



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ALYNNE MAYARA DE SOUZA MORAES**

**OTIMIZAÇÃO DO USO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO NO TRATAMENTO DE  
EFLUENTES: UM ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE RECICLAGEM  
DE CHUMBO.**

**JOÃO PESSOA-PB 2025**

**ALYNNE MAYARA DE SOUZA MORAES**

**OTIMIZAÇÃO DO USO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO NO TRATAMENTO DE  
EFLUENTES: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE RECICLAGEM DE  
CHUMBO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba (Campus I) como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Etimógenes Duarte Vieira Segundo.

**JOÃO PESSOA-PB 2025**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

M827o Moraes, Alynne Mayara de Souza.

OTIMIZAÇÃO DO USO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO NO  
TRATAMENTO DE EFLUENTES: UM ESTUDO DE CASO EM UMA  
INDÚSTRIA DE RECICLAGEM DE CHUMBO / Alynne Mayara de  
Souza Moraes. - João Pessoa, 2025.

56 f. : il.

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

1. Kaizen. 2. World Class Manufacturing. 3. PDCA. 4.  
Eficiência Produtiva. 5. Otimização de Processos. 6.  
Sustentabilidade Industrial. I. Duarte Vieira Segundo,  
José Etimógenes. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 66.01(043.2)


**ALYNNE MAYARA DE SOUZA MORAES**

**OTIMIZAÇÃO DO USO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE RECICLAGEM DE CHUMBO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba (Campus I) como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.


Aprovada em 23 de Abril de 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 JOSE ETIMOGENES DUARTE VIEIRA SEGUNDO  
Data: 28/04/2025 19:52:17-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. José Etimógenes Duarte Vieira Segundo  
(Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 KARLA SILVANA MENEZES GADELHA DE SOUSA  
Data: 29/04/2025 19:37:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Karla Silvana Menezes Gadelha de Sousa  
(Examinadora)

Documento assinado digitalmente  
 JEFFERSON BONIFACIO SILVA  
Data: 29/04/2025 10:20:54-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Me. Jefferson Bonifacio Silva  
(Examinador)

À minhas mães, Nicinha (*In Memoriam*) e  
Cícera,

**Dedico.**

## AGRADECIMENTOS

Ao longo dessa caminhada, Deus nunca me faltou. A Ele, toda a minha gratidão.

Ao concluir este primeiro grande passo da minha jornada acadêmica, agradeço à minha mãe, Cícera Xavier, que sempre acreditou em mim, e à minha família, que esteve ao meu lado desde o início. À minha vó Maria Eunice (*in memoriam*), que me ensinou os primeiros números, e ao meu pai, Missias Moraes, que nunca passou por um conhecido na rua sem dizer: “minha filha vai ser engenheira”. Obrigada por toda a confiança e orgulho.

Aos meus irmãos, Anne e Adryan, agradeço pelas risadas, pelo companheirismo e pelas memórias que tornaram a caminhada mais leve. A todos os parentes e amigos que sempre torceram por mim, minha gratidão: nunca me faltou apoio para que a primeira engenheira da família se formasse. À minha vó Maria das Dores, cujo feijão tropeiro foi carinho em tantos domingos, e à minha tia Joelma (*in memoriam*), que me apoiou com tanto amor no início da graduação, deixo meu sincero agradecimento. Esta conquista também é dedicada aos Moraes e Souza que vieram antes de mim, muitos dos quais não puderam sequer sonhar com o ensino superior.

À minha namorada, Stefanne Brandão, todo o meu carinho e gratidão. Obrigada por caminhar ao meu lado nos últimos anos do curso, por trazer paz e companheirismo à minha vida e por me ajudar a enxergar o valor do percurso, além da linha de chegada. Obrigada por me escutar tantas vezes e por estar sempre aqui.

Aos colegas da UFPB que caminharam comigo, um grupo unido até o fim, meu profundo agradecimento. Foram muitas madrugadas de estudo e dedicação, e sem vocês, talvez eu não tivesse conseguido. Victor, Suevelly, Jardielly, Luiz: obrigada por tornarem até as provas de Reatores ou Instrumentação experiências emocionantes e, de algum modo, divertidas.

À Universidade Federal da Paraíba e ao Departamento de Engenharia Química, minha sincera gratidão por terem sido meu lar paraibano durante esses anos. Aos professores e técnicos que contribuíram para minha formação, muito obrigada.

Agradeço especialmente ao meu orientador, professor Dr. Etimogenes Duarte, e à banca avaliadora representada pela professora Dr<sup>a</sup> Karla Gadelha e pelo Me. Jefferson Bonifácio pelo conhecimento compartilhado e pelas contribuições ao longo do caminho, tanto no aspecto profissional quanto pessoal.

E, por fim, deixo meu agradecimento a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para o projeto de melhoria que deu origem a este Trabalho de Conclusão de Curso.

“Eita, voinha... nós conseguimos!”

## RESUMO

A busca por eficiência operacional e sustentabilidade tem impulsionado a indústria a adotar metodologias estruturadas para a otimização de processos produtivos. No setor de reciclagem de chumbo, o tratamento de efluentes desempenha um papel fundamental na conformidade ambiental, sendo a hidróxido de cálcio um insumo crítico na neutralização dos resíduos ácidos. No entanto, o consumo excessivo dessa substância pode acarretar impactos financeiros significativos, como o aumento dos custos operacionais, além de problemas ambientais como a formação excessiva de lodo e maior geração de resíduos sólidos. O presente estudo tem como objetivo a aplicação de ferramentas de gestão da qualidade para a redução do consumo de hidróxido de cálcio na estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria de reciclagem de chumbo. Para isso, foram empregadas metodologias de resolução de problemas dentro do contexto do World Class Manufacturing (WCM), que integra a filosofia de melhoria contínua Kaizen. O problema identificado demonstra a necessidade de reduzir o consumo em 26,7% para alcançar a meta definida pela empresa. Esse desvio em relação ao objetivo permaneceu por mais de cinco meses, reforçando a importância de uma investigação detalhada das causas. Por meio da utilização do Diagrama de Ishikawa, da técnica dos 5 Porquês e de sessões de Brainstorming com a equipe envolvida, foram identificadas como principais causas-raiz do problema a falta de periodicidade na limpeza do tanque de formulação, a inadequação da concentração da solução de hidróxido de cálcio e a ausência de um controle rigoroso do processo de dosagem. Diante disso, foi elaborado um plano de ação contemplando a revisão do rateio do consumo de hidróxido de cálcio, a realização de testes laboratoriais para ajuste da dosagem ideal e a padronização dos novos procedimentos operacionais. Os resultados obtidos demonstraram uma redução expressiva no consumo de hidróxido de cálcio, atingindo a meta estabelecida em apenas um mês de implementação das ações corretivas. Além da redução de custos operacionais, a otimização do processo permitiu minimizar a geração de resíduos, promovendo uma operação mais sustentável e alinhada às boas práticas ambientais. Assim, este estudo reforça a importância da aplicação estruturada das ferramentas de gestão da qualidade como o diagrama de causa e efeito e das metodologias de melhoria contínua na indústria, demonstrando que a adoção de abordagens sistemáticas pode resultar em ganhos significativos tanto em termos econômicos quanto ambientais. Assim, os resultados alcançados podem servir como referência para futuras iniciativas de otimização de processos em diferentes setores industriais, contribuindo para a consolidação de práticas sustentáveis e eficientes.

**Palavras-chave:** *Kaizen*; *World Class Manufacturing*, PDCA; Eficiência Produtiva, Otimização de Processos, Sustentabilidade Industrial.

## ABSTRACT

The search for operational efficiency and sustainability has driven the industry to adopt structured methodologies for optimizing production processes. In the lead recycling sector, effluent treatment plays a fundamental role in environmental compliance, with calcium hydroxide being a critical input in the neutralization of acidic waste. However, excessive consumption of this substance can lead to significant financial impacts, such as increased operating costs, in addition to environmental problems such as excessive sludge formation and increased generation of solid waste. This study aims to apply quality management tools to reduce calcium hydroxide consumption in the effluent treatment plant (ETP) of a lead recycling industry. To this end, problem-solving methodologies were employed within the context of World Class Manufacturing (WCM), which integrates the Kaizen continuous improvement philosophy. The problem identified demonstrates the need to reduce consumption by 26.7% to achieve the target set by the company. This deviation from the target remained for more than five months, reinforcing the importance of a detailed investigation of the causes. Using the Ishikawa Diagram, the 5 Whys technique and brainstorming sessions with the team involved, the main root causes of the problem were identified as the lack of regularity in cleaning the formulation tank, the inadequate concentration of the calcium hydroxide solution and the lack of strict control of the dosing process. In view of this, an action plan was drawn up including the review of the allocation of calcium hydroxide consumption, the performance of laboratory tests to adjust the ideal dosage and the standardization of new operational procedures. The results obtained demonstrated a significant reduction in calcium hydroxide consumption, reaching the established target within just one month of implementing the corrective actions. In addition to reducing operational costs, the optimization of the process allowed for the minimization of waste generation, promoting a more sustainable operation aligned with good environmental practices. Thus, this study reinforces the importance of the structured application of quality management tools such as the cause and effect diagram and continuous improvement methodologies in the industry, demonstrating that the adoption of systematic approaches can result in significant gains in both economic and environmental terms. Thus, the results achieved can serve as a reference for future process optimization initiatives in different industrial sectors, contributing to the consolidation of sustainable and efficient practices.

**Keywords:** *Kaizen*; World Class Manufacturing, PDCA; Production Efficiency, Process Optimization, Industrial Sustainability.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.4 – Templo do WCM, pilares técnicos .....	16
Figura 2.4 – Níveis de Kaizen. ....	18
Figura 3.4 – Ciclo PDCA. ....	20
Figura 4.4 –Diagrama de Ishikawa.....	22
Figura 5.5 – Equipe <i>Kaizen</i> . ....	24
Figura 6.5 – Processo de Tratamento de Efluentes em uma indústria de reciclagem de chumbo. .....	25
Figura 7.5 – Método de solução de problema. ....	26
Figura 8.5 – Ilustração da utilização da ferramenta 5 Porquês .....	30
Figura 9.5 – Solução de hidróxido de cálcio. ....	31
Figura 10.5 – Sistema da reação de neutralização em laboratório .....	31
Figura 11.5 – Tanque de formulação (interior pré-limpeza). ....	32
Figura 12.6 – Sistema da reação de preparação de solução de hidróxido de cálcio.....	35
Figura 13.6 – Histórico do volume de efluente tratado 2023-2024. ....	36
Figura 14.6 – Histórico do consumo de hidróxido de cálcio 2023-2024. ....	37
Figura 15.6 – Tanque de Formulação (célula de carga) .....	38
Figura 16.6 – Diagrama de Causa e Efeito.....	41
Figura 17.6 – pH do efluente tratado.....	44
Figura 18.6 – Limpeza do tanque de formulação .....	47

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Conceitos de tratamento de efluentes e neutralização com hidróxido de cálcio ...</b>	<b>14</b>
<b>4.2</b>	<b>WCM (<i>World Class Manufacturing</i>) .....</b>	<b>15</b>
<b>4.3</b>	<b><i>Kaizens</i> e melhoria contínua no ambiente industrial.....</b>	<b>17</b>
<b>4.4</b>	<b>Metodologia PDCA.....</b>	<b>19</b>
<b>4.5</b>	<b>Ferramentas da qualidade .....</b>	<b>21</b>
	4.5.1 <i>Brainstorming</i> .....	21
	4.5.2 Diagrama de Causa e Efeito .....	22
	4.5.3 <i>5 Whys</i> .....	23
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
<b>5.1</b>	<b>Equipe <i>Kaizen</i>.....</b>	<b>24</b>
<b>5.2</b>	<b>Descrição do processo.....</b>	<b>25</b>
<b>5.3</b>	<b>Metodologia <i>QC Story</i> e PDCA.....</b>	<b>26</b>
	5.2.1 Planejamento ( <i>Plan</i> ).....	26
	5.2.2 Execução ( <i>Do</i> ).....	30
	5.2.3 Verificação ( <i>Check</i> ).....	32
	5.2.4 Ação e Padronização ( <i>Act</i> ) .....	34
<b>5.4</b>	<b>Considerações Metodológicas.....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>35</b>
<b>6.1</b>	<b>Observação do sistema .....</b>	<b>35</b>
	6.1.1 <i>Gemba</i> (o lugar onde as coisas acontecem) .....	35
	6.1.2 <i>Gembutsu</i> .....	35

6.1.3	<i>Genjitsu</i> .....	36
6.1.4	<i>Genri</i> .....	38
6.1.5	<i>Gensoku</i> .....	39
<b>6.2</b>	<b>Análise</b> .....	<b>40</b>
6.2.1	<i>Brainstorming</i> .....	40
6.2.2	Diagrama de Ishikawa .....	41
6.2.3	Análise dos 5 Porquês .....	41
<b>6.3</b>	<b>Plano de Ação</b> .....	<b>42</b>
<b>6.4</b>	<b>Ações bloqueadoras de causas fundamentais</b> .....	<b>44</b>
6.4.1	Alteração do parâmetro de processo para concentração de 3% de hidróxido de cálcio .....	44
6.4.2	Estudo para definição da periodicidade de limpeza preventiva .....	45
6.4.3	Ajustar bomba para captar efluente neutralizado do reservatório .....	45
6.4.4	Atualização do rateio .....	45
6.4.5	Fazer limpeza de toda incrustação .....	46
<b>6.5</b>	<b>Verificação</b> .....	<b>47</b>
6.5.1	Redução do consumo de hidróxido de cálcio e alcance da meta .....	47
6.5.2	Efetividade das ações .....	48
<b>6.6</b>	<b>Padronização</b> .....	<b>50</b>
<b>6.7</b>	<b>Premiações</b> .....	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por eficiência operacional é um dos desafios centrais da indústria moderna. No contexto da manufatura, a aplicação de metodologias estruturadas de melhoria contínua é fundamental para reduzir desperdícios, otimizar processos e aumentar a produtividade (BORBA et al., 2024). Segundo Lizarelli e Toledo (2016), a adoção dessas práticas contribui diretamente para a redução de custos e impactos ambientais, promovendo operações mais sustentáveis e alinhadas às exigências regulatórias e de mercado.

Na indústria de reciclagem de chumbo, o tratamento de efluentes industriais desempenha um papel essencial na mitigação de impactos ambientais e na garantia da conformidade com normas como a Resolução nº 430 do CONAMA (2011), que estabelece parâmetros para o descarte adequado de efluentes. Um insumo crítico nesse processo é o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), amplamente utilizado na neutralização de efluentes ácidos por sua efetividade e baixo custo (SILVEIRA et al., 2016). No entanto, seu consumo excessivo pode gerar consequências operacionais significativas, incluindo aumento de custos, formação excessiva de lodo e maior demanda por descarte de resíduos sólidos, elevando os riscos ambientais e financeiros.

A unidade industrial estudada apresentou, por mais de cinco meses, uma taxa de consumo de hidróxido de cálcio 26,7% acima da meta estabelecida pela empresa, indicando falhas operacionais no controle do processo de neutralização de efluentes. Esse desvio reforçou a necessidade de uma abordagem estruturada para identificar as causas do problema e implementar contramedidas eficazes, assegurando maior eficiência operacional e sustentabilidade.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo a redução do consumo de hidróxido de cálcio por meio da aplicação estruturada de ferramentas de gestão da qualidade, utilizando a metodologia PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) associada aos princípios do *Kaizen* e do *World Class Manufacturing* (WCM). Para garantir uma abordagem sistemática e lógica na resolução do problema, seguiu-se a estrutura do *QC Story*, metodologia amplamente utilizada na gestão da qualidade para conduzir análises estruturadas e embasar a tomada de decisões.

Segundo Aquino (2017), “o programa WCM utiliza o processo de melhoria contínua através do conceito *Kaizen*, termo japonês não muito bem definido pelo JUSE (*Japanese Union for Scientists and Engineers*), mas utilizado para definir diversos conceitos. As melhorias focadas, realizadas dentro dos *kaizens* do WCM, são totalmente baseadas na metodologia PDCA”. Dessa forma, a integração dessas metodologias proporcionou um diagnóstico preciso

e a implementação eficaz das ações corretivas, garantindo sustentabilidade operacional e redução de desperdícios.

Além do impacto financeiro, o estudo também aborda os aspectos ambientais, classificando-se como uma melhoria que atinge tanto a Matriz C quanto a Matriz LAIA. A Matriz C auxilia na identificação e priorização de perdas e desperdícios, enquanto a Matriz LAIA direciona as ações de melhoria para aspectos ambientais (H. D. PEREIRA, 2014; ROHRICH, 2016)). A sinergia dessas ferramentas possibilitou um maior controle do processo de neutralização de efluentes, redução de desperdícios e conformidade ambiental, tornando o sistema mais robusto e eficiente.

Por fim, este estudo reforça a importância da aplicação estruturada das ferramentas da qualidade na resolução de problemas industriais, fornecendo um modelo replicável para outras organizações que buscam otimizar seus processos produtivos, reduzir custos operacionais e melhorar sua competitividade no mercado.

## 2 MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO

A crescente exigência por práticas industriais mais sustentáveis tem impulsionado organizações a buscarem soluções inovadoras para a gestão de recursos e resíduos (NEGRÃO et al., 2024). No setor de reciclagem de chumbo, onde o tratamento de efluentes é uma etapa crítica, o controle eficiente do consumo de insumos se torna um diferencial estratégico. Além de atender às regulamentações ambientais, esse controle impacta diretamente a confiabilidade operacional e a reputação corporativa.

Na unidade analisada, observou-se um consumo atípico de hidróxido de cálcio no processo de neutralização de efluentes no ano de 2024 em relação ao ano anterior, ocasionando efeitos colaterais como a geração excessiva de lodo e o aumento na frequência de manutenções não planejadas. Essas condições não apenas elevam os custos operacionais, como também comprometem a estabilidade dos processos e os indicadores de desempenho da planta.

Motiva-se, portanto, a realização deste estudo pela necessidade de restabelecer o controle do processo e garantir maior previsibilidade operacional. Embora a neutralização de efluentes seja amplamente abordada na literatura, poucos estudos adotam metodologias estruturadas de melhoria contínua, como PDCA e *QC Story*, para aprimorar o desempenho deste processo, o que torna esta pesquisa inovadora no campo. Ao invés de se restringir ao aspecto técnico da neutralização, a abordagem adotada foca na aplicação prática de ferramentas de gestão da qualidade para reforçar a cultura de melhoria contínua e aumentar a maturidade dos processos da área ambiental (OLIVEIRA, 2022; VIVIAN, 2016).

Este trabalho vai além de uma análise pontual, oferecendo uma oportunidade para replicar boas práticas que integrem desempenho econômico e responsabilidade ambiental, não apenas em outras unidades da empresa, mas também em qualquer Estação de Tratamento de Efluentes ou organização interessada. Ao demonstrar como a gestão proativa de insumos pode impactar positivamente toda a cadeia de valor, reafirma-se o papel estratégico da engenharia de processos no alcance de metas sustentáveis e na criação de valor para a indústria (LAMBERT, 1998; SRIVASTAVA, 2007; NEGRÃO et al., 2024).

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo Geral

Reduzir o consumo de hidróxido de cálcio no processo de neutralização de efluentes, por meio da aplicação estruturada de ferramentas da qualidade e das metodologias PDCA e QC Story, integradas aos princípios do Kaizen, visando maior eficiência operacional, redução de custos e conformidade ambiental.

#### 3.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar as causas do consumo elevado de hidróxido de cálcio:  
Realizar a coleta e análise de dados do processo de neutralização de efluentes, utilizando ferramentas da qualidade como o Diagrama de Causa e Efeito (Espinha de Peixe) e a técnica dos 5 Porquês, com o objetivo de compreender os fatores técnicos, operacionais e organizacionais que contribuem para o consumo excessivo do insumo.
- b) Implementar ações corretivas baseadas na metodologia PDCA:  
Desenvolver e aplicar ações estruturadas a partir do diagnóstico realizado na etapa anterior, promovendo testes, validações e ajustes no processo de dosagem do hidróxido de cálcio, visando reduzir desperdícios e melhorar o desempenho operacional da estação de tratamento de efluentes.
- c) Garantir a padronização e o controle do novo processo:  
Estabelecer mecanismos de padronização por meio da elaboração de instruções operacionais atualizadas, realização de treinamentos com as equipes envolvidas e definição de indicadores de monitoramento, assegurando a sustentabilidade dos resultados alcançados e prevenindo a reincidência do problema.
- d) Contribuir para a sustentabilidade ambiental por meio da otimização do uso de insumos:  
Promover a redução do consumo de hidróxido de cálcio, visando não apenas a eficiência operacional, mas também a diminuição da geração de resíduos alinhando as práticas industriais aos princípios de sustentabilidade e economia circular.

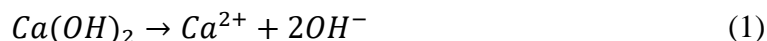
## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Conceitos de tratamento de efluentes e neutralização com hidróxido de cálcio

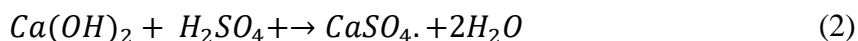
A neutralização de efluentes ácidos contendo ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) é um processo fundamental na indústria metalúrgica, química e de reciclagem de baterias, onde a geração de resíduos líquidos com baixo pH exige tratamento adequado antes do descarte ou reuso. A utilização de hidróxido de cálcio hidratada [ $Ca(OH)_2$ ] é uma das soluções mais empregadas devido à sua eficácia na elevação do pH e precipitação de sulfatos, além de sua disponibilidade e facilidade de manuseio (CARVALHO, 2003; LEGNER, 2023). O processo de neutralização envolve a conversão da acidez em água e a formação de sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ ), conhecido como borra de hidróxido de cálcio, que pode impactar a eficiência operacional se não for adequadamente controlado (SUDAM, 2010).

A neutralização do ácido sulfúrico com hidróxido de cálcio hidratada ocorre conforme as reações abaixo (1) e (2):

1. Dissociação do hidróxido de cálcio hidratada em meio aquoso:



2. Reação de neutralização com ácido sulfúrico:



O hidróxido de cálcio, ao liberar íons hidroxila ( $OH^-$ ), promove a neutralização do meio ácido, resultando na formação de água e na precipitação de sulfato de cálcio. Esse precipitado pode apresentar baixa solubilidade em determinadas condições, o que pode levar à formação de incrustações em equipamentos e tubulações caso o processo não seja otimizado (SHAHA, 2016).

A eficácia da neutralização depende de fatores como dosagem de hidróxido de cálcio, tempo de contato e controle do pH final. O excesso de hidróxido de cálcio pode elevar o pH acima do intervalo recomendado pela própria resolução do CONAMA n°430 (5 a 9), levando à precipitação de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ), o que pode aumentar a turbidez do efluente e dificultar o processo de separação sólido-líquido (SILVA, 2010). Por outro lado, uma dosagem insuficiente pode resultar em pH inadequado, comprometendo a conformidade ambiental do efluente tratado.

Um dos desafios associados à neutralização com hidróxido de cálcio hidratada é a geração de lodo contendo  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , que pode impactar a gestão de resíduos do sistema. O



sulfato de cálcio resultado da neutralização de efluente ácido vindo de uma indústria de reciclagem de chumbo é classificado como Classe IIA, segundo NBR 10004 de 2004, por mais que não seja perigoso pode liberar substâncias que alteram a qualidade da água e do solo. Para minimizar esse efeito, técnicas como decantação assistida por coagulação ou filtração podem ser empregadas, reduzindo o volume de sólidos suspensos e melhorando a clarificação do efluente final (XU Q., 2020).

Dessa forma, o uso de hidróxido de cálcio hidratada na neutralização de efluentes contendo  $H_2SO_4$  é uma abordagem eficiente e economicamente viável, sendo amplamente aplicada em unidades industriais. No entanto, sua implementação requer controle rigoroso do processo para evitar a formação excessiva de precipitados e garantir um pH final adequado, assegurando conformidade ambiental e eficiência operacional.

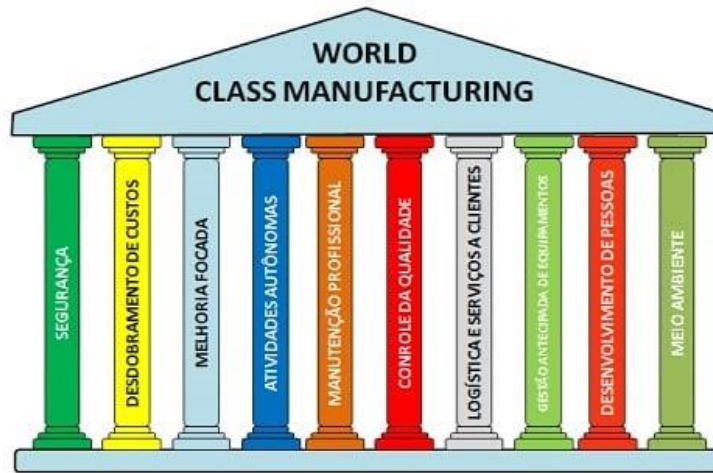
#### **4.2 WCM (*World Class Manufacturing*)**

Em um cenário de intensa concorrência e incertezas, a indústria busca constantemente diminuir custos, evitar perdas e adotar estratégias inovadoras e sustentáveis. Para isso, ao longo do tempo, foram criados diversos métodos e práticas voltadas à melhoria da qualidade, aumento da eficiência e redução de desperdícios (MENDES e MATTOS, 2017).

Entre esses conceitos, destaca-se o *World Class Manufacturing* (WCM), introduzido por Hayes e Wheelwright (1984) (Flynn et al., 1999) e aprimorado ao longo dos anos tendo a primeira versão desenvolvida por Schonberger nos anos 80. O método se baseia nos princípios do *Toyota Production System* (TPS), *Just-in-Time* (JIT) e *Total Quality Control* (TQC). O WCM é uma síntese de diversos conceitos, princípios, políticas e ferramentas voltados para a melhoria organizacional da gestão e das operações (VARGAS et al., 2017).

Por volta dos anos 2000 a Fiat Automobiles desenvolveu uma nova abordagem para o WCM com o apoio do Professor Hajime Yamashina da Universidade de Kyoto, redefinindo e implementando o modelo com base em 10 pilares técnicos e 10 gerenciais (FELICE *et al.*, 2013). Os pilares técnicos são: 1) segurança, 2) desdobramento de custos, 3) melhoria focada, 4a) manutenção autônoma, 4b) organização do hidróxido de cálcio de trabalho, 5) manutenção profissional, 6) controle de qualidade, 7) logística e serviços a clientes, 8a) gerenciamento inicial de equipamentos, 8b) gerenciamento inicial de produtos, 9) desenvolvimento de pessoas e 10) meio ambiente. Na Figura 1.4 é possível ver a representação do “templo do WCM” contendo esses pilares que foi desenvolvido por Yamashina.

Figura 1.4 – Templo do WCM, pilares técnicos



Fonte: PALUCHA(2012).

Ao longo das décadas, os autores definiram um conjunto de princípios, boas práticas e ferramentas que, quando aplicados de maneira estruturada, possibilitam que uma empresa alcance um desempenho superior, especialmente na gestão operacional. Os pilares do WCM estabelecem diretrizes para a eliminação sistemática de perdas, garantindo alto desempenho (PESSOA, 2022). Para viabilizar essa estrutura, metodologias como *Kaizen*, PDCA e 5G são empregadas como ferramentas fundamentais, permitindo que os conceitos do WCM sejam aplicados na prática e assegurando a melhoria contínua dos processos produtivos.

Como já foi levantado anteriormente a busca por resultados está concentrada na redução das principais perdas da fábrica. Para identificar e direcionar essas perdas, são utilizadas matrizes direcionadoras (AQUINO, 2017):

1. Matriz C: Conhecida também como matriz de perdas casuais ou de custos, essa ferramenta destaca os custos associados às perdas em diferentes processos produtivos. A análise dos dados gerados permite a segmentação das informações de diversas maneiras, facilitando a compreensão do tipo e valor das perdas, sua origem, a relação entre os custos de transformação e a estrutura de custos dessas perdas.
2. Matriz S: Essa matriz tem como objetivo principal identificar e evidenciar as condições que podem levar a acidentes dentro da fábrica. A partir dessa análise, são mapeadas

oportunidades de melhoria com foco não apenas na eliminação de acidentes, mas também na erradicação de condições que podem gerar riscos.

3. **Matriz QA:** Utilizada para avaliar o estado atual do controle de qualidade. Ela auxilia na identificação das áreas e operações mais críticas, garantindo que as ações corretivas sejam aplicadas de maneira eficaz. Essa matriz permite um diagnóstico preciso da qualidade na fábrica (YAMASHINA, 2009).
4. **Matriz LAIA:** Levantamento de Aspectos e Impactos Ambientais (LAIA) é essencial para a implantação do Sistema de Gestão Ambiental (SGA), pois permite à organização identificar e avaliar seus aspectos e impactos ambientais. A partir disso, são definidos os impactos significativos que servem como base para a criação de um plano de controle ambiental, estabelecendo prioridades, diretrizes e ações a serem seguidas pelo SGA. (PENIDO, 2014).

#### **4.3 Kaizens e melhoria contínua no ambiente industrial**

A palavra *Kaizen* é uma palavra japonesa cujo significado é “melhoria”. A teoria do *Kaizen* ganhou destaque com a publicação do livro *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*, de Masaaki Imai (1986), após a segunda guerra mundial. Essa metodologia baseia-se na identificação precisa e na resolução eficiente de problemas, sendo fundamentada no ciclo PDCA. A utilização desse ciclo viabiliza o processamento de dados e experiências práticas, permitindo a padronização dinâmica e ajustável de processos, sempre com o propósito central de fomentar a melhoria contínua (VILLANUEVA, et. al, 2024).

Um evento *Kaizen* é um projeto de melhoria contínua focado e estruturado, que utiliza uma equipe multifuncional dedicada para abordar uma área de trabalho específica, com o objetivo de alcançar metas definidas em um curto prazo (DOOLEN et. al., 2008). A melhoria contínua facilita a criação de uma cultura onde mudanças em práticas, processos e comportamentos são mais facilmente aceitas no ambiente de trabalho. Ela também é vista não apenas como um conjunto isolado de ações, mas como uma parte fundamental de um sistema amplo de planejamento operacional (ROBINSON, 2017).

Segundo Tornella (2019), uma cultura de melhoria contínua pode ser baseada na eliminação de desperdícios em todos os sistemas e processos. Rother e Shook (1999) identificam dois níveis de *Kaizen* (Figura 2.4). O *Kaizen de Fluxo* tem um enfoque mais amplo, voltado para o fluxo de valor, sendo geralmente conduzido pela alta administração. Já o *Kaizen*

*de Processo* é voltado para a melhoria de processos específicos e é executado pelas equipes de linha de frente, como equipes de trabalho e líderes de equipe.

Figura 2.4– Níveis de Kaizen.



Fonte: ROTHER e SHOOK (1999).

Dando continuidade ao conceito de *Kaizen* e à sua aplicação no ambiente industrial, segue uma abordagem estruturada que detalha os passos para alcançar a melhoria contínua, os oito passos conhecidos como “História Kaizen” (em japonês *QC story*), são apresentados por Imai, 2014:

- 1) Selecionar o tema: é importante ter com base nas prioridades organizacionais, como políticas de gestão, urgência ou viabilidade econômica, alinhando-o com as necessidades atuais. Nesse contexto se faz importante o direcionamento de matrizes como a Matriz de custos ou de qualidade, e indicadores de processo.
- 2) Entender a situação atual e definir objetivos: é fundamental conhecer a situação atual visitando o lóhidróxido de cálcio e posteriormente estabelecer metas específicas, mensuráveis e alcançáveis. Essas metas podem ser chamadas de SMART (específica, mensurável, atingível, relevante e temporal).
- 3) Analisar os dados assim coletados para identificar as causas raízes: consiste em utilizar dados concretos e ferramentas de análise para identificar as causas subjacentes dos problemas. Imai ressalta ainda a o uso de ferramentas úteis para essa etapa como o “5 porquês” e o Diagrama de Ishikawa).
- 4) Estabelecer contramedidas baseadas na análise de dados: definir ações específicas para corrigir as causas raízes identificadas, priorizando soluções eficazes e práticas.
- 5) Implementar as contramedidas: colocar em prática as contramedidas, garantindo a execução e acompanhamento adequados.

- 6) Confirmar os efeitos das contramedidas: avaliar os resultados das contramedidas para verificar se os objetivos foram alcançados, utilizando indicadores de desempenho.
- 7) Estabelecer ou revisar os padrões para prevenir a recorrência: criar ou atualizar padrões e procedimentos para manter as melhorias e prevenir a repetição do problema.
- 8) Revisar os processos precedentes e trabalhar nos próximos passos: Isso envolve examinar os processos que sustentam o processo abordado na atividade Kaizen. O objetivo é verificar se as mudanças implementadas afetaram de maneira positiva ou negativa os processos anteriores.

No livro “Gemba Kaizen” (2014) o autor Massaki Imai enfatiza a natureza contínua do *kaizen* e a importância de não considerar a melhoria como um evento isolado.

#### **4.4 Metodologia PDCA**

O ciclo Planejar-Executar-Verificar-Agir do inglês *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) é um modelo de gestão amplamente utilizado para impulsionar a melhoria contínua de processos, tendo sua origem na área da manufatura (IMAI, 1986; DEMING, 1993). Segundo Deming (1993), o PDCA é uma estrutura consolidada para aprimoramento de processos, focada no aprendizado contínuo e na geração de conhecimento. De acordo com Martins e colaboradores, 2017 dentre os métodos de resolução de problemas, o ciclo PDCA é um dos mais utilizados.

No livro *Método Estatístico do Ponto de Vista do Controle de Qualidade* (1939), Walter A. Shewhart não apresenta diretamente o ciclo PDCA como o conhecemos hoje. No entanto, suas ideias foram fundamentais para o desenvolvimento desse conceito. Shewhart propôs o Ciclo de Shewhart, um modelo de melhoria contínua baseado em três fases: Especificação, Produção e Inspeção. Esse conceito influenciou diretamente W. Edwards Deming, que mais tarde refinou e popularizou a estrutura como o Ciclo PDCA (PACHECO et al., 2009). Assim, tendo como base o histórico, embora suas raízes estejam no trabalho de Shewhart, foi Deming quem consolidou o PDCA como um dos principais modelos para a gestão da qualidade e melhoria contínua nos processos organizacionais, com quatro etapas fundamentais.

Diversos pesquisadores e especialistas deram continuidade ao legado de Shewhart e Deming, aprofundando e expandindo a aplicação do PDCA. Dentre esses estudiosos, destaca-se Vicente Falconi Campos, que, em 2014, reforçou a estrutura do modelo como um mecanismo essencial para a garantia da excelência operacional. Falconi detalhou a interdependência entre as etapas do ciclo PDCA e sua função estratégica na gestão empresarial, destacando que cada

fase desempenha um papel essencial na busca pela melhoria contínua (Figura 3.4). Cada uma das etapas é descrita abaixo:

- 1ª Etapa – Planejar (Plan): Nesta fase, o foco é a identificação clara do problema, baseada na coleta de dados e na observação direta do ambiente de trabalho (*Gemba*). Além disso, são definidos os objetivos a serem alcançados por meio de indicadores de desempenho e estruturado um plano de ação com estratégias para atingir a meta estabelecida.
- 2ª Etapa – Executar (Do): Após o planejamento, o plano de ação é implementado, garantindo que as medidas propostas sejam aplicadas. Durante essa execução, é fundamental monitorar e registrar dados para avaliar a eficácia das ações adotadas.
- 3ª Etapa – Verificar (Check): Com os dados coletados, esta fase consiste em analisar os resultados obtidos, comparando-os com os objetivos estabelecidos na etapa de planejamento. Esse processo permite identificar possíveis desvios e oportunidades de melhoria.
- 4ª Etapa – Agir (Act): A última fase do ciclo depende da avaliação realizada anteriormente. Se os resultados forem satisfatórios, é necessário padronizar as práticas eficazes, documentando-as e incorporando-as ao processo. Caso a meta não tenha sido atingida, é preciso revisar as etapas anteriores e implementar ajustes, reiniciando o ciclo para garantir a melhoria contínua.

Figura 3.4– Ciclo PDCA.



Fonte: DOMÍNIO PÚBLICO.

De acordo com Marshall (2011), o ciclo PDCA é um método de gestão voltado para a melhoria contínua, estruturado em quatro etapas que representam a essência dessa filosofia. Sua

aplicação de forma cíclica e ininterrupta permite aprimorar processos de maneira sistemática, promovendo a padronização e a otimização das práticas organizacionais. Sua aplicação estruturada facilita a resolução de problemas, impulsiona a inovação e fortalece a competitividade no mercado.

#### **4.5 Ferramentas da qualidade**

Conforme destacado por Paladini (2012), as ferramentas de gestão da qualidade são instrumentos estratégicos, caracterizados por sua simplicidade, que viabilizam a seleção, implementação ou avaliação de modificações no processo de produção, com base em análises objetivas e detalhadas de suas partes constituintes.

Para fortalecer a eficácia dos resultados obtidos por meio do ciclo PDCA e garantir uma tomada de decisão mais robusta e precisa, a incorporação de ferramentas específicas de qualidade se torna essencial. Exemplos de tais ferramentas incluem o *Brainstorming*, a Matriz GUT, o Diagrama de Ishikawa e o 5W2H, entre outras. Cada uma dessas ferramentas possui um propósito definido, desempenhando um papel fundamental na análise e avaliação dos processos, e sua aplicação direcionada contribui para a melhoria contínua de forma eficaz (SOUZA, 2020).

##### *4.5.1 Brainstorming*

O termo *brainstorming* foi introduzido por Osborn (1953) no contexto do marketing, referindo-se ao processo social de geração de ideias criativas para publicidade. Essa técnica se caracteriza como um método colaborativo que incentiva os participantes a expressarem ideias livremente, sem receio de críticas ou rejeições, promovendo um ambiente propício à criatividade e à inovação (TRZECIAK, *et al.*, 2018).

O *brainstorming* pode ser conduzido de duas formas: coletivamente, com a participação do grupo desde o início, ou individualmente, onde cada pessoa registra suas ideias antes da discussão em equipe. Independentemente da abordagem inicial, as sugestões são analisadas e debatidas coletivamente, tornando o processo essencialmente colaborativo (OSBORN, 1953).

Para que o *brainstorming* seja eficaz, é crucial que o grupo estabeleça um ambiente colaborativo, caracterizado pela abertura e receptividade, onde todas as ideias sejam devidamente valorizadas e tenham a oportunidade de serem refinadas. Adicionalmente, o *brainstorming* é amplamente utilizado na coleta de informações necessárias para a construção do Diagrama de Causa e Efeito, desempenhando um papel relevante na análise e resolução de problemas (FURUKITA, 2017). Assim como o *brainstorming* promove a geração de ideias, o

Diagrama de Causa e Efeito complementa essa abordagem ao estruturar e relacionar as ideias identificadas, possibilitando uma análise mais aprofundada dos problemas.

#### 4.5.2 Diagrama de Causa e Efeito

Também denominado Diagrama de Ishikawa ou Diagrama de Espinha de Peixe, essa ferramenta é utilizada para ilustrar a relação entre o efeito e as causas que impactam o resultado de um processo (MARTINS et al., 2017).

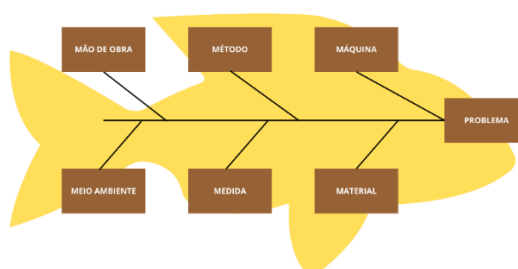
Após a troca de conhecimentos, como no caso do *brainstorming*, utiliza-se a metodologia de causa e efeito para identificar as causas raízes, ou seja, as principais responsáveis pelo problema (CAMPOS, 2004). No diagrama de espinha de peixe a “cabeça” é a representação do problema, e o dorso são as causas.

Na análise de causa e efeito, as influências sobre um problema ou efeito identificado são classificadas em categorias conhecidas como 6M na manufatura. Esses fatores, que representam diferentes elementos do processo produtivo, são organizados em famílias de causas, abrangendo matérias-primas, máquinas, medidas, meio ambiente, mão de obra e método. Essa segmentação possibilita uma abordagem estruturada para identificar e solucionar problemas de forma mais eficaz (CAMPOS, 2014).

O primeiro é a mão de obra, que envolve as pessoas e suas formas de trabalho. Em seguida, o material, que se refere aos insumos e matérias-primas utilizadas. O terceiro fator é a máquina, relacionada aos equipamentos empregados no processo. A medida diz respeito à precisão e confiabilidade das medições, como aferições e eshidróxido de cálcioas. Já o meio ambiente considera as condições ambientais que podem impactar a produção. Por fim, o método engloba os procedimentos, rotinas e técnicas aplicadas no processo (SCARTEZINI, 2009).

A representação da estrutura do diagrama é representada na Figura 4.

Figura 4.4–Diagrama de Ishikawa.





#### 4.5.3 5 Whys

A técnica dos 5 *Whys*, ou 5 Porquês, é um método sistemático de análise de causa raiz amplamente utilizado na engenharia de produção e na gestão da qualidade para identificar e eliminar as origens fundamentais de um problema. Desenvolvida no contexto do *Toyota Production System* (TPS) por Sakichi Toyoda, essa abordagem consiste em uma sequência estruturada de questionamentos que investigam progressivamente a relação de causa e efeito subjacente a uma falha. A técnica usada até os dias de hoje tem como premissa central que, ao perguntar repetidamente “por quê?” (em até cinco vezes) é possível transcender os sintomas superficiais do problema e alcançar sua verdadeira origem, permitindo a implementação de soluções eficazes e sustentáveis (POISSON, 2018).

A simplicidade do método, aliada à sua capacidade de eliminar suposições e subjetividades, torna-o uma ferramenta poderosa para a melhoria contínua. No entanto, sua aplicação deve ser conduzida com rigor analítico, assegurando que os questionamentos sejam embasados em evidências concretas e que o processo investigativo não seja influenciado por vies cognitivo. Para problemas mais complexos e multifatoriais, o 5 *Whys* pode ser utilizado em conjunto com outras metodologias, como o Diagrama de Ishikawa e a Análise de Pareto, proporcionando uma visão mais abrangente e estruturada das variáveis envolvidas no processo produtivo.

No livro “Gemba Kaizen”, de Imai (2014) o autor apresenta um exemplo prático. No livro há um convite para imaginar um funcionário jogando serragem no chão do corredor entre as máquinas e o leitor o interroga. O exemplo foi adaptado para uma tabela que é possível ser conferido a seguir (Tabela 1).

Tabela 1– Exemplo prático aplicação dos 5 *Whys*.

Perguntas (“Porquês”)	Respostas
Por que você está jogando serragem no chão?	Porque o chão está escorregadio e inseguro.
Por que o chão está escorregadio e perigoso?	Porque está coberto de óleo.
Por que está coberto de óleo?	Porque a máquina está pingando.
Por que está pintando?	Porque o óleo está vazando do engate.
Por que está vazando?	Porque o revestimento de borracha no interior do engate está gasto.

Fonte: Adaptado IMAI (2014).

No exemplo prático (Tabela 1) é possível notar que a solução real não estaria em jogar a serragem no chão, mas sim solucionar a causa raiz, ou seja a resposta do último “porquê”. Imai (2014) afirma ainda que dependendo da complexidade dos problemas pode-se perguntar mais ou menos que cinco vezes.

## 5 METODOLOGIA

A abordagem fundamentada na metodologia *World Class Manufacturing* (WCM) destaca que a obtenção de resultados satisfatórios depende da aplicação de ferramentas adequadas ao processo produtivo, conforme argumentado por Weigert (2018). Partindo desse princípio, este estudo configura-se como uma pesquisa aplicada e um estudo de caso, voltado para a redução do consumo excessivo de hidróxido de cálcio na estação de tratamento de efluentes de uma indústria de reciclagem de chumbo.

A metodologia adotada baseia-se na adaptação do *QC Story* (método de solução de problemas), conforme descrito por Campos (2014), em alinhamento com o ciclo PDCA. O projeto caracteriza-se como uma iniciativa de melhoria contínua (*Kaizen*), com o objetivo de otimizar o processo e mitigar impactos ambientais e financeiros decorrentes do consumo excessivo do insumo.

### 5.1 Equipe *Kaizen*

Para viabilizar a implementação das melhorias, foi formada uma equipe multidisciplinar (Figura 5.5) composta por quatro membros, cuja atuação abrangeu desde o mapeamento do problema até a definição e padronização das soluções. Essa equipe foi responsável por identificar as causas raízes, propor alternativas viáveis e acompanhar a implementação das mudanças, garantindo a sustentabilidade dos ganhos obtidos.

Figura 5.5– Equipe *Kaizen*.



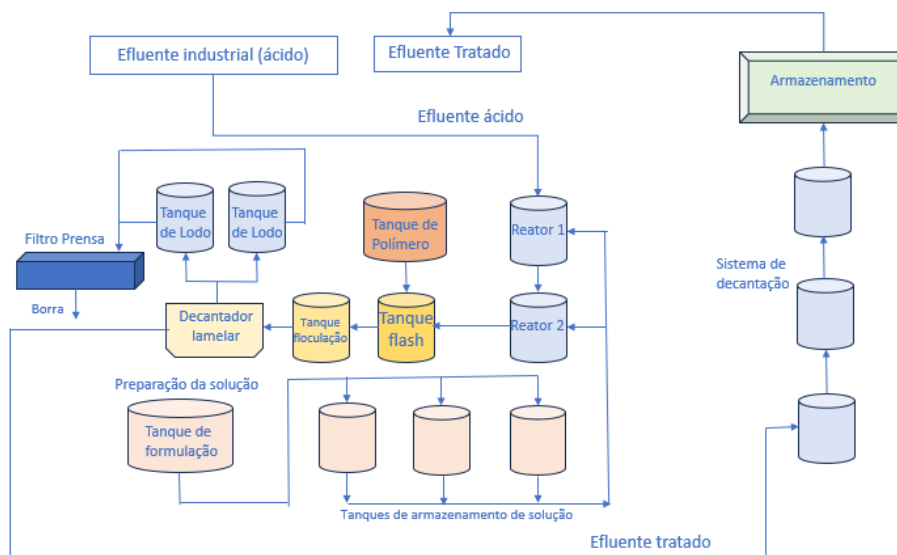
Fonte: AUTORA (2025).

## 5.2 Descrição do processo

O processo estudado é o tratamento do efluente ácido proveniente da reciclagem de chumbo em uma indústria especializada. Ele é composto por três etapas principais. Na primeira, prepara-se a solução básica de hidróxido de cálcio em um tanque de formulação. Após a preparação, a solução é armazenada em um conjunto de tanques. Nos reatores químicos 1 e 2, ocorre a reação de neutralização. No primeiro reator, o efluente de ácido sulfúrico é introduzido, e, por meio de um sistema automático (com uso de pHmetro digital), a solução básica é dosada no reator até atingir o *setpoint* de pH 3. A solução segue, por ação gravitacional, para o segundo reator, onde a dosagem continua até que o pH atinja 8.

Após a neutralização, a solução é encaminhada para o processo de remoção do lodo, composto por sulfato de cálcio, produto da reação de neutralização entre o ácido sulfúrico e o hidróxido de cálcio hidratado, conhecido como cal hidratada. Para isso, um polímero é adicionado no tanque *Flash*, e, em seguida, a solução segue para o tanque de floculação e o decantador lamelar. O concentrado do decantador é direcionado para o tanque de lodo e para o filtro prensa, onde ocorre a remoção da "borra", que são as placas amareladas de sulfato de cálcio. O clarificado resultante do tanque lamelar é então transferido para tanques de decantação, e, após rigorosa análise de conformidade, o efluente é liberado para o emissário. Esse processo é necessário para garantir a conformidade do efluente gerado no processo com norma Resolução nº 430 do CONAMA (2011). Na Figura 6.5 é mostrado o processo de forma simplificada.

Figura 6.5– Processo de Tratamento de Efluentes em uma indústria de reciclagem de chumbo.



Fonte: AUTORA (2025).

### 5.3 Metodologia *QC Story* e PDCA

A metodologia *QC Story*, amplamente utilizada no contexto da Gestão da Qualidade Total (TQC), fornece um processo estruturado e orientado à resolução de problemas (CAMPOS, 2014). Sua aplicação neste estudo seguiu as seguintes etapas e subetapas do PDCA conforme Figura 7.5.

Figura 7.5– Método de solução de problema.

PDCA	FLUXO	ETAPA	OBJETIVO
<b>P</b>	1	Identificação do problema	Definir claramente o problema e reconhecer sua importância.
	2	Observação	Investigar as características específicas do problema com uma visão ampla e sob vários pontos de vistas.
	3	Análise	Descobrir as causas fundamentais.
	4	Plano de ação	Conceber um plano para bloquear as causas fundamentais.
<b>D</b>	5	Ação	Bloquear as causas fundamentais.
<b>C</b>	6	Verificação	Verificar se o bloqueio foi efetivo.
	?	(Bloqueio foi efetivo?)	
<b>A</b>	7	Padronização	Prevenir contra o reaparecimento do problema.
	8	Conclusão	Recapitular todo o processo de solução do problema para trabalho futuro.

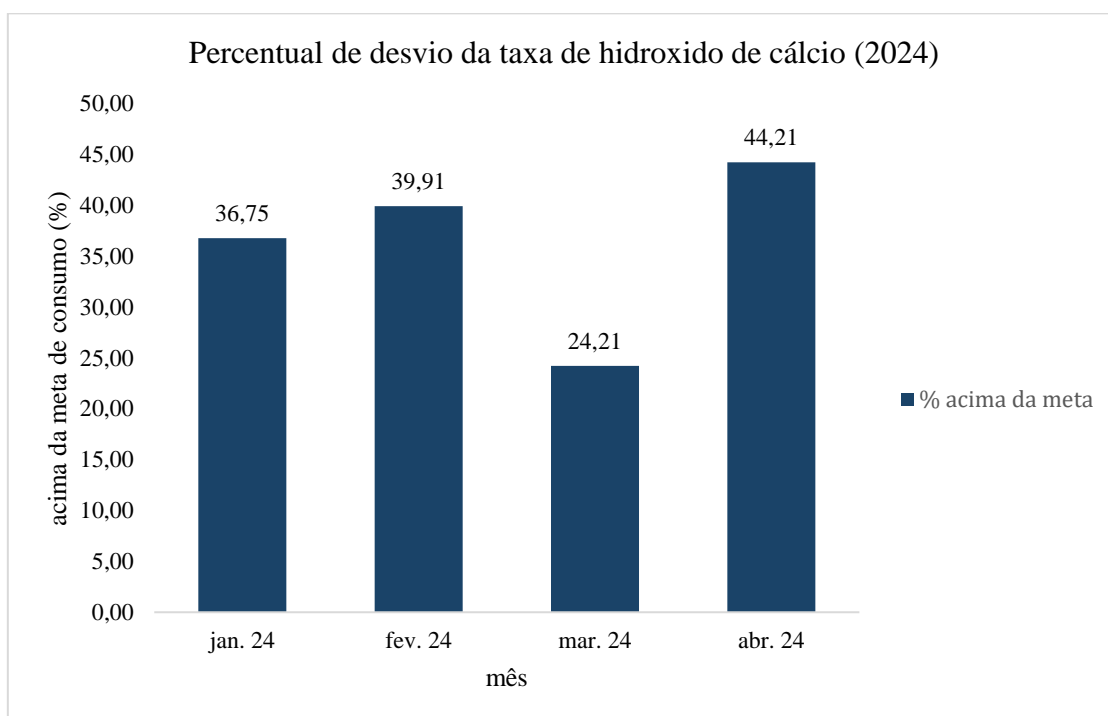
Fonte: CAMPOS (2014).

#### 5.2.1 Planejamento (*Plan*)

- a) Identificação do Problema: A taxa de hidróxido de cálcio (kg de hidróxido de cálcio por tonelada de produção do forno \* 0,58) vinha se mantendo acima da meta ao longo do primeiro quadrimestre de 2024. Esse cenário evidencia um problema crônico, indicando um consumo excessivo de hidróxido de cálcio em relação à produção do forno. Na indústria de reciclagem de chumbo, essa taxa é determinada pelo consumo de hidróxido de cálcio (kg) dividido pela produção do forno (t) \* 0,58, considerando que a estação de tratamento de efluentes neutraliza os efluentes ácidos provenientes de quatro unidades fabris da planta industrial. Dessa forma, a taxa é distribuída entre essas unidades.

O Gráfico 1 apresenta o histórico de desvio da taxa em 2024 em relação à meta, em termos percentuais, evidenciando que, no primeiro quadrimestre do ano, o consumo médio excedeu a meta estabelecida pela organização. Para que a média do primeiro quadrimestre de 2024 se enquadrasse na meta, seria necessária uma redução de 26,7% na taxa. Essa discrepância caracteriza uma perda significativa, enquadrando-se na Matriz C, que analisa os custos associados aos desperdícios no contexto do *World Class Manufacturing*. Paralelamente, a Matriz LAIA que contém o levantamento dos impactos ambientais, também se configura como um direcionador relevante, pois o consumo excessivo impacta diretamente a geração de resíduos na estação de tratamento de efluentes, o que amplia os desafios ambientais e operacionais da planta.

Gráfico 1–Histórico do indicador “Taxa de Hidróxido de cálcio” 2024.



Fonte: AUTORA(2024).

Diante desse cenário, foi definida uma meta clara, realista e alcançável, seguindo o princípio *SMART*, com o objetivo de reduzir esse excedente dentro de um mês e atingir o patamar desejado: Diminuir de 26,7% da taxa de hidróxido de cálcio em relação à média do primeiro quadrimestre de 2024, até o final de maio de 2024 (o projeto iniciou em abril). Tendo com item de controle a taxa de hidróxido de cálcio e a associação direta a matriz C o ganho para a organização será contabilizado como financeiro, sendo assim

para hidróxido de cálcio o ganho anual previsto foi feito o cálculo utilizando a seguinte equação (3):

$$Ganho (R\$) = (Ti - Tf) \left( \frac{Kg}{t} \right) \times Pf(t) \times pc \left( \frac{R\$}{Kg} \right) \quad (3)$$

Onde:

Ti= Taxa inicial do primeiro quadrimestre de 2024;

Tf= Taxa final pós projeto;

Pf= Produção anual do forno(projeção);

pc= Preço do hidróxido de cálcio.

O que gera um valor de ganho estimado de 300 a 400 mil reais por ano.

- b) Observação do problema: Nesta etapa, será feita uma análise detalhada do problema detectado e suas características, por meio de fatos e dados coletados. Para isso, utilizou-se a metodologia 5G (*Gemba*, *Gembutsu*, *Genjitsu*, *Genri* e *Gensoku*), que permite uma abordagem estruturada e eficaz para compreender as causas raiz do problema. A metodologia 5G enfatiza a importância de observar o processo diretamente no hidróxido de cálcio (*Gemba*), analisar os princípios fundamentais que regem o sistema (*Gembutsu*), considerar a situação real com base em dados concretos (*Genjitsu*), comparar com a teoria (*Genri*) e buscar verificar o cumprimento de padrões (*Gensoku*). Com essas ferramentas, será possível mapear os pontos críticos, identificar as variáveis envolvidas e planejar as ações corretivas mais apropriadas para resolver o problema (ROSSETTI, 2020). Para o *Gensoku* utilizou-se como referência de investigação o seguinte quadro de perguntas (Quadro 1):

Quadro1–Padrão de perguntas do *Gensoku*.

Perguntas	Sim	Não
Há padrão disponível?		
Está sendo seguido?		
Pode ser melhorado?		

Fonte: AUTORA (2025).

- c) Investigação e Análise: A investigação e análise do problema foram conduzidas por meio da aplicação de ferramentas da qualidade, direcionando identificar e compreender as causas fundamentais que impactam o processo em questão. Inicialmente foi feito um

brainstorming e as ferramentas escolhidas para essa etapa foi o Diagrama de Ishikawa e a Técnica dos 5 Porquês, que permitiram uma análise estrutural e profunda das variações envolvidas, com o objetivo de identificar as origens do problema e suas inter-relações. No *brainstorming* foi utilizado como base no Quadro 2.

Quadro 2 – Quadro base para o *brainstorming*.

Nº	Causas que podem influenciar no problema	Confirma (Sim/Não)	Tratamento (CB/ QK/ CE)

Legenda: CB: Condição básica; QK : Quick Kaizen; CE: Causa e efeito.

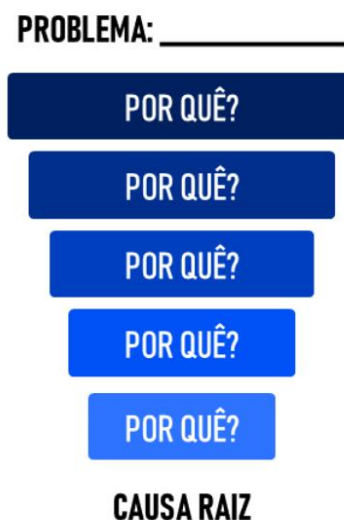
Fonte: AUTORA (2025).

A partir das hipóteses geradas no *brainstorming*, utilizou-se o Diagrama de Ishikawa para organizar e estruturar as possíveis causas do problema. Esse diagrama, também conhecido como diagrama de espinha de peixe, é uma ferramenta visual utilizada para análise de causa e efeito, permitindo identificar, categorizar e estruturar os fatores que podem estar contribuindo para a ocorrência de um problema (IMAI, 2012). Seu formato lembra o esqueleto de um peixe, onde a "cabeça" representa o efeito (ou problema) analisado, e os "ossos" principais simbolizam as categorias de causas que podem influenciar essa questão.

O diagrama foi elaborado em um encontro com a equipe, onde as causas foram classificadas em seis grandes áreas: Máquinas, Métodos, Mão de obra, Materiais, Medidas e Meio Ambiente. Cada uma dessas categorias funciona como um agrupamento lógico para as possíveis origens do problema, facilitando a identificação das relações de causa e efeito, conforme já explicado no item 4.5.2 do presente trabalho.

Com as causas identificadas, a Técnica dos 5 Porquês foi aplicada para aprofundar a investigação e identificar a causa raiz dos problemas mapeados. Cada um dos problemas identificados no Diagrama de Ishikawa foi analisado por meio de uma série de questionamentos, buscando entender por que a falha ocorreu e, a cada resposta, formulando um novo "Por quê?" até que se chegue à causa fundamental (Figura 8.5).

Figura 8.5– Ilustração da utilização da ferramenta 5 Porquês



Fonte: FERRAMENTAS DA QUALIDADE (2019).

- d) **Elaboração do Plano de Ação:** Com base na análise das causas, foi elaborado um plano de ação para mitigar os fatores que contribuem para o consumo excessivo de hidróxido de cálcio. A Tabela 2 apresenta um exemplo ilustrativo da estrutura utilizada na construção desse plano.

Tabela 2 –Exemplo de um plano de ação

Causa Raiz	Ação	Responsável	Prazo	Custo	Status
Bomba danificada	Adquirir uma nova bomba	João	25/03/2025	5.000,00 reais	ok
Operadores sem treinamentos	Treinar operadores	Marta	31/03/2025	Sem custos	ok

Fonte: AUTORA (2025).

### 5.2.2 Execução (*Do*)

- a) **Testes Laboratoriais:** A análise foi realizada em laboratório por meio de um teste em triplicata para determinar a quantidade necessária de hidróxido de cálcio na neutralização do efluente ácido enviado pela unidade D em comparação com o efluente mixado das outras unidades cujo valor já era conhecido. Inicialmente, foi preparada uma solução básica de hidróxido de cálcio com concentração de 0,5 g/mL. Para isso, 100 g de hidróxido de cálcio foram pesados em uma balança semi-analítica e, em seguida,



misturados com 200 mL de água em um béquer. A homogeneização foi realizada manualmente com um bastão de vidro por aproximadamente cinco minutos (Figura 9.5).

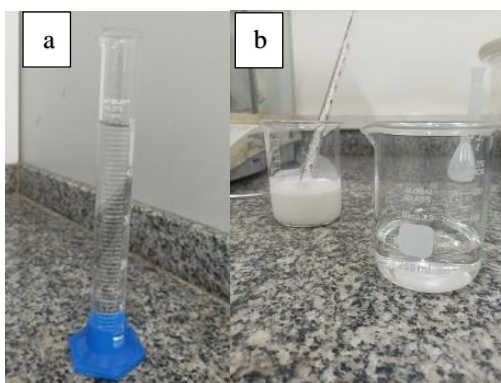
Figura 9.5– Solução de hidróxido de cálcio.



Fonte: AUTORA (2025).

Posteriormente, 50 mL de efluente ácido foram medidos em uma proveta graduada (Figura 10.5a) e transferidos para um béquer de 250 mL. A solução básica preparada foi então adicionada gradualmente (Figura 10.5b) utilizando uma proveta e uma pipeta graduada. A cada adição, a mistura foi homogeneizada com o bastão de vidro, e o pH foi monitorado por meio de fitas indicadoras.

Figura 10.5– Sistema da reação de neutralização em laboratório.



Legenda: 10.5a) proveta contendo ácido; 10.5b) Solução ácida e solução básica preparadas.

Fonte: AUTORA (2025).

Por fim foi anotado os volumes utilizados até a neutralização e através da fórmula (4):

$$C = \frac{m}{v} \quad (4)$$

Onde: C= Concentração(g/mL);

m= massa (g);

v= volume(mL).

Foi encontrada a massa de hidróxido de cálcio utilizada para neutralizar  $1\text{m}^3$  de solução ácida proveniente do processo da unidade D.

- b) Reavaliação do Rateio do Consumo: Foi realizado um balanço do efluente enviado pelas unidades envolvidas para redistribuir adequadamente o consumo de hidróxido de cálcio. Para isso, diversos fatores foram analisados, incluindo a densidade do efluente, a vazão de descarte de cada unidade e as medições registradas pelos hidrômetros.
- c) Limpeza Tanque de Formulação: Para evitar o acúmulo de sedimentos e garantir a homogeneidade da solução, implementou-se uma rotina de limpeza periódica do tanque de formulação. Seguindo os protocolos de segurança, um operador treinado conforme a NR 33 para trabalho em espaço confinado realizou a remoção das incrustações de forma controlada, utilizando uma picareta para quebrá-las gradualmente e depositando os resíduos em sacos que foram içados para fora do tanque (Figura 11.5). Ao final, a estrutura foi lavada com água pressurizada para eliminar quaisquer resíduos remanescentes. O peso do hidróxido de cálcio restante foi aferido por meio do sistema de células de carga do tanque.

Figura 11.5– Tanque de formulação (interior pré-limpeza).



Fonte: AUTORA (2025).

### 5.2.3 Verificação (*Check*)

- a) Análise dos Indicadores de Desempenho: A avaliação dos indicadores de desempenho foi realizada por meio da comparação dos dados operacionais antes e depois das intervenções. O indicador chave analisado foi a taxa de hidróxido de cálcio (Kg/t), podendo ser construído um gráfico de antes de depois da intervenção bem como também fazer o cálculo da

variação(v) em (%) conforme equação (5). O benefício sobre o custo foi estimado conforme a equação (6), permitindo quantificar o retorno econômico obtido com a implementação das ações.

$$v(\%) = \frac{\text{Taxa antes} - \text{Taxa depois}}{\text{Taxa antes}} \times 100 \quad (5)$$

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Retorno financeiro}}{\text{Quanto foi investido para ações}} \quad (6)$$

b) Verificação da Efetividade das Ações: A última etapa da verificação consistiu em avaliar se as ações implementadas conseguiram eliminar ou reduzir significativamente as causas fundamentais do problema. Para isso, foi utilizada uma matriz de verificação conforme a Tabela 3. Para cada ação executada foi dado um critério de medição. A avaliação da efetividade das ações foi realizada com base em uma escala qualitativa de cinco níveis. A nota 5 (muito alta) foi atribuída às ações que tiveram impacto direto, mensurável e sustentado na redução da taxa de hidróxido de cálcio, com resultados imediatos e consistentes ao longo do tempo. A nota 4 (alta) correspondeu a intervenções com contribuição significativa e perceptível no curto prazo, ainda que com algum grau de dependência de fatores operacionais. Já a nota 3 (moderada) foi dada às ações cujo efeito foi indireto ou complementar, com impacto positivo, porém diluído no tempo ou dependente de outras variáveis. A nota 2 (baixa) indicou que a ação teve pouco ou nenhum impacto relevante sobre o indicador analisado, ainda que tenha sido implementada corretamente. Por fim, a nota 1 (sem efetividade) foi reservada a ações que, mesmo executadas, não apresentaram evidências de contribuição para a melhoria do consumo específico de hidróxido de cálcio, podendo inclusive ter resultado em desvio ou ineficiência adicional.

Tabela 3– Matriz de verificação da Efetividade das ações(modelo).

Causa	Ação	Efetivida	Critério de
Raiz		de	medição

Fonte: AUTORA (2025).

#### 5.2.4 Ação e Padronização (*Act*)

Para garantir a sustentabilidade das melhorias implementadas e a padronização dos processos, foram adotadas as seguintes ações:

- a) **Elaboração de Procedimento Operacional Padrão (POP):** Foi desenvolvido um POP para documentar todas as diretrizes e melhores práticas no uso do hidróxido de cálcio no processo de neutralização de efluentes. O documento inclui objetivo, abrangência, responsabilidades, materiais necessários, sequência operacional detalhada, critérios de controle e segurança, além de registros e monitoramento (CAMPOS, 2014).
- b) **Implementação de Rotinas Operacionais Estruturadas:** Estabeleceu-se uma periodicidade fixa para a limpeza do tanque de formulação, assegurando a manutenção das condições ideais do processo e prevenindo acúmulos que impactem a eficiência da neutralização.
- c) **Validação do Novo Rateio de Consumo:** O modelo revisado de rateio do consumo de hidróxido de cálcio foi submetido à controladoria da empresa para validação, garantindo sua conformidade com os princípios de transparência e otimização de custos, além de viabilizar sua implementação oficial nos registros operacionais.

#### 5.4 Considerações Metodológicas

A adoção estruturada do *QC Story* e do ciclo PDCA garantiu uma abordagem sistemática e baseada em dados para a solução do problema. O método permitiu identificar com precisão as causas do consumo excessivo de hidróxido de cálcio e implementar ações eficazes para sua redução.

Dessa forma, a pesquisa contribui para a melhoria dos processos industriais, reforçando a importância de metodologias científicas na busca por eficiência operacional e sustentabilidade.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Observação do sistema

A aplicação da ferramenta 5G permitiu uma análise detalhada do sistema, possibilitando uma melhor descrição do fluxo operacional.

#### 6.1.1 *Gemba* (o lugar onde as coisas acontecem)

No *Gemba*, ou seja, onde as coisas acontecem, foi observada a área de preparação da solução de hidróxido de cálcio, onde o processo seguia uma sequência bem definida (Figura 12.6). Inicialmente, os bags de hidróxido de cálcio eram armazenados sobre paletes, evitando contato direto com o chão. Em seguida, o material era transportado e depositado no silo de hidróxido de cálcio, garantindo o abastecimento contínuo do sistema. No tanque de formulação, ocorria a mistura do hidróxido de cálcio com água, resultando na solução necessária para o processo. Finalmente, essa solução era dosada automaticamente nos reatores químicos por meio de um sistema automatizado de alimentação, assegurando precisão e eficiência na aplicação.

Figura 12.6– Sistema da reação de preparação de solução de hidróxido de cálcio.



Legenda: 12a) Bags de Hidróxido de cálcio; 12b) Silo de hidróxido de cálcio; 12c) tanque de formulação; 12d) dosagem de solução alhidróxido de cálcioina.

Fonte: AUTORA (2025).

#### 6.1.2 *Gembutsu*

No segundo “G”, o *Gembutsu*, foi realizada uma análise detalhada do processo de preparação da formulação de hidróxido de cálcio e do sistema de dosagem. Ambos os sistemas

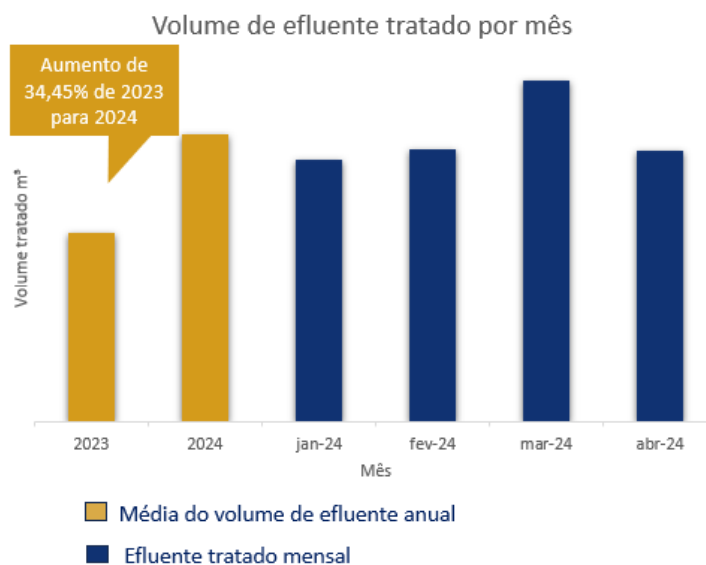
operam de forma automatizada, sendo que o principal parâmetro de controle na formulação é a massa. A composição da batelada consiste em 96% de água e 4% de hidróxido de cálcio, com a massa total sendo monitorada por células de carga instaladas no tanque de preparação.

Após a formulação, a solução de hidróxido de cálcio é dosada em dois reatores, cada um equipado com pHmetros submersos na solução. Dessa forma, o pH atua como a variável de entrada do sistema, enquanto a variável manipulada é a adição da solução de hidróxido de cálcio (vazão). O processo de controle ocorre em duas etapas: no primeiro reator, a adição de hidróxido de cálcio é realizada até que o pH atinja o valor de 3; em seguida, no segundo reator, a solução continua a ser ajustada até que o pH alcance o valor de 8.

### 6.1.3 *Genjitsu*

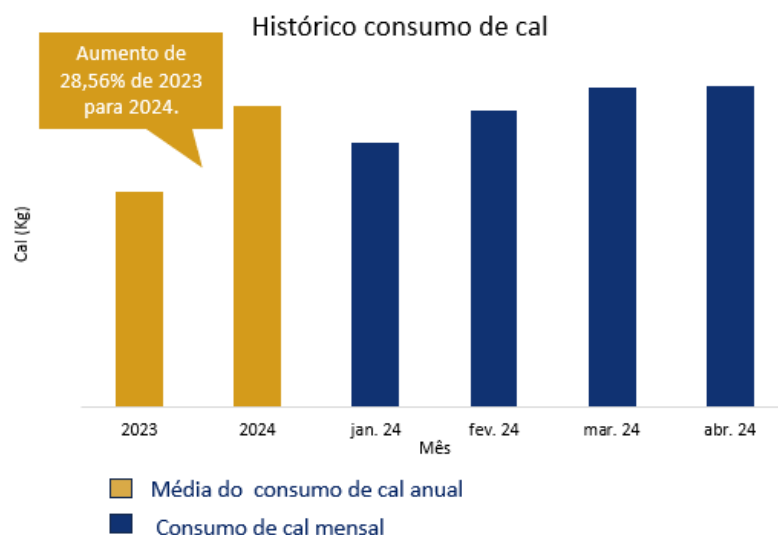
Ao verificar os fatos e dados conforme o princípio do *Genjitsu*, observou-se um aumento de 34,45% no volume de efluente tratado e um incremento de 28,56% no consumo de hidróxido de cálcio entre os anos de 2023 e 2024 (Figura 13.6 e Figura 14.6). No entanto, a produção na unidade em estudo apresentou um crescimento de apenas 6,7% no mesmo período. Esses dados indicam que o aumento da carga ácida no sistema não pode ser atribuído exclusivamente à operação da unidade analisada, sugerindo fortemente que a contribuição ácida adicional tem origem em efluentes provenientes de outras unidades.

Figura 13.6– Histórico do volume de efluente tratado 2023-2024.



Fonte: AUTORA (2024).

Figura 14.6– Histórico do consumo de hidróxido de cálcio 2023-2024.



Fonte: AUTORA (2024).

O rateio da taxa de consumo de hidróxido de cálcio entre as unidades até o momento da análise seguia conforme Tabela 4. Onde “unidade B” é a unidade de reciclagem de chumbo estudada e A, C, D e E, são outras unidades do complexo industrial.

Tabela 4– Rateio da taxa de hidróxido de cálcio entre unidades.

Unidades	Rateio de hidróxido de cálcio
Unidade A	0%
Unidade B	58,13%
Unidade C	18,41%
Unidade D	5,67 %
Unidade E	17,70%
Total	100%

Fonte: AUTORA (2025).

A análise dos dados e fatos relacionados ao sistema de preparação, especificamente no que se refere ao tanque de formulação, revelou aspectos técnicos importantes. A variável utilizada para determinar a porcentagem de água a ser adicionada ao processo foi o peso, sendo este controlado por meio de células de carga instaladas no tanque (Figura 15.6). O sistema

operava de forma automática, em processo batelada: inicialmente, a água era adicionada até atingir o peso desejado; em seguida, a hidróxido de cálcio, por meio de uma rosca de transporte, era inserida na proporção de 4%, finalizando o processo de formulação antes do encaminhamento da solução para os tanques de armazenamento.

Figura 15.6– Tanque de Formulação (célula de carga)



Fonte: AUTORA (2024).

Entretanto, ao esvaziar o tanque, observou-se que a balança ainda registrava uma massa correspondente a 40,9% da água que deveria ter sido adicionada, o que indicou a presença de incrustações no interior do tanque. A inspeção visual do equipamento confirmou que esse valor residual estava relacionado às incrustações acumuladas nas superfícies do tanque.

Adicionalmente, foi identificado que a água utilizada na formulação apresentava pH ácido, o que favorecia a formação de sulfato de cálcio dentro do próprio tanque, conforme descrito na equação (2). Esse fenômeno, aliado ao hidróxido de cálcio utilizado no processo, que não se dissolvia completamente, contribuiu para a formação de depósitos adicionais, essa incrustação estava sendo lida pelo sistema como água, portanto a real concentração da solução estava sendo 6,8% de hidróxido de cálcio ao invés de 4%.

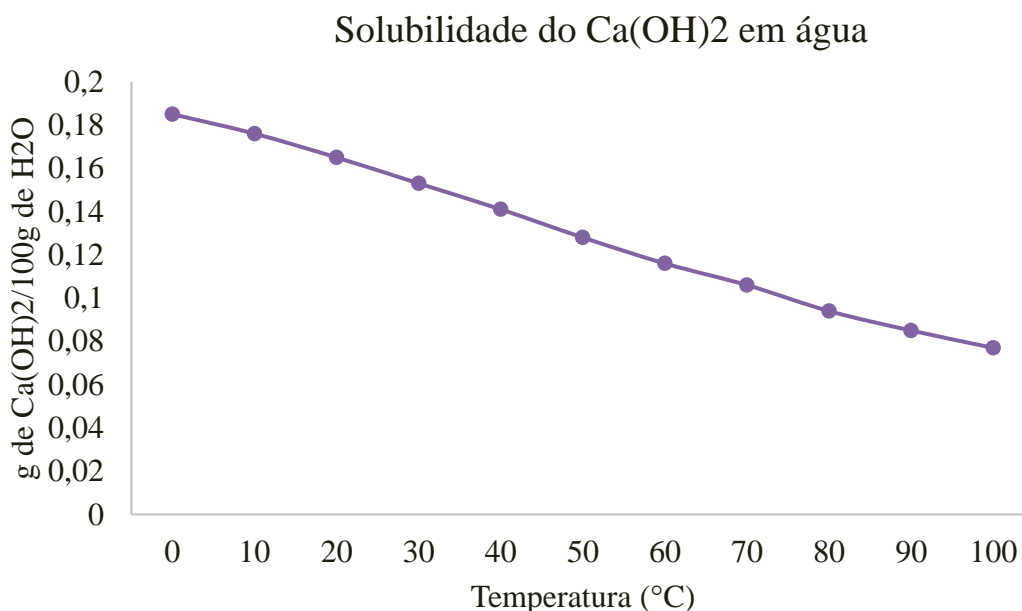
#### 6.1.4 Genri

Para compreender o funcionamento do processo de solução de hidróxido de cálcio, foi realizado um estudo teórico acerca da reação de neutralização entre o hidróxido de cálcio e o ácido sulfúrico, conforme descrito na equação (2). A reação entre o ácido sulfúrico e o hidróxido de cálcio resulta na formação de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) e água.



Além disso, foi analisada a solubilidade do hidróxido de cálcio em água, um fator crucial para a compreensão do comportamento do sistema de preparação. A curva de solubilidade (Gráfico 2) foi utilizada para observar as variações na quantidade de hidróxido de cálcio que pode ser dissolvida em função da temperatura. Este dado é relevante, pois a solubilidade limitada do hidróxido de cálcio em água pode influenciar a eficiência da reação de neutralização e a formação de incrustações dentro do tanque, conforme discutido anteriormente.

Gráfico 2– Curva de solubilidade do hidróxido de cálcio em água.



Fonte: AUTORA (2025).

No gráfico é possível identificar a baixa solubilidade do hidróxido de cálcio em água. Para uma temperatura de 20°C 0,17 g de sulfato são solúveis para cada 100g de água, logo a solução utilizada na ETE estava acima do seu ponto de solubilidade, ou seja, uma solução supersaturada.

#### 6.1.5 *Gensoku*

A análise de conformidade foi realizada por meio do preenchimento do Quadro 3. Constatou-se que, embora o procedimento de preparação da formulação estivesse sendo seguido corretamente, havia oportunidades para melhorias no processo, com o objetivo de aumentar a eficiência e reduzir problemas como incrustações no tanque e limitações na solubilidade do hidróxido de cálcio.

Quadro 3–Resposta da etapa do *Gensoku*.

Perguntas	Sim	Não
Há padrão disponível?	x	
Está sendo seguido?	x	
Pode ser melhorado?	x	

Fonte: AUTORA (2025).

## 6.2 Análise

### 6.2.1 *Brainstorming*

O *brainstorming* realizado com a equipe gerou levantamentos que apontaram áreas de melhoria e aspectos de condição básica que necessitam de ajustes pela gestão. As hipóteses identificadas durante as discussões iniciais estão apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 –*Brainstorming*.

Nº	Causas que podem influenciar no problema	Confirma (Sim/Não)	Tratamento (CB/ QK/ CE)
1	Tanque de formulação com incrustação	sim	CB
2	Tubulação com incrustações	não	
3	Retardo no fechamento da válvula de dosagem	sim	CE
4	Solução de hidróxido de cálcio supersaturada	sim	CE
5	Utilização de água ácida na formulação	sim	CB
6	Recebimento de solução com maior concentração de ácido da unidade D	sim	CB
7	Consumo de hidróxido de cálcio excessivo	sim	CB

Legenda: CB: Condição básica; QK : Quick Kaizen; CE: Causa e efeito.

Fonte: AUTORA (2025).

A análise realizada no *brainstorming* identificou diversas causas do problema, sendo que duas delas apresentaram oportunidades para melhoria por meio do Kaizen: o uso de hidróxido de cálcio supersaturada e o retardo no fechamento da válvula. A primeira foi abordada com ajustes no processo de preparação da solução, enquanto a segunda demandou um estudo para selecionar uma válvula mais eficiente.

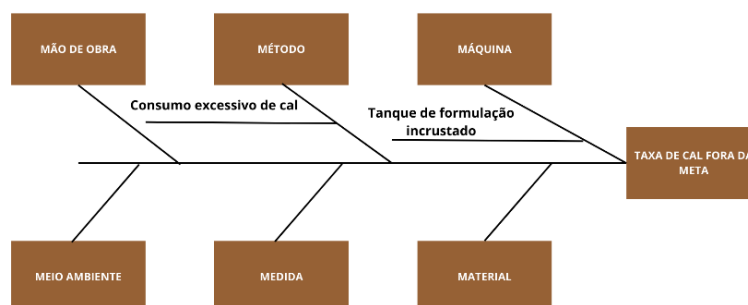
Dada a priorização, optou-se por focar na causa número 4, implementando um projeto *Kaizen* para otimizar o processo de controle da solução de hidróxido de cálcio. Já a causa

número 3, relacionada à válvula, originou um projeto paralelo conduzido pelo setor de mecânica, que visa substituir a válvula por uma mais adequada, reduzindo o retardo no fechamento.

### 6.2.2 Diagrama de Ishikawa

Após a realização do brainstorming, procedeu-se com o preenchimento do Diagrama de Causa e Efeito, conforme a metodologia proposta por Campos (2014), para proporcionar uma visão estruturada das possíveis causas que influenciam o problema identificado (Figura 16.6). Este diagrama permitiu organizar e categorizar as diversas variáveis envolvidas, facilitando a identificação das causas mais críticas e suas inter-relações.

Figura 16.6–Diagrama de Causa e Efeito.



Fonte: AUTORA (2025).

### 6.2.3. Análise dos 5 Porquês

Para identificar a causa fundamental do problema, foram consideradas duas possíveis causas principais: o tanque de formulação incrustado e o consumo excessivo de hidróxido de cálcio. A ferramenta utilizada, conforme descrito por Imai (2014), funcionou como um guia para realizar uma análise aprofundada e descobrir a causa raiz, aplicando o método de questionamento contínuo do "porquê". Esse processo permitiu uma investigação detalhada, até que se chegou à causa fundamental, como ilustrado na Tabela 1 do presente trabalho.

O resultado da aplicação dessa ferramenta pode ser visualizado no Quadro 5, onde as causas principais e suas inter-relações foram claramente identificadas, proporcionando uma base sólida para a implementação de soluções eficazes.

Quadro 5 – 5 Whys.

Causa	1° porque	2° porque	3° porque	4° porque	5° porque
Tanque de formulação incrustado	Solução de hidróxido de cálcio supersaturada	Utilização de hidróxido de cálcio acima do ponto de solubilidade	Procedimento de formulação determina 4% de hidróxido de cálcio na solução		
Tanque de formulação incrustado	Em 2023 e 2024 não há registros de limpeza	Produção não tinha conhecimento da necessidade de limpeza	Não há periodicidade de limpeza no tanque	Falta de procedimento de periodicidade de limpeza	
Tanque de formulação incrustado	Presença de sulfato de cálcio	Hidróxido de cálcio está reagindo com solução e formando o sal	Uso de efluente com pH ácido para fazer solução		
Consumo de hidróxido de cálcio excessivo	Houve um aumento o volume de efluente tratado	Devido a um aumento de produção em algumas unidades o que impactou o consumo do hidróxido de cálcio	Taxa de hidróxido de cálcio é distribuída sem considerar o volume real de efluente gerado atual	Os critérios de rateio não estão alinhados com a atual realidade operacional	O rateio está desatualizado

Fonte: AUTORA (2025).

### 6.3 Plano de Ação

Com base na análise realizada por meio da técnica dos "5 Porquês", foi elaborado um plano de ação (Tabela 5) para abordar as causas fundamentais identificadas. A partir da causa raiz, foram desmembradas as causas elementares em cada uma das etapas do "5 Porquês", e as ações corretivas foram distribuídas entre os membros do grupo, adaptando a metodologia às necessidades do nosso processo específico.

Adicionalmente, foi incluída uma ação contramedida importante: a limpeza do tanque de formulação. Essa medida visa eliminar a incrustação existente, permitindo a partir desse

ponto uma análise mais precisa sobre o comportamento do acúmulo ao longo do tempo. Com a realização dessa limpeza, será possível monitorar a reincidência da incrustação e ajustar o processo conforme necessário, garantindo uma solução mais eficaz e de longo prazo.

Tabela 5 –Plano de ação

Causa Raiz	Ação	Responsável	Prazo	Custo	Status
Procedimento de formulação determina 4% de hidróxido de cálcio na solução	Alterar procedimento para concentração de 3% de hidróxido de cálcio	Alynne	01/05/2024	Sem custos	ok
Falta de procedimento de periodicidade de limpeza	Fazer documento de periodicidade de limpeza	Supervisor/ Alynne	30/05/2024	Sem custos	ok
Uso de efluente com pH ácido para fazer solução	Ajustar bomba para captar efluente neutralizado do reservatório	Mantenedor	01/05/2024	Sem custos	ok
Rateio desatualizado	Atualizar rateio	Alynne e toda equipe	30/05/2024	Sem custos	ok
Tanque de formulação incrustado	Fazer limpeza de toda incrustação	Operadores	15/04/2024	Sem custos	ok

Fonte: AUTORA (2025).

## 6.4 Ações bloqueadoras de causas fundamentais

As ações para conter as causas raízes identificadas no item 6.2.3, e descritas no item 6.3, foram conduzidas por seus responsáveis. No entanto, a execução contou com o engajamento de toda a equipe.

### 6.4.1 Alteração do parâmetro de processo para concentração de 3% de hidróxido de cálcio

Foi proposta a modificação do parâmetro de processo na etapa de formulação, com a redução da concentração de hidróxido de cálcio de 4% para 3%. A motivação principal para essa alteração foi a de manter a solução preparada próxima ao limite de solubilidade, mitigando, assim, o risco de formação de soluções supersaturadas e o consequente acúmulo de material precipitado no tanque de formulação.

Antes de sua implementação definitiva, a nova concentração foi submetida a testes em escala industrial, com o objetivo de verificar sua efetividade no processo de neutralização do efluente. Os dados obtidos demonstraram que, mesmo com a redução do hidróxido de cálcio, o pH final do efluente permaneceu dentro dos limites exigidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011, que estabelece faixa entre 5 e 9 para o lançamento em corpos receptores (Figura 17.6). Esses resultados confirmaram que a alteração do parâmetro não comprometeu a eficiência do tratamento, validando tecnicamente a mudança proposta.

Figura 17.6 –pH do efluente tratado



Fonte: AUTORA (2025).

Com isso foi possível alterar o Procedimento padrão operacional “Preparação de solução de hidróxido de cálcio” que passou a determinar os 3% de hidróxido de cálcio na solução.

#### 6.4.2 Estudo para definição da periodicidade de limpeza preventiva

Diante das recorrentes ocorrências de incrustações no tanque de formulação, foi conduzido um estudo técnico com o objetivo de estabelecer uma periodicidade adequada para a realização de limpezas preventivas, não apenas neste tanque, mas também em outros equipamentos críticos envolvidos no processo.

A partir da análise dos impactos operacionais associados ao acúmulo de resíduos — incluindo perda de eficiência na formulação, risco de contaminações cruzadas e desvios nos parâmetros de qualidade — foi proposta uma frequência mensal de limpeza preventiva para o tanque de formulação. Essa proposta foi discutida e validada conjuntamente pelas equipes de Produção e Engenharia de Processos, levando em consideração tanto a viabilidade operacional quanto os ganhos em estabilidade do sistema.

#### 6.4.3 Ajustar bomba para captar efluente neutralizado do reservatório

O ajuste da bomba foi realizado com o objetivo de redirecionar a captação para um novo reservatório contendo efluente neutralizado. O técnico responsável desenergizou o sistema e, após a desconexão do cabo da bomba em operação, fez a ligação na bomba que passaria a operar no novo ponto de captação. Foi verificado o sentido de rotação da bomba e a funcionalidade do sistema, garantindo a operação adequada. Essa intervenção permitiu otimizar a infraestrutura existente, sem a necessidade de novos pontos de alimentação elétrica, e atendeu às demandas do processo de forma eficiente.

#### 6.4.4 Atualização do rateio

Como uma das causas raízes identificadas foi o rateio desatualizado do consumo de hidróxido de cálcio, foi necessário revisar os critérios de distribuição do insumo entre as unidades operacionais. O novo rateio foi baseado em dois pilares principais:

**Balanco hídrico das unidades:** Foi realizado um levantamento detalhado da geração de efluente em cada unidade produtiva. A partir desses dados, foi possível estabelecer a proporcionalidade real do consumo de hidróxido de cálcio com base no volume efetivo de efluente gerado por unidade, tornando a alocação mais justa e representativa da realidade operacional.

**Teste laboratorial (hidróxido de cálcio para efluente normal e hidróxido de cálcio para efluente concentrado):** O teste laboratorial foi conduzido a fim de investigar o efluente concentrado vindo da unidade D (conforme levantado na causa número 6 do *Brainstorming*), para determinar a quantidade ideal de hidróxido de cálcio necessária para neutralizar esse efluente em comparação com o padrão das outras unidades. Esse teste forneceu dados mais precisos para ajustes finos no novo rateio, permitindo considerar não apenas o volume, mas também a massa utilizada de hidróxido de cálcio utilizada para neutralização.

Tabela 6 –Resultado neutralização de amostra de efluente Unidade D.

Teste	Volume gasto de solução básica (mL)	Massa de hidróxido de cálcio (g)
1	43	21,5
2	43,5	21,75
3	43,5	21,75
Média	43,3	21,3

Fonte: AUTORA (2025).

Com base nesse cálculo, identificou-se que, para o tratamento de 1 m<sup>3</sup>, são utilizados aproximadamente 426 kg de hidróxido de cálcio. Observou-se que o efluente ácido concentrado demanda uma quantidade cerca de 5 vezes maior de hidróxido de cálcio para sua completa neutralização, quando comparado ao consumo dos efluentes das demais unidades. Esses valores foram considerados na definição de um novo rateio de custos (Tabela 7), o qual foi aprovado por todas as unidades envolvidas e devidamente certificado pela controladoria.

Tabela 7 – Rateio da taxa de hidróxido de cálcio entre unidades versão pós projeto.

Unidades	Rateio de hidróxido de cálcio
Unidade A	3,4%
Unidade B	52,1%
Unidade C	18,51%
Unidade D	9,52 %
Unidade E	16,47%
Total	100%

Fonte: AUTORA (2025)..

#### 6.4.5 Fazer limpeza de toda incrustação

Foi realizada a remoção integral das incrustações acumuladas no tanque de formulação por operadores da própria Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). A ação teve



como objetivo restaurar as condições ideais de operação do sistema de pesagem, comprometido pela presença de resíduos aderidos às paredes internas do tanque.

A Figura 18.6 ilustra o estado do equipamento antes e após a intervenção, evidenciando a efetividade do procedimento de limpeza. Com a remoção total dos depósitos, foi possível eliminar as distorções na leitura da célula de carga, que permanecia indicando massa residual mesmo com o tanque vazio. Essa correção permitiu o restabelecimento da acurácia nas dosagens realizadas pelo sistema automático de formulação, contribuindo diretamente para a confiabilidade do processo e para a redução de desvios operacionais

Figura 18.6–Limpeza do tanque de formulação.



Legenda: 17a) Antes da limpeza; 17b) pós limpeza.

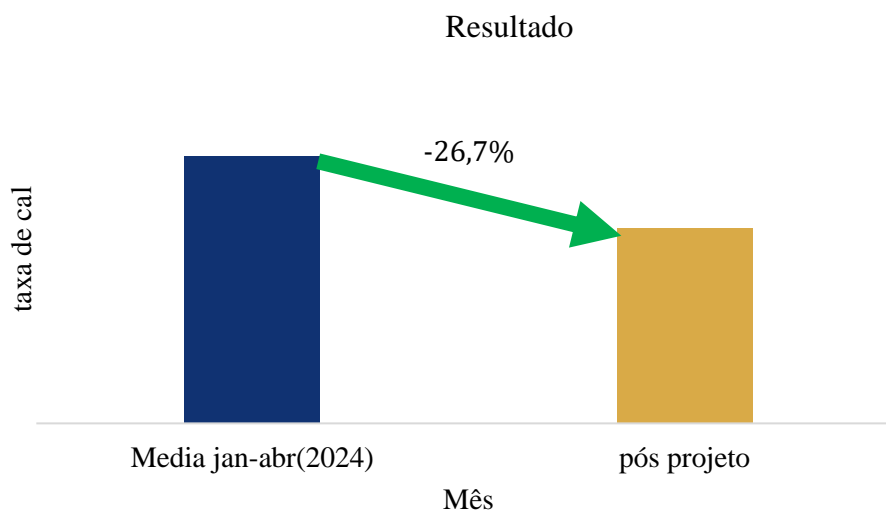
Fonte: AUTORA (2025).

## 6.5 Verificação

### 6.5.1 Redução do consumo de hidróxido de cálcio e alcance da meta

A implementação do projeto resultou em uma expressiva redução na taxa de consumo de hidróxido de cálcio (kg/t) no processo analisado. Conforme apresentado no Gráfico 3, a média registrada entre os meses de janeiro a abril de 2024 foi reduzida em aproximadamente 27% após a execução das ações de melhoria, evidenciando a efetividade das intervenções adotadas.

Gráfico 3–Resultado da taxa de hidróxido de cálcio pós projeto



Fonte: AUTORA (2025).

Essa diminuição representa uma melhora relativa de aproximadamente 26,7% em relação ao valor de referência, superando a meta estabelecida para o período pós-projeto. Tais resultados evidenciam a eficácia das estratégias adotadas, ancoradas em princípios da melhoria contínua e no uso sistemático de ferramentas de análise de causa raiz e controle estatístico de processo. Além dos ganhos operacionais, observou-se um impacto financeiro positivo, com economia estimada em R\$ 479.138,00 e um benefício sobre o custo da iniciativa equivalente a 154.

#### 6.5.2 Efetividade das ações

A seguir, apresenta-se a matriz de verificação da efetividade das ações implementadas para redução da taxa de hidróxido de cálcio. A análise foi realizada com base nos critérios previamente estabelecidos, considerando o impacto real de cada ação sobre o indicador de consumo específico. A classificação permitiu identificar quais intervenções tiveram maior contribuição para a mitigação das causas raízes e quais apresentaram efeitos complementares no processo.

Tabela 8– Matriz de verificação da Efetividade das ações(resultado).

Causa Raiz	Ação	Efetividade (%)	Critério de medição
Procedimento de formulação	Redução da concentração de	Nível 5 – Muito Alta	Redução direta e consistente da taxa

determina 4% de hidróxido de cálcio	hidróxido de cálcio para 3%		de hidróxido de cálcio (kg/t) após alteração no procedimento.
Ausência de procedimento de limpeza	Elaboração de procedimento com frequência definida	Nível 3 – Moderada	Diminuição da reincidência de incrustações, com impacto indireto no consumo.
Uso de efluente ácido na formulação	Ajuste da bomba para captação de efluente neutralizado	Nível 3 – Moderada	Estabilização do pH e menor necessidade de uma alta concentração da solução
Rateio de consumo desatualizado	Atualização do rateio com validação dos responsáveis	Nível 4 – Alta	Melhora na confiabilidade do indicador e suporte à análise crítica de consumo.
Incrustações no tanque de formulação	Limpeza corretiva e remoção de incrustações	Nível 4 – Alta	Maior acurácia e redução de perdas no preparo da solução.

Fonte: AUTORA (2025).

De modo geral, os resultados confirmam a assertividade das ações priorizadas, com destaque para a revisão dos parâmetros de formulação, a atualização do rateio de consumo e as correções operacionais relacionadas ao estado dos equipamentos. As intervenções com alta efetividade demonstraram impacto direto na redução do consumo específico de hidróxido de cálcio, refletindo em ganhos de desempenho no processo. Já as ações com efetividade moderada, embora com influência indireta, contribuíram para o reforço da padronização operacional e maior controle das variáveis envolvidas. A consolidação dessas medidas, associada ao monitoramento sistemático, tende a sustentar os resultados alcançados e mitigar a reincidência das não conformidades.

## 6.6 Padronização

Com o objetivo de garantir a sustentabilidade dos resultados alcançados, foram desenvolvidas ações voltadas à padronização das rotinas operacionais. A partir do mapeamento das causas e da implementação das melhorias, tornou-se essencial formalizar procedimentos que assegurassem a manutenção dos ganhos obtidos. Entre as iniciativas adotadas, destacam-se a elaboração de um Procedimento Operacional Padrão (POP) para a formulação da solução de hidróxido de cálcio, a criação de uma tabela de referência com a periodicidade de limpeza dos equipamentos e a certificação do novo rateio de consumo junto à controladoria, viabilizando a atualização do inventário de insumos.

Para garantir a aderência às novas práticas, foi realizado treinamento com os operadores, no qual foram apresentados e discutidos os documentos atualizados, promovendo alinhamento técnico e padronização das atividades executadas. Essas medidas reforçam o controle sobre os fatores críticos do processo e contribuem para a consolidação da melhoria contínua.

Segundo Imai (1986), os padrões devem ser obrigatórios para todos, cabendo à gestão garantir sua aplicação consistente. A ausência de verificação e cumprimento desses padrões compromete a continuidade das iniciativas de melhoria contínua (Kaizen), reduzindo drasticamente os ganhos sustentáveis ao longo do tempo.

## 6.7 Premiações

O projeto obteve destaque em dois importantes eventos internos da empresa, refletindo o reconhecimento pelo impacto e qualidade dos resultados alcançados. No Seminário de Inovação da Academia de Estagiários, representando a Academia de Engenharia, o projeto conquistou o segundo lugar, evidenciando seu potencial inovador e a contribuição para o desenvolvimento de novas soluções dentro da organização. Além disso, no Seminário Kaizen 2024, voltado para práticas de melhoria contínua, o projeto recebeu o primeiro lugar, com o prêmio sendo entregue ao setor de *World Class Manufacturing* (WCM), consolidando a relevância das iniciativas de otimização implementadas e o alinhamento com a cultura de excelência operacional da empresa.

## 7 CONCLUSÃO

A otimização do uso de hidróxido de cálcio no tratamento de efluentes industriais trouxe avanços técnicos, financeiros e ambientais. A redução de 26,7% no consumo específico atingiu a meta estabelecida, comprovando a eficácia da abordagem baseada no *Kaizen* e no modelo *World Class Manufacturing*.

A aplicação de ferramentas como análise de causa raiz, controle estatístico de processo e priorização de ações eliminou a variabilidade do consumo, garantindo resultados sustentáveis. O benefício financeiro estimado em R\$ 479.138 e a relação benefício/custo de 154 evidenciam a viabilidade e o impacto estratégico do projeto.

Durante a implementação, houve resistência da equipe operacional, principalmente relacionada à nova rotina de controle e à percepção de que a redução da quantidade de cal comprometeria a eficácia da neutralização. Para superar essa resistência, foram realizados treinamentos focados em conceitos de processo, evidências práticas e monitoramento dos resultados, o que aumentou a confiança dos operadores nas mudanças.

As ações de padronização, como a criação de Procedimentos Operacionais Padrão (POP), a tabela de limpeza de equipamentos e a certificação do novo modelo de rateio, consolidaram as melhorias e garantiram sua continuidade.

Do ponto de vista ambiental, a racionalização do insumo reduziu a geração de resíduos e impactos ambientais, refletindo na diminuição dos riscos apontados na matriz LAIA (Levantamento de Aspectos e Impactos Ambientais).

O engajamento da equipe, fortalecido pelos treinamentos e pela integração dos novos procedimentos à rotina, foi essencial para a consolidação dos resultados. O projeto exemplifica a aplicação dos princípios da engenharia de processos, com foco em eficiência, padronização e sustentabilidade.

Como continuidade, recomenda-se aprofundar a análise do ciclo de vida dos insumos e replicar a metodologia em outras linhas ou unidades, ampliando os ganhos em eficiência e sustentabilidade. O estudo oferece um modelo replicável para a gestão industrial voltada à melhoria contínua e ao uso responsável de recursos.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Alcalinizantes para o tratamento de efluentes - Especializada em tratamento de água e efluentes.** Disponível em: <<https://www.revistatae.com.br/Artigo/833/alcalinizantes-para-o-tratamento-de-efluentes>>. Acesso em: 27 de Abr. de 2025.

AQUINO, André Tavares de. **World Class Manufacturing: Uma abordagem para a excelência operacional na indústria automotiva**. 2017. 123 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <https://attena.ufpe.br/bitstream/123456789/50402/1/AQUINO%2C%20Andr%C3%A9%20Tavares%20de.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2025.

BORBA, A. A. et al. Relação entre estratégia de manufatura e competitividade no setor industrial brasileiro. **Revista de Ciências Estratégicas**, v. 29, n. 140, p. 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.69849/revistaft/cl10202411301707>. Acesso em: 22 mar. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 92, 16 maio 2011, p. 89.

BRASIL. Ministério da Educação. Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. **Ciclo PDCA**. Brasília: CAPES, 2020. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/716521/2/Ciclo%20PDCA.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2025.

CAMPOS, V. F. **TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)**. 9º ed.- Nova Lima – Editora FALCONI, 2014.

CAMPOS, V. F. **Gerenciamento da rotina do trabalho do dia a dia**. 8. ed. Nova Lima, MG: INDG, 2004.

COSTA, H. G. da; MIRANDA, R. C. de. World Class Manufacturing: origens, estrutura e aplicação no ambiente industrial brasileiro. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 28, n. 1, p. e2102, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-530X2102-15>.

CARVALHO, M. R. **Interferência de cátions Ca<sup>2+</sup> nas etapas de deslamagem e flotação de minério de ferro**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

DEMING, W. Edwards. **The New Economics for Industry, Government, Education**. Cambridge, MA: MIT Press, 1993.

DE WIT, B.; MEYER, R. **Strategy: Process, Content, Context. An International Perspective**. Minneapolis/St. Paul: West Publishing Company, 2004.

DOOLEN, T. L.; VAN AKEN, E. M.; FARRIS, J. A.; WORLEY, J. M.; HUWE, J. Kaizen events and organizational performance: a field study. **International Journal of Productivity**

**and Performance Management**, v. 57, n. 8, p. 637–658, 2008. DOI: 10.1108/17410400810916062.

FLYNN, B. B.; SCHROEDER, R. G.; FLYNN, E. J. World class manufacturing: an investigation of Hayes and Wheelwright's foundation. **Journal of Operations Management**, v. 17, n. 3, p. 249-269, 1999.

FELICE, F. D.; PETRILLO, A.; MONFREDA, S. Melhorando o desempenho das operações com técnica de fabricação de classe mundial: um caso na indústria automotiva. *In*: CHIRALDI, M. (ed.). **Gestão de operações**. London: IntechOpen, 2013.

FURUKITA, A. C. **Aplicação do ciclo PDCA para redução do desperdício de embalagens de papelão: estudo de caso em uma indústria alimentícia**. 2017. TCC (Graduação), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

HAYES, R. H.; WHEELWRIGHT, S. C. **Restoring our competitive edge: competing through manufacturing**. New York: Wiley, 1984.

IMAI, Masaaki. **Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success**. New York: McGraw-Hill, 1986.

IMAI, Masaaki. **Gemba Kaizen: A commonsense approach to a continuous improvement strategy**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

LAMBERT, D. M.; STOCK, J. R.; ELLRAM, L.M. **Fundamentals of logistics management**. New York: McGraw-Hill, 1998.

LIZARELLI, F. L.; TOLEDO, J. C. de. Práticas para a melhoria contínua do Processo de Desenvolvimento de Produtos: análise comparativa de múltiplos casos. **Gestão & Produção**, v. 23, n. 3, p. 535–555, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-530X2240-15>.

MARTINS, M. P. et al. **Aplicação das ferramentas da qualidade e do ciclo PDCA em uma empresa do setor têxtil**. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 37, 2017, Joinville. Anais [...]. Joinville: ENEGEP, 2017.

MENDES, R. DE C.; MATTOS, M. C. DE. Knowledge Management and World Class Manufacturing: an initial approach based on a literature review. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 22, n. 2, p. 244–263, abr. 2017.

MARSHALL, I. J. et al. **Gestão da qualidade**. 10. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2010.

NEGRÃO, K. R. M. et al.. Strategic Management for Sustainability. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 28, n. 6, p. e240221, 2024.

OSBORN, A. F. **Imaginação aplicada: princípios e procedimentos de resolução criativa de problemas**. New York: Charles Scribner's Sons, 1953.

PACHECO, Ana Paula Reusing; SALLES, Bertholdo Werner; GARCIA, Marcos Antônio; POSSAMAI, Osmar. **O ciclo PDCA na gestão do conhecimento: uma abordagem sistêmica**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. Disponível em: <https://issbrasil.usp.br/artigos/ana.pdf>. Acesso em: 18 de Mar 2025.

PESSOA, Juan Victor Teles. **World Class Manufacturing (WCM) – Aplicação do Pilar Logística e Planejamento (LCS) em uma siderúrgica no processo de abastecimento de uma aciaria**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2022.

POISSON, Maria Augusta Soares de Azevedo (Org.). **Gestão da Qualidade – Volume 3**. Rio de Janeiro: Poisson, [online]. Disponível em: [https://www.poisson.com.br/livros/qualidade/volume3/GQ\\_volume3.pdf](https://www.poisson.com.br/livros/qualidade/volume3/GQ_volume3.pdf). Acesso em: 22 mar. 2025.

PALADINI. **Gestão da qualidade: teoria e prática**. 3. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2012.

PENIDO, Andreza. **Análise da eficiência de processos de manufatura em empresas de pequeno porte**. 2014. 91 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: [https://www.dcta.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/21/2020/02/201422080340\\_Andreza-Penido.pdf](https://www.dcta.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/21/2020/02/201422080340_Andreza-Penido.pdf). Acesso em: 29 mar. 2025.

PEREIRA, Diene Hellmann; FERREIRA, Luiz Felipe; SOUZA, Máira Melo de; FERREIRA, Denize Demarche Minatti. Matriz de Aspectos e Impactos Ambientais como Ferramenta de Evidenciação de Contingências Ambientais. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 74–91, 2014. DOI: 10.5585/geas.v3i2.106. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/9872>. Acesso em: 29 mar. 2025.

ROSSETTI, Gabriel. Ferramenta 5G: o que é e para que serve?. Voitto, 22 jul. 2020. Disponível em: <https://voitto.com.br/blog/artigo/o-que-e-ferramenta-5g>. Acesso em: 12 abr. 2025.

ROTHER, M.; SHOOK, J. **Learning to see**. Cambridge, MA: Lean Enterprise Institute, 1999.

ROBINSON, Alan. **Modern approaches to manufacturing improvement: the Shingo system**. Routledge, 2017.

SHAHA, Bishow Nath. **Efeito do sistema eletrônico de tratamento de água na incrustação de carbonato de cálcio**. Florida Atlantic University, 2016.

ROHRICH, S. S.; TAKAHASHI, A. R. W.. Sustentabilidade ambiental em Instituições de Ensino Superior, um estudo bibliométrico sobre as publicações nacionais. **Gestão & Produção**, v. 26, n. 2, p. e2861, 2019.

SILVA, J. R.; GONÇALVES, J. A.; SOUZA, M. A. Efeito da adição de hidróxido de cálcio na precipitação de carbonato de cálcio em águas residuais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 1-6, 2010. DOI: 10.1590/S1516-14392010000100002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000100002>. Acesso em: 08 abr. 2025



SILVEIRA, F. M.; FARIAS, R. A.; LIMA, J. R.; et al. Processamento de rejeito de carvão visando a redução de custos e impactos ambientais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 337–345, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/gQG5ntZ8YrwgNdGcvSm86gv/>. Acesso em: 26 abr. 2025

SOUZA, Natália Freitas de. **Utilização da metodologia PDCA e da melhoria contínua para a redução de perdas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

SUDAM. Relatório de apoio: GEJR10089. 2010. Disponível em: [https://www.gov.br/suframa/pt-br/centrais-de-conteudo/estudos-socioeconomicos/copy\\_of\\_GEJR10089RELATORIODEAPOIO01\\_AGO2010\\_Portugus.pdf](https://www.gov.br/suframa/pt-br/centrais-de-conteudo/estudos-socioeconomicos/copy_of_GEJR10089RELATORIODEAPOIO01_AGO2010_Portugus.pdf). Acesso em: 08 abr. 2025.

SCARTEZINI, Luís Maurício Bessa. **Análise e melhoria de processos**. Goiânia, 2009.

SRIVASTAVA, S. K. Green Supply Chain Management: A state-of-the-art literature review. **International Journal of Management Reviews**, v. 9, n. 1, p. 53–80, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x>

TORTORELLA, G. L.; FOGLIATTO, F. S.; MAC CAWLEY VERGARA, A.; QUELHAS, O. L. G.; SAWHNEY, R. Influência das características dos membros da equipe na sustentabilidade de iniciativas de melhoria contínua. **Total Quality Management & Business Excellence**, p. 1–17, 2019. DOI: 10.1080/14783363.2019.1641077.

TRZECIAK, Dorzeli Salete et al. **Inovação – Uma nova cultura**. Florianópolis: Instituto Anima Sociesc de Inovação, Pesquisa e Cultura; HB Editora, 2018. 343 p. il. ISBN 978-85-85436-00-1

VILLANUEVA, Pablo Javier; SUGIYAMA, Taku; VILLANUEVA, Bárbara Magdalena; RODRIGUEZ, Hector Ivan; ARCIÉNAGA, Antonio; CHERIAN, Iype. Using Engineering Methods (Kaizen and Micromovements Science) to Improve and Provide Evidence Regarding Microsurgihidróxido de cálcio Hand Skills. **World Neurosurgery**, v. 189, p. e380-e390, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878875024010337>. Acesso em: 17 de Mar. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2024.06.075>.

XU, Qiuxiang; HUANG, Qi-Su; WEI, Wei; SUN, Jing; DAI, Xiaohu; NI, Bing-Jie. Lime treatment of wastewater: Impacts on sludge composition and management. **Water Research**, v. 182, p. 116440, 2020. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116440. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116440>. Acesso em: 08 abr. 2025

YAMASHINA, H. World class manufacturing: Métodos e instrumentos. Material interno de aplicação WCM da empresa em estudo, 2009.

ZAMBRANO VARGAS, Sandra Milena ; SEGURA VARGAS, Ángela María e GONZALEZ MILLAN, José Javier . Fabricação de classe mundial em microfabricantes da indústria de móveis artesanais de madeira em Puntalarga - Colômbia. **Pensam. gesto**. [online]. 2017, n.42, pp.162-186. ISSN 1657-6276. <https://doi.org/10.14482/pege.42.10469> .