

# LEVANTAMENTO DE POSSÍVEIS ROTAS PROCESSUAIS PARA A REUTILIZAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA

N. C. C. LOBATO<sup>1</sup>, E. A. VILLEGAS<sup>1</sup> e M. B. MANSUR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

E-mail para contato: natalia.candian@yahoo.com.br; marcelo.mansur@demet.ufmg.br

**RESUMO** – Dentre os principais resíduos gerados durante a produção de aço via aciaria elétrica destaca-se o pó de forno elétrico, cuja geração específica situa-se em torno de 15 a 20 kg por tonelada de aço. Sua composição química é rica em ferro (20-50%) e em zinco (em torno de 15%), característica que acarreta a esse resíduo potencial para ser reutilizado tanto na produção de aço quanto na de zinco metálico, evitando seu descarte em aterros industriais. Vale ressaltar que a presença de elementos tóxicos como cádmio e chumbo torna o processo de aterramento oneroso por se tratar de um resíduo tóxico. Assim, a fim de aumentar a sustentabilidade do setor, promovendo uma melhor reutilização dos recursos minerais, este trabalho tem como objetivo analisar possíveis rotas de aproveitamento dos teores metálicos presentes no pó de forno elétrico, incluindo lixiviações ácidas ou alcalinas, métodos pirometalúrgicos e rotas híbridas, que consistem na combinação de métodos distintos, além de apresentar destinações finais alternativas aos aterros industriais.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de produção de aço via aciaria elétrica possui como principal resíduo gerado o pó de aciaria elétrica, também conhecido por pó de forno elétrico. Esse resíduo sólido é oriundo da coleta, via sistema de desempoeiramento, dos particulados presentes junto às emissões gasosas liberadas pelo forno elétrico a arco durante a produção do aço. Sua geração situa-se em torno de 15 a 20 kg de pó por tonelada de aço produzido (Havlik *et al.*, 2005; Alsheyab e Khedaywi, 2013; Stathopoulos *et al.*, 2013).

Os elementos químicos que compõem o pó de aciaria elétrica são provenientes da injeção dos finos de coque (C), escorificante (Ca), ferro-gusa (Fe, C), ferro-ligas (Fe, Cr, Si), refratário (Al, Mg) e principalmente da sucata (Na, Cl, K, Mn, Zn, Ni e Mo) (Silva *et al.*, 2002; Vigano *et al.*, 2004; Brehm *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2008). Sua constituição química varia de usina para usina, e principalmente de acordo com o tipo de aço produzido, como, por exemplo, aço carbono ou aço inoxidável (Pickles, 2008). Segundo Silva (2006), os pós oriundos de aciaria produtora de aço carbono tendem a ser mais ricos em zinco e chumbo, ao passo que a siderúrgica que produz aço inoxidável gera pós com menores teores desses elementos, porém mais ricos em cromo e níquel, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Faixa de composição química de pós de aciaria elétrica para usinas produtoras de aço carbono e de aço inoxidável (adaptado de Silva, 2006).

Elementos (% em massa)	Pó de aciaria elétrica (aço carbono)	Pó de aciaria elétrica (aço inoxidável)
Fe (total)	25 - 47	22 - 36
Zn	11 - 27	1,8 - 6,2
Pb	1,0 - 3,8	0,2 - 0,8
Cd	0,03 - 0,15	0,006 - 1,790
Ni	< 0,6	2 - 10
Cr	< 0,1	0,2 - 3,3
Mo	< 0,1	0,4 - 1,5
Mn	2,4 - 4,6	2,4 - 4,6
Mg	0,8 - 2,9	1,7 - 4,7
Ca	1,8 - 10,0	1,8 - 7,0
Si	1,3 - 2,5	1,4 - 4,8
Cl <sup>-</sup>	0,5 - 2,5	0,5 - 1,2
K	< 1,1	0,8 - 5,0
Na	0,3 - 2,3	0,5 - 4,6

Considerando a maior produção de aço carbono, os elementos presentes em maior quantidade no resíduo são o ferro e o zinco. Enquanto o ferro é proveniente da matéria-prima para a produção do aço, o zinco é oriundo do carregamento de sucata galvanizada no forno elétrico. Durante o processo de fusão, o zinco é vaporizado e retido no sistema de limpeza de gases sendo, no final, coletado no pó (Silva, 2006; Sammut *et al.*, 2008; Pickles, 2008).

Os pós de aciaria elétrica são normalmente classificados com base no teor de zinco presente. Existem os pós com alto teor (acima de 15% em massa de zinco), e os pós com baixo teor (abaixo de 15% em massa de zinco). No Brasil, como a reciclagem de sucata galvanizada ainda está em fase de expansão, os pós gerados normalmente situam-se na segunda categoria (Brehm *et al.*, 2006).

Análises mineralógicas indicam a presença de ferro em forma de óxido, principalmente como hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e franklinita ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ). E o zinco presente principalmente em dois compostos básicos, óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ) e franklinita ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ) (Havlik *et al.*, 2005; Pickles, 2008).

Devido à presença de zinco e chumbo em teores significativos, além de traços de outros elementos como cádmio e cromo, esse resíduo é classificado na norma nacional NBR 10004 (ABNT, 2004) e também em normas internacionais, tais como Environmental Protection Agency (EPA); Resource Conservation and Recovery ACT (RCRA) e European Waste Catalog (EWC), como um resíduo perigoso. O descarte inapropriado de resíduos sólidos tóxicos podem causar riscos ambientais devido à mobilidade desses elementos (Laforest e Duchesne, 2006; Suetens *et al.*, 2014). E dada à quantidade gerada do pó de aciaria elétrica, que anualmente no Brasil consiste de aproximadamente 700 mil toneladas e mundialmente em torno de 6 milhões de toneladas, juntamente com os custos associados à sua disposição em aterros industriais, torna-se prioritário o estudo de alternativas de reutilização desse material

(Sofilic *et al.*, 2004; Havlik *et al.*, 2005; IABr, 2014; Suetens *et al.*, 2014). Estima-se que em 2009 somente 40% do pó gerado foi realmente reciclado, enquanto o restante foi destinado a aterros (Suetens *et al.*, 2014). Portanto, em um mundo onde a energia e os recursos estão se tornando cada vez mais escassos e a consciência da preservação ambiental é cada vez maior, é necessário que a indústria tenha um planejamento de gerenciamento de cada um dos seus resíduos, evitando o seu descarte em aterros ou na incineração, e buscando aproveitar a matéria-prima contida neles. Assim, os resíduos passam a ser considerados ou como matérias-primas ou como coprodutos, o que consequentemente aumenta a lucratividade e a competitividade da indústria. Logo, este trabalho tem por objetivo apresentar as possíveis rotas de descarte e reaproveitamento do pó de aciaria elétrica de forma a contribuir para a sustentabilidade do setor.

## **2. ROTAS DE TRATAMENTO PARA A RECUPERAÇÃO METÁLICA**

A produção de aço está associada a uma geração significativa de resíduos (escórias, lamas e pós), sendo uma tendência atual a busca por rotas de tratamento que visem o reaproveitamento dos teores metálicos contidos nesses. Quanto ao pó de aciaria elétrica, por ser um resíduo com maiores teores de ferro e zinco, os processos de recuperação metálica estão voltados a esses metais. Em nível mundial, os processos de reciclagem focam na recuperação do zinco. No Brasil, como o uso de sucata galvanizada na produção de aço ainda é incipiente, as propostas de reciclagem objetivam a recuperação do ferro presente no resíduo para retorná-lo ao processo siderúrgico como pelota, sinter ou briquete. No entanto, a presença de zinco, ainda que pequena, impossibilita a reutilização direta do resíduo, pois esse elemento, quando carregado no alto-forno, acarreta na formação de uma crosta na parede do reator. Portanto, para recuperar o ferro é necessário remover o zinco (Brehm *et al.*, 2006; Dutra *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2008; Trung *et al.*, 2011).

Diversas alternativas de tratamentos pirometalúrgicos e/ou hidrometalúrgicos vêm sendo propostas, cada uma apresentando vantagens e desvantagens. As rotas pirometalúrgicas já são processos consolidados na recuperação do zinco (Suetens *et al.*, 2014). Como esse elemento possui baixo ponto de vaporização em comparação ao ferro metálico, a separação desses elementos através de elevadas temperaturas é uma abordagem bastante comum (Pickles, 2008). Na Europa, por exemplo, cerca de 80% do pó de aciaria elétrica é tratada pelo processo Waelz, que se baseia na redução carbotérmica de óxido de zinco e óxido de ferro, gerando zinco gasoso e ferro sólido, num forno rotativo a uma temperatura de 1200°C (Suetens *et al.*, 2014). No entanto, o custo de operação é elevado, assim como o gasto de energia, além da geração significativa de gases e poeiras. Tais desvantagens tem reduzido o uso de tratamentos pirometalúrgicos pelo mundo (Silva, 2006; Silva *et al.*, 2008).

Quanto aos processos hidrometalúrgicos, esses apresentam como vantagens uma maior flexibilidade e menor custo operacional (Makkonen *et al.*, 2002). Sendo que, dentre as rotas hidrometalúrgicas, a dissolução seletiva dos óxidos não ferrosos em meio ácido ou alcalino é a proposta mais estudada (Ruiz *et al.*, 2007). Os diagramas de equilíbrio apresentados nas Figuras 1 e 2 indicam que o zinco pode ser dissolvido tanto em meio ácido quanto em meio alcalino (caráter anfótero), ao passo que o ferro, que é o metal predominante no pó, é solúvel em meios ácidos. Portanto, a lixiviação alcalina para a retirada do zinco se torna a estratégia processual mais atrativa.

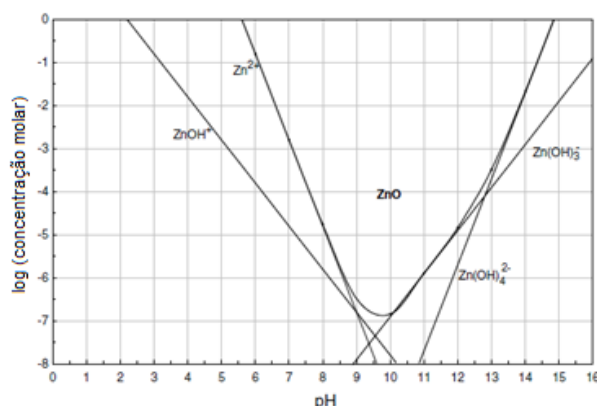


Figura 1 - Solubilidade do ZnO em função do pH a 25°C (Dutra *et al.*, 2006).

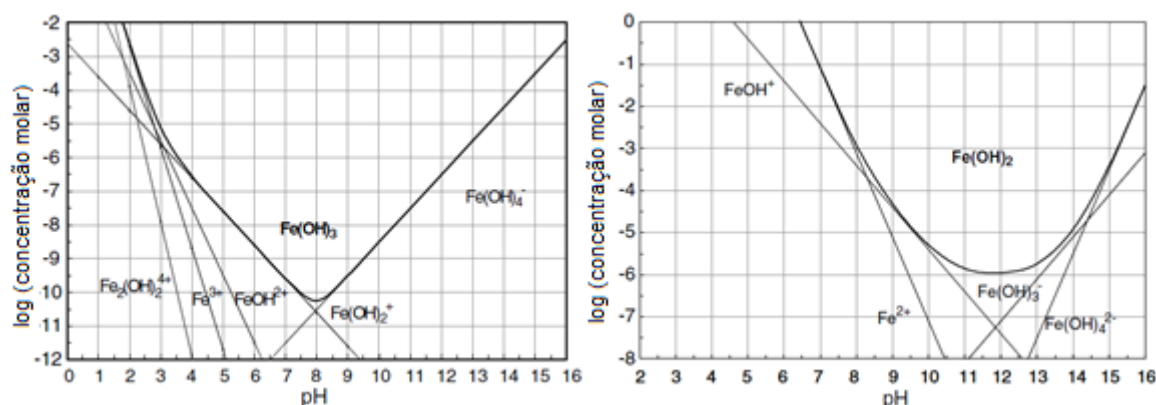


Figura 2 - Solubilidade dos hidróxidos de ferro (II) e ferro (III) em função do pH a 25°C (Dutra *et al.*, 2006).

Em meio ácido, a dissolução do zinco é realizada a elevadas temperaturas. Isso ocorre, pois, à temperatura ambiente, a lixiviação não seria seletiva, uma vez que, além do ZnO e do  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ , também seriam dissolvidas impurezas indesejáveis como PbO, CdO, além do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , que é o principal constituinte dessas poeiras. Com isso, haveria um elevado consumo do agente lixiviante, além de criar dificuldades na etapa de precipitação do ferro. No entanto, se a lixiviação ácida for realizada a altas temperaturas no interior de autoclaves, tem-se uma dissolução seletiva maior dos metais não ferrosos, além de uma separação sólido-líquido mais fácil devido à presença de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , precipitado este, de fácil filtração. O inconveniente nessa alternativa é o elevado custo da operação sob pressão (Silva *et al.*, 2002).

Em condições alcalinas, porém, o ZnO é razoavelmente solúvel à temperatura ambiente, enquanto que o ferro é praticamente insolúvel. A lixiviação normalmente utiliza hidróxido de sódio como agente lixiviante, uma vez que é eficaz na dissolução de zinco, cádmio e outros metais tóxicos. A elevação da temperatura favorece no aumento da solubilidade do óxido de zinco, logo a separação zinco-ferro é bastante seletiva, havendo, assim, uma clara indicação que a rota alcalina seria a mais adequada para a remoção seletiva do zinco (Vigano *et al.*, 2004; Dutra *et al.*, 2006). Segundo Dutra *et al.* (2006), a maior recuperação de zinco a partir de pó de aciaria elétrica (contendo cerca de 12% em massa de zinco), foi de cerca de 74% em 4 horas de lixiviação a 90°C e 6M de NaOH.

No entanto, ao contrário do ZnO que é uma espécie facilmente removível em meio aquoso ácido e/ou básico, o  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  se apresenta de difícil remoção devido à elevada estabilidade química (Silva *et al.*, 2002; Havlik *et al.*, 2005; Dutra *et al.*, 2006; Trung *et al.*, 2011). Sendo assim, apesar dos bons resultados obtidos pelos pesquisadores, a solubilidade das ferritas de zinco (franklinita) tanto em meio ácido quanto em meio alcalino ainda é muito baixa. E a presença de elementos, tais como cloretos de metais alcalinos, tem tornando os processos complexos e ineficientes (Pickles, 2008). Portanto uma alternativa proposta para o tratamento dessas poeiras é a rota híbrida, ou seja, a associação de etapas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas. Uma possível rota híbrida é uma etapa prévia de redução a altas temperaturas em presença de um agente redutor sólido ou gasoso, seguido de uma etapa de lixiviação alcalina, o que tenderia a favorecer a solubilização de todo o zinco presente no resíduo, viabilizando tecnicamente a reciclagem do pó de aciaria elétrica (Silva *et al.*, 2002). Outra proposta é a lixiviação do pó com soluções de carbonato de amônio, seguida por etapas de cimentação, evaporação (destilação) e calcinação, obtendo assim um produto vendável de zinco e um resíduo rico em ferro podendo ser reaproveitado na produção de aço (Ruiz *et al.*, 2007). No entanto, apesar dos resultados já obtidos, ainda são necessários mais estudos voltados para a recuperação metálica desse resíduo.

### 3. ROTAS ALTERNATIVAS PARA O DESCARTE DO RESÍDUO

As rotas de tratamento para a recuperação metálica do pó de aciaria elétrica ainda são processos em estudo e, portanto caros. Como o descarte em aterros industriais também é um processo oneroso, alternativas de descarte que busquem a imobilização dos elementos tóxicos devem ser analisadas (Ruiz *et al.*, 2007; Alsheyab e Khedaywi, 2013). O emprego do resíduo em outro processo produtivo constitui uma estratégia de gerenciamento que pode ser viável, segura e econômica.

Uma das alternativas de estabilização química e descarte do pó de aciaria elétrica é a adição desse na fabricação de artefatos à base de cimento para a construção civil. Tal adição é realizada junto à formulação do clínquer. Diversos autores afirmam que a imobilização dos elementos nocivos do pó nas matrizes cimentícias é eficiente (Silva, 2006; Brehm *et al.*, 2006; Vargas *et al.*, 2006). Portanto, do ponto de vista ambiental o emprego do pó na formulação do cimento é uma excelente opção de gerenciamento do resíduo. Além do mais, o cimento produzido apresentou um comportamento mecânico superior em relação ao cimento sem a presença do pó em sua composição. No entanto, devido à presença de compostos de zinco, a adição retarda o início das reações de hidratação do cimento, dificultando assim seu uso (Vargas *et al.*, 2006).

Alsheyab e Khedaywi (2013) propuseram em seus estudos a adição do pó de aciaria elétrica ao cimento asfáltico a ser utilizado na construção de estradas. Esse processo também garante a estabilização dos elementos tóxicos, promovendo um produto final com propriedades apropriadas. Além do mais, os autores afirmaram que seus resultados demonstram uma economia da quantidade de cimento empregada na produção do asfalto equivalente às quantidades adicionadas de pó de forno elétrico (sendo essa quantidade correspondente até 20% da mistura).

Outra possibilidade de aplicação do resíduo é a sua incorporação na fabricação de cerâmicas (Silva, 2006; Vieira *et al.*, 2013; Stathopoulos *et al.*, 2013). Esse processo também

garante a estabilidade dos elementos tóxicos (Vieira *et al.*, 2013). Além do mais, Silva (2006) analisou que a concentração de zinco presente no pó não gera emissões gasosas desse elemento acima dos valores permitidos por lei durante o processo de queima da cerâmica. Durante os estudos foram observados que a incorporação do pó acarreta em um aumento na densidade do material, redução da absorção de água e da porosidade, menor temperatura de queima e melhoria da resistência mecânica. Ou seja, a adição do resíduo proporcionou melhorias nas características físicas e mecânicas avaliadas, apresentando-se portanto adequada na produção de tijolos maciços e telhas para a construção civil (Silva, 2006; Vieira *et al.*, 2013; Stathopoulos *et al.*, 2013).

Por fim, Cheng (2003) e Kavouras *et al.* (2007) avaliaram a formação de vitrocerâmicas através da utilização do pó de aciaria elétrica. Cheng (2003) combinou o pó de aciaria obtido da fabricação de aços inoxidáveis e cinza de incinerador de resíduos sólidos, na razão de 1:9. O processo de produção consistia na fusão da matéria-prima a 1500°C e sem o uso de nucleadores. Já Kavouras *et al.* (2007) realizaram primeiramente a vitrificação do pó de aciaria junto com pós de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e  $\text{CaCO}_3$  em um forno elétrico a atmosfera ambiente. E posteriormente, realizaram o tratamento térmico para a obtenção da vitrocerâmica. Em ambos os estudos foram obtidos produtos com boas características físico-químicas e resistência mecânica, além de ser assegurada a estabilização dos elementos tóxicos do resíduo.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Todos os resíduos gerados pelas indústrias devem ser tratados e descartados de maneira adequada, respeitando as leis ambientais e buscando sempre priorizar a sua reutilização ao invés da sua disposição final em aterros industriais. Resíduos que contenham teores significativos de metais, como é o caso do pó de aciaria elétrica, requerem tratamento para recuperação desse conteúdo metálico. Há várias propostas para recuperar o ferro e o zinco contidos nesse resíduo, que é gerado em quantidades significativas no Brasil e no mundo. Normalmente as rotas empregadas são as pirometalúrgicas ou as hidrometalúrgicas, sendo que as pirometalúrgicas, devido ao alto consumo de energia e emissão de gases, têm sido cada vez menos utilizadas. Já os processos hidrometalúrgicos ainda estão em fase de desenvolvimento. No entanto, apesar dos processos de lixiviação de maneira geral apresentarem bons resultados, a presença da ferrita de zinco ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ), composto de difícil remoção, tem encaminhado as pesquisas em direção ao desenvolvimento de rotas híbridas. Porém, como os processos de recuperação metálica ainda estão em desenvolvimento, e portanto, ainda não são totalmente eficazes e nem baratos; e além do mais, o descarte dos resíduos dentro das normas ambientais também é um processo oneroso; propostas alternativas de descarte do pó de aciaria elétrica na fabricação de diversos outros materiais, como o cimento, o asfalto, a cerâmica e a vitrocerâmica vêm ganhando destaque. Essa incorporação do resíduo em outro processo produtivo garante a estabilidade química dos elementos tóxicos, podendo além do mais, acarretar em economia de matéria-prima e ganho nas propriedades finais do material fabricado.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPEMIG e INCT-AQUA pelo apoio à pesquisa.

## 5. REFERÊNCIAS

- ALSHEYAB, M. A. T.; KHEDAYWI, T. S. Effect of electric arc furnace dust (EAFD) on properties of asphalt cement mixture. *Resour. Conserv. Recycl.*, v. 70, p. 38–43, 2013.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BREHM, F.A.; MORAES, C.A.M.; MOLIN, D.D.; VILELA, A.C.F. Estudo dos fenômenos físico-químicos relacionados à adição de óxido de zinco (ZnO) em pastas de cimento como contribuição ao estudo de reciclagem de pós de aciaria elétrica na construção civil. *Anais do XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, v. 1, p. 1786-1794, 2006.
- CHENG, T.W. Combined glassification of EAF dust and incinerator fly ash. *Chemosphere*, v. 50, p. 47–51, 2003.
- DUTRA, A.J.B.; PAIVA, P.R.P.; TAVARES L.M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. *Miner. Eng.*, v. 19, p. 478-485, 2006.
- HAVLIK, T.; TURZAKOVA, M.; STOPIC, S.; FRIEDRICH, B. Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid. *Hydrometallurgy*, v. 77, p. 41–50, 2005.
- IABr - INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em < <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/imprensa/noticias.asp?id=11279>>. Acesso em: 03 abr. 2014.
- KAVOURAS, P.; KEHAGIAS, T.; TSILIKA, I.; KAIMAKAMIS, G.; CHRISSAFIS, K.; KOKKOU, S.; PAPADOPOULOS, D.; KARAKOSTAS, T. Glass-ceramic materials from electric arc furnace dust. *J. Hazard. Mater.*, v. 139, p. 424–429, 2007.
- LAFOREST, G.; DUCHESNE, J. Characterization and leachability of electric arc furnace dust made from remelting of stainless steel. *J. Hazard. Mater.*, v. 135, p. 156–164, 2006.
- MAKKONEN, H.T.; HEINO, J.; LAITILA, L.; HILTUNEN, A.; PÖYLIÖ, E.; HÄRKKI, J. Optimisation of steel plant recycling in Finland: dusts, scales and sludge. *Resour. Conserv. Recy.*, v. 35, p. 77-84. 2002.
- PICKLES, C. Thermodynamic analysis of the separation of zinc and lead from electric arc furnace dust by selective reduction with metallic iron. *Sep. Purif. Technol.*, v. 59, p. 115–128, 2008.
- RUIZ, O.; CLEMENTE, C.; ALONSO, M.; ALGUACIL, F. J. Recycling of an electric arc furnace flue dust to obtain high grade ZnO. *J. Hazard. Mater.*, v. 141, p. 33–36, 2007.

- SAMMUT, M.L.; ROSE, J.; MASION, A.; FIANI, E.; DEPOUX, M.; ZIEBEL, A.; HAZEMANN, J.L.; PROUX, O.; BORSCHNECK, D.; NOACK, Y. Determination of zinc speciation in basic oxygen furnace flying dust by chemical extractions and X-ray spectroscopy. *Chemosphere*, v. 70, p. 1945–1951, 2008.
- SILVA, F.T.; OGASAWARA, T.; ANDRADE, M.C. Avaliação da viabilidade termodinâmica da lixiviação de ferritas de zinco em poeiras de fornos elétricos a arco. *Anais do XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, v. 1, p. 146-151, 2002.
- SILVA, M.C. Reciclagem de pó de aciaria elétrica como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos: controle das emissões atmosféricas de zinco. 2006. 126f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre.
- SILVA, M.C.; BERNARDES, A.M.; BERGMANN, C.P.; TENÓRIO, J.A.S.; ESPINOSA, D.C.R. Characterisation of electric arc furnace dust generated during plain carbon steel production. *Ironmak. Steelmak.*, v. 35, p. 315-320, 2008.
- SOFILIC, T.; RASTOVCAN-MIOC, A.; CERJAN-STEFANOVIC, Š.; NOVOSIL-RADOVIC, V.; JENKO, M. Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. *J. Hazard. Mater.*, v. 109, p. 59–70, 2004.
- STATHOPOULOS, V. N.; PAPANDREOU, A.; KANELLOPOULOU, D.; STOURNARAS, C. J. Structural ceramics containing electric arc furnace dust. *J. Hazard. Mater.*, v. 262, p. 91–99, 2013.
- SUETENS, T.; KLAASEN, B.; VAN ACKER, K.; BLANPAIN, B. Comparison of electric arc furnace dust treatment technologies using exergy efficiency. *J. Clean. Prod.*, v. 65, p. 152–167, 2014.
- TRUNG, Z.H.; KUKURUGYA, F.; TAKACOVA, Z.; ORAC, D.; LAUBERTOVA, M.; MISKUFOVA, A.; HAVLIK, T. Acidic leaching both of zinc and iron from basic oxygen furnace sludge. *J. Hazard. Mater.*, v. 192, p. 1100-1107. 2011.
- VARGAS, A. S.; MASUERO, Â. B.; VILELA, A. C. F. Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in Pozzolan-modified Portland cement I (MP) pastes. *Cem. Concr. Res.*, v. 36, p. 1833–1841, 2006.
- VIEIRA, C. M. F.; SANCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N.; LALLA, N.; QUARANTA, N. Recycling of electric arc furnace dust into red ceramic. *J. Mater. Res. Technol.*, v. 2, p. 88–92, 2013.
- VIGANO, J.B.; WILBERG, K.Q.; KAUTZMANN R.M.; LENZ, D.M. Recuperação de zinco do pó de exaustão de indústria siderúrgica em meio alcalino. *Matéria (Rio J.)*, Rio de Janeiro, v. 9, n.4, p. 437-444, 2004.