



# REAPROVEITAMENTO DA POEIRA DE ACIARIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO PROCESSO DE MICROPELOTIZAÇÃO<sup>1</sup>

Victor Bridi Telle<sup>2</sup>

José Roberto de Oliveira<sup>3</sup>

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

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

## Resumo

Este trabalho tem por objetivo estudar o reaproveitamento do pó de aciaria elétrica, gerado na fabricação de aço em forno elétrico a arco, mediante o processo de pré-aglomeração do resíduo para obtenção de micropelotas. Para a caracterização física e química do material, foram feitas análises químicas, granulométricas, morfológicas e de difração de raios-X. Além disto, foram fabricadas micropelotas compostas pelo resíduo, que após isto foram secas em estufa e classificadas por peneiramento. Através dos resultados obtidos pela análise química foi possível conhecer os elementos majoritários que constituem a poeira de aciaria elétrica. Os dados da análise granulométrica e da microscopia eletrônica de varredura mostraram a distribuição do tamanho das partículas e o aspecto morfológico do material. Além disto, a presença de picos no difratograma indicam que o material é cristalino. No processo de aglomeração do resíduo foram obtidas micropelotas de poeira de aciaria elétrica. Os fatores que influenciam na micropelotização e as possíveis destinações do material foram analisados neste trabalho.

**Palavras-chave:** Poeira de aciaria; Reciclagem; Forno elétrico a arco; Micropelotização.

## ELECTRIC ARC FURNACE DUST REUSE IN THE PELLETING PROCESS

### Abstract

The purpose of this work is to study the reutilization of the steelmaking dust, derived from steel production in the electric arc furnace, by the pre agglomeration of that waste to obtain micropellets. To verify the physical and chemical characteristics of steelmaking dust, the material was submitted to chemical and size analysis, x-ray diffraction and scanning electronic microscopy analysis. Besides that, micropellets were fabricated the residue in question, later they were dried in a heater and classified by size through screening. Through the results obtained by chemical analysis was possible to obtain the majority elements that are present at the electric arc furnace dust. The data from particle size analysis and scanning electron microscopy showed the distribution of particle size and morphological aspects of the material. Moreover, the presence of peaks in the diffractogram indicates that the material is crystalline. In the process of agglomeration of the residue were obtained micropellets of electric arc furnace dust. The factors that influenced the pelleting process and possible destinations of the material were analyzed in this work.

**Key words:** Steelmaking dust; Recycling; Electric Arc Furnace; Pelleting process.

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

<sup>2</sup> Mestrando, Universidade de São Paulo (USP).

<sup>3</sup> Professor, Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Doutor em Eng. Metalúrgica.

<sup>4</sup> Professora livre docente, Universidade de São Paulo (USP), Doutora em Eng. Metalúrgica.

<sup>5</sup> Professor titular, Universidade de São Paulo (USP), Doutor em Eng. Metalúrgica.



## 1 INTRODUÇÃO

Pós e finos representam cerca de 13% do total de resíduos gerados pela siderurgia,<sup>(1)</sup> dentre estes se encontra a poeira de aciaria elétrica (PAE).

O PAE é um resíduo proveniente da fabricação de aço através de forno elétrico a arco (FEA). Este pó é composto por diferentes óxidos metálicos, tais como ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e PbO. Em muitos países, a recuperação desses óxidos é adotada como forma de reutilização do resíduo em processos hidro e pirometalúrgicos, dentre estes o Waelz e o Primus. Porém, no Brasil essa prática ainda não é aplicada, pois os teores dos óxidos de alto valor comercial não são suficientes para tornar a recuperação do rejeito viável.

Uma alternativa é utilizar o resíduo em outros processos da siderurgia, porém estudos sobre a formação da poeira e a sua caracterização física e química são fundamentais para verificar a viabilidade da aplicação da poeira em outros processos.

Este trabalho tem por objetivo caracterizar o pó de aciaria elétrica, e verificar se é possível aplicar o resíduo na sinterização de minério de ferro através da sua pré-aglomeração (micropelotização).

A siderurgia produz cada vez mais aço através de FEA, nos anos 70 a produção era de 14% via forno elétrico a arco. Já em 2003, de uma produção mundial de 964 milhões de toneladas de aço, a produção neste processo atingiu 34%<sup>(2)</sup>. Dessa maneira, a tendência é que a geração do PAE aumente.

No Brasil, a produção de aço também está aumentando, e a cada tonelada de aço produzido é gerado cerca de 15 kg a 20 kg de PAE (1,5% a 2,0%). Este valor é próximo aos atingidos em países como EUA (1,7%), Canadá (1,5%), Japão (1,8%) e Itália (1,0% a 1,4%).<sup>(2,3)</sup>

Entretanto, o PAE é classificado como perigoso (Classe I) de acordo com os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 10004/2004,<sup>(4)</sup> o que implica em um aumento nos custos para o gerenciamento adequado deste resíduo, a fim de atender as exigências das leis ambientais a que estão sujeitas as siderúrgicas. Devido a isto, as empresas vêm investindo em parcerias com instituições tecnológicas e universidades, buscando formas de aproveitamento do PAE. Segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), 94% dos rejeitos gerados pelo setor foram reaproveitados no ano de 2007, seja através da reciclagem, reuso, co-processamento ou compostagem.<sup>(1)</sup>

Assim, estudos sobre a reciclagem dos resíduos são importantes para diminuir a quantidade destes no meio ambiente ou em aterros, e até mesmo para contribuir como fonte de matéria prima em processos metalúrgicos, ou ainda em outros setores como o da construção civil.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Coleta e Pré-tratamento da Amostra

A poeira de aciaria elétrica estudada neste trabalho foi coletada no sistema de despoeiramento do forno elétrico a arco de uma indústria siderúrgica semi-integrada, situada na região da Grande Vitória - ES. Para evitar a contaminação e absorção de umidade, a amostra foi armazenada em um recipiente plástico.

O material foi homogeneizado por DEZ minutos no misturador Eirich, nas dependências do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Depois destes procedimentos as amostras de PAE foram encaminhadas para os ensaios de caracterização e fabricação das micropelotas. A Figura 1 mostra uma amostra do PAE utilizado nos experimentos.



**Figura 1:** Amostra de poeira de aciaria elétrica (PAE).

## 2.2 Análise Química

O pó foi caracterizado quimicamente através de dois procedimentos:

- análise semiquantitativa, por espectrometria de fluorescência de raios X; E
- análise qualitativa, por difração de raios X.

Ambos os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo (PMI) da EPUSP.

## 2.3 Distribuição do Tamanho das Partículas

Para a verificação da distribuição granulométrica das partículas do PAE, foi utilizado o Malvern localizado no LCT do PMI. Este equipamento utiliza difração a laser para medir o diâmetro das partículas. A amostra foi exposta a ultra-som durante cinco minutos, e foi utilizado álcool isopropílico como meio de dispersão.

Com esta técnica, é possível obter dados na forma de gráficos e tabelas com a faixa granulométrica do material. Além disso, o Malvern fornece resultados estatísticos de área de superfície específica e  $d_{50}$ , porém esses dados são estimados.

## 2.4 Caracterização Microestrutural

Para este tipo de análise foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo XL-30 Philips, do laboratório de microscopia eletrônica do PMT. Neste equipamento é possível observar a morfologia das partículas e o aspecto topográfico do resíduo. Também foi feita uma análise por microsonda EDS, na qual é possível conhecer a composição química pontual da amostra.



Nesta etapa do trabalho, além da já citada homogeneização, também foi feito um recobrimento da amostra com ouro (para condução de corrente), exigido para análise em MEV.

## 2.5 Fabricação das Micropelotas

No processo de aglomeração, a poeira de aciaria (70%) foi misturada com coque peneirado (30%), com granulometria inferior a 0,71 mm. Esta medida foi adotada, pois materiais com tamanhos de partículas maiores são mais difíceis de micropelotizar. Depois da homogeneização foram produzidas micropelotas em um pelotizador do tipo Eirich TR04, mostrado na Figura 2, um spray de água foi utilizado para adicionar umidade na mistura. Após isso, as micropelotas (de 3 mm a 5 mm) foram classificadas por peneiramento, e secas em uma estufa a 120°C, durante 24 horas.

A Figura 3 mostra a estufa utilizada nos experimentos.



Figura 2: Máquina para pelotização.



Figura 3: Estufa utilizada para secagem das micropelotas.

## 2.6 Aplicação das Micropelotas na Sinterização

Após a secagem, foram feitas duas misturas compostas por minério de ferro, sinter de retorno, coque (combustível), calcário (fundente) e 4% de água sobre a mistura seca. Esses materiais constituem a matéria prima para a fabricação de sinter de minério de ferro e foram misturados em uma betoneira adaptada (Figura 4) durante seis minutos.



**Figura 4:** Betoneira adaptada para os experimentos.

As misturas foram compostas de:

- 6 kg de mistura de referência (67% de minério de ferro, 24% de sinter de retorno, 6% de coque e 3% de calcário); e
- 2,5 kg de mistura de referência com adição de 500g de micropelotas (as micropelotas foram adicionadas após três minutos de mistura na betoneira).

A mistura de 6 kg foi dividida em duas partes iguais. Sendo assim, foram obtidas três misturas de 3 kg cada (duas de referência com a mesma composição, e uma com micropelotas). Deste modo, as diferentes misturas foram adicionadas em camadas em um sinterizador, sendo a camada intermediária composta pela mistura com micropelotas. A Figura 5 indica como as camadas foram distribuídas no sinterizador.



**Figura 5:** Distribuição das misturas no sinterizador.

Através de um termopar, foram medidas as temperaturas de saída dos gases. E após a sinterização foram retiradas três amostras em diferentes regiões do bolo de sinter (superior, intermediária e inferior). Em seguida as amostras foram analisadas através de microscopia eletrônica de varredura.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Análise Química do Pó de Aciaria Elétrica (PAE)

A composição química da poeira de aciaria depende principalmente do tipo de aço fabricado, além do tipo e quantidade de aditivos que fazem parte do processo siderúrgico.

O resultado da análise química por fluorescência pode ser visto na Tabela 1. Os elementos majoritários são Fe, Zn, Pb, Ca, Cl, Mn e Mg.

Esta técnica mostra o teor das substâncias na forma de óxidos, com exceção do Cl, e Br. Porém, nem todos os componentes se encontram nessa forma. O ferro presente no PAE pode ser encontrado como wustita (FeO), hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) e também ferro metálico. Alguns metais voláteis estão presentes (Zn, Pb, Na, K, Cl, Cd), assim como elementos residuais (Co, Ni) e também componentes de fusão de escória (Al, Mg, Ti).<sup>(3,5)</sup>

**Tabela 1:** Composição química do PAE (fluorescência)

Substâncias	Composição (%)	Substâncias	Composição (%)
Fe <sub>total</sub> *	58,3	SO <sub>3</sub>	0,90
Zn <sub>total</sub> **	14,2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,68
CaO	4,70	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,50
SiO <sub>2</sub>	4,18	CuO	0,23
MnO	2,05	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20
MgO	1,52	TiO <sub>2</sub>	0,09
Cl	1,43	Br	0,07
K <sub>2</sub> O	1,34	SnO <sub>2</sub>	0,06
PbO	1,18	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , NiO, SrO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>	< 0,05

\* Fe<sub>total</sub> corresponde ao metal na forma de: Fe, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e FeO; \*\* Zn<sub>total</sub> corresponde ao metal na forma de: Zn, ZnO e de zinco associado com o ferro (ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos pela técnica de difração de raios X. Existem muitas pesquisas sobre a estrutura mineralógica do PAE, com o intuito de investigar as associações de zinco no resíduo.

De acordo com alguns autores<sup>(3,6-9)</sup> a magnetita é um dos minerais mais abundantes encontrados na poeira de aciaria elétrica.

Através da Figura 6 observa-se a existência de picos indicando que a estrutura do PAE é cristalina. Nota-se a presença de magnetita, (FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), magnesioferrita (MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), franklinita (ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) que pertencem ao grupo do espinélio. Além destas fases, também era esperado encontrar a zincita (ZnO). Estudos indicam que a quantidade desta fase no PAE é proporcional a quantidade de zinco.<sup>(10)</sup> Também foram encontrados silvina, grafita, quartzo e silicato de chumbo.

No caso da grafita, esta apresenta estrutura de planos preferenciais, dessa maneira os picos que indicam a presença de grafita no resíduo podem aparecer com maior intensidade no difratograma. Porém, isso não significa que o carbono está presente na amostra em quantidade proporcional à altura do pico.

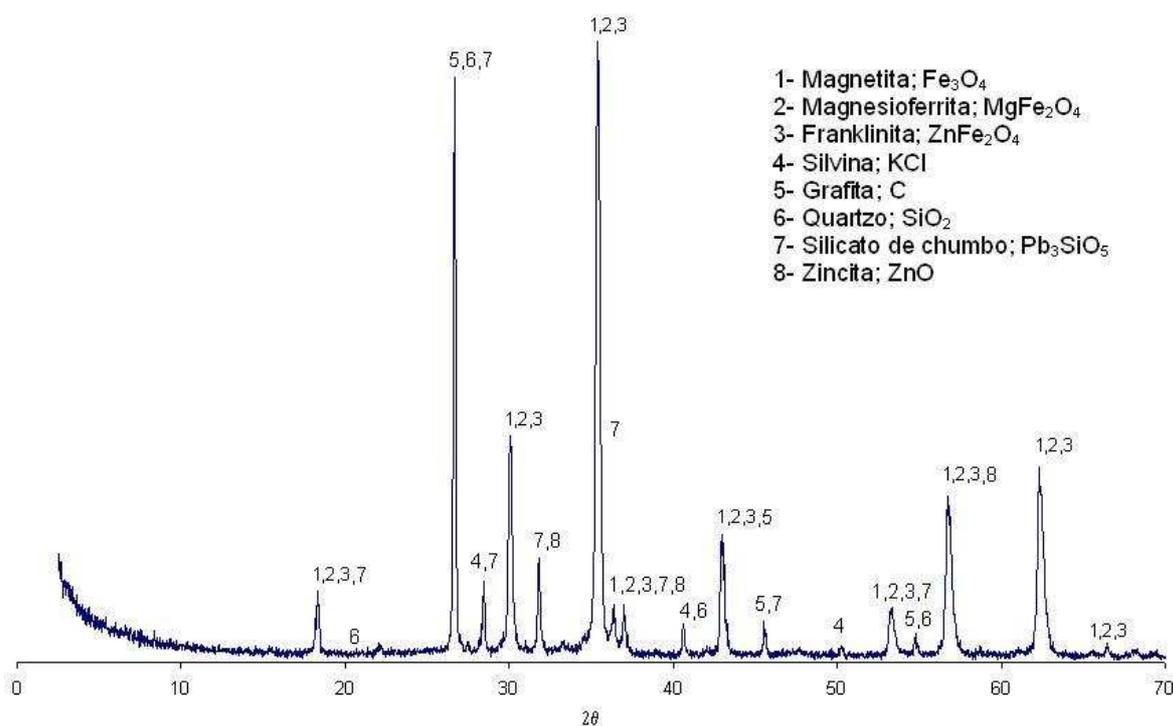


Figura 6: Difratoograma de raios X do PAE.

### 3.2 Distribuição do Tamanho das Partículas do PAE

Através dos resultados fornecidos pelo Malvern, foi possível observar que o PAE é um material fino, no qual cerca de 92% das partículas possuem tamanho menor que 10,48  $\mu m$ .

Esta granulometria do resíduo favorece sua aplicação como matéria prima secundária na produção de alguns materiais, pois isso implica na vantagem da eliminação do estágio de moagem.<sup>(3)</sup>

A Figura 7 apresenta o gráfico com a distribuição granulométrica do PAE.

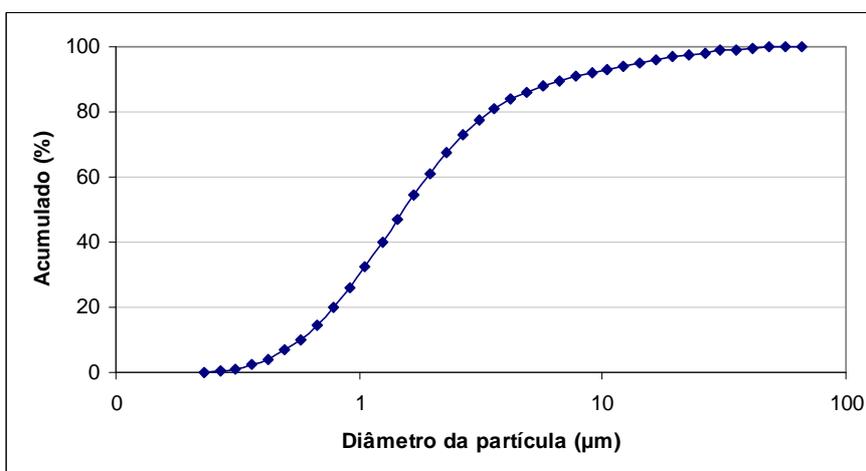


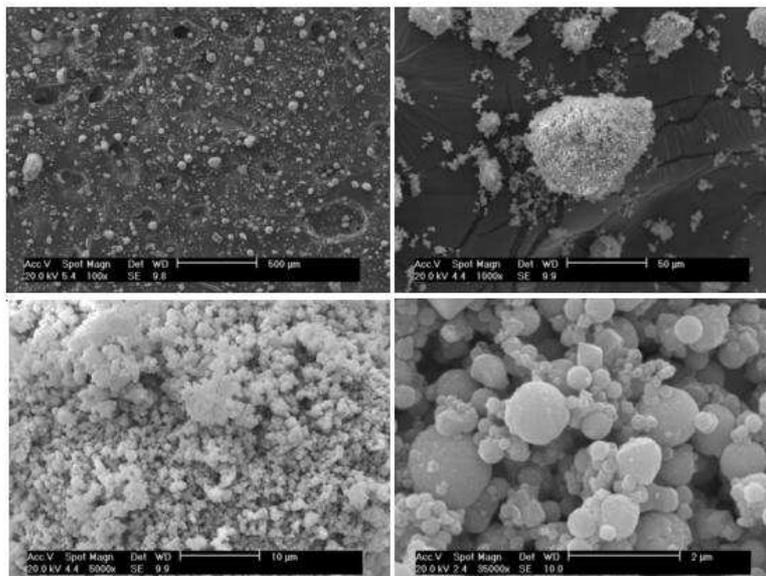
Figura 7: Distribuição granulométrica do PAE.



### 3.3. Microscopia Eletrônica do PAE

A Figura 8 mostra sucessivas ampliações de uma amostra de PAE. Com 100 vezes de aumento (na imagem superior, à esquerda) pode-se observar que as partículas do pó estão dispersas e aparentam ter tamanhos e formas diferentes. No entanto, com aumentos maiores é possível verificar que as partículas possuem forma esférica, e estão aglomeradas. Isto fica claro na micrografia com ampliação de 35.000 vezes (inferior, à direita).

Essa morfologia esférica das partículas já foi observada em outros trabalhos<sup>(3,11)</sup> que envolvem a caracterização da poeira de aciaria elétrica.



**Figura 8:** Micrografias da poeira de aciaria elétrica (ampliações; superior esquerdo: 100x, superior direito: 1.000x, inferior esquerdo: 5.000x, inferior direito: 35.000x).

### 3.4 Micropelotização

Antes mesmo de adicionar água através de spray, observou-se que o pó de aciaria tende a formar pelotas com um simples peneiramento do material.

Após a secagem em estufa, as micropelotas produzidas suportaram o procedimento de mistura com as matérias primas de sinterização. Ou seja, não se quebraram com o processo de pré-aglomeração no misturador. Não foi feita adição de aglomerante de qualquer tipo.

A utilização de micropelotas na mistura de sinterização aumenta a velocidade da produção do sinter.<sup>(12)</sup> Na Figura 9 é possível observar as micropelotas produzidas.



Figura 9: Micropelotas de poeira de aciaria e coque (3 a 5mm).

### 3.5 Influência das Micropelotas na Sinterização

O tempo de sinterização foi de 17 minutos e a temperatura máxima de saída dos gases foi de 318,8°C. A Figura 10 mostra um perfil da temperatura de saída dos gases em função do tempo de sinterização.

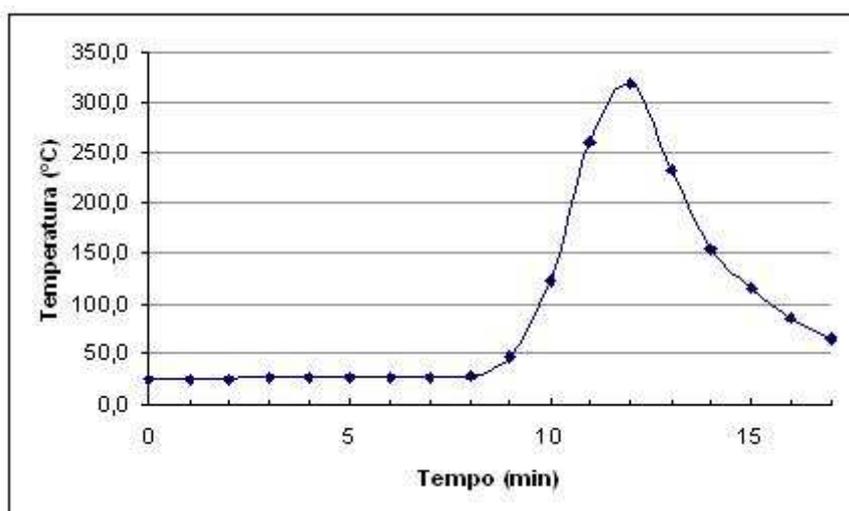
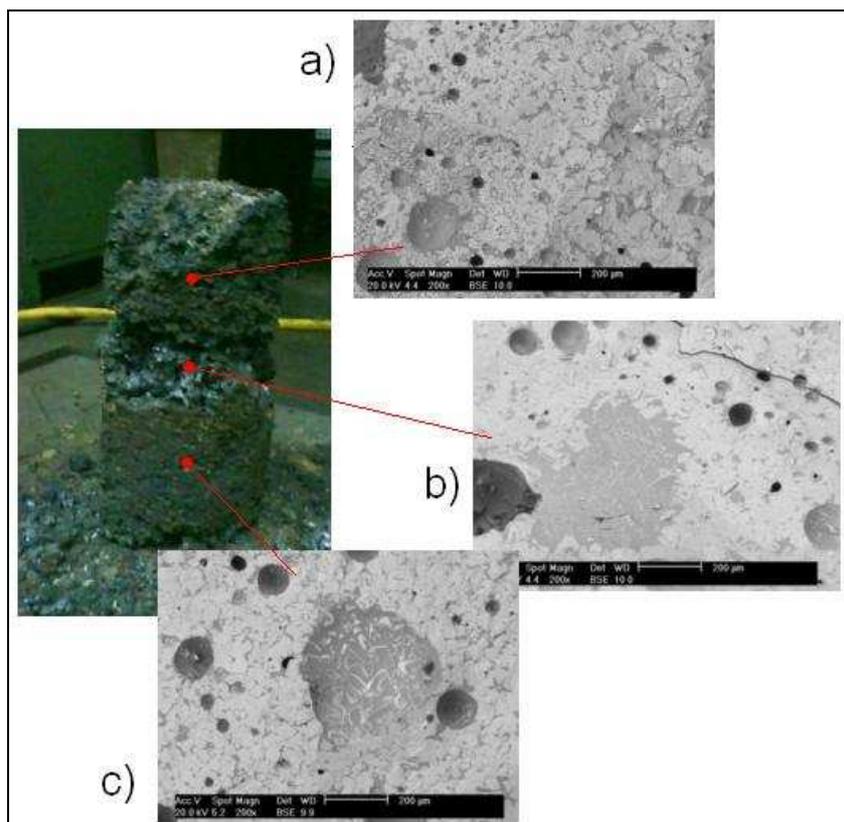


Figura 10: Gráfico da temperatura em função do tempo na sinterização.

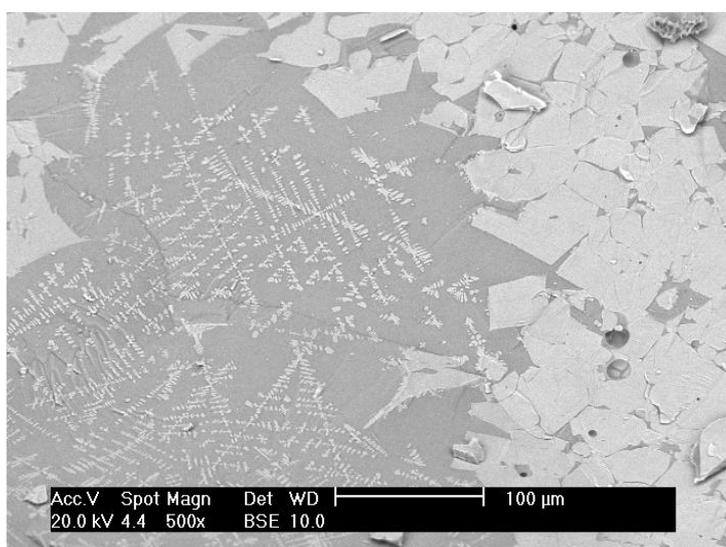
O aspecto do bolo de sinter formado indicou uma fusão parcial das partículas mais acentuada na camada intermediária, se comparada com a região superior e inferior. Isso pode ter sido consequência da maior reatividade do combustível, pois as micropelotas foram fabricadas com 30% de coque na sua composição. A maior reatividade do carbono também é favorecida pela granulometria do combustível. Quanto menor a granulometria do coque, maior a taxa de conversão dos óxidos.<sup>(13)</sup> Na Figura 11 é possível observar a microestrutura das três regiões do bolo de sinter. Nota-se que a região intermediária apresentou estrutura dendrítica. As regiões claras são compostas por fases ricas em Fe (ferro) e O (oxigênio), e as regiões escuras são fases ricas em Si (silício) e Ca (cálcio).



**Figura 11:** Microestruturas do sinter: a) região superior, b) região intermediária e c) região inferior (ampliações: 200 vezes).

O sinter formado na região intermediária do bolo aparentemente não apresentou fragilidade maior do que as regiões superior e inferior. Além disso, o PAE não possui quantidade elevada de substâncias indesejadas na sinterização de minério de ferro, tais como fósforo e enxofre.<sup>(14)</sup>

A região “b” apresentou estrutura dendrítica, além disso, nota-se que as fases mais claras (ferríticas) estão em maior predominância neste ponto do bolo de sinter. A Figura 12 mostra o detalhe da região dendrítica da camada intermediária do bolo com aumento de 500 vezes.



**Figura 12:** Dendritas formadas na camada intermediária do bolo de sinter (ampliação: 500 vezes).



## 4 CONCLUSÕES

A poeira de aciaria elétrica é um resíduo classificado como perigoso, e a sua disposição em aterros acarreta em custos. Os estudos de formação do PAE e sua caracterização são importantes, pois ajudam a diminuir a geração deste material. Este trabalho confirmou que micropelotas compostas por poeira de aciaria e coque podem ser produzidas sem a necessidade de aglomerante, já que estas obtiveram resistência suficiente para não quebrarem na etapa de mistura e carregamento antes da sinterização. A adição do pré-aglomerado na mistura a sinterizar aparentemente contribuiu com a coalescência das partículas de minério de ferro na região em que eles foram adicionados. Assim, o reaproveitamento do PAE através da micropelotização e como matéria prima na produção de sinter de minério de ferro pode ser uma alternativa interessante. Pois, além de diminuir o descarte do resíduo em aterros, o reaproveitamento da poeira de aciaria elétrica pode diminuir custos de produção, já que esta pode vir a substituir outra matéria prima mais onerosa.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e a USP.

## REFERÊNCIAS

- 1 Instituto Brasileiro de Siderurgia. **Relatório de sustentabilidade 2008**. Disponível em: <http://www.ibs.org.br/publicacoes.asp>, Acesso em: 20/01/2009.
- 2 MACHADO, J, G, M, S. **Estudo da caracterização e avaliação da influência do tempo na redução carbotérmica do pó de aciaria elétrica**. 2004. 94p. Dissertação (Mestrado). PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.
- 3 SILVA, M, C da; BERNARDES, A, M; BERGMANN, C, P; TENÓRIO, J, A, S; ESPINOSA, D, C, R. Characterisation of electric arc furnace dust generated during plain carbon steel production. **Ironmaking and Steelmaking**, 2008, v. 35.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- 5 HUBER, J, C; PATISSON, F; ROCABOIS, P; BIRAT, J, P; ABLITZER, D: **Rewas**, 1999, vol. 2, 1483–1492.
- 6 HAGNI, A; HAGNI, R; DEMARS, C: **Jom**, Abril. 1991, 43, 28–30.
- 7 VARGAS, A, S; MASUERO, A, B; VILELA, A, C, F: **Ambient. Constr.**, 2004, 4, (2), 7 - 18.
- 8 DOMINGUEZ, E; ULLMANN, R: **Appl. Clay Sci.**, 1996, 11, 237 - 24.
- 9 HECK, N, C; COSTA, M, I, Jr: **Proc. 53rd Cong. Anual ABM**, Belo Horizonte, Brasil, Setembro 1998, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1344 -1353.
- 10 MANTOVANI, M, C; TAKANO, C; BÜCHLER, P, M. EAF and secondary dust characterization. **Ironmaking and Steelmaking**. 2004, vol. 31, 325 – 332.
- 11 SOBRINHO, P, J, N; ESPINOSA, D, C, R; TENÓRIO, J, A, S. Characterisation of dusts and sludges generated during stainless steel production in Brazilian industries. **Ironmaking and Steelmaking**. 2003, vol. 30, 11 - 17.
- 12 DAWSON, P. R. Recent developments in iron ore sintering. Part 4. The sintering process. **Ironmaking and Steelmaking**. 1993, vol. 20, 150 -159.
- 13 LEE, J; LIN, C; CHEN, H. Carbothermal reduction of zinc ferrite. **Metallurgical and Materials Transactions B**. 2001, vol. 32B, 1033 -1040.
- 14 TAKANO, C. **Estudo da influência de alguns combustíveis na sinterização de minério hematítico**. 1970. 102p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica, USP, São Paulo.