



# CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE PRODUÇÃO DE LIGAS SILÍCIO-MANGANÊS VISANDO A RECICLAGEM <sup>1</sup>

Girley Ferreira Rodrigues <sup>2</sup>

Joner Oliveira Alves <sup>3</sup>

Denise Crocce Romano Espinosa <sup>4</sup>

Jorge Alberto Soares Tenório <sup>5</sup>

## Resumo

O trabalho teve como objetivo a caracterização da escória silico-manganês, obtendo dados para indicar os métodos de reciclagem possíveis. A escória da produção da liga FeSiMn foi reduzida a um pó fino. O material foi caracterizado através de diversas técnicas: análise química, Difração de raios X, Microscopia Eletrônica de Varredura, e Análise Térmica Diferencial. Outro experimento realizado foi o estudo da fluidez em altas temperaturas, a escória foi fundida empregando um forno elétrico em escala laboratorial e o teste de fluidez Herty foi realizado para obter os dados. Os resultados mostram várias propriedades da escória de silício-manganês: composição química, microestrutura, comportamento térmico e fluidez. Estes dados podem ser usados para indicar os possíveis métodos de reciclagem e, portanto, reduzir o custo e o impacto da destinação final deste resíduo.

**Palavras-chave:** Escória; Silício; Manganês; Reciclagem.

## CHARACTERIZATION OF SLAG PRODUCTION OF SILICON-MANGANESE ALLOY AIMING AT RECYCLING

### Abstract

The aim of this work was to characterize the silicon-manganese slag, thereby obtaining data to indicate possible recycling methods. The slag from production of the FeSiMn alloy was reduced to a thin powder. The material was characterized using several techniques: chemical analysis, X-ray diffraction, Scanning Electronic Microscopy, and Differential thermal analysis. Other performed experiment was the study of the fluidity in high temperatures, the slag was melted using a laboratory-scale electric furnace and the Herty fluidity test was performed to obtain the data. The results show several properties of the silicon-manganese slag: chemical composition, microstructure, thermal behavior and fluidity. These data can be used to indicate the possible recycling methods, thereby reducing the cost and impact of this waste disposal.

**Key-words:** Slag; Silicon; Manganese; Recycling.

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

2 *Doutorando, Universidade de São Paulo / Northeastern University, Mestre em Eng. de Materiais.*

3 *Doutorando, Universidade de São Paulo, Mestre em Eng. de Materiais.*

4 *Professora livre docente, Universidade de São Paulo, Doutora em Eng. Metalúrgica.*

5 *Professor titular, Universidade de São Paulo, Doutor em Eng. Metalúrgica.*



## 1 INTRODUÇÃO

A reciclagem e a reutilização de resíduos é considerada uma viabilidade econômica para a destinação de resíduos. Com isso a possibilidade da produção de produtos utilizando-se resíduos pode se apresentar como uma maneira de diminuir a quantidade de resíduos descartados no ambiente e também prolongar o uso das reservas de matérias-primas naturais. Pois o descarte de resíduos no meio ambiente pode causar danos e comprometer o meio ambiente.<sup>(1)</sup>

No contexto de reciclagem e reutilização de resíduos industriais este trabalho visou obter bases sobre o conhecimento para a possibilidade de reutilização do rejeito industrial como matéria-prima para ser reintroduzida no meio produtivo, desta forma diminuindo a quantidade de resíduo descartado no meio ambiente e também diminuindo a extração de matéria-prima natural. O aproveitamento, total ou parcial, de rejeitos constitui uma vantagem que coloca o fabricante em uma posição fortemente competitiva no mercado, devido não apenas à questão econômica, como também à oportunidade de veiculação deste princípio como marketing ecológico.<sup>(2,3)</sup>

O manganês é um elemento que é adicionado no processo de fabricação dos aços na forma de ligas de ferro-manganês, conferindo aos aços propriedades específicas. As principais ferro ligas de manganês são classificadas em três categorias de acordo com o seu teor de carbono:<sup>(4)</sup>

- Ferro Manganês Alto Carbono, representado por FeMnAC (6-7% de carbono);
- Ferro Manganês Médio Carbono representado por FeMnMC (1-2% de carbono); E
- Ferro Manganês Baixo Carbono representado por FeMnBC (0,1-0,5% de carbono).

São produzidas também ligas de ferro silício manganês (FeSiMn) que apresenta teores que variam de 12% a 25% de silício. Um processo de fabricação das ligas de ferro-manganês está esquematizado na Figura 1 onde é possível ver as várias etapas. Observa-se que os minérios vão dar origem a diferentes ligas de acordo com o teor de manganês, nota-se também que a escória da produção da liga FeMnAC, também chamada de escória rica é utilizada como matéria-prima na produção da liga FeSiMn.<sup>(5)</sup>

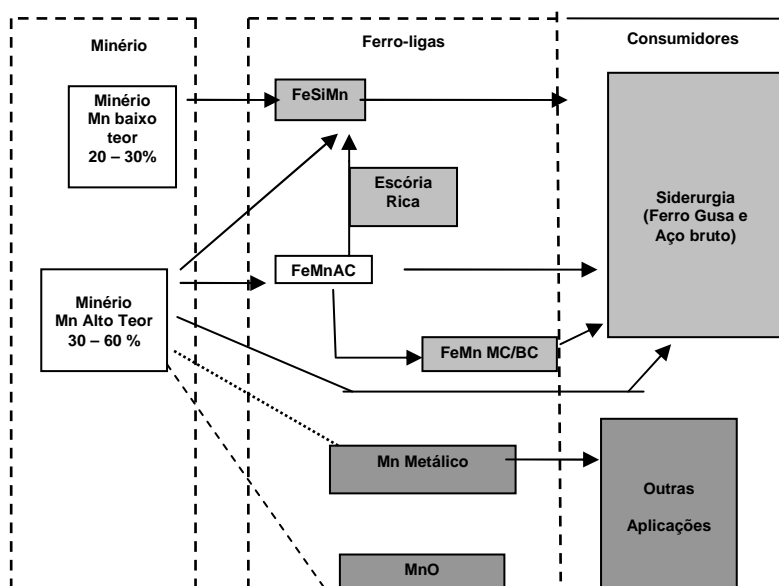


Figura 1: Esquema da produção de ligas de ferro-manganês.<sup>(5)</sup>



A escória da produção de FeSiMn geralmente é descartada e na Tabela 1 é mostrado um exemplo da faixa de composição dos elementos majoritários na forma de óxidos desta escória.<sup>(6)</sup>

**Tabela 1.** Composição química majoritária da escória de FeSiMn<sup>(6)</sup>

Elementos	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
Massa (%)	35	2-8	31	4-10	8-12

Nota-se da Tabela 1 que a escória da produção da liga de FeSiMn é formada principalmente por CaO (35%), SiO<sub>2</sub> (31%) e também por outros óxidos MnO (8-12%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4-10%) e MgO (2-8%).

A possibilidade do uso da escória da produção de FeSiMn para a produção de aços com baixo teor de manganês se mostrou possível.<sup>(7)</sup> A composição química da escória utilizada na produção de aço com baixo teor de manganês é mostrada na Tabela 2.<sup>(7)</sup>

**Tabela 2.** Composição química majoritária da escória de FeSiMn<sup>(7)</sup>

Elementos	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	C	S
Massa (%)	12-16	2,5-3,5	45-50	6-10	0,4-0,5	22-28	4-5	0,6-1,2

Conforme nota-se na Tabela 2 a escória é formada principalmente por SiO<sub>2</sub> (45-50%), MnO(22-28), CaO (12-16%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6-10%), MgO (2,5-3,5%) e apresentando também outros elementos como C, S e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

No estudo realizado sobre a avaliação ambiental da escória de ferro-manganês que foi utilizada como revestimentos de pavimentos na cidade de Salvador no estado da Bahia, e foi concluído que os resíduos não podem ser classificados como inerte conforme a NBR 10004.<sup>(8)</sup>

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais relacionados a este trabalho foram realizados no departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

Foi utilizada escória oriunda da produção da liga FeSiMn de uma empresa produtora de ligas de ferro manganês. A Figura 2 mostra a imagem dos resíduos industriais empregados neste trabalho.



**Figura 2:** Imagem da escória de ferro silício manganês



Observa-se que a escória de ferro silício manganês possui uma cor cinza escura e partículas com vários tamanhos e geometrias.

A escória de ferro silício manganês apresenta partículas com distribuição de tamanho variada e com tamanhos que não era possível colocá-la no forno, sendo necessário realizar a cominuição da escória. O processo de cominuição da escória foi realizado utilizando-se um Britador de Mandíbulas modelo BM 2010 marca Furlan, em seguida o material foi peneirado em uma peneira do tipo ABN 5/16” com abertura de 7,93 mm da marca Granutest, utilizou-se o material que passou pela malha da peneira.

A caracterização química do material foi realizada em um espectrômetro de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda, Philips PW2404, e por uma microsonda EDAX para análise espectrométrica de raios X com detector de elementos leves acoplada ao Microscópio Eletrônico de Varredura do tipo Philips XL - 30.

Para a análise microestrutural foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura Philips XL - 30, sendo que as amostras foram recobertas com filme de ouro.

O equipamento utilizado para o estudo do comportamento térmico da escória através de Análise Térmica Diferencial foi um Netzsch, modelo 409 C. Ambos os cadinhos utilizados, porta amostra e de referência, foram de alumina, sendo o ensaio realizado em atmosfera de ar com taxa de aquecimento de 15°C/min até a temperatura de 1.480°C.

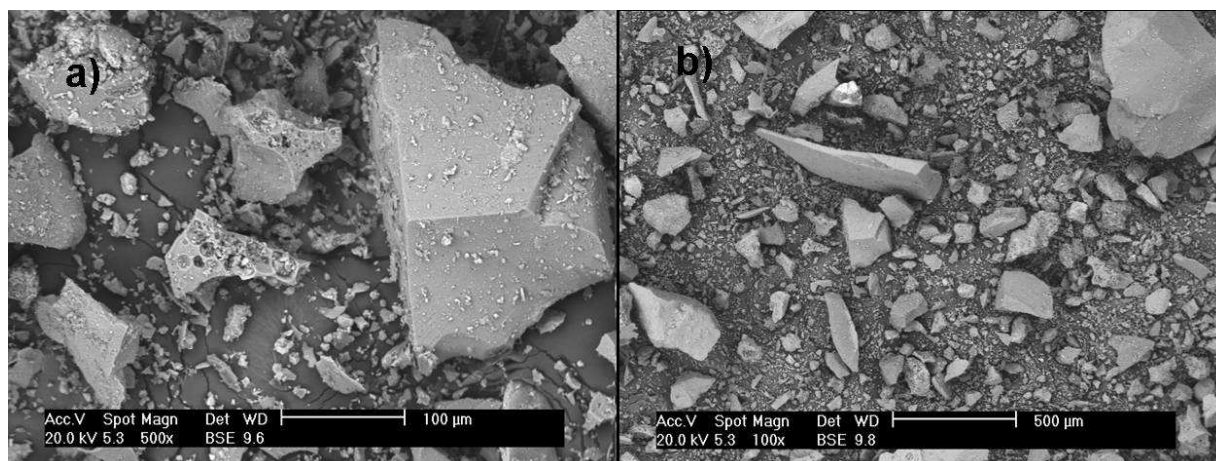
Foram realizadas medidas de Fluidez Herty utilizando-se um viscosímetro de Herty. Os ensaios foram realizados a três temperaturas (1.400°C, 1.450°C e 1.500°C), e em todas as corridas a altura entre a calha do forno e o topo do viscosímetro estava em torno de 130 mm e a velocidade de alimentação do viscosímetro foram aproximadas para a mesma velocidade em todas as corridas. A medida de fluidez Herty é considerada a distância medida em centímetros que o fluido percorre o canal de seção circular do viscosímetro de Herty.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **3.1 Análise Microestrutural**

A escória oriunda da produção da liga de ferro silício manganês apresenta-se na forma de rocha com tamanhos e geometrias variados, tendo fragmentos com dimensões de micrômetros até centímetros. A Figura 3 mostra duas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da parte da escória que possui menor granulometria.



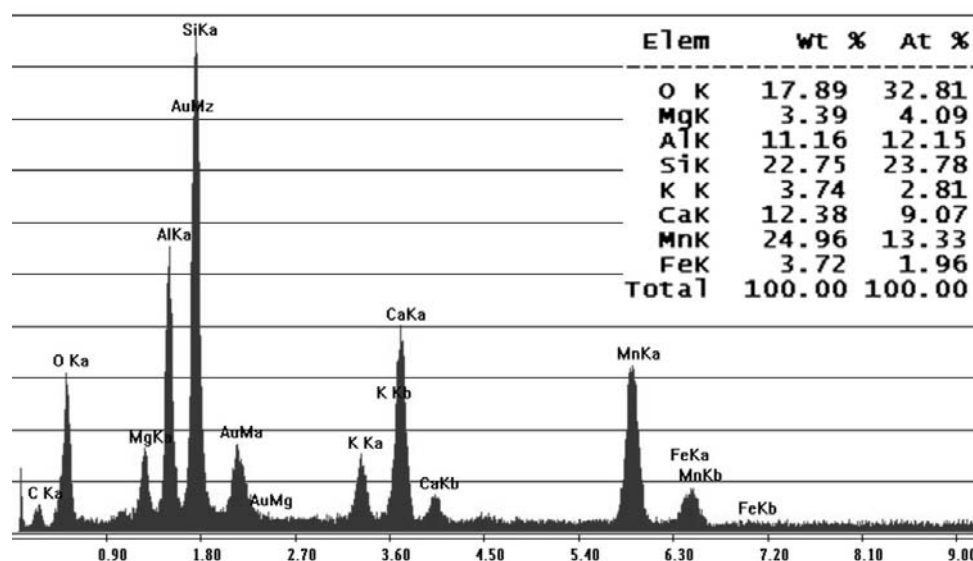


**Figura 3.** Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura da escória de ferro silício manganês: a) aumento de 500x; b) aumento de 100x.

As dimensões das partículas que formam a escória variam de micrômetros a centímetros e possuem geometria variada.

### 3.2. Análises Químicas

A Figura 4 apresenta os resultados da análise química da escória realizada por microsonda eletrônica de energia dispersiva.



**Figura 4.** Análise química do resíduo do corte mármore obtida por microsonda eletrônica.

Realizando-se uma análise dos dados do gráfico da Figura 4 pode-se notar que a escória apresenta em maior quantidade os elementos Mn (24,96%), o elemento Si (22,75%), o elemento O (17,89), o elemento Ca (12,38%) e o elemento Al (11,16) aparecendo em menor quantidade outros elementos como o K (3,74%), o Fe (3,72%) e o Mg (3,39%).

A análise química realizada por fluorescência de raios X é mostrada na Tabela 3 na forma de óxidos em porcentagem de massa.



**Tabela 3.** Composição química da escória de ferro silício manganês

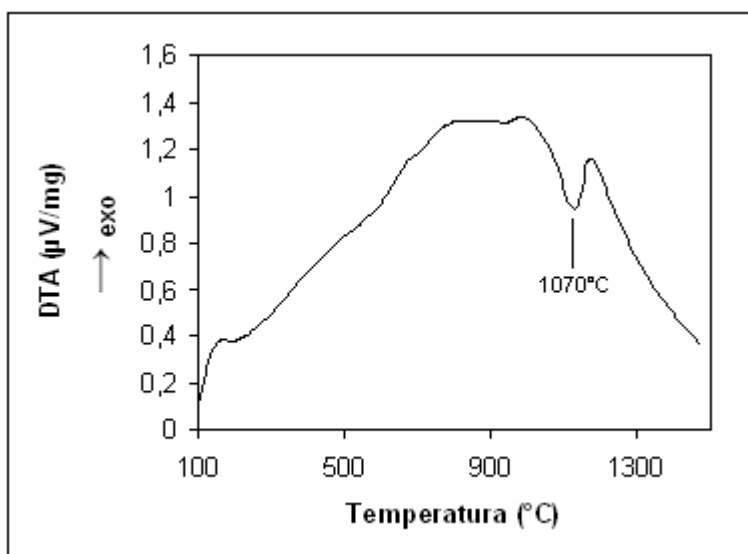
Elementos	% em massa
CaO	20,79
MgO	6,19
SiO <sub>2</sub>	43,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,79
MnO	12,00
Outros	3,10

Observando-se a

Tabela 3 nota-se que a escória é composta por 43,13% de sílica (SiO<sub>2</sub>), 20,79% de CaO, 14,79% de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 12% de óxido de manganês (MnO) e 6,19% de óxido de magnésio MgO, e apresentando outros elementos que somam 3,1%. A escória de ferro silício manganês é rica em sílica, óxido de cálcio e alumina estes óxidos fazem parte da composição química de materiais vítreos. A escória apresenta também grande quantidade de óxido de manganês.

### 3.3 Análise Térmica Diferencial (DTA)

O resultado da Análise Térmica Diferencial é mostrado no gráfico da Figura 5. Nota-se que a curva apresenta um pico endotérmico que caracteriza a fusão da escória, a temperatura em que se inicia a fusão da escória é de aproximadamente 1.070°C.



**Figura 5.** Análise Térmica Diferencial da escória.

Pelos resultados da Análise Térmica Diferencial conclui-se que para a fusão da escória são necessárias temperaturas acima de 1.000°C. Temperaturas da ordem de 1000°C podem ser alcançadas em forno elétrico a arco, que foi utilizado para a fusão da escória para a medida da fluidez Herty.

### 3.4 Fluidez Herty

A medida da viscosidade dos materiais fundidos em função da temperatura constitui operação delicada, sendo a medida da fluidez Herty uma maneira prática de se



medir a fluidez. A Tabela 4 apresenta os resultados da fluidez Herty da escória a três temperaturas diferentes (1.400°C, 1.450°C e 1.500°C ).

**Tabela 4.** Fluidez Herty a três temperaturas

Temperatura de vazamento	Fluidez Herty (mm)
1.400°C	80
1.450°C	120
1.500°C	170

A fluidez da escória aumenta de acordo com o aumento da temperatura, uma faixa de fluidez de 80 mm a 170 mm foi registrada.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados encontrados neste trabalho mostram que a escória apresenta partículas com dimensões e geometrias variadas, sendo que as dimensões variam desde micrômetros até centímetros e que dependendo do seu uso é necessário realizar a cominuição da escória para servir como matéria-prima para ser incorporada em algum meio produtivo. A composição química indica que a escória principalmente por óxidos que são usados na fabricação de materiais vítreos indicando que a escória poderá substituir as matérias-primas convencionais utilizadas no processo de fabricação de materiais vítreos. Sendo assim, pode-se afirmar que existe a viabilidade do reaproveitamento da escória, transformando-a em sub-produtos, gerando uma economia para o setor de materiais vítreos e fornecendo um destino adequado para a escória.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, Universidade Federal de Ouro Preto e Universidade de São Paulo.

## REFERÊNCIAS

- 1 TERRY LAY, G.F.; ROCKWELL, M. C.; WILTSHIRE, J. C.; KETATA, C.; Characteristics of silicate glasses derived from vitrification of manganese crust tailings. *Ceramics International* (2009).
- 2 ALVES, J.O., ESPINOSA, D.C.R., TENORIO, J.A.S. Recycling of steelmaking slag aiming at the production of thermo-acoustic insulation. TMS 2009 - 138th Annual Meeting & Exhibition, 2009, San Francisco - USA, p. 921-925.
- 3 ALVES, J.O., ESPINOSA, D.C.R., TENORIO, J.A.S. Reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte do granito visando a produção de lâ de vidro. 40º Seminário Internacional de Aciaria - ABM, 2009, São Paulo-SP, p. 36-42.
- 4 FARIA, G. L.; Estudo da Intensidade de Creptação de Minérios Granulados de Manganês do Brasil. Dissertação de Mestrado, 125 p., Rede Temática em Engenharia de Materiais (UFOP/CETEC/UEMG), Ouro Preto, Brasil, 2008.
- 5 VALE. Estrutura da industria de manganês. Disponível em: <http://www.vale.com/vale/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=41>. Acesso em 06 de janeiro de 2010.
- 6 HOLAPPA, L.; XIAO, Y. Slags in ferroalloys production-review of present knowledge. VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.



- 7 NÓBREGA, L. M; ROSA, N. M. G. S; CAMPOS, L. E.P; SOARES, J. B; Avaliação Ambiental de Escória de Ferro liga Aplicada em Revestimentos de Pavimentos em Salvador 36ª Reunião Anual de Pavimentação – 36.ª RAPv Curitiba/PR - Brasil - 24 a 26 de agosto de 2005.
- 8 PELINO, M.; CANTALINI, C.; VEGLIO, F.; Crystallization of glasses obtained by recycling goethite industrial wastes to produce glass-ceramic materials. Journal of Materials Science 29 (1994) 2087-2094.