

ADIÇÃO DE POEIRA DE ACIARIA ELÉTRICA EM FERRO-GUSA LÍQUIDO

Felipe Fardin Grillo ¹

Vicente de Paula Marques Sobrinho ²

José Roberto de Oliveira ³

Raphael de Alcantara Sampaio ⁴

Jorge Alberto Soares Tenório ⁵

Denise Croce Romano Espinosa ⁶

Resumo

Esta pesquisa tem como objetivo estudar o processo de incorporação de massa de ferro ao ferro-gusa final e a volatilização do zinco contido na poeira de aciaria elétrica (PAE) proveniente de uma usina siderúrgica produtora de aços longos, mediante adição em ferro-gusa líquido às temperaturas de 1.400°C, 1.450°C e 1.500°C alterando-se o percentual de PAE a ser adicionado e o teor de silício do ferro gusa. Previamente, a PAE foi caracterizada utilizando-se as técnicas de análise química e de análise granulométrica. Após a caracterização, a PAE a ser adicionada ao banho de gusa líquido foi aglomerada sob a forma de briquetes. A realização dos experimentos de fusão, em escala de laboratório, ocorreu em um forno de resistências com controlador de temperatura. Um fluxo de gás inerte (argônio) foi mantido no interior do forno durante a realização dos experimentos. O resultado da amostra da PAE volatilizada mostra que há aumento na concentração de zinco quando se compara com a concentração de zinco da PAE na forma “como recebido”.

Palavras-chave: Resíduo siderúrgico; Poeira; Reciclagem; Ferro-gusa.

ADDITION OF ELECTRIC ARC FURNACE DUST IN HOT METAL

Abstract

This research aims to study the process of incorporation of the mass in final hot metal and volatilization mass contained in the electric arc furnace dust (EAFD), by addition in hot metal at a temperature of 1,400°C; 1,450°C and 1,500°C altering experimental conditions such as the percentage of EAFD to be added and the percentage of silicon in hot metal. Previously, the EAFD was characterized using techniques of chemical analysis and size analysis. After characterization, the EAFD to be added to the hot metal was agglomerated in the form of briquettes. The achievement of fusion experiments in laboratory scale was placed in a vertical tubular furnace with temperature control. A flow of inert gas (argon) was maintained inside the furnace during the experiments. The result of the sample EAFD volatilized shows that there is an increase in the zinc concentration when compared with the concentration of zinc present in EAFD “as received”.

Key words: Siderurgical residue; Dust; Recycling; Hot metal.

¹MSc. Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Aluno do curso de Doutorado em Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, Av. Professor Mello Moraes, 2463, Cep 05508-030, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: felipefarding@gmail.com

²Engenheiro Metalúrgico, Professor Doutor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Av. Vitória, 1729, Bairro Jucutuquara, Cep 29040-780, Vitória, ES, Brasil. E-mail: vicente@ifes.edu.br

³Engenheiro Metalúrgico, Professor Doutor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Av. Vitória, 1729, Bairro Jucutuquara, Cep 29040-780, Vitória, ES, Brasil. E-mail: jroberto@ifes.edu.br

⁴Engenheiro Químico, Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Av. Ministro Salgado Filho, 1685, Bairro Soteco, Cep 29106-010, Vila Velha, ES, Brasil. E-mail: rdasampaio@gmail.com

⁵Engenheiro Metalúrgico, Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de São Paulo, Av. Professor Mello Moraes, 2463, Cep 05508-030, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: jtenorio@usp.br

⁶Engenheira Metalúrgica, Professora Associada da Universidade de São Paulo. Av. Professor Mello Moraes, 2463, Cep 05508-030, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: espinosa@usp.br

I INTRODUÇÃO

A poeira de aciaria elétrica (PAE), gerada no forno elétrico a arco, representa um dos maiores problemas pelo seu conteúdo em elementos químicos, tais como zinco, ferro, chumbo, cromo, cádmio, entre outros, emitidos à atmosfera durante a fabricação do aço.⁽¹⁾

Vários autores⁽²⁻⁴⁾ têm relatado os índices da quantidade gerada de poeira de aciaria com relação à produção de aço. Tais valores mostram que entre 15 kg a 20 kg de PAE são gerados para cada tonelada de aço que é produzida.

A PAE é classificada como resíduo perigoso no Brasil de acordo com os critérios descritos na NBR 10.004:2004,⁽⁵⁾ bem como em outros países produtores de aço, como Estados Unidos,^(6,7) Japão⁽⁸⁾ e nos países que integram a União Européia.⁽⁹⁾ Devido a esta classificação, o manuseio da PAE no Brasil exige cuidados especiais.

Exigências impostas pela legislação ambiental, somada com a necessidade de minimização de custos, fazem com que as empresas metalúrgicas e siderúrgicas busquem tecnologias para solucionar os problemas da geração de resíduos.⁽¹⁰⁾

Portanto, esta pesquisa tem como objetivo estudar, em escala laboratorial, a incorporação de massa de ferro e a volatilização do zinco contidos na poeira de aciaria elétrica mediante adição em ferro-gusa líquido, variando-se a temperatura do banho de ferro-gusa, a massa de PAE e o percentual de silício do ferro-gusa. Além disso, foi coletada a poeira geral, visando o aumento do teor de zinco para utilização na indústria do zinco.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram empregadas os seguintes equipamentos, materiais e matérias-primas, para a realização dos experimentos:

- Poeira de aciaria elétrica;
- Ferro-gusa;
- Cadinhos de alumina;
- Amostradores a vácuo; e
- Forno elétrico com capacidade de 1.700°C.

Foram recebidos 100 kg de PAE e 100 kg de ferro-gusa na forma de lingotes, provenientes de siderúrgicas situadas na região da Grande Vitória, no estado do Espírito Santo. Os lingotes tinham a massa variando entre 1 kg e 7 kg.

Após a obtenção dos materiais para a pesquisa, a próxima etapa foi a caracterização das matérias primas. A PAE foi caracterizada utilizando as técnicas de análise química, análise granulométrica e área de superfície específica.

2.1 Metodologia Adotada para Adição de PAE em Gusa Líquido

O ferro-gusa com composição química e quantidades conhecidas (1 kg a 1,1 kg) foi carregado em um cadinho de alumina de alta alumina TIPO 710 cuja composição química é: alumina –99,7%; sílica –0,08% e magnésio –0,07%. As dimensões do cadinho são: altura –110 mm; diâmetro –64 mm e fundo –64 mm com capacidade aproximada de 0,35 L. O cadinho foi levado até um forno de fusão e injetado argônio na câmara de aquecimento para evitar a oxidação do ferro-gusa. Quando o forno atingiu a temperatura de trabalho, a PAE (na forma de briquetes) foi adicionada ao cadinho.

Após a adição da PAE, foram retiradas amostras de metal, através de amostradores a vácuo. O tempo de reação passou a ser contado imediatamente após o carregamento.

2.2 Cálculo de Massa dos Experimentos e Briquetagem da Mistura

No cálculo da massa de poeira, foi levada em conta a composição química do ferro-gusa (%Si), além da composição química da poeira, considerando a redução completa pelo silício do ferro-gusa de todos os óxidos contidos no resíduo, que teoricamente seriam reduzidos pelo silício. A Tabela 1 apresenta os dados dos ensaios realizados.

Em relação à primeira coluna da Tabela 1, os quatro primeiros números representam a temperatura dos ensaios. A abreviação (Esteq.) representa a massa estequiométrica de poeira adicionada. As três últimas letras identificam os teores de silício, sendo (A) para teores entre 1,5% e 1,65% e (M) para os teores entre 0,85% e 0,95%.

Tabela 1. Caracterização dos ensaios realizados

Ensaio	Massa de ferro-gusa Inicial (g)	Massa de PAE adicionado (g)	%Si Inicial
1400 Esteq. A Si	805,40	95,10	1,61
1400 Esteq. M Si	822,44	54,60	0,85
1450 Esteq. A Si	818,00	96,58	1,6
1450 Esteq. M Si	824,60	54,70	0,95
1500 Esteq. A Si	823,87	77,70	1,57
1500 Esteq. M Si	806,85	51,00	0,93

Para a fabricação dos briquetes, utilizou-se uma prensa hidráulica manual. Os briquetes foram prensados em uma pressão de 14,5 MPa durante um tempo de 20 segundos em uma matriz de aço. Após este tempo reduziu-se a pressão da prensa sobre o molde e, em seguida, retirou-se o briquete. Os briquetes utilizados possuíam diâmetro de 15 mm e altura entre 10 mm e 25 mm. Em todos os experimentos a PAE utilizada foi previamente colocada em estufa à temperatura de 115°C, para perda da umidade.

2.3 Captação do Material Volatilizado

Foram realizadas coletas de amostras da nova poeira gerada pelo processo proposto com o objetivo de avaliar o teor de zinco.

Foi montado um dispositivo experimental para o estudo da evaporação de zinco. Este dispositivo, denominado coletor da poeira, foi posicionado sobre o forno tubular vertical.

Durante os experimentos, o gás proveniente do forno era direcionado para o dispositivo, objetivando coletar os materiais particulados.

A PAE foi adicionada ao ferro-gusa líquido a uma temperatura de trabalho pré-estabelecida para que ocorresse a volatilização do zinco. Após o resfriamento, foi realizada a pesagem e a análise química das amostras.

Em seguidas, as amostras foram submetidas a análise química para verificar os teores de zinco na nova poeira coletada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Química

Os resultados da análise química da PAE são apresentados na Tabela 2.

Pode-se observar na Tabela 2 que os teores de ferro e de zinco são compatíveis com os teores de ferro (24,9% a 46,9%) e de zinco (11,12% a 26,9%) relatados por Nyrenda⁽¹¹⁾ para as siderúrgicas americanas.

De acordo com a ABNT NBR 1004:2004⁽¹²⁾ - Anexo B, fonte geradora: ferro e aço e o código de identificação K061, a PAE devido à presença de cádmio e chumbo é considerada um resíduo perigoso, Classe I, de fonte específica.

3.2 Análise Granulométrica

Os resultados da análise granulométrica estão representados na Figura 1.

A linha (A) representa a porcentagem de distribuição do tamanho das partículas e a linha (B) representa a porcentagem acumulada.

Observa-se, na Figura 1, que 10% da amostra possui diâmetro da partícula menor que 0,672 μm e 90% do material apresenta granulometria inferior a 17,07 μm . O resultado da área de superfície específica das partículas, medida pela técnica BET, é de 3,81 m^2/g e com diâmetro médio da partícula de 2,281 μm .

Tabela 2. Composição química da PAE na forma “como recebido” por FRX

Elemento	Composição (%)	Elemento	Composição (%)
Fe _{total} *	38,90	P	0,14
Zn _{total} **	11,70	Cu	0,28
Ca	3,06	Cr	0,21
Si	1,66	Ti	0,08
Mn	2,27	Br	0,13
Mg	1,33	Sn	0,07
Cl	4,64	Cd	0,03
K	1,87	S	0,88
Pb	1,48	Al	0,32

*Fetotal corresponde a Fe, Fe₃O₄, Fe₂O₃, FeO e Fe associado com Zn(ZnFe₂O₄); **Zntotal corresponde ao metal na forma de Zn, ZnO e de zinco associado com o Fe(ZnFe₂O₄).

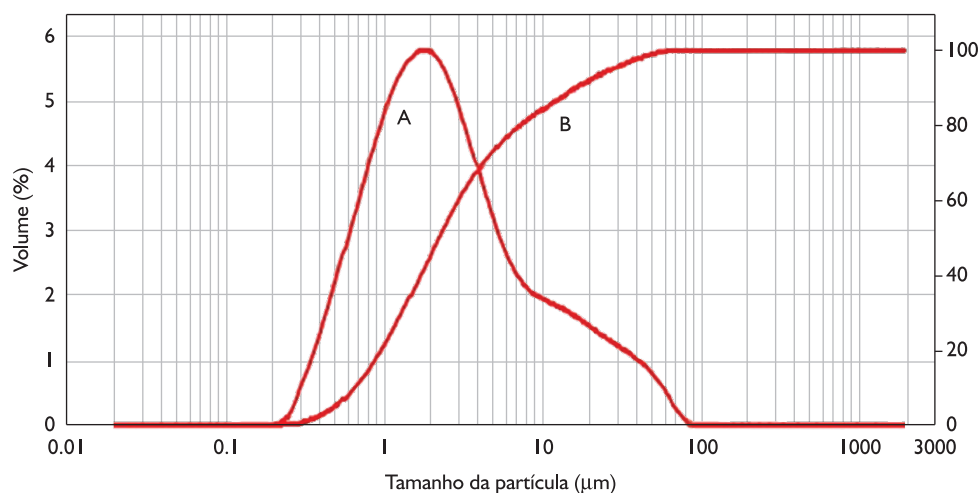


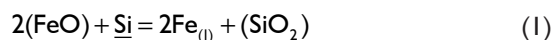
Figura 1. Distribuição do tamanho das partículas da PAE na forma “como recebido”.

3.3 Ensaios de Adição de PAE em Ferro-Gusa Líquido

Neste item são apresentados e discutidos os resultados referentes à análise termodinâmica dos testes realizados neste trabalho. As curvas da concentração de silício reduzido do ferro-gusa em relação ao tempo são apresentadas nas Figuras 2 e 3.

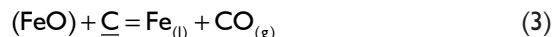
Observa-se que ocorre uma redução considerável do silício do ferro-gusa nos primeiros cinco minutos, comportamento que é observado por Oliveira.⁽¹³⁾

Inicialmente ocorre a redução do silício do ferro-gusa de acordo com as seguintes equações:⁽¹⁴⁻¹⁷⁾



$$\Delta G^\circ = -78570 + 26,56.T(\text{cal/mol})^{(14,16,17)} \quad (2)$$

e



$$\Delta G^\circ = 21320 - 20,66.T(\text{cal/mol})^{(14,16)} \quad (4)$$

Analisando as Figura 2 e 3, é possível observar que a concentração de silício no ferro-gusa aumenta com o aumento da temperatura. Do ponto de vista termodinâmico, isto ocorre porque a reação de redução do FeO pelo silício (Equação 2) é exotérmica, ou seja, o aumento da temperatura desfavorece a reação. Por outro lado, a reação de redução do FeO pelo carbono é endotérmica, ou seja, é favorecida pelo aumento da temperatura.

Visando verificar se as reações ilustradas pelas Equações 1 e 3 possuem potencial de ocorrer no instante final (15 minutos), foram realizados cálculos do ΔG . Para isso utilizou-se o programa computacional termodinâmico Factsage 6.3 para o cálculo das atividades dos óxidos na escória. A Tabela 3 apresenta os resultados das atividades gerados pelo Factsage 6.3.

Após os cálculos das atividades do carbono e silício do metal e os cálculos das atividades dos óxidos na escória, é possível calcular a variação da energia livre das reações. A Tabela 4 apresenta os resultados das variações das energias livres das reações de redução do FeO pelo carbono e pelo silício.

Analisando a Tabela 4, observa-se que as reações de redução do FeO pelo silício e pelo carbono em alguns casos possuem potencial termodinâmico para ocorrerem. Entretanto, quando a atividade do FeO na escória é baixa, as reações não possuem potencial termodinâmico para ocorrência.

Analisando as Figura 2 e 3 observa-se também que, na temperatura de 1.500°C e para os tempos de 15 minutos, a redução do silício do ferro-gusa é menor do que para os ensaios nas temperaturas de 1.450°C e 1.400°C. Visando compreender estes resultados é gerada o gráfico da Figura 4 por meio de simulação computacional.

Observa-se nesta simulação que o comportamento do silício de equilíbrio é similar ao observado nos experimentos, ou seja, o aumento da temperatura desfavorece a redução do silício do ferro-gusa. Pickles⁽¹⁷⁾ também verifica este comportamento.

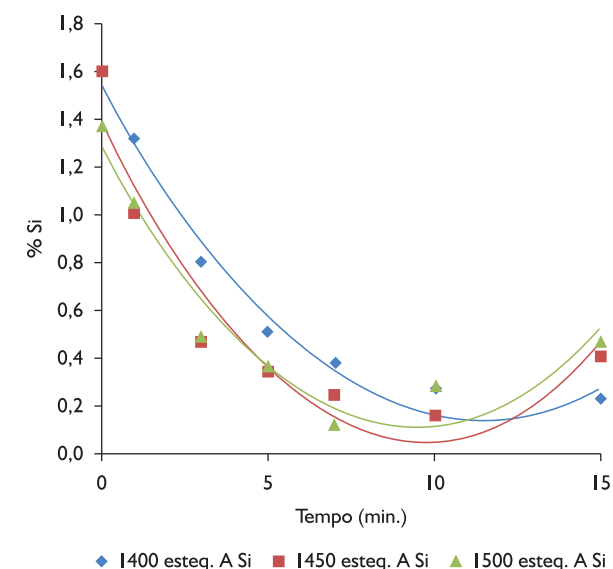


Figura 2. Variação do teor de silício do ferro-gusa em função do tempo.

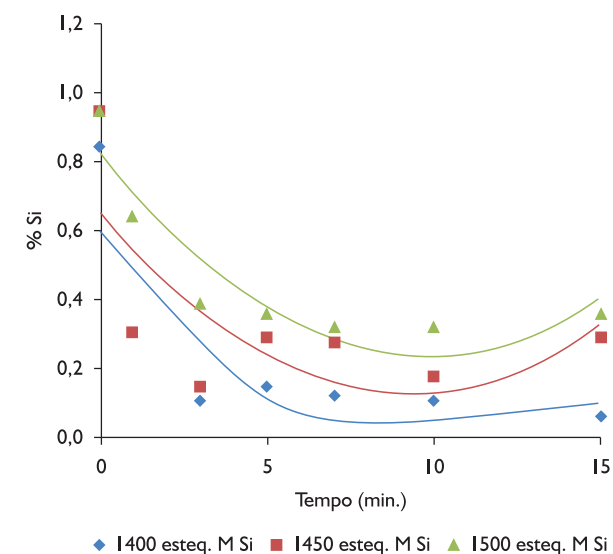


Figura 3. Variação do teor de silício do ferro-gusa em função do tempo.

Tabela 3. Atividades do SiO_2 e FeO das escórias finais

Experimentos	SiO_2	FeO
1400 Esteq A Si	0,78	0,02
1400 Esteq M Si	0,34	0,22
1450 Esteq A Si	0,74	0,08
1450 Esteq M Si	0,64	0,11
1500 Esteq A Si	0,93	0,01
1500 Esteq M Si	0,84	0,01

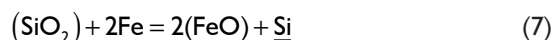
Analisando o comportamento do silício nos ensaios, verificam-se oscilações no teor de silício do ferro-gusa líquido. Este comportamento é observado em todas as classes de experimentos.

Ainda analisando as Figuras 2 e 3, observa-se que, após cinco minutos, com o aumento da atividade da sílica (SiO_2) na escória começa a redução da SiO_2 pelo carbono ou ferro líquido do banho, de acordo com as seguintes equações:



$$\Delta G^\circ = 138900 - 95,72T(\text{cal/mol})^{(18)} \quad (6)$$

e



$$\Delta G = 85560 - 34,2T(\text{cal/mol})^{(14)} \quad (8)$$

As duas reações são endotérmicas, por isso são favorecidas pelo aumento da temperatura. A fim de avaliar a redução do SiO_2 através do ferro e do carbono, foram realizados cálculos termodinâmicos. A Tabela 5 apresenta os resultados das variações das energias livres das reações de redução do SiO_2 pelo carbono e pelo ferro.

Analisando os dados da Tabela 5 e correlacionando-os com os ensaios, observa-se que a reação de redução do SiO_2 pelo carbono é termodinamicamente possível por apresentar a energia livre negativa.

Sobre o ponto de vista termodinâmico, o carbono apresenta desvio positivo da idealidade. Isto significa que sua atividade aumenta com o aumento da temperatura. Este comportamento é comprovado por meio da utilização da termodinâmica computacional (Thermocalc). A Figura 5 apresenta o comportamento do carbono em relação à temperatura.

Analisando a Figura 5, observa-se que a fração molar do carbono no equilíbrio tende a diminuir com o aumento da temperatura.

A redução do SiO_2 possui condições termodinâmicas de ocorrer; entretanto, ela depende das atividades do FeO e SiO_2 na escória e do silício no metal, além da temperatura, sendo favorecida com o aumento da mesma. Após a reversão do silício e o aumento da atividade do mesmo no metal, a reação de redução do FeO pelo silício e carbono é novamente favorecida. Entretanto, esta é dependente da atividade do FeO na escória.

Segundo Silva e Meo,⁽¹⁸⁾ a reação de redução do SiO_2 pelo carbono é favorecida por altas temperaturas. Este comportamento é observado na Tabela 4.

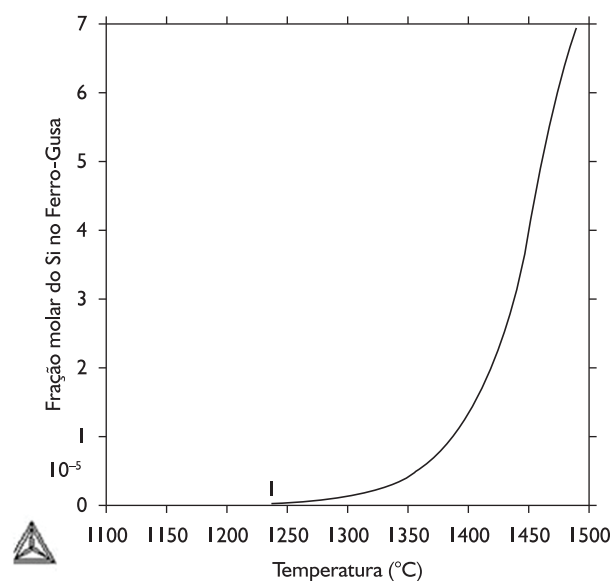


Figura 4. Simulação do teor de silício de equilíbrio no ferro líquido.

Tabela 4. Variação da energia livre de Gibbs da redução do FeO (kcal/mol)

Ensaio	$(\text{FeO}) + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$	$2(\text{FeO}) + \text{Si} = 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$
1400 Esteq A Si	4,50	-9,23
1400 Esteq M Si	-10,78	-23,47
1450 Esteq A Si	-5,38	-18,77
1450 Esteq M Si	-7,48	-20,16
1500 Esteq A Si	8,16	-2,28
1500 Esteq M Si	5,34	-4,73

Tabela 5. Variação da energia Livre de Gibbs das reações de redução do SiO_2 (kcal/mol)

Ensaio	$(\text{SiO}_2) + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$	$(\text{SiO}_2) + 2\text{Fe} = 2(\text{FeO}) + \text{Si}$
1400 Esteq A Si	-13,18	3,08
1400 Esteq M Si	-13,57	17,90
1450 Esteq A Si	-14,94	12,42
1450 Esteq M Si	-15,58	14,03
1500 Esteq A Si	-19,74	-4,27
1500 Esteq M Si	-19,61	-1,82

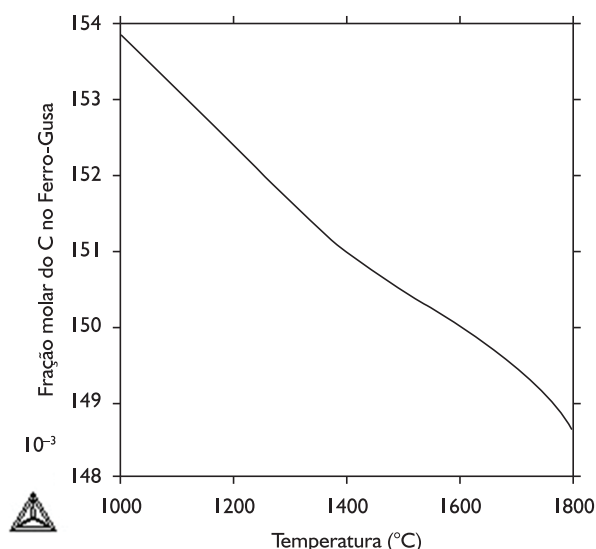


Figura 5. Comportamento do carbono do ferro-gusa.

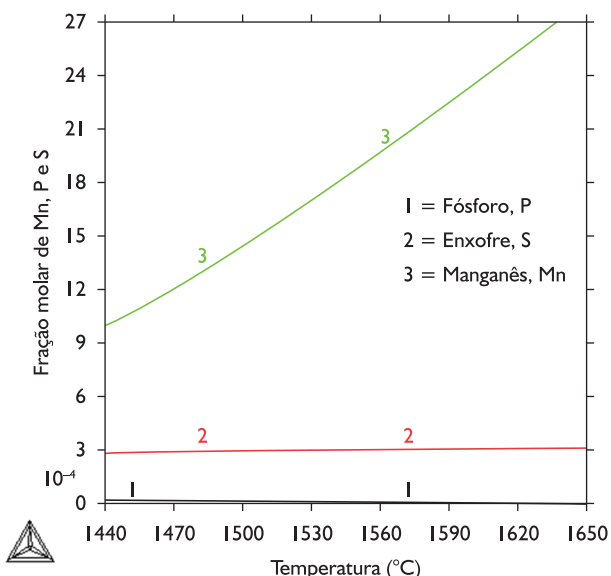


Figura 6. Comportamento de equilíbrio de enxofre, fósforo e manganês no metal.

Tabela 6. Composição química elemental da poeira resultante do processo por FRX

Elemento	Composição (%)
Fe _{total} *	2,41
Zn _{total} **	52,54
Ca	0,22
Si	0,37
Mn	0,09
Mg	0,20
Cl	5,83
K	2,53
Pb	2,00
S	0,28
Al	0,29

Fe_{total}* corresponde ao metal na forma de Fe, Fe₃O₄, Fe₂O₃, FeO ZnO e de ferro associado com o Zn (ZnFe₂O₄); Zn_{total}** corresponde ao metal na forma de Zn, ZnO e de zinco associado com o Fe (ZnFe₂O₄).

A Figura 6 apresenta o comportamento de equilíbrio do enxofre, fósforo e manganês no metal, após a adição da PAE.

Analisando a Figura 6 observa-se que o comportamento do enxofre e fósforo no metal é praticamente estável. Já o manganês aumenta com o aumento da temperatura do metal.

3.4 Caracterização da Poeira Resultante do Processo

Os resultados da análise química da poeira resultante do processo são apresentados na Tabela 6.

Observa-se que o teor de ferro diminui de 38,9% para 2,41% e o teor de zinco aumenta de 11,7% para 52,54%, quando comparados com os valores apresentados pela PAE inicial.

De acordo com a ABNT NBR 1004:2004,⁽¹⁴⁾ no Anexo B, fonte geradora: ferro e aço e o código de identificação K061, a PAE estudada, devido à presença de chumbo, é considerada um resíduo perigoso de fonte específica, porém o teor de zinco (52,54%) é compatível com o teor de zinco do concentrado de minério importado (52%) e superior ao teor de zinco dos minérios nacionais (12% a 39%).

4 CONCLUSÕES

Em face aos resultados obtido nesta pesquisa, podem ser elaboradas as seguintes conclusões:

- A PAE no estado “como recebido” apresenta 10% da amostra com diâmetro da partícula menor que 0,672 μm e 90% do material apresenta granulometria inferior a 17,07 μm . Além disso, a área de superfície específica das partículas, medida por BET, é de 3,81 m^2/g e o diâmetro médio da partícula de 2,281 μm . A análise química mostra teores de ferro de 38,9% e de zinco de 11,7%;
- Observa-se que as condições termodinâmicas dos experimentos favorecem a redução do FeO da PAE pelo silício e pelo carbono;
- O aumento da temperatura desfavorece a redução do FeO da escória através do silício. Por outro lado, favorece a redução do SiO₂ e do FeO da escória pelo carbono do ferro-gusa líquido. Estes resultados também são observados nos cálculos termodinâmicos computacionais; e
- A reversão do silício da escória para o ferro-gusa líquido ocorre de acordo com as seguintes reações: $(\text{SiO}_2) + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$ e $(\text{SiO}_2) + 2\text{Fe} = 2(\text{FeO}) + \text{Si}$.

A nova poeira gerada possui teor de zinco de (52,54%), compatível com o teor de zinco do concentrado de minério importado (52%) e superior ao teor de zinco dos minérios nacionais (12% a 39%). Portanto, a nova poeira gerada possui potencial de ser usada para os processos de galvanização e não mais descartada em aterros.

REFERÊNCIAS

- 1 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. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- 2 NOLASCO SOBRINHO, P. J.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Caracterização da poeira gerada na fabricação de aço inoxidável visando a sua reciclagem. *Metalurgia e Materiais*, v. 53, n. 4, p. 257-263, 2000.
- 3 HAGNI, A. M.; HAGNI, R. D.; DEMARS, C. Mineralogical characteristics of electric arc furnace dusts. *JOM*, v. 43, n. 4, p. 28-30, Apr. 1991. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03220543>
- 4 NOLASCO SOBRINHO, P. J.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Characterization of dusts and sludges generated during stainless steel production in brazilian industries. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 3, n. 1, p. 11-17, 2003. <http://dx.doi.org/10.1179/030192303225009506>
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.004. Resíduos Sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.
- 6 LI, C. L.; TSAI, M. S. Mechanism of spinel ferrite dust formation in electric arc furnace steelmaking. *ISIJ International*, v. 33, n. 2, p. 284-290, 1993. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.33.284>
- 7 RUIZ, O. et al. Recycling of an electric arc furnace flue dust to obtain high grade ZnO. *Journal of Hazardous Material*, v. 141, n. 1, p. 33-36, June 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.079>
- 8 PELINO, M. et al. Vitrification of electric arc furnace dusts. *Waste Management*, v. 22, n. 8, p. 945-949, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00080-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00080-6)
- 9 NOLASCO SOBRINHO, P. J. *Reciclagem de poeiras e lamas provenientes de fabricação de aço inoxidável*. 2004. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- 10 MANTOVANI, M. C. *Caracterização de poeiras geradas em fornos elétricos a arco e seu estudo quando aglomeradas na forma de pelotas auto-redutoras*. 1998. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- 11 NYREND, R. L. The processing of steelmaking flue-dust: a review. *Minerals Engineering*, v. 4, n. 7-11, p. 1003-1025, 1991.
- 12 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004: resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 1987.
- 13 OLIVEIRA, J. R. *Redução do MnO pelo carbono dissolvido no banho e pelo carbono dissolvido na escória*. 2008. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- 14 TURKDOGAN, E. T. *Physical chemistry of high temperature technology*. New York: Academic Press, 1980.
- 15 PICKLES, C. A. Reaction of electric arc furnace dust with molten iron containing carbon and silicon. *Iron et Steelmaker*, v. 29, n. 12, p. 55-67, 2002.
- 16 FRUEHAN, R.J. Reactions rates and rate limiting factors in iron bath smelting. In: BRIMACOMBE, J, K. et al. *Proceedings of the Savard/Lee International Symposium on Bath Smelting*. Warrendale: TMS, 1992. p. 233-248.
- 17 PICKLES, C. A. Reaction of electric arc furnace dust with molten iron containing carbon. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, v. 112, n. 2, p. 81-87, 2003. <http://dx.doi.org/10.1179/037195503225002745>
- 18 SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. *Aços e ligas especiais*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1988.

Recebido em: 24/09/2012

Aceito em: 28/11/2012