



COMPORTAMENTO DO ZINCO NA LAMA DE ACIARIA GERADA EM CONVERTEDOR¹

Mônica Marques Caetano de Lima²
Luciana Cerqueira Souza Solimani³
Eduardo Campolina Azeredo⁴

Resumo

Na planta de Ipatinga da Usiminas, a lama fina de aciaria é atualmente disposta em aterros de resíduos industriais controlados, principalmente por apresentar quantidade significativa de zinco, o qual dificulta sua reciclagem nos processos siderúrgicos. Experiências industriais foram realizadas com o intuito de melhor compreender o comportamento do zinco na composição da lama durante o processo de sopro de oxigênio no refino de aço. Foram coletadas amostras de lama a cada trinta segundos na saída da tubulação do sistema de lavagem dos gases. As amostras foram caracterizadas essencialmente por meio de difração de raios-X, análise química e microscopia eletrônica de varredura com recursos de espectrometria por dispersão de energia. Os resultados dos experimentos industriais mostraram que o zinco é removido do convertedor ao longo da corrida. O teor de zinco na lama foi elevado no início do sopro de oxigênio, equivalente a 10% da carga de zinco e 10% da massa de sólidos totais da lama, diminuindo significativamente a partir do décimo minuto.

Palavras-chave: Lama de aciaria; Zinco; Reciclagem.

ZINC BEHAVIOR AT BOF SLUDGE GENERATION

Abstract

BOF fine sludge from Usiminas's plant in Ipatinga is deposited in landfill due to high zinc contents which make the recycling quite difficult. In order to understand the zinc behavior at BOF sludge during the oxygen blow, in site experiences were done. Sludge samples were taken every thirty seconds at off-gas pipeline system during five heats. The samples were characterized by total solids, X-ray diffraction, chemical analysis, scanning electron microscope and energy dispersive X-ray analysis. The experimental results showed zinc is removed from the converter during the heat. The zinc content was high at the beginning of the oxygen blow, which represented 10% of the zinc charge and 10% of the total solids, decreasing drastically after 10th minute.

Key words: BOF sludge; Zinc; Recycling.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.

² Engenheira Química, M.Sc.; Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

³ Química, D.Sc.; Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

⁴ Membro da ABM; Engenheiro Metalúrgico, CQE-CQA/ASQ, Superintendência de Aciaria, Usiminas; Ipatinga, MG.



1 INTRODUÇÃO

Na planta da Usiminas em Ipatinga, no ano de 2008, foram geradas em torno de 130.000 t de lama fina de aciaria. Embora apresente quantidade substancial de óxido de ferro, que a torna bastante atraente do ponto de vista de reciclagem nos processos siderúrgicos, a lama fina é atualmente disposta em aterros de resíduos industriais controlados, principalmente por apresentar quantidade significativa de zinco. No alto-forno, por exemplo, o zinco pode favorecer a formação de cascão e comprometer a permeabilidade da carga, caso a lama venha a ser reciclada¹ e, na aciaria, sua reutilização como refrigerante pode eventualmente elevar a concentração de zinco no aço.² A elevada geração destas lamas tem impulsionado o desenvolvimento de estudos para o seu tratamento, de forma a tornar viável seu retorno ao processo. Adicionalmente, eventual aprovação de leis ambientais mais restritivas quanto ao seu uso pode implicar em custos de disposição mais elevados. O entendimento do comportamento do zinco na geração da lama é essencial para proposição de tratamentos mais eficientes e menos dispendiosos.

Com relação à sua formação, a lama da aciaria é gerada a partir do sistema de limpeza do gás de convertedor (LDG). Este gás gerado carrega consigo elevada quantidade de material particulado que é removido pela ação dos lavadores venturís. Vários autores estudaram os mecanismos de formação do pó de convertedor. Turkdogan e Leake,⁽³⁾ Bates⁽⁴⁾ e Krasheninnikov⁽⁵⁾ *apud* Gritzan e Neuschütz⁽⁶⁾ acreditam que a evaporação de ferro (fumos de pequenas partículas de ferro) e volatilização de compostos de ferro em condições experimentais sejam o principal caminho para a formação do pó de aciaria. Morris, Riott e Illig,⁷ Baker e Ward⁸ e Ellis⁹ *apud* Gritzan e Neuschütz⁽⁶⁾ mostram que a ejeção de gotículas de metal líquido deveria ser o caminho mais importante para a formação de pó. Bates,⁽⁴⁾ Neigenbauer⁽¹⁰⁾ *apud* Gritzan e Neuschütz⁽⁶⁾ e Tsujino⁽¹¹⁾ sugerem que a evaporação e a ejeção de gotículas de metal líquido sejam os mecanismos dominantes, sendo a ejeção de gotículas de gusa no início do sopro e evaporação no final do sopro. Por sua vez, Schurmann¹² e Nedar¹³ mostraram que a geração de pó em convertedor LD era decorrente de quatro mecanismos relacionados à ejeção de gotículas de gusa, ejeção de gotículas de escória, vaporização e ao arraste de partículas durante a adição de fundentes, sendo que a ejeção de gotículas de metal líquido e de escória predominantes.

Gleim *et al.*,¹⁴ *apud* Nedar⁽¹³⁾, comentam em seus estudos que o zinco pode estar presente na superfície de partículas esféricas maciças, sugerindo que sua saída do banho esteja associada às gotículas de ferro líquido. Mas, o zinco também pode aparecer nas superfícies interna e externa de partículas esféricas porosas, indicando que é oriundo da emulsão de metal-escória. Estudo recente, desenvolvido por Kelebek *et al.*,¹⁵ mostra que os compostos de zinco apresentam-se na camada externa das partículas contendo ferro. Com relação à morfologia, a partícula caracteriza-se por um núcleo de ferro metálico coberto por um aglomerado de óxido de ferro e por partículas finas de ferrita de zinco na camada mais externa. A abundante presença de zinco na superfície das gotículas de gusa indica sua rápida oxidação a óxido de zinco ou uma reação de superfície entre os óxidos de ferro e zinco gasoso.⁽¹³⁾

Conforme Pluschell,¹⁶ o processo de refino do aço em convertedor LD é muito efetivo para remoção de zinco. Isto porque este elemento apresenta elevada pressão de vapor, resultando em baixos teores residuais no aço e na escória.



Considerando os aspectos teóricos mencionados, foram realizadas experiências industriais com o objetivo de melhor compreender o comportamento do zinco na composição da lama durante o processo de refino de aço em convertedor. Baseado neste comportamento, a idéia é avaliar a possibilidade de remover o zinco ainda na geração da lama, a fim de viabilizar a sua utilização, principalmente da fração fina, nos processos siderúrgicos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados cinco experimentos industriais no Convertedor 5 (160 t) da Usiminas (Ipatinga). Durante as cinco corridas, procurou-se manter as condições operacionais praticamente constantes. A vazão de oxigênio durante o refino do aço foi em torno de 41500 Nm³/h. A sucata adicionada variou entre 18% a 19% do total de carga processada. Como o zinco é proveniente das sucatas galvanizadas, para avaliar sua variação de concentração na lama, foram realizadas quatro corridas subseqüentes com sucata galvanizada, o que correspondeu entre 42% e 50% da carga de sucata adicionada. Diferentemente, uma corrida foi realizada sem adição de sucata galvanizada. É importante ressaltar que não é prática usual a seleção de sucata galvanizada no carregamento do convertedor.

Na aciaria da Usiminas, a lama gerada do sistema de lavagem do gás (venturis) de convertedor é transportada por tubulações até um tanque e, posteriormente, segue para um classificador primário, onde a lama é separada em fração grossa e fração fina. A fração grossa é sedimentada e a fração fina segue para um espessador e, em seguida, é seca em filtro de tambor rotativo. Durante os experimentos, foram coletadas amostras de lama na referida tubulação, de 30 s em 30 s, desde o carregamento da sucata até um minuto após o término de sopro de oxigênio.

As amostras foram identificadas e armazenadas em frascos de polietileno de 5 L. Posteriormente, as amostras foram caracterizadas quanto ao teor de sólidos totais. Foram também realizadas análises químicas semi-quantitativas por espectrometria de fluorescência de raios-X (espectrômetro Siemens, modelo SRS3000) em cada uma das amostras das lamas. Os elementos químicos considerados para avaliação foram zinco, ferro, cálcio, magnésio, silício, sódio e potássio. O ferro total foi também analisado por titulação colorimétrica com dicromato de potássio. Estes elementos foram considerados chave na identificação dos principais mecanismos de formação do pó de convertedor.

Para determinação da composição mineralógica, foram realizadas análises por difração de raios-X, utilizando-se difratômetro Rigaku, modelo Geigerflex. A caracterização da microestrutura foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura com recursos de espectrometria por dispersão de energia (MEV/EDS), utilizando microscópio Zeiss, modelo EVO 50. Para análise por MEV/EDS, as amostras foram prensadas, embutidas em resina e polidas em pasta de diamante.

Além dos experimentos realizados, uma amostra de lama fina, coletada após o filtro de tambor rotativo, referente a uma semana de operação do convertedor com sucatas não galvanizadas, foi caracterizada quimicamente, a fim de medir o seu teor de zinco. Tal amostra, pertinente às corridas isentas de zinco, foi usada como referência.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos de carga de material de particulado (kg/min), gerada do sistema de lavagem do gás, durante o início do carregamento de sucata no convertedor e ao longo do sopro de oxigênio das cinco corridas, são mostrados na Figura 1.

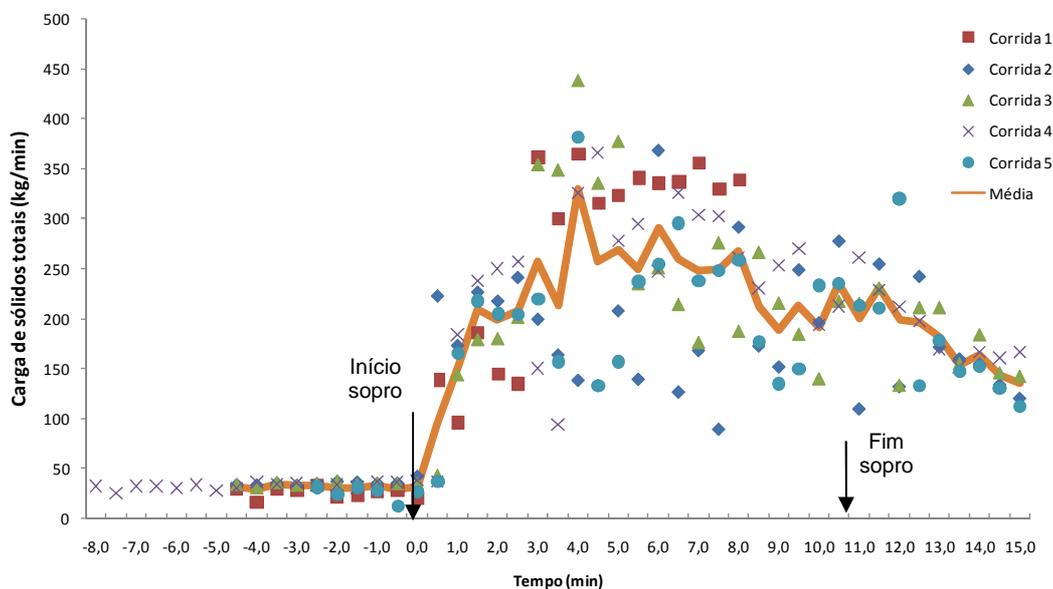


Figura 1. Carga de sólidos totais durante as corridas em convertedor.

Conforme mostrado na Figura 1, antes de iniciar o sopro de oxigênio, a geração de sólidos é muito pequena. Em seguida, eleva-se com o início do sopro até atingir um valor máximo e depois decresce ao longo do tempo. Em especial, o experimento referente à corrida 1 foi interrompido após alguns minutos do início do sopro devido a problemas no dispositivo para coleta das amostras. Os resultados médios semi-quantitativos dos teores dos elementos químicos investigados nas cinco corridas são mostrados na Tabela 1. Os resultados estão representados na forma de seus óxidos. Pode-se observar que o comportamento dos elementos foi semelhante para as corridas com e sem sucata galvanizada. No entanto, a concentração de zinco foi inferior para a corrida 5, em virtude da sua ausência na sucata utilizada. A alta concentração de sódio e potássio antes de iniciar o sopro de oxigênio é devido à adição de nefelina (silicato de alumínio, sódio e potássio) ao banho, a qual foi empregada como fundente. No início do sopro, o teor de cálcio e magnésio foi maior em virtude da adição de cal e dolomita. A concentração de ferro aumentou ao longo da corrida. Apesar de não ter sido determinado o teor de ferro metálico neste estudo, segundo Nedar,¹³ a ejeção de partículas de ferro metálico, normalmente, predomina no início do sopro. O autor⁽¹³⁾ evidenciou também a ejeção de cálcio e magnésio logo após o início do sopro de oxigênio.

Tabela 1. Composição química da lama ao longo do sopro determinada por análise semi-quantitativa de fluorescência de raios-X

Corridas	Período	Fe ₂ O ₃	ZnO	CaO	MgO	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
		(%)						
1 a 4	Antes do sopro	18,6±23,0	3,1±4,6	4,3±3,3	0,8±0,4	2,1±0,1	9,1±4,8	22,0±10,4
	Início do sopro	52,2±16,7	7,1±2,8	11,9±7,3	2,8±2,0	1,3±0,3	6,4±5,5	5,8±8,3
	Meio do sopro	62,6±7,8	4,7±1,4	7,2±5,8	1,9±1,4	1,1±0,2	0,5±0,3	2,8±0,6
	Fim de sopro	71,9±4,3	1,6±0,5	1,5±0,7	0,6±0,1	1,3±0,3	1,8±1,1	4,7±1,4
5	Antes do sopro	8,3±4,4	0,6±0,4	2,6±0,8	0,7±0,1	2,8±0,6	12,7±1,5	27,6±2,3
	Início do sopro	48±17	1,6±0,5	15,1±8,7	4,0±2,9	1,5±0,2	2,4±4,0	7,3±9,5
	Meio do sopro	73±5	1,1±0,4	4,3±3,8	1,5±1,2	1,7±0,3	0,6±0,3	2,8±0,4
	Fim de sopro	70±5	0,5±0,1	0,9±0,2	0,5±0,03	1,8±0,5	1,9±0,6	4,8±1,1

Com relação à composição de fases, verificou-se, por meio de difração de raios-X, a presença de ferro metálico, magnetita (Fe₃O₄), wustita (FeO), calcita (CaCO₃), ferrita de magnésio (MgFe₂O₄) e um composto de óxido de ferro e cálcio (CaFeO₂). As espécies de ferro, sobretudo FeO e ferro metálico, mantiveram-se presentes ao longo de todo o sopro. Com relação ao zinco, foram observadas as linhas de difração de raios-X de óxido de zinco (ZnO), principalmente no início do sopro, e de ferrita de zinco (ZnO.Fe₂O₃). Estes resultados concordaram com os obtidos por Sammut *et al.*¹⁷ Para melhor entendimento das fases presentes, foram realizadas microanálises em microscópio eletrônico de varredura, utilizando-se os recursos de espectrometria por dispersão de energia. Concordando com as análises de Kelebek,¹⁵ foram observadas microesferas de ferro recobertas por uma camada de ZnO.Fe₂O₃ (Figura 2).

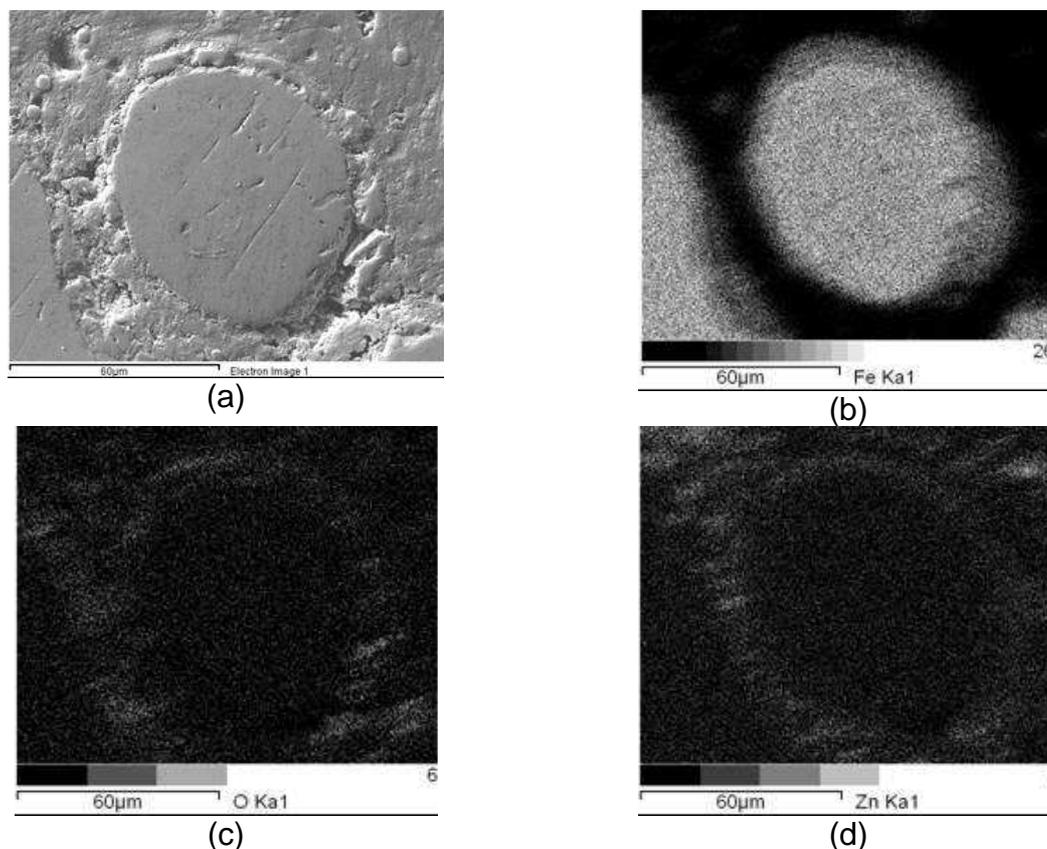


Figura 2. Fotomicrografia (a) e mapeamentos de raios-X de Fe (b), O (c) e Zn (d) de um campo previamente selecionado de uma seção polida da lama.



A fotomicrografia da Figura 3 mostra um campo evidenciando partículas de ZnO. Tais partículas caracterizam-se essencialmente pelo seu tamanho reduzido, ou seja, menor que 5 µm.

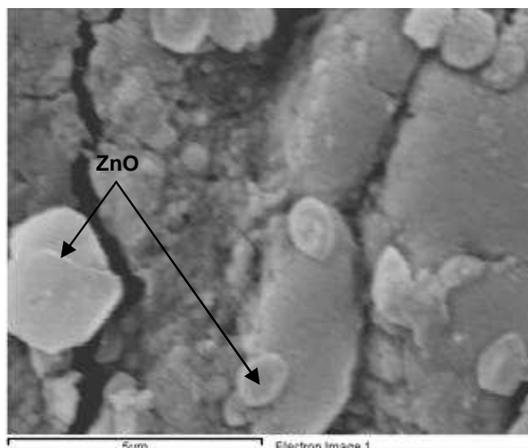


Figura 3. Fotomicrografia de um campo de uma seção polida da lama evidenciando a presença de ZnO.

De uma forma geral, as partículas encontradas na lama são de natureza metálica e apresentam morfologia esférica maciça (Figura 4), as quais são geradas a partir da projeção do próprio aço durante o sopro. Além das partículas metálicas, que podem estar associadas a camadas de óxido de ferro, foram observadas partículas provenientes da ejeção de fundentes como a cal e/ou dolomita (Figura 4). Essas, também, apresentam tamanhos relativamente pequenos.

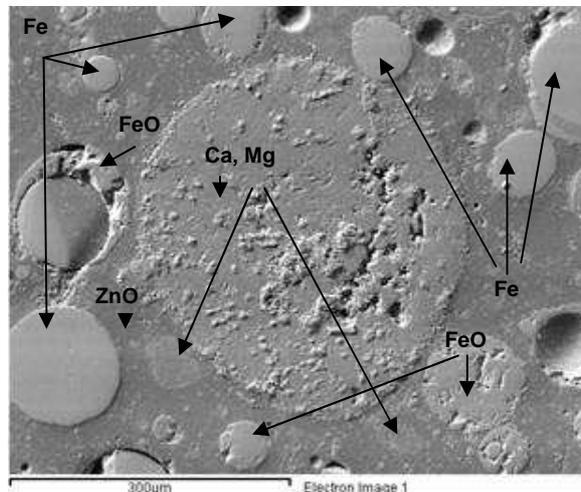


Figura 4. Fotomicrografia de um campo de uma seção polida da lama evidenciando partículas esféricas metálicas e não metálicas.

Certamente, o zinco representa um dos elementos mais importantes em termos de impureza, uma vez que está presente em quantidade substancial na lama fina, inviabilizando sua reciclagem. Por esta razão, o teor zinco foi determinado para as diferentes amostras de lama retiradas ao longo de cada corrida (Figura 5).

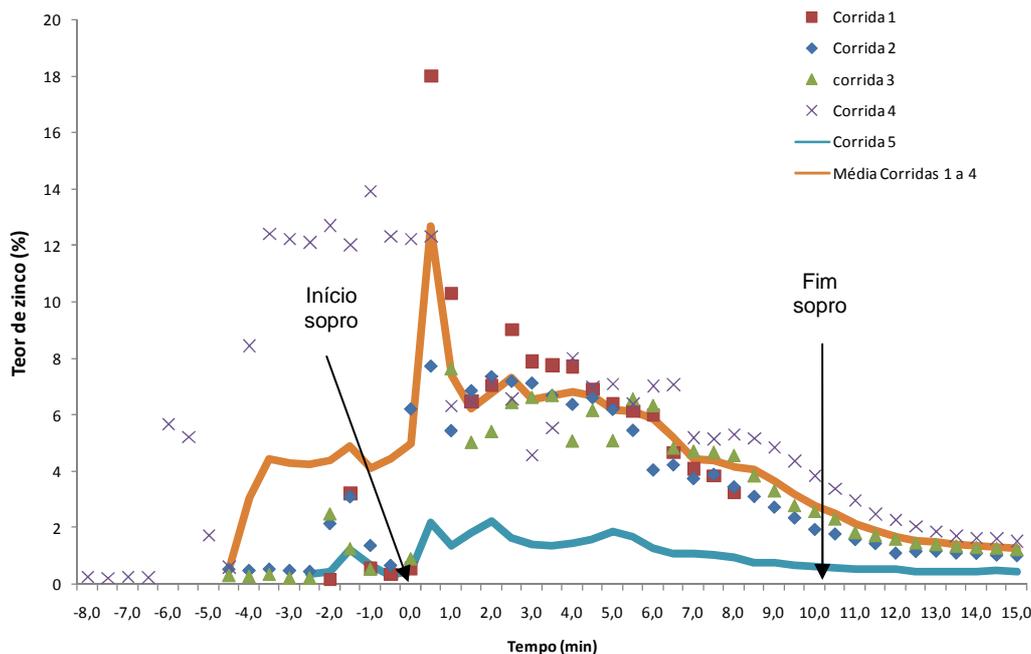


Figura 5. Comportamento do zinco ao longo da corrida.

Percebe-se que o zinco pode alcançar valores superiores a 6% (exceto para a corrida 5 - sucata não galvanizada) após o início do sopro de oxigênio, diminuindo significativamente a partir do décimo minuto do sopro. Verificou-se que o teor de zinco na corrida 4 foi maior que as demais, possivelmente devido ao carregamento de sucata revestida com alta espessura de camada de zinco. Além disso, especialmente nesta corrida houve um atraso para iniciar o sopro, modificando o perfil de saída do zinco.

De uma forma geral, o comportamento da carga de zinco na lama foi bastante similar ao de sólidos totais, conforme Figuras 1 e 6.

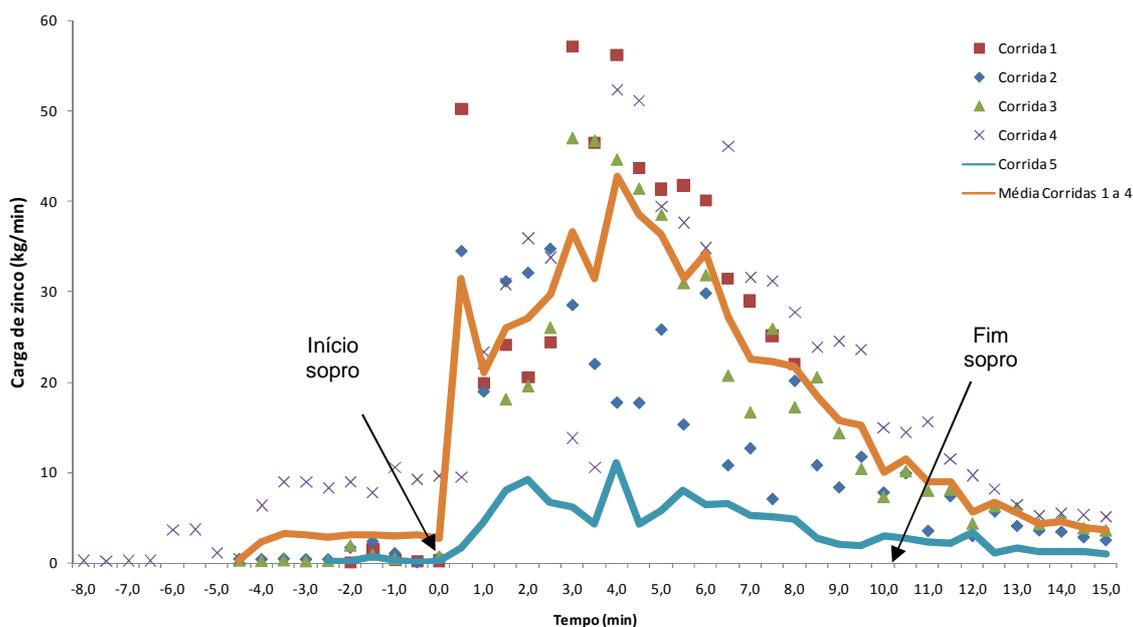


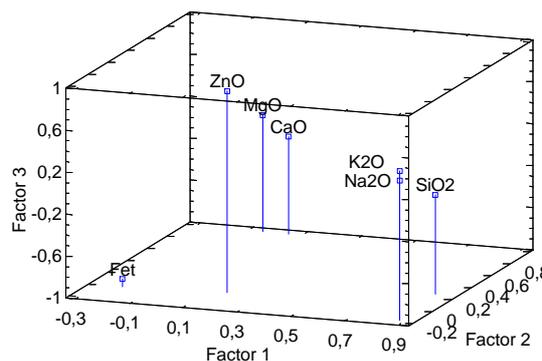
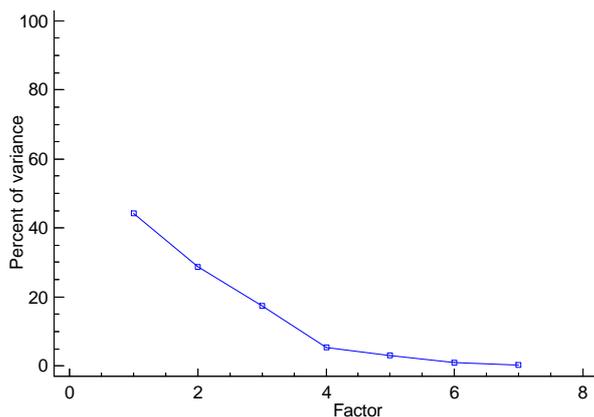
Figura 6. Carga de zinco na lama ao longo da corrida.



Os resultados dos experimentos industriais mostraram que o zinco é removido do convertedor ao longo da corrida. O teor de zinco na lama foi elevado no início do sopro de oxigênio, o que foi equivalente a 10% da carga de zinco e 10% da massa de sólidos totais da lama, diminuindo significativamente a partir do décimo minuto. Sob as condições operacionais avaliadas, estes resultados mostram a inviabilidade de separação ou segregação da lama durante a corrida em duas ou mais frações. A princípio, a proposta seria separar uma fração rica em zinco e outra com baixa concentração de zinco, de modo que pudesse ser reciclada sem qualquer tratamento adicional.

Na corrida 5, embora não tenha sido adicionada sucata galvanizada, o zinco na lama comportou-se de forma análoga ao das outras corridas. No entanto, a concentração total de zinco foi de aproximadamente de 1%. Este comportamento levanta a seguinte questão: por que haveria zinco na lama gerada a partir de corrida em que não se empregou sucata galvanizada? Dentre as hipóteses levantadas de maior relevância para explicar tal resultado, está associada ao acúmulo do zinco dentro do sistema de limpeza do gás. Para melhor explorar esta hipótese, realizou-se um balanço de massa de zinco nas proporções dos experimentos. Considerando-se que o teor médio de zinco na sucata galvanizada seja em torno de 2%, a quantidade de sucata alimentada no convertedor seria de aproximadamente de 20 t e assumindo-se que todo zinco saia na lama gerada, a quantidade de zinco na lama seria equivalente a 400 kg. Para as condições estudadas, os resultados medidos médios de carga de zinco foram da ordem de 600 kg, isso é, próximos aos estimados, apesar de toda variabilidade do sistema. Isto reforça a hipótese levantada. Para o entendimento deste comportamento, foi analisada uma amostra de lama fina a partir de uma semana de operação com sucata não galvanizada, justamente para se determinar o teor de zinco na lama fina. Os resultados deste experimento indicaram que a quantidade média de zinco na lama fina foi de 0,08%. Adicionalmente, a literatura pertinente⁽¹⁾ fornece indicativos de que o teor de zinco residual encontrado na lama de aciaria, para corrida que não se utilizou sucata galvanizada, seja o indicativo de efeito memória no sistema. Nesta referência,⁽¹⁾ seriam necessárias várias corridas para que se alcance uma condição estável e com baixa concentração de zinco na lama.

Diante dos resultados de composição química, realizou-se análise multivariada de fatores pelo *software Stagraphics Plus* versão 5.0, buscando-se verificar como os elementos químicos da lama estavam correlacionados entre si e como foram gerados. A análise de fatores indica a presença de três fatores significativos que explicam mais de 90% da variabilidade do processo (Figura 7a). A descrição de cada fator e a comunalidade de cada variável (corresponde ao percentual de variabilidade de cada variável) são mostrados na Figura 7b. Por sua vez, a Figura 7c mostra os fatores significativos.



(a)

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
CaO	0,0510759	0,976804	-0,0694903
ZnO	0,161264	0,0474007	0,914769
K2O	0,864322	-0,128769	0,401016
MgO	-0,044695	0,974682	0,112194
SiO2	0,854158	0,26415	-0,0585946
Na2O	0,878138	-0,160064	0,331434
Fet	-0,211303	-0,00414316	-0,925338

(b)

Variable	Estimated Communality
CaO	0,961584
ZnO	0,865055
K2O	0,924448
MgO	0,964591
SiO2	0,802794
Na2O	0,906596
Fet	0,900917

(c)

Figura 7. Resultado da análise multivariada de fatores da composição química da lama ao longo do sopro (a), representação gráfica dos fatores significativos (b) e, descrição dos fatores e comunalidade das variáveis (c).

O fator 1 indicou que o sódio, potássio e silício estão correlacionados entre si positivamente. Estes elementos estão presentes na nefelina, que é adicionada como fundente, sugerindo que as partículas sejam geradas pelo mecanismo de ejeção de escória (Figura 7). O fator 2 mostrou que o cálcio e magnésio também estão correlacionados entre si positivamente. Estes dois elementos decorrem essencialmente da adição de fundentes, tais como cal calcítica e cal dolomítica. Isto mostra que outro mecanismo de formação do pó de convertedor, associado à adição de fundentes, também parece ser relevante. O fator 3 indicou uma correlação inversa entre o ferro total e o zinco. Quando se inicia o sopro de oxigênio, a concentração do zinco aumenta ao mesmo tempo em que a de ferro decresce. Acredita-se que a queda da concentração de ferro esteja relacionada ao efeito de diluição que ocorre neste momento, decorrente da projeção de partículas advindas da adição de fundentes e da vaporização do zinco da sucata. Outro fato que reforça esta hipótese é que normalmente o ferro e o zinco possuem mecanismos de formação distintos. O mais provável é que o zinco tenha se volatilizado, já que sua temperatura de vaporização é de 907°C. Isto caracteriza sua baixa solubilidade no aço líquido¹⁶, favorecendo, assim, a formação de óxido de zinco (ZnO) pelo seu contato com oxigênio e de ferrita de zinco (ZnO.Fe₂O₃) pela reação entre óxido de zinco e óxido de ferro. A presença de ferro na lama decorre essencialmente da ejeção de aço. Em síntese, a análise de fatores mostrou 3 mecanismos de formação do pó de convertedor.

4 CONCLUSÃO

Os resultados dos experimentos industriais mostraram que o zinco é removido do convertedor ao longo da corrida. O teor de zinco na lama foi elevado no início do



sopro de oxigênio, equivalente a 10% da carga de zinco e 10% da massa de sólidos totais da lama, diminuindo significativamente a partir do décimo minuto. Considerando-se este comportamento, a separação da lama em frações com elevado e baixo teor de zinco, nas condições estudadas, torna-se difícil de ser implantada.

As análises microscópicas e por difratometria de raios-X permitiram caracterizar a distribuição das partículas de zinco na lama e determinar suas principais fases. O zinco encontrou-se como partículas menores que 5 μm , circundando as esferas metálicas e de óxido de ferro. Por meio de análise de fatores, comprovou-se a existência de três mecanismos de formação das partículas: (i) vaporização, (ii) ejeção de gotículas de ferro líquido e (iii) adição de fundentes. A vaporização foi o mecanismo principal que explica a presença de zinco na lama.

REFERÊNCIAS

- 1 KOROS, P.J.; HELICKSON, D. A.; DUDEK, F.J. Issues recycling galvanized scrap. In: Galvatech Conference, 1995, USA. *Proceedings...* USA: Iron and Steel Society, 1995, p. 535-542.
- 2 SMITH, S. ZHOU, X. NASSARALLA, C. A novel process for recycling steelmaking dust. *ISS transactions*, USA, p. 69-76, 2000.
- 3 TURKDOGAN, E.T. e LEAKE, L.E. *JISI* 192, p. 162-170, 1959. *apud* GRITZAN, A. e NEUSCHÜTZ, D. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking. *Steel Research*, v. 72, n.9, p. 324-330, 2001.
- 4 BATES, R.E. *JISI*, v. 201, p. 747-751, 1963. *apud* GRITZAN, A. e NEUSCHÜTZ, D. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking. *Steel Research*, v. 72, n. 9, p. 324-330, 2001.
- 5 KRASHENINNIKOV, M.G. FILIPPOV, S.I. BORODIN, A.N. *Steel USSR*. v. 9, n. 1, p.22-24, 1979. *apud* GRITZAN, A. e NEUSCHÜTZ, D. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking. *Steel Research*, v. 72, n. 9, p. 324-330, 2001.
- 6 GRITZAN, A. e NEUSCHÜTZ, D. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking. *Steel Research*, v. 72, n. 9, p. 324-330, 2001.
- 7 MORRIS, J.P.; RIOTT, J.P., ILLIG, E.G. *Journal Metals*, v. 18, n. 7, p. 803-810, 1966. *apud* GRITZAN, A. e NEUSCHÜTZ, D. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking. *Steel Research*, v. 72, n. 9, p. 324-330, 2001.
- 8 BAKER, L.A. WARD, R.G. *JISI*, v. 205, p.714-717, 1967. *apud* GRITZAN, A. e NEUSCHÜTZ, D. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking. *Steel Research*, v. 72, n. 9, p. 324-330, 2001.
- 9 ELLIS, A.F.; GLOVER, J. *JISI*, v. 209, p. 593-599, 1971. *apud* GRITZAN, A. e NEUSCHÜTZ, D. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking. *Steel Research*, v. 72, n. 9, p. 324-330, 2001.
- 10 TSUJINO, R. et al. Mechanism of dust generation in a converter with minimum slag. *ISIJ International*, v. 29, n. 4, p. 291-299, 1989.
- 11 NEIGENBAUER, G.O.; GUMENNYI, V.F.; DIMITRIENKO, V.I. *Steel USSR*. v. 20, n. 6, p. 272-274, 1990 *apud* GRITZAN, A. e NEUSCHÜTZ, D. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking. *Steel Research*, v. 72, n. 9, p. 324-330, 2001.
- 12 SHÜRMANN, E.; PLOCH, A.; PFLIPSEN, H-D.; HERWIG, U. *Stahl U. Eisen*, v. 115, n. 6, p. 55-61, 1995. *apud* GRITZAN, A. e NEUSCHÜTZ, D. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking. *Steel Research*, v. 72, n. 9, p. 324-330, 2001.
- 13 NEDAR, L. Dust formation in a BOF converter. *Steel Research*, Sweden, v. 67, p. 320-327, 1996.
- 14 GLEIM, V.T. *Journal Applied Chemistry*. USSR, v. 26, p. 1099-1106, 1953. *apud* GRITZAN, A. e NEUSCHÜTZ, D. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking. *Steel Research*, v. 72, n. 9, p. 324-330, 2001.



- 15 KELEBEK, S. YORUK, S. DAVIS, B. Characterization of basic oxygen furnace dust and zinc removal by acid leaching. *Minerals Engineering*, Canada, v. 17, p. 285-291, 2004.
- 16 PLUSCHKELL, W.; JANKE, D. Thermodynamics of zinc reactions in the BOF steelmaking process. In: Steelmaking Conference, 1992, Canada. *Proceedings...* Canada: Iron and Steel Society, 1992. p. 717-722.
- 17 SAMMUT, M.L.; ROSE, J.; MASION, A.; FIANI, E.; DEPOUX, M.; ZIEBEL, A.; HAZEMANN, J.L.; PROUX, O.; BORNSCHNECK, 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.