas mais sustentáveis (Lima *et al.*, 2020).

A eficiência do processo depende fundamentalmente da seleção do coagulante, de sua dosagem e das condições operacionais, uma vez que tanto a subdosagem quanto a superdosagem podem comprometer a remoção de poluentes (Chaouch *et al.*, 2022). Essa influência foi demonstrada por Ugonabo *et al.* (2022), que avaliaram o uso de sulfato de alumínio no tratamento de efluentes da indústria petrolífera, em uma faixa de pH de 2,0 a 10,0 e dosagens entre 0,1 e 0,5 g L<sup>-1</sup>. A maior remoção de turbidez, de 95%, foi obtida em pH 10,0, com dosagem de 0,1 g L<sup>-1</sup> e 30 min de sedimentação.

De modo semelhante, Almutaire (2022) comparou o desempenho do sulfato de alumínio Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.16H<sub>2</sub>O e do cloreto férrico FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O no tratamento de efluentes oleosos. Na remoção de demanda química de oxigênio (DQO) e cor, o alumínio (III) apresentou maior eficiência nas condições ótimas de 1,52 g L<sup>-1</sup> e pH 7,0. O ferro (III), por sua vez, interferiu na remoção de cor em razão da coloração do próprio coagulante, tornando necessário um tratamento complementar. O mesmo autor verificou que a combinação de aeração, coagulação e floculação com sulfato de alumínio promoveu a formação de flocos mais densos e maior remoção de DQO em comparação com a coagulação/floculação sem aeração. Esses resultados evidenciam as limitações do tratamento convencional e reforçam a necessidade de combinar diferentes técnicas no tratamento de efluentes oleosos, conforme também apontado por Xiao *et al.* (2021) e Gahrouei *et al.* (2024).

A aplicabilidade do sulfato de alumínio também foi observada por Jagaba *et al.* (2020), que avaliaram sua utilização na remoção de turbidez e sólidos totais (ST) de efluentes oleosos provenientes da indústria de palma, mantendo o pH das amostras em 4,51. Considerando dosagens entre 1,0 e 6,0 g L<sup>-1</sup>, os autores obtiveram remoções máximas de 98,72% para ST e 96,68% para turbidez na dosagem de 4,0 g L<sup>-1</sup>. Embora o coagulante possa ser aplicado em diferentes faixas de pH, diversos estudos indicam que sua maior eficiência na remoção de turbidez e sólidos suspensos ocorre em valores próximos de 7,0 (Santos *et al.*, 2014; Mazloomia *et al.*, 2019; Maria *et al.*, 2020; Jabbar *et al.*, 2021; Almutaire, 2022; Araujo *et al.*, 2022). Entretanto, resultados satisfatórios também foram obtidos em valores superiores, como demonstrado por Ugonabo *et al.* (2022).

Apesar de sua ampla aplicabilidade, o uso do sulfato de alumínio apresenta como uma de suas principais limitações a elevada geração de lodo contendo íons de alumínio (Rodriguez *et al.*, 2020). Como alternativa, Zhao *et al.* (2020) propuseram a reutilização desse lodo como matéria-prima em diferentes processos de tratamento de águas residuais, possibilitando uma destinação mais viável e econômica do resíduo, anteriormente encaminhado a aterros sanitários.

Assim, embora diversos coagulantes químicos e naturais sejam empregados no tratamento de águas e efluentes, a presente pesquisa concentra-se na aplicação do sulfato de alumínio na coagulação/floculação convencional e lastreada com microareia no tratamento primário da água produzida (AP).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

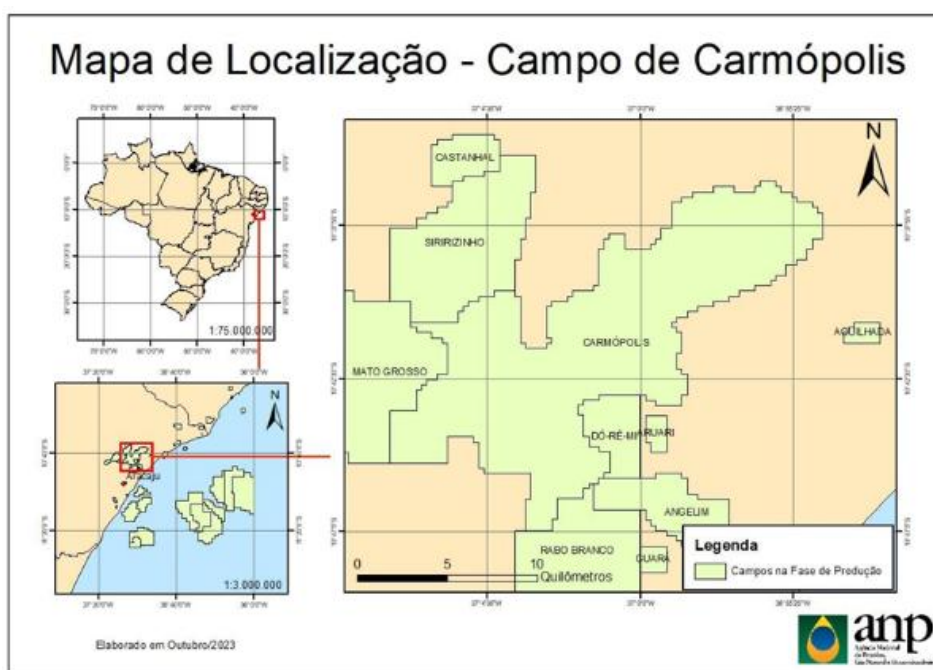
Este item apresenta a localização da área de estudo e a metodologia aplicada para caracterização da água produzida, determinação de sólidos e turbidez, o tratamento aplicado, preparo de soluções de sulfato de alumínio (coagulante) e de hidróxido de sódio (para ajuste de pH), características do agente de lastro (microareia), ensaios de *jar test* e um protótipo do aparato experimental realizado em escala de bancada.

Como ferramenta de apoio à elaboração deste trabalho foram utilizados recursos de inteligência artificial (ChatGPT-OpenAI) para revisão gramatical, correção ortográfica e aprimoramento da redação, permanecendo sob a responsabilidade da autora a análise das amostras, interpretação dos resultados, organização metodológica e produção do conteúdo científico.

##### 4.1. Água Produzida

A água produzida utilizada neste estudo foi proveniente de poços petrolíferos de Carmópolis, localizado no município de Carmópolis, estado de Sergipe, na porção emersa da Bacia do Rio Sergipe. A localização da área de estudo é apresentada na Figura 11, conforme dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2023).

**Figura 11** – Mapa de localização do Campo Petrolífero de Carmópolis no estado de Sergipe.



Fonte: ANP (2023).

## 4.2. Caracterização da água produzida (AP)

Para as análises de caracterização, uma alíquota de 2 L da AP foi transferida para um béquer de mesmo volume e mantida em repouso até atingir a temperatura ambiente. Em seguida, a amostra foi homogeneizada manualmente com o auxílio de um bastão de vidro. Após a homogeneização, foram determinados o pH e a temperatura utilizando um pHmetro (modelo PHS-3E, marca Atra)

As medições de turbidez foram aferidas utilizando turbidímetro digital (modelo AP 2000, marca Policontrol), enquanto os sólidos totais dissolvidos (STD) foram determinados por meio de sonda multiparâmetro (modelo a-AB33M1, marca OHAUS).

Para a determinação dos sólidos totais (ST), adotou-se o método 2540B-SM do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017). Foram transferidos 50 mL da amostra para béqueres previamente secos e pesados. Sendo posteriormente submetida à secagem em estufa a temperatura de 103 – 105 °C até a evaporação completa da fase líquida

Após a secagem, as amostras foram resfriadas em dessecador e novamente pesadas em balança analítica até atingir um peso constante ou até que a variação do peso fosse inferior a 0,5 mg, conforme estabelecido pelo método de referência.

Os sólidos suspensos totais (SST) foram determinados através da diferença entre o quantitativo de ST e STD, conforme Equação 1.

$$SST = ST - STD \quad (1)$$

Os sólidos sedimentáveis (SS) foi estimado por meio da diferença entre os ST da água produzida bruta e da água produzida tratada, de acordo com a Equação 2

$$SS = ST_{(APbruta)} - ST_{(APtratada)} \quad (2)$$

Ressalta-se que esse procedimento consiste na estimativa de massa de sólidos removidos durante o tratamento, não correspondendo à determinação de sólidos sedimentáveis pelo método do cone de *Imhoff* descrito no *Standard Methods*.

## 4.3. Ensaio de Coagulação/Floculação de Água Produzida

### 4.3.1. Preparo das Soluções de Sulfato de Alumínio e Hidróxido de Sódio

Foi preparado uma solução coagulante de sulfato de alumínio a partir de sulfato de alumínio hidratado ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), com pureza de 97%. Para isso foram preparados 50 mL da solução, posteriormente armazenada em um balão volumétrico com tampa de vedação, mantido em local seco à temperatura ambiente e ausência de luz, a fim de preservar suas propriedades químicas.

A dosagem ideal do coagulante empregada nos ensaios de coagulação/floculação com e sem a utilização de material lastreado, foi de  $0,2 \text{ g L}^{-1}$ , adotada com base nos resultados obtidos por Andonof (2025).

Também foi preparada uma solução de Hidróxido de Sódio ( $\text{NaOH}$ , 1 M), utilizada para ajuste do pH da AP bruta, antes dos ensaios de *jar test*.

#### **4.3.2. Material de lastro**

Como material de lastro foi utilizada a microareia com pureza de 86%, adquirida de uma empresa especializada em tratamento de água e efluentes, localizada no estado de Sergipe.

A granulometria utilizada da microareia foi de 0,112 mm (-100+200#), definida com base em estudos anteriores referentes à tratamento de água, que demonstraram melhor desempenho da floculação lastreada com partículas de microareia inferiores a 0,160 mm (He *et al.* (2023); Desjardins *et al.* (2002)).

As dosagens de microareia utilizadas nos ensaios ( $0,5 \text{ g.L}^{-1}$  e  $5,0 \text{ g.L}^{-1}$ ) foram estabelecidas com base nos estudos de Saththasivam *et al.* (2024), que empregaram esse material como agente de lastro para remoção de óleo emulsionado em água, e em Andonof (2025), que verificou maior eficiência na remoção de turbidez e SST utilizando a dosagem de  $5,0 \text{ g L}^{-1}$  associada ao sulfato de alumínio.

#### **4.3.3. Ajuste do pH da Água Produzida**

O ajuste do pH da água produzida (7,0 e 9,0) foi realizado mediante a adição de solução de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ , 1,0 M).

A seleção dos valores foi baseada em estudos anteriores que avaliaram a aplicação do sulfato de alumínio no tratamento de água produzida e de efluentes da indústria petrolíferas (Andonof 2025; Santos *et al.*, 2014), os quais demonstraram desempenho satisfatório do processo de coagulação/floculação nesses valores de pH.

#### **3.3.4. Ensaios de Jar Test**

Os ensaios de coagulação/floculação seguidos da sedimentação, foram conduzidos no equipamento de Jar Test, equipado com seis posições contendo béqueres com capacidade de 500 mL e agitadores do tipo paletas. Todos dos ensaios foram conduzidos em escala de bancada e executados em duplicatas.

Inicialmente, foram adicionados 500 mL de água produzida em cada béquer do equipamento, previamente ajustada aos valores de pH (7,0 e 9,0) estabelecidos para o estudo. Antes da adição do agente coagulante e do material de lastro, as amostras foram homogeneizadas durante 1 minuto, sob agitação de 120 rpm.

Nos ensaios de coagulação-floculação lastreada, a microareia foi adicionada inicialmente às amostras nas dosagens de 0,5 g.L<sup>-1</sup> e 5,0 g.L<sup>-1</sup>, dando início ao processo de agitação por 5 min a 120 rpm, com a finalidade de promover sua adequada dispersão e molhabilidade.

Em seguida, deu-se início ao processo de coagulação com a introdução do agente coagulante (0,2 g.L<sup>-1</sup>). A mistura rápida foi conduzida durante 2 min, à velocidade de 120 rpm (Mousa e Hasan, 2017) Posteriormente, realizou-se a etapa de floculação, sob agitação lenta durante 30 min a 30 rpm. (Hosny *et al.*, 2016)

Após o término da floculação, a agitação foi interrompida, iniciando-se a etapa de sedimentação, durante 30 min (Hosny *et al.* 2016; Ugonabo *et al.*, 2022).

Ao final da sedimentação, foram coletados 300 mL da AP tratada por meio de pipeta volumétrica, posicionada abaixo da superfície do líquido evitando ressuspensão dos flocos sedimentados. As amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos com capacidade de 500 mL e armazenadas sob refrigeração até a realização das análises físicas. Antes das análises todas as amostras foram mantidas à temperatura ambiente.

Todo procedimento experimental foi realizado em duplicata, para AP em pH 7,0 e 9,0 com dosagem do coagulante de 0,2 g.L<sup>-1</sup> e, em ambos pH, foram adicionados 0,5 g.L<sup>-1</sup> e 5,0 g.L<sup>-1</sup> da microareia. Além da coagulação/floculação lastreada, foi realizado testes de coagulação/floculação convencional apenas com a adição do agente coagulante para fins de avaliação como mostra a Tabela 6.

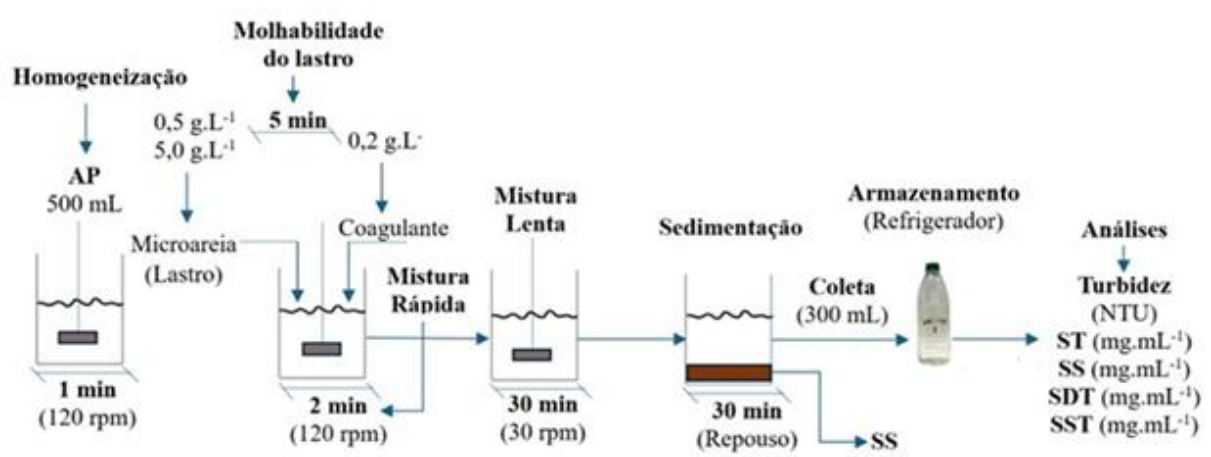
Tabela 6 – Combinação das dosagens de coagulante, lastro e valores de pH utilizados nos ensaios de Jar Test

| Coagulante (g.L <sup>-1</sup> ) | pH  | Lastro (g.L <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------|-----|-----------------------------|
| 0,2                             | 7,0 | 0,00                        |
|                                 |     | 0,5                         |
|                                 |     | 5,0                         |
| 0,2                             | 9,0 | 0,00                        |
|                                 |     | 0,5                         |
|                                 |     | 5,0                         |

Fonte: Autora (2026).

A Figura 12 exibe um protótipo experimental do tratamento convencional com a introdução do agente de lastro antes da etapa de coagulação.

Figura 12 - Procedimento experimental realizado em escala de bancada.



Fonte: Autora (2026).

## 5. RESULTADO E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados da caracterização físico-química da água produzida proveniente do campo petrolífero de Carmópolis, Sergipe, com o objetivo de avaliar sua qualidade antes do tratamento e fornecer uma referência para as análises da remoção de turbidez, sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST) por meio do processo de coagulação/floculação seguido da sedimentação. Em seguida, são discutidos os resultados obtidos após o tratamento convencional, utilizando exclusivamente o sulfato de alumínio, e após a coagulação/floculação lastreada com microareia, permitindo comparar a eficiência de ambas as condições na remoção dos parâmetros avaliados.

### 5.1. Caracterização da água produzida (AP)

Os parâmetros analisados na AP foram pH, temperatura, turbidez, sólidos totais (ST), sólidos dissolvidos totais (SDT) e sólidos suspensos totais (SST). Os resultados obtidos para a AP bruta foram comparados aos padrões de qualidade e às condições de lançamento de efluentes estabelecidos na legislação brasileira (CONAMA nº 357/2005; CONAMA nº 430/2011), além de serem discutidos à luz da literatura científica.

A Tabela 7 apresenta os resultados da caracterização físico-química da água produzida do campo petrolífero de Carmópolis/SE, antes do tratamento.

**Tabela 7** - Caracterização da água produzida do campo petrolífero de Carmópolis, Sergipe.

| Parâmetros Analisados     |               |
|---------------------------|---------------|
| pH                        | 4,57 ± 0,17   |
| Temperatura (°C)          | 23,5 ± 0,21   |
| Turbidez (NTU)            | 93,55 ± 0,07  |
| ST (mg.L <sup>-1</sup> )  | 153,48 ± 2,65 |
| SDT (mg.L <sup>-1</sup> ) | 59,43 ± 0,35  |
| SST (mg.L <sup>-1</sup> ) | 94,05 ± 0,66  |

Fonte: Autora (2026).

Diante dos dados apresentados na Tabela 7, observa-se que os valores de pH e de turbidez da AP bruta não atendem aos padrões de qualidade estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e estabelece diretrizes para seu enquadramento. No art. 18, a resolução estabelece como padrão de qualidade, para corpos hídricos salinos, pH na faixa de 6,5 a 8,5 e ausência de substâncias que produzem turbidez.

No entanto, como a água produzida avaliada neste estudo apresentou caráter ácido ( $\text{pH } 4,57 \pm 0,17$ ), característica frequentemente associada à presença de gases ácidos dissolvidos, principalmente  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{CO}_2$  (Candido *et al.*, 2021; Ullattumpoyil, 2023), torna-se então, necessária a correção do pH antes de seu lançamento, uma vez que, a Resolução CONAMA nº 430/2011, que estabelece as condições de lançamento de efluentes, determina que, independentemente da fonte poluidora, qualquer efluente lançado diretamente em corpos hídricos receptores deve apresentar pH entre 5,0 e 9,0 e temperatura inferior a 40 °C, contribuindo para a qualidade do corpo hídrico receptor.

Cabe destacar que a CONAMA nº 393/2007, que dispõe sobre o descarte contínuo de água produzida em plataformas marítimas, determina que na ausência de enquadramento do corpo hídrico salino receptor, onde a plataforma estiver instalada, deve-se observar os padrões de qualidade para água salina classe 1, estabelecidos pela CONAMA nº 357/2005 no seu art. 18.

Em relação aos sólidos totais (ST), as legislações citadas não estabelecem padrões específicos de qualidade ou de lançamento em águas salinas. Entretanto, deve-se observar a Resolução CONAMA nº 430/2011 quanto aos padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água interiores, bem como a Resolução CONAMA 393/???? – para descarte offshore. Para assegurar o enquadramento do corpo hídrico receptor, deve-se consultar a Resolução CONAMA nº 357/2005.

Considerando os padrões de qualidade estabelecidos para corpos de água doce, a Resolução CONAMA nº 357/2005 determina que, para as quatro classes de águas doces, o pH do corpo hídrico deve situar-se na faixa de 6,0 a 9,0. Assim, o lançamento de efluente em corpos de água doce não deve comprometer o enquadramento do corpo hídrico receptor quanto a esse parâmetro.

No que se refere à turbidez, a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece, para águas doce, limites de até 40 NTU para a Classe 1 e até 100 NTU para Classes 2 e 3. Como a CONAMA nº 430/2011 não estabelece limites numéricos para esse parâmetro no lançamento de efluentes, deve-se assegurar que o lançamento não comprometa o enquadramento do corpo receptor. Quanto aos sólidos dissolvidos totais (SDT), a Resolução nº 357/2005 estabelece concentração máximo de 500  $\text{mg L}^{-1}$  para águas doces Classes 1,2 e 3. Assim, para preservar o enquadramento do corpo hídrico receptor, o lançamento não deve comprometer esse padrão de qualidade.

Logo, os resultados apresentados na Tabela 7 indicam que o pH e a turbidez da água produzida necessitam de correção para possibilitar seu lançamento em corpos de água doce

Classe 1, atendendo aos requisitos estabelecidos pelas resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011. Para os corpos de águas doce Classes 2 e 3, entretanto, apenas a turbidez atende ao limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

Outro aspecto que merece destaque é o descarte de água produzida no solo. Embora alguns autores (Neff *et al.*, 2011; Zhao, *et al.*, 2020) alertem para os impactos associados ao lançamento de efluentes residuais em ambientes terrestres, as legislações analisadas neste estudo não estabelecem padrões específicos para a disposição de efluentes oleosos diretamente no solo. No entanto, a resolução CONAMA nº 430/2011, em seu art. 2º, estabelece que a disposição de efluente no solo, ainda que submetido ao tratamento prévio, não deve ocasionar poluição nem contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

Com o objetivo de facilitar a comparação entre os resultados experimentais e os padrões de qualidade e de lançamento estabelecidos pelas Resoluções CONAMA nº 357/2005 e CONAMA nº 430/2011, apresenta-se o Quadro 1.

**Quadro 1** – Comparação entre os padrões de qualidade e as condições de lançamento estabelecidos pelas CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011 e os resultados da caracterização da água produzida bruta.

| Parâmetros     | Corpos Hídricos                                |                                                |                                                | Resolução CONAMA | Caracterização da AP Bruta |
|----------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------|----------------------------|
|                | Águas Salinas                                  | Águas Doces                                    | Águas Salobras                                 |                  |                            |
| pH             | 6,5 - 8,5                                      | 6,0 - 9,0                                      | Classe 1<br>6,5 - 8,5                          | Nº 357/2005      | 4,57 ±0,17                 |
|                |                                                |                                                | Classe 2 e 3<br>6,0 - 9,0                      |                  |                            |
|                | 5,0 - 9,0                                      | 5,0 - 9,0                                      | 5,0 - 9,0                                      | Nº 430/2011      |                            |
| Turbidez (NTU) | Ausência de substâncias que produzam turbidez. | Classe 1<br>Até 40<br>Classes 2 e 3<br>Até 100 | Ausência de substâncias que produzam turbidez. | Nº 357/2005      | 93,55±0,07                 |
| SDT            | -                                              | Classes 1, 2 e 3<br>500 mg L <sup>-1</sup>     | -                                              | Nº 357/2005      | 59,43±0,35                 |

Fonte: Autora (2026).

Conforme demonstrado no Quadro 1, a água produzida analisada neste estudo não atende integralmente aos padrões legais para lançamento em ecossistemas aquáticos, principalmente em razão do pH ácido e da elevada turbidez.

No contexto do reuso da água produzida para reinjeção, visando à manutenção da pressão e da produção do reservatório, os valores apresentados de pH de 4,57, SST de 94,05 mg/L e turbidez de 93,55 NTU estão significativamente acima dos limites típicos recomendados

para essa aplicação, que correspondem a pH entre 6,5 e 7,5, SST inferior a 2 mg/L e turbidez menor que 1 NTU (Ahmed *et al.*, 2025). O pH ácido pode decorrer não só da presença de gases dissolvidos ( $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ) como já mencionado, mais também da oxidação de sulfetos, de reações químicas entre os constituintes da água e da interação com a formação geológica. As elevadas concentrações de SST e turbidez indicam a presença de partículas suspensas, como argilas, precipitados minerais, produtos de corrosão e sólidos da formação, capazes de causar bloqueio dos poros, redução da permeabilidade e perda de injetividade. Esses parâmetros podem variar em função da origem e do momento da coleta, das condições de armazenamento, da temperatura, da salinidade e da eficiência da separação óleo/água. Assim, considerando os parâmetros pH, Turbidez e SST, a água requer tratamento prévio, com correção do pH e remoção dos sólidos por coagulação, floculação e filtração, antes de sua eventual reinjeção no reservatório.

Dessa forma, a água produzida foi submetida ao tratamento primário por coagulação/floculação, e sedimentação (Jar Test), empregando o sulfato de alumínio como agente coagulante e a microareia como agente de lastro, visando à redução de turbidez e sólidos suspensos totais (SST).

## **5.2. Tratamento da Água Produzida (AP)**

Os resultados obtidos no tratamento da AP são apresentados nesta seção, com o objetivo de avaliar a influência das condições operacionais, previamente estabelecidas, na eficiência do tratamento primário por coagulação/floculação com e sem microareia, seguida da sedimentação para remoção de turbidez e sólidos da água produzida.

### **5.2.1. Tratamento convencional com sulfato de alumínio para remoção de turbidez**

A Tabela 8 apresenta os valores de turbidez residual e os respectivos percentuais de remoção obtidos para AP, após os ensaios de coagulação/floculação e sedimentação empregados com sulfato de alumínio ( $0,2 \text{ g L}^{-1}$ ), na ausência e na presença de microareia ( $0,5$  e  $5,0 \text{ g L}^{-1}$ ), sob condições de pH ajustadas para 7,0 e 9,0.

**Tabela 8** – Características da água produzida, concentração de lastro, turbidez residual e percentual de remoção de turbidez com aplicação de 0,2 g.L<sup>-1</sup> do agente coagulante.

| pH  | Concentração de Lastro (g/L) | Turbidez Residual (NTU) | Remoção de Turbidez (%) |
|-----|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 7,0 | 0,50                         | 2,15 ± 0,64             | 97,70                   |
|     | 5,00                         | 1,51 ± 0,45             | 98,39                   |
|     | 0,00                         | 12,68 ± 3,99            | 86,45                   |
| 9,0 | 0,50                         | 1,51 ± 0,87             | 98,39                   |
|     | 5,00                         | 1,99 ± 0,86             | 97,88                   |
|     | 0,00                         | 2,42 ± 0,87             | 97,42                   |

Fonte: Autora (2026).

A água produzida bruta apresentou turbidez de  $93,55 \pm 0,07$  NTU, indicando elevada concentração de partículas suspensas e coloides dispersos. Esse resultado reforça a necessidade de tratamento físico-químico antes do descarte, uma vez que a turbidez pode comprometer a qualidade do corpo receptor. No reuso para reinjeção em poços de petróleo, essas partículas também podem causar perda de injetividade, dano à formação e problemas operacionais no poço e no reservatório (Ahmed *et al.*, 2025).

Após o tratamento convencional com sulfato de alumínio, na concentração de 0,2 g L<sup>-1</sup>, foram obtidas remoções de turbidez de 86,45%, em pH 7,0, e 97,42%, em pH 9,0. Portanto, nas condições avaliadas, a elevação do pH favoreceu o desempenho da coagulação/floculação. Esse parâmetro influencia a hidrólise do sulfato de alumínio e a distribuição das espécies hidrolisadas de alumínio, favorecendo, em condições adequadas, a formação do precipitado amorfo de hidróxido de alumínio. Esse precipitado promove a remoção de partículas coloidais e sólidos suspensos por coagulação por varredura (*sweep flocculation*). Nesse mecanismo, as partículas suspensas são adsorvidas e incorporadas aos flocos durante sua formação, favorecendo a sedimentação e, consequentemente, a clarificação do efluente (Cui *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2024; Tahraoui *et al.*, 2024).

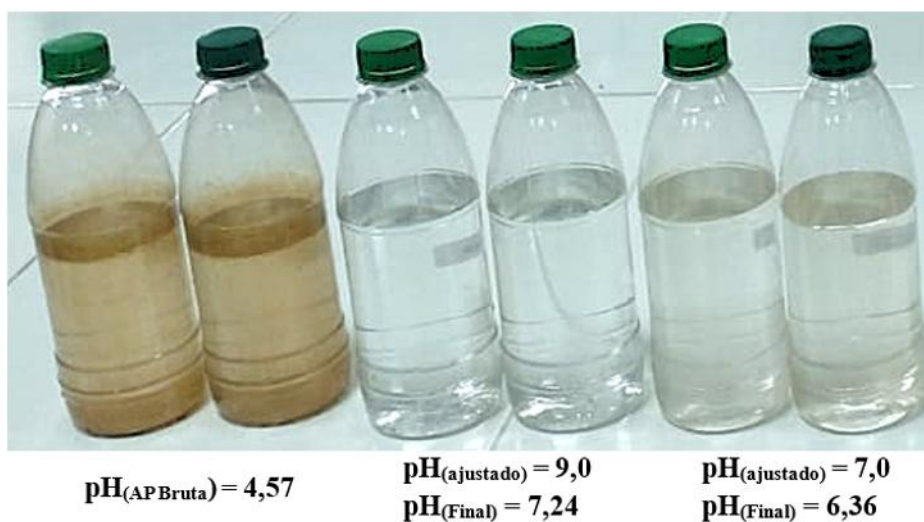
A maior eficiência obtida em pH 9,0 sugere que, nessa condição, a formação e o crescimento dos flocos contribuíram de forma mais efetiva para a remoção das partículas responsáveis pela turbidez. Esses resultados corroboram os dados de Santos *et al.* (2014), que obtiveram 93,5% de remoção utilizando sulfato de alumínio na concentração de 0,3 g L<sup>-1</sup>, em pH 9,0, no tratamento de efluente petroquímico. De modo semelhante, Andonof (2025) obteve remoções de 42,45%, em pH natural de 5,40, e de 90,79%, após ajuste para pH 7,05, no

tratamento de água produzida com a mesma dosagem de coagulante empregada neste estudo. Embora as matrizes apresentem características distintas, os resultados reforçam a influência do pH sobre a eficiência do processo.

A turbidez residual de  $2,42 \pm 0,87$  NTU, obtida após o tratamento em pH 9,0, foi consideravelmente inferior à observada na água bruta e compatível com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos de água doce Classes 1, 2 e 3, conforme apresentado no Quadro 1. Para águas salinas, essa resolução não estabelece limite numérico de turbidez; para a Classe 1, determina a ausência de substâncias que produzam turbidez. Além disso, a Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece que o lançamento de efluentes não deve ocasionar o desenquadramento do corpo hídrico receptor. Assim, embora a redução da turbidez indique a eficiência do tratamento, a adequação do efluente ao descarte deve ser avaliada em conjunto com os demais parâmetros de qualidade aplicáveis.

Mantidas constantes a dosagem do coagulante e as demais condições operacionais, a elevação do pH de 7,0 para 9,0 aumentou a eficiência do tratamento, evidenciando a influência das espécies hidrolisadas de alumínio na formação dos flocos. A Figura 13 confirma visualmente esse resultado, ao demonstrar maior clarificação da água produzida tratada em pH 9,0 em comparação à tratada em pH 7,0, em concordância com os dados quantitativos obtidos.

**Figura 13** - Remoção de turbidez da água produzida apenas com o agente coagulante.



Fonte: Autora (2026).

A maior eficiência observada nos ensaios inicialmente ajustados para meio alcalino está em consonância com a literatura, que reconhece a influência do pH sobre o desempenho do sulfato de alumínio. O ajuste do pH pode favorecer a formação de espécies hidrolisadas de

alumínio e do precipitado de que contribuem para a remoção de partículas por coagulação e floculação. Entretanto, a hidrólise do coagulante consome alcalinidade e pode provocar redução do pH ao longo do tratamento (Mazloomia *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2019; Jabbar *et al.*, 2021; Cui *et al.*, 2020; Sheng *et al.*, 2023).

Esse comportamento foi observado experimentalmente: os ensaios ajustados inicialmente para pH 7,0 apresentaram pH final de 6,36, enquanto aqueles conduzidos inicialmente em pH 9,0 atingiram pH final de 7,24. A redução do pH é compatível com o consumo de alcalinidade associado à hidrólise do sulfato de alumínio, conforme descrito por Cui *et al.* (2020) e Sheng *et al.* (2023). Contudo, como a alcalinidade não foi determinada diretamente, os resultados permitem indicar a ocorrência desse consumo, mas não o quantificar.

Resultados semelhantes foram relatados por Ugonabo *et al.* (2022), que obtiveram aproximadamente 95% de remoção de turbidez utilizando sulfato de alumínio na concentração de 0,1 g L<sup>-1</sup>, em pH 10 (inicial), no tratamento de água produzida da indústria petrolífera. Embora esse percentual tenha sido ligeiramente inferior ao obtido no presente estudo, a diferença pode estar relacionada às características específicas das águas produzidas avaliadas, incluindo composição química, concentração de sólidos suspensos totais, teor de óleos e graxas e demais condições operacionais.

De modo geral, o sulfato de alumínio apresentou potencial para a clarificação da água produzida. Entre as condições avaliadas, o tratamento realizado com 0,2 g L<sup>-1</sup> de coagulante e ajuste inicial para pH 9,0 apresentou o melhor desempenho. Nessa condição, a turbidez residual foi de  $2,42 \pm 0,87$  NTU. Portanto, considerando o limite de 2 NTU adotado como referência para a reinjeção, a coagulação/floculação realizada exclusivamente com sulfato de alumínio não foi suficiente para atingir o enquadramento, indicando a necessidade de etapas complementares de tratamento, como filtração. Essa condição, contudo, demonstra potencial para aplicação como etapa de pré-tratamento em sistemas de coagulação/floculação lastreada.

### **5.2.2. Tratamento por coagulação/floculação lastreada com microareia para remoção de turbidez.**

A Tabela 8 também apresenta os resultados obtidos para a coagulação/floculação lastreada, na qual o sulfato de alumínio foi associado à microareia como agente de lastro. Essa estratégia foi adotada para avaliar a influência da microareia na formação e na sedimentação dos flocos, bem como seu potencial para aumentar a eficiência da remoção de turbidez da água produzida.

A incorporação da microareia resultou em elevada remoção de turbidez em todas as condições experimentais avaliadas. Para os ensaios conduzidos em pH 7,0 foram obtidas remoções de 97,70% e 98,39% com a adição de 0,5 g.L<sup>-1</sup> e 5,0 g.L<sup>-1</sup> de microareia respectivamente. Quando comparados ao tratamento convencional sem a utilização de microareia (86,45% em pH 7,0), observa-se um ganho expressivo de 11,25% (0,5 g.L<sup>-1</sup>) e 11,94% (5,0g.L<sup>-1</sup>) de desempenho decorrente da incorporação do agente de lastro, evidenciando sua contribuição para o processo de clarificação da água produzida.

Nos ensaios realizados em pH 9,0, as remoções de turbidez foram de 98,39% para 0,5 g.L<sup>-1</sup> de microareia e 97,88% para 5,0 g.L<sup>-1</sup>, valores bastante próximos entre si e ligeiramente superiores ao tratamento convencional conduzido na mesma condição de pH (97,42%). Embora as diferenças percentuais sejam pequenas, os resultados demonstraram que a associação entre o sulfato de alumínio e a microareia manteve elevada eficiência de remoção de turbidez, confirmando a viabilidade da coagulação floculação lastreada para o tratamento de água produzida.

A melhoria observada com a incorporação da microareia pode ser explicada pela sua atuação como agente de lastro. Durante a etapa de floculação, as partículas minerais são incorporadas aos flocos formados durante a hidrólise das espécies de alumínio provenientes do sulfato de alumínio, aumentando sua massa específica e favorecendo uma sedimentação mais rápida e eficiente. Esse mecanismo promove a formação de flocos maiores, mais densos e mecanicamente mais estáveis, reduzindo a permanência de partículas suspensas na fase líquida e contribuindo para a diminuição da turbidez residual. Além disso, a utilização de material de lastro favorece o aumento da velocidade de sedimentação dos flocos e evidencia a separação sólido-líquido (Okoro *et al.*, 2021).

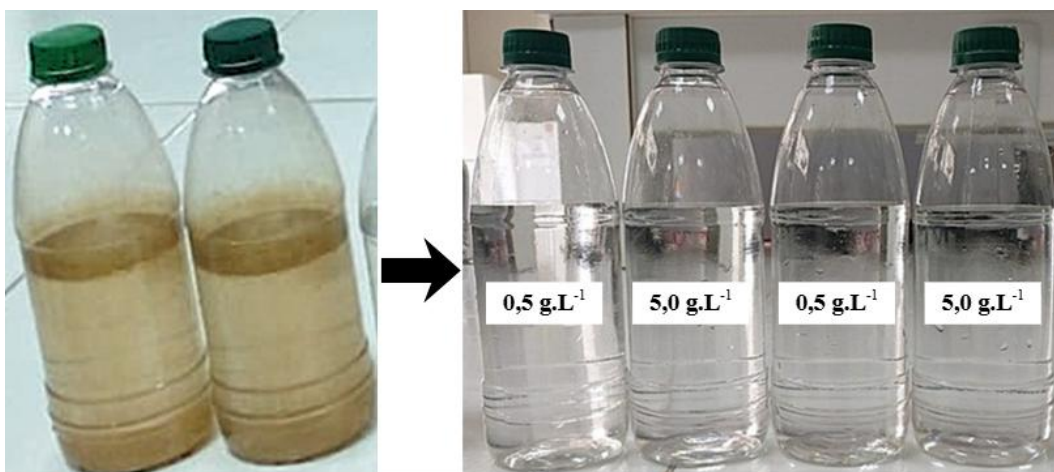
Enquanto, neste estudo, em pH 7,0 a maior remoção foi obtida com 5,0 g.L<sup>-1</sup> de microareia (98,39%), em pH 9,0, a mesma eficiência (98,39%) foi obtida com apenas 0,5 g.L<sup>-1</sup> de microareia. Esse comportamento indica que em condições de maior eficiência do coagulante, observada no tratamento conduzido exclusivamente com o sulfato de alumínio, o aumento da quantidade de material de lastro não necessariamente resulta em melhoria adicional do processo. Uma possível explicação é que após determinado limite, a formação dos flocos passa a ser controlada predominantemente pela eficiência da coagulação química, tornando menos significativa a influência da quantidade de micro areia adicionada.

Outro aspecto importante refere-se à diferença relativamente pequena entre as remoções de turbidez obtidas utilizando 0,5 g.L<sup>-1</sup> e 5,0 g.L<sup>-1</sup> de microareia. Essa proximidade também sugere que o aumento na concentração do agente de lastro não ofereceu ganhos proporcionais

na redução de turbidez. Sob o ponto de vista operacional esse resultado é bastante relevante, pois demonstra que menores dosagens de microareia podem produzir desempenho semelhante ao obtido com concentrações mais elevadas, reduzindo o consumo de insumos e os custos associados ao tratamento.

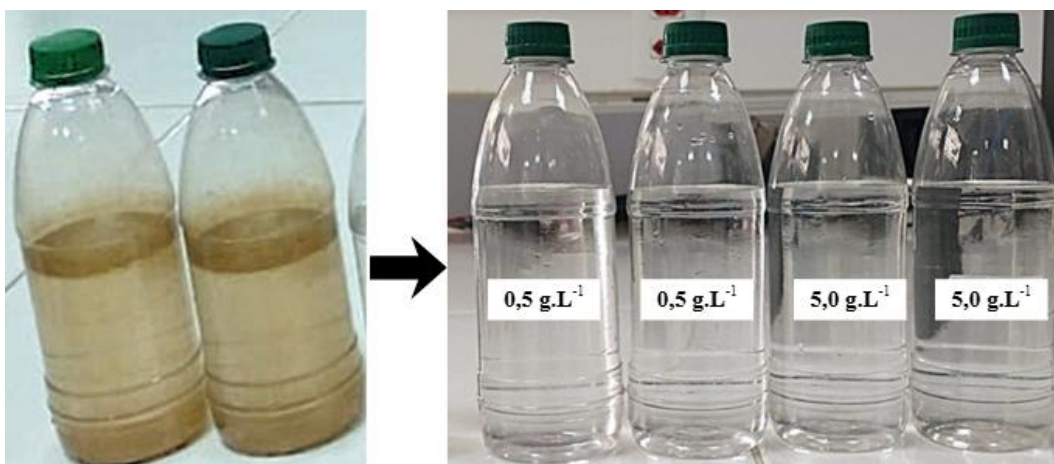
As Figuras 14 e 15 corroboram os resultados quantitativos apresentados na Tabela 7, evidenciando visualmente a elevada clarificação obtida após a aplicação do tratamento lastreado. Em ambas as condições de pH, observa-se redução expressiva da turbidez quando comparada a água produzida bruta, confirmando a eficiência da coagulação/floculação associada à microareia.

**Figura 14** - Remoção de turbidez da AP com o tratamento lastreado em pH do meio igual a 7,0.



Fonte: Autora (2026).

**Figura 15** - Remoção de turbidez da AP com o tratamento lastreado em pH do meio igual a 9,0.



Fonte: Autora (2026).

A concordância entre os resultados visuais e os valores experimentais reforça a confiabilidade dos ensaios realizados. Além disso, demonstra que a utilização da microareia favoreceu a formação de flocos com maior capacidade de sedimentação, reduzindo significativamente a quantidade de partículas remanescentes em suspensão ao final dos 30 min de decantação.

Do ponto de vista da aplicação industrial, os resultados obtidos indicam que a condição operacional composta por pH 9,0, sulfato de alumínio ( $0,2 \text{ g L}^{-1}$ ) e microareia ( $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ ) apresentou melhor equilíbrio entre eficiência de remoção e consumo de insumos. Nessa condição foi alcançada a remoção de 98,39%, com turbidez residual de apenas  $1,51 \pm 0,87$  NTU, empregando uma dosagem de microareia significativamente inferior à maior concentração avaliada.

A adoção de menores concentrações de microareia também apresenta vantagens econômicas e ambientais, uma vez que reduz o consumo de material, diminui a geração de lodo contendo partículas minerais e simplifica as etapas posteriores de manejo e disposição dos resíduos gerados no tratamento. Saththasivam *et al.* (2024) destacam que a otimização das unidades de tratamento primário deve considerar não apenas a eficiência de remoção, mas também os aspectos relacionados aos custos operacionais, à geração de resíduos e à sustentabilidade do processo.

Em geral, os resultados demonstraram que a incorporação da microareia aumentou significativamente o desempenho da coagulação/floculação em pH 7,0 e manteve elevada eficiência em pH 9,0, indicando que sua principal contribuição consiste em favorecer a formação e a sedimentação dos flocos. Esses resultados evidenciam que a coagulação lastreada constitui uma alternativa para o tratamento de água produzida proveniente da indústria de petróleo.

### **5.2.3. Comportamento do tratamento convencional em relação aos ST e SS**

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de coagulação/floculação utilizando sulfato de alumínio, isoladamente e associado à microareia como um agente de lastro, foi estabelecida a Tabela 9, que apresenta os valores remanescentes de sólidos dissolvidos totais (STD), sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST) e os sólido sedimentáveis (SS), Bem como os percentuais remanescentes de SDT e SST após o tratamento da água produzida.

**Tabela 9** - Representação dos valores de sólidos totais (ST).

| Características | Lastro (g/L) | SDT (mg/mL) | ST (mg/mL) | SST (mg/mL) | SS* (mg/mL) | SS = SS* - [(Areia (g/L) + Coagl (g/L))] | SDT (%) | ST (%) | SST (%) | [(SDT + SST) não sed.] - SS |
|-----------------|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------------------------------------|---------|--------|---------|-----------------------------|
| AP Bruta        | 0,00         | 59,43       | 153,48     | 94,05       | -           | -                                        | 38,72   | 100,00 | 61,28   | -                           |
| pH=7,0          | 0,50         | 56,02       | 138,18     | 82,16       | 15,30       | 14,60                                    | 40,54   | 90,03  | 59,46   | 122,88                      |
|                 | 5,00         | 56,01       | 138,29     | 82,28       | 15,19       | 9,99                                     | 40,50   | 90,11  | 59,50   | 123,11                      |
|                 | 0,00         | 55,82       | 136,61     | 80,79       | 15,81       | 15,11                                    | 43,87   | 89,01  | 56,13   | 121,86                      |
| pH=9,0          | 0,50         | 55,91       | 135,17     | 79,26       | 16,87       | 11,67                                    | 40,86   | 88,07  | 59,14   | 119,74                      |
|                 | 5,00         | 60,40       | 137,67     | 77,27       | 18,31       | 18,31                                    | 41,36   | 89,70  | 58,64   | 116,87                      |
|                 | 0,00         | 60,08       | 129,90     | 69,82       | 23,58       | 23,58                                    | 46,25   | 84,63  | 53,75   | 103,31                      |

SDT - Sólidos Dissolvidos Totais;

ST - Sólidos totais;

SST - Sólidos Suspensos Totais;

SS\*- Sólidos Sedimentáveis;

SS - Sólidos Sedimentáveis menos a dosagem do lastro somada agente coagulante;

[(SDT + SST)<sub>não dis.</sub>]- (SDT + SST) não dissolvidos

Fonte: Autora (2026).

A análise dos sólidos presentes na água produzida complementa a avaliação da eficiência da coagulação/floculação, uma vez que esse processo promove a agregação de partículas suspensas e coloides em flocos sedimentáveis. Assim, além da redução da turbidez espera-se uma diminuição dos sólidos totais remanescentes e um aumento da fração de sólido sedimentáveis (SS).

Nos ensaios realizados na ausência da microareia, verificou-se que o tratamento conduzido em pH 9,0 apresentou o melhor desempenho entre as condições avaliadas, resultando em menor teor residual de ST ( $129,90 \text{ mg mL}^{-1}$ ) e maior quantitativo de SS ( $23,58 \text{ mg mL}^{-1}$ ). Esse comportamento acompanha os resultados obtidos para turbidez, Indicando que a elevação do pH favoreceu a hidrólise do sulfato de alumínio e a formação de flocos com maior capacidade de sedimentação.

Quando analisado os ensaios conduzidos com a incorporação da microareia ao processo, verificou-se um comportamento distinto daquele observado para a turbidez. Em pH 7,0, a dosagem de  $0,5 \text{ g L}^{-1}$  de microareia proporcionou resultados ligeiramente superiores aos obtidos com  $5,0 \text{ g L}^{-1}$  de lastro, apresentando menor concentração residual de ST ( $138,18 \text{ mg mL}^{-1}$ ) e maior quantidade de SS ( $14,60 \text{ mg mL}^{-1}$ ), desconsiderando a massa correspondente ao coagulante e à microareia. Em pH 9,0, a mesma tendência foi observada, uma vez que a dosagem de  $0,5 \text{ g L}^{-1}$  resultou em menor teor de ST ( $135,17 \text{ mg mL}^{-1}$ ) quando comparada a dosagem de  $5,0 \text{ g L}^{-1}$  ( $137,67 \text{ mg mL}^{-1}$ ). Entretanto, para o sólido sedimentáveis corrigidos

(SS), a maior dosagem de micro areia apresentou valor superior ( $18,31 \text{ mg mL}^{-1}$ ), em relação a dosagem de  $0,5 \text{ g L}^{-1}$  ( $11,67 \text{ mg mL}^{-1}$ ).

Os resultados demonstram que o aumento da concentração de microareia não promoveu redução adicional dos sólidos totais remanescentes e que seu efeito sobre os sólidos sedimentáveis não apresentou comportamento uniforme entre as condições avaliadas. Dessa forma, a resposta do sistema depende da interação entre a dosagem do material de lastro e as condições de coagulação, não sendo possível afirmar que concentrações mais elevadas de microareia resultem necessariamente em maior eficiência da remoção de sólidos.

Esse comportamento difere parcialmente daquele observado para a turbidez. Enquanto a incorporação da microareia promoveu ganhos expressivos na remoção de turbidez em pH 7,0 e manteve elevada eficiência em pH 9,0, esses ganhos não foram igualmente observados para os sólidos totais (ST). Uma vez que o tratamento convencional, sem adição da microareia, apresentou menores concentrações residuais de ST, especialmente em pH 9,0.

Os resultados indicam que a remoção de turbidez e a redução dos ST não apresentam, necessariamente, um comportamento proporcional, uma vez que a turbidez está principalmente associada as partículas responsáveis pelo espalhamento da luz, enquanto os sólidos totais incluem tanto a fração suspensa quanto à fração dissolvida, sendo esta última pouco afetada pelo processo de coagulação/floculação (APHA; AWWA; WEF, 2023).

Além disso, Cui *et al.* (2020) destacam que eficiência da coagulação/floculação lastreada Depende da dosagem adequada do material de lastro, uma vez que concentrações excessivas de microareia podem favorecer a quebra dos flocos formados, enquanto dosagens insuficientes podem limitar sua capacidade de lastreamento. Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com essa interpretação, indicando que o aumento da concentração de microareia de  $0,5 \text{ g L}^{-1}$  para  $5,0 \text{ g L}^{-1}$  não proporcionou melhoria consistente na remoção de sólidos.

Considerando especificamente os parâmetros apresentados na Tabela 9, observa-se que o tratamento convencional conduzido exclusivamente com sulfato de alumínio em pH 9,0 apresentou o melhor desempenho simultâneo para sólidos totais, alcançando melhor teor residual de ST ( $129,90 \text{ mg mL}^{-1}$ ) e maior quantidade de SS ( $23,58 \text{ mg mL}^{-1}$ ). Dessa forma, para esses parâmetros a incorporação da microareia não proporcionou os ganhos que justificassem sua utilização nas condições experimentais avaliadas.

Sob o ponto de vista operacional, os resultados indicam que a dosagem de  $0,5 \text{ g L}^{-1}$  de microareia pode ser considerada a mais vantajosa entre as dosagens avaliadas, Uma vez que proporcionou menores valores residuais de sólidos totais, utilizando uma quantidade significativamente inferior de material de lastro. Entretanto, considerando conjuntamente os

parâmetros ST e SS, o tratamento conduzido apenas com sulfato de alumínio em pH 9,0 apresentou o melhor desempenho global, indicando que, nas condições avaliadas a incorporação da microareia não proporcionou ganhos adicionais para os parâmetros ST e SS nas condições experimentais avaliadas.

#### **5.2.4. Comportamento do tratamento convencional, apenas com o sulfato de alumínio e em conjunto com a microareia em relação aos SST**

Os resultados referentes aos sólidos suspensos totais (SST), apresentados na Tabela 9, permitem avaliar de forma complementar a eficiência do processo de coagulação/floculação, uma vez que esse parâmetro representa a fração de sólidos presentes em suspensão na amostra. A análise conjunta da turbidez e dos SST possibilita compreender não apenas a clarificação visual do efluente, mas também o comportamento das partículas sólidas remanescentes após o tratamento.

De maneira geral, verificou-se que o tratamento convencional, utilizando exclusivamente sulfato de alumínio, apresentou melhor desempenho quando conduzido em pH 9,0, comportamento semelhante ao observado anteriormente para remoção de turbidez. Nessa condição operacional foi registrado o menor percentual residual de SST ( $67,82 \text{ mg mL}^{-1}$ ), indicando que o aumento do pH favoreceu a formação de flocos mais densos e com maior capacidade de sedimentação.

Esse comportamento está associado à maior eficiência da coagulação em meio levemente alcalino, favorecendo a formação de flocos com maior capacidade de sedimentação, conforme discutido anteriormente.

Resultados semelhantes foram observados por Andonof (2025), que também verificou aumento da eficiência de remoção de SST (72,84 %) após o ajuste de pH (7,05) da água produzida no tratamento apenas com o agente coagulante. Em conjunto  $5,0 \text{ g L}^{-1}$  (microareia) mais agente coagulante, a autora observou uma redução de SST de 74,35 %. Embora os valores observados nos dois estudos sejam diferentes, ambos demonstram que o pH constitui uma variável determinante para a eficiência da coagulação utilizando sulfato de alumínio, apesar das diferenças entre as características físico-químicas das águas produzidas avaliadas.

Nos ensaios conduzidos com coagulação lastreada em pH 7,0, os percentuais residuais de SST foram de 59,46% e 59,50% para as concentrações de  $0,50 \text{ g.L}^{-1}$  e  $5,0 \text{ g.L}^{-1}$  de microareia, respectivamente. Esses valores foram ligeiramente inferiores ao percentual observado para água produzida bruta (61,28%), indicando que houve redução de SST em relação à água produzida bruta, embora essa redução tenha sido relativamente discreta.

Comportamento semelhante foi observado nos ensaios realizados em pH 9,0, nos quais os percentuais residuais de SST foram 59,14% para 0,50 g.L<sup>-1</sup> e 58,64% para 5,0 g.L<sup>-1</sup> de microareia. Entre essas condições, a maior redução foi obtida utilizando 5,0 g.L<sup>-1</sup> de microareia, sugerindo que, para o parâmetro SST, a maior concentração de agente de lastro apresentou ligeira redução adicional.

É importante destacar que essa tendência difere daquela observada para a turbidez na qual a concentração de 0,50 g.L<sup>-1</sup> apresentou desempenho semelhante ou até superior ao obtido com 5,0 g.L<sup>-1</sup>. Essa diferença evidencia que a remoção de turbidez e a remoção de sólidos suspensos, embora relacionadas, não são necessariamente proporcionais, pois cada parâmetro representa uma característica distinta da água produzida.

A turbidez corresponde a uma propriedade óptica, determinada pela capacidade das partículas de dispersarem ou absorverem a luz incidente. Dessa forma, partículas coloidais e de pequenas dimensões, mesmo presentes em baixas concentrações, podem contribuir significativamente para o aumento da turbidez. Em contrapartida, os SST representam a massa total de sólidos suspensos retidos durante a determinação gravimétrica. Assim, partículas maiores podem contribuir, de forma mais expressiva, para os valores de SST sem, necessariamente provocar aumento proporcional da turbidez (APHA; AWWA; WEF, 2023).

Em razão dessa diferença metodológica e das características físicas das partículas, reduções de turbidez nem sempre são acompanhadas por diminuições equivalentes dos SST. Durante a coagulação/floculação, partículas muito finas podem ser removidas de maneira eficiente, promovendo expressiva redução de turbidez, enquanto parte da massa sólida pode permanecer em suspensão sob a forma de partículas maiores ou agregados que não sedimentam completamente durante o tempo de sedimentação adotado. Além disso, o comportamento ótico das partículas também depende de fatores como tamanho, forma, composição e índice de refração, o que contribui para que turbidez e SST respondam de maneira distinta ao processo de tratamento (Crittenden *et al.*, 2012; APHA; AWWA; WEF, 2023). Essa diferença explica por que esses parâmetros nem sempre apresentam comportamento proporcional, conforme descrito por Tahraoui *et al.*, (2024).

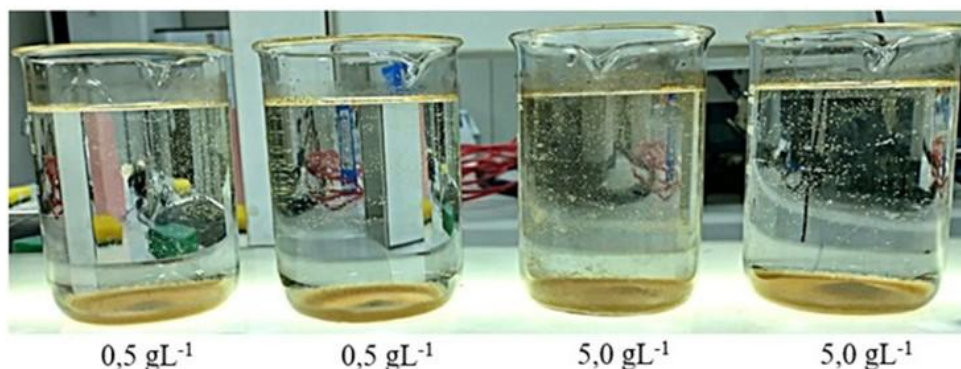
Outro aspecto relevante refere-se ao efeito da microareia sobre a sedimentação dos flocos. Embora a microareia aumente a densidade dos flocos formados durante a floculação, os ganhos observados para SST foram mais discretos do que aqueles verificados para turbidez, Indicando que o favorecimento da sedimentação dos flocos não se refletiu em redução proporcional da massa de sólidos suspensos remanescentes.

Sob o ponto de vista operacional, os resultados indicam que a coagulação/floculação foi eficiente para promover a redução dos sólidos suspensos da água produzida, sobretudo quando conduzida em pH 9,0. Entretanto, considerando especificamente os resultados de SST apresentados na Tabela 8, o tratamento convencional realizado exclusivamente com sulfato de alumínio apresentou o menor percentual residual de SST (53,75%), superando todas as condições avaliadas com a incorporação da microareia. Além disso, as diferenças relativamente pequenas entre as dosagens de  $0,50 \text{ g.L}^{-1}$  e  $5,0 \text{ g.L}^{-1}$  indicam que o aumento da concentração do agente de lastro não resultou em melhoria significativa de remoção de SST, devendo sua aplicação ser avaliada também sob os aspectos econômicas e operacionais, como o consumo de material e geração de resíduos.

Assim, os resultados demonstram que tanto o tratamento convencional quanto o tratamento lastreado foram capazes de reduzir a quantidade de sólidos suspensos (SST) presentes na água produzida. Contudo, diferentemente do observado para a turbidez, a incorporação da microareia não proporcionou melhoria da remoção de SST em relação ao tratamento convencional conduzido exclusivamente com sulfato de alumínio. Esses resultados evidenciam que a resposta da coagulação/floculação lastreada depende dos parâmetros de qualidade considerados, reforçando a necessidade de avaliar turbidez e SST de forma complementar, e não como indicadores equivalentes da eficiência do tratamento.

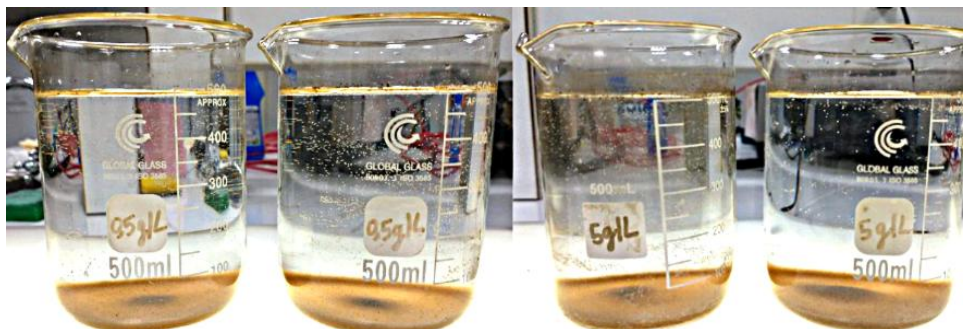
Para complementar a análise quantitativa dos SST, realizou-se também uma avaliação visual dos ensaios após o período de sedimentação. As Figuras 16 e 17 apresentam o aspecto dos béqueres no final do processo, permitindo observar a formação e a sedimentação dos flocos nas diferentes condições experimentais. Embora essa avaliação seja qualitativa, ela auxilia na interpretação dos resultados obtidos para turbidez, SST e sólidos sedimentáveis (SS\*), evidenciando o comportamento do processo de coagulação/floculação.

**Figura 16** - Imagem dos flocos dispersos no efluente em pH 7,0 após 30 min sedimentação.



Fonte: Autora (2026)

**Figura 17** - Imagem dos flocos dispersos no efluente em pH 9,0 após 30 min sedimentação



Fonte: Autora (2026).

### 5.2.5. Comportamento do tratamento em relação a remoções de Turbidez e de SST

Os resultados obtidos nesse estudo demonstram que o tratamento promoveu elevada remoção de turbidez, alcançando remoções superiores a 97% nas condições experimentais. Entretanto, as reduções observadas para SST foram menos expressivas, indicando que a clarificação visual da água produzida ocorreu de forma mais intensa do que a redução de massa total de sólidos suspensos.

Essa diferença evidencia que a eficiência do tratamento não pode ser avaliada com base em um único parâmetro. Embora a turbidez e os SST estejam relacionados à presença de partículas na água produzida, cada um representa uma característica distinta do efluente, razão pela qual suas respostas ao processo de coagulação/floculação não são necessariamente proporcionais.

Além disso, verificou-se que a incorporação da microareia influenciou de maneira mais evidente a remoção da turbidez do que a redução dos SST. Esse resultado indica que a principal contribuição da microareia está relacionada ao processo de clarificação e à dinâmica de sedimentação dos flocos, e não necessariamente na remoção de sólidos suspensos.

Observa-se que todas as condições avaliadas proporcionaram elevada remoção de turbidez, enquanto as diferenças entre os percentuais de SST foram relativamente pequenas. Esse comportamento reforça que a eficiência do tratamento não deve ser interpretada com base em um único parâmetro, sendo necessária a avaliação conjunta de diferentes indicadores físico-químicos para caracterizar adequadamente o desempenho do processo.

Os resultados obtidos corroboram a literatura, que destaca que turbidez e SST, apesar de frequentemente apresentarem correlação positiva, não são parâmetros equivalentes (APHA, AWWA e WEF, 2023). Alterações na distribuição granulométrica, na forma e na composição

das partículas podem modificar essa relação, tornando indispensável a análise conjunta desses indicadores em estudos de tratamento de água produzida e demais efluentes.

Sob a perspectiva da aplicação prática, a elevada remoção de turbidez obtida em todas as condições experimentais demonstra que o processo de coagulação/floculação foi eficiente para promover a clarificação da água produzida. Entretanto, a permanência de parte dos sólidos suspensos evidencia que, dependendo do padrão de lançamento ou do reuso pretendido, etapas complementares de tratamento, como filtração ou processos de separação mais refinados, podem ser necessárias para aumentar a eficiência global do sistema.

De forma geral, a análise integrada dos resultados confirma que a associação entre sulfato de alumínio e microareia constitui uma alternativa promissora para o tratamento de água produzida, sobretudo em relação a remoção de turbidez. Entretanto, para os parâmetros relacionados aos sólidos (ST, SST e SS), a incorporação da microareia não proporcionou ganhos consistentes em relação ao tratamento convencional conduzido apenas com o sulfato de alumínio.

#### **5.2.6. Limitações Experimentais**

A Figura 18 ilustra a retenção de óleos, graxas e sólidos nas paredes dos recipientes utilizados durante o manuseio da água produzida, evidenciando uma das limitações experimentais observadas neste estudo. Essa retenção pode contribuir para pequenas variações na distribuição dos sólidos entre as amostras analisadas, influenciando os resultados obtidos para os parâmetros gravimétricos.

**Figura 128** - Recipientes com óleos, graxas e sólidos retidos nas paredes.



Fonte: Autora (2026).

Além das limitações relacionadas ao fracionamento da amostra, devem ser considerados possíveis incertezas associadas às determinações instrumentais. Assim, a partir de análises com as sondas de pH e multiparâmetro para efluentes oleosos, como a água produzida, também devem ser levados em consideração, de acordo com o método 4500-H<sup>+</sup>B (*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*), que o óleo presente em efluentes cria uma película de revestimento no sensor, comprometendo sua resposta analítica (APHA, AWWA; WEF, 2012; Neme, 2026), podendo resultar em medições imprecisas.

Em virtude dessa informação, é relevante considerar uma possível interferência nos valores SDT para a AP bruta, uma vez que o princípio de funcionamento das sondas é o mesmo.

A falta de determinação de SS para a AP bruta, por meio do Cone de Sedimentação Imhoff constitui uma limitação desse estudo, considerando a importância desse parâmetro para uma avaliação mais completa do comportamento do tratamento e para a interpretação dos resultados obtidos.

De modo geral, embora os valores residuais de SST não tenham acompanhado proporcionalmente as elevadas remoções de turbidez, isso não significa que o tratamento tenha sido ineficiente na remoção de SST.

## 6. CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu avaliar a eficiência da coagulação/floculação convencional, utilizando sulfato de alumínio, e da coagulação/floculação lastreada com microareia no tratamento da água produzida proveniente das atividades *upstream* da indústria de petróleo e gás, o que permite concluir que ambas apresentam potencial para promover a clarificação do efluente, contribuindo para sua gestão ambiental e ampliando as possibilidades de reuso.

Os resultados obtidos demonstraram que ambos os tratamentos foram eficientes na clarificação da água produzida, alcançando remoção de turbidez entre 86,45% e 98,39%. A associação da microareia ao tratamento convencional favoreceu a formação de flocos mais densos e com maior capacidade de sedimentação, contribuindo principalmente para a clarificação da água produzida e para a elevada remoção de turbidez observada nas condições avaliadas.

A influência da alcalinidade mostrou-se determinante para a eficiência da coagulação/floculação. Em síntese, os melhores resultados foram obtidos em pH 9,0, evidenciando a influência dessa variável sobre a eficiência do processo.

Entre as condições avaliadas, a utilização de 0,5 g L<sup>-1</sup> de microareia apresentou desempenho semelhante ao obtido com 5,0 g L<sup>-1</sup>, indicando que menores dosagens do agente de lastro podem proporcionar desempenho semelhante, com potencial redução do consumo de insumos e dos custos operacionais, sem comprometer a eficiência do tratamento.

Em relação aos sólidos suspensos totais (SST), verificou-se redução desse parâmetro após o tratamento, embora em menor proporção, quando comparada à remoção de turbidez. Esse comportamento evidencia que a turbidez e os SST devem ser considerados parâmetros complementares para avaliação da eficiência do tratamento, devendo ser interpretados em conjunto.

Para os parâmetros relacionados aos sólidos (ST, SST e SS), verificou-se que a incorporação da microareia não promoveu ganhos consistentes em relação ao tratamento convencional conduzido apenas com o sulfato de alumínio. Esses resultados evidenciam que os benefícios da coagulação/floculação lastreada depende do parâmetro de qualidade considerado reforçando a importância da avaliação integrada dos diferentes indicadores físico-químicos

Os resultados obtidos demonstraram que a coagulação/floculação lastreada com microareia constitui uma tecnologia promissora para a clarificação da água produzida, sobretudo em relação à remoção de turbidez, podendo contribuir para o desenvolvimento de processos mais eficientes, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis na indústria do petróleo.

Por fim, verificou-se, ainda, que o aumento da concentração de microareia não promoveu melhorias proporcionais na eficiência do tratamento para os parâmetros avaliados.

## 7. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS POSTERIORES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se que pesquisas futuras contemplem os seguintes aspectos:

- A Determinação dos teores de óleos e graxas (TOG), de modo a avaliar a eficiência do tratamento na remoção desse parâmetro de controle da água produzida;
- A investigação de uma faixa mais ampla de valores de pH e de dosagens de sulfato de alumínio e microareia, visando a otimização das condições operacionais do processo de coagulação/floculação lastreada;
- A avaliação da influência da granulometria e da concentração da microareia na formação, estabilidade e velocidade de sedimentação dos flocos;
- A determinação da velocidade de sedimentação dos flocos e da produção de lodo gerado durante o tratamento, possibilitando uma avaliação mais abrangente da viabilidade operacional do processo;
- A caracterização mais detalhada dos sólidos presentes na água produzida, incluindo a quantificação dos sólidos sedimentáveis da amostra bruta, utilizando a amostra integral, diretamente do recipiente de coleta, sem fracionamento prévio, de forma a minimizar possíveis interferências decorrentes da sedimentação durante o armazenamento e manejo das amostras;
- A avaliação do desempenho do tratamento em escala piloto, permitindo verificar a aplicabilidade da coagulação/floculação/lastreada em condições operacionais mais próximas da realidade industrial.

## REFERÊNCIAS

ABDELHAMID, C.; LATRACH, A.; RABIEI, M.; VENUGOPAL, K. Produced water treatment technologies: A Review. *Energies*, v.18, n.1, 63, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18010063>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/1/63>. Acesso em 29/05/2025.

ABDULMAJEED, B. A.; OLEIWI, H. B. Evaluation of alum/lime coagulant for the removal of turbidity from Al-Ahdab Iraqi oilfields produced water. *Journal of Engineering*, v. 21, n. 7, p. 145-153, 2015. DOI: 10.31026/j.eng.2015.07.11. Disponível em: <https://joe.uobaghdad.edu.iq/index.php/main/article/view/399>. Acesso em 11/08/2026.

AHMED, T. A.; AYOUB, S. S.; RAMADAN, S.; ABDUL-KAREEM, L. Produced water effluent in East Baghdad oil field: treatment for oil recovery application. *Journal of Water Resources and Geosciences*, v.4, nº 1, p. 128-142, 2025. Disponível em <https://jwrg.gov.iq/index.php/jwrg/article/view/127>. Acesso em 30/07/2026.

AL-GHOUTI, M. A.; AL-KAAB, M. A.; ASHFAQ, M. Y.; DA'NA, D. A. Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. *Journal of Water Process Engineering*, v. 28, p. 222-239, 2019. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.02.001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714418306858>. Acesso em 16/07/2025.

ALI, S. K.; ABDOU, M. M.; EMARA, M. M.; FARAG, R. S.; MUBARAK, M. F. Eco-friendly solutions: a comprehensive review of natural coagulants for sustainable water treatment. *Environ Geochem Health*, 2025; 47 (12):525. DOI: 10.1007/s10653-025-02803-3. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12575516/>. Acesso em 09/04/2026.

ANDONOF, M. T. Tratamento primário de água produzida: coagulação lastreada com microareia e resíduos de crustáceos e moluscos. 2025. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais). Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE, 2025.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF - WATER ENVIRONMENT FEDERATION. (2017) Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater. 23. Ed. Washington, D.C.: APHA/AWWA/WEF.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF - WATER ENVIRONMENT FEDERATION. (2023) Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater. 24. Ed. Washington, D.C.: APHA/AWWA/WEF.

ALMUTAIRI, M. Evaluate the effectiveness technology for the treatment of oily wastewater. *Journal of Water and Health*, v. 20, n. 8, p. 1171-1187. DOI: 10.2166/wh.2022.089. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wh.2022.089>. Acesso em 15/01/2026.

ALOMAR, T. S.; HAMEED, B. H.; USMAN, M.; ALMOMANI, F. A.; BAÁBBAD, M. M.; KHRAISHEH, M. Recent advances on the treatment of oil fields produced water by adsorption

and advanced oxidation processes. *Journal of Water Process Engineering*, v. 49, p. 103034, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103034>. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714422004780?via%3Dihub>. Acesso em 30/10/2025.

AL-SAHARI, M. AL-GHEETHI, A. A. S.; RADIN MOHAMED, R. M. S. Natural coagulates for wastewater treatment; A review for application and mechanism. In: Prospects of fresh market wastes management in developing countries. Cham: Springer, 2020 p. 17–31. DOI: 10.1007/978-3-030-42641-5\_2. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/340062392\\_Natural\\_Coagulates\\_for\\_Wastewater\\_Treatment\\_A\\_Review\\_for\\_Application\\_and\\_Mechanism](https://www.researchgate.net/publication/340062392_Natural_Coagulates_for_Wastewater_Treatment_A_Review_for_Application_and_Mechanism). Acesso em 03/11/2025.

AMAKIRI, K. T.; CANON A. R.; MOLINARI M.; ANGELIS-DIMAKIS A. Review of oilfield produced water treatment Technologies. *Chemosphere*, [S. l.], v. 298, 134064, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134064>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522005574>. Acesso em 23/07/2025.

AMAKIRI, K. T.; OGOLO, N. A.; ANGELIS-DIMAKIS, A.; ALBERT, O. Physicochemical assessment and treatment of produced water: A case study in Niger delta Nigeria. *Petroleum Research*, v. 8, n. 1, p. 87-95, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2022.05.003>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096249522000308?via%3Dihub>. Acesso em 16/07/2025.

ARAUJO, R. N.; GOMES, V. S.; LIMA, E. G.; DUARTE, T. M.; FERREIRA, R. S. B.; CAVALCANTE, M. T. Estudo comparativo do sulfato de alumínio e ferro no processo de coagulação/floculação da água do açude Epitácio Pessoa, Boqueirão-PB. *Revista do Instituto Nacional de Semiárido (REVINSA)*, v.1, n. 2, p. 30-35, 2022.

BARBOSA, A. M. A.; NAVONI, J.; TAVARES, J. L. Caracterização e análise do potencial da água produzida como alternativa para reuso. *HOLOS*, v. 8, p. 1-15, 2019. DOI: DOI: 10.15628/holos.2019.9200. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/338662891\\_CHARACTERIZACAO\\_E\\_ANALISE\\_DO\\_POTENCIAL\\_DA\\_AGUA\\_PRODUZIDA\\_COMO\\_ALTERNATIVA\\_PARA\\_REUSO](https://www.researchgate.net/publication/338662891_CHARACTERIZACAO_E_ANALISE_DO_POTENCIAL_DA_AGUA_PRODUZIDA_COMO_ALTERNATIVA_PARA_REUSO). Acesso em 14/05/2025.

BERGFORS, S. N.; SCHOVSBO, N. H.; FEILBERG, K. L. Classification of and changes within formation water types in Danish North Sea Chalk: A study of the Halfdan, Dan, Kraka and Valdemar oil reservoirs. *Applied Geochemistry*, v. 122, 104702, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104702>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0883292720301943?via%3Dihub>. Acesso em 29/05/2025.

BEYER, J.; GOKSØYR, A.; HJERMANN, D. Ø.; KLUNGSØYR, J. Environmental effects of offshore produced water discharges: A review focused on the Norwegian continental shelf. *Marine Environmental Research*, [S.l.], v. 162, 105155, 2020. DOI: 10.1016/j. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141113620306164?via%3Dihub>. Acesso em 23/07/2025.

**BRASIL.** Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível - ANP. Disponível em <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNzVmNzI1MzQtNTY1NC00ZGVhLTk5N2ItNzBkMDNhY2IxZTlxliwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTl0YTtytNGl0Mi1iN2VmLTExNGFmY2FkYzIxMyJ9>. Acesso em: 29/05/2025.

**BRASIL.** Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível - ANP. Campo de Carmópolis. Rio de Janeiro: ANP, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/desenvolvimento-e-producao/pd/carmopolis.pdf>. Acesso em: 29/05/2025.

**BRASIL.** Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação de corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 de março de 2005. Disponível em: [https://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=450](https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450). Acesso em 23/07/2025.

**BRASIL.** Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n.º 340, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições, parâmetro, padrões e diretrizes para gestão de lançamento de efluentes em corpos de água receptores, alterando parcialmente e complementando a resolução n.º 357 de 17 de março de 2005. Diário oficial da União, Brasília, DF, 16 de maio de 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em 23/07/2025.

**BRASIL.** Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n.º 393, de 8 de agosto de 2007. Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 90 de agosto de 2007. Disponível em: [https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/importacao/institucional/grupos-de-trabalho/encerrados/residuos/documentos-diversos/agua-esgoto-docs/Resolucao\\_CONAMA\\_no393\\_ano\\_2007.pdf/view](https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/importacao/institucional/grupos-de-trabalho/encerrados/residuos/documentos-diversos/agua-esgoto-docs/Resolucao_CONAMA_no393_ano_2007.pdf/view). Acesso em 23/07/2025.

**BRASIL.** Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 de maio de 2021. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888\\_07\\_05\\_2021.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 10/04/2026.

CHAOUCH, N.; LAHRECH, L.; MEDDOUR, A.; AYAIDIA, L. Improvement of treatments process by oily wastewaters coagulation and flocculation applied at Haoud Berkaoui production center, Algeria, *Desalination and Water Treatment*, v. 259, 2022, p. 82-89. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28462>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624026614>. Acesso em 12/04/2026

CAMPOS, W. K. S.; BUARQUE, F. S.; MACEDO JÚNIOR, R. O.; SILVA D. P.; RUZENE, D. S. Estudo sobre as principais tecnologias para tratamento da água produzida. Caderno de graduação-Ciências exatas e tecnológicas-UNIT-Sergipe, v. 1 n. 15, p. 141-152, 2012. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/275/134>. Acesso em: 14/05/2025.

CANDIDO, J. C. D.; WESCHENFELDER, S. E.; FERRAZ, H. C. ÁGUA PRODUZIDA E SEUS IMPACTOS NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA. In: Anais do Web Encontro Nacional de Engenharia Química, Diamantina (MG), online, 2021. Diamantina (MG), Even3, 2021. DOI: 10.29327/138535.1-79. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/wendeq2021/349296-agua-produzida-e-seu-impacto-na-industria-petrolifera>. Acesso em 03/09/2025.

CUI, H.; HUANG, X.; YU, Z.; CHEN, P.; CAO, X. Application progress of enhanced coagulation in water treatment. RSC AdvANCES, v. 10, n. 34, p. 20231-20244, 2020. DOI: 10.1039/d0ra02979crsc.li/rsc-advances. Disponível em: [https://colab.ws/articles/10.1039%2Fd0ra02979c?utm\\_source=chatgpt.com](https://colab.ws/articles/10.1039%2Fd0ra02979c?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 09/09/2025.

DAS, N.; RAJPUT. H.; HASSAN, A. A.; KUMAR, S. Application of different coagulants and cost evaluation for the treatment of oil and gas produced water. Water, v. 15, n. 3, art. 464, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15030464>. Disponível em <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/3/464>. Acesso em 13/08/2025.

DAYARATHNE, H. N. P.; ANGOVE, M. J.; ARYAL, R.; ABUEL-NAGA, H.; MAINALI, B. Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. Journal of Water Process Engineering. V. 40, p. 1-13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101820>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714420306978>. Acesso em 03/11/2025.

DESJARDINS, C.; KOUDJONOU, B.; DESJARDINS, R. Laboratory study of ballasted flocculation. Water Research, v. 26, n. 3, p. 744 -754, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00256-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00256-1). Disponível em: Laboratory study of ballasted flocculation - ScienceDirect. Acesso em 16/04/2026.

DUDEK M.; VIK, E. A.; AANESSEN, S. V.; Øye, G. Colloid chemistry and experimental techniques for understanding fundamental behaviour of produced water in oil and gas production. Avanços na ciência de colóides e interfaces, v. 276, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102105>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001868619303537>. Acesso em 03/09/2025.

EL-BACHA, R. SALHI, A. HAFID, A. RABI, S. Water treatment: Aluminum sulfate, polymer, and activated carbon between efficacy and overdosing. Case of Oum Er-Rbia River, Morocco. Desalination and Water Treatment, v. 317, p. 100273-2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100273>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624003060?via%3Dihub>. Acesso em 19/01/2026.

EPA. United States Environmental Protection Agency. Summary of the clean water act. 12 de junho de 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act>. Acesso em 23/07/2025.

EYITAYO, S. I.; WATSON, M. C.; KOLAWOLE, O.; XU, P.; LAWAL, K. A.; WIGWE, M. E.; GIUSSANI, A. Novel systematic approach for produced water volume quantification applicable for beneficial reuse. *Environmental Science: Advances*, v. 2, n. 3, p. 508-528, 2023. DOI: 10.1039/d2va00282e. Disponível em: [https://www.academia.edu/98839068/Novel\\_systematic\\_approach\\_for\\_produced\\_water\\_volume\\_quantification\\_applicable\\_for\\_beneficial\\_reuse](https://www.academia.edu/98839068/Novel_systematic_approach_for_produced_water_volume_quantification_applicable_for_beneficial_reuse). Acesso em 17/03/2025.

FARD, K. A.; RHADFI, T.; MCKAY, G.; AL-MARRI, M.; ABDALA, A.; HILAL, N.; HUSSIEN, A. A. Enhancing oil removal from water using ferric oxide nanoparticles doped carbon nanotubes adsorbents. *Chemical Engineering Journal*. v. 293, p.90-101, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.02.040>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894716301413?via%3Dihub>. Acesso em 12/04/2026.

GAHROUEI, A. E.; REZAPOUR, A.; PIROOZ, M.; POUREBRAHIMI, S. From classic to cutting-edge solutions: A comprehensive review of materials and methods for heavy metal removal from water environments. *Desalination and Water Treatment*, v. 319, 100446, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100446>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624004806?via%3Dihub>. Acesso em 03/11/2025

GHERNAOUT, D.; ELBOUGHDIRI, N.; GHAREBA, S.; SALIH, A. Coagulation Process for Removing Algae and Algal Organic Matter-An Overview. *Open Access Library Journal*, v. 7, p. 1-21, 2020. DOI:10.4236/oalib.1106272. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/340502050\\_Coagulation\\_Process\\_for\\_Removing\\_Algae\\_and\\_Algal\\_Organic\\_Matter-An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/340502050_Coagulation_Process_for_Removing_Algae_and_Algal_Organic_Matter-An_Overview). Acesso em 03/11/2025.

GOSWAMI, M.; PATOWARY, R.; PATOWARY, K.; SARMA, H. P.; RABHA, S.; DEVI, B.; SARMA, N.; DAS, E.; DEVI, A. Environment friendly treatment of petroleum hydrocarbon contaminated formation water: Mechanisms and consequences for degradation and adsorption. *Water Resources and Industry*, [S. l.], v. 30, 100224, 2023. DOI:10.1016/j.wri.2023.100224. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212371723000240>. Acesso em 23/07/2025.

GRAY, M. Reuse of Produced Water in the Oil and Gas Industry. Paper SPE-199498-MS, apresentado na SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability, Bogotá (virtual), 27-31 de jul.2020. Disponível em [https://www.stopafvalwatertwente.nl/Reuse\\_ProducedWate\\_OilGas\\_Industry.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.stopafvalwatertwente.nl/Reuse_ProducedWate_OilGas_Industry.pdf?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 30/10/2025.

GWPC. Ground Water Protection Council. Produced water report: 2023. Regulations & Practices Updates. May, 2023. Disponível em [https://www.env.nm.gov/wp-content/uploads/sites/13/2024/05/NMOGA-Exhibit-99.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.env.nm.gov/wp-content/uploads/sites/13/2024/05/NMOGA-Exhibit-99.pdf?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 31/10/2025.

HE, W.; LUO, J.; HUANG, J.; TANG, C.; YANG, Z. Two-stage injection of polymer and microsand during ballasted flocculation for treating kaolin waters with or without humic acid: Floc evolutionary characteristics, performance and mechanisms. *Water Research*, v.259, 121846, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121846>. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135424007474?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135424007474?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 09/09/2025.

HOSNY, R.; FATHY, M.; RAMZI, M.MOGHNY, A. T.; DESOUKY, S. E. M.; SHAMA, S. A. Treatment of the oily produced water (OPW) using coagulant mixtures. *Egyptian Journal of Petroleum*, v. 25, n. 3, p. 391-396, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110062115200797?via%3Dihub>. Acesso em 17/04/2026.

HUANG, X.; WAN, Y.; SHI, B.; SHI, J. Effects of powdered activated carbon on the coagulation-flocculation process in humic acid and humic acid-kaolin water treatment. *Chemosphere*, v. 238, art. 24637, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124637>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519318612?via%3Dihub>. Acesso em 30/05/2025.

JABBAR. H. A.; ALATABE. M. J. A. Treatment Oilfield Produced Water using Coagulation/Flocculation Process (case study: Alahdab Oilfield). *Pollution*, v. 7, n. 4, p. 787-797, 2021. DOI: 10.22059/POLL.2021.322760.1071. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Treatment-Oilfield-Produced-Water-using-Coagulation-Jabbar-Alatabe/1170d802fa3f6ab0b857c8c691d229f30422b400>. Acesso em 12/04/2026

JABRI, F. A.; MARUGANADAM, L.; NATARAJAN, R. Sustainable treatment of oil produced water using novel methods : a review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, v. 18, p. 100658, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100658>. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772416625000701?via%3Dihub>. Acesso em 30/10/2025.

JAGABA, A. H.; KUTTY, S. R. M.; HAYDER, G.; LATIFF, A. A. A.; AZIZ, N. A. A.; UMARU, I.; GHALEB, A. A. S.; ABUBAKAR, S.; LAWAL, I. M.; NASARA, M. A. Sustainable use of natural and chemical coagulants for contaminants removal from palm oil mill effluent: a comparative analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 11, n. 4, p. 951-960, 2020. DOI: 10.1016/j.asej.2020.01.018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447920300411>. Acesso em 29/05/2025.

KLEMZ, A. Ç.; DAMAS, M. S. P.; GONZÁLEZ, S. Y. G.; MAZUR, L. P.; MARINHO, B. A.; WESCHENFELDER, S. E.; OLIVEIRA, D.; SILVA, A.; VALLE, J. A. B.; SOUZA, A. A. U.; SOUZA, S. M. A. G. The use of oilfield gaseous byproducts as extractants of recalcitrant naph thenic acids from synthetic produced water. *Tecnologia de Separação e Purificação*, [S. l.], v. 248, 111723, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.111723> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586620315975?via%3Dihub>. Acesso em 23/07/2025.

LAPOINTE, M. BARBEAU, B. Substituting polyacrylamide with an activated starch polymer during ballasted flocculation. *Journal of Water Process Engineering*, v. 28, April 2019, p. 129-134, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.01.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714418307682?via%3Dihub>. Acesso em 30/05/2025.

LAPOINTE, M.; JAHANDIDEH, H.; ALIM, O. S.; FARNER, J. M.; TUFENKJI, N. Sustainable granular materials improve removal of natural organic matter, turbidity and microplastics during adsorption, ballasted flocculation and granular filtration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 13, n. 2, p. 116012, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343725007080?via%3Dihub>. Acesso em 09/09/2025.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água. 4ª Edição. Campinas, SP; Editora Átomo, 2016. Disponível em: [https://www.grupoatomoealinea.com.br/fundamentos-de-qualidade-e-tratamento-de-agua.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.grupoatomoealinea.com.br/fundamentos-de-qualidade-e-tratamento-de-agua.html?utm_source=chatgpt.com).

LIMA, C. V.; ALMEIDA, T. D.; VICENTINI, D. S. Os diferentes tipos de coagulantes naturais para o tratamento de água: uma revisão. *Evidência, Biociências, Saúde e Inovação*, v. 20, n. 1, p. 9-22, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18593/eba.24704>. Disponível em <https://periodicos.unoesc.edu.br/evidencia/article/view/24704>. Acesso em 04/11/2025.

LIU, Y.; LU, H.; LI, Y.; XU, H.; PAN, Z.; DAI, P.; WANG, H.; YANG, Q. A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields. *Science of the Total Environment*, [S.l.], v. 775, 145485, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145485>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721005532>. Acesso em 29/05/2025.

LV, M.; ZHANG, Z.; ZENG, J.; LIU, J.; SUN, M.; YADAV, R. S.; FENG, Y. Roles of magnetic particles in magnetic seeding coagulation-flocculation process for surface water treatment. *Separation and Purification Technology*, v. 212, p. 337-343, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586618327758?via%3Dihub>. Acesso em 03/11/2025.

MANSOUR, M. S. M.; ABDEL-SHAIFY, H. I.; IBRAHIM, A. M. Petroleum wastewater: Environmental protection, treatment, and safe reuse: An overview. *Journal of Environmental Management*, v. 351, 119827, 2024. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119827>. Acesso em 03/11/2025.

MARIA, A.; MAYASARI, E.; IRAWATI, U.; ZULFIKURRAHMAN. Comparing the effectiveness of chitosan and conventional coagulants for coal wastewater treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 980, p. 012077, 2020. DOI: [10.1088/1757-899X/980/1/012077](https://doi.org/10.1088/1757-899X/980/1/012077). Disponível em: [https://colab.ws/articles/10.1088%2F1757899X%2F980%2F1%2F012077?utm\\_source=chatgpt.com](https://colab.ws/articles/10.1088%2F1757899X%2F980%2F1%2F012077?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 30/05/2025.

MAZLOOMIA, S.; ZAREI, A.; NOURMORADI, H.; GHODSEI, S.; GHODSEI, S.; AMRAEL, P.; HAGHIGHAT, G. A. Optimization of coagulation–flocculation process for turbidity removal using response surface methodology: a study in Ilam water treatment plant, Iran. *Desalination and Water Treatment*, v. 147, p. 234-242, 2019. DOI: 10.5004/dwt.2019.23698. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624136521?via%3Dihub>. Acesso em 20/08/2025.

MOUSA, K.M.; AL-HASAN, A. A. Oilfield Produced Water Treatment by Coagulation /Flocculation Processes. In: The Second Conference of Post Graduate Researches (CPGR'2017), 2017, Baghdad. Anais [...]. College of Engineering, Al-Nahrain Univ., Baghdad, 2017. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/325343473\\_Oilfield\\_Produced\\_Water\\_Treatment\\_by\\_Coagulation\\_Flocculation\\_Processes](https://www.researchgate.net/publication/325343473_Oilfield_Produced_Water_Treatment_by_Coagulation_Flocculation_Processes). Acesso em 16/04/2026.

NADER. A. F.; MUHAMMAD, R. J.; ABDULLAH, M. S.; ATWAN, A. Q. Evaluation of main pay-zubair formation re-injection of produced water directly in Rumaila oil field Norths under matrix condition. *Journal of Petroleum Research and Studies*, v. 12, n. 2, 2022. DOI: 10.52716/jprs.v12i2.655. Disponível em: <https://jprs.gov.iq/index.php/jprs/article/view/>. Acesso em 11/08/2026.

NEFF, J.; LEE, K.; DEBLOIS, E. M. Produced water: qverview of composition, fates, and effects. In: LEE, K.; Neff, J. (Eds). Produced water: environmental risks and advances in mitigation Technologies. New, York: Springer, 2011. DOI: DOI: 10.1007/978-1-4614-0046-2\_1. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-0046-2\\_1?utm\\_source=chatgpt.com#citeas](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-0046-2_1?utm_source=chatgpt.com#citeas). Acesso em 29/05/2025.

OKORO, O.; LOMP, K.; PAPINEAU, I.; SOLLIEC, M.; FRADETTE, L.; BARBEAU, B. Simultaneous powdered activated carbon and coagulant injection during ballasted flocculation for trace benzene removal from diesel and gasoline-contaminated surface waters. *Journal of Water Process Engineering*, v. 40, p. 101846, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101846>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714420307236?via%3Dihub>. Acesso em 30/05/2025.

OLADIMEJI, T. E.; OYEDEMI, M.; EMETERE, M. E.; AGBOOLA, O.; ADEOYE, J. B.; ODUNLAMI, O. A. Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal Technologies. *Heliyon*, v.10, n. 23, e40370, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40370. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39654720/>. Acesso em 03/11/2025.

OVUORAYE, P. E.; OKPALA, L. C.; UGONABO, V. I.; NWOKOCHA, G. F. Clarification efficacy of eggshell and aluminum base coagulante for the removal of total suspended solids (TSS) from cosmetics wastewater by coag-flocculation. *Chemical Papers*, v. 75, n. 9, p. 4759-4777, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01703-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11696-021-01703-x>. Acesso em 20/08/2025.

OWODUNNI, A. A.; ISMAIL, S. Revolutionary technique for sustainable plant-based green coagulants in industrial wastewater treatment - A review. *Journal of Water Process Engineering*, v. 42, 102096, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102096>.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714421001835>. Acesso em 23/07/2025.

PAFFRATH, S. F.; ETCHEPARE, R. G. I-1080 - proposição de uma nova abordagem de estimativa de massa seca gerada em estações de tratamento de água do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30, 2019. Anais [...]. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2029. Disponível em: [https://abes-dn.org.br/anaisletronicos/32cbesa/1080\\_tema\\_i.pdf](https://abes-dn.org.br/anaisletronicos/32cbesa/1080_tema_i.pdf). Acesso em 09/04/2026.

PAMPANIN, D. M.; SYDNES, M. O. Polycyclic aromatic hydrocarbons a constituent of petroleum: presence and influence in the aquatic environment. *IntechOpen*, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/48176>. Disponível em: <http://www.intechopen.com/chapters/41885>>. Acesso em: 29/05/2025.

PANNEKENS, M.; KROLL, L.; MÜLLER, H.; MBOW, F. T.; MECKENSTOCK, R. U. Oil reservoirs, an exceptional habitat for microorganisms. *New Biotechnology*, v. 49, p. 1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.11.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871678418316935>. Acesso em 29/05/2025.

PANKRATZ, K.; WARNER, N. R. Radioactivity from oil and gas produced water accumulated in freshwater mussels. *Science of The Total Environment*, v. 927, p. 172151, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172151>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724022940?via%3Dihub>. Acesso em 15/04/2026.

PETROBRAS. Relatório de Sustentabilidade 2023. Rio de Janeiro: Petrobras, 2023. Disponível em: [https://pt.scribd.com/document/778172044/Relatorio-de-Sustentabilidade-2023?utm\\_source=chatgpt.com](https://pt.scribd.com/document/778172044/Relatorio-de-Sustentabilidade-2023?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 03/09/2025.

QASIM, M.; PARK, S.; KIM, J. -O. The role of ballast specific gravity and velocity gradient in ballasted flocculation. *Journal of Hazardous Materials*. V. 399, p. 122970, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122970> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389420309596?via%3Dihub>. Acesso em 15/04/2026.

RAJBONGSHI, A.; GOGOI, S.B. A review on oilfield produced water and its treatment Technologies. *Petroleum Research*, v. 9, n. 4, p. 640-656, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2024.06.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096249524000541?via%3Dihub>. Acesso em 16/07/2025.

RAZZAK. S. A. FARUQUE, M. O.; ALSHEIKH, Z.; ALSHEIKHMOHAMAD, L.; ALKUROUD, D.; ALFAYEZ, A.; HASSAIN, M. M. A comprehensive review on conventional and biological-driven heavy metals removal from industrial wastewater. *Environmental Advances*, v. 7, 100168, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100168>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666765722000047>. Acesso em 03/11/2025.

RODRIGUEZ, A. Z.; WANG, H.; HU, L.; ZHANG, Y.; PEI, X. Treatment of produced water in the permian basin for hydraulic fracturing: comparison of different coagulation processes and innovative filter media. *Water*, v. 12, n. 3, p. 770, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030770>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/770>. Acesso em 17/03/2025.

ALSALEM, F.; THIEMANN, T. Produced water from oil and gas exploration—problems, solutions and opportunities. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 14, n. 2, p. 142-185, 2022. DOI: 10.4236/jwarp.2022.142009. Disponível em <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=115491>. Acesso em 13/08/2025.

SAMUEL, O.; OTHMAN, M. H. D.; KAMALUDIN R.; SINSAMPHANH, O.; ABDULLAH, H.; PUTEH, M. H. KURNIAWAN, T. A.; LI, T.; ISMAIL, A. F.; RAHMAN M, A.; JAAFAR, J.; EL-BADAWY, T.; MAMAH, S. C. Oilfield-produced water treatment using conventional and membrane-based technologies for beneficial reuse: a critical review. *Journal of Environmental Management*, v. 308, 114556, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114556>. Disponível em [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479722001293?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479722001293?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 30/10/2025.

SANTOS, F. S.; OLIVEIRA, S. M.; YOKOYAMA, L.; CAMMAROTA, M. C.; VENEU, D. M. Avaliação da eficiência do processo de coagulação/floculação aplicado ao tratamento primário de efluente da indústria petroquímica. *Engevista, Niterói*, v. 16, n. 4, p. 404-413, 2014. DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v16i4.581>. Acesso em 20/08/2025.

SATHTHASIVAM, J.; OGUNBIYI, O.; LAWLAER, J.; LIU, Z. An eco-friendly approach to separate emulsified oil from water using all natural materials of chitosan and beach sand. *Cleaner Materials*, v. 13, p. 100270, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100270>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397624000546?via%3Dihub>. Acesso em 30/05/2025.

SCANLON, B. R.; REEDY, R. C.; XU, P.; ENGLE, M.; NICOT, J. P.; YOXTHIMER, D.; YANG, Q.; IKONNIKOVA, S. Can we beneficially reuse produced water from oil and gas extraction in the U.S.? *Science of the Total Environment*, v. 717, p. 137085, 2020. Disponível em [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720305957?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720305957?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 30/10/2025.

SEIFI, F.; HAGHIGHAT, F.; NIKRAVESH, H.; KAZEMZADEH, Y.; AZIN, R.; OSFOURI, S. Using new chemical methods to control water production in oil reservoirs: comparison of mechanical and chemical Methods. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, v. 14, p. 2617-2655, 2024. DOI: 10.1007/s13202-024-01844-1. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13202-024-01844-1>. Acesso em 16/07/2025.

SILVA, J. R. P.; IVANUK, R. E.; BAIDA, F. S.; CARVALHO, N. R. S. I-1591 - Avaliação dos coeficientes de correlação entre turbidez e sólidos suspensos totais na água bruta, descarga de decantador e água de retrolavagem de filtro de ETA para uso em projetos de tratamento de lodo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL,

30, 2019. Anais [...]. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019.

SHENG, D. P. W.; BILAD, M. R.; SHAMSUDDIN, N. Assessment and Optimization of Coagulation Process in Water Treatment Plant: A Review. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, v.3, n 1, p. 79-100, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17509/ajse.v3i1.45035>. Disponível em: <https://ejournal.upi.edu/index.php/AJSE/article/view/45035>. Acesso em 03/11/2025.

SHUTOVA, Y.; RAO, N. R. H.; ZAMYADI, A.; BAKER, A.; BRIDGEMAN, J.; LAU, B.; HENDERSON R. K. Characterisation of dissolved organic matter to optimise powdered activated carbon and clarification removal efficiency. *Environmental Science: Water Research & Technology*, v. 6, p. 2065-2077, 2020. DOI: 10.1039/D0EW00149J. Disponível em: <https://research.monash.edu/en/publications/characterisation-of-dissolved-organic-matter-to-optimise-powdered/>. Acesso em 30/05/2025.

SILVA, S. C. R.; SANTOS, L. C. L.; PEREIRA, K. R. O. Estudos das técnicas aplicadas no tratamento de água produzida de petróleo. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, n. 148, 2022, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: IBP, 2022. DOI: <https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2022.148>. Disponível em: <https://biblioteca.ibp.org.br/pt-BR/search/43778>. Acesso em 17/03/2025.

SUKMANA, H.; BELLAHSE, N.; PANTOJA, F.; HODÚR, C. Adsorption and coagulation in wastewater treatment – Review. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, v. 17, n.1, p. 49-68, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1556/446.2021.00029>. Disponível em: <https://akjournals.com/view/journals/446/17/1/article-p49.xml>. Acesso em: 30/05/2025.

SUN, Y.; ZHOU, S.; CHIANG, P. C.; SHAH, K. J. Evaluation and optimization of enhanced coagulation process: Water and energy nexus. *Water-Energy Nexus*, v. 2, n. 1, p. 25-36, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.01.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588912520300011?via%3Dihub>. Acesso em 16/04/2026.

TABISH, M. TABINDA, A. B.; MAZHAR, Z.; YASAR, A.; ANSAR, J.; WASIF, I. Physical, chemical and biological treatment of textile wastewater for removal of dyes and heavy metals. *Desalination and Water Treatment*, v. 320, art. 100842, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100842>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624203520?via%3Dihub>. Acesso em 13/08/2025.

TAHRAOUI, H.; TOUMI, S.; BOUDOUKHANI, M.; TOUZOUT, N.; SID. A. N. E. H.; AMRANE, A.; BELHADI, A-E.; HADJADJ, M.; LAOCHI, Y.; ABOUMUSTAPHA, M.; KEBIR, M.; BOUGUETTOUCHA, A.; CHEBLI, D.; ASSADI, A. A.; ZHANG, J. Evaluating the Effectiveness of Coagulation–Flocculation Treatment Using Aluminum Sulfate on a Polluted Surface Water Source: A Year-Long Study. *Water*, 2024, DOI: <https://doi.org/10.3390/w16030400>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/3/400>. Acesso em 09/04/2026.

TUDERARO, L. E.; EGIELYA, A. J. Physicochemical and Microbial Characterization of Treated and Untreated Produced Water. *Journal of Advances in Microbiology*, v. 23, n. 4, 98044,

p.38-49, 2023. Disponível em: <https://journaljamb.com/index.php/JAMB/article/view/719/1435>. Acesso em 29/05/2025.

UGONABO, V. I.; OVUORAYE, P. E.; CHOWDHURY, A.; FETAHI, E. Machine learning model for the optimization and kinetics of petroleum industry effluent treatment using aluminum sulfate. *Journal of Engineering and Applied Science*, v. 69, n. 1, p. 108, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00164-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s44147-022-00164-7.pdf>. Acesso em 15/01/2026.

ULLATTUMPOYIL, N. Produced Water Geochemistry from an Upstream Oil Operation. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, v. 11, p. 155-168, 2023. DOI: 10.4236/gep.2023.116011. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=125855>. Acesso em 03/09/2025.

JUNIOR, A. M. V.; ALTOÉ, L.; ANTUNES, P. A. S. B. M. JÚNIOR, A. A. M. P. Principais métodos de tratamento da água produzida em unidades marítimas de produção de petróleo. *Latin American Journal of Energy Research*, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 23–32, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21712/lajer.2023.v10.n1.p23-32>. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/lajer/article/view/41054>. Acesso em 29/05/2025.

XIAO, F. Characterization and treatment of Bakken oilfield produced water as a potential source of value-added elements. *Science of The Total Environment*, v. 770, p. 145283, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145283>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721003491?via%3Dihub>. Acesso em 30/10/2025.

YOUSEF, R.; QIBLAWEY, H.; EL-NAAS, M. H. Adsorption as a Process for Produced Water Treatment: a Review. *Processes*, v. 8, n. 12, p. 1657, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8121657>. Disponível em: [https://www.mdpi.com/2227-9717/8/12/1657?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mdpi.com/2227-9717/8/12/1657?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 30/10/2025.

ZAFISAH, N. S.; ANG, W. L.; MOHAMMAD, A. W.; HILAL, N.; JOHNSON, D. J. Interaction between ballasting agent and flocs in ballasted flocculation for the removal of suspended solids in water. *Journal of Water Process Engineering*, v. 33, p. 101028, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714419306257?via%3Dihub>. Acesso em 09/09/2025.

ZAKI, N.; HADOUDI, N.; CHARKI, A.; BENSITEL, N.; EL OUARGHI, H.; AMHAMDI, H.; AHARI, M. Advancements in the chemical treatment of potable water and industrial wastewater using the coagulation–flocculation process. *Separation Science and Technology*, v. 58, n. 3, p. 1-1, 2023. DOI:10.1080/01496395.2023.2219381. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/371548110\\_Advancements\\_in\\_the\\_chemical\\_treatment\\_of\\_potable\\_water\\_and\\_industrial\\_wastewater\\_using\\_the\\_coagulation-flocculation\\_process](https://www.researchgate.net/publication/371548110_Advancements_in_the_chemical_treatment_of_potable_water_and_industrial_wastewater_using_the_coagulation-flocculation_process). Acesso em 03/11/2025.

ZHANG, H.; GAO, C.; Zhang, H.; SONG, N.; CAO, Q. Recent advances on the treatment of oilfield-produced water by advanced oxidation processes: a review. *Water Reuse*, v. 14, n. 2,

2024. Disponível em <https://www.iwaponline.com/jwrd/article-pdf/14/2/190/1437907/jwrd0140190.pdf>. Acesso em 30/10/2025.

ZHAO, C.; ZHOU, J.; YAN, Y.; YANG, L.; XING, G.; LI, H.; WU, P.; WANG, M.; ZHENG, H. Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review. *Science of The Total Environment*, v. 765, n. 15, 142795, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142795>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720363245>. Acesso em 29/05/2025.