

# O USO DA TERMODINÂMICA COMPUTACIONAL PARA A SIMULAÇÃO DA RECICLAGEM DE PÓ DE ACIARIA EM FORNO WAEZ<sup>1</sup>

Flavio Beneduce Neto<sup>2</sup>  
Joao Batista Ferreira Neto<sup>3</sup>

## Resumo

Há uma crescente necessidade do controle dos rejeitos provindos dos processos metalúrgicos. Nos fornos elétricos a arco (FEA), além da escória, um dos mais importantes rejeitos é o pó coletado nos filtros. Como ele não pode ser colocado em aterros pela sua, normalmente, alta concentração de metais pesados, esta poeira pode ser realimentada no próprio forno mas este procedimento pode causar distúrbios na sua marcha ou, ainda, processado externamente para ser utilizado em outra aplicação. Tal processamento pode ser hidrometalúrgico ou pirometalúrgico dependendo do material que se deseja produzir. A tecnologia predominante para o processamento pirometalúrgico é a recuperação de zinco em fornos Waelz, embora existam outras tecnologias disponíveis. Neste caso, há dois produtos: um óxido de zinco contendo chumbo e cádmio e uma escória inerte, usualmente com alto teor de ferro, que pode ser reutilizada num FEA ou ser depositada em aterros. O uso da termodinâmica computacional para o modelamento de processos tem sido cada vez mais frequente já que ela pode realizar previsões qualitativas e quantitativas do comportamento do processo o que possibilita a sua otimização. Os dois programas comerciais mais utilizados são o FactSage® e o Thermocalc®. O objetivo do presente trabalho é o de realizar uma simulação das condições operacionais de um forno Waelz utilizando a termodinâmica computacional. Os resultados mostraram claramente a aplicabilidade desta ferramenta. Variáveis tais como temperatura de processamento, composição da escória e grau de oxidação da atmosfera foram estudados e criticamente discutidos.

**Palavras-chave:** Waelz; Pó de aciaria; Termodinâmica computacional; Factsage.

## THE USE OF COMPUTATIONAL THERMODYNAMICS FOR SIMULATING THE RECYCLING OF ELECTRIC ARC FURNACE DUST IN WAEZ FURNACE

### Abstract

There is an increasing need to control the waste from metallurgical processes. In electric arc furnace, besides the slag, a waste of the most important is the dust collected on filters. Since it cannot be disposed of in landfills because of their high concentration of heavy metals, this powder can be fed back into the furnace, causing disturbances in their march, or processed externally to be reused in another application. Such processing may be hydrometallurgical or pyrometallurgical depending on the material you want to produce. The predominant pyrometallurgical processing technology is zinc recovery in Waelz furnaces, although there are other technologies available. In this case two products are marketed: a zinc oxide containing lead and cadmium and an inert slag, usually with high iron content, which can be reused in FEA or be disposed in landfills. The use of computational thermodynamics in the modeling of processes has been increasingly frequent, as it can make predictions of qualitative and quantitative behavior that enable their optimization. The commercial programs are the most used are FactSage® and Thermocalc®. The objective of this work is to carry out a simulation of the operating conditions of a Waelz furnace using computational thermodynamics. The results clearly showed the applicability of this tool. Variables such as operating temperature, slag chemical composition and degree of oxidation of the atmosphere were studied and critically discussed.

**Key words:** Waelz; Steelmaking dusts; Computational thermodynamics; Factsage.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Eng. Metalúrgico, Dr., Prof. Adjunto do Depto. de Eng<sup>a</sup> de Materiais, UNIFEI, Diretor Técnico da Açotécnica, Brasil.

<sup>3</sup> Eng. Metalúrgico, Dr., Chefe do Laboratório de Metalurgia e Materiais Cerâmicos, IPT, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Há uma crescente necessidade do controle dos rejeitos provindos dos processos metalúrgicos. Nos fornos elétricos a arco (FEA), além da escória, um dos mais importantes rejeitos é o pó coletado nos filtros. Como ele não pode ser colocado em aterros pela sua, normalmente, alta concentração de metais pesados, esta poeira pode ser realimentada no próprio forno mas este procedimento pode causar distúrbios na sua marcha ou, ainda, processado externamente para ser utilizado em outra aplicação. Tal processamento pode ser hidrometalúrgico ou pirometalúrgico dependendo do material que se deseja produzir.

A tecnologia predominante para o processamento pirometalúrgico<sup>(1-7)</sup> é a recuperação de zinco em fornos Waelz, embora existam outras tecnologias disponíveis. Neste caso, há dois produtos: um óxido de zinco contendo chumbo e cádmio e uma escória inerte, usualmente com alto teor de ferro, que pode ser reutilizada num FEA ou ser depositada em aterros.

O forno Waelz nada mais é do que um forno rotativo em que os fumos são coletados, oxidados e resfriados. Os fumos oxidados tais como o CO<sub>2</sub> e o N<sub>2</sub> são normalmente eliminados e os metais voláteis oxidados, tais como Zn, Pb e Cd, são resfriados e então coletados em um sistema de filtragem. A carga consiste de poeira de aciaria, um redutor carbonoso e, eventualmente, fluxantes. As temperaturas de operação estão entre 900°C e 1.400°C (normalmente 1.200°C)

O uso da termodinâmica computacional para o modelamento de processos tem sido cada vez mais frequente já que ela pode realizar previsões qualitativas e quantitativas do comportamento do processo o que possibilita a sua otimização.<sup>(8,9)</sup>

Os dois programas comerciais mais utilizados são o FactSage® e o Thermocalc®.

O objetivo do presente trabalho é o de realizar uma simulação das condições operacionais de um forno Waelz utilizando a termodinâmica computacional.

## 2 DADOS PARA A SIMULAÇÃO

A simulação foi conduzida numa base de 100 g em um programa comercial de termodinâmica computacional, o FactSage® utilizando uma base de dados de óxidos e compostos do mesmo programa. Esta base de dados usa o modelo quase-químico modificado. Foi utilizada também uma base de dados para soluções metálicas líquidas que utiliza o modelo do líquido associado.

A composição química do pó de aciaria é extremamente dependente da carga usada. No Brasil estes materiais tendem a ser mais empobrecidos em Zn já que as sucatas brasileiras têm uma menor quantidade de materiais revestidos. Uma composição típica destas poeiras está apresentada na Tabela 1. Na mesma tabela é mostrada a composição química utilizada para realizar as simulações (base de cálculo - BC) que é nada mais que a média das composições apresentadas na tabela.

**Tabela 1.** Composição química dos pós de aciaria brasileiros publicados na literatura<sup>(10)</sup>

Composto	Amostra			
	P1	P2	P3	BC
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55,9	48,6	73,2	59,25
SiO <sub>2</sub>	2,7	0,1	1,5	1,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,1	0,1	0,08
CaO	1,6	1,0	2,2	1,61
MgO	1,3	1,2	0,9	1,12
MnO	3,5	2,7	4,8	3,69
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6	0,5	0,5	0,55
ZnO	27,4	38,5	14,2	26,68
PbO	3,6	3,1	1,1	2,61
Na <sub>2</sub> O	1,3	1,5	0,6	1,13
K <sub>2</sub> O	1,9	2,7	0,9	1,85

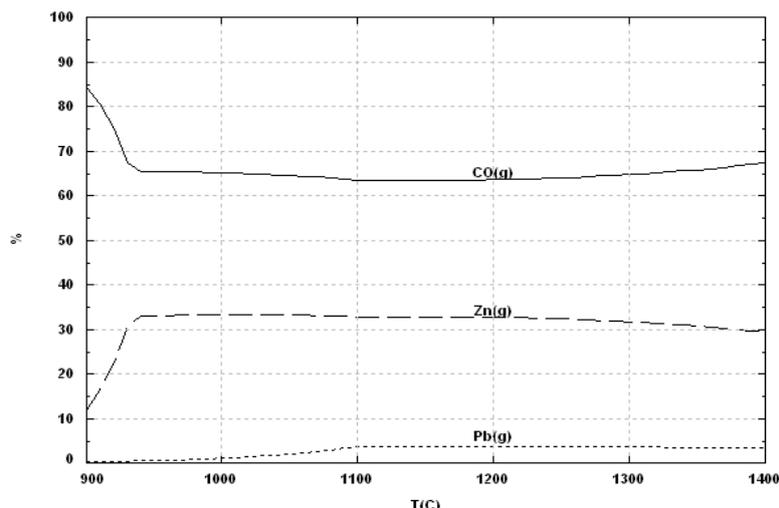
A carga de um forno Waelz consiste normalmente de 20% de sílica, 30% de coque e o resto de poeira de aciaria.<sup>(11)</sup> Considerando a sílica como pura e o coque com 99,5% de carbono fixo (coque de petróleo), a composição química da carga seria:

**Tabela 2.** Composição química da carga considerada no presente trabalho

Composto	Carga(%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,6
SiO <sub>2</sub>	20,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0
CaO	0,8
MgO	0,6
MnO	1,8
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3
ZnO	13,3
PbO	1,3
Na <sub>2</sub> O	0,6
K <sub>2</sub> O	0,9
C	30,0

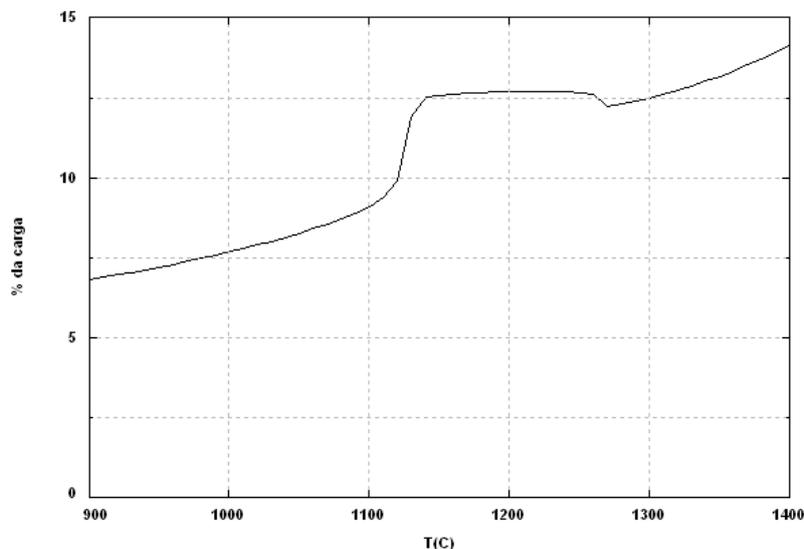
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO DA SIMULAÇÃO

A Figura 1 mostra a variação da composição química do gás com a temperatura do forno.



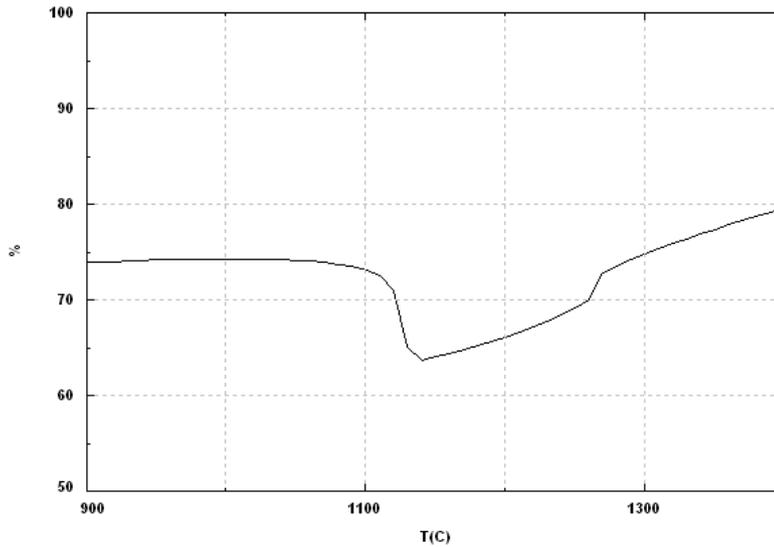
**Figura 1.** Variação da composição química da fase gasosa com a temperatura do processo.

Pode ser visto na Figura 1 que o intervalo de temperatura com um melhor aproveitamento do gás, isto é, com uma maior quantidade de Zn, está entre 1.000°C e 1.300°C. Nesta faixa, o teor de ZnO equivalente do gás é de cerca de 88% (o resto é PbO). Existe um pico a 1.000°C, onde o teor de ZnO seria de cerca de 95,4%. Na Figura 2 é apresentada a quantidade de fase não metálica líquida para o processamento da mistura de pó de aciaria considerado.



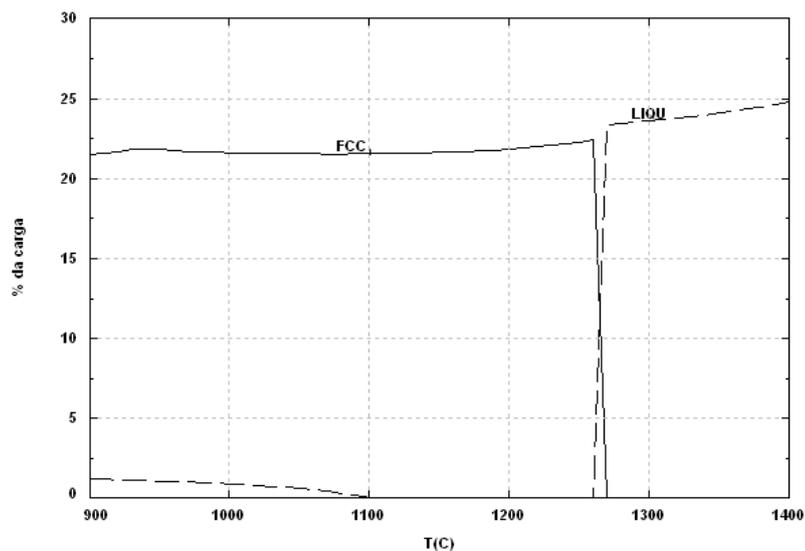
**Figura 2.** Variação com a temperatura da quantidade de fase não metálica líquida.

A Figura 2 mostra que a quantidade de fase líquida não metálica líquida cresce, obviamente, com o aumento da temperatura de processo. Considerando que esta quantidade é diretamente relacionada com a formação de anéis no forno que são prejudiciais à sua marcha, a faixa de temperatura entre 900°C e 1.100°C seria a ideal para o processamento deste material. Por outro lado, como mostrado na Figura 3, o teor de SiO<sub>2</sub> desta fase é muito alto, sugerindo uma alta viscosidade e, conseqüentemente, uma grande possibilidade da formação de anéis em qualquer temperatura. Conseqüentemente, a adição de fluxantes ou a diminuição da carga de SiO<sub>2</sub> deve ser imperativa na minimização dos anéis.



**Figura 3.** Teor de SiO<sub>2</sub> da fase não metálica líquida em função da temperatura.

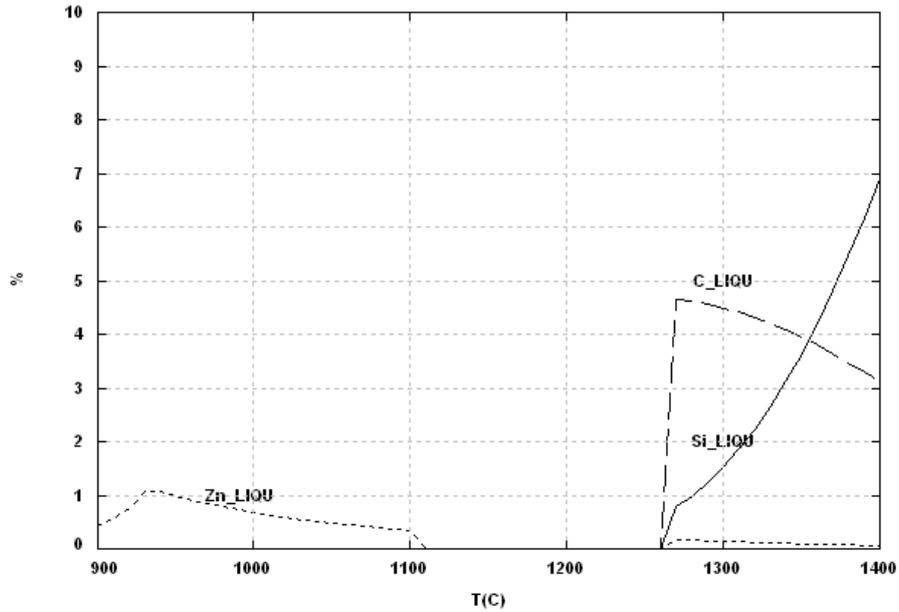
A Figura 4 mostra a quantidade de fase metálica (sólida ou líquida) presente no processamento da mistura considerada.



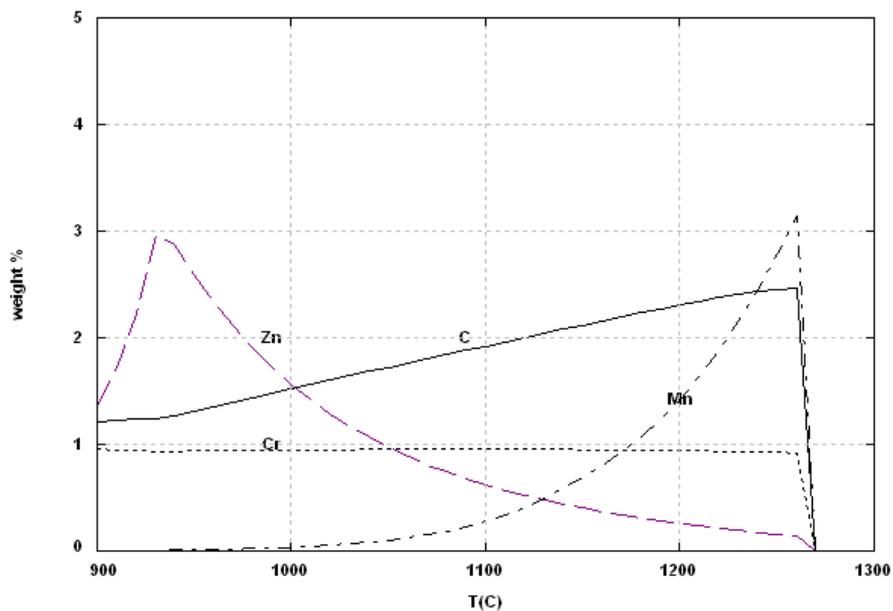
**Figura 4.** Quantidade de fase metálica em função da temperatura de processamento.

A fase metálica líquida que é estável a baixa temperatura, até cerca de 1.200°C aproximadamente, é rica em Pb. Acima desta temperatura, o metal líquido torna-se rico em Fe, dissolvendo quantidades apreciáveis de C e Si como pode ser observado na Figura 5. Nesta mesma figura pode-se observar que o teor de Zn desta fase é maior em temperaturas mais baixas com um vale a 1.200°C.

A composição química da fase metálica sólida está apresentada na Figura 6. Nela pode-se observar que tal fase é mais rica em Zn a baixas temperaturas. Vale mencionar, entretanto, que deve ser considerada a não existência dessa fase metálica sólida pela possível baixa velocidade de formação da mesma, totalmente dependente de processos difusivos.



**Figura 5.** Composição química da fase metálica líquida em função da temperatura.



**Figura 6.** Composição química da fase metálica sólida em função da temperatura.

É importante mencionar que dependendo do potencial de oxidação do sistema, a fase metálica pode ser oxidada antes de deixar o reator ou simplesmente permanecer no estado metálico. O potencial de oxigênio do sistema pode ser determinado pela presença ou ausência de carbono livre. A Figura 7 mostra a quantidade de carbono livre do sistema.

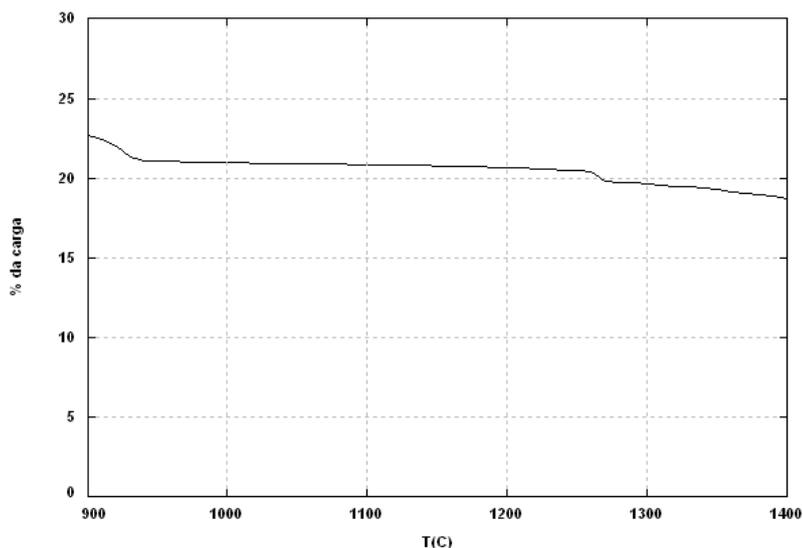


Figura 7. Quantidade de carbono livre no sistema em função da temperatura do processo.

A Figura 7 indica que a proporção de 30% de material carbonoso impõe desnecessariamente um excesso de C no sistema. Pode ser inferido da mesma figura que no máximo 30% do carbono inicial reage com a carga, ou seja, uma quantidade muito menor de redutor poderia ser adicionado sem afetar o comportamento do processo e garantido um baixo potencial de oxigênio.

#### 4 COMENTÁRIOS FINAIS

A simulação por termodinâmica computacional do processamento de pó de aciaria em forno Waelz mostrou ser uma ferramenta importante na previsão do comportamento do processo e do planejamento da carga tendo como consequência mais importante, a maximização dos produtos do processamento.

Para o pó de aciaria e a carga considerados pode-se concluir que:

- A melhor faixa de temperatura de processo fica entre 1.100°C e 1.200°C, considerando o teor de Zn da fase gasosa (maximizada) e da fase metálica (minimizada) e a quantidade de fase não metálica líquida;
- É necessária a adição de fluxantes na carga para diminuir a viscosidade da fase não metálica líquida que tem alto teor de SiO<sub>2</sub>;
- É possível diminuir substancialmente a quantidade de redutor da carga mantendo as mesmas características de potencial de oxigênio.

#### REFERÊNCIAS

- 1 WRONA, L.M. Pollution Prevention in the Steel Industry-Toward a Zero Waste Plant. **Iron and Steel Engineer**, v.74, n.7, 1997. p.9-63.
- 2 STROHMEIER, G.; BONESTELL, J.E. Steelworks Residues and the Waelz Kiln Treatment of Electric Arc Furnace Dust. **Iron and Steel Engineer**, v.73, n.4, 1996. p.87-90.
- 3 MCMANUS, C.J. Integrated Steel Producers Race the Recycling Clock. **Iron and Steel Engineer**, v.73, n.1, 1996. p.50-52.
- 4 TSUNEYAMA, N.TAKEWAKI, M.;YASUKAWA, M. Production of Zinc Oxide for Zinc Smelting Process from EAF Dust at Shisaka Works. In: WORLD SYMPOSIUM ON

- METALLURGY AND ENVIRONMENTAL CONTROL, Anaheim, 1990. LEAD-ZINC'90. TMS, Warrendale, p.465-476.
- 5 KOLA, R. Processing of Steelworks Wastes. In: World SYMPOSIUM ON METALLURGY AND ENVIRONMENTAL CONTROL, Anaheim, 1990. LEADZINC' 90. TMS, Warrendale, p.453-464.
  - 6 MACZEK, H.; KOLA, R. Recovery of Zinc and Lead From Electric-Furnace Steelmaking Dust at Berzelius. **Journal of Metals**, v.32, n.1, 1980. p.53-58.
  - 7 JAMES, S.E. Recycling Lead Cadmium, as well as Zinc, From EAF Dust. In: WORLD SYMPOSIUM ON METALLURGY AND ENVIRONMENTAL CONTROL, Anaheim, EUA, 1990. LEAD-ZINC'90.. TMS, Warrendale, p.477-495.
  - 8 NOGUEIRA, P.F. In: Blast Furnace Mixed Burden Softening and Melting Phenomena, PhD Thesis, Carnegie Mellon, 2003
  - 9 TOSETTI, J.P.V. ; BENEDUCE, F.N. ; FERREIRA NETO, J.B.; TAKANO, C. ; SILVA, A. L.V.C. . Computational Study of the Use of Steelmaking Slags. In: FOURTH JAPAN-BRAZIL SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING-ENERGY-ENVIRONMENT IN METALLURGICAL INDUSTRIES, 2002, SÃO PAULO. p. 189-203.
  - 10 MANTOVANI, M. C. ; TAKANO, C. ; BUCHLER, P. M. . EAF and secondary dust characterisation. **Ironmaking and Steelmaking**, London, v. 31, n. 4, p. 325-332, 2004.
  - 11 CHI, K.H., CHANG, S.H., CHANG, M.B. Characteristics of PCDD/F Distributions in Vapor and Solid Phases and Emissions from the Waelz Process. **Environmental Science & Technology**, v. 40, n. 6, p. 1770-1775, 2006