



UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DE FEIRA DE SANTANA

BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ANA CAROLINA LIMA SANTOS

PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS PARA RECUPERAÇÃO DE ZINCO EM SUCATA
METÁLICA

FEIRA DE SANTANA, BA, 2020



UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DE FEIRA DE SANTANA

BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ANA CAROLINA LIMA SANTOS

PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS PARA RECUPERAÇÃO DE ZINCO EM SUCATA
METÁLICA

Trabalho apresentado ao curso de
Engenharia Química da Unidade de Ensino
Superior de Feira de Santana como pré-
requisito para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química

Orientador: Ricardo de Oliveira Mota

FEIRA DE SANTANA, BA, 2020

ANA CAROLINA LIMA SANTOS

PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS PARA RECUPERAÇÃO DE ZINCO EM SUCATA
METÁLICA

Feira de Santana, 15 de dezembro de 2020

Banca examinadora:

Ricardo de Oliveira Mota
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Orientador

Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Examinador

Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Examinador

Agradecimentos

Enfim, esse momento chegou! O começo de uma nova jornada. Não foi um caminho nada fácil, mas tive pessoas cujo apoio foi imprescindível e sem elas, jamais teria conseguido vencer esta etapa.

À minha mãe, toda a gratidão do universo, por ter feito inúmeros sacrifícios, muitas vezes abrindo mão dos próprios desejos para garantir que eu tivesse a melhor base possível. Ao meu pai por acreditar em mim e apoiar as minhas decisões.

Ao Leonardo, a pessoa mais incrível que poderia fazer parte da minha vida, pelo apoio, puxões de orelha, companheirismo, amizade, amor sem medida, inúmeras revisões do TCC e mais mil e uma coisas.

Aos amigos que fiz durante esses cinco anos de convivência, pelo apoio, risadas e companhia sem igual.

Aos professores que se dedicaram e ajudaram a construir o conhecimento, incentivando sempre o nosso crescimento.

Ao meu orientador, por me conduzir durante esse trajeto, norteando as decisões que precisei tomar ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

A todos que fizeram parte do meu período de estágio, por me apresentarem a engenharia que não vemos em sala de aula, contribuindo enormemente para a minha formação como profissional.

Agradeço a cada um que, direta ou indiretamente, fez parte dessa caminhada.

Resumo

A crescente industrialização vem aumentando o consumo das matérias primas renováveis e não renováveis. Esse ritmo de consumo, a longo prazo, pode ocasionar a escassez de alguns recursos. Dentre os insumos não renováveis, a mais presente nos diversos segmentos são os metais, com destaque para o zinco, que apresenta alta resistência a corrosão em qualquer ambiente, sendo empregado como metal de sacrifício, protegendo outros metais. Esse tipo de material permite que a sua reciclagem seja feita infinitamente, sem que haja perda de propriedades, o que abre uma gama de possibilidades de estratégias para reciclagem do zinco. Devido a esse fator, esta pesquisa tem por objetivo analisar as principais estratégias que estão sendo utilizadas para a recuperação de zinco em resíduos, comparando-as em termos de processos empregados e resultados obtidos. Para alcançar o objetivo principal, serão elencadas as propriedades e aplicações do zinco, aprofundados os conhecimentos no processo de galvanização, compreendidas as técnicas empregadas para a recuperação de zinco e comparados os trabalhos realizados por cada autor estudado. Trata-se de uma pesquisa de cunho bibliográfico que aborda as características do elemento Zinco, a sua produção, o processo de galvanização e as metodologias empregadas para reciclagem do zinco. Ao analisar os trabalhos realizados nesta área, foi possível identificar que os principais pontos que impactaram diretamente no rendimento da recuperação de zinco foram o tempo de decapagem, a concentração do reagente e a temperatura de reação.

Palavras chave: Matérias primas, zinco, reciclagem, resíduos, galvanização.

Abstract

The growing industrialization has been increasing the consumption of renewable and non-renewable raw materials. This consumption rhythm, can cause the scarcity of some raw materials. Among the non-renewable raw materials, the most present in the various segments are metals, especially zinc, which has high resistance to corrosion in any environment, being used as a sacrifice metal, protecting other metals. This type of material allows it to be recycled infinitely, without loss of properties, which opens up a range of possibilities for zinc recycling strategies. Due to this factor, this research aims to analyze the main strategies that are being used for the recovery of zinc in residues, comparing them in terms of processes used and results obtained. To achieve the main objective, the properties and applications of zinc will be listed, deepening the knowledge in the galvanizing process, understanding the techniques used for zinc recovery and comparing the works carried out by each author studied. It is a bibliographic research that addresses the characteristics of the element Zinc, its production, the galvanizing process and the methodologies used for recycling zinc. By analyzing the work carried out in this area, it was possible to identify that the main points that directly impacted the zinc recovery yield were the pickling time, the reagent concentration and the reaction temperature.

Keywords: Raw materials, zinc, recycling, waste, galvanizing.

Lista de abreviaturas

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

MME – Ministério de Minas e Energia

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

IZC – Instituto de Metais não Ferrosos

EAF – Eletric arc furnace (Forno elétrico a arco)

ICP – Inductive Coupling Plasma (Plasma por acoplamento indutivo)

Lista de figuras

Figura 1 – Fluxograma de blocos ilustrando processo produtivo considerando recursos naturais ilimitados.	9
Figura 2 – Fluxograma de blocos ilustrando processo produtivo considerando recursos naturais limitados	10
Figura 3 – Utilização mundial de zinco por setores	11
Figura 4 – Valores correspondentes à tonelada do zinco 98% puro, em reais	12
Figura 5 – Produção mundial de zinco	14
Figura 6 – Fluxograma do processo de produção do zinco	15
Figura 7 – Fluxograma do processo de galvanização	16
Figura 8 – Fluxograma de blocos representando a recuperação de zinco por rota ácida	21
Figura 9 – Fluxograma de blocos representando a recuperação de zinco por rota alcalina	22
Figura 10 – Fluxograma de blocos dos processos realizados por Carvalho et al. (2018) para a recuperação do zinco.	22

Lista de quadros

Quadro 1 – Quadro comparativo entre as metodologias e resultados **28**
obtidos por cada autor analisado.

Sumário

1. Introdução	11
2. Objetivo	14
2.1. Objetivos específicos	15
3. Referencial teórico	15
3.1. Zinco	15
3.1.1. Propriedades	15
3.1.2. Produção de zinco	16
3.2. O processo de galvanização	18
3.4. Reciclagem de zinco.....	19
3.5. Forno elétrico a arco (EAF).....	19
4. Metodologia.....	20
4.1. Etapas da pesquisa.....	20
5. Discussão.....	21
5.1. Análises prévias e preparo das amostras	22
5.2. Recuperação de zinco por rota ácida	23
5.3. Recuperação de zinco por rota alcalina.....	24
5.4. Eletrólise do zinco.....	26
5.5. Resultados obtidos por autor	27
6. Conclusão	29

1. Introdução

A crescente industrialização ao redor do mundo vem aumentando o consumo de insumos, renováveis e não renováveis. De acordo com Boehm (2018) a humanidade já consome os recursos naturais a uma taxa maior que a de recuperação do planeta. Esse ritmo de consumo, a longo prazo, poderá ocasionar a escassez e até ausência de determinadas matérias primas importantes para a vida como a conhecemos.

Um tipo de recurso não renovável muito presente em diversos setores econômicos são os metais. Os quatro metais mais consumidos no mundo são o ferro, alumínio, cobre e zinco. (IBRAM, 2012)

Para reduzir retirada direta dos metais, uma alternativa promissora é investir na reciclagem dos mesmos. Os sistemas de produção padrão não investem em reciclagem e tomam a matéria prima como recurso ilimitado. Além de causar sérios impactos ao meio ambiente, sofrem também impactos financeiros já que há perdas de material durante o processo. A figura 1 demonstra o sistema de produção considerando que os recursos naturais são ilimitados.

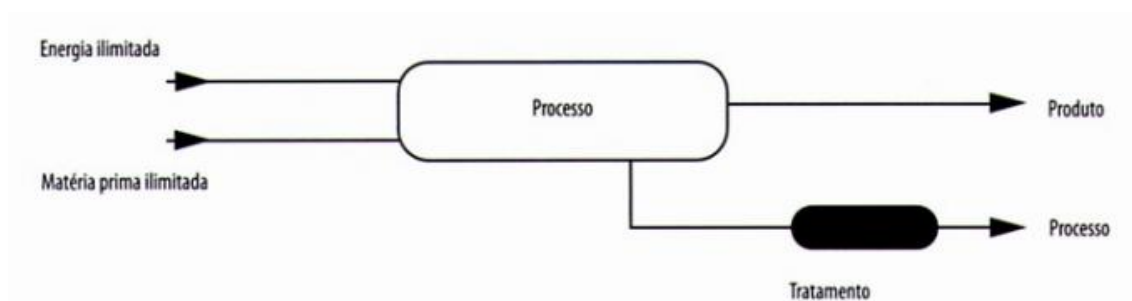


Figura 1. Fluxograma de blocos ilustrando processo produtivo considerando recursos naturais ilimitados. Fonte: Giannetti, 2007

No fluxograma, a energia utilizada no processo e a matéria prima são vistos como ilimitados, ou seja, que estão sempre à disposição, de maneira infinita. Dessa forma, utiliza-se os recursos para a obtenção de determinado produto e, tudo que é gerado de maneira secundária, ou seja, subproduto, é apenas tratado e descartado.

No entanto, é possível acrescentar etapas de reciclagem durante o processo, tornando menor o consumo total da energia e matéria prima. A figura

2 ilustra o mesmo processo, considerando os recursos como finitos e aplicando estratégias para recuperar subprodutos ao longo da produção.

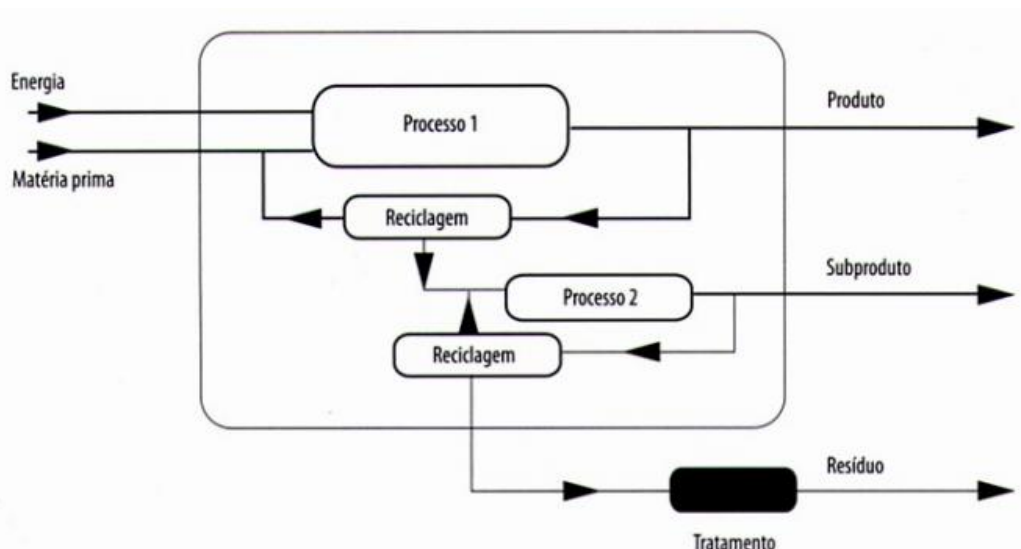


Figura 2. Fluxograma de blocos ilustrando processo produtivo considerando recursos naturais limitados. Fonte: Giannetti, 2007

Pode-se observar que, no fluxograma apresentado na figura 2, há etapas de reciclagem ao longo do processo, retornando para etapas anteriores os insumos que seriam descartados por fatores inerentes ao processo. Além disso, há também a geração de um subproduto passível de comercialização. Os resíduos que não possuem valor agregado, são submetidos a tratamentos e destinados corretamente ao local de descarte.

A reciclagem dos subprodutos está diretamente correlacionada com as questões ambientais, já que reduz a geração de resíduos ao final do processo e também minimiza a utilização do insumo.

Considerando os processos apresentados nos fluxogramas, é possível inferir que, quanto mais resíduos são gerados, mais perdas econômicas ocorrem a longo prazo, pois há perda de insumos durante o processo, tanto de matérias primas como água e energia e gastos maiores com destinação e tratamento dos resíduos.

Em processos que utilizam insumos de alto valor agregado, é desejável aplicar medidas que reduzam ou reutilizem os materiais não conformes gerados ao longo do processo. Um exemplo de processo que envolve matérias primas com alto valor agregado é a zincagem de peças metálicas.

Sendo um dos metais mais utilizados mundialmente, a reciclagem do zinco pode ser avaliada para aplicação dentro do próprio processo, reduzindo as perdas do metal em materiais fora da especificação. Essa reciclagem do zinco pode ser feita infinitamente, sem que o material perca as suas propriedades químicas e físicas. (MME, 2009)

O zinco está presente em diversas áreas, como o revestimento de peças metálicas, indústria automobilística, eletrodomésticos, construção civil, torres de energia e telefonia, dentre inúmeras outras aplicações. No entanto, a parcela mais expressiva do consumo do zinco, a nível mundial, é a galvanização, como pode ser visto no gráfico da figura 3. (IBRAM, 2012)

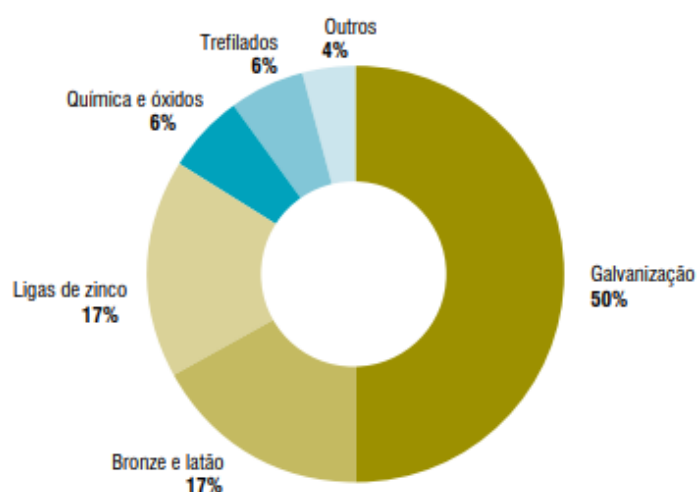


Figura 3. Utilização mundial de zinco por setores. Fonte: IBRAM, 2012

Representando 50% do consumo mundial de zinco, a galvanização se trata do processo de recobrimento de peças metálicas utilizando um outro metal de sacrifício que, de acordo com Wiercinski (2015), confere ao metal resistência à corrosão. O zinco age como ânodo, doador de elétrons, prevenindo a corrosão do metal que está sendo protegido.

Devido a essas propriedades, o metal apresenta alto valor agregado, representando uma parcela significativa do custo de produção de peças galvanizadas. A variação do valor da tonelada de zinco, em reais, entre outubro de 2019 e setembro de 2020 pode ser observada na figura 4. No mês de setembro, o valor da tonelada do zinco estava em 2.440 dólares.

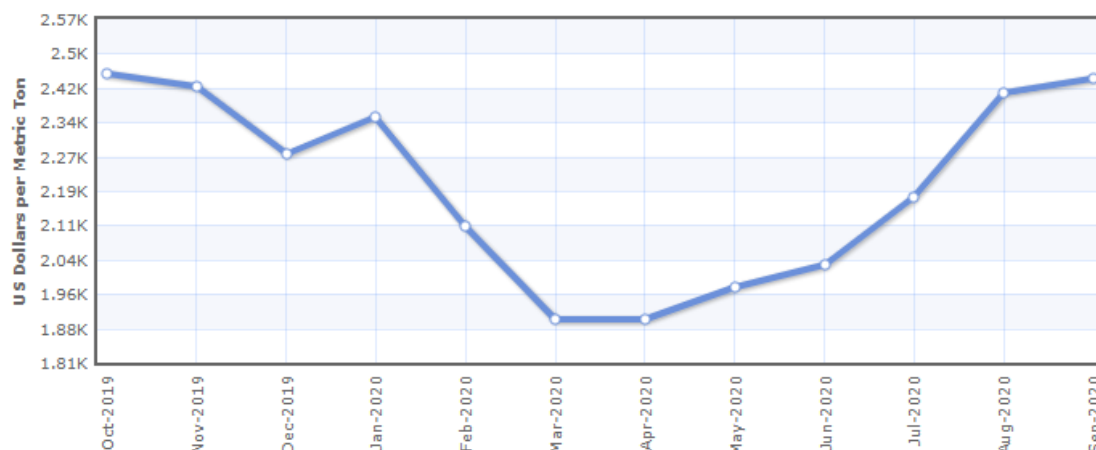


Figura 4. Valores correspondentes à tonelada do zinco 98% puro, em reais. Fonte: Indexmundi, 2020

Levando em consideração o alto custo do zinco e as questões ambientais envolvidas, considera-se pertinente investir na reciclagem desse material. Segundo Sobral *et al.* (2018), cerca de um terço da produção de zinco metálico puro advém de fontes secundárias, exemplos delas são a recuperação proveniente de resíduos metálicos.

O zinco pode ser reciclado diretamente a partir da sucata metálica, passando por um processo de decapagem para remoção da camada superficial do zinco, ou através da poeira gerada pelo forno elétrico a arco (EAF), onde ocorre o recozimento da sucata de aço. Nesse forno, o zinco presente na sucata passa para o estado gasoso, e pode ser recuperado.

Utilizando os conceitos de reciclo ao longo do processo, apresentados na figura 2, o presente trabalho tem como objetivo analisar as principais técnicas empregadas para a recuperação de zinco em sucata metálica, no intuito de descobrir quais as metodologias com melhor rendimento em termos de recuperação do metal.

2. Objetivo

Analisar as principais estratégias que estão sendo utilizadas para a recuperação de zinco em sucata metálica, comparando-as em termos de processos empregados e resultados obtidos.

2.1. Objetivos específicos

- Elencar as propriedades e aplicações do zinco;
- Conhecer o processo de galvanização;
- Compreender as técnicas empregadas para a recuperação de zinco;
- Comparar os trabalhos realizados por cada autor estudado.

3. Referencial teórico

Teixeira, Zamberlan e Rasia (2009) defendem que o referencial teórico consiste em apresentar estudos realizados por outros autores e conceitos cientificamente consolidados a respeito do tema. Portanto, este tópico tratará do elemento zinco, apresentando as suas propriedades, a produção desse metal, explicará também o processo de galvanização e como ocorre de maneira geral a reciclagem do zinco.

3.1. Zinco

3.1.1. Propriedades

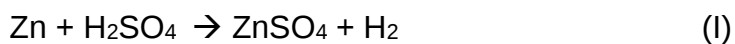
O zinco é o 24º elemento mais abundante na terra. De modo geral, o mineral é encontrado em compostos associados ao chumbo, prata e ferro, em forma de sulfetos. (SANTOS, 2010)

Apresenta como característica um metal de cor cinza, com dureza de 2,5 e boa condutividade térmica. A principal característica desse elemento é a alta resistência à corrosão em qualquer ambiente, devido a isso ele é amplamente utilizado como cobertura em peças metálicas, garantindo maior vida útil da peça. (OLIVEIRA; BRASIL & ANJOS, 2016)

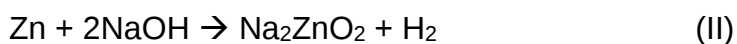
Na tabela periódica, o zinco apresenta número atômico 30 e está localizado entre os metais de transição. Seus pontos de fusão e ebulição são 692,68 K e 1180 K, respectivamente, sua massa molar corresponde a 65,38 g/mol e a sua densidade a 7140 kg/m³. (OLIVEIRA; BRASIL & ANJOS, 2016)

O zinco é considerado um material anfótero, ou seja, ele é capaz de reagir tanto em meios ácidos quanto em meios alcalinos. Ao reagir em meio ácido, o

zinco se apresenta na forma de cátion Zn^{2+} . A equação I apresenta a reação do metal com o ácido sulfúrico.



Já na reação em meio alcalino, o zinco apresenta a forma de ânion ZnO_2^{2-} e a equação II demonstra esse comportamento, ao reagir o zinco com hidróxido de sódio. (OLIVEIRA; BRASIL & ANJOS, 2016)



3.1.2. Produção de zinco

De acordo com dados apresentados pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), em 2012 a extração desse mineral foi concentrada na Ásia, representando 61% de toda a produção mundial de zinco. A produção por continente está expressa na figura 5.

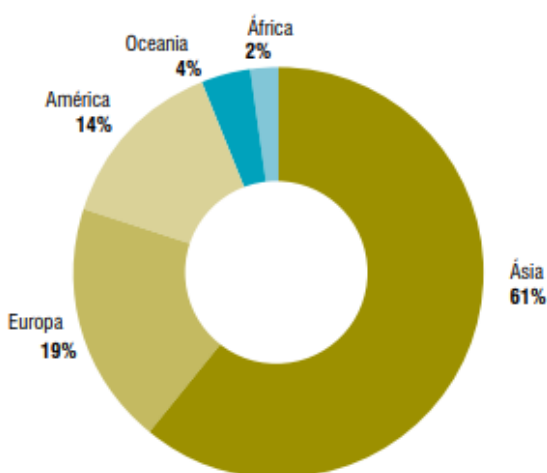


Figura 5. Produção mundial de zinco. Fonte: DNPM, 2012

Os dados do IBRAM apontaram que a produção mundial do metal chegou a 12,4 milhões de toneladas. O Brasil contribui com cerca de 284,4 mil toneladas por ano, deixando-o na décima segunda posição do ranking de produtores de

zinco. A produção mundial do metal chega a 12,4 milhões de toneladas. (USGS, 2012 apud IBRAM, 2012)

Esse metal não é retirado da natureza em sua forma pura, sendo necessário um pré-processamento para isolar o zinco na forma metálica. Este processo de produção do zinco está representado por meio de fluxograma na figura 6.

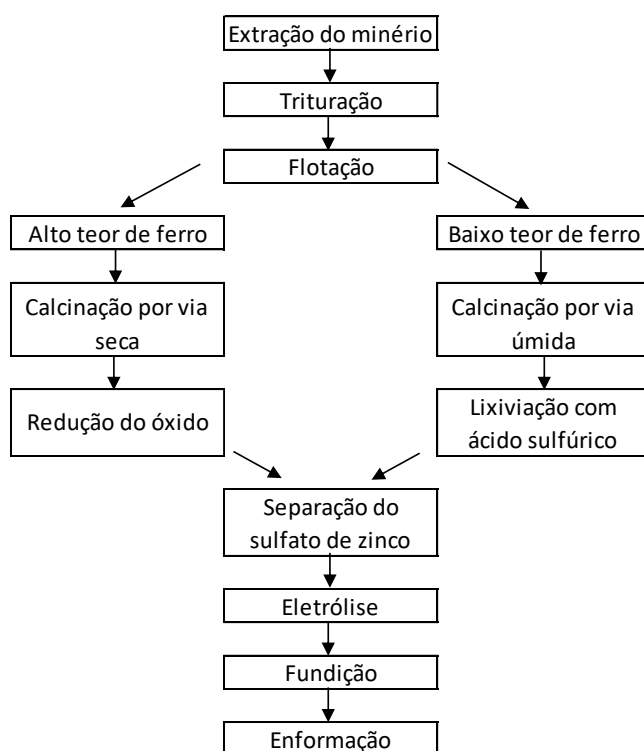


Figura 6. Fluxograma do processo de produção do zinco. Fonte: Produzido pelo autor, com base no processo descrito por Santos (2010).

A produção do zinco inicia na extração do mineral. Após extraídos, eles são triturados e passam por flotação, para obtenção do mineral concentrado. Após concentrado, os minerais com alto teor de ferro passam por uma calcinação por via seca, a fim de oxidar o sulfeto em óxido. Em seguida, ocorre a redução do óxido por meio de carbono. (SANTOS, 2010)

Por sua vez, os que apresentam baixo teor de ferro são submetidos à calcinação por via úmida, para a obtenção do óxido. Os óxidos são então lixiviados por meio de ácido sulfúrico diluído. O produto lixiviado passa por uma separação, para isolar o sulfato de zinco e então passa por eletrólise com ânodo

de chumbo e cátodo de alumínio, no qual é captado o zinco. O zinco é então fundido e enformado para a comercialização. (SANTOS, 2010)

3.2. O processo de galvanização

A galvanoplastia, ou galvanização, é o processo que confere a um determinado material metálico, proteção contra intempéries, ação de produtos químicos ou água salgada. Essa proteção é dada pela deposição de um metal sobre o que se deseja proteger, garantindo ao produto, maior durabilidade e melhor aspecto. (MOREIRA, 2010)

O processo da galvanização, de acordo com Wiercinski (2015), é dividido em três etapas. A primeira é o pré-tratamento, em que é feito um banho, geralmente alcalino, para remover vestígios de graxa e outros contaminantes que estejam aderidos na superfície do material. Em seguida, a peça passa por um segundo banho, dessa vez em meio ácido, para remover óxidos, ferrugem ou outras incrustações. Posteriormente, as peças passam por um enxágue e neutralização, para evitar contaminação das etapas seguintes, usando reações com soluções fracas de ácidos ou bases. (WIERCINSKI, 2015)

A segunda etapa é a zincagem, em que o zinco é depositado na superfície do material. Em seguida, a peça passa novamente por enxágue, e por último, por um processo de passivação, geralmente com ácido nítrico, que confere a ela um acabamento espelhado. (WIERCINSKI, 2015)

O IZC - Instituto de Metais não Ferrosos, acrescenta o processo de fluxagem na galvanoplastia. Essa etapa ocorre antes da entrada do material no banho de zinco e é encarregado de remover da superfície do material qualquer impureza, melhora a molhabilidade do material pelo zinco fundido e evita oxidação. (IZC, 2014)

O fluxograma presente na figura 7 resume as etapas do processo de galvanização.

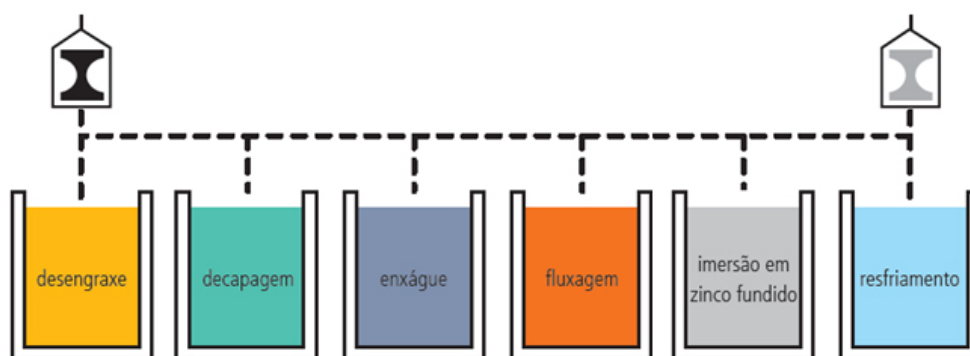


Figura 7. Fluxograma do processo de galvanização. Fonte: IZC, 2014

3.4. Reciclagem de zinco

O zinco é reciclado a partir de diversos materiais, já que recobre itens dos mais diversos segmentos. Para cada tipo de material há um meio diferente de realizar a recuperação, dentre elas há a fusão seletiva, separação manual, por peneiras, flotação ou lixiviação por rota ácida ou alcalina. (SOBRAL *et al.* 2018)

Independente do processo escolhido para a reciclagem, o zinco pode ser reutilizado novamente para a galvanização de peças metálicas sem perder as suas propriedades, mesmo se for recuperado de sucatas já deterioradas. (SOBRAL *et al.* 2018)

A reciclagem desse metal é de suma importância, dado que se caracteriza como uma prática sustentável que reduz o acúmulo de materiais considerados inservíveis e também minimiza a necessidade de extração do mineral. Essa recuperação reduz o déficit entre a demanda e a produção do zinco, reduzindo os preços do material. (SOBRAL *et al.* 2018)

3.5. Forno elétrico a arco (EAF)

O forno elétrico a arco (EAF) é utilizado para fusão de carga metálica, utilizando energia elétrica, que se transforma em energia térmica através de carga alternada. (REIS, 2017)

Segundo a Gerdau (2019), o forno elétrico a arco é utilizado para a reciclagem de sucata, transformando-a novamente em aço de qualidade, reduzindo a utilização de minério de ferro, carvão mineral, cal e CO₂.

O forno EAF alcança temperaturas superiores a 5000 °C, necessária para fundir o aço. Para alcançar essa temperatura, além da energia elétrica utiliza-se também lanças de oxigênio, queimadores de gás e injetores de carbono. (GERDAU, 2019)

4. Metodologia

No presente estudo, a proposta metodológica se apresenta como uma pesquisa de natureza bibliográfica, que é uma sistematização das diferentes formas das colaborações científicas que foram ou estão sendo realizadas acerca de pesquisas e descobertas sobre o referido objeto. (OLIVEIRA, 2002)

Segundo Severino (2007), a pesquisa bibliográfica se dá a partir de registros disponíveis, oriundos de pesquisas realizadas anteriormente. Os dados são acessados através de documentos, como livros e revistas, artigos, teses, ou outros materiais publicados. Dessa forma, os textos desenvolvidos pelos autores que trabalharam no tema se tornam a fonte da pesquisa bibliográfica.

Esta pesquisa reúne as técnicas de recuperação de zinco de sucatas metálicas que vem sendo estudadas e comparando-as para verificar quais são os processos com melhor eficiência na recuperação do zinco.

Para tal, se faz necessário o levantamento de dados em documentos já produzidos como artigos, livros, revistas científicas e projetos (sejam eles de cunho digital ou impresso). Os materiais a serem selecionados serão os que apresentarem dados ou experimentos realizados com o objetivo de recuperar o zinco de peças metálicas para reutilização.

Posteriormente, as metodologias e resultados dos trabalhos analisados serão comparados para que seja possível compreender qual é o melhor método, dentre os trabalhados nas pesquisas, para a recuperação do zinco.

4.1. Etapas da pesquisa

Para reunir os projetos que estão sendo desenvolvidos na comunidade científica, é necessário coletar no *locus* de pesquisa, os projetos para preparação dos dados a serem utilizados. Neste caso, o *locus* pode ser entendido como

qualquer veículo de publicação de trabalhos científicos, como plataformas de periódicos, revistas digitais, sites e bibliotecas online.

Os sujeitos envolvidos serão os materiais obtidos dessas fontes de pesquisa, podendo ser artigos, teses, trabalhos de conclusão de curso, dissertações, livros, periódicos científicos. Estes fornecerão as informações detalhadas sobre o processo que está sendo estudado.

Para que os trabalhos possam ser analisados, separando apenas os que se enquadrem no propósito da pesquisa, será feita uma leitura crítica de cada um.

Após essa etapa, os materiais separados como adequados para a pesquisa serão analisados de maneira mais detalhada, encontrando assim contestações mais recorrentes, ideias semelhantes e as maiores dificuldades de cada um dos projetos, separando-os em categorias. Posteriormente, serão elaboradas conclusões acerca de cada dado obtido, proporcionando a oportunidade de comparação entre os mesmos e mensurando os quesitos mais relevantes de cada um e seus feitos.

Esse pré-tratamento dos materiais coletados será aplicado para obtenção dos dados necessários para as etapas de elencar as propriedades e aplicações do zinco, conhecer o processo de galvanização e compreender as técnicas empregadas para a recuperação de zinco.

Após selecionados os trabalhos que serão utilizados como base para a comparação, os dados principais e parâmetros de cada um irão ser destacados para que se torne clara as diferenças e pontos em comum para cada um dos trabalhos bem como o resultado final obtido por cada autor.

5. Discussão

Os resultados obtidos nessa pesquisa advêm da análise e comparação de trabalhos desenvolvidos por pesquisadores dentro do tema proposto, no caso, a recuperação do zinco a partir de sucata metálica. Para isso, as metodologias e resultados dos trabalhos selecionados serão apresentados e comparados, visando evidenciar quais foram as dificuldades e êxitos em cada

um deles, facilitando assim que trabalhos nessa área de estudo sejam desenvolvidos posteriormente.

Ao estudar os trabalhos selecionados, observa-se que existem pontos em comum entre eles. Todos os autores analisados evidenciaram os parâmetros de rota de decapagem utilizada, composição e concentração da solução decapante, meio utilizado para separação ou quantificação do zinco da lixívia. O tempo de decapagem é abordado por quatro dos cinco autores utilizados.

Esses pontos de congruência entre os trabalhos servirão como base para a análise comparativa por serem apontados pelos autores como etapas críticas no processo de recuperação de zinco de sucatas metálicas.

5.1. Análises prévias e preparo das amostras

Antes de efetuar os processos para a recuperação do zinco é necessário conhecer o material que está sendo utilizado como fonte de zinco, principalmente o teor de zinco. Em sua pesquisa, Sobral *et al.* (2018) utiliza em seu experimento sucadas de flandes. O material foi previamente cortado em amostras de 2x2 cm.

Para conhecer o teor de zinco, a análise gravimétrica foi realizada, comparando as massas iniciais e finais de uma amostra, submetendo-a a uma decapagem com solução de ácido sulfúrico concentrado. Os autores adicionaram 500 mL de solução ácida em 230,53 g de amostra de sucata. Após a completa retirada do zinco, a amostra foi lavada seca e pesada, então as massas iniciais e finais foram comparadas.

Sobral *et al.* (2018) também avaliou o tempo necessário para que o zinco fosse completamente removido das amostras, tanto na via alcalina quanto ácida, testando a concentração das soluções em 0,1 M e 0,2 M, tempo de extração de 30 e 60 minutos em tambor rotatório a 30 e 60 rpm, retirando amostras a cada 10 minutos para avaliação.

Em Carvalho *et al.* (2018), foram utilizadas chapas de aço galvanizado com tamanhos de 24x26 mm. As placas foram lavadas com água destilada e álcool etílico antes da análise de revestimento. A massa do revestimento de zinco foi avaliada através de gravimetria. As amostras foram previamente pesadas, posteriormente foram adicionados 5 mL de solução de Sb_2O_3 em 50

mL de HCl PA e 100 mL de HCl 50% V/V. As amostras foram imersas na solução até o desprendimento de hidrogênio, por fim, seu peso final foi verificado.

No processo proposto por Leeker *et al.* (1992), para recuperação do zinco de sucatas de aço galvanizado, o autor considera que os resíduos podem vir com substâncias orgânicas indesejáveis em sua superfície, e para isso devem ser previamente limpos, evitando assim a contaminação da solução de decapagem, podendo ser sabão, óleos ou tintas.

No processo proposto por Palimaka *et al.* (2018), o material utilizado foi poeira com 33 % de zinco em massa, na forma de ZnO, oriunda do processo de recozimento de peças de aço galvanizado desgastadas em forno elétrico a arco. Como pré-tratamento, a poeira foi submetida a uma lavagem inicial com água para remoção de resíduos de cloreto, sódio, potássio e cálcio. Essa lavagem foi realizada sob agitação constante de 400 rpm a 60°C, durante 120 minutos. Em seguida, a solução foi filtrada a vácuo e seco.

Haamed *et al.* (2015) também utiliza a poeira oriunda do forno de recozimento, rica em Zn, como resíduo base para a recuperação do zinco, no entanto, não apresenta nenhuma metodologia empregada para pré-tratamento das amostras.

5.2. Recuperação de zinco por rota ácida

A decapagem do material por via ácida gera uma solução contendo sulfato ferroso (FeSO_4) e sulfato de zinco (ZnSO_4). Sobral *et al.* (2018) utilizou o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para oxidar o sulfato ferroso a sulfato férrico, posteriormente, os autores adicionaram ao meio hidróxido de sódio, visando aumentar o pH para 3, para que, na presença de forte agitação, o ferro fosse precipitado como oxi-hidróxido férrico $\text{FeO}(\text{OH})$. A decapagem do material com o ácido sulfúrico, realizada por Sobral *et al.* (2018), foi capaz de remover toda a cobertura de zinco, permitindo também a recuperação de subprodutos férricos de alto valor agregado.

Para ilustrar o processo empregado na rota ácida, os autores apresentam um fluxograma de blocos, que pode ser visto na figura 8, com os passos seguidos durante a experimentação.

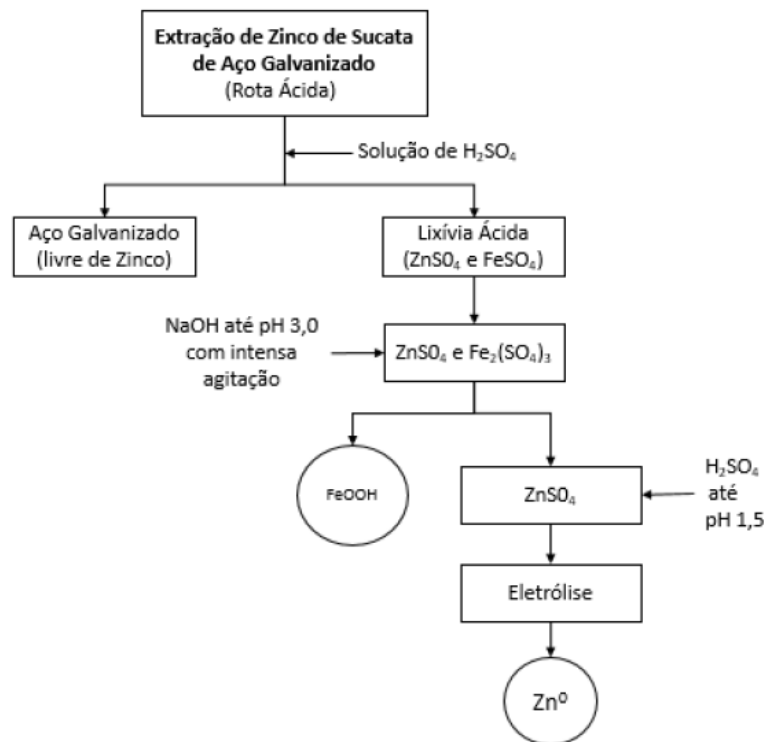


Figura 8. Fluxograma de blocos representando a recuperação de zinco por rota ácida. Fonte: Sobral *et al.* (2018)

A lixiviação por rota ácida realizada por Carvalho *et al.* (2018) utilizou solução de ácido sulfúrico a 1 mol/L e 0,5 mol/L. Durante o processo, amostras da lixívia foram retiradas a cada 10 minutos para titulação do Zn^{2+} com EDTA.

No trabalho apresentado em Haamed *et al.* (2015) a recuperação do zinco da poeira do forno de recozimento de aço é utilizada a rota ácida, utilizando uma solução a 1M de ácido sulfúrico, a 80°C durante 90 minutos.

5.3. Recuperação de zinco por rota alcalina

No processo de recuperação do zinco via rota alcalina ocorre a dissolução do zinco na solução, obtendo a peça livre de zinco e uma solução de zincato de sódio (Na_2ZnO_2). Sobral *et al.* (2018) aponta que nessa rota não há contaminação da solução pelo ferro, já que a solução alcalina não ataca o aço carbono. Em seu experimento, os autores utilizaram o hidróxido de sódio. Sobral *et al.* (2018) observou que, nessa rota, o zinco forma óxido de zinco (ZnO), que não reage com a solução alcalina. Os autores expressaram o procedimento

realizado pela rota alcalina através de um diagrama de blocos, expresso na figura 9.

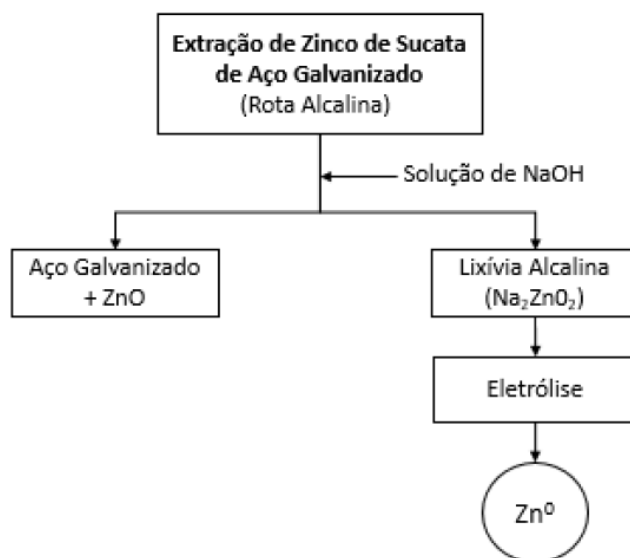


Figura 9. Fluxograma de blocos representando a recuperação de zinco por rota alcalina. Fonte: Sobral *et al.* (2018)

Carvalho *et al.* (2018) utiliza para a lixiviação por rota alcalina o hidróxido de sódio a 1 mol/L e procede o experimento da mesma forma que na rota ácida. Para ilustrar os procedimentos realizados nas duas rotas, os autores apresentam um fluxograma de blocos, que pode ser visto na figura 10.

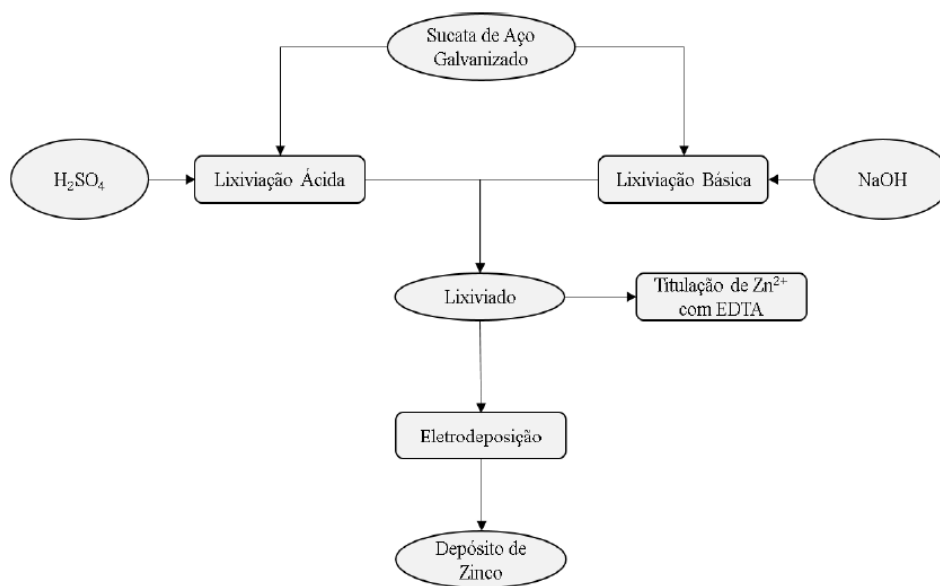


Figura 10. Fluxograma de blocos dos processos realizados por Carvalho *et al.* (2018) para a recuperação do zinco. Fonte: Carvalho *et al.* (2018)

No processo proposto em Lekeer *et al.* (1992) uma solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) a 5M e nitrato de sódio (NaNO₃) com concentração variando entre 0.0 – 0.08M, é utilizada em 3 tanques, em contrafluxo à direção de movimentação das sucatas de aço galvanizado. Após chegar ao último tanque, o material retorna para o primeiro e circula novamente pelos tanques, afim de retirar toda a camada de zinco.

Palimaka *et al.* (2018) optaram pela rota alcalina para recuperação do zinco, em forma de ZnO da poeira do forno. Os autores utilizaram o hidróxido de sódio, variando a concentração entre 2, 4 e 6M, com aquecimento variando entre 20, 50 e 80°C, agitação a 400 rpm e tempo de decapagem de 120 minutos.

5.4. Eletrólise do zinco

Os trabalhos analisados utilizam como método final para a captação do zinco metálico a eletrólise, seja em solução ácida ou alcalina. Sobral *et al.* (2018) caracteriza a eletrólise como o processo em que ocorre a transferência de cargas entre eletrodos, podendo a espécie doar ou receber elétrons do eletrodo. Em seu trabalho, Sobral *et al.* (2018) empregou a eletrólise da solução para captação de zinco, na rota ácida, após a precipitação do ferro na forma de oxi-hidróxido férrico FeO(OH), obtendo assim nos eletrodos, o zinco na forma pura.

Sobral *et al.* (2018) utilizou uma célula eletrolítica com dois anodos inertes DAS (dimensionally stable anode) de titânio coberto com óxido de irídio IrO₂ e cátodo de alumínio, no qual houve a deposição do zinco. A eletrólise foi empregada pelos autores na lixivia apresentando 50 g/L de zinco e 1 de pH. Aplicaram ao meio a voltagem de 4,3 V, gerando uma corrente de 4,5 ampères, com auxílio de corrente externa.

Os autores calcularam também o consumo de energia a partir da voltagem da célula, medida com um multímetro.

Por sua vez, Carvalho *et al.* (2018) utilizou uma célula eletrolítica com anodo de titânio e catodo feito a partir de fio de zinco em forma espiral. Os autores aplicaram através de tensão uma densidade de corrente de 10 A/dm² durante 30 minutos.

No processo proposto por Leeker *et al.* (1992), a célula eletrolítica é formada por placas de ânodo a cerca de 32mm de distância de cada cátodo,

para que o zinco possa se fixar dos dois lados da placa catódica. A corrente utilizada foi de 7,9 amperes e a solução ficou em repouso na célula por 1,27 horas.

Já a célula eletrolítica utilizada por Palimaka *et al.* (2018) era composta por um ânodo de grafite, enquanto o cátodo era feito de aço inoxidável. A solução foi submetida a uma densidade de corrente de 250 A/m² por 90 minutos.

5.5. Resultados obtidos por autor

Em sua pesquisa, Sobral *et al.* (2018) utilizou as duas rotas, ácida e alcalina, variando os tempos de decapagem e as concentrações da solução decapante. O autor encontrou os melhores rendimentos de recuperação de zinco, ao utilizar a rota ácida, submetendo o material a decapagem em ácido sulfúrico, a 0,1 M por 60 minutos e ao utilizar a rota alcalina, usando solução de hidróxido de sódio a 0,3 M por 60 minutos. Para a rota ácida, o autor conseguiu recuperar 94,14% do zinco e para a alcalina, 15,70%.

Carvalho *et al.* (2018) também utilizou as duas rotas de recuperação, com meio ácido e meio alcalino, utilizando para a rota ácida uma solução de ácido sulfúrico a 1 mol/L por minutos e para a rota alcalina, hidróxido de sódio a 1 mol/L pelo mesmo tempo. Através desse processo, o autor recuperou 63,80% do zinco na rota ácida e 0,80% na rota alcalina.

Já Leeker *et al.* (1992), utilizou apenas a rota alcalina, apresentando, no entanto, um sistema de banhos sequenciais utilizando o hidróxido de sódio a 5M e o nitrato de sódio, como agente oxidante, a 0,08M, pelos quais o material circularia até a completa remoção do zinco, chegando ao final da primeira sequência de banhos com 75% da camada de zinco removida, retirando os 25% restantes na segunda passagem pelos banhos. Ao finalizar o procedimento, o autor recuperou entre 90 e 99% do zinco presente na lixívia, não apresentando um valor exato.

Por sua vez, Palimaka *et al.* (2018) utilizou como resíduo a poeira gerada no forno EAF, de recozimento de aço, optando pela rota alcalina. Os autores utilizaram uma solução de hidróxido de sódio a 6M, mantida a 80° C durante 120 minutos. Para a recuperação do zinco do meio aquoso, submeteram a solução à eletrólise, utilizando uma célula eletrolítica composta por um ânodo de grafite

e cátodo de aço inoxidável, a uma densidade de corrente de 250 A/m² por 90 minutos. Através dessa metodologia, os autores obtiveram um rendimento de 88% de recuperação de zinco.

Haamed *et al.* (2015) também utilizou a poeira do forno EAF, no entanto, os autores optaram pela rota ácida, usando o ácido sulfúrico a 1M como solução decapante a 80°C por 90 min. Para a quantificação do zinco extraído, os autores utilizaram a espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma – ICP. Obtiveram um rendimento de 76% de recuperação do metal.

Visando tornar possível a análise dos resultados de cada um dos trabalhos científicos analisados, as principais características de cada um foram organizadas em forma de quadro comparativo, como mostra o quadro 1, com o intuito de avaliar qual a metodologia obteve maior percentual de recuperação de zinco.

Quadro comparativo							
Método	1	2	3	4	5	6	7
Autores	Sobral <i>et al.</i> (2018)		Carvalho <i>et al.</i> (2018)		Leeker <i>et al.</i> (1992)	Palimaka <i>et al.</i> (2018)	Haamed <i>et al.</i> (2015)
Resíduo utilizado	Sucata metálica	Sucata metálica	Sucata metálica	Sucata metálica	Sucata metálica	Poeira de forno EAF	Poeira de forno EAF
Rota utilizada	Rota ácida	Rota alcalina	Rota ácida	Rota alcalina	Rota alcalina	Rota alcalina	Rota ácida
Solução de decapagem	H ₂ SO ₄ a 0,1 M	NaOH a 0,3 M	H ₂ SO ₄ a 1 mol/L	NaOH 1 mol/L	3 tanques com NaOH 5M + NaNO ₃ 0.08M com recirculação	NaOH 6M a 80°C	H ₂ SO ₄ a 1 M a 80°C
Tempo de decapagem	60 minutos	60 minutos	30 minutos	30 minutos	-	120 minutos	90 min
Método para separação/quantificação do zinco removido	Eletrolise	Eletrolise	Eletrolise	Eletrolise	Eletrolise	Eletrolise	Espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma - ICP
Célula eletrolítica	Dois anodos inertes DAS (dimensionally stable anode) de titânio coberto com óxido de irídio IrO ₂ e cátodo de alumínio. Voltagem de 4,3 V, gerando uma corrente de 4,5 ampères, com auxílio de corrente externa.	Dois anodos inertes DAS (dimensionally stable anode) de titânio coberto com óxido de irídio IrO ₂ e cátodo de alumínio. Voltagem de 4,3 V, gerando uma corrente de 4,5 ampères, com auxílio de corrente externa.	Anodo de titânio e catodo feito a partir de fio de zinco em forma espiral. Os autores aplicaram através de tensão uma densidade de corrente de 10 A/dm ² durante 30 minutos.	Anodo de titânio e catodo feito a partir de fio de zinco em forma espiral. Os autores aplicaram através de tensão uma densidade de corrente de 10 A/dm ² durante 30 minutos.	Placas de ânodo a cerca de 32mm de distância de cada cátodo, para que o zinco possa se fixar dos dois lados da placa catódica. A corrente de 7,9 amperes por 1,27 horas.	Ânodo de grafite e cátodo de aço inoxidável. A solução foi submetida a uma densidade de corrente de 250 A/m ² por 90 minutos.	-
Percentual de recuperação de zinco	94,14%	15,70%	63,80%	0,80%	90 a 99%	88%	76%

Quadro 1. Quadro comparativo entre as metodologias e resultados obtidos por cada autor analisado. Fonte: Produzido pela autora com base nos trabalhos analisados.

Dentre as metodologias utilizadas para recuperação em sucata metálica, as que obtiveram maior rendimento, em termos de quantidade de zinco recuperada, foram 1 e 5. Sendo que na metodologia 1 foi obtida uma recuperação de 94,14% e na 5, de 90 a 99%.

As metodologias 6 e 7 trataram de recuperação de zinco em poeira de forno EAF. Dentre elas, a de maior rendimento foi a rota alcalina, com 88% de recuperação de zinco, enquanto a rota ácida apresentou 76% de recuperação.

6. Conclusão

Por ser um recurso não renovável, muito utilizado e de alto valor agregado, é imprescindível que esforços para reciclagem do zinco sejam empregados. Diversos estudos nesse campo foram analisados e comparados em termos de metodologia empregada para a recuperação do zinco e percentual de rendimento.

Através do comparativo dos pontos mais relevantes do processo de recuperação, como a rota utilizada, a concentração do agente de decapagem, o tempo de decapagem, foi possível inferir que as duas rotas, ácida e alcalina, podem ser empregadas para a recuperação do zinco a partir de resíduos. No entanto, foi observado ao analisar os estudos que a rota alcalina, para alcançar resultados satisfatórios, demanda processos de maior complexidade, com mais etapas e uso de reagentes em altas concentrações.

Os principais pontos identificados que impactaram diretamente no rendimento foram o tempo de decapagem, a concentração do reagente e a temperatura de reação. O tempo de reação mostrou ter uma influência maior no resultado que a concentração do reagente, visto que nas metodologias 3 e 4 foram utilizadas as mesmas espécies químicas como agente decapante que foram empregadas na 1 e 2, em maior concentração mas utilizando metade do tempo de decapagem e o rendimento obtido foi consideravelmente inferior ao obtido nas metodologias 1 e 2.

Já nas metodologias que utilizavam como resíduo a poeira de forno, os resultados de recuperação foram próximos, 88% para a rota alcalina e 76% para a rota ácida. Essa diferença pode ser atribuída a dois fatores, tempo de decapagem e concentração do reagente. O agente alcalino utilizado se

encontrava em concentração seis vezes maior que o ácido e o tempo de decapagem empregado para a reação com o agente alcalino foi 30 minutos a mais que na rota ácida.

Para avaliar melhor qual das rotas apresenta maior aplicabilidade se faz necessário realizar um estudo econômico, a ser realizado em estudos futuros, que poderá definir qual metodologia possui a melhor relação entre custo e benefício para implementação.

Referências bibliográficas

BOEHM, C. **Consumo de recursos naturais superou o que o mundo pode renovar no ano.** Agência Brasil, 2018. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-08/consumo-de-recursos-naturais-superou-que-o-planeta-pode-renovar-no-ano> Acesso em: 29 de setembro de 2020.

GERDAU. **Conhecendo o forno elétrico a arco.** 2019. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/conhecendo-o-forno-eletrico-a-arco>. Acesso em: 24 de novembro de 2020.

GIANNETTI, B.F.; ALMEIDA, C.M; BONILLA, S.H. **A ecologia industrial dentro do contexto empresarial.** Revista digital Banas Qualidade, Setembro, 2007. Disponível em: http://www.advancesincleanerproduction.net/papers/journals/2007/2007_Banas_ecoindlemp.pdf. Acesso em: 14 de fevereiro de 2020

HAAMED, Z. A. *et al.* **Hydrometallurgical Extraction of Zinc from Indigenous Electric ARC Furnace Dust.** First International Conference on Advanced Material and Process Engineering – AMPE, 2015, p.199. Disponível em: <https://cutt.ly/tgK6pwi>. Acesso em: 08 de novembro de 2020.

IndexMundi. **Zinco Preço Mensal - Real brasileiro por Tonelada.** 2020. Disponível em: <https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=zinco> Acesso em: 10 de outubro de 2020.

IZC, Instituto de Metais não Ferrosos. **O processo de zincagem por imersão a quente.** 2014. Disponível em: <http://www.icz.org.br/o-processo-de-zincagem-por-imersao-a-quente.php> Acesso em: 10 de outubro de 2020.

LEEKER, J. *et al.* **Alkaline leaching of galvanized steel scrap.** United States Patent, US5106467A.1992. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US5106467A/en> .Acesso em: 25 de outubro de 2020.

Ministério de Minas e Energia, MME. **Relatório técnico 83 – Reciclagem de Metais no País.** 2009. Disponível em:

http://www.mme.gov.br/documents/36108/450079/P57_RT83_Reciclagem_de_Metais_no_Paxs.pdf/2c11b09c-fa95-cf3d-2699-5a2efc59cb5b?version=1.0.

Acesso em: 19 de setembro de 2020.

MOREIRA, D.R. **Desenvolvimento de adsorventes naturais para tratamento de efluentes de galvanoplastia**. Dissertação de mestrado em engenharia e tecnologia de materiais. PUCRS, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/3333/1/000424194-Texto+Completo-0.pdf>> Acesso em: 24 de junho de 2020.

OLIVEIRA, Silvio Luiz de. **Tratado de Metodologia Científica: projetos de pesquisa, TGI, TCC, monografias, dissertações e teses**. 1943. São Paulo, Pioneira Thomson Learning, 2002.

PALIMAKA, P. *et al.* **Zinc Recovery from Steelmaking Dust by Hydrometallurgical Methods**. Faculty of Non-Ferrous Metals, AGH University of Science and Technology, 30-059 Krakow, Polônia, 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-4701/8/7/547/htm>> Acesso em: 08 de novembro de 2020.

REIS, K.C. **Aplicação da ferramenta MASP para redução do consumo de areia EBT no forno elétrico a arco de uma siderúrgica**. Juiz de Fora, 2017. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/engenhariadeproducao/files/2016/12/KLISSIAN-CHINAIDER-DOS-REIS-VERS%C3%83O-FINAL.pdf>> Acesso em: 24 de novembro de 2020

SOBRAL, L. G. *et al.* **Recuperação de zinco de sucata de aço galvanizado**. CETEM/MCTIC, Rio de Janeiro, 2018.

TEIXEIRA, E.; ZAMBERLAN, L.; RASIA, P. **Pesquisa em Administração**. Ijuí: Unijuí, 2009.

WIERCINSKI. **Galvanoplastia: Melhorias no processo de zincagem eletrolítica**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi – RS, 2015.

