

# ESTADO DA ARTE DA RECICLAGEM DE PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA<sup>1</sup>

Carlos Alberto Mendes Moraes<sup>2</sup>,  
Feliciane Andrade Brehm<sup>3</sup>

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar o estado da arte da caracterização e da reciclagem de pó de aciaria, suas limitações ambientais, tecnológicas e econômicas. Uma série de trabalhos publicados tanto nacionais quanto na literatura internacional mostram as diferentes áreas onde este resíduo sólido, considerado perigoso por lixiviar metais pesados acima dos limites exigidos pela norma brasileira NBR 10004, vem sendo estudado, com resultados positivos e negativos, desde aplicações simples a usos mais especiais. É mostrado que existem várias alternativas de reciclagem interna e externa deste resíduo, mas em algumas situações há barreiras ambientais, econômicas ou tecnológicas. Fica claro que a reciclagem externa, mesmo sendo uma alternativa viável a curto prazo, a longo prazo com a diminuição de reservas naturais de uma série de metais como Zn, Pb, Cd, e o próprio Fe, faz da recuperação de metais a partir de pós de FEA um caminho também para as empresas geradoras na América Latina, como já vem sendo na Europa e Japão a mais de 10 anos.

**Palavras-chaves:** Pó de aciaria elétrica; Caracterização; Reciclagem.

## STATE OF ART OF ELECTRIC ARC FURNACE DUST RECYCLING

### Abstract

This work has the aim of analyzing the state of art of the characterization and recycling of EAF dust, its environmental limitations, technological and economical. Several national and international published works show different areas where this solid waste, considered dangerous because of leaching heavy metals over the limits in the Brazilian Rule NBR 10004, has been studied with positive and negative results, since simple to special applications. There are several alternatives of internal and external recycling of this waste, but in some situations there are environmental, technological and economical barriers. Even though the external recycling is a viable alternative in a short term, with the decreasing of several natural resources of metal like Zn, Pb, Cd, and also Fe, a long term the reclamation of metals from EAF dust becomes a way to the generator companies in Latin America, as it already is in Europe and Japan for more than a decade.

**Key words:** Electric arc furnace; Characterization; Recycling.

---

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Membro da ABM, Prof. Dr. - Engenharia Mecânica - Núcleo de Caracterização de Materiais - Universidade do Vale do Rio dos Sinos/UNISINOS. Av. Unisinos, 950 São Leopoldo – RS, Brasil, CEP 93022-000, e-mail: cmoraes@unisinos.br*

<sup>3</sup> *Profa. Dra. - Engenharia Mecânica - Núcleo de Caracterização de Materiais - Universidade do Vale do Rio dos Sinos/UNISINOS. Av. Unisinos, 950 São Leopoldo – RS, Brasil, CEP 93022-000, e-mail: felicianeb@unisinos.br*

## INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica mundial, ao mesmo tempo em que recicla quase toda sucata de aço gerada, gera uma série de outros resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas durante o processo de fabricação do aço. Quanto aos resíduos sólidos, as siderúrgicas geram escória, pó, carepa e lama em várias etapas do processo, desde a redução do minério de ferro até a conformação mecânica do aço. Dentre estes resíduos sólidos, a escória e o pó são os mais gerados e, por conseguinte, os mais estudados em âmbito mundial. Como a escória de alto forno, possivelmente, outrora resíduo mais estudado é hoje um subproduto consagrado para as siderúrgicas integradas.

Os resíduos sólidos gerados pelas indústrias siderúrgicas possuem características bastante peculiares, proporcionando o estudo de diferentes formas de reaproveitamento. Por exemplo, as características físicas e químicas da escória e do pó podem conferir excelentes propriedades aos materiais onde são aplicados, principalmente na área da construção civil e da própria siderurgia.

Alguns motivos, como grande geração, dificuldade para disposição e custo, pressão dos órgãos ambientais, fizeram com que as indústrias, centros de pesquisa e universidades investissem em estudos sobre formas de reaproveitamento destes resíduos.

O Pó de Aciaria Elétrica (PAE) é um resíduo sólido gerado a partir da coleta, via sistema de despoeiramento, dos particulados presentes junto às emissões liberadas pelo Forno Elétrico a Arco (FEA) durante a produção do aço. É classificado, de acordo com a norma NBR 10004,<sup>(1)</sup> como resíduo sólido perigoso – classe I. A Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Estado do Rio Grande do Sul - FEPAM - exige que este resíduo seja estocado em local adequado, ou seja, local coberto protegido das intempéries. Devido à grande quantidade gerada, de 12 a 14 toneladas por dia de aço fabricado, torna-se prioritário que se estude alternativas de reciclagem do mesmo, em vez de dispô-lo em aterros industriais.

A caracterização do pó de aciaria seja, química, física e de fases de um resíduo sólido é a etapa fundamental para avaliar a viabilidade de reciclagem. Além disso, os resultados devem contribuir para possibilitar um melhor controle na sua geração durante a fabricação do aço e avaliar sua homogeneidade, no sentido de reciclá-lo internamente numa siderúrgica seja no FEA, no BOF ou no alto-forno, ou valorizá-lo como possível subproduto em aplicações externas.

Mundialmente, a maioria dos processos utilizados para a sua reciclagem foca na recuperação do zinco (Zn) contido no PAE. O percentual deste elemento no PAE vem crescendo ao longo dos anos devido ao fato que este vem sendo cada vez mais usado no setor siderúrgico em processos de galvanização dos aços. Ao reutilizar a sucata galvanizada, o Zn evapora durante o processo de fusão, ficando retido no PAE.

No Brasil, a reciclagem de sucata galvanizada está em fase de expansão. O teor de zinco no PAE vem crescendo em função do aumento de sucata galvanizada, o que pode viabilizar economicamente os processos de reciclagem utilizados em nível mundial aqui na América do Sul. Além disso, o mercado de zinco tem mostrado problemas quanto ao aumento de preço deste elemento, essencialmente obtido a partir de minérios de zinco extraídos da natureza.

## Caracterização de Pó de Aciaria Elétrica

Segundo Huber et al.,<sup>(2)</sup> o PAE pode ser gerado pelos seguintes mecanismos:

- volatilização dos metais não ferrosos;
- vaporização do ferro abaixo do arco;
- expansão das bolhas de CO (monóxido de carbono) que, conseqüentemente, ejetam pequenas bolhas de metais;
- arraste de partículas sólidas.

De acordo com dados do INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – 2004,<sup>(3)</sup> a produção mundial de aço bruto no ano de 2003 foi de 964 milhões de toneladas. No Brasil, a produção de aço bruto foi em torno de 31 milhões de toneladas, o que representa 3,2% da produção mundial. Nesse ano, a produção de aço via FEA foi de 6,5 milhões de toneladas. Com o aumento de sucata de aço no mercado mundial, tem ocorrido aumento da produção mundial de aço via FEA. Para exemplificar, em 1970 a produção de aço via FEA representava 14%, 23% em 1980, 28% em 1990 e 35% em 1998 do total da produção mundial de aço.<sup>(4)</sup> De acordo com Birat,<sup>(5)</sup> a produção de aço via forno elétrico a arco representava 33% da produção mundial em 2000, prevendo que esta passe a representar 40% em 2010 para uma produção total prevista de 830 milhões de toneladas por ano.

O INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA -1996<sup>(6)</sup> cita os coeficientes de geração de PAE entre 1 e 2% da produção de aço, tanto para a produção de aço carbono como para aço inoxidável. No Brasil são gerados, em média, 1,48% de PAE por tonelada de aço produzido, índice semelhante ao encontrado nos EUA (1,7%), Canadá (1,5%), Japão (1,8%) e Itália (1 a 1,4%), porém com teor médio de zinco de aproximadamente 10%, inferior à média internacional, situada na faixa de 15 a 25% de zinco, porém em algumas empresas já atingindo patamares superiores de 25% em função da crescente reciclagem de sucata galvanizada.

No caso de processo de fabricação de aço via aciaria elétrica, os pós podem ser classificados de duas formas, segundo a quantidade de zinco:

- pós com altos teores de zinco (acima de 15% de Zn);
- pós com baixos teores de zinco (abaixo de 15% de Zn).

Os elementos químicos típicos que compõem o PAE podem ser provenientes da sucata (a grande maioria), das injeções dos finos de coque (C), do escorificante (Ca), do ferro-gusa (Fe e C), ferro-ligas (Fe-Cr, Fe-Si) ou do refratário (Al, Mg) utilizados durante o processo de fabricação de aço. Além dos elementos C, Ca, Fe, Cr, Si, Al e Mg, amostras de PAE analisadas indicaram, na sua composição química elementar, Na, S, Cl, K, Mn, Zn, Ni, Mo, Sn e O.<sup>(7)</sup>

A primeira etapa para a realização destes estudos é a caracterização química e ambiental dos resíduos a fim de verificar a melhor aplicação. Com isso, parte-se para a próxima etapa que seria a caracterização física dos resíduos, para avaliar as propriedades que vão conferir valor agregado ao material onde serão utilizados.

Na Tabela 1 é possível observar as diversas formas como têm sido expressos os resultados da caracterização química das amostras de PAE na última década.

**Tabela 1:** Diferentes formas de expressão de resultados para análises químicas do PAE.

Composição (% massa)	Strohmeier <sup>(8)</sup>	Hara <sup>(9)</sup>	Pickels <sup>(10)</sup>	Gudenau <sup>(11)</sup>	Mantovani <sup>(12)</sup>	Pelino <sup>(13)</sup>	Yang <sup>(14)</sup>	Masud <sup>(15)</sup>	Gonçalves <sup>(16)</sup>
Zn	22-24	27,7	24,8	0,1-5,0	2,40		21,5		9,24
Pb	45	3,22	3,22	0,05-1,0	0,18		0,157		
Cd	0,03-0,1		714 ppm						
Cu	0,2-0,4			0,01					
Sn	0,2-0,3								
As	0,04-0,08								
S	1,8-2,2		4000 ppm				0,113	1,8	
F	0,2-0,4		2550 ppm						
Cl	1-1,5		4,05						
C	1-2	3,33	0,94	20-30	2,25			3,3	
Cr							0,698		2,90
Mo							0,538		
<b>Fe</b>		<b>25</b>	<b>16,55</b>	<b>25-35</b>	<b>53,00</b>				<b>48,96</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>					<b>75,78</b>	<b>52,82</b>	<b>40,3</b>	<b>41,3</b>	
<b>FeO</b>	<b>26-30</b>								
Mn			1,55						
MnO	4-5				2,97	5,33		3,3	
MnO <sub>2</sub>							2,55		
Ca			11,5						3,28
CaO	6-7	2,16			8,67	7,50	8,31		
MgO	2,5-3,0				1,31	5,21	6,58	7,9	
Mg									1,65
BaO	~ 0,01							3,9	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4-0,6	2,09			1,13	0,65	0,436	1,1	
SiO <sub>2</sub>	3-3,5	2,78			4,73	5,94	5,96	4,8	
Na <sub>2</sub> O	1,5-1,9					0,91	0,417		
K <sub>2</sub> O	1,2-1,5					1,01	0,475		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						1,12			
ZnO						13,80		24,5	
CuO						0,18		0,2	
NiO						0,08			
PbO						0,48		2,4	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>							0,0297		

Analisando-se a Tabela 1, pode-se observar que os resultados analíticos, para os mesmos elementos químicos, são expressos de formas diferentes. Como exemplo, é possível citar o elemento Fe. Para este elemento, os resultados são expressos de três formas diferentes: Fe (elementar), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e FeO. Nos laboratórios analíticos da indústria siderúrgica, os resultados normalmente são expressos na forma dos óxidos mais estáveis do elemento analisado, sendo que normalmente as técnicas utilizadas para análise fornecem resultados elementares. Essa prática, no caso da análise de PAE, leva à expressão errônea dos resultados em termos da forma como os elementos analisados se encontram na amostra. Os resultados obtidos via técnica de DRX para diversas amostras deste resíduo (Kanari et al;<sup>(17)</sup> Dominguez;<sup>(18)</sup> Xia<sup>(19)</sup>) mostram que, na maioria das vezes, as fases que compõem o PAE não são os óxidos mais estáveis dos elementos encontrados na análise química elementar. Youcai<sup>(20)</sup>, Al-Zaid<sup>(21)</sup> e Gonçalves<sup>(16)</sup>, por exemplo, expressam os resultados da caracterização química na forma elementar em seus trabalhos.

Ao mesmo tempo em 2000, Coedo et al<sup>(22)</sup> estudaram a caracterização química (As, Sn, Sb, Se, Te, Bi, Cd, V, Ti e Mo) de pó de aciaria utilizando um espectrômetro de

massa ICP (electrothermal vaporization inductively coupled plasma mass spectrometry), os resultados foram certificados por outros métodos convencionais de análise. Atualmente, na Europa, já existem padrões de análise química de pós de aciaria.

De acordo com Brehm<sup>(23)</sup>, a etapa crítica e primordial para determinar a composição química é a digestão da amostra, que é o processo pelo qual a amostra sólida é solubilizada, tornando-se líquida. A amostra solubilizada pode ser analisada por métodos analíticos tais como: absorção atômica (AA) e espectrometria de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado (ICP/AES). Esse procedimento é responsável, em grande parte, pela obtenção de resultados analíticos confiáveis, que exige uma digestão completa da amostra.

Recentemente, alguns pesquisadores têm mostrado que para se caracterizar adequadamente pó de aciaria elétrica é necessário utilizar várias técnicas em conjunto para se determinar as fases presentes, em especial, aquelas formadas por Zn, quais sejam, ZnO e ZnFeO<sub>4</sub>. Sofili et al<sup>(24)</sup> e Gonçalves et al<sup>(25)</sup> utilizaram diversas técnicas para caracterizar pó de aciaria, em especial para determinar os compostos presentes no mesmo que devem influenciar mais ou menos dependendo da aplicação que se escolha para o pó, conforme pode-se observar na tabela 2.

De acordo com Sofili et al<sup>(24)</sup>, o volume e a composição química do pó gerado na Croácia não difere dos pós gerados por outros produtores de aço no mundo, com exceção de Zn (na ordem de 10%) em função de sua sucata conter baixa quantidade de aço galvanizado. Complementam colocando que seus resultados provem uma melhor análise de possibilidades para uso do pó de FEA em outras indústrias ou para recuperá-lo (metais) e para reuso no processo siderúrgico.

Conforme Gonçalves et al<sup>(25)</sup>, o uso de várias técnicas para caracterização é importante porque, por exemplo, a presença de duas fases de óxidos de Zn são fundamentais para a reciclagem deste resíduo seja:

- (1) para obter zinco metálico para a indústria do zinco,
- (2) para obter ferro metálico para a indústria siderúrgica,
- (3) para a construção civil, pois dependendo da presença e quantidade de óxido de zinco um retardo na hidratação pode ocorrer, podendo resultar numa barreira para sua utilização.

**Tabela 2** – Técnicas empregadas na caracterização e seus objetivos.

Técnica	Finalidade	Sofili et al – 2004 <sup>(24)</sup>	Gonçalves – 2004 <sup>(16)</sup>
Espectroscopia de emissão atômica - ICP/AES	Composição Química elementar	As e Hg	Fe, Zn Ca, Cr e Mg
Espectroscopia de Emissão Atômica (EEA)	Composição Química elementar	Outros elementos	-----
Determinador de C e S com forno indução	Composição Química elementar	C e S	C e S
Análise química via úmida por titulação, baseado na NBR 8741	Análise de Fe <sub>(total)</sub> , Fe <sup>0</sup>	-----	√
Classificação Granulométrica	Determinação de tamanho médio de grão	sieve separation according to DIN-4188	Laser Granulometer – model 1064 – from Cilas
Combinação de Espectroscopia Eletron Auger com alta resolução (HR AES) e Espectroscopia Fotoelétron de Raios-X (XPS).	Determinação de tamanho de grão e composição mineralógica	√	-----
Difração de Raios-X - DRX	Determinar a composição estrutural das amostras de PAE	√	√
Microscopia eletrônica de varredura acoplada a microssonda - MEV/EDS	Caracterizar morfológica e quimicamente as fases de PAE	√	√
Espectroscopia Mössbauer	Analisar química e microestruturalmente materiais ferrosos	-----	√
Caracterização Ambiental	Avaliação do Impacto Ambiental do Resíduo no meio ambiente	10 g de pó para 100 ml de água destilada por 1, 10 e 30 dias. Determinação dos metais no filtrado via EEA. Medição de pH e condutividade	Análise via NBR 2004, 2005 e 2006

### Reciclagem de Pó de Aciaria Elétrica

Para que os processos de recuperação de Zn sejam economicamente viáveis, é necessário que os pós contenham altos teores de Zn (Yamada; Itaya; Hara, 1998). Na tabela 3 são apresentados alguns processos utilizados no mundo para tratamento de PAE.

Analisando a Tabela 3, nota-se que o principal objetivo dos processos é a recuperação de zinco, devido ao alto valor agregado que este metal representa para a indústria. Em muitos países, Turquia, por exemplo, o PAE é usado como substituto do minério de Zn necessário para a galvanização do aço, evitando, assim, que seja realizada a importação deste minério (Best; Pickles, 2000). Observa-se que a grande maioria dos processos referenciados são pirometalúrgicos, e comercialmente vários deles estão em operação desde o final da década de 90. Estas técnicas piro e hidrometalúrgicas para os resíduos que incorporem os mesmos em seus processos produtivos têm sido estudadas, patenteadas e algumas implementadas comercialmente em todo o mundo, utilizando o princípio de redução para tratar poeiras de aciaria com eficiência. Processos mundialmente conhecidos como o Environplas, Star, Waelz,

Inmetco, e outros apresentam grandes vantagens já que produzem subprodutos de valor comercial e geram economia, pois evitam ou diminuem custos de disposição (aterros), transporte, e matéria-prima a ser extraída da natureza.

**Tabela 3:** Processos para Redução de Pó de Aciaria Elétrica.

Processo	País	Princípio	Processo Metalúrgico	Produtos
Waelz <sup>(21)</sup>	Desenvolvido na Alemanha (comercial)	pó+agente redutor+fundentes	piro	ZnO contaminado por Pb+halogênios+produto rico em Fe
St JOE <sup>(28)</sup>	EUA (comercial)	Redução seletiva dos óxidos dentro de um ciclone de fusão	piro	Fe, Zn e Pb
ZIA <sup>(29)</sup>	EUA	Forno vertical +retorta	piro	Zn metálico
Enviroplas <sup>(30)</sup>	África do Sul (comercial)	Redução seletiva de óxidos a alta temperatura em presença de carbono.	piro	ZnO e Pb
INMETCO <sup>(31)</sup>	USA (comercial)	PAE (aço inox) + material carbonáceo	piro	Pb, Zn, Fe e Fe-Cr-Ni
EZINEXX <sup>(32)</sup>	Itália (comercial)	PAE+eletrólito fraco+ agente redutor (carvão mineral)+carepa de laminação	hidro	Zn, Fe, Pb e metais alcalinos
Processo Fusão redução <sup>(27)</sup>	Japão	PAE+agente redutor (coque)	piro	Zn e Fe
Lixiviação com soda caústica para PAE <sup>(33)</sup>	Turquia	PAE+NaOH	hidro	Zn e Pb
HTR <sup>(34)</sup>	Japão (comercial)	Redução seletiva	piro	Zn e Pb
IMS <sup>(34)</sup>	Japão (comercial)	Redução em fornos elétricos dos óxidos dos pós	piro	Fe, Zn
RHYOHO <sup>(34)</sup>	Japão (comercial)	Processo eletroquímico	hidro	Concentrado de Zn
Processo hidrometalúrgico para produção de Zn <sup>(35)</sup>	Singapura	PAE+água+NaOH+solução alcalina	hidro	Zn e Pb
Redução do PAE por plasma <sup>(36)</sup>	Canadá	PAE+reductor(CO <sub>2</sub> )+plasma (24KVA)	piro	Zn, Pb, Cd e escória
PRIMUS <sup>(37)</sup>	Luxemburgo (planta piloto)	Minério de ferro+carepa de laminação+PAE+lama BF/BOF+lama oleosa+carvão	piro	Zn, Pb, Cl, Na, K e Fe
IPEN/IPT <sup>(38)</sup>	Brasil	Pó+ ligante	piro	Matéria-prima do alto forno.
UFRGS <sup>(16)</sup>	Brasil	Pó + agente redutor (carvão)	piro	Matéria-prima do forno elétrico a arco
EPUSP <sup>(39)</sup>	Brasil	Pó briquetado	piro	Matéria-prima do forno elétrico a arco.
EPUSP <sup>(12)</sup>	Brasil	Pó+agente redutor (carvão mineral) + aglomerante (cimento Portland)	piro	Auto-redução para produção de ferro primário e concentração de Zn.
EPUSP <sup>(40)</sup>	Brasil	Pó+agente redutor (carvão)+escória de alto forno.	piro	Auto-redução para produção de ferro primário e concentração de Zn.
Processo TECNORED <sup>(41)</sup>	Brasil (comercial)	Resíduos sólidos (pó FEA e outros) + agente redutor, minério de ferro	piro	Ferro gusa

Apesar da existência de vários processos comerciais, muitos estudos sobre a redução de pó de aciaria tanto elétrica como a oxigênio continuam sendo realizados em todo o mundo buscando melhores alternativas de processos em diferentes especificidades de empresas geradoras, de formas de redução e de mercado para os produtos da redução. Mesmo havendo processos de redução consagrados comercialmente em todo o mundo (Tabela 3) desde final da década de 90, estudos para recuperação de metais (Fe, Zn, Pb, Cd e Ca) de PAE continuam sendo realizados, sendo que nos últimos 6 anos em busca feita via <http://www.sciencedirect.com/science/journals/> (banco de dados bibliográficos de periódicos) e via <http://www.google.com>, dos 30 artigos encontrados 18 referem-se a processos de redução para obtenção de metais. Destes trabalhos, 10 foram desenvolvidos utilizando processos hidro e 8 pirometalúrgicos. Isto mostra que mesmo com a alta eficiência obtida com os processos pirometalúrgicos comerciais na obtenção de metais, questões como custo energético, grandes instalações, questões ambientais levam os pesquisadores a procurarem alternativas mais sustentáveis econômica e ambientalmente que os processos hidro podem trazer (muito destes processos estudados na década de 90 tinham baixa eficiência em função da fase ZnFeO<sub>4</sub> ser bastante estável). Outros trabalhos têm sido desenvolvidos para obtenção de maior precisão na caracterização de pós de aciaria para melhorar mais a eficiência de sua redução e também para sua aplicação em outras áreas como cerâmica vitrificada, adição ao cimento, e para limpeza de águas contaminadas.

Cabe salientar que acessando o site de busca na internet <http://www.google.com/patents> foi possível encontrar 258 citações incluindo as palavras-chaves “EAF DUST REDUCTION” (FEA PÓ REDUÇÃO). Analisando as primeiras 60 patentes da busca, observou-se que um percentual de 83% das patentes são relacionadas a processos de recuperação de constituintes do pó:

- Zn e metais não ferrosos → 27.
- Fe (inclui adição de pó em FEA, BOF, BF ou redução direta) → 16.
- ZnO e outros compostos → 7.

Outras patentes estão relacionadas à aplicação do PAE em materiais cerâmicos (telhas e tijolos) e concreto.

No Brasil, até o momento, pode-se dizer, que a geração de sucata zincada ainda não atingiu os patamares da Europa, portanto o pó gerado na produção de aço via FEA possui menores teores de Zn, inviabilizando o uso das tecnologias, em especial pirometalúrgicas comercializadas mundialmente. Por outro lado, o preço de Zn metálico utilizado para fabricação de produtos em Zamak, e pelo processo die casting vem atingindo preços mais elevados que Al metálico utilizado para o mesmo fim. De acordo com o *Sumário Mineral Brasileiro 2006*, entre os prováveis investimentos de recursos, está em curso o estudo de viabilidade econômica pela Votorantim Metais Zinco (única produtora de zinco a partir de minério do Brasil) da implantação de uma unidade de reciclagem em Juiz de Fora (MG) para tratamento de pó de aciaria elétrica e outros resíduos de zinco. Os primeiros estudos indicam investimentos da ordem de R\$ 250 milhões.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Até bem pouco tempo só havia uma única possibilidade para o descarte de pó de aciaria elétrica, ou seja, disposição em aterro industrial. Este artigo mostra que além de as pesquisas na redução deste pó para obtenção de metais e compostos continuarem sendo



realizadas na busca de processos mais eficientes técnica, econômica e ambientalmente. Existem várias alternativas sendo pesquisadas de reciclagem interna e externa deste resíduo, mas em algumas situações há uma ou mais barreiras ambientais, econômicas ou tecnológicas dificultando sua reciclagem. Fica claro que a reciclagem externa, mesmo sendo uma alternativa viável a curto prazo, a longo prazo com a diminuição de reservas naturais de uma série de metais como Zn, Pb, Cd, e o próprio Fe, faz da recuperação de metais a partir de pós de FEA um caminho também para as empresas geradoras na América Latina, como já vem sendo na Europa e Japão a mais de 10 anos. Considerando ainda, que o Zn, segundo elemento do pó de aciaria, chama atenção pelo seu teor muito maior que o máximo encontrado nos seu minérios hoje em dia no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos sólidos – Classificação: NBR 10004. Rio de Janeiro, 2004.
- 2 HUBER J. C., PATISSON F., ROCABOIS P., BIRAT J. P., ABLITZER D. Some means to reduce emissions and improve the recovery of electric arc furnace dust by controlling the formation mechanisms. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, 2., 1999, San Sebastián. Proceedings of the “Rewas’99: Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology”. San Sebastián: TMS, INASMET, 1999, p.1483-1491.
- 3 INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. Anuário estatístico da indústria siderúrgica brasileira - 2003. Rio de Janeiro, 2003. 20 p
- 4 UN ECE Steel Series, Iron and Steel Scrap 1995, New York/Geneva, 1995, p. 123.
- 5 BIRAT, J. P. A futures study analysis of the technological evolution of the EAF by 2010, Irsid-Usinor Recherche. La Revue de Métallurgie-CIT, Novembre, 2000, P. 1347 – 1363.
- 6 INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. Identificação e seleção de tecnologias para tratamento e/ou reciclagem de pós de aciaria elétricas. Relatório Final. Fase III. Fevereiro, 1996.
- 7 BREHM, F. A.; VARGAS, A.; MORAES, C. A. M.; MASUERO, A.; DAL MOLIN, D.; VILELA, A. C. F.; BERNARDES, A. M.; MAFALDO. CHARACTERIZATION AND USE OF EAF DUST IN CONSTRUCTION. In: THIRD JAPAN-BRAZIL SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING-ENERGY-ENVIRONMENT IN METALLURGICAL INDUSTRIES, 2001, São Paulo. 2001, p. 173-181.
- 8 STROHMEIER, G. E BONESTELL, J. E.. In: IRON AND STEEL ENGINEER. Proceedings of Iron and steel engineer, Alemanha, 1996. p. 87-90.
- 9 HARA, Y. Development of a smelting reduction process for electric arc furnace dust recycling. La Revue de Metallurgie, março 1998, p. 369-376.
- 10 PICKELS, C.A.; DONALD, J. R. Reduction of Electric arc furnace dust with solid iron powder. Canadian Metallurgical Quarterly, vol. 35, 3, 255-267, 1996.
- 11 GUDENAU, H. W. et al. Recycling of dust and treatment of tramp elements with the Him (High Turbulence-Mixer)-Principle. In: JAPAN-GERMANY SEMINAR ON FUNDAMENTALS OF IRON AND STEELMAKING. Germany, 8 to 9 of October 1996. Proceedings of Japan-Germany seminar on fundamentals of iron and steelmaking. Germany: Verein deutscher eisenhüttenleute German iron and steel institute, 1996. p.126-135.

- 12 MANTOVANI, Mario; TAKANO, Ciro. Comportamento de pelotas auto-redutoras de resíduo de aciaria elétrica. In: 51° CONGRESSO ANUAL DA ABM, 51. Porto Alegre, 1996. Anais do 51° congresso anual da ABM . Porto Alegre, 1996. v.1, p. 273-279.
- 13 Pelino M, Karamanov A, Piscicella P, Crisucci S, Zonetti D, Vitrification of electric arc furnace dusts. Waste Management. 2002; 22(2002):945-949.
- 14 Yang Q, Gustafsson B, Studies on Dust Recycling in the Electric Arc Furnace at Uddeholm Tooling AB. Scandinavian Journal of Metallurgy. 2003; 32:147-156.
- 15 MASUD A.; LATIF A. Fundamentals of zinc recovery from metallurgical wastes in the Enviroplas process. Minerals Engineering, 2002, pp. 945-952.
- 16 GONÇALVES, J.M. Estudo de caracterização e avaliação da influência do tempo na redução carbotérmica do pó de aciaria elétrica. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da UFRGS, Porto Alegre, 2004. 95p.
- 17 KANARI, N. et al. New process for the tread treatment of eaf dust. Recycling and Wastw Tratment in Mineral and Meyal Processing. Luleà: Technical and Economic Aspects, 2002, p.16-20.
- 18 DOMÍNGUEZ, E.A.; ULLMANN, R.; ‘Ecological bricks’ made with clays and steel dust pollutants. Applied Clay Science, Olavarría, v.11, p.237-249, September 1996.
- 19 XIA, D.K.; PICKLES, C.A. Caustic Roasting and Leaching of Electric Arc Furnace Dust. Canadian Metallurgical Quarterly, v.38, n.3, p.175-186, 1999.
- 20 YOUCAI, Z.; STANFORTH, R. Technical note extraction of zinc from zinc ferrites by fusion with caustic soda. Minerals Engineering, v. 13, n.13. 2000, p.1417-1421.
- 21 AL-ZAID, R. Z.; AL-SUGAIR, F. H.; AL-NEGHEIMISH, A. I. Investigation of potential uses of electric arc furnace dust (EAFD) in concrete. Cement and concrete research, v.27, n. 2, p.267-278, 1997.
- 22 COEDO, A.G.; DORADO, U, T.; PADILLA, I.; MAIBUSCH, R.; KUSS, H.-M.. Slurry sampling electrothermal vaporization inductively coupled plasma mass spectrometry for steelmaking flue dust analysis. Spectrochimica Acta, Part B 55, 2000. p.185-196.
- 23 BREHM, F. A. ADIÇÃO DE ÓXIDO DE ZINCO (ZnO) EM PASTAS DE CIMENTO VISANDO VIABILIZAR A RECICLAGEM DE PÓS DE ACIARIA ELÉTRICA (PAE) NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Tese defendida no Programa de Pós-Graduação em Metalurgia, Materiais e Minas da UFRGS, Porto Alegre, dez, 2004, p. 90.
- 24 SOFILI, A. R.; STEFANOVI, Š. C.-; RADOVI, V. N.-; JENKO, M. Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. Journal of Hazardous Materials B109 (2004). p. 59–70.
- 25 GONÇALVES, Janaína Mendes et al. Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. Journal of Hazardous Materials B136 (2006) 953–960.
- 26 YAMADA, S.; ITAYA, H.; HARA, Y. Simultaneous recovery of zinc and iron from electric arc furnace dust with a coke-packed bed smelting-reduction process. Iron and steel engineer, v.75, n.8, p.64-67, Aug 1998.
- 27 BEST, T.E; PICKLES, C.A. In-fight plasma reduction of electric furnace dust in carbon monoxide. Canadian Metallurgical Quarterly, v .40, n.1, p.61-78, 2000.
- 28 HANEWALD, R.H., MUNSON, W.A., SCHWEYER, D.L.. Processing EAF dusts and other nickel-chromium waste materials pyrometallurgically at INMETCO. Miner metal process, v.9, n.4, p 169-173, Nov 1992.

- 29 YOUCAI, Z.; STANFORTH, R. Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium. *Journal of Hazardous Materials*, 1999, p.223-240.
- 30 OLPER, M. Publicação, reprodução, execução: direitos autorais. In: 3TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECYCLING OF METALS AND ENGINEERED MATERIALS, 3., Point Clear, 1995. Proceedings of 3th International symposium on recycling of metals and engineered materials. Point Clear, 1995. p. 563-578.
- 31 MORDOGAM, H; et al. Caustic soda leach of electric arc furnace dust. *Turkish journal of engineering and environmental sciences*, v.23, n.3, p.199-207, 1999.
- 32 NOLASCO, P. J.; TENÓRIO, J. A. S. Processos para o aproveitamento de poeiras geradas durante a fabricação do aço In: 55º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 55. Rio de Janeiro, 2000. Anais do 55º Congresso anual da ABM, Rio de Janeiro, 2000. p. 2888-2897.
- 33 STROHMEIER, G. Two routes to more ecological steelmaking, *Steel times international*, 1992. p.30-31.
- 34 PISCIELLA, P.; CRISUCCI, S.; KARAMANOV, A.; PELINO, M. Publicação, reprodução, execução: direitos autorais. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, 1., 1999. Proceedings of Global symposium on recycling waste treatment and clean technology. 1999. p. 102-111.
- 35 MANTOVANI, Mario; TAKANO, Ciro; CAVALLANTE, F. Caracterização de três tipos de poeiras geradas em fornos elétricos a arco. In: 53º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 53. 1998. Anais do 53º Congresso Anual da ABM. Minas gerais, 1998. p.1329-1343.
- 36 SOUTHWICK, L. M. Publicação, reprodução, execução: direitos autorais. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON RECYCLING, WASTE TREATMENT AND CLEAN TECHNOLOGY, 1. San Sebastián, 1999. Proceedings of the "Rewas'99: Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology". San Sebastián, TMS, INASMET, 1999, p.311-325.
- 37 ROTH, J.L. et al. PRIMUS, a new process for recycling by-products and producing virgin iron. *La Revue de Metallurgie*, n.11, p 987-996, Nov 2001.
- 38 ORTIZ, N.; PIRES, M. A. F.; CASOLA, M. S. Publicação, reprodução, execução: direitos autorais. In: 41o CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 41, 1997. Anais do 41o congresso brasileiro de cerâmica. Associação brasileira de cerâmica. 1997. p. 721-724.
- 39 NOLASCO, Pedro; ESPINOSA, Denise; TENÓRIO, Jorge. Estudo morfológico da poeira gerada na fabricação de aço inoxidável. In: XXXI SEMINÁRIO DE REFINO, FUSÃO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS DA ABM, Vitória, E.S., maio, 2000. Anais do XXXI Seminário de refino, fusão e solidificação dos metais da ABM. Vitória, 2000.
- 40 TAKANO, C. MOURAO, M.B. Comparison of high temperature behavior of self reducing pellets produced from iron ore with that dust from sintering plant. *The iron and steel institute of Japan*, v.41, p 22-26, 2001.
- 41 D'ABREU, J. C. ; NOLDIN JÚNIOR, José Henrique . TecnoRed Trios - Convertendo Custos em Lucro. In: XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas / VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 2005, Florianópolis - Santa Catarina. v. 1. p. 467-476.