UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CARLOS ERICKSON MELO DE FARIAS FILHO

OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DO EFLUENTE PARA REMOÇÃO DE CHUMBO POR PRECIPITAÇÃO QUÍMICA: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE BATERIAS AUTOMOTIVAS

João Pessoa - PB
Setembro, 2025

CARLOS ERICKSON MELO DE FARIAS FILHO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Química, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito obrigatório para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Etimógenes Duarte Vieira Segundo

João Pessoa - PB

Setembro, 2025

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F48lo Farias Filho, Carlos Erickson Melo de.
Otimização do sistema de tratamento do efluente para remoção de chumbo por precipitação química: estudo de caso em uma indústria de baterias automotivas / Carlos Erickson Melo de Farias Filho. - João Pessoa, 2025.
42 f. : il.

Orientação: José Etimógenes Duarte Vieira Segundo.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Jar test. 2. Tratamento de efluentes. 3. Remoção de chumbo. 4. Precipitação química. I. José Etimógenes Duarte Vieira Segundo. II. Título.

UFPB/BSCT CDU 66.01(043.2)

Elaborado por ROSANGELA GONCALVES PALMEIRA - CRB-216

CARLOS ERICKSON MELO DE FARIAS FILHO

OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTE PARA REMOÇÃO DE CHUMBO POR PRECIPITAÇÃO QUÍMICA: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE BATERIAS AUTOMOTIVAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Química, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito obrigatório para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovada em 29 de setembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br
JOSE ETIMOGENES DUARTE VIEIRA SEGUNDO
Data: 30/09/2025 13:15:23-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. José Etimógenes Duarte Vieira Segundo

Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br
FLAVIO LUIZ HONORATO DA SILVA
Data: 30/09/2025 14:33:58-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva

Examinador

Documento assinado digitalmente
gov.br
MARIA LUISA DE SA FREIRE
Data: 30/09/2025 17:11:25-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Engª. Maria Luísa de Sá Freire

Examinadora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha mãe, Elisângela, pela paciência e apoio em todas as circunstâncias ao longo da minha graduação, nos momentos de distância, saudade e necessidades. Às minhas irmãs Mariana e Marília pelo apoio nos estudos e nas conquistas que tive.

Agradeço também ao meu avô, José da Costa Lima (*in memorian)*, por sempre ter investido e prezado pelos meus estudos e das minhas irmãs enquanto em vida. Todo esforço será recompensado.

Aos meus amigos que se tornaram minha família ao longo dos “5 anos” de graduação: Maria Luísa, Rafael Dreher e Lucas Bezerra. Mas também aos que desde o início fizeram parte desta história: Suévelly, Jardyelle, Alynne, Victor Hugo, Luiz Felipe, Alícia, Débora e aos que de alguma forma contribuíram.

Aos professores da UFPB, em especial do Departamento de Engenharia Química, que foram fundamentais em todo percurso com seus ensinamentos e esforço pela difusão da ciência, em especial ao meu orientador Professor José Etimógenes, pela solução das minhas agonias e orientações do estudo.

E por fim, mas não menos importante, à República dos Coronéis que se tornou minha casa durante 1 ano que estive fora em busca do meu crescimento profissional em que foi possível de realizar este estudo. Agradeço especialmente a Alex, Neto, Relyson, Rivaldo, Arthur, Danielson e Guilherme pelos momentos vividos e aos outros coronéis e amigos que estiveram em minha rotina neste meio tempo.

RESUMO

A água é o principal recurso para a evolução e manutenção da vida humana. Dessa forma, a Organização das Nações Unidas (ONU), através do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, prevê em sua Agenda 2030 a gestão sustentável da água, enfatizando seu reuso. Em indústrias de baterias automotivas chumbo-ácido, o chumbo é a principal matéria-prima para a manufatura, sendo fonte de contaminação ocupacional e gerando riscos de contaminação ambiental. Assim, para mitigar a contaminação, a água é utilizada para limpeza de máquinas, ruas, calçadas, produtos, entre outros. Com isso, o efluente é destinado à Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), visando a remoção do chumbo para que a água seja reutilizada. Contudo, um acompanhamento realizado identificou a presença de chumbo no efluente tratado presente nas caixas de reuso. Dessa forma, o estudo objetivou a otimização do processo de tratamento na ETE visando a remoção de chumbo. A metodologia do estudo foi baseada na filosofia Kaizen, em conjunto com a metodologia PDCA e as ferramentas 5G e Diagrama de Ishikawa. Foi realizada uma prototipagem em jar test identificando limitações no sistema de agitação que funcionava a 30 RPM, falta de padronização do floculante utilizado e pH de operação inadequado equivalente a 6. Com isso, um plano de ação foi criado visando mitigar as limitações do sistema: adição da etapa de mistura rápida a 200 RPM, padronização da diluição do floculante na proporção de 1:100, junto com o aumento da dosagem aplicada ao sistema; correção do pH de operação para 8 de acordo com a literatura, gerando a produção de hidróxido de chumbo, insolúvel em meio alcalino. Com isso, a remoção de chumbo foi eficaz resultando no intervalo de fevereiro a agosto de 2025 sem a presença do metal no efluente de reuso.

Palavras-chave: Jar test; Precipitação química; Tratamento de Efluentes; Remoção de Chumbo.

ABSTRACT

Water is the main resource for life and human activities maintenance. The United Nations (UN) establishes at its Sustainable Development Goal (SDG) 6, for the 2030 Agenda, the promotion of sustainable water management, increasing water-use efficiency. In lead-acid batteries industry, lead is the main raw material for manufacturing, being a risk for occupational contamination and environmental damage. Thus, aiming on the reduction of the contamination, water is used for equipment cleaning, floors and products, generating effluents that are sent to the Effluent Treatment Plant (ETP) for subsequent reuse. However, monitoring identified the presence of residual lead in the treated effluent stored in reuse tanks. Thus, this study aimed to optimize the treatment process at the ETP to improve lead removal efficiency. The methodology was based on Kaizen philosophy, combined with the PDCA cycle and the use of the 5G method and the Ishikawa diagram. Jar test prototyping revealed limitations such as an agitation speed restricted to 30 RPM, lack of standardization in flocculant preparation, and an inadequate operating pH of 6. To address these issues, an action plan was implemented: the addition of a rapid mixing stage at 200 RPM, standardization of flocculant dilution at a 1:100 ratio with increased dosage and adjustment of the operating pH to 8, favoring the formation of insoluble lead hydroxide in alkaline water. As a result, lead removal was effective, with no detectable presence of the metal in the reuse effluent from February to August of 2025.

Keywords: Jar test; Chemical precipitation; Wastewater treatment; Lead removal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do tratamento de água convencional. 17
Figura 2 - Ciclo PDCA. 19
Figura 3 - Diagrama de Ishikawa. 21
Figura 4 - Fluxograma da aplicação das metodologias. 22
Figura 5 - Fluxograma do tratamento do efluente industrial. 22
Figura 6 - Equipamento Jar Test. 24
Figura 7 - Amostra de um dos efluentes coletados. 25
Figura 8 - Concentração de chumbo (Pb) após o tratamento do efluente. 27
Figura 9 - Produto não solubilizado após agitação. 28
Figura 10 - Pelotas de floculante não solubilizadas. 29
Figura 11 - Decantação do primeiro experimento. 30
Figura 12 - Flocos formados após etapas de mistura rápida e lenta 31
Figura 13 - Resultados do segundo experimento após decantação. 32
Figura 14 - Condições iniciais do efluente. 33
Figura 15 - Etapa de floculação do terceiro experimento. 33
Figura 16 - Lama decantada. 33
Figura 17 - Concentração de Pb no efluente após tratamento. 34
Figura 18 - Solubilidade de metais pesados em função do pH. 35
Figura 19 - Resultados de novo experimento em meio ácido, neutro e alcalino. 35
Figura 20 - Resultados de experimento em meio alcalino. 36
Figura 21 - Diagrama de Ishikawa. 36
Figura 22 - Balde graduado para manejo do floculante puro. 37
Figura 23 - Medição do pH da caixa de neutralização. 38
Figura 24 - Monitoramento das bateladas: amostras antes e depois do tratamento. 39
Figura 25 - Timeline das concentrações de chumbo: antes e depois do tratamento. 40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da água destinada à ETE por emissário. 23
Tabela 2 - Condição da agitação durante os experimentos realizados. 26
Tabela 3 - Condições para o primeiro experimento. 29
Tabela 4 - Condições para o segundo experimento. 31
Tabela 5 - Condições do experimento variando pH. 32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
MLS	Máquina de Lavar e Secar
ONU	Organização das Nações Unidas
Pb	Símbolo do elemento químico chumbo
pH	Potencial Hidrogeniônico
RPM	Rotações Por Minuto
VMP	Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. OBJETIVOS 14
2.1. Objetivo Geral 14
2.2. Objetivos Específicos 14
3. REFERENCIAL TEÓRICO 15
3.1. Indústria de baterias chumbo-ácido 15
3.2. Importância do tratamento de água em indústrias 16
3.3. Tratamento de água convencional 16
3.4. Filosofia *Kaizen* 18
3.4.1. Ciclo PDCA 18
3.4.2. Ferramenta 5G 19
3.4.3. Diagrama de Ishikawa 20
4. METODOLOGIA 22
4.1. 5G 22
4.1.1. Análise do processo – Tratamento do efluente na ETE 22
4.2. Prototipagem 24
4.2.1. Teste de Jarros (Jar Test) 24
4.2.2. Estudo de bancada (*Scale down*) 25
4.2.3. Coleta do efluente para estudo 25
4.2.4. Experimentos 26
4.2.4.1. Agitação 26
4.2.4.2. Dosagem de floculante 26
4.2.4.3. pH 27
4.3. Análise da água 27
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 27
5.1. Direcionador 27
5.2. Identificação do problema 28
5.3. Variação da dosagem de floculante 29
5.3.1. Primeiro experimento – Variação da dosagem em baixa rotação 29
5.3.2. Primeiro experimento – Variação da dosagem em alta rotação 30
5.3.3. Segundo experimento – Aumento do volume de floculante dosado 31
5.4. Variação do pH 32

5.5. Replicação para o sistema real 36
5.5.1. Diagrama de Ishikawa 36
5.5.2. Ações e contramedidas 37
5.5.2.1. Padronização da diluição do floculante 37
5.5.2.2. Ajuste do pH de operação 37
5.5.2.3. Troca do sistema de agitação 38
5.5.3. Remoção de chumbo por batelada 38
5.5.4. Padronização operacional 40
6. CONCLUSÕES 41
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 42

1. INTRODUÇÃO

A água é o principal recurso para a manutenção da vida, tanto fisiologicamente quanto em relação ao desenvolvimento das atividades humanas. Contudo, ela se tornou um fator limitante para o desenvolvimento urbano e industrial em regiões áridas, semiáridas e até mesmo regiões com recursos hídricos abundantes, tornando busca por novas fontes complementares necessárias. (HESPANHOL, 2002).

Assim, visando mitigar o desperdício e garantir a sustentabilidade, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu, em sua Agenda 2030, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 para assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água, enfatizando o aumento da reciclagem e reuso seguro de águas residuais (UNITED NATIONS, 2015).

As indústrias de baterias automotivas têm como principal matéria-prima o chumbo, um metal pesado que através da constante contaminação é capaz de gerar danos irreversíveis à saúde humana e ao meio ambiente, intensificando a necessidade de um manejo e descarte adequado ao longo do seu processo de manufatura e reciclagem (IBER, 2024). Na saúde humana, a exposição ocupacional ao chumbo está diretamente associada a danos neurológicos, renais e hematológicos, sendo considerada um dos principais riscos em processos industriais (ROCHA; PEZZINI; POETA, 2017). Para o meio ambiente, a Resolução CONAMA N° 430/2011 estabelece o valor máximo permitido (VMP) para descarga de efluentes em corpos de água, em que para o chumbo é de 0,5 mg/L.

Dessa forma, ao longo do processo de manufatura das baterias na indústria em estudo, em diversos momentos se faz necessária a utilização de água para manter a limpeza tanto do produto quanto do ambiente, visando conter a contaminação dentro e fora da indústria.

Neste contexto, o estudo teve como objetivo avaliar diferentes condições para a remoção de chumbo do efluente industrial que é destinado ao reuso após o tratamento na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma indústria de baterias automotivas – através da aplicação do ciclo PDCA – de forma a garantir a saúde humana e do meio ambiente ao longo do processo da manufatura e otimizar o processo de tratamento nas condições existentes do sistema.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar as condições ótimas de operação da ETE em questão para remoção do chumbo proveniente do processo e aumentar a capacidade produtiva do sistema.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a remoção da concentração de chumbo do efluente variando os parâmetros de dosagem do floculante, agitação e pH do sistema;
- Otimizar o tempo de ciclo do processo;
- Padronizar o procedimento em documentações internas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Indústria de baterias chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido obtiveram um grande pico de produção após a Segunda Guerra Mundial, estimuladas pelo rápido desenvolvimento das indústrias automobilísticas, de transporte e telecomunicações. Atualmente, através de suas principais aplicações, as baterias chumbo-ácido podem ser classificadas em: automotivas, estacionárias, tracionárias, náuticas e entre outras (PAVLOV, 2011).

As baterias automotivas inicialmente eram utilizadas apenas como suporte às luzes do carro e, com o desenvolvimento da tecnologia automotiva, sua função aumentou englobando as atividades de partida, luzes e ignição do automóvel. Essas baterias são conhecidas como SLI (*Starting, lighting, ignition)* (GELBKE; MONDOLONI, 2017).

Sua estrutura é composta por placas de chumbo positivas e negativas, material ativo contendo óxido de chumbo e aditivos, separadores, ácido sulfúrico, caixa, tampa e sobretampa e seu funcionamento é baseado na reação global de oxirredução, em que a reação direta é referente à reação de descarga (PAVLOV, 2011):

$$PbO_2 + Pb + 2\,H_2SO_4 \leftrightarrow 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O$$

A indústria é dividida em três principais setores: Placas, Montagem e Formação e Acabamento. Dentro de cada processo, a contaminação por chumbo se torna um risco, visto que é o principal material utilizado na manufatura da bateria e possui alto risco de gerar intoxicações agudas e crônicas, conhecida como saturnismo, levando a falta de concentração, perda de coordenação, perda de memória a curto prazo, dores abdominais e náuseas (KIANOUSH et al., 2013). Segundo Voltarelli et al. (2022), o índice máximo permitido biologicamente para exposição ao chumbo é de 60 µg/dL, sendo considerado excesso de exposição ao ultrapassar. Dessa forma, é realizado o controle para conter a contaminação por chumbo. Dentre as medidas, a limpeza de máquinas, produtos, áreas comuns e higiene pessoal são fortemente prezados.

A água é utilizada de diferentes formas: produção do material ativo; remoção de calor de equipamentos e baterias em formação; limpeza de equipamentos, pisos e produtos, entre outros. Ao fim de sua utilização, a água contaminada segue para o

tratamento, visto que a presença de estações de tratamento em unidades industriais minimiza os riscos ambientais e representa uma gestão sustentável da água, facilitando o manejo, descarte e reuso (KATO; KANSHA, 2024).

3.2. Importância do tratamento de água em indústrias

Por se tratar de um recurso escasso, as indústrias buscam entender e se adequar às necessidades regionais diante da disponibilidade de água. O planejamento e estratégias para tratar águas residuais trazem benefícios na qualidade da água e minimizam o desperdício, contribuindo para a sustentabilidade da empresa e diminuição de custos, além de oferecer a visão sustentável para outras empresas (TERCETTI; ROSSONI, 2022).

Segundo Kato e Kansha (2024), o tratamento de efluentes residuais – utilizados para fins domésticos, industriais, comerciais – geralmente requer uma sequência de técnicas de tratamento que se encaixem para remoção de certos contaminantes, a depender da atividade em que a água foi empregada. Apesar da capacidade de autodepuração dos corpos aquáticos, o excesso de descarte de água sem tratamento ultrapassa essa capacidade. Assim, o descarte de águas residuais sem tratamento continua sendo uma problemática global, afetando diretamente na fauna e flora aquática.

No Brasil, a Resolução N°430 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de 16 de maio de 2011, dispõe sobre as condições, parâmetros, padrões e diretrizes para o lançamento de efluentes em corpos de água receptores. Nessa resolução são firmados os valores máximos permitidos para parâmetros orgânicos e inorgânicos.

3.3. Tratamento de água convencional

O tratamento convencional de água, composto pelas etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração, é amplamente aplicado não apenas em sistemas de abastecimento público, mas também em processos industriais que demandam água de qualidade para produção.

A coagulação – também conhecida como mistura rápida – é o processo de adição de coagulantes na água, gerando um desequilíbrio entre as partículas, ocasionando em sua aglutinação. A mistura rápida tem como finalidade promover a

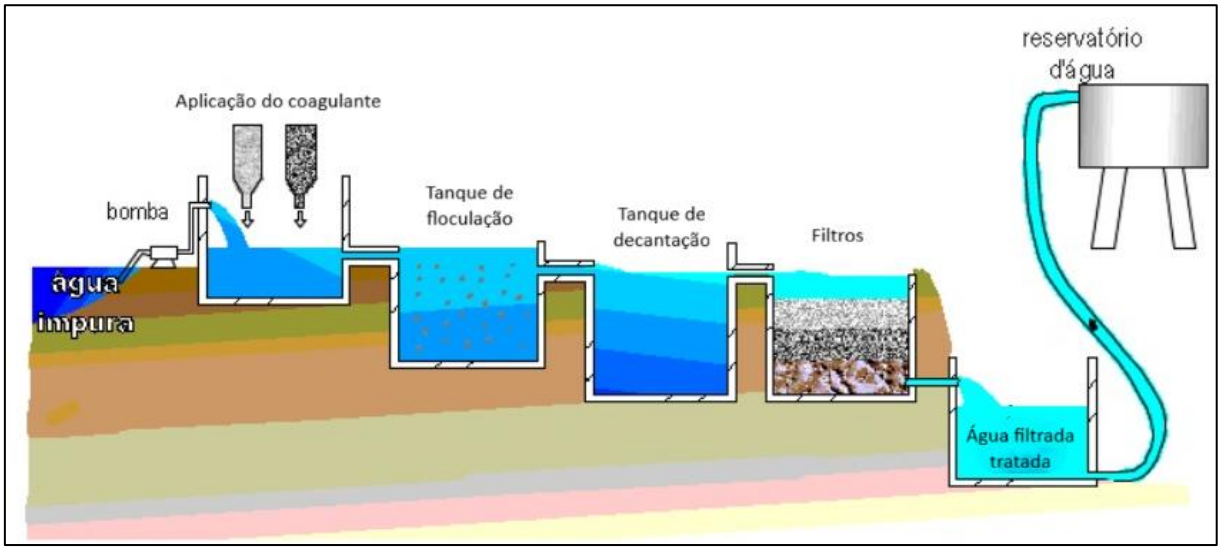
dispersão do coagulante à água, garantindo a homogeneidade do produto no meio e aumentando a eficiência da agregação de partículas (RICHTER, 1991).

A floculação – mistura lenta – é a etapa subsequente à coagulação que, em contrapartida, se faz necessária uma menor agitação para favorecer a agregação das partículas de forma que, para obter os melhores resultados, um tempo longo se faz interessante visando aumentar o tamanho do floco e facilitar a etapa de decantação (NASIER; ABDULRAZZAQ, 2021).

Após a formação dos flocos, o processo de separação sólido-líquido é realizado pelo uso das forças gravitacionais para separar as partículas formadas de densidade maior que a da água (RICHTER, 1991). O tamanho do floco é fundamental para a realização de uma boa decantação, influenciando no tempo necessário para a separação, em que a lama se acumula ao fim do decantador e o sobrenadante tratado segue para as próximas etapas (NASIER; ABDULRAZZAQ, 2021).

Por fim, a última etapa é voltada para filtração do sobrenadante tratado. A etapa de coagulação/floculação não é capaz de remover todo material suspenso na água. Dessa forma, a filtração garante a retenção das últimas partículas suspensas remanescentes através de um meio filtrante poroso com diferentes materiais (RICHTER, 1991).

Figura 1 - Esquema do tratamento de água convencional.



Fonte: Adaptado de VIANA (2018).

3.4. Filosofia *Kaizen*

A filosofia *Kaizen* surgiu no Japão pós-guerra voltado à melhoria contínua. *Kaizen* significa “mudar para melhor”. Fundamentada em pequenas melhorias, a filosofia busca atingir grandes resultados no longo prazo diante da estimulação e envolvimento de todos os colaboradores na busca pela eficiência e produtividade (SINGH, 2009). O significado de melhoria no *Kaizen* não deve ser visto isoladamente, mas também de forma generalista abrangendo toda a sociedade e trazendo melhorias a todos (PROSIC, 2011).

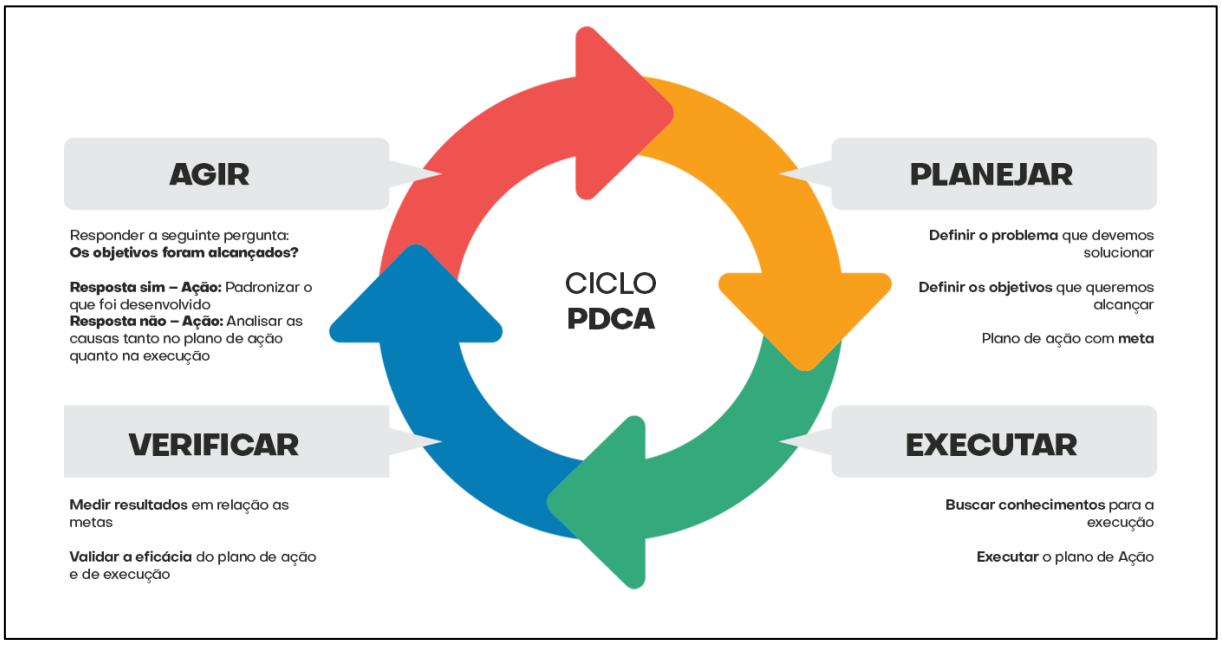
Na indústria, a filosofia é aplicada focada na melhoria contínua junto aos processos visando gerar produtividade e qualidade através da minimização de desperdícios. Segundo Prosic (2011), o *Kaizen* não vê problemas de forma negativa, mas sim como oportunidades para melhoria, encorajando colaboradores a darem sugestões e implementar ideias produtivas.

Para Scotelano (2016), a implementação da filosofia *Kaizen* em indústrias é um processo lento e difícil. Existe a necessidade de um profundo conhecimento de seus processos para entender onde e por qual razão aplicar a filosofia diante dos desperdícios e potenciais oportunidades de melhoria. Para isso, com a intenção de aplicar a melhoria contínua, após a etapa de levantamento de dados, se faz necessária a aplicação da metodologia do ciclo PDCA.

3.4.1. Ciclo PDCA

O ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) funciona como um método para aplicação da filosofia Kaizen, visto que aplica quatro etapas voltadas à melhoria contínua que se repetem de forma cíclica: planejar, executar, verificar e padronizar. Segundo Singh (2009), o ciclo PDCA foi introduzido pelo estatístico Shewhart por volta de 1920 e foi modificado por Deming, se tornando um modelo de melhoria contínua que consiste em uma sequência lógica de quatro etapas.

Figura 2 - Ciclo PDCA.



Fonte: GEREMIAS (2023).

- **Planejar (Plan):** Trata-se da etapa mais importante e que se deve investir mais tempo, visto que tem como objetivo definir o problema, coletar dados, estabelecer metas, analisar as causas raízes e criar um plano de ação para resolução do problema.
- **Executar (Do):** Etapa responsável pela aplicação do plano de ação em pequena escala visando obter resultados controlados.
- **Verificar (Check):** Após a execução do plano de ação em pequena escala, esta etapa é responsável pela análise dos resultados obtidos ao longo da execução do plano de ação e verificação em relação às metas estabelecidas.
- **Padronizar (Act):** Com a realização do tratamento de dados e verificação das metas, em caso de sucesso as melhorias devem ser aplicadas e padronizadas em documentações e treinamentos. Em caso de falha nos resultados, o ciclo PDCA deve ser reiniciado visando um novo planejamento de ações para mitigar o problema em questão.

3.4.2. Ferramenta 5G

O 5G é uma ferramenta da qualidade japonesa voltada à descrição e análise de um fenômeno, investigando o problema e encontrando sua causa raiz através da observação pessoal. O objetivo principal é visualizar o problema, entender o processo

e coletar informações. O 5G serve como uma ferramenta auxiliar às etapas do Planejamento do ciclo PDCA e é dividido em cinco fases: Gemba, Gembutsu, Genjitsu, Genri e Gensoku (FILHO; KAWAKAME; ALMEIDA, 2024).

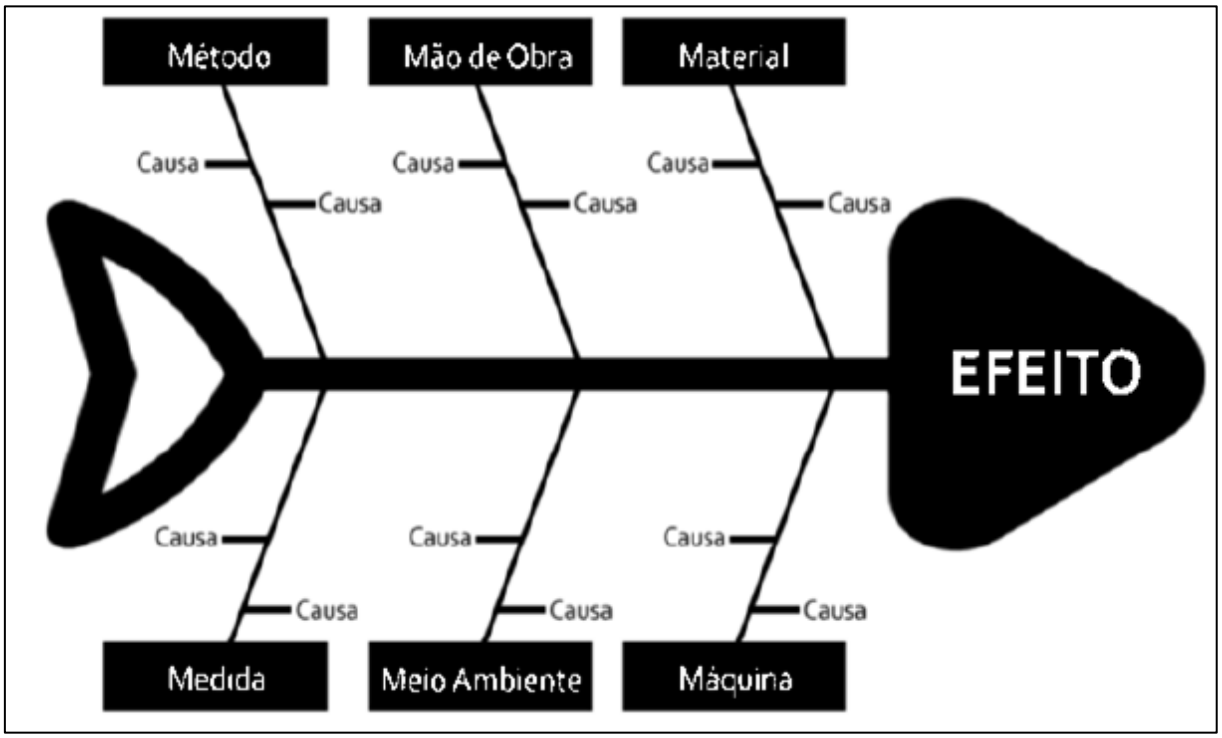
- ***Gemba*:** Ir ao local que ocorre o fenômeno, conversar com quem executa as tarefas, visualizar e vivenciar o problema.
- ***Gembutsu*:** Examinar o objeto de estudo, entender o processo, equipamentos e ferramentas utilizadas.
- ***Genjitsu*:** Checar fatos e dados, coletar informações, históricos, condições de trabalho e ferramental.
- ***Genri*:** Comparar com a teoria, procedimentos padrões, tabelas de referência.
- ***Gensoku*:** Verificar se existe um padrão, se é seguido e se há oportunidade de melhoria. Entender se o executor da atividade conhece o procedimento, se está apto para a atividade.

3.4.3. Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa, Espinha de Peixe ou Causa e Efeito é muito utilizado para organizar e entender às causas raízes de um problema. Proposto por um professor japonês nos anos 1960, o diagrama representa graficamente a correlação entre o problema e os fatores que influenciam diretamente no problema (BOTEZATU et al., 2019).

Segundo Costa et al. (2023), o diagrama foi projetado especificamente para sistemas industriais. Por isso, ele contempla 6 categorias, chamada de 6M’s: Material, método, máquina, mão de obra, meio ambiente e medição. Assim, em conjunto com a execução de outras ferramentas da qualidade, é possível preencher o diagrama estratificando os problemas encontrados de acordo com sua categoria.

Figura 3 - Diagrama de Ishikawa

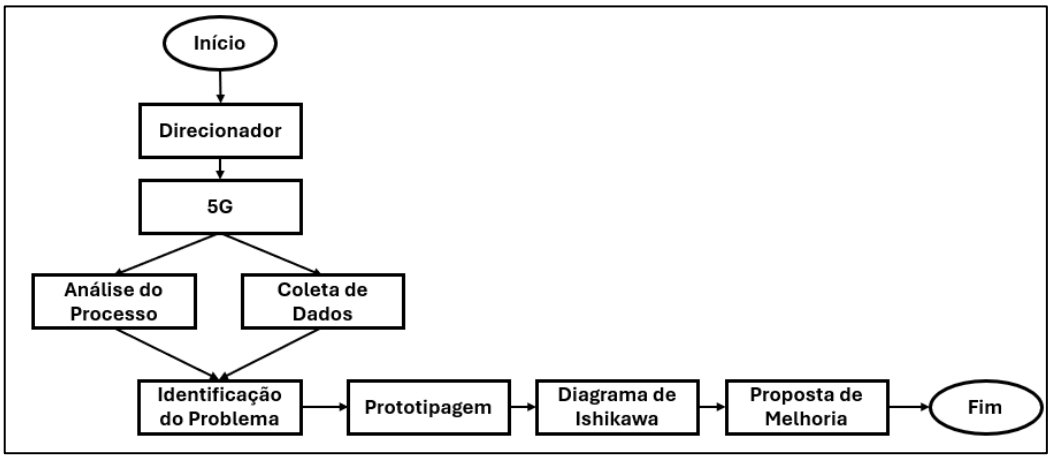


Fonte: Costa et al. (2023).

4. METODOLOGIA

O estudo foi baseado na filosofia *Kaizen*, aplicando a metodologia do ciclo PDCA e utilizou-se de algumas ferramentas da qualidade, como o 5G para identificação do problema e o Diagrama de Ishikawa para encontrar as suas causas raízes.

Figura 4 - Fluxograma da aplicação das metodologias.



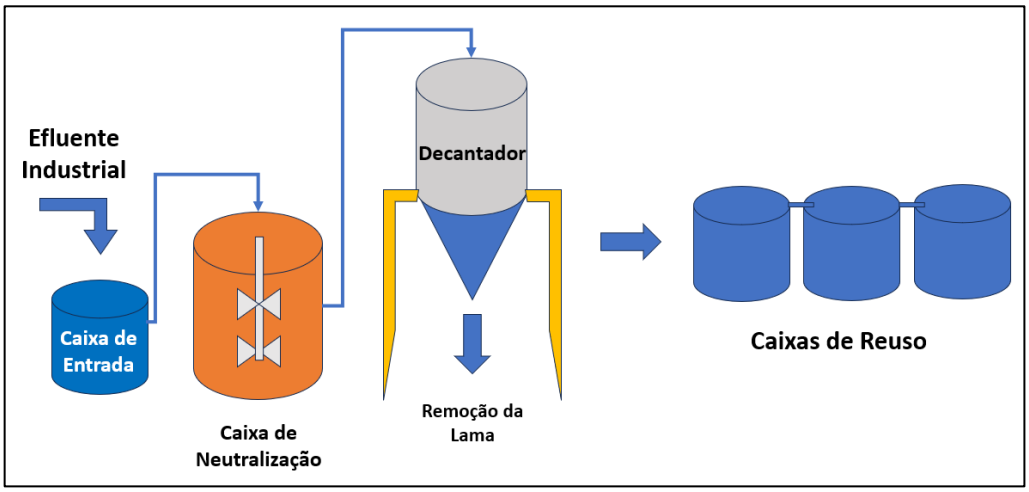
Fonte: Autor (2025).

4.1. 5G

4.1.1. Análise do processo – Tratamento do efluente na ETE

O processo de tratamento do efluente industrial foi realizado em bateladas. A Figura 5 sintetiza as etapas desse processo.

Figura 5 - Fluxograma do tratamento do efluente industrial.



Fonte: Autor (2025).

Inicialmente o efluente foi recebido na Caixa de Entrada, com capacidade de 7 m³, que funciona como um tanque pulmão, em que ao atingir certo volume o efluente será bombeado à Caixa de Neutralização.

A Caixa de Neutralização possuia uma capacidade de 20 m³ e era disposta com um sistema de motorredução conectado a um agitador, com motor elétrico de 1725 RPM e redutor na relação de 1:60, gerando uma rotação de aproximadamente 30 RPM. Ao encher a caixa, o efluente – que é predominantemente ácido – recebeu a adição de hidróxido de sódio (NaOH) e, se necessário, do ácido clorídrico (HCl) para corrigir seu pH e atingir o valor equivalente a 6. Os volumes adicionados variaram de acordo com a qualidade do efluente inicial da batelada. As medições foram realizadas através das fitas de pH diretamente na caixa de neutralização. Na Tabela 1 são apresentadas as condições dos efluentes industriais que são recebidos na Caixa de Entrada, sendo a principal contribuinte o efluente proveniente do processo de acabamento, da Máquina de Lavar e Secar (MLS), responsável por limpar externamente a bateria acabada, removendo resquícios de chumbo e ácido.

Tabela 1 - Parâmetros da água destinada à ETE por emissário.

Emissário	Contribuição	pH	Pb
MLS	Constante	≤ 4,0	Sim
Limpeza de filtros	A cada 2 horas	≥ 6,0	Sim
Desmineralizadores	A cada 3 horas	≥ 6,0	Não
Lavagem de rua	A cada 12 horas	≥ 6,0	Sim
Lagoa de acúmulo de chuva	Turno noturno	≥ 6,0	Sim

Fonte: Autor (2025)

Após a correção do pH, foi adicionado o floculante (polímero catiônico) diluído devido à sua viscosidade. Como cada batelada varia a qualidade da água a depender dos processos que estão contribuindo, o volume de floculante utilizado variou entre 15 e 30 L, sendo ajustado de acordo com a qualidade do floco formado durante a agitação.

Por fim, após a formação dos flocos o efluente foi bombeado para um decantador vertical, onde passou 3 horas e ao final teve a lama removida e o sobrenadante destinado às caixas de reuso, sendo o efluente tratado novamente destinado aos processos.

4.2. Prototipagem

Esta etapa tratou-se de um mapeamento do processo de tratamento dentro da indústria em questão, visto que os métodos utilizados eram empíricos e convenções entre os colaboradores. Assim, a prototipagem partiu do intuito de mapear e entender o funcionamento do sistema junto aos produtos que são utilizados em diferentes condições através da manipulação das variáveis: agitação, pH e dosagem de floculante.

Visando reproduzir as mesmas condições do sistema da ETE para o estudo, foi utilizado um equipamento que simula as principais etapas de uma estação de tratamento.

4.2.1. Teste de Jarros (Jar Test)

O método de jar test é amplamente conhecido e utilizado para determinar a dosagem ideal de um sistema, em que o equipamento típico consiste em cubas com agitadores submersos. Cada cuba deve conter o mesmo volume de água a ser tratada, porém com valores diferentes do produto a ser estudado, visando coletar o sobrenadante após o tratamento e mensurar suas características, comparando e avaliando o melhor resultado obtido de acordo com as necessidades (TASSINARI et al., 2015).

Na prototipagem realizada, o equipamento possuía três cubas de 2000 mL, um controlador analógico da agitação que variava entre 20 e 250 RPM, mangueiras para coleta do sobrenadante e tubos de ensaio dosadores.

Figura 6 - Equipamento Jar Test.

Fonte: Autor (2025).

4.2.2. Estudo de bancada (*Scale down*)

Para reproduzir as mesmas condições do sistema real em pequena escala, foram feitas proporções para o efluente e o produto dosado, como é mostrado na Equação 1.

$$\frac{Volume\ Caixa\ de\ Neutralização}{Volume\ da\ Cuba} = \frac{20.000\ L}{2.000\ mL} = \frac{20.000.000\ mL}{2.000\ mL} = 10.000 \qquad (1)$$

Dessa forma, a proporção de 1:10.000 foi aplicada ao produto:

$$\frac{Volume\ de\ floculante\ real}{Proporção} = \frac{20\ L}{10.000} = \frac{20.000\ mL}{10.000} = 2\ mL \qquad (2)$$

Com isso, a dosagem do floculante nas cubas foi realizado com seringas de 5 mL para atender a proporção necessária.

4.2.3. Coleta do efluente para estudo

O efluente inicial foi coletado em um balde graduado de polipropileno (PP) diretamente da caixa de neutralização sem a adição dos produtos químicos, visando garantir que o efluente estivesse mais próximo possível da realidade.

Figura 7 - Amostra de um dos efluentes coletados.

Fonte: Autor (2025).

Após a realização dos experimentos, o sobrenadante foi coletado diretamente pelas mangueiras da cuba.

4.2.4. Experimentos

Os experimentos foram realizados de acordo com as variáveis capazes de serem controladas e os gargalos encontrados anteriormente: agitação, dosagem de floculante e pH. Dessa forma, durante os estudos tais variáveis foram testadas em diferentes combinações a fim de observar seus efeitos sobre o processo de tratamento e encontrar o ponto ótimo de operação do sistema.

Inicialmente os experimentos foram realizados com objetivo de replicar o sistema real e verificar se os gargalos persistiriam. Em seguida, as combinações foram executadas de acordo com o plano a seguir.

4.2.4.1. Agitação

No tratamento convencional existem as etapas de mistura rápida e mistura lenta. Contudo, o sistema em estudo não contempla ambas. Dessa forma, inicialmente os experimentos foram realizados a 30 RPM para replicar as condições reais.

Em seguida, replicando as etapas de mistura rápida e mistura lenta, os experimentos foram feitos na mistura rápida a 200 RPM e na mistura lenta a 30 RPM com tempos determinados. Na Tabela 2 são sintetizadas tais condições.

Tabela 2 - Condição da agitação durante os experimentos realizados.

Sistema	Mistura Rápida	Tempo	Mistura Lenta	Tempo
Real	-	-	30 RPM	5 min
Convencional	200 RPM	1 min	30 RPM	5 min

Fonte: Autor (2025).

4.2.4.2. Dosagem de floculante

Nas condições reais, o volume de floculante dosado variava entre 15 L e 30 L por convenção entre a operação. Assim, o processo não dependia da qualidade do floco formado e era regido pelo volume adicionado de até 30 L.

Dessa forma, novas quantidades de floculante foram testadas e variaram entre 10 L e 100 L de floculante na proporção de bancada, ou seja, 1 mL a 10 mL.

4.2.4.3. pH

A faixa de pH para o tratamento do sistema era mantida em 6,0 para neutralizar o efluente ácido e torná-lo utilizável para reuso sem riscos à atividade. Assim, inicialmente os estudos foram realizados em pH neutro, mas também em pH ácido e alcalino visando observar o comportamento do efluente tratado nestas condições.

O pH foi controlado com auxílio de um pHmetro digital e os produtos químicos para correção do pH foram amostras de Hidróxido de Sódio e Ácido Clorídrico que são utilizados no processo.

4.3. Análise da água

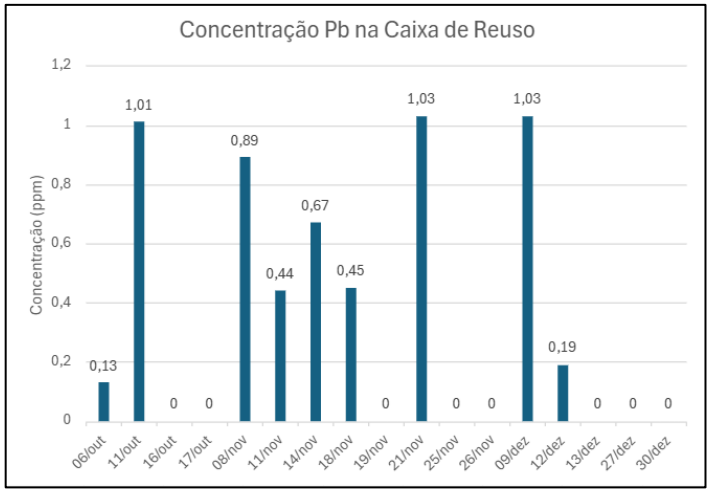
As análises do efluente foram realizadas no laboratório químico da empresa, através da espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). As amostras para análise eram coletadas do efluente inicial sem tratamento e do efluente após o tratamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Direcionador

Na etapa do Planejamento (P), foi feito um acompanhamento ao longo de 3 meses em que foi identificado que havia a presença de chumbo no efluente industrial mesmo após o tratamento. As coletas foram realizadas uma vez no dia durante diferentes dias da semana. Na Figura 8 vemos a concentração de chumbo das coletas realizadas.

Figura 8 - Concentração de chumbo (Pb) após o tratamento do efluente.



Fonte: Autor (2025).

5.2. Identificação do problema

Na etapa de execução do 5G, durante o acompanhamento do processo e coleta de informações no *Gemba*, foram identificados alguns gargalos no processo.

Um dos principais gargalos visualizados durante o acompanhamento do processo foi a permanência de resquícios de floculante que não eram dissolvidos na água, resultando em perdas de produto e evidenciando a baixa capacidade de dispersão do produto por todo sistema, como apresenta a Figura 9.

Figura 9 - Produto não solubilizado após agitação.

Fonte: Autor (2025).

Além disso, outro gargalo se tratava da forma que o floculante era diluído e dosado. Para a diluição do floculante, o produto era adicionado em uma bombona de 1000 L por um balde sem graduação e com volume incerto de aproximadamente 4 litros, não havendo padronização em relação à quantidade do produto puro dosado a ser diluído. Assim, a cada 2 dias havia variação em relação à qualidade do produto que era dosado, afetando a qualidade do tratamento.

O controle do pH da batelada através das fitas não garantia a precisão necessária, visto que tornava a verificação subjetiva a cada operador por ser um teste qualitativo.

Por fim, o tempo de decantação de 3 horas se torna um fator limitante do sistema visto que a ETE dispõe de apenas dois decantadores verticais, limitando a

capacidade de tratamento diária, ainda mais diante da inconstância da vazão recebida do processo.

5.3. Variação da dosagem de floculante

5.3.1. Primeiro experimento – Variação da dosagem em baixa rotação

Os primeiros experimentos realizados envolveram replicar o sistema real a 30 RPM e pH neutro em pequena escala para avaliar o comportamento da formação do floco em diferentes volumes de floculante. Na Tabela 3 são apresentadas as condições desse experimento.

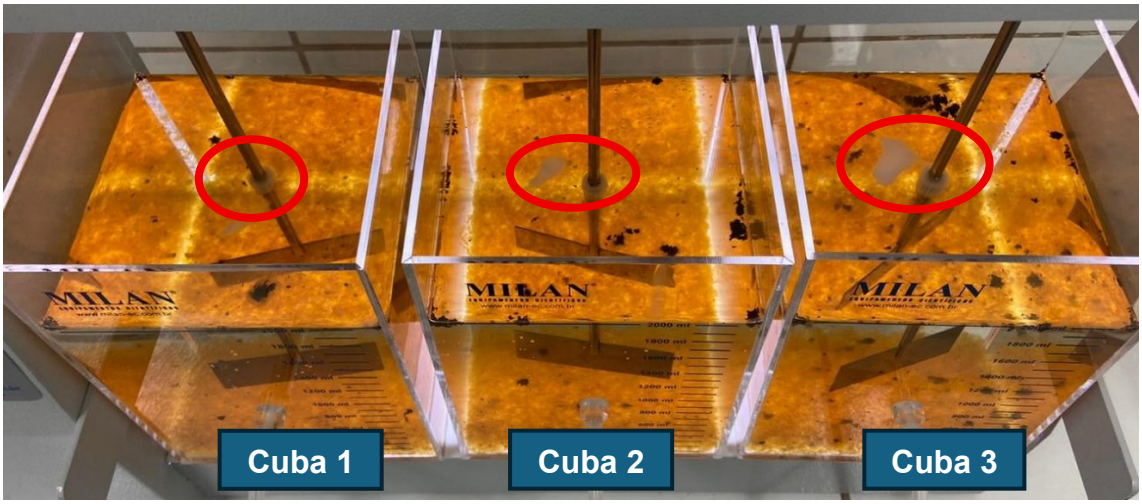
Tabela 3 - Condições para o primeiro experimento.

	Vol. Floc. (mL)	pH	RPM	Tempo
Cuba 1	2	7,5	30	10min 40s
Cuba 2	3			
Cuba 3	5			

Fonte: Autor (2025).

Através da Figura 10 fica evidente que a agitação do sistema não era capaz de solubilizar completamente o floculante quando adicionado em dosagens maiores, mesmo em longos tempos de agitação, gerando pelotas que aumentaram de acordo com o aumento de floculante adicionado. Tal resultado se iguala ao observado na etapa de identificação do problema.

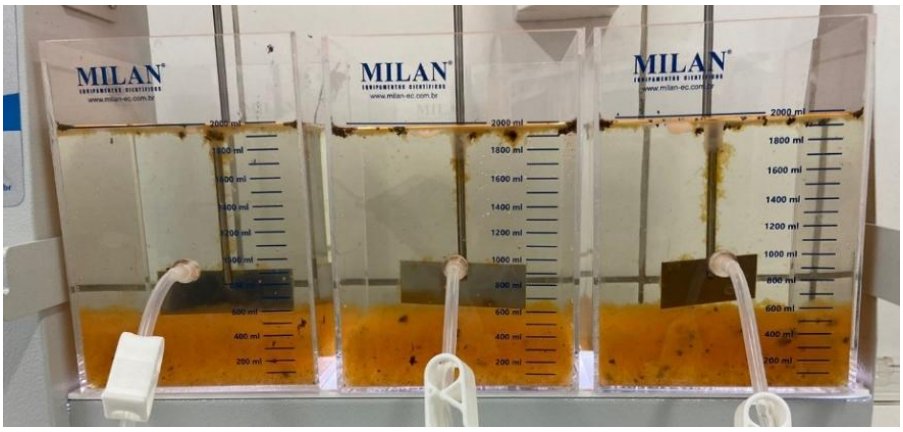
Figura 10 - Pelotas de floculante não solubilizadas.



Fonte: Autor (2025).

Por fim, foi avaliada a decantação e qualidade do floco formado, apresentada na Figura 11.

Figura 11 - Decantação do primeiro experimento.



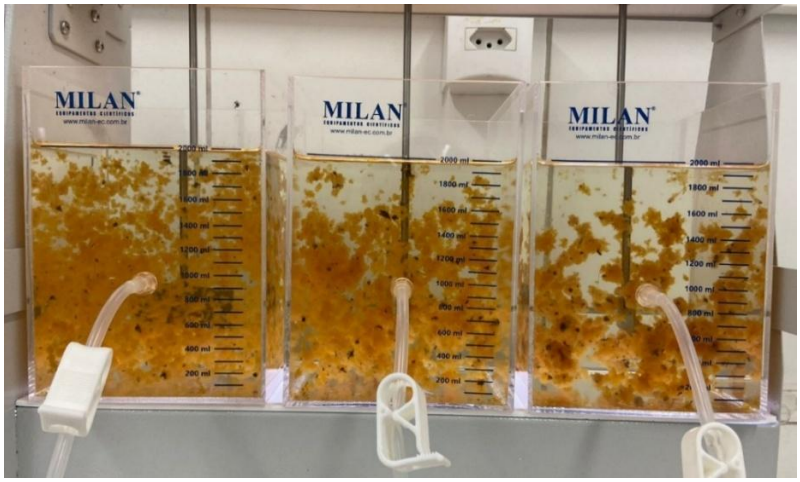
Fonte: Autor (2025).

Observa-se que independentemente do volume adicionado e do tempo de agitação à 30 RPM o resultado do floco e volume de lama decantada foi o mesmo, com um floco fino. Diante disso, nota-se que a agitação é um fator limitante do processo.

5.3.2. Primeiro experimento – Variação da dosagem em alta rotação

Visto que na primeira etapa a agitação foi um limitante, foi realizada uma segunda etapa de acordo com o prescrito no tópico 4.2.4.1, aplicando as etapas de mistura rápida e mistura lenta no sistema. Como havia floculante não solubilizado, o experimento anterior foi reaproveitado e aplicou-se a nova agitação.

Figura 12 - Flocos formados após etapas de mistura rápida e lenta



Fonte: Autor (2025).

Ao comparar os resultados obtidos na Figura 11 e Figura 12, foi evidente que ao solubilizar todo o floculante, os flocos mudaram seu formato. O tamanho do floco aumentou proporcionalmente ao volume adicionado o que comprovou que, de fato, a agitação estava limitando a eficácia do processo. A cuba 3, com 5 mL de floculante, apresentou flocos maiores e mais pesados, sendo eles de melhor qualidade. Em relação à remoção de chumbo, a amostra inicial e final apresentou valores quantitativos inferiores ao limite do equipamento.

5.3.3. Segundo experimento – Aumento do volume de floculante dosado

Visto que a limitação do agitador foi sanada, testes visando o aumento da quantidade do polímero foram feitos para entender o que aconteceria com o efluente e os flocos formados. Na Tabela 4 é apresentada as condições do novo estudo aumentando a dosagem do floculante em um novo efluente coletado.

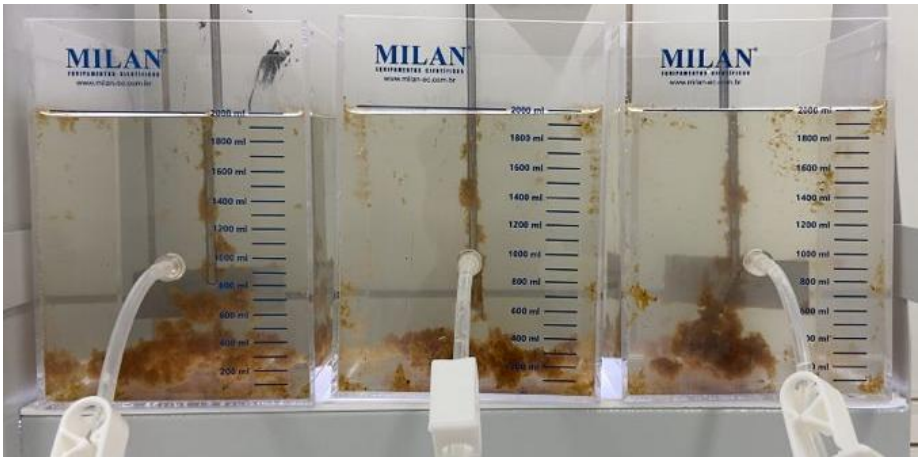
Tabela 4 - Condições para o segundo experimento.

	Vol. Floc. (mL)	pH	RPM
Cuba 1	5	6,0	200 / 30
Cuba 2	7		
Cuba 3	10		

Fonte: Autor (2025).

Após o estudo, foi possível observar que o melhor resultado em relação à qualidade do floco foi na cuba 1, em que foi adicionada 5 mL. Os flocos das cubas 2 e 3 foram menores e a água apresentou uma turbidez esbranquiçada, podendo ser justificada pelo excesso de produto adicionado, apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Resultados do segundo experimento após decantação.



Fonte: Autor (2025).

5.4. Variação do pH

Já tendo descoberto tanto a agitação quanto a dosagem que obtiveram os melhores resultados no sistema em estudo, o último experimento foi voltado a encontrar o pH ideal em que o sistema deve atuar.

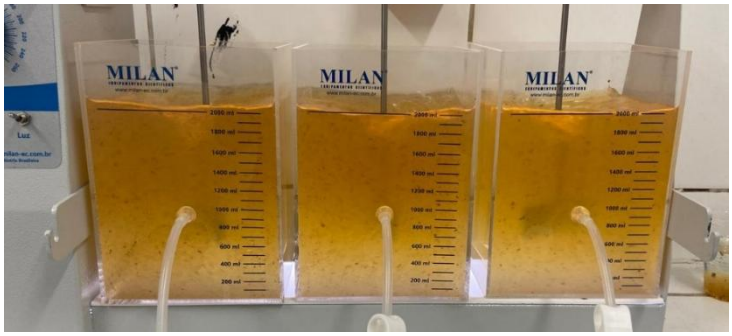
Inicialmente foi feito um estudo com pH ácido, neutro e alcalino em cada cuba, respectivamente, para averiguar a qualidade do floco formado e da água ao fim do tratamento. Na Tabela 5 estão apresentadas tais condições.

Tabela 5 - Condições do experimento variando pH.

	Vol. Floc (mL)	pH	Agitação (RPM)
Cuba 1	6	4,4	200 / 30
Cuba 2		6,0	
Cuba 3		7,7	

Fonte: Autor (2025).

Figura 14 - Condições iniciais do efluente.

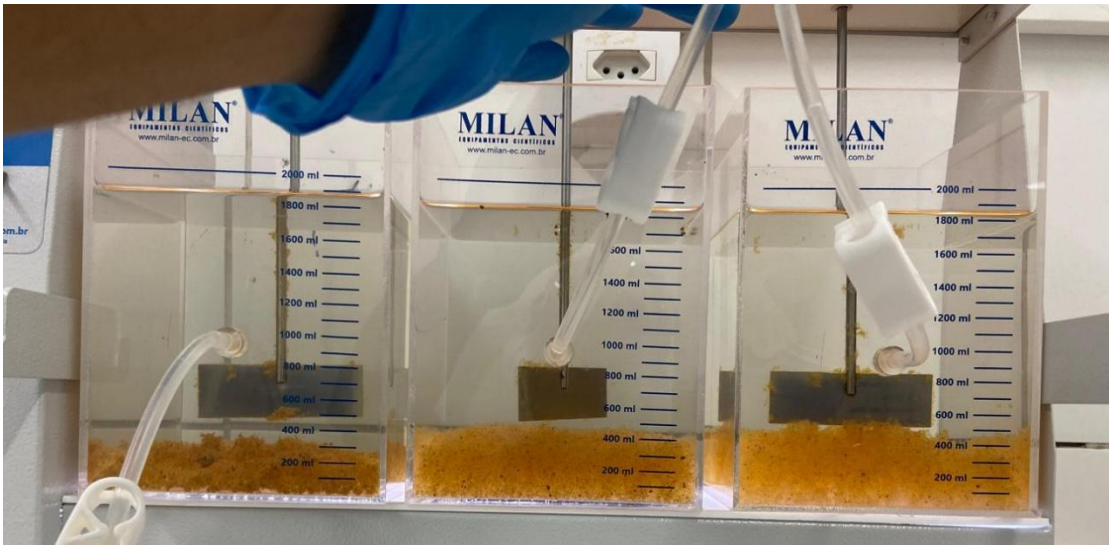


Fonte: Autor (2025).

Figura 15 - Etapa de floculação do terceiro experimento.

Fonte: Autor (2025).

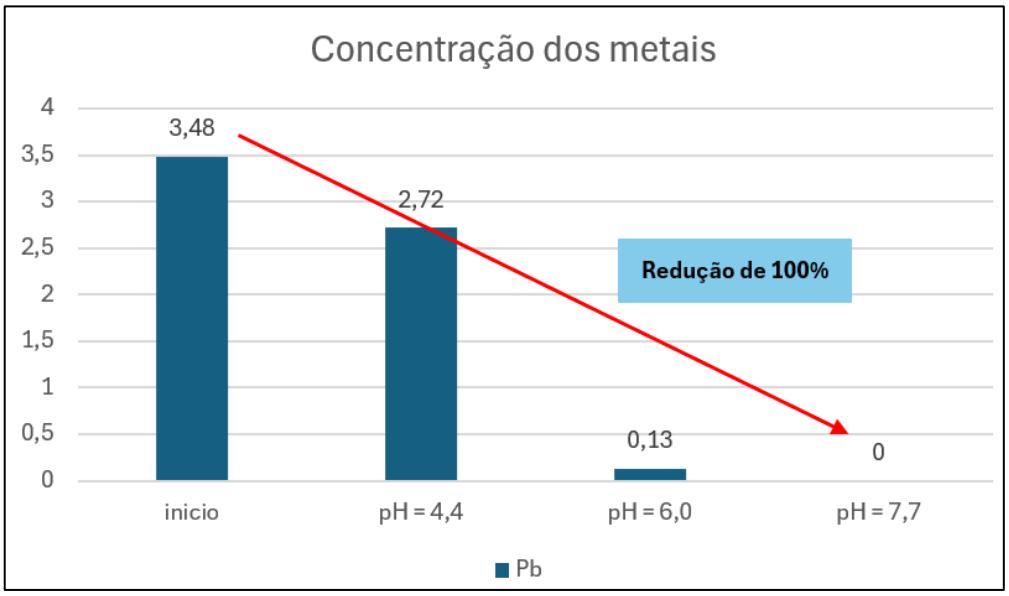
Figura 16 - Lama decantada.



Fonte: Autor (2025).

Pela Figura 16 fica evidente que ao aumentar o pH do sistema, o volume de lama decantada também aumentou. Segundo Zhao et al. (2016), a elevação do pH em soluções contendo chumbo favorece a formação de um precipitado branco, caracterizado como hidróxido de chumbo. Na Figura 17 são apresentados os valores de chumbo do efluente inicial e após o tratamento em cada cuba.

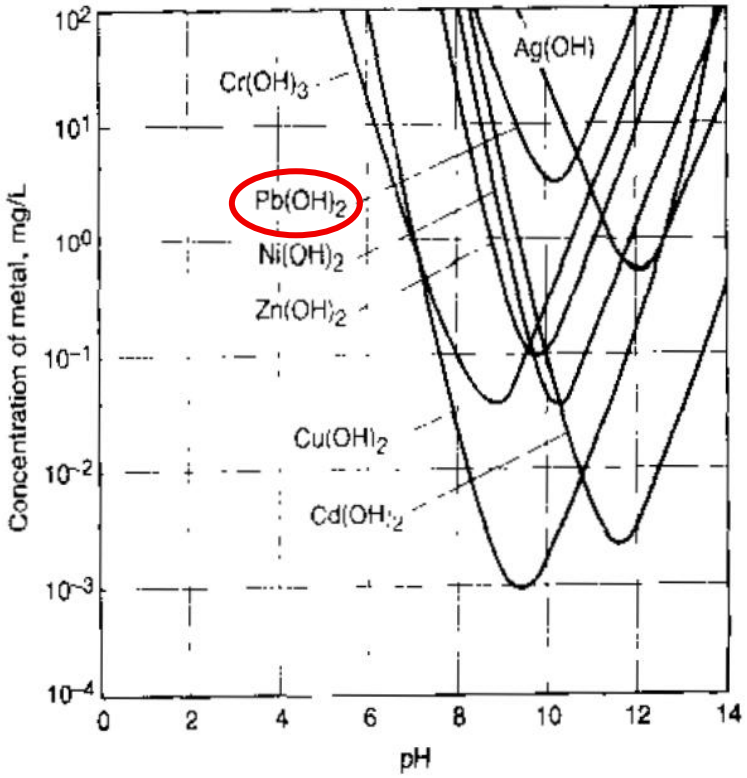
Figura 17 - Concentração de Pb no efluente após tratamento.



Fonte: Autor (2025).

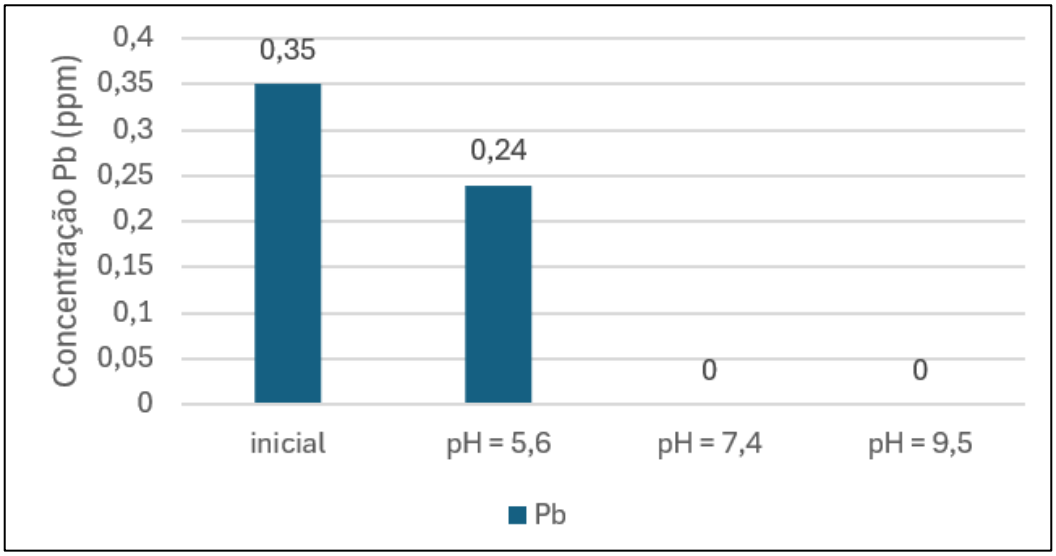
Assim, entende-se que o aumento do volume de lama esteja associado à formação do $Pb(OH)_2$ e que o meio alcalino garante melhores resultados para a remoção de chumbo, como citado por Metcalf e Eddy (2003), em que a precipitação química é uma das técnicas mais utilizadas para remoção de metais pesados de efluentes, utilizando principalmente de hidróxidos e sulfetos como agentes precipitantes. Dessa forma, como no processo em estudo foi adicionado hidróxido de sódio no efluente, foi possível precipitar o chumbo em forma de hidróxido de chumbo ao ajustar o pH na faixa de solubilidade mínima, como apresenta a Figura 18, sendo esta faixa entre 8,5 e 12 com ponto mínimo por volta do pH equivalente a 10.

Figura 18 - Solubilidade de metais pesados em função do pH.



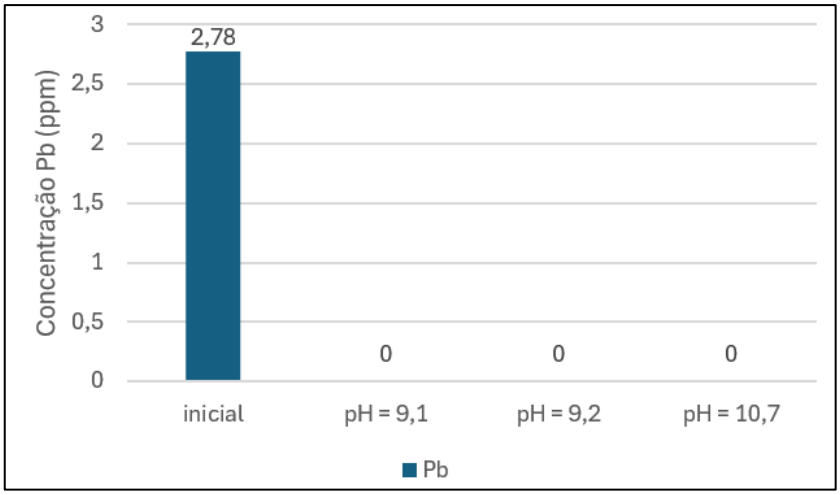
Fonte: METCALF e EDDY (2003).

Figura 19 - Resultados de novo experimento em meio ácido, neutro e alcalino.



Fonte: Autor (2025).

Figura 20 - Resultados de experimento em meio alcalino.



Fonte: Autor (2025).

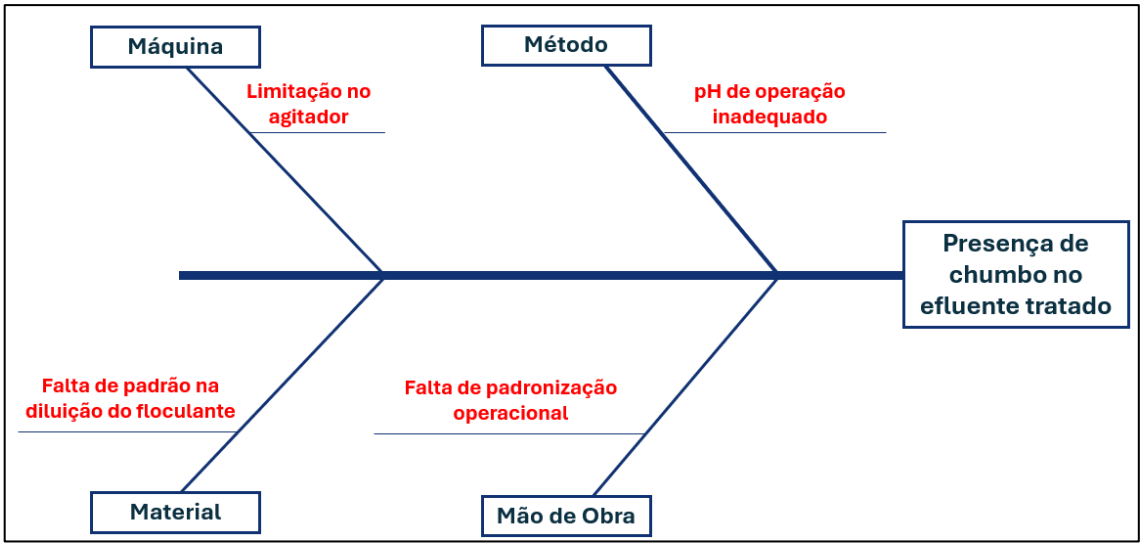
Através destes experimentos fica evidente que a partir de valores de pH equivalentes e superiores a 7, a remoção de chumbo ocorreu de forma muito satisfatória.

5.5. Replicação para o sistema real

5.5.1. Diagrama de Ishikawa

Após a verificação e validação dos testes realizados em bancada, foi montado um Diagrama de Ishikawa que evidencia as causas raízes da problemática no sistema real.

Figura 21 - Diagrama de Ishikawa.



Fonte: Autor (2025).

5.5.2. Ações e contramedidas

Tendo conhecimento das causas raízes, foi realizado um plano de ação para mitigar os gargalos encontrados.

5.5.2.1. Padronização da diluição do floculante

Como citado anteriormente, a diluição do floculante dependia da operação, variando a qualidade do produto e consequentemente o resultado do tratamento. Dessa forma, foi realizada a troca do balde anterior por um graduado e determinada a diluição 1:100.

Figura 22 - Balde graduado para manejo do floculante puro.

Fonte: Autor (2025).

5.5.2.2. Ajuste do pH de operação

O pH de operação do processo foi ajustado de acordo com os resultados obtidos nos estudos em bancada, sendo alterado para a faixa equivalente a 8, visto que pela Resolução do CONAMA N°430/2011, para descarte em corpos receptores deve ser entre 6 e 9.

Figura 23 - Medição do pH da caixa de neutralização.

Fonte: Autor (2025).

Além disso, o método para medição do pH foi alterado diante da incerteza e subjetividade inerente à medição pelas fitas, sendo substituídas por um pHmetro portátil.

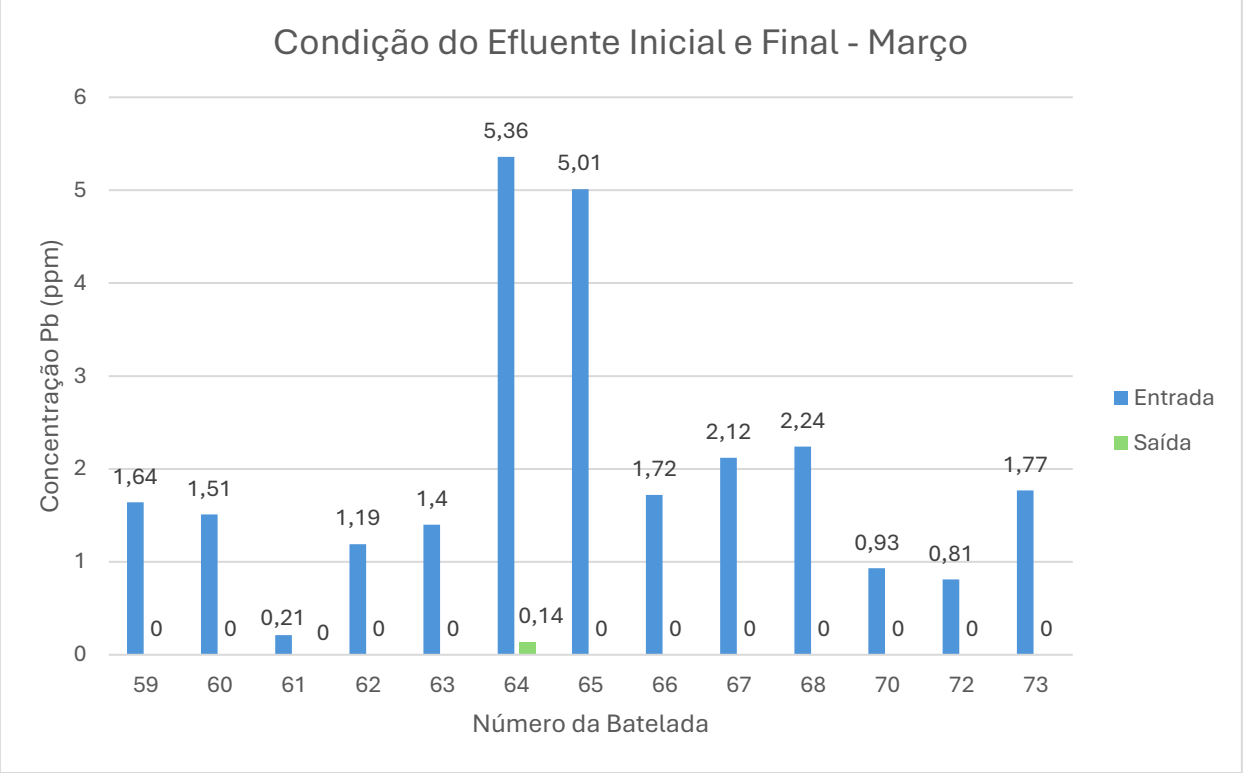
5.5.2.3. Troca do sistema de agitação

Para realização das etapas de mistura rápida e mistura lenta do processo, se faz necessária a troca do sistema motorredutor que rege a agitação na caixa de neutralização. Assim, foi proposta a troca do redutor para um que possua uma relação mais baixa, de preferência 1:10, junto à instalação de um inversor de frequência. Dessa forma, seria possível de controlar as etapas de agitação em diferentes rotações.

5.5.3. Remoção de chumbo por batelada

Após a execução do plano de ação, as bateladas foram monitoradas em suas entradas e saídas ao longo do tempo. Na Figura 24 são apresentados os resultados obtidos.

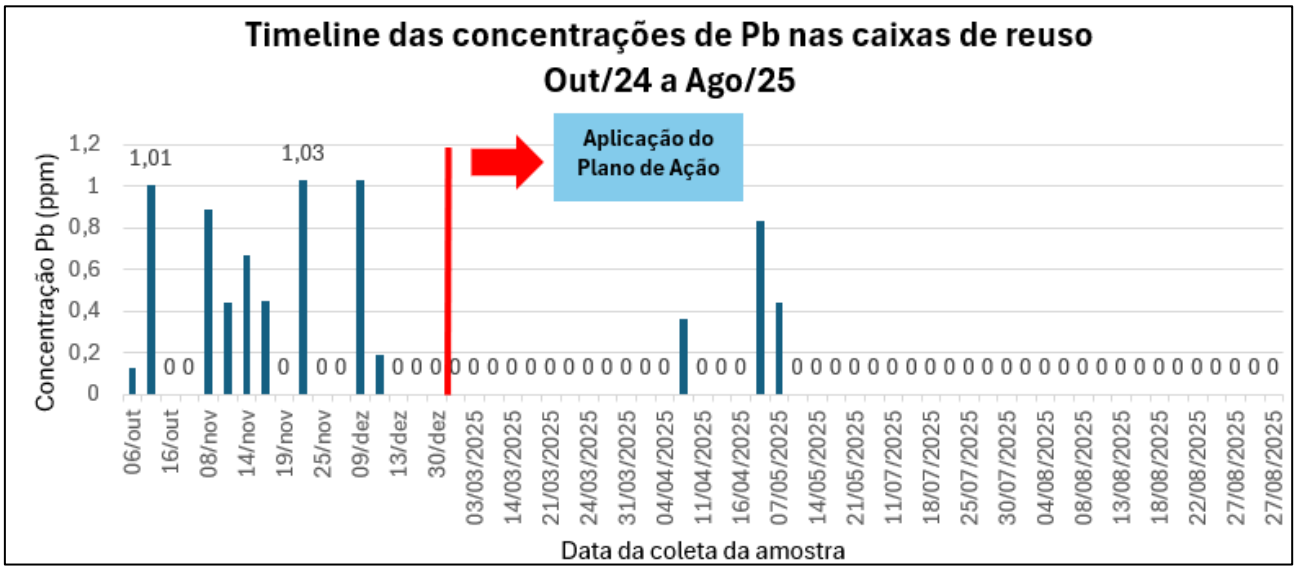
Figura 24 - Monitoramento das bateladas: amostras antes e depois do tratamento.



Fonte: Autor (2025).

É possível observar que o chumbo estava presente em todas as amostras coletadas referentes ao efluente antes do tratamento, sendo ele completamente removido no processo, com exceção da batelada N°64 que sua remoção foi de 97%. Por fim, após os resultados positivos no acompanhamento da batelada, foi feita uma timeline do monitoramento das caixas de reuso que armazenam este efluente após tratado, ficando evidente a qualidade do efluente antes e após a execução do plano de ação em relação à concentração de chumbo.

Figura 25 - Timeline das concentrações de chumbo: antes e depois do tratamento.



Fonte: Autor (2025).

5.5.4. Padronização operacional

A padronização dos processos está diretamente ligada a uniformizar procedimentos e eliminar variações, garantindo a qualidade e eficiência dos resultados (CAMPOS, 2004). Sendo assim, ao fim da execução do plano de ação, foram atualizadas instruções operacionais internas da empresa, junto a realização de treinamentos com a operação.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizado o estudo da Estação de Tratamento de Efluentes em uma indústria de baterias automotivas, em que seu sistema funciona em bateladas e possui o intuito de receber, tratar e reutilizar o efluente industrial, com objetivo principal de remover o chumbo advindo dos processos.

Os experimentos conduzidos no estudo de bancada comprovaram a ineficiência do sistema em relação aos aspectos de agitação e pH, que comprometiam a qualidade final da água, sendo possível de prototipar o sistema através do jar test. Dessa forma, a adição da mistura rápida a 200 RPM seguida da mistura lenta a 30 RPM garantiu uma melhor dispersão do floculante pelo líquido, seguida da geração de flocos maiores, afetando diretamente no tempo de decantação, em que o volume ideal encontrado foi equivalente a 5 mL de floculante, nas proporções de bancada.

Em relação ao pH, a remoção de metais por precipitação química serviu bem à necessidade da ETE, visto que a faixa de pH de 7 a 9 apresentou resultados satisfatórios na remoção do chumbo.

Por fim, utilizando do Diagrama de Ishikawa foi possível de destacar as principais causas e executar um plano de ação no sistema real em que houve a padronização do floculante, proposta para adição da mistura rápida no agitador, ajuste no pH de operação e, por fim, a execução da padronização da atividade em documentações internas e treinamentos com a equipe.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOTEZATU, C. et al. **Use of the Ishikawa diagram in the investigation of some industrial processes.** In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 92, p. 89, 16 maio 2011.

CAMPOS, Vicente Falconi. **TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês).** 8. ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda., 2004.

COSTA, C. et al. **Aplicação das Ferramentas de Qualidade-Controle Estatísticos de Processos e Diagrama de Ishikawa na determinação da Qualidade de um processo produtivo de Limão.** Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 9, n. 5, p. 1794-1819, 2023.

FILHO, R.A.B.; KAWAKAME, M. S.; ALMEIDA, J.F. **Análise de Aplicação da Metodologia 5G do WCM Para Solucionar o Problema de Empenamento do Subconjunto de um Produto em uma Linha de Produção de uma Metalúrgica.** XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2024.

GELBKE, M.; MONDOLONI, C. **Flooded starting-lighting-ignition (SLI) and enhanced flooded batteries (EFBs): State-of-the-art.** Lead-Acid Batteries for Future Automobiles, p. 149-184, 2017.

GEREMIAS, J. **Ciclo PDCA na saúde: Saiba como utilizar**. Qualidade para Saúde, 2023. Disponível em: <https://qualidadeparasaude.com.br/ciclo-pdca-na-saude/>.

HESPANHOL, I. **Potencial de reuso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios e recarga de aquíferos.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7, n. 4, p. 75-95, 2002.

IBER. **O impacto ambiental das baterias de chumbo-ácido: conheça os riscos e saiba como reciclar responsavelmente.** Publicado em 26 mar. 2024. Disponível em: <https://iberbrasil.org.br/blog/2024/03/26/o-impacto-ambiental-das-baterias-de-chumbo-acido-conheca-os-riscos-e-saiba-como-reciclar-responsavelmente/>. Acesso em: 7 set. 2025.

KATO, S.; KANSHA, Y. **Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques.** Environmental Science and Pollution Research, v. 31, n. 39, p. 51064–51097, 7 ago. 2024.

KIANOUSH, S. et al. **Clinical, toxicological, biochemical, and hematologic parameters in lead exposed workers of a car battery industry.** Iranian Journal of Medical Sciences, v. 38, n. 1, p. 30-37, 2013. DOI: 10.5812/ijms.3642942.

METCALF e EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.** 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. cap. 6, p. 514-515.

NASIER, M; ABDULRAZZAQ, K. **Conventional water treatment plant, principles, and important factors influence on the efficiency.** Design Engineering, v. 8, p. 16009-16027, 2021.

PAVLOV, D. **Lead-Acid Batteries: Science and Technology.** 1. Ed. Amsterdam: Elsevier, 2011.

PROŠIĆ, S. **Kaizen management philosophy.** In: I International Symposium Engineering Management And Competitiveness, June. 2011. p. 24-25.

RICHTER, C. **Tratamento de água**. São Paulo: Editora Blucher, 1991. *E-book.* ISBN 9788521217404. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521217404/.

ROCHA, Rafaela; PEZZINI, Marina Ferri; POETA, Julia. **Fontes de contaminação pelo chumbo e seus efeitos tóxicos na saúde ocupacional.** Ciência em Movimento, v. 19, n. 39, p. 23-32, 2017.

SCOTELANO, L. de S**. Aplicação da Filosofia Kaizen e uma Investigação sobre a sua Difusão em uma Empresa Automobilística.** Revista da FAE, v. 10, n. 2, 2016. Disponível em: <https://revistafae.fae.emnuvens.com.br/revistafae/article/view/347>.

SINGH, J; SINGH, H. **Kaizen philosophy: a review of literature.** IUP journal of operations management, v. 8, n. 2, p. 51, 2009.

TASSINARI, B. et al. **Application of turbidity meters for the quantitative analysis of flocculation in a jar test apparatus.** Journal of Environmental Engineering, v. 141, n. 9, p. 04015015, 2015.

TERCETTI, Rodolfo Luiz; ROSSONI, Hygor Aristides Victor. **O reuso industrial de água residuária tratada: o estado da arte por meio de uma revisão sistemática de literatura.** Revista Brasileira de Gestao Ambiental e Sustentabilidade, v. 9, n. 23, p. 1383-1398, 2022.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.** Publicado em 25 set. 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 7 set. 2025.

VIANA, D. **Estação de tratamento de água: entenda seu funcionamento – Guia da Engenharia.** Publicado em 9 mar. 2018. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/estacao-tratamento-agua/>. Acesso em: 30 set. 2025.

VOLTARELLI, A. et al. **Saturnismo: efeitos da intoxicação pelo chumbo em seres humanos.** Global Clinical Research Journal, v. 2, n. 2, 2022.

ZHAO, Y. et al**. Kinetics, equilibrium, and thermodynamics investigation on the adsorption of lead (II) by coal-based activated carbon**. SpringerPlus, v. 5, n. 1, p. 1-11, 2016. DOI: 10.1186/s40064-016-2839-4.