

# CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DA FLOTAÇÃO DO MINÉRIO DE ZINCO\*

Raquel Húngaro Costa<sup>1</sup>  
Jonathan Tenório Vinha<sup>2</sup>  
Denise Croce Romano Espinosa<sup>3</sup>  
Jorge Alberto Soares Tenório<sup>4</sup>

## Resumo

A demanda de recursos naturais vem crescendo com os anos, porém, o meio ambiente oferece uma quantidade limitada destes recursos para exploração, assim, a investigação de novos métodos para recuperação e reaproveitamento de compostos e elementos são essenciais para conhecer posteriores finalidades do rejeito. O zinco por apresentar uma boa resistência a corrosão é utilizado como revestimento protetor para vários produtos. Uma das etapas para extração do zinco é pelo processo de flotação para obtenção do mineral concentrado, no qual é gerado um resíduo. Tem-se como objetivo a caracterização deste resíduo gerado na flotação, permitindo optar por rotas de recuperação de compostos e elementos em etapas futuras. Os métodos de análise foram o Malvern, VA, Eltra e ICP-OES, além do teor de umidade. Neste estudo foi realizada uma caracterização da análise química elementar no qual os principais elementos apresentados foram, o cálcio (17,4%), magnésio (10,3%) e ferro (7,97%); o teor de umidade que foi de 27% e, a granulometria do material que apresentou um tamanho médio de 50µm. Com as características apresentadas o material pode ser utilizado, após tratamento, na recuperação de outros compostos para aplicações no setor de fertilizantes, cerâmica e siderúrgico.

**Palavras-chave:** Resíduo de Mineração; Recursos Naturais; Zinco; Caracterização Mineralógica.

## CHARACTERIZATION OF THE RESIDUE OF THE FLOTATION ORE OF ZINC

### Abstract

The demand for natural resources has grown over the years, however, the environment offers a limited amount of these resources for exploration. Then, the investigation of new methods for recovering and reuse some compounds and elements are essential to know later tailings purposes. Zinc is used in corrosion resistance as a protective coating for several products. One of the steps for the extraction of zinc is by flotation process to obtain the concentrated ore, in which a residue is generated. The aim is to characterize this residue, allowing the choice of recovery routes for compounds and elements in future stages. The methods of analysis were Malvern, VA, Eltra and ICP-OES, besides the water content. In this study, a characterization of elemental chemical analysis was performed, in which the main elements presented were: calcium (17.4%), magnesium (10.3%) and iron (7.97%); the water content was 27% and the grain size of the material presented an average size of 50µm. With the presented characteristics the material can be used, after treatment, in the recovery of other compounds for applications in the sector of fertilizers, ceramics and steel industry.

**Keywords:** Mining Waste; Natural Resources; Zinc; Mineralogical Characterization.

<sup>1</sup> Engenheira Ambiental e Sanitarista, Mestranda pelo Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Químico, Mestrando pelo Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheira Metalurgista, Doutora em Engenharia Metalúrgica, Professora Associada, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, Doutor em Engenharia Metalúrgica, Professor Titular, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Considerando a importância da mineração no cotidiano desde os séculos passados até os dias atuais, necessita-se abordar as questões ambientais para melhor conservação dos recursos naturais. Dentro da mineração existem diversos tópicos a serem discutidos diante dos impactos ambientais, sendo uma delas, a geração de resíduos e sua disposição. Muitas vezes esses resíduos podem ser tratados e dispostos em menores volumes dentro de uma barragem, a fim de recuperar elementos ou compostos com interesse econômico (1).

A gestão dos recursos é um dos desafios no quesito de resíduos gerados na exploração de minérios. Alguns aspectos a serem considerados para a gestão dos recursos minerais é a reciclagem de efluentes e/ou resíduos do processo operacional, eficiência do gasto de energia gerado nas etapas de beneficiamento e purificação do minério; exploração racional das jazidas; aproveitamento integral da matéria-prima; planejamento de oferta e demanda, considerando também a legislação e normas ambientais (2). O resíduo se torna uma nova fonte de exploração de minerais e compostos a serem utilizados, podendo variar a sua finalidade. Torna-se importante, portanto, o estudo prévio do material para posteriores etapas do resíduo gerado na mineração.

O zinco é um metal utilizado para galvanização de aço e outros materiais protegendo-os do processo de corrosão. A produção deste metal atinge cerca de 13 milhões de toneladas anual no mundo. Além de ser utilizado para galvanização, tem-se como finalidade a produção de latão; ligas à base de bronze e zinco, assim como, compostos de zinco em forma de óxidos e sulfatos (3,4).

No processo de extração do zinco uma das etapas para o seu beneficiamento é a flotação, no qual é gerado um resíduo que é disposto em barragens. A finalidade da flotação é separar os principais minerais de ganga do minério de zinco (5).

O zinco é um exemplo da gestão de reciclagem a partir de um material secundário (resíduos de galvanização e óxido de zinco bruto recuperado de pó de fornos de arco elétrico) para retornar ao ciclo de extração primária (3).

Apesar da reciclagem funcionar em casos como o do zinco, a reutilização e reciclagem de resíduos advindos da extração de minerais primários – geração de rejeito -, são tópicos para contribuir na conservação e exploração de recursos naturais. Os repositórios de minas são, por consequência, um desses desafios para exploração (1).

A caracterização é uma das etapas que permite identificar o comportamento do material e, direcionar qual tratamento a ser seguido, como por exemplo, as rotas de recuperação de minérios ou elementos específicos. Essas rotas variam de acordo com as características do material inicial, no qual pode-se usar a técnica a favor dessa recuperação. Alguns exemplos são as técnicas de recuperação do concentrado de ferro (hematita ou magnetita) realizado por separação magnética à úmido ou à seco. Caso a amostra original apresente um teor de umidade aceitável para o processo de recuperação, não há necessidade de secar a amostra antes do tratamento à úmido (6–8).

Um outro exemplo da importância da caracterização e suas vantagens para próximas etapas de tratamento são as partículas estarem liberadas fisicamente – espécie bem definida. Para que isso seja realizado, geralmente é utilizada a técnica de redução de tamanho como a cominuição – britagem ou moagem. Este método tende a diminuir as partículas em centímetros ou micrometros, dependendo da sua especificação da separação ou técnica para formar um concentrado (9).

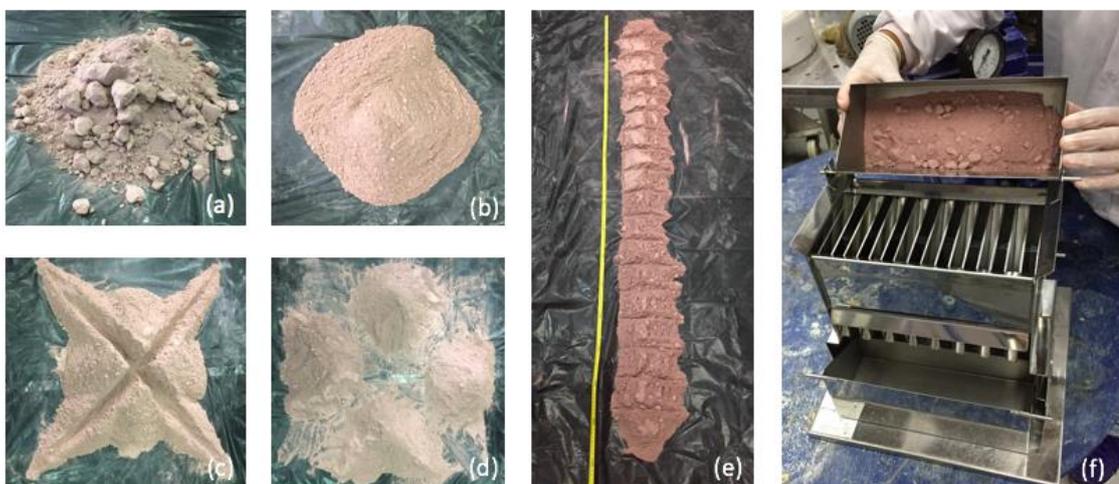
Portanto a caracterização do resíduo para a mineralogia aplicada, permite conhecer sua composição mineralógica, a liberação desses minérios, aplicações e a própria identificação dos elementos disponíveis (9).

Este trabalho visa caracterizar um rejeito da mineração de zinco para posteriores aplicações. Serão abordados estudos prévios para o aperfeiçoamento de técnicas e, a partir disso, a identificação de futuras etapas para a recuperação e/ou extração de outros compostos.

## 2 DESENVOLVIMENTO

O material de estudo caracterizado foi obtido a partir do beneficiamento da mineração de zinco pelo processo de flotação. As análises de granulometria, química elementar, determinação de carbono e enxofre e, análise do ferro foram realizadas a partir de uma fração do material adquirido após a secagem e quarteamento da amostra.

O quarteamento foi efetivado para uma homogeneização do material para as análises de granulometria, química elementar, determinação de carbono e enxofre, bem como a análise do ferro. Este método foi realizado após a secagem da amostra. Para isto, o quarteamento foi realizado em três etapas: a primeira foi o espalhamento do material em uma lona e, em seguida foram moídos para redução do volume das partículas aglomeradas. Posteriormente, foi colocado em pilha cônica e dividido em quatro partes conforme a Figura 1 – (a), (b), (c) e (d). Na segunda etapa o material obtido na etapa 1 foi submetido em forma de uma pilha longitudinal – quarteados com tamanhos específicos com o auxílio de uma fita métrica conforme a Figura 1 – (e). Na terceira etapa o material da etapa 2 foi adicionado ao quarteador tipo Jones correspondente a Figura 1 – (f).



**Figura 1** – Quarteamento da amostra em três estágios. Pilha cônica (a), (b), (c) e (d); Pilha longitudinal (e); Quarteador Jones (f)

### 2.1. Teor de umidade

Foi realizada a preparação do rejeito inicial para calcular o teor de umidade da amostra após o processo de flotação para obtenção do zinco. A fração sólida do material foi sedimentada e em seguida foi retirada a água em suspensão. Essa

mesma água foi filtrada para que a massa retida fosse considerada para o cálculo de massa inicial. O material sólido foi colocado em uma estufa a 100°C por 48h.

## 2.2. Análise granulométrica

O equipamento Malvern – Mastersizer 2000 foi utilizado para a análise de granulometria. O resíduo formado a partir da técnica de flotação apresenta partículas friáveis. Portanto, foram analisadas por difração de raio laser pelo equipamento supracitado.

## 2.3. Análise química elementar

Esta foi uma técnica de caracterização quantitativa multi-elementar a partir da digestão da amostra (resíduo da mineração). Na abertura de amostra foi utilizada uma mistura de ácidos e um micro-ondas para que houvesse uma digestão total dos sólidos contidos para então, ser feita a análise química elementar. Permite conhecer a composição dos elementos presentes na amostra. Utilizou-se o equipamento Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) Modelo 710 Agilent.

## 2.4. Determinação de carbono e enxofre

O equipamento Eltra modelo CS-2000 foi utilizado para determinar a quantidade de carbono e enxofre da amostra. Esta é uma das técnicas capaz de determinar o carbono presente na amostragem.

## 2.5 Análise do ferro

Para determinar e conhecer a concentração de ferro total na amostra foi realizada uma análise voltamétrica pelo equipamento Metrohm, modelo 797 VA Computrace. Para esse tipo de análise foi necessária a digestão da amostra. Foi utilizada a amostra digerida conforme citado no item 2.3.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 3.1 Teor de umidade

O teor de umidade foi calculado com a diferença do volume inicial de água e o volume final da amostra seca. A Tabela 1 mostra os valores a serem considerados e o teor de umidade.

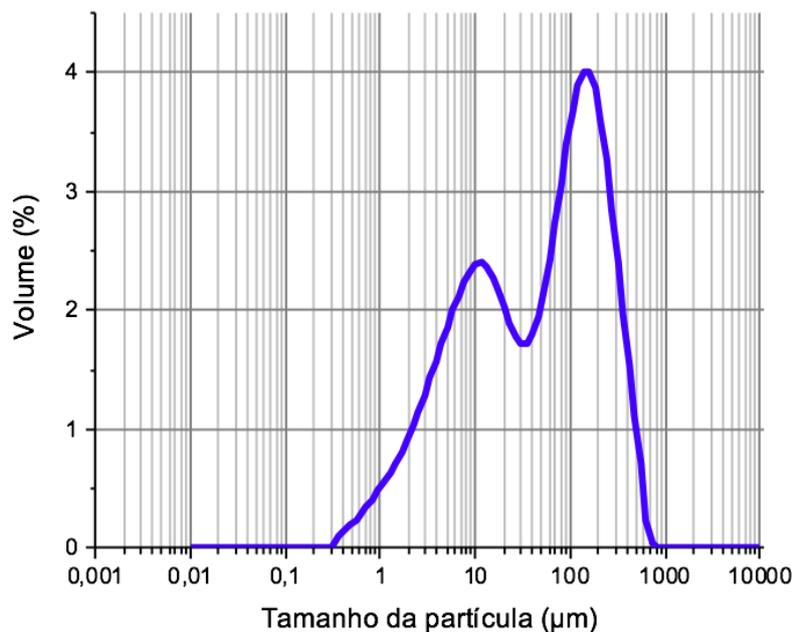
**Tabela 1** – Peso da amostra e determinação da umidade

<b>Material</b>	<b>Peso (kg)</b>
Massa inicial	66,7
Massa seca	48,5
<b>Teor de umidade = 27,3%</b>	

O teor de umidade foi de aproximadamente 27%. Esse valor permite que tanto o beneficiamento direto quanto vias de pré-tratamento à úmido sejam usados (9).

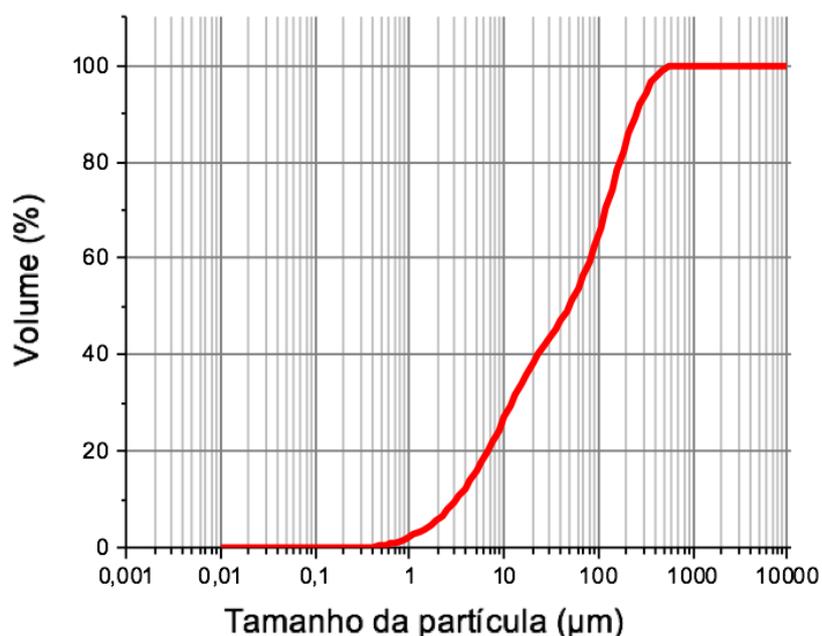
### 3.2 Análise granulométrica

Segundo a distribuição granulométrica (Figura 2), o maior pico formado corresponde às partículas de mesma granulometria, que estão em maior quantidade no material. As partículas com cerca 160 $\mu\text{m}$  compõe 4% do volume total da amostra.



**Figura 2** – Distribuição granulométrica do volume total da amostra com maior quantidade do material de mesma granulometria

Na Figura 3, verifica-se o valor acumulado da granulometria das partículas da amostra no qual 80% possui uma faixa granulométrica de 3 a 270 $\mu\text{m}$ .



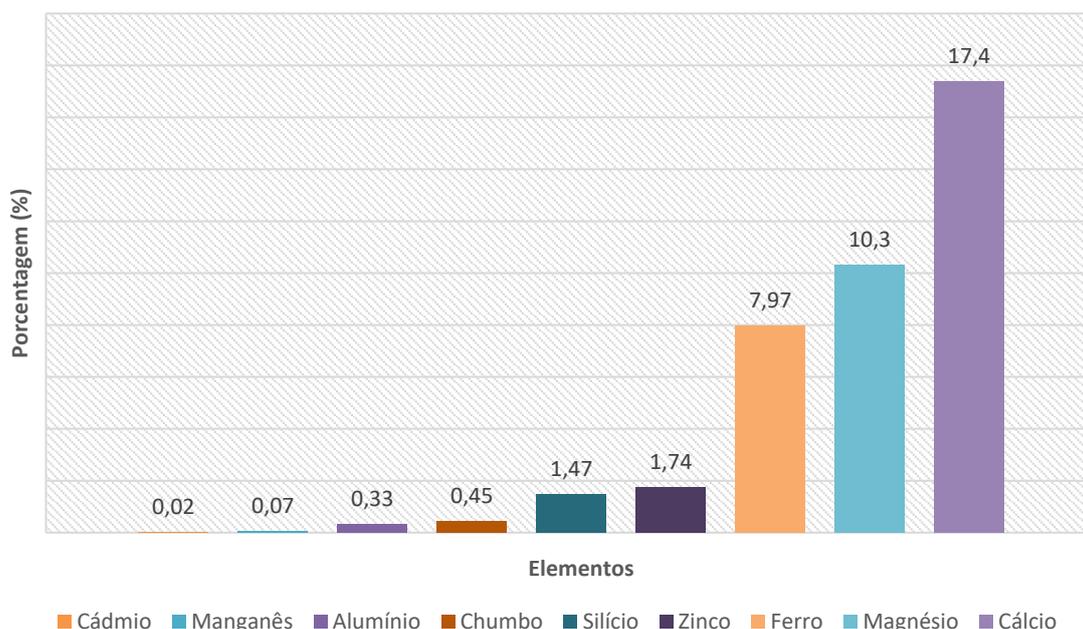
**Figura 3** – Tamanho das partículas acumuladas da amostra com granulometria entre 3 a 270 $\mu\text{m}$

A justificativa para este comportamento do material é devido ao processo de flotação para a extração do zinco, no qual as partículas são friáveis. Sabe-se que, para cada tipo de separação e beneficiamento existe um método no qual utiliza a diferença dos materiais para sua extração. Exemplo disso é método de flotação, que tem a diferença entre as espécies minerais. Essas partículas se prendem ou prendem-se entre si em uma bolha de gás – comumente o ar -, para que seja realizada a separação do minério de interesse e a ganga que se torna um resíduo. As partículas precisam ser finas o suficiente para serem arrastadas e, por consequência, separadas. Outros métodos de separação por diferença da espécie mineralógica são: a separação magnética e/ou densitária, assim como, a separação eletroestática (9,10).

A análise granulométrica permite direcionar se há a necessidade de utilizar previamente processos de fragmentação para um método de separação, tornando as próximas rotas mais simples para aquisição de um concentrado ou a separação do material (9).

### 3.3 Análise química elementar

Nesta técnica foi identificada a concentração dos principais elementos da amostra. Na Figura 4 são apresentadas tais concentrações.



**Figura 4 - Principais elementos e concentração**

Os elementos de maior concentração são o cálcio (17,4%), magnésio (10,3%) e ferro (7,97%). Considerando que, os materiais de ganga estejam relacionados com o magnésio, cálcio e ferro, supõe-se que, eles estejam associados à algum óxido e/ou carbonatos. O chumbo mesmo apresentando um baixo valor (0,45%) em relação aos outros, se torna uma preocupação para futuros tratamentos e aplicações do material.

O chumbo e cádmio são elementos que devem ser eliminados para etapas futuras. O chumbo é geralmente encontrado em resíduos e efluentes da mineração,

no mercado dos setores de baterias, tintas à base de óleo, assim como, na galvanoplastia. Este elemento é considerado um contaminante quando em presença no meio ambiente – solo, sedimento, águas subterrânea ou superficial. É um metal prejudicial à saúde pública, pois se acumula nas células dos organismos vivos (11,12).

Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), deve-se seguir o limite de concentração permitido para cada cenário avaliado, incluindo os de efluente advindos da mineração (13–15). Na Tabela 2 são apresentados alguns cenários e o valor permitido de concentração do chumbo. Considerando que, no rejeito foi analisado um teor em torno de 4.460mg/kg de chumbo. Observa-se assim que, o teor de chumbo está acima do permitido pelo CONAMA, como no caso do meio em solo em que o valor de investigação é de 900mg/kg. Serão investigadas, portanto, soluções para que o teor de chumbo seja aceitável pela legislação ou que sejam desvinculados do material.

**Tabela 2** – Valor permitido da concentração de chumbo

Tipo do meio	Concentração	Referência
Solo (valor de investigação para cenário industrial)	900 mg/kg	CONAMA 420/2009
Água subterrânea (valor máximo permitido para cenário de consumo humano)	10µg/L	CONAMA 396/2008
Efluente industrial (valor máximo de padrão de lançamento)	0,5mg/L	CONAMA 430/2011

**Fonte:** Conselho Nacional do Meio Ambiente (13–15)

Alguns estudos mostram que, mesmo com a presença do chumbo no material a ser trabalhado, existe uma alternativa de imobilizar estes metais. Exemplo disso, é estabilizar o chumbo num material cerâmico de aluminato e sílica-aluminato. Outro composto que poderia exercer esse papel na cerâmica, é a própria hematita, que se comportaria como um precursor cerâmico para imobilizar o chumbo advindo de um efluente em forma de lodo contaminado (12).

Nota-se, portanto, a existência de alternativas para a tomada de decisão de futuras etapas com um material contaminado.

### 3.4 Determinação de carbono e enxofre

Neste método observou-se que, o carbono apresentou uma concentração mais alta em relação ao enxofre de 11,62% e de 0,03%, respectivamente. Lembrando que, o enxofre é um contaminante para a indústria de siderurgia. Por isto, a importância de conhecer sua concentração.

**Tabela 3**-Teor de carbono e enxofre

Elemento	Teor (%)
Carbono	11,62
Enxofre	0,03

Considerando a presença de minerais de ganga no material diagnosticado, o carbono pode estar associado aos elementos discutidos no item 3.3 sendo possível a formação de carbonatos. Para o setor siderúrgico o teor de enxofre é uma preocupação pois, na maioria dos casos ele pode causar defeitos na parte mecânica, soldagem e até mesmo para a corrosão do aço (16).

### 3.5 Análise do ferro

De acordo com os resultados do item 3.3 o teor de ferro mostrou-se elevado. Outro método que reafirmou a presença do ferro foi o analisador voltamétrico, em que apresentou um teor de ferro total igual a 8,46%. O resíduo apresenta um teor considerável de ferro no qual pode estar presente em diferentes níveis de oxidação. Porém, para que seja confirmada essa associação de óxidos de ferro, análises mineralógicas, como a difração de raios-X, devem ser empregadas. O ferro presente no resíduo visa uma aplicabilidade na indústria siderúrgica, por isso foram realizadas a determinação de enxofre e até mesmo de carbono.

## 4 CONCLUSÃO

Conclui-se que, o resíduo caracterizado apresentou a possível associação do carbono com os elementos apresentados pelo ICP-OES. Elementos que poderiam ser prejudiciais para a siderurgia, como enxofre, tiveram baixos teores em relação ao permitido neste setor. A umidade pode ser favorável na separação magnética à úmido e, a granulometria do material demonstra ter minerais bem definidos – desagregados. O chumbo analisado pode seguir rotas de processo no qual seja desvinculado do material ou ainda tratado, sendo possível a utilização deste material.

Portanto, alternativas de tratamentos posteriores serão investigadas, no qual permitirá usar o material no setor siderúrgico, cerâmico e/ou como compostos para outras aplicações, como no setor de fertilizantes.

### Agradecimentos

Ao CNPq (nº 306936/2016-0) e à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – SP.

## REFERÊNCIAS

1. Lottermoser BG. Rehabilitation of Mine Wastes. 2011;405–10.
2. Engenharia Ambiental Subterrânea e Aplicações.
3. Ore I, Pigments IO, Rock P, Crystal Q, Earths R, Ash S. MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2019. 2019.
4. Steinlechner S, Unger A, Pichler C, Rumpold R. Zinc and Residue Recycling. 2014;113–24.
5. Moradi S, Monhemius AJ. Mixed sulphide – oxide lead and zinc ores : Problems and solutions. Miner Eng [Internet]. 2011;24(10):1062–76. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.05.014>
6. Kukurugya F, Rahfeld A, Möckel R, Nielsen P, Horckmans L, Spooren J, et al. Recovery of iron and lead from a secondary lead smelter matte by magnetic separation. Miner Eng [Internet]. 2018;122(March):17–25. Available from:

- <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.030>
7. Magnetic and Electrical Separation 13.1. 2016;
  8. Koymatcik C, Ozkaymak M, Selimli S. Recovery of iron particles from waste water treatment plant of an iron and steel factory. Eng Sci Technol an Int J [Internet]. 2018;21(3):284–8. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.04.008>
  9. Inácio L, Antonio L, Elias R. Tratamento de Minérios. 5ª Edição. Rio de Janeiro; 2010. 1-963 p.
  10. Bulatovic SM. Flotation of Lead – Zinc Ores. Handb Flotat Reagents. 2007;323–66.
  11. Tong S, Schirnding YE Von, Prapamontol T. Environmental lead exposure : a public health problem of global dimensions. 2000;78(9):5–10.
  12. Lu X, Ning X, Lee P, Shih K, Wang F, Zeng EY. Transformation of hazardous lead into lead ferrite ceramics : Crystal structures and their role in lead leaching. J Hazard Mater [Internet]. 2017;336:139–45. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.04.061>
  13. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 396/2008. 2008 p. 308–18.
  14. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 460/2013. 2013.
  15. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 430/2011. 2011.
  16. Qilin C, Wei L, Zhu C. Results in Physics Analysis of microstructure characteristics of high sulfur steel based on computer image processing technology. 2019;12(October 2018):392–7.