

**CENTRO DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
ETEC TRAJANO CAMARGO
3º MTEC-PI Química**

**Caio Cesar Capelli
Guilherme Lins de Albuquerque
Thiago Galletto**

**ESTUDO DE PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO DO ZINCO
PRESENTE NO
LODO DE INDÚSTRIAS GALVÂNICAS**

**Limeira
2025**

Caio Cesar Capelli
Guilherme Lins de Albuquerque
Thiago Galletto

**ESTUDO DE PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO DO ZINCO
PRESENTE NO
LODO DE INDÚSTRIAS GALVÂNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Técnico em Química da Etec Trajano Camargo, orientado pelos Profa. Dra. Gislaine Aparecida Barana Delbianco e Prof. Dr. Sergio Delbianco Filho como requisito parcial para obtenção do título de Técnico em Química.

Limeira
2025

ESTUDO DE PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO DO ZINCO PRESENTE NO LODO DE INDÚSTRIAS GALVÂNICAS

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, apresentado à Etec Trajano Camargo – Limeira, no Sistema de Ensino Presencial Conectado, como requisito parcial para a obtenção do título de Técnico em Química, com nota final igual a _____, conferida pela Banca Examinadora formada pelos professores:

Prof. Orientador
Etec Trajano Camargo de
Limeira

Prof. Membro 2
Etec Trajano Camargo de
Limeira

Prof. Membro 3
Etec Trajano Camargo de
Limeira

Limeira, ____ de _____ de 2025

Dedicamos, sobretudo, a Deus, por nos proporcionar discernimento e sabedoria para a realização deste projeto e, aos familiares, por serem alicerce e amparo no decorrer do ciclo acadêmico. Dedicamos este trabalho também aos professores doutores Gislaine Aparecida Barana Delbianco e Sérgio Delbianco Filho.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão a todos que nos incentivaram ao longo deste caminho de conhecimento.

Agradecemos especialmente aos nossos professores orientadores, Gislaine Aparecida Barana Delbianco e Sergio Delbianco Filho, por sua orientação e apoio indispensáveis durante a elaboração deste trabalho.

Agradecemos também aos nossos familiares, pelo apoio e compreensão, e aos colegas de turma, pela colaboração e por todos esses anos de convivência.

Reconhecemos o empenho e a dedicação incansáveis de nosso grupo, que se manteve firme na busca pela excelência e pelo aprofundamento da pesquisa

"O mundo é um lugar perigoso de se viver,
não por causa daqueles que fazem o mal,
mas sim por causa daqueles que observam
e deixam o mal acontecer".

Albert Einstein

RESUMO

O zinco é um elemento essencial com vasto uso na indústria (construção civil, automotiva) e, principalmente, na galvanização de ferro e aço contra corrosão. Movimentando um mercado bilionário em expansão (estimado em R\$ 70 bilhões até 2030), seu uso enfrenta o risco de escassez em menos de 100 anos, o que torna sua recuperação e reciclagem cruciais para a sustentabilidade. Os resíduos de galvanização são classificados como perigosos, reforçando a necessidade de um manejo adequado. O estudo propôs investigar processos de recuperação do zinco a partir de lodos galvânicos (resíduos de galvanização) para prolongar seu ciclo de vida. Os experimentos laboratoriais se concentraram na recuperação do zinco dos lodos por meio da eletrólise e da pirólise. A análise dos resultados confirmou a possibilidade da recuperação do zinco metálico, com a eletrólise demonstrando eficiência superior à pirólise. Foram obtidos depósitos visíveis de zinco nos eletrodos, permitindo calcular o rendimento. Embora com limitações instrumentais, os dados validam o potencial do método para o reaproveitamento de resíduos industriais e a promoção da sustentabilidade em ambientes laboratoriais e educacionais.

Palavras-chave: Zinco. Lodo galvânico. Eletrólise. Reciclagem. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Zinc is an essential element with wide-ranging applications in industry (civil construction, automotive) and, most importantly, in the galvanization of iron and steel for corrosion protection. Mobilizing a growing billion-dollar market (estimated at R\$ 70 billion by 2030), its use faces the risk of scarcity in less than 100 years, which makes its recovery and recycling crucial for sustainability. Galvanizing waste is classified as hazardous, reinforcing the need for proper handling. The study aimed to investigate processes for zinc recovery from galvanic sludge (galvanizing waste) to extend its lifecycle. The laboratory experiments focused on recovering zinc from the sludge using electrolysis and pyrolysis. The analysis of the results confirmed the possibility of metallic zinc recovery, with electrolysis demonstrating superior efficiency compared to pyrolysis. Visible zinc deposits were obtained on the electrodes, allowing for yield calculation. Although instrumental limitations were present, the data validate the method's potential for reusing industrial waste and promoting sustainability in laboratory and educational settings.

Keywords: Zinc. Galvanic sludge. Electrolysis. Recycling. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Materiais galvanizados	18
Figura 2 – Esquema Pirólise	20
Figura 3 – Esquema de Pirólise Lenta	21
Figura 4 – Esquema Reator de Pirólise Rápida	22
Figura 5 – Esquema de Pirólise Catalítica	23
Figura 6 – Esquema para exemplificação	28
Figura 7 – Ânodo e Cátodo utilizados	31
Figura 8 – Cátodo e ânodo em fonte de corrente contínua.....	32
Figura 9 – Fonte de corrente contínua	32
Figura 10 – Soluções do processo armazenadas	33
Figura 11 – Modelo Canvas de Negócios	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de comparação dos métodos	19
Tabela 2 – Tabela Periódica dos Elementos em Extinção	24
Tabela 3 – Valores obtidos nos procedimentos	35

LISTA DE SÍMBOLOS

Cl⁻ – Íon cloreto

Cl₂ – Cloro gasoso

ClO⁻ – Íon hipoclorito

e⁻ - Elétron

H₂O – Água

H₃PO₄ – Ácido fosfórico

HClO – Ácido hipocloroso

O₂ – Oxigênio

R\$ – Real (moeda brasileira)

V – Volts

Wh – Watts/hora (Watts por hora)

Zn – Zinco

Zn²⁺ – Íon de zinco com carga +2

ZnO – Óxido de Zinco

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

EAA – Espectrometria de Absorção Atômica

EMBTEC – Embalagens Tecnológicas LTDA

ESG – Environmental, Social and Governance

EUA – Estados Unidos da América

GRI – Global Reporting Initiative (Iniciativa de Relatórios Globais)

IA – Inteligência Artificial

ICP-OES – Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente)

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

TCFD – Task Force on climate-related Financial Disclosures (Força-Tarefa sobre Divulgações Financeiras relacionadas às mudanças climáticas).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3 ASSUNTOS RELACIONADOS AO TEMA	17
3.1 Histórico do Processo de Galvanização	17
3.2 Legislação Pertinente.....	17
3.3 Processo de Galvanização.....	18
3.4 Processo de Eletrólise	19
3.5 Processo de Pirólise.....	20
3.5.1 Pirólise Lenta	20
3.5.2 Pirólise Rápida	21
3.5.3 Pirólise Térmica	22
3.5.4 Pirólise Catalítica	22
3.6 Estudos de Aplicação de Resíduos Galvânicos	23
3.7 Escassez de Materiais no Planeta	24
3.8 Técnica de Obtenção de Zincagem	25
3.9 Utilização Ética da Ferramenta IA	25
3.10 Economia Linear X Economia Circular	26
3.11 ESG	26

3.11.1 ESG no Mercado de Zinco	26
3.12 Reciclagem de Zinco Atualmente.....	27
4 METODOLOGIA.....	28
4.1 Coleta da Amostra e Preservação	28
4.2 Fluxograma	28
4.3 Processos de Tratamento e Recuperação do Zinco	29
4.3.1 Montagem do Sistema da Eletrólise.....	31
4.3.2 Filtração e Armazenamento	32
4.4 Quantificação	33
5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS	35
5.1 Modelo Canvas de Negócios	35
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	36

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

De acordo com Berardinelli (2022) muitos dos 118 elementos da tabela periódica estão ameaçados de desaparecer. Alguns podem se esgotar em menos de 100 anos. E o zinco na “tabela periódica de elementos em extinção” se encontra em cor vermelha, o que significa quem ele pode sumir em 100 anos ou menos, por isso a importância de recuperar esse elemento.

O zinco e seus compostos têm muitos usos na indústria automobilística, de construção civil e de eletrodomésticos. É usado na fabricação de ligas resistentes à corrosão e na galvanização de produtos de ferro e aço (CETESB, 2022).

Seu mercado global, especificamente no setor de galvanização, movimentou cerca de US\$ 9 bilhões em 2023, com uma previsão de atingir US\$ 14,13 bilhões até 2030. Convertendo esse valor para reais, com base no câmbio de R\$ 5,00 por dólar (aproximadamente), o mercado movimenta cerca de R\$ 45 bilhões em 2023 e pode alcançar R\$ 70,65 bilhões até 2030 (MORDORINTELLIGENCE, 2024).

A galvanização é o processo de revestimento de superfícies por meio da eletrólise onde o metal a ser revestido funciona como cátodo e o metal que irá revestir a peça funciona como o ânodo (também pode ser utilizado como ânodo algum material inerte). A solução eletrolítica deve conter um sal composto por cátions do metal que se deseja revestir a peça. O controle da espessura da camada a ser depositada pelo processo de eletrogalvanização é feito por meio de modelos matemáticos (FARIA, 2024).

A forma mais comum e que muitas vezes é usada como significado para o termo é a aplicação de zinco ou ligas de zinco na superfície de aço ou ferro. Dessa forma, é possível proteger as peças da corrosão provocada pelo contato direto com água ou oxigênio (PEDRO, 2024).

Este processo está em constante crescimento sendo impulsionado pela demanda de setores como a construção civil e a indústria automotiva, que usam o aço galvanizado para proteção contra corrosão, especialmente em regiões como a Ásia-Pacífico (BUSINESSRESEARCHINSIGHTS, 2024).

A reciclagem do zinco desempenha um papel importante na sustentabilidade ambiental e na conservação de recursos naturais. O zinco é um material altamente reciclável, o que significa que pode ser reprocessado e reutilizado várias vezes sem perder suas propriedades físicas e químicas. Desse modo, reduz a necessidade de extração de minério, conserva energia e diminui a quantidade de resíduos descartados em aterros sanitários. Além disso, a reciclagem do zinco contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, ajudando a combater as mudanças climáticas (KAIZENQUÍMICA, 2024).

A obtenção do hidrogênio verde ocorre por meio da eletrólise a partir de fontes renováveis e consiste na decomposição das moléculas de água (H_2O) em oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2) (BARROSO et.al, 2021).

O hidrogênio verde pode dar origem a novos setores econômicos, como a produção de células de combustível, tecnologias de eletrólise avançada e sistemas de armazenamento. Países com capacidade de produção de hidrogênio verde podem se tornar exportadores desse recurso, criando oportunidades de comércio internacional e geração de receitas. O uso de hidrogênio verde pode aumentar a resiliência energética, especialmente em locais que dependem muito das importações de combustíveis fósseis. Por fim, regiões com recursos renováveis abundantes, como é o caso do Brasil, podem se beneficiar economicamente ao se tornarem centros de produção de hidrogênio verde.

Algumas empresas situadas na região metropolitana de Belo Horizonte, realizaram uma análise quantitativa dos lodos galvânicos, de, por Espectrometria de Absorção Atômica - EAA (técnica baseada na propriedade de absorção da luz por átomos livres) com a utilização de lamas de diferentes processos de deposição. A escolha dos elementos a serem analisados considerou-se as exigências da norma ABNT NBR 10004, que caracteriza o resíduo como classe 1 (perigoso) (MOREIRA, 2021).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar processos de recuperação de Zn proveniente da galvanização, uma vez que este tende a acabar nos próximos anos, buscando assim minimizar o desperdício de zinco, sendo levado em consideração suas propriedades físicas e químicas de reutilização e aumentar seu ciclo vida.

2.2 Objetivos Específicos

- Buscar formas de recuperar o zinco no lodo das galvanizadas;
- Reutilizar o zinco do lodo de forma sustentável;
- Aprimorar o processo de eletrólise para o processo de recuperação;
- Entender o que é hidrogênio verde (obtenção, aplicações, etc.);
- Entender o que é ciclo de vida em indústrias;
- Estudar eletrólise;
- Entender o princípio de galvanoplastia;
- Estudar os princípios da química;
- Compreender as propriedades do zinco;
- Estudar a possibilidade da obtenção do zinco por aquecimento;
- Entender o mercado de galvanoplastia;
- Pesquisar sobre o mercado de reciclagem nas empresas;

3. ASSUNTOS RELACIONADOS AO TEMA

3.1 Histórico do Processo de Galvanização

Para impedir ou pelo menos diminuir prejuízos, existem vários métodos de proteção contra a corrosão dos metais, sendo que um dos mais eficientes é a galvanização (FOGAÇA, 2024).

Envolve adicionar uma camada de metal superior ou ligas no metal do substrato por meio de deposição eletroquímica. A peça de trabalho (cátodo) e o metal de origem do revestimento (ânodo) são imersos na solução eletrolítica e conectados por meio de uma fonte de alimentação. Conforme a corrente flui pelo circuito, os íons metálicos do ânodo se movem em direção a uma peça de trabalho carregada negativamente e formam uma camada por toda a superfície (MORGAN, 2022).

Podem ser usados diferentes metais para o revestimento de uma peça. Ao processo de revestimento por cromo, por exemplo, dá-se o nome de “cromagem” ou “cromaço”; se o revestimento for de níquel, dá-se o nome de “niquelagem” ou “niquelação”. E ainda temos o zinco, o estanho, o magnésio, o ouro, o cobre, a prata e etc.. Cada metal de revestimento pode conferir características diferentes ao material galvanizado de acordo com suas propriedades, como maior ou menor condutividade, ou ainda resistência a temperaturas extremas (FARIA, 2024).

O revestimento duro de cromo, liga de níquel e zinco pode aumentar significativamente a resistência ao desgaste, a resistência à corrosão e a durabilidade dos componentes fabricados. Por outro lado, o revestimento decorativo como ouro e prata é popular em acabamentos de joias e ornamentos (MORGAN, 2022).

3.2 Legislação Pertinente

Coleta e análise do lodo, classificando-o de acordo com a NBR 10004:2004 que é uma norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que classifica resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Ela divide os resíduos em três classes principais: Classe I - Resíduos Perigosos, Classe II - Resíduos Não Perigosos, Classe II A (Não Inertes) e Classe II B (Inertes), para determinar sua classificação como resíduo perigoso (EMBTEC, 04 de out. de 2024).

Obter as licenças ambientais necessárias conforme as Resoluções CONAMA nº 01/1986 e, que regulamentam o licenciamento de atividades potencialmente poluidoras (LANGANKE, s.d.). O lodo residual após a eletrólise deve ser tratado

conforme os requisitos da Resolução CONAMA nº 313/2002 e as Normas ABNT, para garantir a destinação final ambientalmente adequada (Legisweb, 2002). Qualquer subproduto (como o ácido residual) deve ser tratado ou reciclado conforme as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) (Planalto, 2010).

3.3 Processo de Galvanização

A galvanização é um processo de revestimento de zinco ou ligas de zinco em materiais como aço e ferro, a fim de evitar o processo de corrosão. O zinco é utilizado como um metal de sacrifício, ou seja, se a superfície do aço for danificada e ficar exposta, é o zinco que sofrerá corrosão no lugar do aço (CRV, 2018).

A preparação com aço ou ferro e zinco é simples de explicar e difícil de aplicar. É necessário começar preparando bem a superfície de metal removendo sujeiras, oxidação e antigos revestimentos. Essa limpeza pode ser realizada através da limpeza química ou jateamento abrasivo (NOMUS, 2024).

Em seguida, é preciso mergulhar a peça em zinco fundido a temperaturas elevadas, entre 440°C e 465°C, ao menos na galvanização a quente (explicarei os diferentes tipos em um tópico mais abaixo) (NOMUS, 2024).

O último passo é resfriar o zinco para solidificar o revestimento, seguido de uma inspeção de qualidade para garantir que a galvanização tenha sido aplicada de forma uniforme e sem defeitos (NOMUS, 2024).

A parte mais complicada desse processo todo é a prática, principalmente o controle de temperatura, o banho de zinco e o tempo de contato (NOMUS, 2024).

Figura 1 - Materiais galvanizados



Fonte: Quality Tubos, (2021).

3.4 Processo de Eletrólise

A eletrossíntese, ou eletrólise, é um processo que utiliza eletricidade para forçar reações químicas que não ocorreriam espontaneamente. Este método é amplamente usado na indústria, principalmente na extração e purificação de metais e na produção de substâncias como hidrogênio e cloro. Existem dois principais tipos de eletrólise:

- Eletrólise ígnea: Acontece com substâncias iônicas no estado fundido, como a extração de alumínio a partir da bauxita. Este processo requer altas temperaturas e é utilizado para metais que necessitam de grande quantidade de energia para serem isolados de seus minérios (ECYCLE, 04 de out. de 2024).
- Eletrólise aquosa: Ocorre em soluções contendo íons dissolvidos em água, como a produção de cloro e hidróxido de sódio a partir de salmoura. Este processo é mais simples, pois não demanda temperaturas extremas (DIAS, 2024).

Em ambos os casos, são utilizados dois eletrodos: um cátodo, onde ocorre a redução, e um ânodo, onde ocorre a oxidação. Os materiais envolvidos dependem do tipo de reação e produto desejado. Metais como platina e grafita são usados frequentemente como eletrodos inertes por sua alta resistência ao calor e à corrosão (ECYCLE, 04 de out. de 2024).

Essas aplicações fazem da eletrólise um processo essencial em várias indústrias, incluindo a de galvanoplastia, para revestir e proteger metais contra corrosão (NETO, 2024).

Tabela 1 - Tabela de comparação dos métodos

Processo	Vantagens	Desvantagens
Lixiviação ácida (H2SO4 ou HCl)	Alta dissolução do zinco, eficiência elevada.	Necessita ajuste de pH para remoção do ferro.
alcalina		
Lixiviação (NaOH)	Menor risco de corrosão.	Menos eficiente na dissolução de zinco oxidado.
Eletrólise em meio ácido (ZnSO4/H2SO4)	Deposição pura do zinco metálico.	Necessidade de controle da corrente elétrica.
Eletrólise em meio alcalino (Zn(OH)4^2- / NaOH)	Boa condutividade da solução.	Redução da eficiência devido à formação de óxidos.
Pirólise	Longevidade do material e custo-benefício	Toda superfície deve ser tratada para que a zincagem seja perfeita

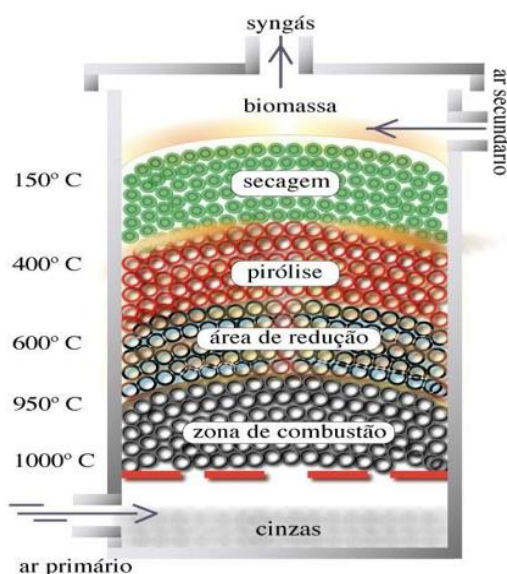
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3.5. Processo de Pirólise

A Pirólise é uma tecnologia com um processo que transforma resíduos sólidos em energia. Usada para aquecer os resíduos em um ambiente sem oxigênio, o que produz gases combustíveis, óleo e carvão vegetal. Essa tecnologia é uma alternativa para tratar resíduos urbanos, industriais e agrícolas. Permite a redução do volume dos resíduos e a geração de energia a partir de materiais antes do descarte. Por exemplo: a Pirólise pode ser utilizada para tratar resíduos orgânicos, como restos de alimentos. Com ela podemos transformá-los em energia para iluminar casas ou movimentar carros (XAVIER, 2025).

É um processo de deposição do elemento zinco em estruturas de aço. O processo se dá por imersão à quente. Isso aumenta a vida útil da estrutura ou do material tratado. Uma de suas maiores vantagens além da longevidade, é a relação custo/benefício. Como se trata de um processo químico, toda a superfície precisa ser tratada para que a zincagem seja perfeita (SANTA MARTA, 2025).

Figura 2 - Esquema Pirólise



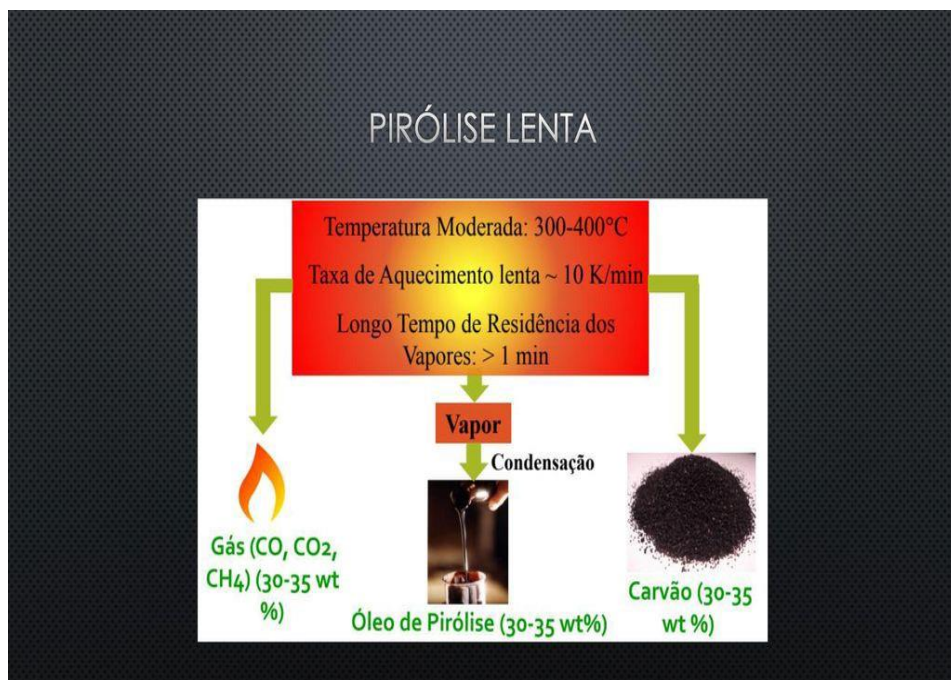
Fonte: Bruno Imbroisi (2021).

3.5.1 Pirólise lenta

Ocorre em temperaturas de aproximadamente 400°C, e o seu produto final é o carvão vegetal, também chamado de biocarvão ou biochar. Esse tipo de processamento pode levar horas ou dias, sendo realizado por um processo térmico, com a inserção de calor, ou catalítico, pela ação de um catalisador. A qualidade do

carvão vegetal produzido está de acordo com a qualidade da matéria-prima utilizada. Portanto, quanto melhor a matéria-prima, melhor será o carvão vegetal. No caso do biochar, ele é produzido a partir do estrume, e pode ser utilizado para a geração de energia. Além disso, se utilizado no solo, atua como um sequestrador de carbono da atmosfera (CABALLERO, 2025).

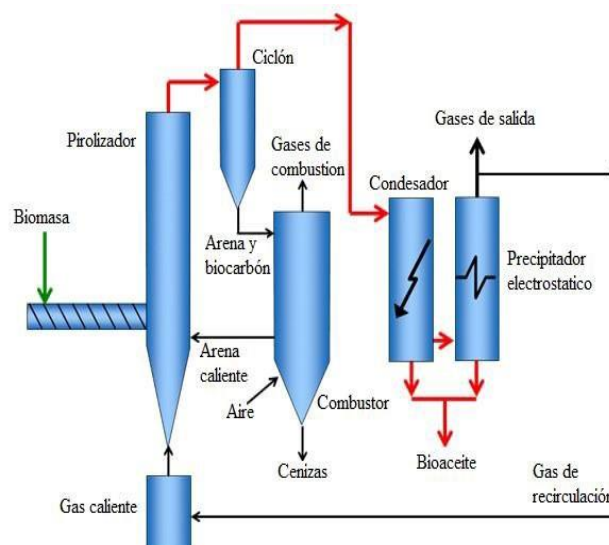
Figura 3 - Esquema de Pirólise Lenta



Fonte: CARDOSO; SANTOS (2018).

3.5.2 Pirólise rápida

É um método destinado à produção de gases e líquidos. Essa técnica é utilizada para a produção de combustíveis e produtos químicos. A pirólise rápida acontece em uma temperatura de aproximadamente 500°C, em um tempo estimado de 1 segundo. O material é inicialmente submetido a alta temperatura, em um sistema fechado, sem a presença de oxigênio. Com isso, ocorre a vaporização, produzindo o gás. Para que seja produzido o líquido, após a vaporização ocorre o resfriamento rápido do material. Dessa forma, ele é condensado e transformado em líquido. As vantagens dessa tecnologia são a produção direta de combustíveis, a densidade do produto final e o menor gasto de energia. Além disso, no caso da produção de líquidos, o transporte é mais fácil do que de sólidos e gases (CABALLERO, 2025).

Figura 4 - Esquema Reator de Pirólise Rápida

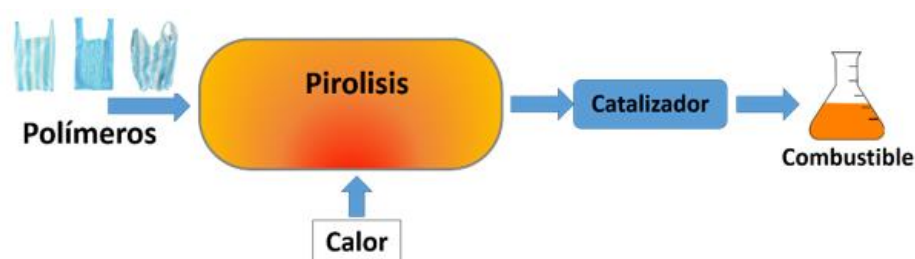
Fonte: JESSIE OSORIO VILASCO (2014).

3.5.3 Pirólise térmica

É o processo em que o material é exposto a uma temperatura de aproximadamente 800°C, em um longo período de tempo. Ele pode ser utilizado para a produção de gases, como o gás natural, um produto de origem fóssil utilizado para a geração de energia. Ele apresenta em sua composição o monóxido de carbono, o dióxido de carbono e hidrocarbonetos leves (CABALLERO, 2025).

3.5.4 Pirólise catalítica

Consiste no uso de uma substância com potencial de realizar a pirólise, um catalisador. Os catalisadores têm a capacidade de fragmentar o material em partes menores. Dessa forma, o tempo e a temperatura necessária para que a pirólise aconteça se torna menor. Outra vantagem dessa técnica é a capacidade de selecionar o catalisador desejado. Dessa forma, é possível escolher um catalisador que produza o produto final desejado, como uma quantidade maior de gases ou de combustível. Além disso, alguns catalisadores, como o Al-MCM-41, tem a vantagem de produzir menos resíduos durante a pirólise, resultando em menores danos ambientais. A pirólise catalítica pode ser usada para os mesmos processos que a pirólise térmica, como a transformação de plástico em petróleo. Entretanto, esse processo tem um custo maior, pois depende do investimento em um catalisador (CABALLERO, 2025).

Figura 5 – Esquema de Pirólise Catalítica

Fonte: Emilio MORON (2022).

3.6. Estudos de Aplicação de Resíduos Galvânicos

Processos galvânicos são atividades industriais bastante difundidas no mundo. Os resíduos dessas indústrias geralmente contêm altos teores de metais pesados, como Ni, Zn, Cr, Sn, Cu, Pb, Sb, etc. Uma quantidade significativa de publicações recentes demonstra que a produção de cerâmica é o método mais promissor de metais pesados para prevenção da poluição ambiental. O reuso maciço de alguns resíduos industriais que contêm metais pesados e/ou produtos na Sardenia, como matéria-prima na indústria da cerâmica é o objetivo de uma pesquisa experimental intensa conduzida por 20 anos. Eles são usados para produção de cerâmica como telhas, tijolos de pavimentação e outros (MYMRIN; CANFIELD; PONTE, 2006).

Com a Revolução Industrial e a adoção do modelo econômico urbano e industrial, baseado no consumo, ocorreu o aumento da geração de resíduos, frutos das diferentes atividades humanas. A galvanoplastia é um processo que embeleza e protege mecanicamente peças metálicas e está presente nas indústrias do setor metalomecânico de Nova Friburgo. Neste processo, dois resíduos importantes são gerados: um oriundo do pré-tratamento das peças metálicas e outro das estações de tratamento de efluentes industriais. Neste trabalho, tais resíduos, denominados de (RGs), foram incorporados à borracha natural (NR) em substituição total ou parcial ao óxido de zinco (ZnO) (SANTOS, 2009).

O possível efeito ativador dos RGs sobre a vulcanização e as propriedades da borracha natural foi investigado. A cinética de vulcanização foi estudada nas temperaturas de 150°C, 160°C e 170°C, através de ensaios reométricos e a determinação de parâmetros tais como: tempo de pré-cura: tempo ótimo de vulcanização (190); torques mínimo e máximo; constantes de velocidade; e, energias

de ativação. Com relação às propriedades mecânicas, a resistência à tração e a resistência ao rasgamento foram determinadas. No entanto, a resistência ao rasgamento foi mantida em um nível satisfatório apenas nas composições em que o ZnO foi substituído parcialmente em 25% (SANTOS, 2009).

3.7. Escassez de Materiais no Planeta

Em todo o mundo, pessoas e empresas enfrentam escassez de tudo, desde café até carvão. Os transtornos causados pela pandemia de covid-19 são os principais culpados — mas há muitos fatores e os efeitos estão sendo sentidos de diferentes maneiras:

- China (Falta de carvão e papel);
- EUA (Falta de brinquedos e papel higiênico);
- Índia (Falta de carros e chips de computador);
- Brasil (Falta de café e água);
- Nigéria (Falta de gás de cozinha);
- Líbano (Falta de água e medicamentos) (KRAEMER, 2021).

"Alguns consumidores não encontrarão as coisas que precisam", advertiu Neil Sunders, analista de varejo da consultoria GlobalData Retail (BARRIA, 2021).

A escassez de recursos naturais é um dos desafios mais urgentes do século XXI. Em um mundo onde a população global ultrapassa os 8 bilhões, a demanda por recursos como água, energia, e minerais está crescendo de forma exponencial. Assim, a combinação do crescimento populacional, desenvolvimento econômico e mudanças climáticas está colocando uma pressão sem precedentes sobre os recursos naturais do planeta (123ECOS, 2024).

Tabela 2 – Tabela Periódica dos Elementos em Extinção

1 H																	2 He				
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo				
Lantanídeos	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu						
Actínidos	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr						

Fonte: MOTA (2019).

3.8. Técnica de Obtenção de Zincagem

A zincagem é um processo de revestimento realizado por uma aplicação de zinco em outro tipo de metal. Esse procedimento tem como objetivo oferecer características mais fortes como resistência contra corrosão. Além disso, esse processo oferece um brilho único à peça submetida (SELBERTRATAMENTO, 2023).

A zincagem eletrolítica é um processo de galvanização amplamente utilizado na indústria metalúrgica para proteger peças de metal contra a corrosão. Esse método envolve a aplicação de um revestimento de zinco sobre a superfície do metal através da eletrólise, conferindo-lhe uma camada protetora resistente (GALVANOPLASTIA DIADEMA LTDA., 2024).

Zincagem por imersão a quente é o tratamento que tem por finalidade a obtenção de uma camada de zinco sobre uma peça de ferro ou aço. O principal objetivo da zincagem é impedir o contato do metal-base com o meio corrosivo (QUALINOX, 2024).

3.9. Utilização Ética da Ferramenta IA

A Inteligência Artificial (IA) é uma área da ciência da computação dedicada ao desenvolvimento de sistemas capazes de simular comportamentos humanos, como aprender, raciocinar e tomar decisões. Essa tecnologia vem transformando diversos setores, como saúde, indústria e educação, ao automatizar processos e tornar decisões mais eficientes a partir da análise de grandes volumes de dados (Centro Paula Souza, 2023).

Em um Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), a IA pode ser utilizada como ferramenta auxiliar na organização de ideias, geração de textos preliminares, análise de dados e construção de gráficos. Ferramentas baseadas em IA, como assistentes de escrita e algoritmos de aprendizado de máquina, podem contribuir para agilizar etapas do trabalho e aprimorar a qualidade da apresentação (Centro Paula Souza, 2023).

No entanto, seu uso deve ser ético e transparente. O estudante deve garantir que o conteúdo final reflita sua própria compreensão do tema, citando corretamente as ferramentas de IA utilizadas e evitando a dependência excessiva. Dessa forma, é possível aproveitar os benefícios da IA sem comprometer a originalidade e a credibilidade do trabalho (Centro Paula Souza, 2023).

3.10. Economia Linear x Economia Circular

O modelo de economia linear no setor de zinco no Brasil caracteriza-se pela extração contínua de minério, processamento industrial e descarte após o uso, sem reaproveitamento eficiente. Esse ciclo resulta em desperdício de recursos naturais e impactos ambientais significativos. Embora o Brasil possua a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), sua aplicação prática ainda é limitada, especialmente no que se refere à recuperação de materiais pós-consumo. Estudos indicam que, comparado a economias líderes globais, o Brasil apresenta ambições modestas nesse aspecto, o que evidencia a necessidade de políticas mais eficazes para promover a sustentabilidade no setor mineral (DUBEUX; CELIDONIO, 2020).

A economia circular propõe um modelo mais sustentável, onde o zinco é mantido em uso pelo maior tempo possível por meio da reutilização, reciclagem e reaproveitamento. Empresas como a Nobre Metais têm se destacado nesse cenário, oferecendo soluções completas para a reciclagem de sucata de zinco (Nobre Metais, 2024). A reciclagem do zinco reduz a necessidade de extração de minério, conserva energia e diminui a quantidade de resíduos descartados em aterros sanitários, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a conservação de recursos naturais (Kaizen Química, 2023).

3.11. ESG (Environmental, Social, and Governance – Ambiental, social e governância)

O termo ESG foi cunhado em 2004 em uma publicação feita em parceria com Pacto Global da Organização das Nações Unidas (ONU) com o objetivo de minimizar degradações ambientais, promover equidade e bem-estar na sociedade e excelente conduta nas empresas, a fim de maximizar os lucros e gerar um impacto positivo no meio ambiente e sociedade. É uma sigla em inglês para environmental, social, governance, ou seja, adotar uma abordagem ESG significa adotar práticas éticas a favor do meio ambiente, sociedade e de governança corporativa (INMAR, 2023).

3.11.1 ESG no Mercado de Zinco

O mercado de zinco tem incorporado cada vez mais práticas ESG, especialmente no setor de mineração. A Nexa Resources, uma das maiores produtoras de zinco das Américas, estabeleceu metas de reduzir suas emissões diretas em 20% até 2030 (NEXA, 2022).

As ações sociais também têm ganhado destaque. Em Juiz de Fora (MG), a Nexa implementou um ecoponto em parceria com organizações locais, onde a população troca recicláveis por créditos em conta, promovendo inclusão e educação ambiental (NEXA, 2024).

No aspecto de governança, o setor tem buscado alinhamento com padrões internacionais, como GRI e TCFD, para garantir maior transparência e confiança dos investidores, impulsionando projetos sustentáveis (IBRAM, 2023).

3.12 Reciclagem de Zinco Atualmente

A reciclagem de zinco tem se consolidado como uma das práticas mais importantes na indústria de metais, especialmente devido ao seu impacto ambiental positivo. Segundo a Kaizen Química, o zinco é um material 100% reciclável, ou seja, pode ser reutilizado várias vezes sem perder suas propriedades físico-químicas, reduzindo significativamente o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos industriais (Kaizen Química, 2023).

A Nexa Resources destaca-se por operar a maior recicladora de pilhas e baterias portáteis do Brasil, localizada em Juiz de Fora (MG). De acordo com a empresa, “a planta tem capacidade de processar 2.500 toneladas de resíduos por ano, gerando produtos como zinco metálico, óxido de zinco e ligas de manganês, todos reaproveitados pela indústria” (Nexa, 2022).

A empresa Nobre Metais reforça que a reciclagem de metais não ferrosos, como o zinco, “gera economia significativa de energia, uma vez que a fundição do metal reciclado consome menos energia do que a produção a partir do minério bruto”, além de ser uma atividade que fomenta a geração de empregos e renda (Nobre Metais, 2024).

Entretanto, conforme destaca a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (Abrema), “a reciclagem no Brasil vive uma crise inédita, quase 14 anos após a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, devido à baixa valorização do material reciclado e à ausência de políticas públicas eficazes” (ABREMA, 2024).

4. METODOLOGIA

As atividades experimentais serão realizadas no laboratório da escola ETEC Trajano Camargo, baseado nos trabalhos de Fábio Augusto Dornelles do Amaral, em parceria com a empresa JCR Limeira representada pelo gerente administrativo Mateus Barros, conforme o fluxograma (Imagem 8).

As práticas experimentais foram conduzidas no laboratório da ETEC Trajano Camargo, em agosto de 2025, conforme descrito:

- Preparação do lodo (25 g) com 35 mL de água deionizada, 15 mL de H_2SO_4 ($1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) e adição de NaOH.
- Eletrólises sucessivas: primeira com duração de ~50 min; segunda com 1h40min.
- Filtração, secagem e pesagem do lodo em cadinho.
- Obtenção de cinzas via tratamento térmico (Mufla).
- Registro de massas, pH e rendimento do zinco depositado.

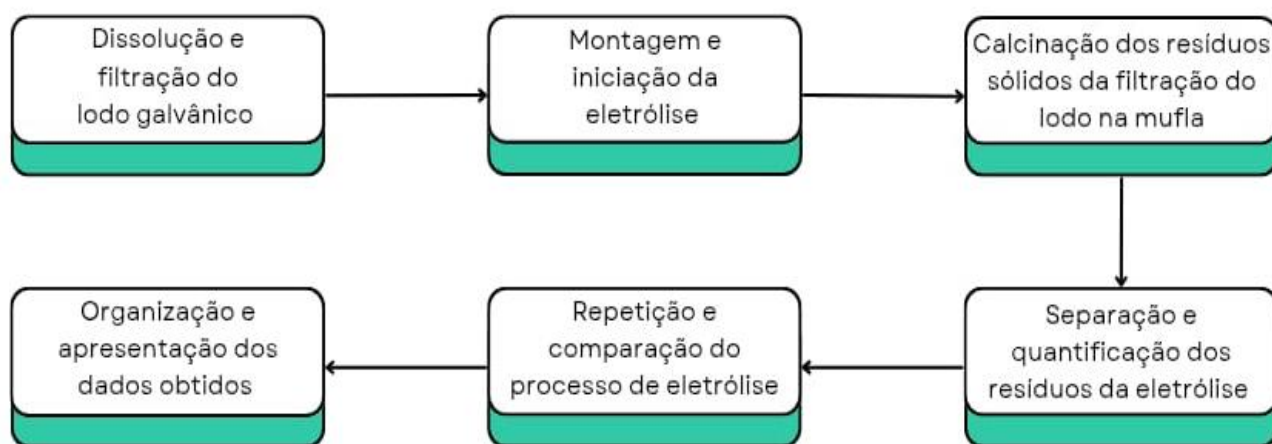
Todos os ensaios foram realizados em tripé didático, visando simular recuperação em escala laboratorial.

4.1. Coleta de Amostra e Preservação

Lodo Galvânico: Aproximadamente 50 g de lodo galvânico (a quantidade exata dependerá da concentração de zinco no lodo, que pode variar de 5 a 15% de zinco metálico). É importante que esse lodo contenha uma quantidade significativa de óxido ou sais de zinco para ser eficiente na eletrólise.

4.2. Fluxograma

Figura 6 - Esquema para exemplificação



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

4.3. Processos de Tratamento e Recuperação do Zinco por Eletrólise

A recuperação do zinco presente em resíduos galvanicos, como o lodo, pode ser realizada por métodos eletroquímicos, sendo a eletrólise um dos mais eficientes. O processo consiste em promover uma reação redox forçada por corrente elétrica, que permite a deposição do zinco metálico no cátodo.

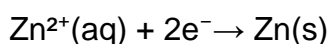
Inicialmente, o lodo galvanico foi submetido a um pré-tratamento com água destilada, para dissolver os sais presentes e separar partículas metálicas por decantação e filtração. A solução obtida, rica em íons Zn^{2+} , foi utilizada como eletrólito.

Na montagem do sistema de eletrólise, utilizou-se:

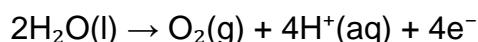
- Fonte de corrente contínua (bateria 9V ou fonte de bancada);
- Eletrodos de grafite e cobre;
- Recipiente de vidro como cuba eletrolítica;
- Fios condutores com garras jacaré; □ Solução com íons de zinco (Zn^{2+}).

Durante a eletrólise, os íons Zn^{2+} migraram em direção ao cátodo, onde foram reduzidos a zinco metálico:

Reação no cátodo:



Reação no ânodo (grafite):



O processo foi mantido por cerca de 30 minutos, e a formação de zinco metálico no cátodo foi visivelmente confirmada por uma camada acinzentada. O zinco recuperado foi filtrado e deixado para secagem natural.

Este método mostrou-se eficiente, de baixo custo e aplicável em escala didática, confirmando que a eletrólise é uma alternativa viável para a recuperação de zinco em contextos acadêmicos e industriais (NETO, 2024).

• Separação por eletrólise

A separação por eletrólise pode ser realizada utilizando materiais simplórios (Baterias, cátodo e ânodo, água e o lodo de zinco, por exemplo), abrindo assim a possibilidade de uso do processo para “situações pequenas” (como uma exposição na escola ou um teste para provar a usabilidade da eletrólise).

O Objetivo da eletrólise é isolar o metal desejado de forma a removê-lo do meio impuro em que se encontra (Um exemplo é o cobre metálico, que normalmente vem acompanhado de diversos outros metais e deve ser assim purificado para que tenha uso e funcionalidades corretas).

Isso significa que metais como o próprio zinco (alvo da pesquisa) podem ser separados de meios impuros e utilizados ou até reutilizados, tornando assim o processo mais sustentável.

É necessário frisar o fato de que o zinco tem potencial de reutilização extremamente alto devido a ser capaz de manter suas capacidades físicas e químicas mesmo após o processo de recuperação.

- **Processo de pirólise**

A separação por aquecimento, semelhantemente à eletrólise, é capaz de separar um metal de um meio impuro para que ele fique sozinho em meio purificado. Este método pode ser utilizado de forma que, dependendo da circunstância, pode ser ainda mais vantajoso que a própria eletrólise dado que não são necessários reagentes para o funcionamento do processo.

É possível utilizar materiais sustentáveis como placas solares para o processo ocorrer ou até mesmo maçaricos, já que o ponto de fusão do zinco é consideravelmente baixo.

De acordo com Rossini e Bernardes (2006), a separação térmica do zinco pode ser vantajosa por dispensar reagentes químicos e possibilitar o uso de fontes de energia renovável, como placas solares. Essa técnica foi testada em pequena escala e demonstrou resultados preliminares promissores.

- **Separação por pirólise**

1. **Preparação da matéria-prima:** Na primeira etapa, a matéria-prima a ser processada, como madeira, plástico ou biomassa, precisa ser preparada. Isso envolve processos como trituração, secagem e classificação, dependendo do material utilizado. Por exemplo, madeira muito úmida exigirá secagem prévia para eficiência da pirólise;

2. **Reação de pirólise:** A etapa central é a reação propriamente dita. A matéria-prima preparada é introduzida em um reator vedado, onde receberá calor intenso. É crucial que o ambiente seja livre de oxigênio, pois a pirólise não é

combustão. Fontes externas como fornos elétricos ou combustão indireta aquecem o reator, elevando a temperatura da matéria-prima entre 400°C e 1000°C;

3. Decomposição térmica: Sob o calor intenso, as cadeias moleculares da matéria prima se rompem. Com isso, ocorre a decomposição térmica, liberando gases como metano, eteno, dióxido de carbono e monóxido de carbono. Esses gases são continuamente retirados do reator para evitar a combustão dentro do recipiente;

4. Condensação e formação de líquidos: Simultaneamente à decomposição gasosa, outros compostos orgânicos voláteis, mas que não chegam ao estado gasoso naquelas temperaturas, são liberados. Esses compostos, ao entrarem em contato com regiões mais frias do reator ou em um condensador externo, sofrem condensação e se transformam em líquidos oleosos conhecidos como bio-óleos ou óleos pirolíticos;

5. Separação dos produtos: Por fim, os produtos da pirólise são separados. Os gases são direcionados para armazenamento ou aproveitamento energético. O bio-óleo é coletado separadamente e pode ser refinado para diversos usos. O material sólido remanescente no reator, rico em carbono e não volátil, é chamado de carvão vegetal (no caso de madeira) ou carvão biochar (para biomassa em geral) (XAVIER, 2025).

4.3.1 Montagem do sistema da eletrólise

Usar vidro ou plástico resistente garante que o material não reaja com o hipoclorito formado, que é um agente oxidante.

Ânodo (aço inox): Material inerte que resiste à corrosão e não interfere nas reações. Cátodo (aço inox): Suporta bem a redução da água, que gera gás hidrogênio (H_2), e tem boa condutividade elétrica.

Figura 7 - Ânodo e Cátodo utilizados



Fonte: Acervo Pessoal (2025)

Figura 8 - Cátodo e ânodo em fonte de corrente contínua



Fonte: Acervo Pessoal (2025).

Fonte de corrente contínua (DC): fornece elétrons em fluxo unidirecional, essencial para promover as reações de oxidação e redução de forma controlada. A faixa de 6 a 12 V é suficiente para superar a sobre tensão eletroquímica sem causar decomposição indesejada de produtos.

Figura 9 - Fonte de corrente contínua



Fonte: Acervo Pessoal (2025).

4.3.2 Filtração e armazenamento

Filtrar, se necessário, para remover partículas sobrenadantes, impurezas ou precipitados que possam ter se formado. Armazenar adequadamente o H_3PO_4 , Zinco metálico e as cinzas do lodo seco que é instável, especialmente na presença de luz,

calor e metais pesados. Por isso: Usar frascos opacos ou âmbar, manter em local fresco e evitar agitação ou exposição ao ar, pois pode liberar gás cloro ou decompor o hipoclorito.

Figura 10 – Soluções do processo armazenadas



Fonte: Acervo Pessoal (2025).

4.4. Quantificação

Para quantificar o zinco recuperado, utilizou-se o método da filtração e posterior pesagem em papel filtro, após o processo eletroquímico. Como os recursos disponíveis no laboratório escolar não permitiram a utilização de técnicas instrumentais de alta precisão, como a espectrometria de absorção atômica (EAA), a avaliação foi realizada de forma empírica, por meio da análise visual e gravimétrica simples.

Apesar disso, foi possível identificar a presença de zinco metálico no cátodo e um leve aumento de massa no papel filtro após a secagem, indicando que houve deposição efetiva do metal.

Segundo Nascimento et al. (2019), a espectrometria de absorção atômica é um dos métodos mais precisos para a quantificação de metais pesados em resíduos industriais, permitindo determinar concentrações com alta sensibilidade, mesmo em amostras complexas como lodo galvânico. Contudo, em contextos educacionais, métodos alternativos como a análise gravimétrica podem fornecer uma estimativa prática e didática da recuperação

• **Cálculos Eletroquímicos:** Moles de Zn recuperados = $0,281 \text{ g} / 65,38$

$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1} = 0,00430 \text{ mol}$.

Carga elétrica teórica necessária (Q) = $0,00430 \cdot 2 \cdot 96485 \approx 831 \text{ C}$.

• **Correntes médias estimadas:**

- 50 min (3000 s): 0,277 A (277 mA);
- 100 min (6000 s): 0,139 A (139 mA);
- 150 min (9000 s): 0,092 A (92 mA).

• **Energia elétrica (estimada):**

- 2 V \rightarrow 0,462 Wh;
- 5 V \rightarrow 1,155 Wh.

• **Concentrações e Rendimentos**

Concentrações de Zn na solução, considerando diferentes volumes:

- 35 mL \rightarrow $8,03 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (8030 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);
- 50 mL \rightarrow $5,62 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (5620 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);
- 56 mL \rightarrow $5,02 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (5020 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

Rendimento relativo ao lodo seco: $(0,281 / 12,901) \cdot 100 \approx 2,18 \%$.

Rendimento relativo à amostra inicial (25 g): $\approx 1,12 \%$.

• **Eficiência Comparativa**

Assumindo diferentes teores de Zn no lodo:

- 5 % Zn no lodo seco (0,645 g esperado) \rightarrow eficiência $\approx 43,6 \%$;
- 10 % Zn no lodo seco (1,290 g esperado) \rightarrow eficiência $\approx 21,8 \%$;
- 15 % Zn no lodo seco (1,935 g esperado) \rightarrow eficiência $\approx 14,5 \%$.

• **Balanço de Massa**

- Massa inicial do lodo úmido: 25 g;
- Massa do lodo seco: 12,901 g (perda de $\approx 48,4 \%$ em água e solúveis);
- Zinco recuperado: 0,281 g;
- Cinzas obtidas: 4,090 g;
- Zn recuperado por kg de lodo seco $\approx 21,8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Os resultados demonstram que a eletrólise é viável para a recuperação de zinco em escala laboratorial, embora a eficiência dependa fortemente do tempo de eletrólise, da densidade de corrente e do pH do eletrólito. Os rendimentos calculados (1–2 %) são baixos em termos absolutos, mas compatíveis com experimentos didáticos. Ao assumir teores de 5 a 15 % de Zn no lodo, a eficiência variou de 14 a 44 %, indicando que parte significativa do metal ainda permanece no resíduo ou foi perdida em solução. A pirólise resultou em 4,090 g de cinzas, mas sem ganho expressivo de Zn metálico, além de riscos ambientais. Dessa forma, a eletrólise se mostra mais eficiente, segura e econômica.

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados experimentais indicaram que foi possível recuperar zinco metálico nos eletrodos, além da obtenção de cinzas no tratamento térmico. A seguir, estão organizados os cálculos e tabelas.

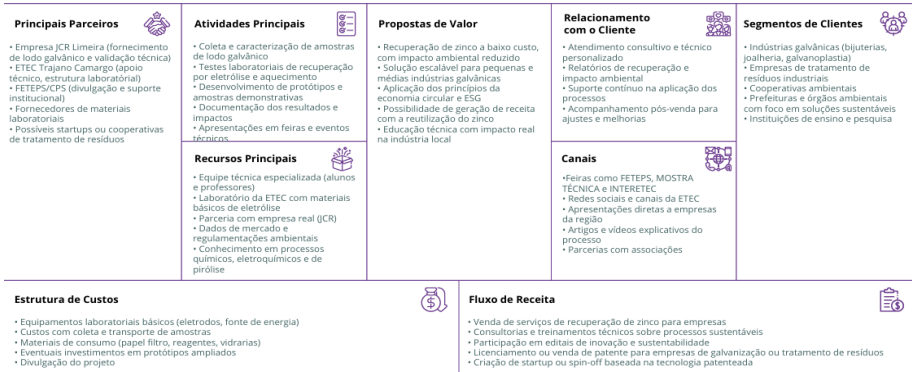
Tabela 3 – Valores obtidos nos procedimentos

Descrição	Valor
Massa do cadinho	98,432 g
Massa cadinho + lodo seco	111,333 g
Massa do lodo seco	12,901 g
Zn recuperado (1ª eletrólise)	0,089 g
Zn recuperado (2ª eletrólise)	0,192 g
Zn total recuperado	0,281 g
Cinzas obtidas	4,090 g
pH final da solução	≈ 5–6

Fonte: Acervo Pessoal (2025)

5.1 Modelo Canvas de Negócios

Figura 11 – Modelo Canvas de Negócios.



Fonte: Acervo Pessoal (2025).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com diversos autores, o zinco é um elemento essencial para a indústria, mas está ameaçado de escassez em menos de 100 anos, o que reforça a importância de sua recuperação e reciclagem. Amplamente utilizado na construção civil, na indústria automobilística e na galvanização de ferro e aço para proteção contra corrosão, o zinco movimenta um mercado bilionário em expansão, podendo alcançar cerca de R\$ 70 bilhões até 2030. O processo de galvanização, baseado em eletrólise, é controlado por modelos matemáticos e tem crescido impulsionado pela demanda global.

A reciclagem do zinco é fundamental para a sustentabilidade, pois reduz a extração de minérios, economiza energia e diminui as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a produção de hidrogênio verde, obtido por eletrólise a partir de fontes renováveis, surge como uma alternativa energética promissora, abrindo novas oportunidades econômicas, especialmente em países com potencial renovável como o Brasil. Estudos também analisam resíduos de galvanização, classificando-os como perigosos segundo normas ambientais, o que reforça a necessidade de manejo adequado e sustentável desses materiais.

O estudo propõe investigar processos de recuperação do zinco proveniente da galvanização para reduzir seu desperdício e prolongar seu ciclo de vida, considerando suas propriedades físicas e químicas que permitem a reutilização. Busca-se desenvolver formas sustentáveis de recuperar o zinco presente nos lodos galvânicos, aprimorar o processo de eletrólise, compreender os princípios da galvanoplastia e da química envolvida, além de estudar temas relacionados como o hidrogênio verde, o ciclo de vida industrial e o mercado de reciclagem e galvanoplastia, visando integrar sustentabilidade e eficiência nos processos industriais.

Apresenta-se uma síntese dos principais processos de galvanização, eletrólise e pirólise aplicados à recuperação do zinco, destacando aspectos técnicos, ambientais e sustentáveis. São abordados o reaproveitamento de resíduos industriais, a escassez de recursos naturais, a transição da economia linear para a circular, o uso ético da inteligência artificial e a incorporação de práticas ESG no setor metalúrgico, com ênfase na reciclagem e na redução de impactos ambientais.

Descreve-se a realização de experimentos laboratoriais voltados à recuperação do zinco presente em lodos galvânicos por meio de processos de

eletrólise e pirólise. O procedimento inclui a coleta e preparação das amostras, o uso de soluções eletrolíticas e a montagem de um sistema simples de eletrólise com eletrodos e fonte de corrente contínua. Também são abordadas etapas de filtração, secagem, quantificação e cálculo de rendimento do metal recuperado, com base em métodos gravimétricos e dados eletroquímicos. O estudo enfatiza o caráter didático e sustentável da metodologia, aplicável em pequena escala e com baixo custo.

Apresenta-se a análise dos resultados obtidos nos experimentos, confirmando a possibilidade da recuperação do zinco metálico através da eletrólise, que mostrou eficiência superior à pirólise. Foram obtidos depósitos visíveis de zinco nos eletrodos, permitindo cálculos de rendimento e balanço de massa. Apesar das limitações instrumentais, os dados indicam eficiência satisfatória para fins educacionais e laboratoriais, reforçando o potencial do método para reaproveitamento de resíduos industriais e promoção da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

Aço galvanizado: vantagens e desvantagens. Jansen Iberia, 2022. Disponível em: <https://jansen.es/pt-pt/aco-galvanizado-vantagens-edesvantagens/#:~:text=A%20sua%20durabilidade&text=Portanto%2C%20uma%20ve z%20que%20o,durar%20mais%20de%2070%20anos>. Acesso em: 06 de set. de 2024.

ALVES, Lucas C.. Caracterização do cromo presente no lodo de galvanoplastia: avaliação técnica e econômica de processos de remoção. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-29032016-084227/publico/2016AlvesCaracterizacao.pdf>. Acesso em: 30 de abr. de 2025.

BARRIA, Cecilia. “Nunca vi algo assim”: a escassez global de produtos que ameaça o mundo e o seu bolso. BBC News Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-58209471>. Acesso em: 04 de out. de 2021.

BARROSO, Amanda M. R.; ROCHA, Brenda V. S.; ALVES, Luis F. L.; FILHO, Mário R. G. M. Obtenção do Hidrogênio verde a partir de energias renováveis. Revista Arte, Ciência e Tecnologia. Disponível em: <https://cet.edu.br/files/pages/95/artigo.pdf>. Acesso em: 06 de set. de 2024.

BERARDINELLI, Marcos V. L.. Elementos em extinção. Aurhora, 2022. Disponível em: <https://www.aurhora.com.br/post/elementos-em-extin%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 12 de mar. de 2025.

CABALLERO, Luiza. Pirólise: tudo o que você precisa saber. Ecycle. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/pirolise/#:~:text=A%20pir%C3%B3lise%20r%C3%A1pida%20acontece%20em,sem%20a%20presen%C3%A7a%20de%20oxig%C3%AAnio>. Acesso em: 02 de abr. de 2025.

Centro Paula Souza. Inteligência Artificial: Guia para Iniciantes. São Paulo: CPS, 2023. MOTA, Claudio J. A.. A extinção de elementos químicos é possível?. Ciência Hoje, 2019. Disponível em: <https://cienciahoje.org.br/artigo/a-extincao-de-elementosquimicos-e-possivel/>; Acesso em: 30 de abr. de 2025.

Como é realizado o processo de zincagem?. Selber Tratamento, 2023. Disponível em: <https://www.selbertratamento.com.br/blog/revestimento/como-e-realizadoprocessozincagem/>. Acesso em: 04 de out. de 2024.

DIAS, Diogo L.. O que é eletrólise?. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/quimica/o-que-e-eletrolise.htm>. Acesso em: 03 de out. de 2024.

DUBEUX, Carolina; CELIDONIO, Maína. Economia circular: os desafios do Brasil. Centro Brasileiro de Relações Internacionais, 2020. Disponível em: <https://cebri.org.br/doc/24/economia-circular-os-desafios-do-brasil?> ; Acesso em: 07 de mai. de 2025.

ESG para CIPA: um grande diferencial no mundo dos negócios; Instituto Nova Maré, 2023. Disponível em: https://www.inmar.org.br/post/esg-para-cipa-um-grandediferencial-no-mundo-dos-neg%C3%B3cios?gad_source=1&gbraid=0AAAAAqTOwYubkA4z0a4SnCiHYCUMAvDm&gclid=EAlaIqObChMIqYDd4MyMjQMVtjBECB3f3SM4EAAYAyAAEgLiDvD_BwE ; Acesso em: 05 de mai. de 2025.

FARIA, Caroline. Galvanização. Info escola. Disponível em: <https://www.infoescola.com/quimica/galvanizacao/>. Acesso em: 07 de out. de 2024.

FOGAÇA, Jennifer R. V.. Galvanização. Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/galvanizacao.htm>. Acesso em: 07 de out. de 2024.

Identificação da substância. CetesbSP, 2021. Disponível <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wpcontent/uploads/sites/24/2021/05/Zinco.pdf>. Acesso em: 06 de set. de 2024.

Impacto ambiental. Ecologia Usp. Disponível em: https://ecologia.ib.usp.br/lepac/conservacao/ensino/conservacao_impacto.htm#:~:text=A%20resolu%C3%A7%C3%A3o%20001%2F86%20%E2%80%93%20CONAMA,be m%2Destar%20da%20popula%C3%A7%C3%A3o%3B%20as ; Acesso em: 06 de set. de 2024.

Juiz de Fora tem a maior recicladora de pilhas e baterias portáteis do Brasil. Nexa, 2022. Disponível em: <https://www.nexaresources.com/juiz-de-fora-tem-a-maiorrecicladora-de-pilhas-e-baterias-portateis-do-brasil> ; Acesso em: 07 de mai. de 2025.

KRAEMER, Daniel. Por que há escassez de produtos no Brasil e no mundo. Uol, 2021. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/bbc/2021/10/19/por-que-haescassez-de-produtos.htm?cmpid=copiaecola>. Acesso em: 04 de out. de 2024.

LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. BRASIL. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm ; Acesso em: 06 de set. de 2024.

Mercado Zinco - Crescimento, tendências, impacto COVID-19 e previsões (2024-2029). Mordor Intelligence, 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/zinc-market>. Acesso em: 02 de out. de 2024.

MOREIRA, Tatiane R. Caracterização e tratamento de lodos galvânicos: uma revisão da literatura. Instituto Federal de educação e Tecnologia da Bahia Bacharelado em Engenharia Química, 2021. Disponível em: https://portal.ifba.edu.br/salvador/ensino/cursos/superior/graduacao/engenhariaquimica/documentos/TCC/2021/tcc_tatiane_ribas_final.pdf. Acesso em: 06 de set. de 2024.

MORGAN, Elijah. O que é galvanoplastia? Definição, como funciona e aplicações. RapidDirect, 2022. Disponível em: <https://www.rapiddirect.com/pt/blog/electroplatingprocess/>. Acesso em: 02 de abr. de 2025.

MYMRIN, Vsévolod; CANFIELD, Simone B.; PONTE, Haroldo A.. Resíduos de Processos Galvânicos como Principais Componentes da Produção de Cerâmica Vermelha. Cerâmica Industrial, 2006. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876572d7f8c9d6e028b470b/pdf/ci11-5-5876572d7f8c9d6e028b470b.pdf>. Acesso em: 04 de out. de 2024.

NASCIMENTO, C. A. O.; SANTOS, J. A.; RIBEIRO, M. S. Análise de metais pesados por espectrometria de absorção atômica em resíduos industriais. Revista Brasileira de Química, v. 36, n. 2, p. 45–53, 2019.

NBR 10004 - CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Embtec. Disponível em: <https://www.embtec.com.br/br/noticias/interna/nbr-10004-classificacao-deresiduos-solidos-209> ; Acesso em: 06 de set. de 2024.

NETO, João G.. Eletrólise. InfoEscola. Disponível em: <https://www.infoescola.com/quimica/eletrolise/>. Acesso em: 03 de out. de 2024.

NEXA. Uma empresa de zinco comprometida em gerar legado social. Tribunal de Minas, 2024. Disponível em: <https://tribunademinas.com.br/especiais/publieditoria/09-09-2024/uma-empresa-de-zinco-comprometida-em-gerar-legado-social.html> ; Acesso em: 07 de mai. de 2025.

Nexa reforça seus compromissos ESG até 2030 em novo relatório de sustentabilidade. IBRAM, 2023. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/nexareforca-seus-compromissos-esg-ate-2030-em-novo-relatorio-de-sustentabilidade/> ; Acesso em: 07 de mai. de 2025.

Nexa anuncia compromissos ESG até 2030. Nexa, 2022. Disponível em: <https://www.nexaresources.com/nexa-anuncia-compromissos-esg-ate-2030/> Acesso em: 07 de mai. de 2025.

O mercado de zinco. Kaizen Química, 2023. Disponível em: <https://kaizenquimica.com.br/blogs/informacoes-sobre-zinco/o-mercado-dezinco#:~:text=O%20zinco%20%C3%A9%20um%20material%20altamente%20recicl%C3%A1vel%2C%20o,a%20quantidade%20de%20res%C3%ADduos%20descartados%20e m%20aterros%20sanit%C3%A1rios>. Acesso em: 11 de out. de 2024.

O Mercado de Zinco. Kaizen Química, 2023. Disponível em: <https://kaizenquimica.com.br/blogs/informacoes-sobre-zinco/o-mercado-dezinco?srsId=AfmBOoq0lf1Wbr4413fbx8ZtF0VLFUIJ-NuWCP0Y0SZMPXvQJtVvDLL2&utm> ; Acesso em: 07 de mai. de 2025.

Onde reciclar metais não ferrosos?. Nobre Metais, 2024. Disponível em: <https://nobremetais.com.br/blog/2024/10/02/onde-reciclar-metais-nao-ferrosos/> ; Acesso em: 07 de mai. de 2025.

PEDRO, João; Galvanização: o que é, como funciona, para que serve e quais os principais tipos. Nomus. Disponível em: <https://www.nomus.com.br/blogindustrial/galvanizacao/> ; Acesso em: 06 de set. de 2024.

PERINI, Sebastiam J. B.. Tratamento de efluente do processo de galvanização a fogo por precipitação química visando aproveitamento do lodo gerado. Disponível em: https://www.univille.edu.br/account/mep/VirtualDisk.html/downloadDirect/982655/Dissertacao_Sebastiam_Johann_Batista_Perini.pdf; Acesso em: 30 de abr. de 2025.

Reciclagem vive crise inédita no Brasil quase 14 anos após política nacional. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/2024/06/17/reciclagem-vive-crise-inedita-no-brasilquase-14-anos-apos-politica-nacional/> ; Acesso em: 07 de mai. de 2025.

Resolução CONAMA Nº 237 DE 19/12/1997. Legisweb. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=95982>. Acesso em: 06 de set. de 2024.

Resolução CONAMA nº 313 de 29/10/2002. Legisweb. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=98292>. Acesso em: 06 de set. de 2024.

SANTOS, Alex C. S.. Avaliação do efeito de resíduos galvânicos sobre a vulcanização e as propriedades da borracha natural (NR). UERJ, 2009. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/bitstream/1/8024/1/Dissertacao%20Alex%20Calcagno%20de%20Sales%20Santos.pdf>. Acesso em: 04 de out. de 2024.

SciELO. Determinação de metais por técnicas de espectrometria atômica em amostras de carvão mineral e cinzas utilizando metodologia de superfície de resposta. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/7Ht33ND5NwN3ySnvKZqbzMJ/?lang=pt>. Acesso em: 30 de abr. de 2025.

Tamanho do mercado de aço galvanizado, participação, crescimento e análise da indústria, por tipo (aço galvanizado por imersão a quente, aço galvanizado elétrico), por aplicação (construção, automotivo, indústria geral, eletrodomésticos) e previsão regional para 2028. Business Research Insights, 2024. Disponível em: <https://www.businessresearchinsights.com/pt/market-reports/galvanized-steelmarket-106922>. Acesso em: 02 de out. de 2024.

Você sabe o que é Galvanização?. CRV Parafusos, 2018. Disponível em: <https://www.crvindustrial.com/blog/voce-sabe-o-que-e-galvanizacao>. Acesso em: 06 de set. de 2024.

XAVIER, Dayana. Pirólise – O Que É, Processo, Desafios E Fundamentos. 123Ecos. Disponível em: <https://123ecos.com.br/docs/o-que-e-pirolise/>. Acesso em: 09 de abr. de 2025.

Zincagem eletrolítica. Galvanoplastia Diadema. Disponível em: <https://galvanoplastiadiadema.com.br/processos/banhos/zincagem-eletrolitica/>. Acesso: 07 de out. de 2024.

Zincagem por imersão a quente. Qualinox. Disponível em: <https://www.qualinox.com.br/zincagem-a-fogo>. Acesso: 07 de out. de 2024

Zinco. Infopédia. Disponível em: [https://www.infopedia.pt/artigos/\\$zinco](https://www.infopedia.pt/artigos/$zinco). Acesso em: 06 de set. de 2024.

5 problemas que só a reciclagem de sucata de zinco pode resolver. Nobre Metais, 2024. Disponível em: <https://nobremetais.com.br/blog/2024/09/28/5-problemas-que-so-a-reciclagem-de-sucata-de-zinco-pode-resolver/> ; Acesso em: 07 de mai. de 2025.

GLOSSÁRIO

Ânodo: Ânodo é o eletrodo em que ocorre um acúmulo de elétrons, portanto é o que tem polaridade negativa da célula eletroquímica.

Catalisador: Substância capaz de acelerar uma reação química sem ser consumida ou alterada durante o processo.

Cátodo: Oposto do ânodo. Nele ocorre um ganho de elétrons, originados do ânodo. Sendo assim, a polaridade do eletrodo tende a ser positiva e ocorrem reações de redução na região.

Concentração: A concentração em quantidade de matéria, ou simplesmente molaridade (M) é definida como a razão entre a quantidade de matéria do soluto (em mol) e o volume da solução (em litros).

Densidade: Relação entre a massa de um material e seu volume.

Deposição: Acumulação de Substâncias.

Dióxido de Carbono (CO₂): Gás incolor e inodoro importante para a vida na Terra e que desempenha papel significativo no aquecimento global.

Eletrodos: Nome genérico dado aos polos condutores de corrente elétrica de um sistema que gera ou consome energia elétrica.

Elétron (e⁻): Partículas Subatômicas com carga elétrica negativa.

Espectroscopia de absorção atômica (EAA): Ensaio para identificar e quantificar elementos químicos.

Gravimetria: Método analítico quantitativo clássico que tem por objetivo isolar e realizar a pesagem de um elemento ou composto definido em sua forma mais pura que é separado de uma quantidade ou amostra previamente conhecida.

Hidrocarbonetos: Os hidrocarbonetos são um grupo de compostos orgânicos que possui apenas átomos dos elementos carbono e hidrogênio, C_xH_y .

Hidrogênio verde: Hidrogênio produzido a partir de fontes de energia renováveis, sendo uma alternativa aos combustíveis fósseis.

Inertes: Sem atividade ou movimento próprio.

Íons: Átomos eletricamente carregados que ganharam ou perderam elétrons.

Jateamento abrasivo: Remoção industrial de ferrugem, tinta, sujeira e outros contaminantes com o lançamento de materiais abrasivos como areia em alta pressão.

Lixiviação: Minerais desejados são extraídos através da solubilização seletiva em uma solução aquosa.

Metais não ferrosos: Materiais metálicos que não contêm ferro em sua composição.

Metais pesados: Metais pesados são elementos de alta densidade, como chumbo, mercúrio e cádmio, conhecidos por sua toxicidade e capacidade de se acumular no ambiente e nos organismos.

Moles/Mols: Mol é a unidade de medida da quantidade de matéria em química, correspondente a $6,022 \times 10^{23}$ partículas.

Mufra: Um tipo de forno de alta temperatura usado em laboratórios e indústrias para tratamentos térmicos diversos.

Óxido: Compostos binários (constituído de dois elementos químicos), onde os átomos de oxigênio são ligados a outros elementos.

pH: O pH corresponde ao potencial hidrogeniônico de uma solução.

Reagentes: substâncias que são adicionadas em um sistema, em conjunto, de forma que as moléculas colidam entre si e possam interagir.

Reator: Dispositivo que provoca uma reação química.

Redox (Redução-Oxidação / Oxirredução): Reação química que envolve a transferência simultânea de elétrons.

Reometria: Técnica de medição utilizada para estudar o comportamento de materiais sob deformação.

Sais: Substâncias químicas formadas por ligações iônicas entre os átomos.

TABELA PERIÓDICA: Arranjo tabular dos elementos químicos, organizados de acordo com número atômico, configuração eletrônica e propriedades químicas.

Vulcanização: A vulcanização é um processo de adição de enxofre à borracha crua, formando pontes de enxofre entre as cadeias do polímero que melhoram suas propriedades.

ANEXOS

ANEXO A – Processo de Eletrólise



ANEXO B – Reagentes e Produtos



ANEXO C – Lodo Galvânico “Puro”



ANEXO D – Lodo Seco



ANEXO E – Cinzas do Lodo

