

## CONCENTRAÇÃO DE ESCÓRIA METALÚRGICA DA LIGA FeSiMn POR MESA CONCENTRADORA WILFLEY

R. O. GALVÃO\*, F. B. M. BARROS, G. K. SILVA NETO, V. C. P. ANDRADE, E. L. SILVA, J. C. S. OLIVEIRA, B. B. LIRA  
Universidade Federal do Ceará, Universidade Federal de Pernambuco.  
engraulim@gmail.com\*

Submetido 26/08/2017 - Aceito 13/09/2017

DOI: 10.15628/holos.2017.6247

### RESUMO

A produção industrial da liga metálica ferrosilicomanganês (FeSiMn) está intimamente ligada ao processo pirometalúrgico. Porém, devido às limitações desse processo, observa-se um elevado percentual da liga FeSiMn nas pilhas de rejeito. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi escalonar uma rota de recuperação utilizando uma mesa oscilatória Wilfley. Para o estudo foi utilizada cerca de 40 kg de escória metalúrgica da liga FeSiMn. Analisaram-se as influências de 3 parâmetros fundamentais da mesa: granulometria (<125 $\mu$ m e >125 $\mu$ m), inclinação (2° e 4°) e amplitude (12 e 14 mm). As influências dos parâmetros da mesa oscilatória foram analisadas pela variação do teor do concentrado, das recuperações mássica e

metalúrgica. Para determinar o teor do concentrado empregou-se a técnica de fluorescência de raios-X (FRX). Com isso, constatou-se que os parâmetros amplitude e inclinação apresentaram uma menor influência sobre o teor e a recuperação mássica. No entanto, a granulometria apresentou uma variação significativa na recuperação metalúrgica. Assim, pode-se concluir que neste estudo a configuração que gerou uma maior eficiência no processo de concentração da liga FeSiMn, utilizando a mesa oscilatória Wilfley foi: granulometria <125  $\mu$ m; inclinação de 2°; e amplitude de 14 mm. Essa configuração apresentou uma recuperação metalúrgica de aproximadamente 50% da liga FeSiMn.

**PALAVRAS-CHAVE:** Liga FeSiMn, Escoria, Mesa Oscilatória, FRX.

## CONCENTRATION OF FeSiMn LEAGUE METALLURGICAL SLAG BY CONCENTRATOR TABLE WILFLEY

### ABSTRACT

The industrial production of ferro-silico-manganese alloy (FeSiMn) is closely linked to the pyrometallurgical process. However, due to limitations in the process a high percentage of FeSiMn alloy is observed in the tailings piles. In this context, the purpose of this work is to stagger a recovery rotation of FeSiMn alloy by using a Wilfley oscillating table. A 40kg slag sample from the FeSiMn alloy was utilized for the study. The influence of three essential parameters of the table were analyzed: granulometry (<125 $\mu$ m and > 125 $\mu$ m), slope (2° and 4°) and amplitude (12 and 14mm). The influence of the oscillatory table's parameters was analyzed by the variation of the concentrate content and the mass and

metallurgical recoveries. The X-ray fluorescence (FRX) technique was used to determine the concentrate content. Hence, it was found that the amplitude and slope parameters had a lower influence on the content and recovery. However, the granulometry showed significant variation in metallurgical recovery. Thus, it can be concluded that in this study, the configuration that generated a higher efficiency in the concentration process of FeSiMn alloy using a Wilfley oscillating table was: granulometry <125  $\mu$ m; 2° slope; and amplitude of 14 mm. This configuration showed a metallurgical recovery of approximately 50% of the FeSiMn alloy.

**KEYWORDS:** FeSiMn League, Slag, Oscillatory Table, FRX.

## 1 INTRODUÇÃO

O manganês é um elemento de transição da família do ferro e representa cerca de 0,1%, em peso, dos constituintes do planeta (WILLS, 1992). Depois do ouro e das pedras preciosas, foi o manganês um dos primeiros recursos minerais a despertar interesse no Brasil (ABREU, 1973). Como insumo mineral, tem um papel importante na indústria metalúrgica devido às suas características físico-químicas. Suas aplicações neste setor industrial estão vinculadas a produção de ferro-ligas, que são utilizadas para a fabricação do aço (GONÇALVES E SERFATY, 1976). Uma das ligas metálicas comumente utilizadas na produção de aço é a liga ferrosiliciomanganês (FeSiMn). Seu uso está associado a propriedade dessulfurante, e desoxidante, relacionada ao manganês e ao silício, respectivamente. Essas propriedades são fundamentais para a produção de aços mais resistentes (OLSEN E TANGSTAD, 2004). Isso mostra a importância do manganês no setor mineral e em suas aplicações nos produtos metalúrgicos.

Devido às limitações do processo metalúrgico, observa-se um elevado percentual da liga FeSiMn nas pilhas de rejeito (RICHTER, 2009; GALVÃO, 2016). A preocupação com os princípios de proteção do meio ambiente e a visão econômica de reprocessar materiais de baixo teor, tem gerado um maior aproveitamento desses rejeitos, tanto na mineração quanto nas siderúrgicas (REIS, 2005; GALVÃO, 2016). No entanto, para que seja possível o reprocessamento das pilhas de materiais de baixo teor é necessário aumentar a concentração do material, para isso é possível utilizar técnicas de concentração de materiais. Dentre as técnicas de concentração, a gravimétrica é comumente utilizada nessa etapa do processo. Essa técnica é baseada na diferença de densidade existente entre os materiais presentes, utilizando-se de um meio fluido (água ou ar) para que ocorra a efetiva separação. A aplicação adequada de processos de concentração nas plantas siderúrgicas poderá aumentar, potencialmente, o aproveitamento de seus rejeitos. Isso indica que a escolha do método de concentração a ser aplicado nas pilhas de rejeito metalúrgico deve satisfazer condições técnicas e econômicas ideais para a sua implantação (REIS, 2005). Com isso, fica claro a importância do estudo sobre técnicas de concentração para o reprocessamento de escoria metalúrgica.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi determinar os parâmetros adequados de uma mesa oscilatória Wilfley, visando a maior concentração do material. Para o estudo foi utilizado escoria metalúrgica da liga FeSiMn proveniente da Empresa de Ferro Ligas Marabá. Analisou-se as influências de 3 parâmetros fundamentais da mesa oscilatória: granulometria (<125µm e >125µm), inclinação (2° e 4°) e amplitude (12 e 14 mm). Para determinar a influência dos parâmetros da mesa oscilatória foi observado a variação do teor do concentrado e das recuperações mássica e metalúrgica. Para avaliar quantitativamente os teores do produto da concentração gravimétrica, empregou-se a técnica de fluorescência de raios X (FRX). Com isso, observou-se que os 3 parâmetros analisados apresentaram influência nos teores de recuperação da liga FeSiMn. Pode-se concluir o melhor resultado, ou seja, a maior recuperação metalúrgica da liga, cerca de 53%, foi observada utilizando a granulometria <125 µm, a inclinação de 2° e a amplitude de 14 mm.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Preparação e Caracterização da amostra

Para este estudo, foi utilizada uma amostra de escória da liga FeSiMn de aproximadamente 40 kg, proveniente da Empresa de Ferro Ligas Marabá. A amostra foi britada utilizando britadores de mandíbula e de rolos. O material britado foi classificado entre 2 mm (10 malhas). O produto dessa britagem foi homogeneizado e quarteado em amostras de 4 kg. Essas amostras foram novamente quarteadas em alíquotas de 500 g, as quais foram moídas utilizando um moinho de disco. O produto da moagem foi classificado em 115  $\mu\text{m}$  (120 malhas), gerando 2 alíquotas (<125  $\mu\text{m}$  e >125  $\mu\text{m}$ ).

Realizou-se uma caracterização previa das amostras empregando a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), analisada por energia dispersiva de raios-X (EDS – *Energy Dispersal Spectroscopy*). A Figura 1 apresenta o espectro obtido pelo EDS da liga FeSiMn e uma imagem microscópica (ES) da partícula da amostra. Foi observado a presença dos elementos: Ferro (Fe); Alumínio (Al); Manganês (Mn); e Silício (Si). Isso comprova a presença da liga FeSiMn na amostra estudada.

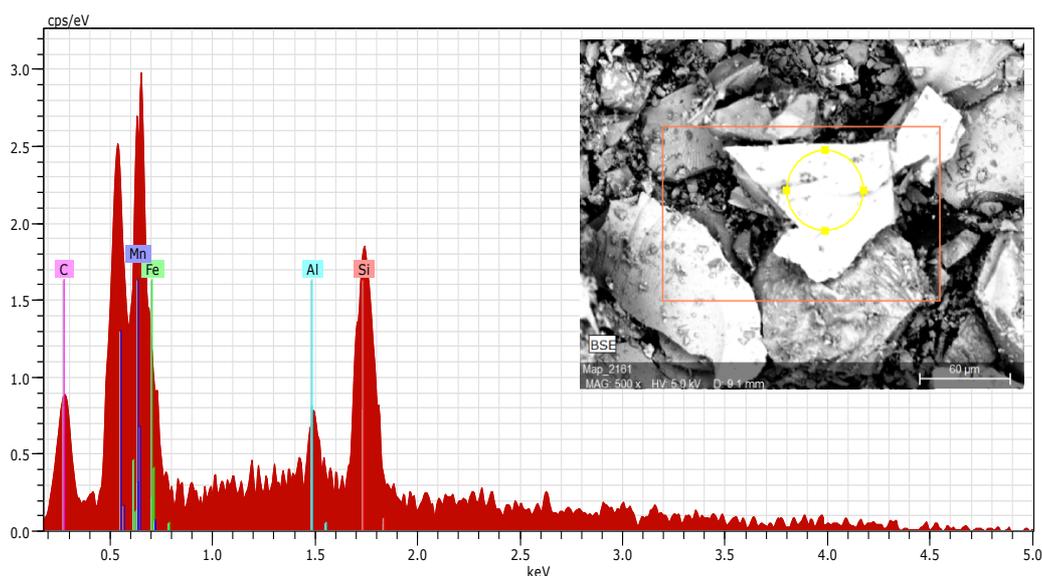


Figura 1: Espectro EDS da análise pontual na partícula da liga FeSiMn e uma imagem morfológica da partícula da liga, por elétrons secundários.

### 2.2. Concentração Gravimétrica

Para a etapa da concentração gravimétrica utilizou-se uma mesa oscilatória, do tipo Wilfley. Foi utilizado cerca de 250g de amostra em cada ensaio. Neste estudo foram avaliados 3 parâmetros principais do funcionamento da mesa, os quais são vinculados a eficiência do processo de concentração: (i) Granulometria; (ii) Amplitude; e (iii) Inclinação. Para cada parâmetro foi empregado dois valores distintos. A Tabela 1 apresenta as configurações empregadas na mesa em cada ensaio. Alguns parâmetros da mesa foram fixados: fluxo de água 60 L/h; frequência de 360 rpm; e taxa de alimentação 1 kg/h. A amostra de escória foi descarregada na mesa em forma de polpa e de forma manual. Utilizando bandejas de aço, coletou-se os produtos da mesa oscilatória, denominadas de concentrado (porção com maior

concentração da liga) e de leve (rejeito). Cabe ressaltar que os ensaios da mesa oscilatória foram realizados em duplicata, para garantir a reprodutibilidade dos ensaios. Os resultados obtidos no processo de concentração da liga de FeSiMn presente na escória foram analisados percentualmente por recuperação mássica e metalúrgica e pelo teor do concentrado.

**Tabela 1: Parâmetros utilizados nos testes de concentração em mesa oscilatória Wilfley.**

<i>Ensaio</i>	<b>Granulometria(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Inclinação(<math>^{\circ}</math>)</b>	<b>Amplitude(mm)</b>
1	<125	2	12
2	>125	2	12
3	<125	4	12
4	>125	4	12
5	<125	2	14
6	>125	2	14
7	<125	4	14
8	>125	4	14

### 2.3. Fluorescência de raios-X

Foi empregado o FRX para analisar, de forma quantitativa, a composição das amostras de alimentação da mesa oscilatória e das faixas concentradas do produto de cada ensaio. Cada amostra foi adequada a análise, ou seja, sua granulometria foi reduzida a um tamanho de partícula inferior a 75  $\mu\text{m}$ , por meio de almofariz e pistilo.

Uma alíquota de cada amostra foi secada em estufa a 110°C. Uma porção da alíquota seca foi levada a uma mufla a 1000°C por 2 horas para determinação da perda ao fogo. A outra porção da alíquota foi prensada em cápsulas de alumínio aplicando 30 toneladas de força. As pastilhas prensadas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raio-X Rigaku Modelo ZsX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. A Tabela 1 apresenta os dados obtidos pela análise FRX.

**Tabela 2. Percentual de óxidos constituintes das amostras de alimentação determinado por espectrometria FRX após perda ao fogo a 1000°C.**

Alimentação	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total	BaO
<125 $\mu\text{m}$	0.07	9.45	<b>22.34</b>	0.02	4.33	1.12	<b>53.05</b>	<b>2.53</b>	5.37
>125 $\mu\text{m}$	0.06	9.63	<b>22.73</b>	0.01	4.42	1.1	<b>52.68</b>	<b>1.91</b>	5.64

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 exibe os resultados dos testes de concentração da liga metálica na mesa oscilatória, contendo dados sobre a recuperação média em massa e a recuperação metalúrgica e o teor médio de Fe presente. Para os ensaios 1 e 5 foram obtidos elevados teores de ferro com altas taxas de recuperação em massa, enquanto que menores teores foram obtidos nos ensaios 3 e 7. Na análise do balanço metalúrgico as maiores recuperações ocorreram nos ensaios 5 e 6 e de forma contrária para os ensaios 2 e 8.

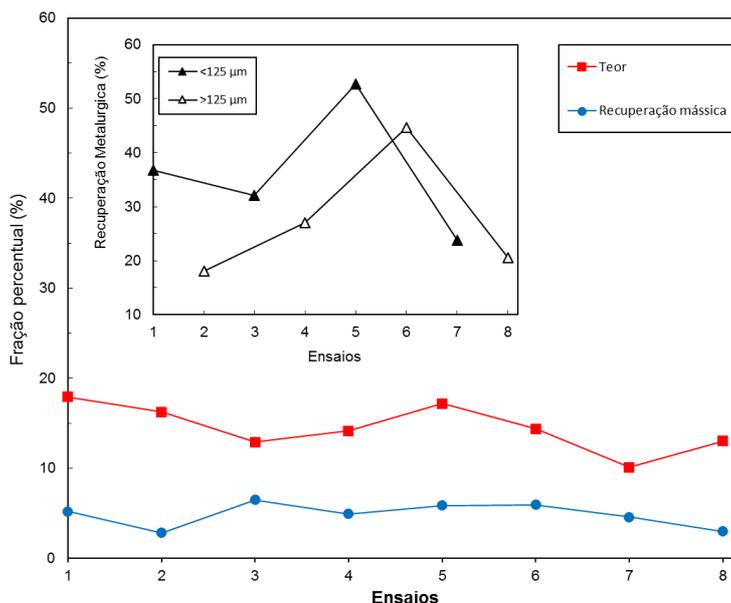


Figura 2: Gráfico da recuperação em massa versus recuperação metalúrgica

As maiores taxas de recuperação da liga metálica estiveram relacionadas com menores inclinações da mesa oscilatória, alcançando recuperações metalúrgicas de 52 e 44,66%, para os ensaios 5 e 6, respectivamente. Estes dados corroboram com os trabalhos realizados por Reis (2005) que estudou a recuperação de minérios de manganês em mesa oscilatória em ângulos de 3° e 5°. Os resultados obtidos foram de maior recuperação em todas as faixas granulométricas estudadas (global, + 0,074 mm e - 0,074 mm) para o ângulo de inclinação em 3°. Para o ensaio 2 executado em inclinação de 2° a baixa recuperação se deu em função do estreitamento entre as faixas de concentrado e rejeito provocadas pela baixa aceleração longitudinal resultado da menor amplitude (12 mm).

As Figuras 3, 4 e 5 mostram o perfil de distribuição das partículas sobre a mesa permitindo avaliar o efeito das variáveis granulometria, inclinação e amplitude, respectivamente. Na Figura 3 os ensaios com inclinação em 2° e amplitude de 12 mm tiveram redução na recuperação metalúrgica: de 36,74% para 18,05 % ao mudar de granulometria fina para granulometria grossa.



Figura 3: Perfil de separação no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b) para as condições de granulometria fina e granulometria grossa

Na Figura 4 os ensaios com granulometria fina e amplitude de 14 mm tiveram diminuição na recuperação metalúrgica: de 52,64% para 23,81 % ao variar de uma inclinação de 2° para 4°.



Figura 4: Perfil de separação no ensaio 5 (a) e ensaio 7 (b) para as condições de inclinação 2° e 4°, respectivamente

Na Figura 5 os ensaios com granulometria grossa e inclinação em 4° tiveram diminuição na recuperação metalúrgica: de 27,07% para 20,53 % ao variar de uma amplitude em 12 mm para 14 mm. Interessante destacar, que para os ensaios 1 e 5, em que ocorreram em granulometria fina e inclinação de 2°, o aumento da amplitude promove maior recuperação metalúrgica, de 36% para 52%, respectivamente.



Figura 5: Perfil de separação no ensaio 4 (a) e ensaio 8 (b) para as condições de amplitude 12 mm e 14 mm, respectivamente

Este efeito oposto obtido nos ensaios 1 e 5 nos permite afirmar que em menores inclinações e granulometrias mais finas as partículas densas são as últimas a sofrer o efeito do filme líquido, em contrapartida são as primeiras a sofrer efeito com o aumento do movimento oscilatório, justificando assim a boa recuperação metalúrgica no ensaio 5. De modo contrário utilizando maior inclinação o efeito no escorregamento é maior para as partículas grossas densas,

quando comparadas com as finas densas, sendo o contrário no movimento oscilatório com menor efeito nas grossas densas do que nas finas densas. Em síntese a explanação acima obtida a partir da análise dos trabalhos de Burt (1984) permitem compreender a menor recuperação metalúrgica para o ensaio 8.

#### 4. CONCLUSÕES

O processo de beneficiamento gravimétrico por mesa oscilatória se mostrou eficiente para a concentração da liga metálica de FeSiMn. Destacam-se que as três variáveis estudadas foram significativas na recuperação metalúrgica. Observou-se que os ensaios com granulometria grossa e fina em amplitudes de 14 mm e inclinação de 2° promoveram recuperações metalúrgicas de 52% e 44,66%, respectivamente.

Em termos gerais, os resultados dos testes de concentração em mesa oscilatória mostraram que a maior recuperação metalúrgica da liga de FeSiMn, ocorre com a variável de inclinação em 2° e amplitudes mais elevadas.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao laboratório de tratamento de minérios (LTM) da Universidade Federal de Pernambuco pela disponibilidade do espaço para a realização dos ensaios e à empresa Ferro Ligas Marabá (FERMAR) pela doação da escória para o estudo.

#### 6. REFERÊNCIAS

- ABREU, S.F (1973). Recursos minerais do Brasil. São Paulo, SP, Editora Edgard Blucher LTDA, vol.2, Cap.14, p.492-550.
- BURT, R.O.; MILLS, C. Gravity Concentration Technology (Developments in Mineral Processing). Elsevier: Volume 5. The Netherlands. Amsterdam 1984.
- GONÇALVES, E.; SERFATY, A (1976). *Perfil Analítico do Manganês*. Departamento Nacional da Produção Mineral, DNPM, Brasília, DF, Boletim nº 37, 149 p.
- GALVÃO, R. O. Aplicação de um planejamento fatorial na recuperação de liga metálica (FeSiMn) de escória empregando-se mesa oscilatória do tipo wilfley. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2016.
- OLSEN, S. E. e TANGSTAD, M. Silicomanganese production and process understanding. Tenth International Ferroalloys Congress. Capetown, África do Sul, 2004.
- REIS, E. L. Caracterização de resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico carbonatado da RDM-Unidade Morro da Mina. Dissertação mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- RICHTER, D. Uma rota de recuperação de metal a partir de escória secundária da produção de ferroníquel. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2006.
- WILLS, B. A (1992). *Mineral processing Technology*. Pergamon Press, 5ª edição, New York, 855 p.