

REMOÇÃO DE ZINCO DE SUCATA DE AÇO GALVANIZADO PARA VIABILIZAR A RECICLAGEM DA LAMA FINA DE ACIARIA LD

Mônica Marques Caetano de Lima ¹

Luciana Cerqueira Souza Solimani ²

Marco Antônio Quintela ³

Resumo

A sucata de aço galvanizado gerada na Usiminas é totalmente reciclada nos convertedores das aciarias da Usina de Ipatinga. Essa sucata contém quantidade significativa de zinco que, devido à sua alta pressão de vapor, é liberada durante o sopro no convertedor. O zinco na forma gasosa, juntamente com outros gases e pós, são captados pelo sistema de limpeza de gás, compondo a lama de aciaria. Devido à presença de zinco, a lama fina de aciaria é disposta em aterros controlados. Para permitir a reciclagem dessa lama, este trabalho estuda a remoção do zinco dessa sucata, por meio de tratamento térmico. Foi desenvolvido um forno rotativo e avaliada a capacidade de remoção de diferentes tipos de sucata das linhas de galvanização, em ambiente inerte, variando a massa de camada de zinco entre 20 g/m² e 150 g/m², temperatura entre 700°C e 900°C e tempo entre 3 min e 10 min. Nas condições avaliadas, sob temperatura de 700°C e tempo de 10 min, a remoção de zinco é acima de 70%. Mais de 60% do pó de zinco recolhido é na forma de zinco metálico e o restante, como óxido. Diante disso, a metodologia proposta torna viável a reciclagem desta lama na sinterização.

Palavras-chave: Lama de aciaria; Zinco; Sucata; Tratamento térmico.

REMOVING ZINC FROM GALVANIZED STEEL SCRAP TO FEASIBLE THE BOF SLUDGE RECYCLING

Abstract

Galvanized steel scraps generated at Usiminas Ipatinga are recycled in BOF converters. Although they are noble products, they contain a significant quantity of zinc that escapes from the bath due to its high vapor pressure and is captured by the gas control system, appearing in BOF sludge. As BOF sludge contains high iron content, it could be recycled to the process, but due to its zinc content, it is disposed in landfills. For this reason, this study aimed to treat these scraps to remove zinc layer using a thermal treatment process. The samples were fed to a rotative furnace in an inert ambient. It was tested the hot dip galvanized and eletrogalvanized scraps, varying the zinc coating weight between 20g/m² and 150g/m², temperature between 700°C and 900°C and time between 3 minutes and 10 minutes. Considering these conditions, it is verified that more than 70% of the zinc layer is removed at 700°C, in 10 minutes. Dust captured is about 60% of metallic zinc and 40% as zinc oxide. Based on these results, the recycling of BOF sludge can be feasible to the ironmaking process.

Key words: BOF sludge; Zinc; Scrap; Thermal treatment.

I INTRODUÇÃO

Nos convertedores LD das aciarias da Usina de Ipatinga da Usiminas, dependendo do tipo de aço a ser produzido, a carga metálica pode conter até 20% de sucatas de aço. Parte das sucatas é constituída de aço galvanizado proveniente das linhas de galvanização

eletrolítica (EG), de galvanização por imersão a quente (GA e GI) e dos centros de serviços e distribuição da Usiminas. No ano de 2010, foram geradas e totalmente recicladas na aciaria cerca de 15.000 t de sucatas de aço galvanizado provenientes somente das linhas de galvani-

¹Engenheira Química, MSc. Pesquisadora, Centro de Tecnologia, Usiminas, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Usiminas, Cep 35160- 900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: monica.lima@usiminas.com

²Química, DSc. Pesquisadora, Centro de Tecnologia, Usiminas, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Usiminas, Cep 35160- 900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: luciana.solimani@usiminas.com

³Engenheiro Mecânico, MSc. Pesquisador, Centro de Tecnologia, Usiminas, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Usiminas, Cep 35160- 900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: marco.quintela@usiminas.com

zação. Espera-se um incremento de 10.000 t/ano desse tipo de sucata com o início de operação da nova linha de galvanização por imersão a quente da Usiminas.

Normalmente, a espessura média da camada de revestimento de zinco nos materiais laminados é de $10\ \mu\text{m}$, o que corresponde em torno de 1,5% (%p) de zinco em uma chapa de aço de aproximadamente 0,8 mm de espessura. O zinco presente na sucata de aço galvanizado, quando carregado no convertedor da aciaria volatiliza-se rapidamente, por possuir alta pressão de vapor, sendo eliminado juntamente com outros gases e material particulado. Essa mistura de gases e material particulado é captada pelo sistema de controle dos gases de exaustão dos convertedores, denominado Sistema OG, que devido à lavagem dos gases gera a lama de aciaria. Na Usina de Ipatinga, a lama de aciaria é dividida em duas frações de tamanho. A fração grossa é totalmente reciclada no processo siderúrgico, enquanto a fração fina, face à sua composição química, presença de zinco e, sobretudo, tamanho de partícula extremamente fina, tem sido disposta em aterros controlados para resíduos não perigosos.⁽¹⁾

A presença de zinco na lama fina de aciaria é, sem dúvida, o maior entrave à reciclagem e ou reutilização desse resíduo no processo siderúrgico. Isto ocorre porque o zinco, em determinada quantidade dentro do alto-forno, pode favorecer a formação de cascão, comprometendo a sua operação.⁽²⁾ Para contornar o problema da presença de zinco na lama fina de aciaria, uma alternativa é a utilização de processos que removam o zinco da sucata. Os processos existentes para remoção de zinco da sucata de aço galvanizado podem ser térmicos ou químicos. O tratamento químico apresenta um impacto, pois necessita de uma etapa adicional para tratamento dos subprodutos gerados e apresenta dificuldade em remover o revestimento galvanizado pintado ou oleado. Desta forma, o tratamento térmico tem sido apontado na literatura como a melhor alternativa para a remoção de zinco da sucata de aço galvanizado.⁽³⁾

São vários os estudos desenvolvidos para remoção de zinco da sucata de aço galvanizado pelo tratamento térmico. Em um deles,⁽⁴⁾ mostra-se que a camada de zinco pode ser removida após aquecimento do aço entre 560°C e 920°C durante 300 s e 1.000 s (atmosfera inerte). Nestas condições experimentais, é formada uma camada intermetálica de zinco e ferro relativamente frágil, capaz de ser retirada por ação mecânica, por exemplo, por jateamento. No entanto, alguns autores⁽⁵⁾ comentam que é muito difícil a transposição dessa tecnologia para escala industrial. Outros estudiosos⁽⁵⁾ também propõem a retirada da camada de zinco do aço galvanizado por meio de processo térmico, sob atmosfera de ar e cloro gasoso. Nos experimentos efetuados, as amostras foram aquecidas a 800°C durante 10 minutos. Para as condições avaliadas, a eficiência de remoção foi superior a 92%. Porém, concomitante com a remoção da camada de revestimento, ocorre oxidação da superfície da chapa. Entretanto, não são observados efeitos negativos impor-

tantes do cloro na parte metálica superior. Outro estudo⁽⁶⁾ propõe a retirada do zinco da sucata usando um forno rotativo de três zonas de aquecimento. Numa primeira etapa, sob atmosfera oxidante a 927°C , o óxido de zinco e os outros metais oxidados são formados e removidos como pós, que, subsequentemente, são recolhidos num coletor de pós e separados por flotação. Avançando à zona seguinte, a carga em movimento dentro do forno é submetida a atmosfera neutra. Finalmente, na última zona, prevalecem o ambiente redutor e temperaturas acima de 982°C . Nestas condições, o revestimento de zinco remanescente torna-se frágil e é reduzida a formação de óxido de ferro. Posteriormente, a camada de óxidos com baixa aderência ao substrato é retirada por ação mecânica. A retirada de zinco das sucatas de aço galvanizado poderia também ser realizada em fornos a indução.⁽⁷⁾ Devido ao seu baixo ponto de vaporização, à temperatura de 907°C , o zinco vaporiza-se e, posteriormente, é oxidado a ZnO, sendo recolhido nos equipamentos de controle atmosférico. Esse tipo de tratamento tem sido realizado na Espanha, na Fundação *Fuchosa*, que dispõe de instalação para processar 48 t de sucata por batelada e produz 19 t/h de metal fundido. Nessa unidade, o zinco evaporado é recolhido em filtro de manga.⁽⁸⁾ Outro tratamento disponível é o desenvolvido pela Ogihara Ecology,⁽⁹⁾ que disponibiliza a evaporação a vácuo para remoção de zinco de sucata de aço galvanizado. Nesse processo, a sucata de aço galvanizado é submetida a aquecimento a aproximadamente 700°C , à pressão de 133 Pa, para evaporação do zinco. A eficiência de remoção de zinco é superior a 97% e sua pureza de 99,86%, já que o material não sofre nenhuma oxidação dentro do forno a vácuo. A planta piloto da Ogihara é capaz de processar 1.000 t/mês.⁽¹⁰⁾

Diante disso, este estudo tem por objetivo avaliar a remoção de zinco das sucatas de aço galvanizado por meio do tratamento térmico e identificar a influência dos parâmetros tempo, temperatura e massa de camada de zinco nos resultados, usando um forno rotativo sob ambiente inerte, a fim de viabilizar a reciclagem da lama fina de aciaria.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado um planejamento fatorial 2^k considerando três fatores (variáveis) e uma replicata, totalizando 16 testes para cada tipo de revestimento. Os experimentos foram realizados em forno rotativo, construído, desenvolvido e patenteado no Centro de Tecnologia da Usiminas. Esse forno foi adaptado para a execução dos testes em diferentes ambientes de queima. É composto de sistema para monitoramento e controle da temperatura de trabalho e possui duas aberturas laterais: uma para a entrada de gás corrente e amostras, e outra para saída de gases e particulados gerados no processo. Foi também acoplado ao forno um sistema de captação de particulado que consiste de uma caixa fechada (Figura 1).

Os fatores avaliados foram: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), massa de camada (g/m^2) e tempo de exposição (min). Os níveis de cada fator são mostrados na Tabela I.

Os corpos de prova nas dimensões de 50 mm x 50 mm com espessura de substrato de tamanho variável foram previamente desengraxados e inseridos no forno às temperaturas propostas em ambiente inerte. Optou-se pelo ambiente inerte pela possibilidade de recuperação do zinco na sua forma mais nobre e de maior valor de mercado, o zinco metálico. A vazão de nitrogênio permaneceu constante em todos os 48 experimentos, em torno de 15 NL/min, e a massa de corpos de prova introduzida no forno foi em torno de 0,5 kg.

As amostras, após o tratamento, foram resfriadas e pesadas para avaliação da perda de massa de zinco. Não foi considerado o efeito de oxidação das placas. As amostras, após resfriamento, foram também submetidas ao ataque com ácido clorídrico, na presença de inibidor de hexametilenotetraamina, para determinação da massa de zinco remanescente no substrato. A solução obtida contendo zinco foi analisada pela técnica de espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma induzido (ICP). Com base nisso e no valor médio de massa de camada de zinco estimado de cada revestimento, foi estimada a remoção percentual de zinco das sucatas de aço galvanizado. Amostras de pó de zinco gerado durante o tratamento térmico foram analisadas por difratometria de raios X para avaliação de fases e, também, por análise química para determinação de zinco e ou do óxido de zinco.

Em paralelo, foram realizados experimentos com os três diferentes tipos de revestimento nas suas diferentes massas de camada de zinco por meio da term-análise. A termobalança utilizada foi da marca Netzsch, modelo STA409. As amostras foram pesadas e colocadas em um cadinho de alumina e submetidas a aquecimento até a temperatura de 1.300°C , a uma taxa de aquecimento de $99^{\circ}\text{C}/\text{min}$, em ambiente inerte (N_2). Foram avaliadas a variação de massa (TG) e a variação de energia (DTA) em cada uma das amostras. Neste teste, a ideia era avaliar a evolução das reações e perda de massa decorrente do tempo e verificar se os resultados obtidos seriam similares aos dos experimentos do forno rotativo.

Para a análise dos parâmetros avaliados no tratamento térmico para remoção de zinco da sucata galvanizada usando o planejamento de experimentos, foram utilizados a análise de variância e o gráfico de Pareto de efeitos padronizados por meio do software Statgraphics versão 5.1. Na análise de variância foi testada significância estatística (*p valor*) de cada fator (efeito) no intervalo de confiança de 95% pela comparação entre os valores dos quadrados médios e a estimativa do erro experimental. Se o resultado do *p valor* fosse menor que 0,05, então os valores dos quadrados médios e a estimativa do erro experimental seriam muito diferentes entre si e, portanto, o efeito seria significativo sobre a variável resposta. No gráfico de Pareto de efeitos padronizados são mostrados também os fatores e ou efeitos significativos e como eles se correlacionaram com a variável resposta.

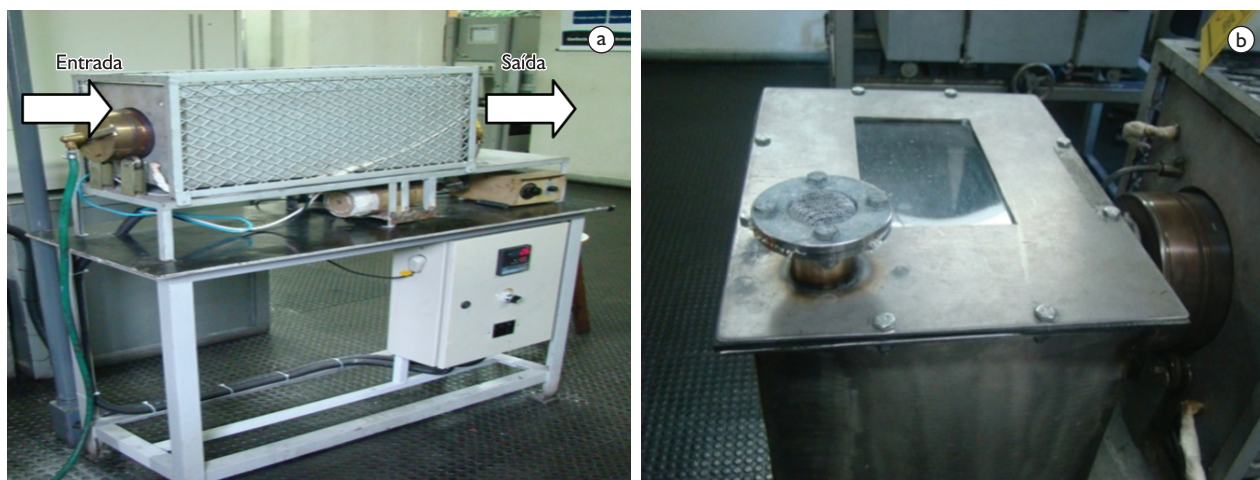


Figura 1. (a) Forno rotativo (b) caixa coletora de pó.

Tabela I. Níveis de cada fator utilizados no planejamento fatorial 2^k

Fatores	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo (min)	Massa de camada de cada revestimento (g/m^2)		
			GA	GI	EG
Nível 1	700	3	35	58	22
Nível 2	900	10	64	150	60

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos experimentos conduzidos com as sucatas de aço galvanizado EG, GA e GI são mostrados na Tabela 2.

Conforme mostrado na Tabela 2, os resultados de remoção de zinco apresentam uma tendência de serem melhores quando se utiliza temperatura mais elevada, com massa de camada menor e tempo mais elevado independente do tipo de revestimento. Em termos de revestimento, os resultados obtidos de remoção de zinco para sucata de aço GA são aparentemente melhores que os de EG e GI.

Pela análise de variância, os fatores significativos que afetam a remoção de camada de zinco de sucatas de aço EG são: temperatura, tempo e a interação entre temperatura e massa de camada, já que os resultados de *p* valor são menores que 0,05 (Tabela 3a).

É importante salientar que a interação entre dois fatores deve ser avaliada sempre que for realizada a replicata dos experimentos no planejamento fatorial 2^k . Todos os fatores significativos apresentam efeito positivo, ou seja, elevando-se qualquer um dos fatores ocorre um aumento da remoção de zinco da sucata de aço galvanizado EG (Figura 2a). A temperatura é o efeito mais significativo na remoção de zinco de sucatas de aço EG. A remoção de zinco à temperatura de 700°C é acima de 70% em média. Para a temperatura de 900°C, a remoção de zinco está acima de 90%, em média (Figura 2b).

Já para os experimentos com as sucatas de aço GA, verifica-se que os fatores significativos são: massa de camada, temperatura e interação entre temperatura e massa de camada, indicados pelo teste do *p* valor (Tabela 3b). O fator massa de camada é o mais significativo e apresenta um efeito negativo sobre a variável resposta (Figura 2c). No entanto, é importante ressaltar que o controle desse fator é possível somente em escala de laboratório, mas em escala industrial é praticamente inviável. A temperatura e a interação entre esse fator e massa de camada apresentam efeitos positivos sobre a variável resposta (Figura 2c). Conforme mostrado na Figura 2d, um aumento da massa de camada deve reduzir a remoção de zinco da sucata. Para esta condição, a eficiência de remoção do zinco mostra-se superior a 70%.

Finalmente, os fatores significativos que afetam a remoção de camada de zinco de sucatas de aço GI são: temperatura, tempo e as interações entre temperatura e massa de camada e tempo e temperatura (Tabela 3c). Somente a interação (temperatura e tempo) apresenta efeito negativo na variável resposta (Figura 2e). Os fatores temperatura e tempo e a interação (temperatura e massa de camada) apresentam efeito positivo (Figura 2e). Como ocorre com o experimento com sucatas de aço EG, a temperatura apresenta o efeito mais significativo na remoção de zinco de sucatas de aço GI. Conforme mostrado na Figura 2f, os resultados de remoção de zinco na temperatura de 700°C chegam a ser maiores que 70% e, acima de 900°C, praticamente todo o zinco é removido da amostra de sucata.

Tabela 2. Resultados dos experimentos realizados pelo planejamento fatorial 2^k de experimentos

Temperatura (°C)	Tempo (min)	Massa de camada (g/m ²)	Remoção de zinco (%)		
			EG	GA	GI
700	3	-	73	90	64
700	3	-	73	95	61
700	3	+	53	49	56
700	3	+	55	61	51
700	10	-	75	103*	89
700	10	-	92	100	87
700	10	+	78	69	86
700	10	+	69	42	84
900	3	-	83	101*	90
900	3	-	100	98	92
900	3	+	95	87	95
900	3	+	98	89	95
900	10	-	89	100	67
900	10	-	100	103*	92
900	10	+	94	87	103*
900	10	+	99	89	107*

*Valores acima de 100%, estão associados provavelmente à oxidação das sucatas; + maior valor de massa de camada de cada revestimento; - menor valor de massa de camada de cada revestimento.

Tabela 3. Análise de variância realizada para o experimento com sucatas de aço EG (a), GA (b) e GI (c)

Fatores	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	Razão F	P valor
A: Tempo	333,06	1	333,06	8,15	0,021
B: Temperatura	2.425,56	1	2.425,56	59,34	0,000
C: Massa de camada	105,06	1	105,06	2,57	0,148
AB	162,56	1	162,56	3,98	0,081
AC	22,563	1	22,56	0,55	0,479
BC	390,06	1	390,06	9,54	0,015
blocos	95,063	1	95,063	2,33	0,166
Erro total	327	8	40,88		
Total (corrigido)	3.860,94	15			

Fatores	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	Razão F	P valor
A: Tempo	20,25	1	20,25	0,37	0,558
B: Temperatura	1296	1	1.296,00	23,9	0,001
C: Massa de camada	2.756,25	1	2.756,25	50,84	0,000
AB	12,25	1	12,25	0,23	0,647
AC	16	1	16	0,3	0,602
BC	870,25	1	870,25	16,05	0,004
blocos	30,25	1	30,25	0,56	0,477
Erro total	433,75	8	54,22		
Total (corrigido)	5.435,00	15			

Fatores	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	Razão F	P valor
A: Tempo	637,56	1	637,56	14,61	0,005
B: Temperatura	1.463,06	1	1.463,06	33,54	0,000
C: Massa de camada	39,063	1	39,063	0,9	0,372
AB	1.008,06	1	1.008,06	23,11	0,001
AC	126,56	1	126,56	2,9	0,127
BC	333,06	1	333,06	7,63	0,025
blocos	14,063	1	14,063	0,32	0,586
Erro total	349	8	43,63		
Total (corrigido)	3.970,44	15			

Diante dos resultados mostrados, é possível perceber que o fator temperatura tem uma importância fundamental na remoção de zinco de sucata independente do revestimento utilizado. O tempo e a massa de camada também mostram ser variáveis importantes, sobretudo para os experimentos de sucata de aço GI. No entanto, conforme já comentado, a massa de camada é difícil de ser controlada principalmente em escala industrial. Assim, para se definir a melhor estratégia para remoção de zinco pelo processo térmico, os fatores temperatura e tempo deverão ser levados em consideração.

Os resultados obtidos de percentual de remoção de zinco das sucatas de aço galvanizado acima de 90%, independente do revestimento utilizado, a 900°C, são similares aos resultados experimentais obtidos por outros estudiosos.^(2,11)

A análise de difração de raios X mostra a presença de zinco metálico e óxido de zinco para todos os revestimentos avaliados. As análises químicas para determinação da pureza de zinco dos pós recolhidos nos experimentos

foram realizadas e, em média, o teor de zinco metálico está em torno de 60%, sendo o restante, óxido de zinco. Considerando que este processo viesse a ser adotado pela Empresa em sua planta industrial, seria de se esperar uma redução do teor de zinco na lama fina de aciaria acima de 70%, com a utilização de sucatas processadas a 700°C, e acima de 90%, para sucatas processadas à 900°C, supondo que todo o zinco presente na sucata fosse para a lama fina de aciaria. Hoje, essa lama apresenta em torno de 2% de zinco⁽¹⁾ em média e reduziria, portanto, para 0,6% e para 0,2%, respectivamente, nas temperaturas mencionadas.

O valor em torno de 0,6%⁽¹⁾ representa o teor de zinco da lama grossa de aciaria que, atualmente, retorna totalmente ao processo siderúrgico pela sinterização. Desta forma, a lama de fina de aciaria também poderia ser reciclada na área de redução. Mas, para que isto ocorra, é necessário avaliar o balanço de zinco no alto-forno, a granulometria do material e as formas de aglomeração, que, no momento, não estão sendo levadas em consideração.

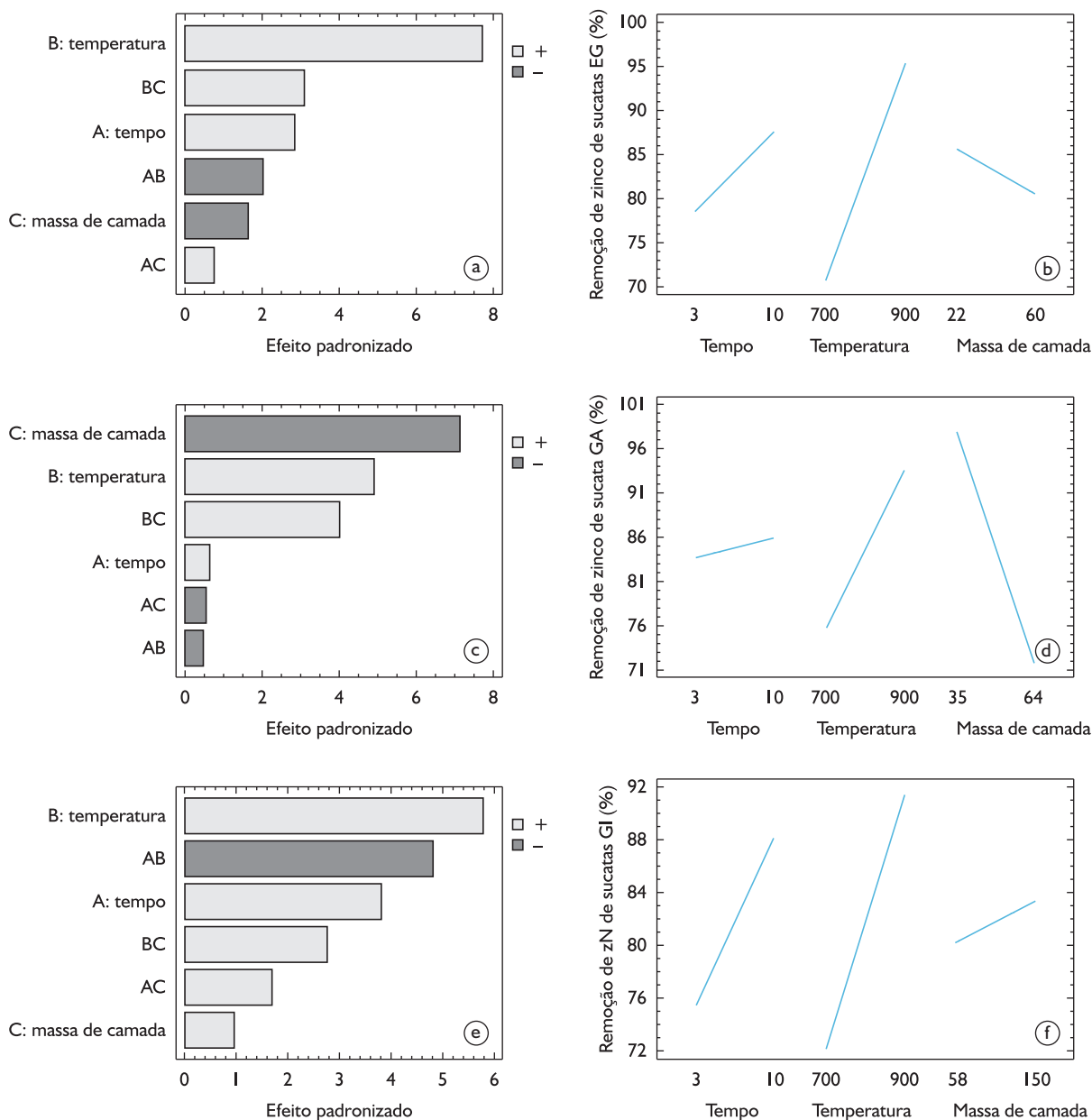


Figura 2. Gráfico de Pareto de efeitos padronizados realizados para o experimento e análise dos efeitos dos fatores principais sobre a remoção de zinco com sucatas de aço EG (a, b), GA (c, d) e GI (e, f).

Na Figura 3, são mostrados os resultados de análise térmica em ambiente inerte obtido de uma amostra de sucata de aço de revestimento EG com massa de camada de 60g/m². Assim como esta, as outras amostras de sucata GA e GI também apresentam reação endotérmica, indicada pela curva de DTA, e perda de massa, indicada pela curva TG e DTG entre 650°C e 1.000°C. Esta reação refere-se provavelmente à mudança de fase de zinco sólido para zinco vapor. A

inspeção visual das amostras após o teste mostra elevada remoção de zinco. Considerando a massa de camada de zinco de cada revestimento e a perda de massa ocorrida na termoanálise, a remoção de zinco das amostras de sucatas de aço galvanizado também pode ser estimada. Em média, a remoção de zinco das sucatas de aço galvanizado é acima de 70%. Este resultado era esperado e está bastante semelhante aos obtidos nos experimentos no forno rotativo.

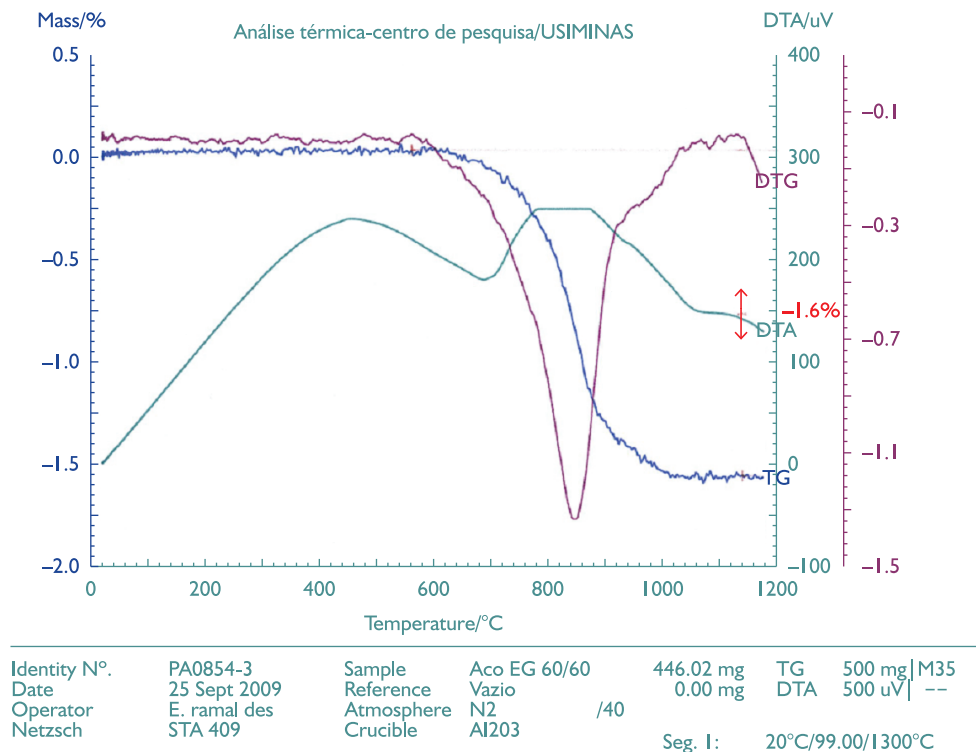


Figura 3. Resultados da análise de termobalança da amostra de sucata de aço EG de massa de camada de 60 g/m².

4 CONCLUSÃO

O tratamento térmico para a remoção de zinco da sucata de aço galvanizado mostra-se bastante eficiente. Verifica-se que a melhor condição experimental, após as análises dos resultados obtidos pelo planejamento experimental, independente do revestimento utilizado, é 900°C

e 3 min, com percentual de remoção de zinco da sucata acima de 90%. No entanto, os resultados a 700°C em 10 min são também expressivos, indicando remoção de zinco acima de 70%. Os pós recolhidos durante os experimentos foram analisados e verifica-se que, em média, o teor de zinco metálico está em torno de 60% e o restante é de óxido de zinco.

REFERÊNCIAS

- 1 Lima MMC, Solimani LCS, Campolina EA. Comportamento do zinco da lama de aciaria gerada em convertedor. In: Anais do 41. Seminário Internacional de Aciaria; 2010; Resende, Brasil. São Paulo: ABM; 2010. p. 1-11.
- 2 Koros PJ, Hellickson DA, Dudek FJ. Issues recycling galvanized scrap. In: Proceedings of the Galvatech Conference; 1995; Chicago, USA. London: Iron and Steel Society; 1995, p. 535-542.
- 3 Janjua RA. Optimisation of electric arc furnace dust recycling and zinc recovery by scrap de-zincing [doutorado]. Freiberg: Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg; 2008.
- 4 Franzen A, Plusckell W. Removal of zinc layers from coated steel strip by thermal and mechanical processing. Steel Res. 1999;70:141-146.
- 5 Tee J, Fray D. Removing impurities from steel scrap using air and chlorine mixtures. JOM. 1999;51: 24-27. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-999-0237-x>
- 6 Herter CJ, inventors. Herter CJ, assignee. Method for preparing a low residual alloy steel charge from scrap metal. United States patent. US4517016. 1985 May 14.
- 7 Hegewaldt F. Recycling of zinc coated steel sheets. In: International Scientific Colloquium Modelling for Saving Resources; 2001, Riga, Letonia. [S.n.t.]. p. 164-168.
- 8 Cadarso C, Losada L. Melting of zinc coated scrap. Foundry Trade J. 2003;177:7-11.

- 9 Saotome Y, Nakazawa Y, Yokoyama Y. Vacuum aided recycling systems technology (VARS Tech) as a restoration systems technology of ecofactory. *Vacuum*. 1996;47:833-836. [http://dx.doi.org/10.1016/0042-207X\(96\)00077-2](http://dx.doi.org/10.1016/0042-207X(96)00077-2)
- 10 Dudek F, Daniels E, Morgan W. Dezincing technology. In: *Proceedings of Aise Annual Convention & Iron And Steel Exposition*. 1997; Cleveland, United States. Washington: Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy; [s.d.].
- 11 Ozturk B, Fruehan R. Vaporization of zinc from steel scrap. *ISIJ Int*. 1996;36:239-242. http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.36.Suppl_S239

Recebido em: 11/09/2012

Aceito em: 18/02/2013