



ECONOMIA CIRCULAR: ESTUDO PARA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ZINCO PARA FINS INDUSTRIAIS – ESTUDO DE CASO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.I-023>

Rafael Nonato de Oliveira Leite (UFOP), Mariana Caroline Andrade Silva, Érica Linhares Reis
Universidade Federal de Ouro Preto, rafael.nonatooleite@gmail.com

RESUMO

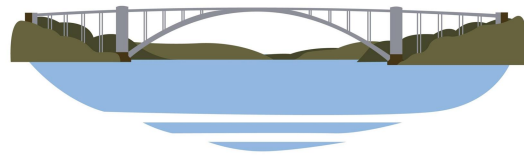
Os resíduos industriais se tornam um problema cada vez maior para a sociedade à medida que a produção industrial aumenta e no setor mineral não é diferente. A necessidade de reduzir os impactos inerentes à atividade mineradora e maximizar o aproveitamento dos recursos não renováveis tem valorizado o conceito de economia circular, apresentando uma proposta de aproveitar de maneira inteligente os resíduos gerados, implicando na redução de extração de novas matérias primas, além de benefícios ambientais e retorno financeiro. Tratando-se do setor mineral, o minério de zinco assume posição relevante no caso brasileiro, apresentando aplicações em diversos segmentos industriais, desde a fabricação de tintas, passando pelo setor cerâmico até na produção de ligas metálicas. Neste caso, o beneficiamento do minério consiste, de forma convencional, de etapas de cominuição, para a fragmentação das partículas; seguidas de etapas de flotação, para a concentração dos minerais de zinco. Diante disso, este trabalho apresenta um estudo de caso quanto à utilização do rejeito do beneficiamento do minério de zinco silicatado de uma mina localizada no estado de Minas Gerais como matéria prima para fins industriais, priorizando aplicações como correção de acidez de solo, clínquer e escorificante. De posse da caracterização desse rejeito: umidade, densidade, análise granulométrica (série de peneiras com abertura de 0,5 a 0,038mm), mineralógica (difração de raios-x) e química (ICP-OES); foi realizada uma análise comparativa com os requisitos técnicos exigidos pelo mercado para a possível aplicação nos segmentos industriais já mencionados. As hipóteses priorizadas foram as que utilizam dolomita como principal componente ou fonte para óxido de cálcio e magnésio, já que este carbonato representa 73,9% em massa da amostra em estudo, sendo elas: correção de acidez de solo, clínquer e escorificante. A partir das comparações entre as características do resíduo e as especificações dos três materiais citados anteriormente, confirmou-se para as aplicações serem viáveis são necessárias adequações, sendo elas a redução da concentração de metais pesados e da umidade para o corretivo de acidez, processo de separação eficiente entre o CaO e MgO e redução da concentração de hematita para o clínquer, ajuste granulométrico e diminuição do teor de SiO₂ para o escorificante.

PALAVRAS-CHAVE: Economia circular, minério de zinco, dolomita, resíduo.

ABSTRACT

Industrial waste becomes an increasing problem for society as industrial production increases and in the mining sector it is no different. The need to reduce the impacts inherent to the mining activity and maximize the use of non-renewable resources has valued the concept of circular economy, presenting a proposal to intelligently use the waste generated, implying a reduction in the extraction of new raw materials, in addition to environmental benefits and financial return. When it comes to the mineral sector, zinc ore assumes a relevant position in the Brazilian case, presenting applications in several industrial segments, from the manufacture of paints, through the ceramic sector to the production of metallic alloys. In this case, the ore beneficiation consists, in a conventional way, of comminution steps, for the fragmentation of the particles; followed by flotation steps, for the concentration of the zinc minerals. Therefore, this paper presents a case study of the use of the silicate zinc ore beneficiation tailings from a mine located in the state of Minas Gerais as a raw material for industrial purposes, prioritizing applications such as soil acidity correction, clinker and scorifying. With the characterization of this tailings: moisture, density, granulometric analysis (series of sieves with apertures from 0.5 to 0.038mm), mineralogical (X-ray diffraction) and chemical (ICP-OES); a comparative analysis was performed with the technical requirements demanded by the market for possible application in the industrial segments mentioned above. The hypotheses prioritized were those that use dolomite as the main component or source for calcium and magnesium oxide, since this carbonate represents 73.9% by mass of the sample under study, and they are: soil acidity correction, clinker, and scorifying. Based on comparisons between the characteristics of the waste and the specifications of the three materials cited above, it was confirmed that for the applications to be viable, adaptations are necessary, namely the reduction of the concentration of heavy metals and moisture for the acidity corrective, efficient separation process between CaO and MgO and reduction of the concentration of hematite for the clinker, granulometric adjustment, and reduction of the SiO₂ content for the primer.

KEY WORDS: Circular economy, zinc ore, dolomite, waste.



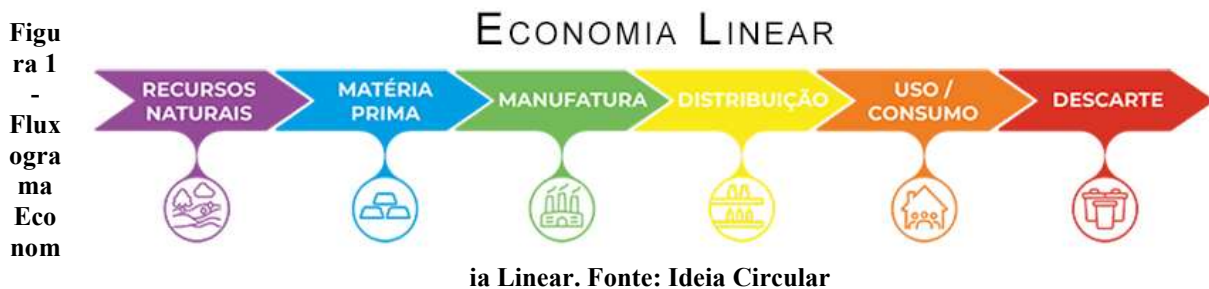
INTRODUÇÃO

De acordo com Santos (2013), os resíduos industriais tornaram-se um problema cada vez maior para a sociedade à medida que a produção industrial aumenta, sendo em sua maioria descartados ou armazenados inadequadamente, afetando todo um ecossistema em sua volta.

Atualmente, com o tema ESG (*environmental, social, governance*), existe um ímpeto crescente das empresas em atenderem algumas exigências mercadológicas de forma mais eficiente, pois o respeito a este tema tem se tornado sinônimo de responsabilidade socioambiental, reputação e credibilidade para as instituições.

Segundo Azapagic (2004), apesar do setor mineral ser base para a economia mundial, a operação de recursos não renováveis leva a uma variedade de impactos ambientais. A crescente preocupação em diminuir tais impactos, estimulam o empenho das empresas no desenvolvimento de novos modelos de negócio, a fim de maximizar os recursos já lavrados, alguns dos quais inicialmente não apresentavam valor comercial.

Dentro desse novo conceito de trabalho, a tendência é que a economia linear (Figura 1) seja substituída pela economia circular, mostrada na Figura 2



A primeira é uma cadeia que já foi e ainda é muito utilizada pela indústria, consiste em simplesmente apenas, extrair recursos, produzir bens e descartar os rejeitos. Com o passar do tempo, o modelo da Figura 1 mostra-se cada vez menos sustentável, visto que as matérias primas são em sua grande maioria recursos não renováveis, sendo que a geração de resíduos decorrentes desse modelo só aumenta à medida que a população demanda por mais produtos e a indústria busca suprir este consumo crescente.

Já a economia circular propõe uma quebra desse paradigma de extração, produção e descarte. Por ser pautada na reutilização da matéria prima, através de reciclagem e reaproveitamento inteligente dos resíduos, ao final do processo tem-se uma quantidade mínima de material a ser descartado para o meio ambiente. Além gerar poucos resíduos, ela também reduz a extração de novas matérias primas para a produção de novos produtos, pois como visto na Figura 2, prioriza o aproveitamento ao máximo os recursos já disponíveis para indústria, a fim de manter o constante abastecimento da cadeia produtiva (LETT, 2014).

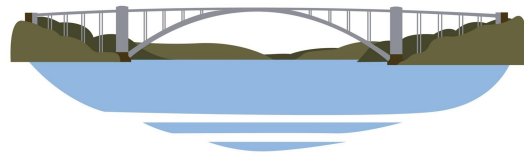


Figura 2 - Fluxograma Economia Circular. Fonte: Apcer Group

Portanto, considerando a finitude dos recursos minerais, impacto da atividade mineradora e a impossibilidade do licenciamento de novas barragens para descarte e armazenamento dos rejeitos, um dos maiores desafios do setor mineral atualmente é tratar seus resíduos de forma adequada, dando a eles um destino nobre, para além de benefícios ambientais, ainda possibilitar um retorno financeiro. A partir deste pressuposto, o trabalho possuiu como principal assunto desenvolvido maneiras de utilização do resíduo da flotação de zinco para fins industriais, sendo priorizadas as aplicações para corretivo de acidez, clínquer e escorificante (CASTRO, 2011).

OBJETIVOS

Realizar um estudo conceitual sobre as possibilidades de utilização de um resíduo do beneficiamento de minério de zinco willemítico, que atualmente é destinado ao empilhamento à seco, tornando-se um passivo ambiental para a mineradora.

Para alcançar o objetivo geral do trabalho, foram listados os seguintes objetivos específicos: levantar hipóteses com possíveis utilizações do resíduo a partir de dados referentes à caracterização do mesmo e avaliar a viabilidade conceitual dessas hipóteses.

METODOLOGIA

Este trabalho apresenta um estudo de caso quanto à utilização do rejeito da flotação do minério de zinco silicatado de uma mina localizada no estado de Minas Gerais como matéria prima para fins industriais. Inicialmente, foram levantados os dados referentes à caracterização deste rejeito, para que entendendo as características do material fosse possível escolher aplicações que potencializem a reinserção do mesmo como insumo para algum segmento industrial

De acordo com Mesquita (2019), o resíduo em questão possui cerca de 12,02% de umidade base úmida, densidade de $3,13\text{g/cm}^3$ obtida através do método de picnometria manual e distribuição granulométrica foi feita utilizando peneiras com abertura de 0,5 a 0,038mm e se deu acordo com o Gráfico e Tabela 1.

Gráfico 1. Análise granulométrica do rejeito da Flotação. Fonte: Adaptado de MESQUITA, 2019.

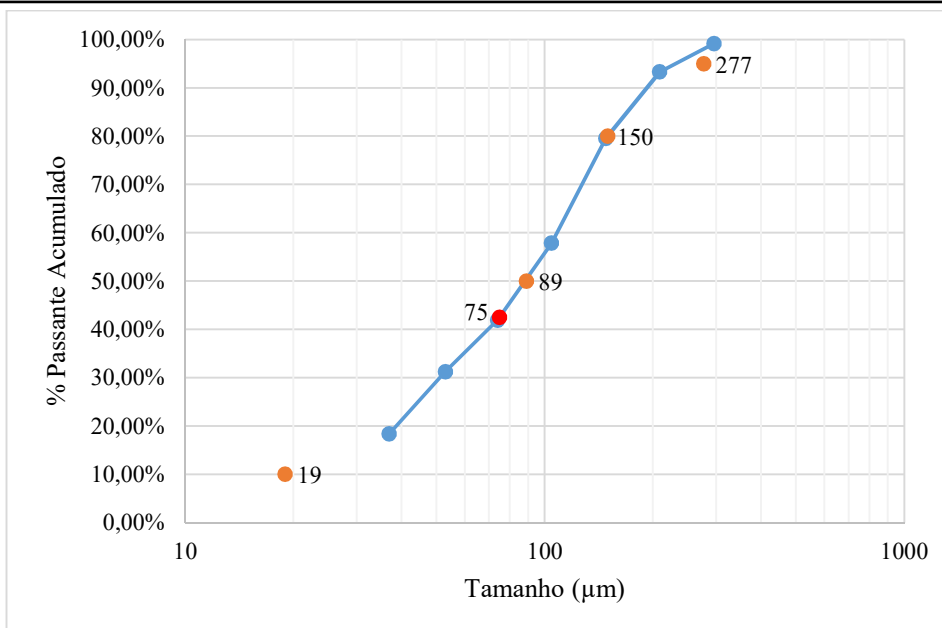


Tabela 1. Distribuição Granulométrica do Rejeito da Flotação de Zinco. Fonte: Adaptada de MESQUITA, 2019.

Granulometria	
d10	19 µm
d50	89 µm
d80	150 µm
d95	277 µm

Para identificação dos minerais, executou-se a análise de difração de raios X, através do método do pó total utilizando o difratômetro MiniFlex 300 (marca: Rigaku), sendo considerados os seguintes parâmetros: ângulo de 10-80°, com o passo de 0,02° a uma velocidade de 1,5°/min no modo *continuous*. A partir da densidade dos picos observados no difratograma e aplicação do método de refinamento de Rietveld foi possível estimar o teor global de minerais constituintes do rejeito, sendo os seguintes como principais componentes da amostra: dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), hematita (Fe_2O_3), quartzo (SiO_2), willemita (Zn_2SiO_4) e caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), nas concentrações indicadas na Tabela 2.

Tabela 2. Porcentagem em massa das fases cristalinas identificadas por difração de raios-x. Fonte: Adaptada de MESQUITA, 2019.

Amostra	Dolomita	Hematita	Quartzo	Willemita	Caulinita
Global	73,9%	20,6%	3,0%	1,5%	1,0%

Por fim, através da técnica ICP-OES (Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente), comumente utilizada para análise química dos elementos de amostras minerais, foi possível definir os principais elementos que compõem o rejeito da flotação. Sendo eles apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Composição elementar em porcentagem do rejeito da flotação por meio da técnica de ICP/OES. Fonte: Adaptada de MESQUITA, 2019.

Elemento	Ca	Fe	Zn	Mg	Si	Al	Cd	Pb
Concentração	17,8%	11,1%	1,4%	9,9%	9,5%	0,64%	0,04%	0,17%

Dessa forma, comparando a caracterização encontrada na literatura com as especificações técnicas de mercado de alguns insumos de diferentes segmentos industriais, priorizou-se aplicações que utilizam dolomita como principal componente ou fonte para óxido de cálcio e magnésio, já que o rejeito é majoritariamente constituído por este carbonato. Sendo assim as aplicações escolhidas foram correção de acidez de solo, clínquer e escorificante.

- **Corretivo para acidez**



A correção da acidez dos solos é uma prática comumente utilizada no Brasil, já que de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) os solos brasileiros, majoritariamente, apresentam acidez natural e baixa fertilidade, o que de certa forma prejudica o desenvolvimento e produtividade de algumas culturas (EMBRAPA et al., 2013).

O processo mais utilizado para a correção da acidez é a calagem, no qual ocorre a aplicação de calcário no solo com o objetivo de corrigir o pH e elevar os teores de cálcio e magnésio (WIETHÖLTER, 2000).

Considerando que o resíduo em questão é composto predominantemente por dolomita, sendo essa rica em cálcio e magnésio, e o grande potencial de mercado consumidor que o corretivo tem no Brasil, um país com forte indústria agropecuária, a primeira hipótese para a aplicação do material é como corretivo de acidez.

Para a utilização do resíduo estudado como corretivo de acidez, a instrução normativa nº35 de 2006 da SDA (Secretaria de Defesa Agropecuária) foi utilizada como base para os requisitos mínimos dos corretivos destinados à agricultura, sendo estes baseados nos parâmetros da Tabela 4:

Tabela 4. Parâmetros Mínimos do Corretivo de Acidez. Fonte: SDA (2006)

Granulometria	100% das partículas devem ser inferiores a 2 mm (ABNT nº10); 70% das partículas devem ser inferiores a 0,84 mm (ABNT, nº20); 50% das partículas devem ser inferiores a 0,3 mm (ABNT, nº50).
Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT)	Superior a 45%
Reatividade	0% → partículas maiores que 2 mm; 20% → partículas entre 2 e 0,84 mm; 60% → partículas entre 0,84 e 0,3 mm; 100% → partículas menores que 0,3 mm.
Umidade	Inferior a 10%
Concentração de Metais Pesados	Inferior a 20 mg/kg para Cd e 1.000 mg/kg para Pb

• Clínquer

De acordo com Ferreira (2005) o processo atual para obtenção do cimento Portland consiste na mistura de rocha calcária britada e argila, mistura esta que após moída origina uma farinha com característica granulométrica menor que 75 µm, a qual fornece ao processo CaCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Quando aquecida, em forno rotativo, atingindo temperatura entre 1350 – 1500 °C, a farinha forma como produto o clínquer de cimento Portland.

O clínquer, é um material cerâmico composto de nódulos acinzentados que possuem cerca de 3mm a 25mm de diâmetro, principal item do cimento Portland, sendo de extrema importância para a resistência mecânica final do cimento (SOUZA et al., 2015).

Para definir se o resíduo do beneficiamento do zinco pode ser utilizado como fonte de óxido de cálcio do clínquer, torna-se necessário analisar com mais critério as características físicas, químicas e granulométricas deste composto. De acordo com Costa (2020), a composição química do clínquer pode ser representada por alguns óxidos, conforme Tabela 5.

Tabela 5. Composição química do clínquer de cimento Portland. Fonte: COSTA (2020).

Elemento	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Outros Componentes
Concentração	67%	22%	5%	3%	3%

Além disso, considerando que o resíduo é composto majoritariamente por dolomita, é necessário um processo de calcinação capaz de transformar o $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ em óxidos básicos dos respectivos metais do composto, já que na composição característica não há óxido de magnésio.

• Escorificante



De acordo com Takano (2007), Susaki (2008) e Silva (2011) os escorificantes ou fundentes são materiais utilizados em geral nas operações de fusão, fato este que os torna compostos imprescindíveis no processo da indústria siderúrgica. A principal função do fundente, especialmente na manufatura do ferro gusa é diminuir o ponto de fusão para formação da escória, sendo esta comumente composta por ganga do minério de ferro, fundentes e cinza do coque ou carvão.

Suas características específicas como, insolubilidade e menor densidade em comparação ao ferro gusa favorecem a retirada de alguns contaminantes, principalmente fósforo e enxofre, os quais em grande quantidade podem ser prejudiciais a resistência mecânica das ligas, podendo levar a formação de trincas no produto final.

Susaki (2008) ressalta que os fundentes mais utilizados na metalurgia são o CaO, MgO e SiO₂, seguindo as respectivas concentrações típicas apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Especificação química típica de fundentes siderúrgicos. Fonte: SUSAKI (2008).

Item	Calcário	Dolomito	Quartzito	Cal Calcítica	Cal Dolomítica	Fluorita
CaO (%)	> 52	30 – 40	< 1,5	> 90	55 – 65	-
MgO (%)	< 3	15 – 20	< 1	< 6	32 – 37	-
SiO ₂ (%)	< 2	< 2	> 95	< 3	< 3	< 7

RESULTADOS

Para a aplicação como corretivo de acidez, o resíduo respeita parte dos requisitos para ser um calcário agrícola magnesiano, utilizado como corretivo de acidez de reatividade instantânea, de nome *Filler*, com foco na utilização para plantio direto. Apresenta PRNT de 85,5%, atendendo ao valor mínimo definido pela SDA e reatividade de 100% devido a sua característica granulométrica. Porém, excede a concentração limite de metais pesados em quase duas vezes, o que não permite que ele seja utilizado diretamente para esta finalidade. Recomenda-se então que seja desenvolvido processo de tratamento para remoção dos metais pesados ou mistura com material que possa ser utilizado como calcário agrícola, mas que não possua metais pesados, dessa forma é possível chegar na concentração definida na norma. Também é necessário fazer a secagem, para que a umidade de aproximadamente 12% reduza para no máximo 10%.

Para o clínquer um dos principais desafios é a decomposição da dolomita em CaO e MgO através de um processo alternativo à calcinação, já que para este processo a separação não é eficaz neste caso em específico. Para a sílica, tem-se 20,3% no rejeito em comparação com os 22% esperados, para caulinita 1% no rejeito em comparação com 5% esperados e para a willemita 1,5% no rejeito em comparação aos 3% de outros componentes esperados, ou seja, a utilização deste rejeito como matéria-prima para a produção de clínquer seria possível mediante adição de outra matéria-prima com maiores teores desses minerais. Já para a hematita, a composição característica não é atendida, pois o resíduo é composto por 20,6% enquanto o esperado deste mineral para a composição do clínquer é de apenas 3%, fazendo-se necessário um tratamento prévio para remoção deste óxido.

Por fim para o escorificante, analisando comparativamente a amostra de resíduo com as especificações de mercado percebe-se que as concentrações de CaO e SiO₂ não se encontram em conformidade com os padrões dos fundentes siderúrgicos, ainda que para o MgO a concentração esteja de acordo com o esperado. Dessa forma, é necessário que existam adequações na concentração de óxido de cálcio e um dos meios para isso pode ser um blend com material mais rico que possibilite atingir a faixa de concentração entre 30 – 40%.

Já para a sílica que possui concentração extremamente alta em comparação a composição típica expressa na tabela 6, ou seja, 20,3% no rejeito em comparação com < 2% da especificação de mercado, o processo de lixiviação pode ajudar nessa diminuição e ainda existiria a possibilidade de que a sílica recuperada possa ser utilizada como areia para construção civil.

Além disso, para utilização como escorificante, o material precisa apresentar granulometria que siga a carga do combustível do forno (PEREIRA, 2004). Dessa forma, a fim de não precisar granular o material, uma saída possível, considerando a distribuição granulométrica do resíduo seria utilizá-lo como fundente junto a carga de pelotas (granulometria inferior a 0,15 mm). Caso o material seja utilizado como fundente para o minério granulado ou acompanhando a carga do *sinter feed*, é necessário que passe por um processo de granulação, para que assim respeite as especificações técnicas do processo.



CONCLUSÃO

A partir das análises feitas durante o trabalho é possível concluir que o material apresenta potencial para ser utilizado como matéria prima de algumas indústrias que podem no futuro consumir grande quantidade do resíduo. Porém são necessárias adequações que viabilizem as aplicações levantadas. Para corretivo de acidez a concentração de metais pesados e a umidade são um desafio. Para a utilização como clínquer deve ser testada uma alternativa que possibilite a separação do CaO e MgO, pois ambos não se separam durante a calcinação, outro ponto de atenção é a quantidade de hematita presente no rejeito em comparação à composição característica do clínquer. Para o escorificante deve-se ter atenção para que a granulometria seja a mesma da carga do forno, é necessário também diminuir o teor de SiO₂. Além disso seria interessante executar testes em laboratório para comprovar se os resultados práticos seguirão os indícios teóricos. Apesar das ressalvas, as aplicações levantadas apresentam um futuro promissor para o resíduo. Uma vez que viáveis, as hipóteses apresentarão grande consumo de um material, podendo ser fundamentais no descomissionamento das barragens, como também na diminuição da quantidade de resíduo disposto à seco. A depender do modelo de negócio desenvolvido, tais aplicações podem passar de passivo para geradores de receita para a empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZAPAGIC, Adisa. **Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry**. Journal of Cleaner Production, v. 12, n. 6, p. 639–662, 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652603000751>>. Acesso em: 15 mai. 2022.
2. CASTRO, Camila Gonçalves. **Estudo do aproveitamento de rejeitos do beneficiamento do manganês pela indústria cerâmica**. 2011. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Ouro Preto, 2011. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2482>>. Acesso em: 9 mai. 2022.
3. COSTA, Rayara Pinto. **Hidratação e reologia de clínquer Portland com diferentes fontes brasileiras de sulfato de cálcio (gipsita e fosfogesso)**. 2020. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020. Disponível em: . Acesso em: 4 set. 2022.
4. EMBRAPA et al. **Manual da Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro**. 1. ed. Brasília, DF: Editora Universidade Rural, 2013. Disponível em: Acesso em: 24 ago. 2022.
5. FERREIRA, Andréa Vidal. **Efeitos de adições de Cr₂O₃, NiO e ZnO sobre a formação do clínquer Portland e de adições de Al₂O₃ e Fe₂O₃ sobre a decomposição de seu composto majoritário**. 2005. Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Ouro Preto, 2005. Disponível em: . Acesso em: 3 set. 2022.
6. LETT, Lina A. **Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular**. Revista Argentina de Microbiología, v. 46, n. 1, p. 1–2, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0325754114700392>>. Acesso em: 15 mai. 2022.
7. MESQUITA, Ricardo Teixeira de Paiva. **Caracterização do rejeito de zinco da mina de Vazante**. 2019. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto, 2019. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1995>>. Acesso em: 3 ago. 2022.
8. PEREIRA, Helio Cardoso. **Avaliação em escala piloto do comportamento dos produtos pellet feed, pellet screenings e micro pellet em substituição ao sinter feed em uma mistura de sinterização**. 2004. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8DGFK2>>. Acesso em: 16 set. 2022.
9. SANTOS, Olívia de Souza Heleno. **Reciclagem de um resíduo proveniente do beneficiamento de minério de manganês**. 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Ouro Preto, 2013. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2976>>. Acesso em: 9 mai. 2022.
10. SOUZA, H. M. et al. **Predição da composição do clínquer industrial utilizando minimização da energia livre de Gibbs**. Cerâmica, v. 61, n. 357, p. 23–30, mar. 2015. Disponível em: Acesso em: 18 out. 2022.
11. SUSAKI, K. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico-NT Fundentes e escorificantes–situação atual com tendências 2025**. São Paulo: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)/ABM, 2008. Disponível em: <https://doceru.com/doc/n0e8eeec>. Acesso em: 15 set. 2022
12. WIETHÖLTER, S. **Calagem no Brasil. Passo Fundo: Embrapa Trigo**, 2000. p. 104 Disponível em: Acesso em: 14 out. 2022.