

MODELO TERMODINÂMICO PARA O FORNO WAE LZ*

Bruno Henrique Reis¹
Nestor Cezar Heck²

Resumo

O pó de aciaria elétrica (PAE) é um importante subproduto da indústria siderúrgica devido ao seu alto teor de Zn. Assim, tecnologias vêm sendo desenvolvidas visando seu aproveitamento, sendo o forno Waelz a mais difundida delas atualmente. Sua operação, por contar com um forno rotativo de grandes dimensões, que abriga uma infinidade de fenômenos físico-químicos, apresenta difícil previsibilidade *ab initio*. Por essa razão, este trabalho faz uso de uma ferramenta avançada da termodinâmica computacional, destinada à modelagem de processos, chamada SimuSage, a fim de modelar o seu comportamento. Para a criação do modelo utilizou-se também uma base de dados termodinâmicos advinda do *software* FactSage e a plataforma Lazarus. Com base em dados e resultados operacionais da literatura, foi possível realizar simulações no modo adiabático e comparar os resultados com os da prática industrial. Constatou-se uma grande sensibilidade do modelo com relação à quantidade de ar de entrada considerada no sistema, mas, também, boa aproximação dos resultados com relação à composição química dos produtos Óxido Waelz e Escória Waelz.

Palavras-chave: Pó de aciaria elétrica; Forno Waelz; SimuSage.

THERMODYNAMIC MODEL FOR THE WAE LZ KILN

Abstract

The electric arc furnace dust (EAFD) is a by-product of the steel industry due to its high content of Zn. Thus, technologies have been developed aiming for its use, and the Waelz Kiln is the most widespread of them today. However, counting on a very large rotary kiln that houses an infinity of physico-chemical phenomena, its operation is difficult to predict *ab initio*. For this reason, this work uses an advanced tool of computational thermodynamics, designed to process modelling, called SimuSage in order to model its behavior. To create the model, a thermodynamic database coming from the FactSage software and the Lazarus platform were also used. Based on operational data and results from de literature, it was possible to perform simulations on adiabatic mode and compare its results with the industrial practice. A high sensibility of the model was found related to the amount of input air considered in the system, but also good approximation of results regarding the chemical composition of products, Waelz Oxide and Waelz Slag.

Keywords: Electric arc furnace dust; Waelz Kiln; SimuSage.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Estudante de Mestrado em Engenharia Metalúrgica, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, Dr. -Ing., Núcleo de Termodinâmica Computacional, NTCm, professor do DEMET e PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

1.1 O Forno Waelz

Com o crescimento da produção de aços galvanizados, aciarias elétricas passaram a utilizar na carga sucatas mais ricas em zinco. Por consequência, esse elemento de baixo ponto de fusão passou a fazer parte da composição normal do pó de aciaria elétrica (PAE) a partir de fatores como: vaporização seguida de condensação em partículas ejetadas; oxidação na presença de CO₂; e ejeção de partículas do espinélio ZnFe₂O₄ ou (Mn,Zn)Fe₂O₄-Fe₃O₄ a partir da escória [1,2]. Por causa disso, o PAE tornou-se um importante subproduto rico em zinco, e, por essa razão, diversos processos já foram desenvolvidos a fim de reciclá-lo. Dentre eles, o mais bem sucedido, e amplamente utilizado até o momento, é o forno Waelz.

O processo Waelz recebeu a nota de Melhor Tecnologia Disponível (BAT) no Documento de Referência para as Melhores Técnicas Disponíveis (BREFs) da comunidade europeia [3,4]. Em 2009, da quantidade total de PAE reciclada no mundo, de 2.558 kton, 2.046 kton o foram através do forno Waelz – ou seja, cerca de 80% deste resíduo [4]. Hoje há, no Brasil, uma única planta, em Juiz de Fora, RJ, operada pela Votorantim. Além do PAE, essa planta se destina a reciclar o zinco a partir de outros resíduos da indústria metalúrgica e da sucata de obsolescência [5].

O forno deste processo é do tipo rotativo, com comprimentos relatados de 38,5 a 75 m e diâmetros de 2,5 a 4,5 m, possuindo uma leve inclinação a fim de garantir o fluxo da carga à medida que mantém uma rotação constante, entre 0,5 e 1,6 rpm [6-9]. Para compor a carga, o PAE é pelotizado com um agente carbonífero redutor, geralmente coque, e um agente escorificante, cal ou sílica [3,4,6,10]. A opção pela cal determina o modo de operação do forno como *básico*; neste caso, a relação PAE/COQUE/CAL é de aproximadamente 85%/6%/9% em massa. Já no modo *ácido*, tem-se uma relação de PAE/COQUE/SÍLICA de aproximadamente 50%/30%/20% em massa [10]. Oxigênio (ar atmosférico) é injetado em contracorrente para contribuir com a volatilização e oxidação do zinco e do chumbo. Como o reator é autógeno, é suficiente uma proporção COQUE/O₂ subestequiométrica, ou seja, $\lambda < 1$ [6]. Assim, os produtos do forno são: o Óxido Waelz (OW), material particulado, rico em zinco, carregado pelos gases efluentes no lado de admissão da carga sólida e, também, a Escória Waelz (EW), rica em ferro, que sai pelo lado oposto, mais baixo, conforme a Figura 1.

Mombeli *et al.* [3] dividem o forno Waelz em 3 zonas distintas: a primeira localiza-se na extremidade de saída dos gases, onde as temperaturas atingem 600°C e remoção da umidade é iniciada. A segunda, uma zona central, com temperaturas perto de 1100°C, é responsável por volatilizar cloretos e decompor óxidos de ferro e zinco. E a última, na extremidade de admissão de ar, atinge 1300°C e nela são reduzidos fortemente os óxidos de zinco e ferro. Nesta descrição, os autores citados explicam que a extração dos vapores de zinco é feita por um exaustor e que a sua oxidação ocorre subsequentemente, quando eles entram em contato com o oxigênio atmosférico.

Matthes *et al.* [11], no entanto, relatam que a temperatura máxima dos sólidos atinge 1250°C e a redução da zincita, ZnO, já começa a 800°C, através da Reação 1.

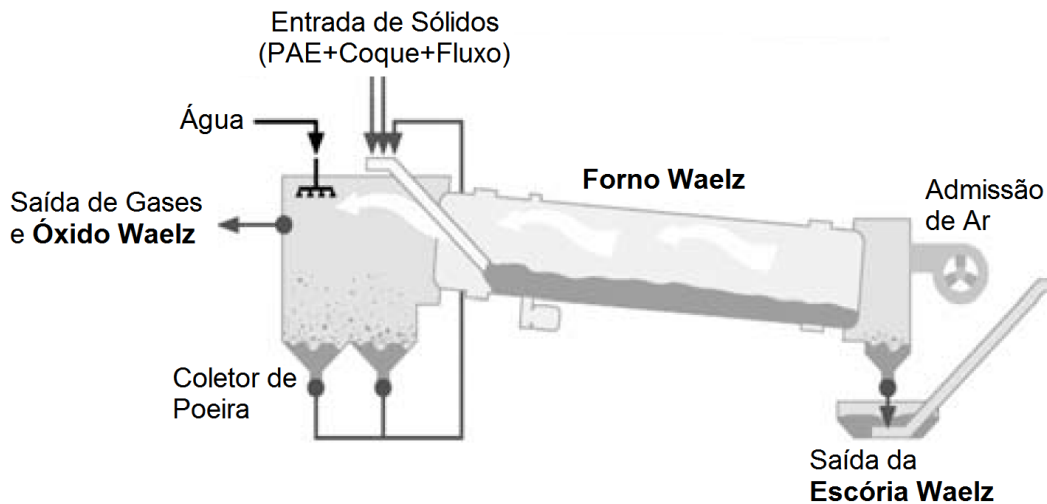
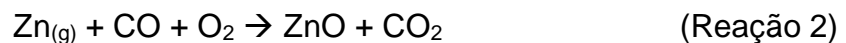


Figura 1. Diagrama simplificado do forno Waelz (adaptado de Mager *et al.*, 2003 [6]).



Após, o zinco volatilizado é reoxidado (ainda dentro do forno) na zona gasosa, conforme a Reação 2 [11].



Na sequência, o óxido é transportado como poeira sólida com o fluxo de ar em contracorrente até um coletor de poeira.

Suetens *et al.* [4] ainda narram temperaturas de 1200°C durante a redução e de 850°C na reoxidação, também dentro do forno. De maneira geral, as temperaturas relatadas pelas diferentes fontes estão próximas àquelas encontradas em resultados operacionais de uma planta industrial do forno Waelz [7].

A afirmação de que a reoxidação dos vapores de zinco ocorre ainda dentro do forno tem maior relevância quando o sistema Zn-O-C é avaliado termodinamicamente. Rosenqvist estudou a estabilidade do ZnO como função do logaritmo de $p_{\text{CO}_2}/p_{\text{CO}}$ e do inverso da temperatura, Figura 2. Nesta Figura, a reação de Boudouard é representada pelas linhas sólidas ascendentes e, a Reação 3, pelas descendentes [12].



A partir da Figura 2 é possível notar que à medida que a temperatura é reduzida, a estabilidade do ZnO aumenta, independente da pressão parcial de zinco e ou da razão $p_{\text{CO}}/p_{\text{CO}_2}$. Como há grande redução de temperatura dentro do forno Waelz, há grande probabilidade de que a fase ZnO seja a fase mais estável daquelas contendo o metal zinco.

1.2 Simulação Termodinâmica

A 'termodinâmica computacional' é capaz de determinar o estado de equilíbrio em um sistema complexo (multicomponente e multifásico) para dadas pressão, temperatura e composição. Diversos pacotes de software e de bancos de dados comerciais estão disponíveis hoje em dia para executar esses cálculos: FactSage,

Thermodata, Thermocalc, HSC Chemistry, etc. No entanto, nem sempre um cálculo de equilíbrio pontual é capaz de efetuar a simulação de um processo inteiro, o que limita a aplicabilidade deste método. Para o modelamento de um processo, portanto, há outras ferramentas mais apropriadas.

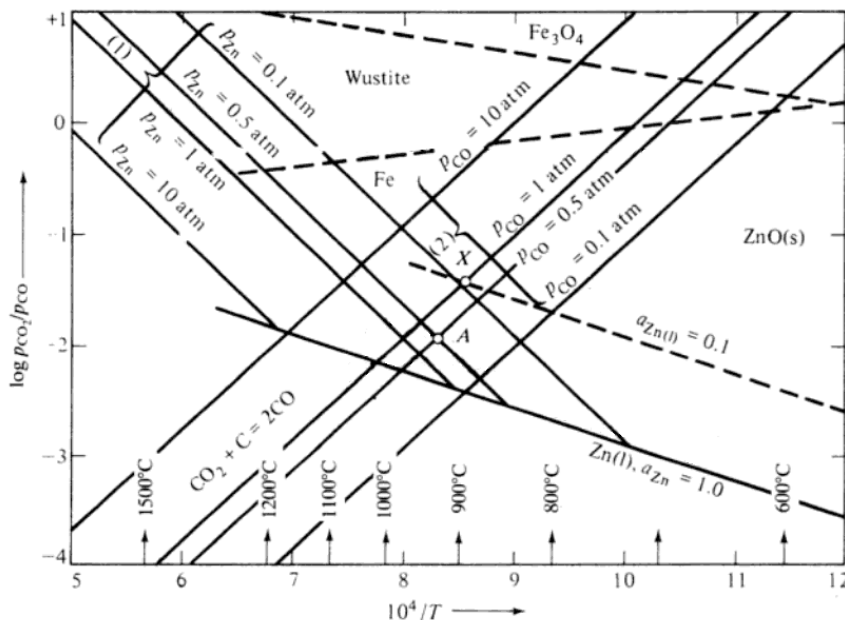


Figura 2. CO e CO₂ em equilíbrio na redução de ZnO(s) para Zn(l) ($a_{Zn(l)} = 1,0$ e $0,1$), assim como para Zn(g) ($p_{Zn} = 0,1; 0,5; 1,0; \text{ e } 10\text{atm}$); (Rosenqvist, 2004 [12])

Uma delas é o SimuSage© – na verdade, uma biblioteca de componentes. O sistema se baseia na tecnologia de programação orientada ao objeto, através da linguagem Object Pascal. Ele permite que o desenvolvedor conecte um fluxo de materiais, em um fluxograma interativo, a uma rede de operações unitárias capazes de realizar cálculos de equilíbrio complexos encadeados. A Tabela 1 apresenta uma descrição dos componentes disponíveis no pacote SimuSage.

Alguns modelos termodinâmicos já foram desenvolvidos para o forno Waelz, ou para outros fornos com fluxo em contracorrente. Alguns utilizaram apenas o FactSage como, por exemplo, o de Suetens *et. al.* [4], quando investigaram a exergia envolvida no processo. Já o KilnSimu© é um grande projeto desenvolvido para a modelagem de fornos rotativos que considera inclusive a cinética em conjunto com a termodinâmica computacional voltada a processos [13]. O pacote SimuSage também inclui exemplos de reatores em contracorrente, como possíveis modelos a serem seguidos.

Neste nível é que se encontra o objetivo deste trabalho, que é o de gerar um modelo termodinâmico computacional para o forno Waelz através da ferramenta SimuSage, que seja capaz de reproduzir os resultados deste reator encontrados na literatura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Modelo do Forno Waelz

O modelo foi desenvolvido com o auxílio dos softwares comerciais FactSage 6.4, SimuSage V1.12.7 e Lazarus IDE v1.2.6. O FactSage serviu como fonte para os dados termodinâmicos, enquanto o pacote SimuSage permitiu que as operações

unitárias do forno Waelz fossem incorporadas ao modelo. Como linguagem de programação, foi empregada Object Pascal, através do ambiente Lazarus.

Tabela 1. Componentes disponíveis na biblioteca SimuSage

Componente	Breve descrição
TPbInputStream	Material de entrada em um fluxograma; a coexistência de diversas fases é possível.
TPbCoalInputStream	Combustível de entrada em um fluxograma.
TPbStream	Transfere materiais de uma operação unitária à outra.
TPbCoalStream	Transfere combustíveis de uma operação unitária à outra.
TPbGttBalance	Operação unitária de um reator padrão para o cálculo de equilíbrio; suporta mais de um material de entrada.
TPbHeatExch	Operação unitária para aquecer ou resfriar um material.
TPbMixer	Operação unitária de um misturador não-isotérmico.
TPbIsoMixer	Operação unitária de um misturador isotérmico.
TPbPhaseSplitter	Operação unitária de um divisor de material em suas fases.
TPbSplitter2	Operação unitária de um divisor de material em quantidades.
TPbRecycleIteator	Permite fluxogramas com ciclos iterativos internos entre operações unitárias, para a reciclagem de materiais.
TPbInStreamIteator	Permite processos iterativos com satisfação de critérios.
TPbOutputUnit	Unidade que forma o fim lógico de um fluxograma (cada fluxograma deve ter uma destas).
TPbInspector	Realiza testes para garantir que todos os componentes estejam devidamente configurados.
TPbRun	Botão que serve para executar o processo modelado.
TPbLogger	Caixa texto que apresenta informações sobre os cálculos durante a simulação.
TPbFloatEdit	Caixa texto para armazenagem e/ou edição de número decimal, que pode ser usado como variável.
TPbFloatGrid	Grade de células para armazenagem e/ou edição de números decimais, que podem ser usados como variáveis.

FactPS e FToxid foram os bancos de dados utilizados para a seleção de fases no FactSage [14]. Além das fases puras estequiométricas, a solução líquida de óxidos, FToxid-SLAGA, também foi exportada para uso no SimuSage. No caso de duplicidade de fases, se deu preferência para aquelas provindas do banco FToxid.

A Figura 3 apresenta um fluxograma onde se verifica o fluxo de materiais entre as zonas do forno. Cada zona é composta por dois componentes do tipo PbGttBalance, “Reator” e “Oxi”. “Reator” é responsável por garantir que a temperatura da zona seja atingida (através do modo adiabático ou isotérmico). E “Oxi” refere-se à etapa de oxidação que a fase gasosa sofre, gerando “ZnO”, o óxido Waelz, do tipo PbStream. Na oxidação, a temperatura assumida é igual à da zona a sua esquerda, T_{x-1} , já que é a temperatura referente à zona seguinte, por onde passam os coprodutos “Outros”, também é PbStream, que inclui gases e sólidos precipitados. Os componentes chamados “Divisor” são do tipo PbSplitter. Após o cálculo do reator, o divisor separa os produtos em “Gás” e “Cond.” (fases condensadas), ambos PbStream. Um divisor também é empregado após a oxidação, segregando “ZnO” e “Outros”. “ZnO” é removido do sistema assim que é formado, indo para a “Saída”, do tipo PbOutputUnit, enquanto “Outros” segue para o reator à esquerda, “Reator_(x-1)”. A fim

de simular o deslocamento das fases condensadas para a direita, “Cond.” da zona “(x)” é remetido para o reator da zona “(x+1)”. Dessa maneira, o fluxo em contracorrente entre fases gasosas e condensadas é estabelecido, com gases fluindo para a esquerda e condensados para a direita. No total, 5 zonas foram consideradas.

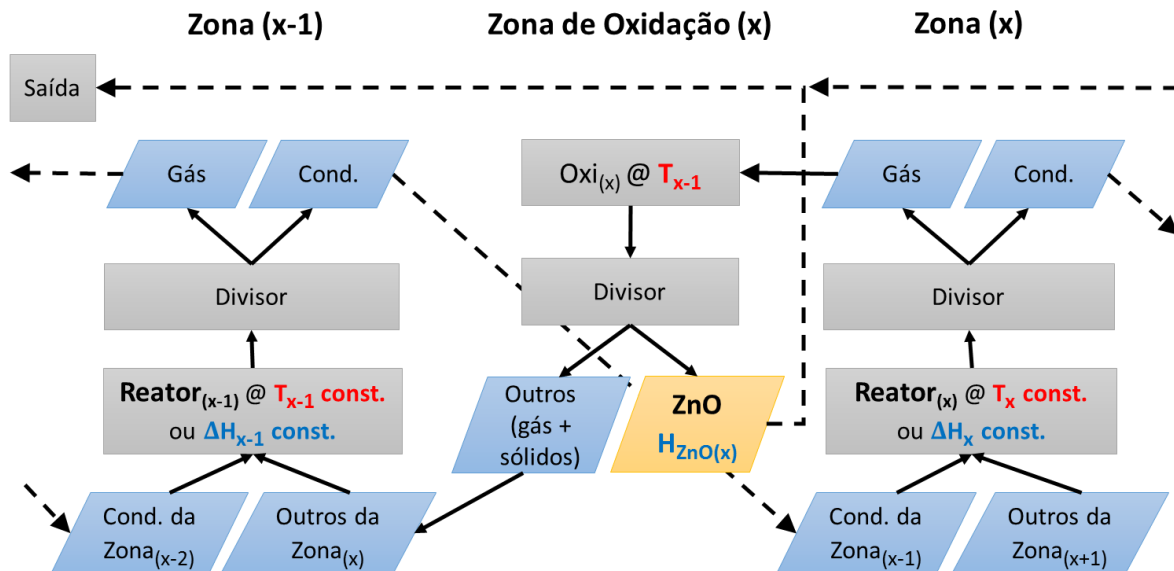


Figura 3. Fluxograma com a representação do fluxo de materiais entre as zonas do forno no modelo

Além dos componentes ilustrados na Figura 3, o modelo conta também com 4 componentes do tipo PblnStream, “PAE”, “Coque”, “CaO/SiO₂” e “Ar”. Esses materiais podem ter sua composição e quantidade ajustadas pelo usuário. Para o PAE, a composição é *elementar* e permite ajuste nos teores de C, Ca, Fe, Mg, Mn, O₂, Si e Zn. Para o restante da carga, a composição é *mineralógica* em termos de Al₂O₃, C, CaO, CO₂, Fe₂O₃, SiO₂, MgO, mas também inclui gases: H₂, H₂O, N₂ e O₂. PAE, coque e cal são alimentados na primeira zona à esquerda, fluindo para a direita. Já o ar tem entrada na última zona à direita, fluindo para a esquerda.

O modelo conta ainda com um componente do tipo PblnStreamIterator para o controle das iterações. A cada iteração, “Outros” é deslocado para a zona à esquerda, “ZnO” para a saída e “Cond.” para a zona à direita. Assim, o papel desse componente é o de garantir que o número de iterações seja maior do que *quatro*, para que a carga alimentada na zona 1 atinja, no mínimo, a zona 5; e, também, verificar se entre iterações há variação de massa na saída de gases, ZnO ou condensados. Enquanto houver variação de massa (em um certo nível), o programa executa um nova iteração. Quando essa variação ‘cessa’, o regime é considerado estacionário e a simulação chega ao final.

Para realizar os cálculos nos reatores, o modelo dispõe das opções *isotérmica* e *adiabática*. No modo isotérmico, temperaturas devem ser especificadas para cada zona do forno; elas são mantidas constantes, independentemente do calor produzido ou absorvido pelas reações até o final do cálculo. Quando a opção é adiabática, os reatores buscam as temperaturas que garantam a variação de entalpia, ΔH , desejada. Para que não haja perda ou ganho na energia total do sistema, ΔH deve ser igual a zero. Contudo, como ZnO é removido do sistema assim que é formado, levando consigo uma parcela de entalpia, isso contribui para que altas temperaturas se estabeleçam no processo. Portanto, ao invés de $\Delta H = 0$, no modo adiabático os

reatores devem buscar temperaturas para as quais a equação $\Delta H = -H_{ZnO}$ seja satisfeita.

Além dos ajustes de composição, temperatura e modo de cálculo, o modelo permite ainda definir parâmetros como: basicidade do sistema; fator lambda (λ) (determinante da proporção ar/carbono), temperatura de entrada do ar, precisão para o balanço de massa, número máximo de iterações, e tempo máximo de simulação.

2.2 Simulações

A Tabela 2 apresenta os materiais e as condições consideradas tanto na planta referência quanto nas simulações. O modo de cálculo foi o adiabático, com precisão de 1 kg para o balanço de massa, e a temperatura de entrada do ar ficou estabelecida em 500°C, enquanto que o restante da carga é alimentada a 25°C, para todos os casos.

Tabela 2. Carga utilizada na planta referência e nas simulações

Referência [15]		Simulações	
PAE	% massa	PAE	% massa
Zn	18,2	Si	2,150
Pb	2,5	Ca	5,003
Fe	30,5	Mg	1,206
SiO ₂	4,6	Al	0,265
CaO	7	O	5,976
MgO	2	Zn	18,2
Cd	0,035	Fe	30,5
Al ₂ O ₃	1	Ctot	2,1
Ctot	2,1	Massa de PAE	6900 kg
Stot	0,45	Massa de Sílica	1400 kg
Cl	4,5	Massa de Coque	2500 kg
F	0,3	<u>Volume de Ar</u>	<u>Conforme o Caso</u>
Na	1,5	Caso "a"	3882 Nm ³
K	1,05	Caso "b"	7764 Nm ³
Massa de PAE	6900 kg/h	Caso "c"	8638 Nm ³
Massa de Sílica	1400 kg/h	Caso "d"	9705 Nm ³
Massa de Coque	2500 kg/h	Caso "e"	14250 Nm ³
Volume de Ar	19000 Nm ³ /h	Caso "f"	19000 Nm ³
Basicidade	0,38	Basicidade	0,38

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta os resultados com relação às temperaturas obtidas em cada zona do forno, curvas "a" a "f", e, também, as temperaturas de referência de operação do forno Waelz, curva "Ref.", descrita por Clay *et al.* [7].

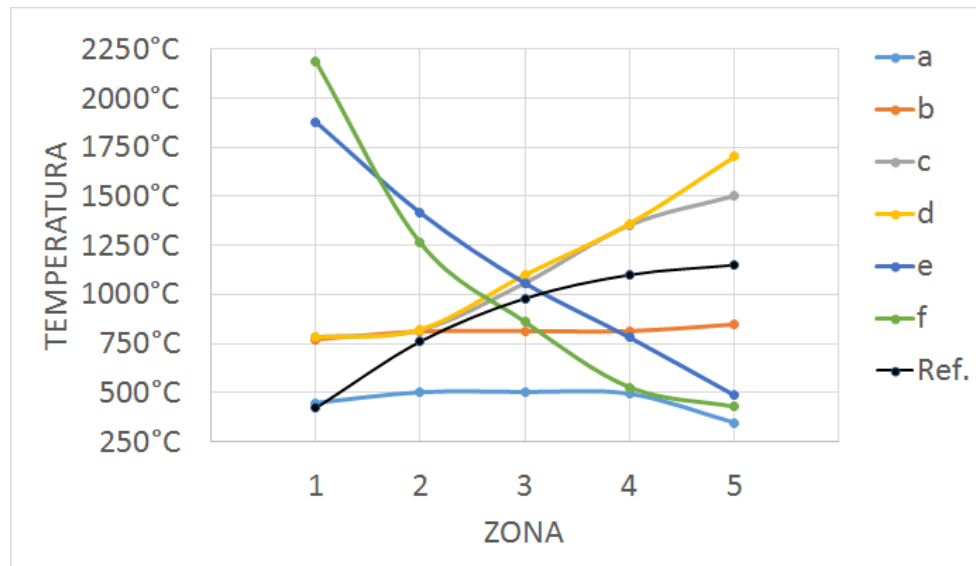


Figura 4. Temperaturas obtidas nas 5 zonas do modelo para a referência e os 6 casos simulados

De acordo com Beyzavi e Mattich [15], o volume de ar empregado é igual a 19000 Nm³, o que se traduz em um fator lambda (λ) de 1,08. Esta situação foi simulada no caso “f”, para o qual, o modelo assumiu temperaturas muito elevadas, 2191 e 1264°C, já na entrada da carga sólida, zonas 1 e 2. Isso possivelmente reflete uma diferença importante na cinética das reações entre o modelo e os casos reais. Como o forno Waelz é autógeno, o fator lambda não precisa ser igual ou maior que a unidade para que as temperaturas de operação sejam atingidas. Mas, na prática, isso não significa que 100% do ar injetado sofra interação completa com todos os materiais ao atravessar o forno; fatores como superfície de contato e velocidade de rotação podem dificultar as reações do ar com a carga. Portanto, quantidades menores de ar, como aquelas dos casos de “a” a “e”, podem aproximar mais o modelo à realidade.

O caso “e”, com 14250 Nm³ de ar e um fator lambda igual a 0,81, apresentou também temperaturas acima do padrão esperado na extremidade da carga sólida, 1881 e 1417°C nas zonas 1 e 2. Já o caso “a” representa o outro extremo das situações, onde o ar está na menor quantidade, com 38882 Nm³. Isso garantiu que a zona 1 atingisse um valor de 448°C, muito próximo àquele da referência, de 420°C; mas insatisfatório para as demais zonas, chegando à grande diferença de 803°C na zona 5.

O caso “b” foi o que apresentou os valores mais próximos àqueles da referência, com 7764 Nm³ de ar. Mas a curva “b” apresenta um comportamento quase constante em torno de 810°C para todas as zonas, conforme a Figura 4, o que indica pouca liberação de calor pelo sistema. Isso sugere que um maior teor de O₂ deva aumentar a liberação de calor por aumentar os produtos de oxidação no sistema. Assim, os casos “c” e “d” se tornam aqueles com maior sentido prático, com 8638 e 9705 Nm³ de ar, já que as curvas correspondentes apresentam um comportamento mais semelhante àquele da curva de referência – ainda que as temperaturas na zona 1 sejam elevadas. Na verdade, as temperaturas finais da zona 5 para ambas as curvas são também elevadas, com 1503°C para “c” e 1702°C para “d”, ante 1150°C da prática. Mas esses valores podem estar associados a um aproveitamento “exagerado” das energias liberadas das reações, o que é mais um indicativo da valia da cinética para o sistema. De qualquer maneira, dentre “c” e “d”, “c” apresenta um temperatura final mais baixa e por isso será analisado em mais detalhes a seguir.

A Tabela 3 apresenta as quantidades e composições dos produtos obtidos no caso “c” em comparação com a referência.

Tabela 3. Resultados obtidos para a referência [15] e para o caso “c”

Zn no Óxido Waelz (kg)		Análise Química da Escória Waelz (% massa)					
Ref.	Caso "c"	Constituinte	Ref.	Caso "c"	Constituinte	Ref.	Caso "c"
1213,1	1255,6	Zn	1,2	0,0	Al ₂ O ₃	1,9	0,7
Recuperação do Zn (%)		Pb	0,3	n.c.	C _{total}	11	0,4
Ref.	Caso "c"	Fe	30,7	40,1	S _{total}	0,4	n.c.
96,6	100,0	SiO ₂	28,2	31,6	Cl	0,35	n.c.
Obs.: 'n.c.' denota constituinte não considerado no modelo		CaO	7,3	9,5	F	0,2	n.c.
		MgO	2,1	2,6	Na	0,9	n.c.
		Cd	0	n.c.	K	0,3	n.c.

Como se pode notar, a recuperação de zinco na simulação do caso “c” está próxima daquela obtida pela referência, sendo 100% para a primeira e 96,6% para a segunda, conforme a Tabela 3. A temperatura elevada já na zona 1, tratando-se de “c”, influencia este resultado, já que boa parte do zinco presente na carga tem sua volatilização facilitada. Com relação à análise química da escória Waelz, a situação em “c” tem certa aproximação com a referência. Mas, diferenças são encontradas para os constituintes ferro e carbono – em torno de 10% em massa para ambos. Tal variação também pode ser o resultado da ação conjunta da alta temperatura na zona 5 e da quantidade de oxigênio diferente entre os dois sistemas. Equilíbrios dos óxidos em geral são afetados por essas variáveis, o que influi no consumo de carbono total, por exemplo.

4 CONCLUSÃO

A ferramenta SimuSage possibilitou a criação de um modelo termodinâmico para o Forno Waelz, que, submetido a uma série de cálculos, permitiu a quantificação das temperaturas internas do forno, a recuperação do zinco a partir do pó de aciaria elétrica e a composição química de todos os produtos gerados em cada zona. Este modelo – já que permite a manipulação das composições químicas dos materiais de entrada e de suas quantidades – expande a sua aplicabilidade para uma gama infinita de possibilidades.

Com relação às simulações propostas, o modelo foi capaz de gerar resultados próximos àqueles da referência citada, mas, com ponderações sobre os fenômenos que acontecem em cada caso. Ficou claro que o comportamento adiabático do modelo é muito sensível à quantidade de ar que entra no sistema, o que não permitiu a utilização direta de valores provenientes do caso prático com boa aproximação. Modelos que considerem a cinética devem ser empregados para que isso seja possível e a expansão futura deste trabalho levará isso em consideração.

Como foi possível constatar, muitos são os fenômenos decorrentes das reações químicas que influenciam o balanço de um reator como o Forno Waelz, o que torna muito difícil a sua modelagem sem o auxílio da termodinâmica computacional. Além disso, como há grande fluxo de materiais e variações de energia e temperatura dentro do forno, as ferramentas usuais de termodinâmica computacional não são capazes de modelar satisfatoriamente os fenômenos reinantes. Isso destaca a importância da simulação termodinâmica voltada à processos em cadeia, como a que foi empregada neste trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Science Technology & Engineering, STE, na pessoa de Leonardo Barboza Trindade, por conceder acesso à licença do *software* SimuSage, bem como à empresa GTT-Technologies GmbH, nas pessoas de Klaus Hack e Stephan Petersen, por permitirem o uso da versão 1.12.7 do mesmo *software* antes de sua publicação oficial. Um dos autores agradece também ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- 1 Silva M. Reciclagem de pó de aciaria elétrica como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos: controle das emissões atmosféricas [tese de doutorado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2006.
- 2 Telles V. Reciclagem da poeira de aciaria elétrica na sinterização de minério de ferro visando a eliminação de zinco [dissertação de mestrado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2010.
- 3 Mombelli D, Mapelli C, Barela S, Gruttadauria A, Di Landro U. Laboratory investigation of Waelz slag stabilization. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014;464:1-12.
- 4 Suetens T, Klaasen B, Acker K, Blanpain B. Comparison of electric arc furnace dust treatment technologies using exergy efficiency. *Journal of Cleaner Production*. 2014;65:152-167.
- 5 Gestão de Coprodutos. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. (Nota Técnica). 28 p: il.
- 6 Mager K, Meurer U, Wirling J. Minimizing dioxin and furan emissions during zinc dust recycle by the Waelz Process. *JOM*. 2003;55(8):20-25.
- 7 Clay J, Schoonraad G. Treatment of zinc silicates by the Waelz Process. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 77(1):11-14.
- 8 Mager K, Meurer U. Recovery of zinc oxide from secondary raw materials: new developments of the Waelz Process. In: *Fourth International Symposium on Recycling Metals and Engineered Materials*. Warrendale: TMS; 2000. p. 329-344.
- 9 Araújo J. Reciclagem de pó de forno elétrico a arco para a produção de aglomerado pré-fundido (APF) para uso em processo siderúrgico [tese de doutorado]. São Carlos: Universidade de São Paulo; 2014.
- 10 Hung P, Chi K, Chen M, Chang M. Characteristics of dioxina emissions from a Waelz plant with acid and basic kiln mode. *Journal of Hazardous Materials* 2012;201-202:229-235.
- 11 Matthes J, Waibel P, Keller H. A new infrared camera-based technology for the optimization of the Waelz process for zinc recycling. *Mineral Engineering*. 2011;24:944-949.
- 12 Rosenkvist, T. *Principles of Extractive Metallurgy*. Trondheim: Tapir Academic Press; 2004.
- 13 Koukkari, P. *Advanced Gibbs Energy Methods for Functional Materials and Processes*. Helsinki: Edita Prima Ou; 2009.
- 14 Factsage Database Documentation. Parte integrante do software FactSage versão 6.4 e atualizada em 2013.
- 15 Beyzavi A, Mattich C. Operational Practice with the Waelz Kiln and Leaching Plant of TSU in Taiwan. In: *Fourth International Symposium on Recycling Metals and Engineered Materials*. Warrendale: TMS; 2000. p. 345-360.