

ESTUDO DE TÉCNICAS DE RECIRCULAÇÃO DO GÁS DO LEITO DE SINTERIZAÇÃO VISANDO DIMINUIR A EMISSÃO DE DIOXINAS E FURANOS¹

Jose Adilson de Castro²
Aneliza Porto Gonçalves²
Alexandre Jose da Silva²

Resumo

O processo de sinterização do minério de ferro é bastante complexo e envolvem vários fenômenos relacionados ao movimento do gás, partículas sólidas, mecanismo de aglomeração, transferência de calor e diversas reações químicas envolvidas. As matérias-primas são variadas em sua composição química e, via de regra, se utiliza reciclagem de resíduos de outros processos introduzindo impurezas que em geral demandam cuidados adicionais do ponto de vista do controle do processo e de emissões. Neste contexto, a simulação computacional do processo tem contribuído para elucidar e quantificar fenômenos e indicar técnicas operacionais que minimizam as emissões. Dioxinas e furanos são substâncias classificadas de alta toxicidade e são produzidas em pequenas concentrações em processos que envolvem combustão na presença de compostos clorados mesmo em baixíssimas concentrações. Neste estudo um modelo de previsão de dioxinas e furanos é proposto e a recirculação seletiva do gás é implementado visando determinar as condições ótimas do processo que minimize as emissões destes compostos. Resultados de simulação indicaram que uma recirculação de aproximadamente 30% do volume do gás nas duas primeiras caixas de vento promovem uma redução da concentração de dioxinas e furanos no gás da ordem de 15 para menor que 5 ng/Nm³ com um alargamento de aproximadamente 5% na espessura da zona de fusão e diminuição de aproximadamente 30 °C na temperatura de pico.

Palavras-chave: Sinterização; Modelagem; Dioxinas; Furanos.

INVESTIGATION OF GAS RECIRCULATION OF SINTER BED AIMING TO MINIMIZE DIOXINS AND FURANS EMISSIONS

Abstract

The iron ore sintering process is complex with several phenomena taking place simultaneously. Gas and solid mass, momentum, heat transfer coupled with chemical reactions are carried out in a single strand. In addition, the sintering machine plays an important role recycling the by products of the integrated steel industry, which in turn, introduce impurities leading to a strict control of the emissions. In this context, the computer simulation based on integrated and detailed model has played important role in determining new operation techniques which minimize emissions together with smooth operation. Dioxins and furans are classified as high toxicity substances and are generated in small quantities within the sintering bed. This paper deals with modeling the PCDDs and PCDFs formation and decomposition within the sinter strand. The model is based on transport equations of mass, momentum and energy coupled with chemical reactions and phase transformations. In this study is proposed a selective recirculation of the outlet gas in order to minimize the emissions. Simulations results indicated that recirculation of nearly 30% of gas volume from the first 20% of the strand length can decrease PCDDs and PCDFs emissions from 15 to less than 5 ng/Nm³ with the fusion zone is enlarged about 5% and the pick temperature decreased around 30 °C.

Key words: Sintering process; Modeling; PCDDs; PCDFs.

¹ Contribuição técnica ao XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 18 a 21 de setembro de 2007, Salvador - BA, Brasil.

² Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica -UFF- Universidade Federal Fluminense. Av. dos Trabalhadores, 420, CEP: 27255-125 jose.adilson@pq.cnpq.br; aneliza@metal.eeimvr.uff.br; ajs@metal.eeimvr.uff.br – www.eeimvr.uff.br

1 INTRODUÇÃO

O processo de sinterização é complexo e envolve vários fenômenos. Uma grande variedade de matérias-primas é utilizada e desempenha um papel importante no aproveitamento e reciclagem dos resíduos sólidos gerados nos processos subsequentes de uma usina integrada.⁽¹⁻⁵⁾ Na Figura 1 apresenta-se uma visão dos principais equipamentos e fluxo de material de uma planta de sinterização, com especial destaque para a esteira de sinterizar, foco deste estudo. Devido a flexibilidade de matérias-primas, baixo consumo energético, alta produtividade e flexibilidade para produzir sinter de alta qualidade para o alto-forno, a sinterização se destaca como o principal fornecedor de carga metálica para o alto-forno. Não obstante, este processo representa umas das fontes poluidoras mais importantes na siderurgia envolvendo emissões gasosas e de particulados, além de compostos organoclorados de alta toxicidade tais como PCDDs e PCFs (Figura 2). onde as posições indicadas por x são passíveis de serem ocupadas por cloro ou hidrogênio.^(6,7)

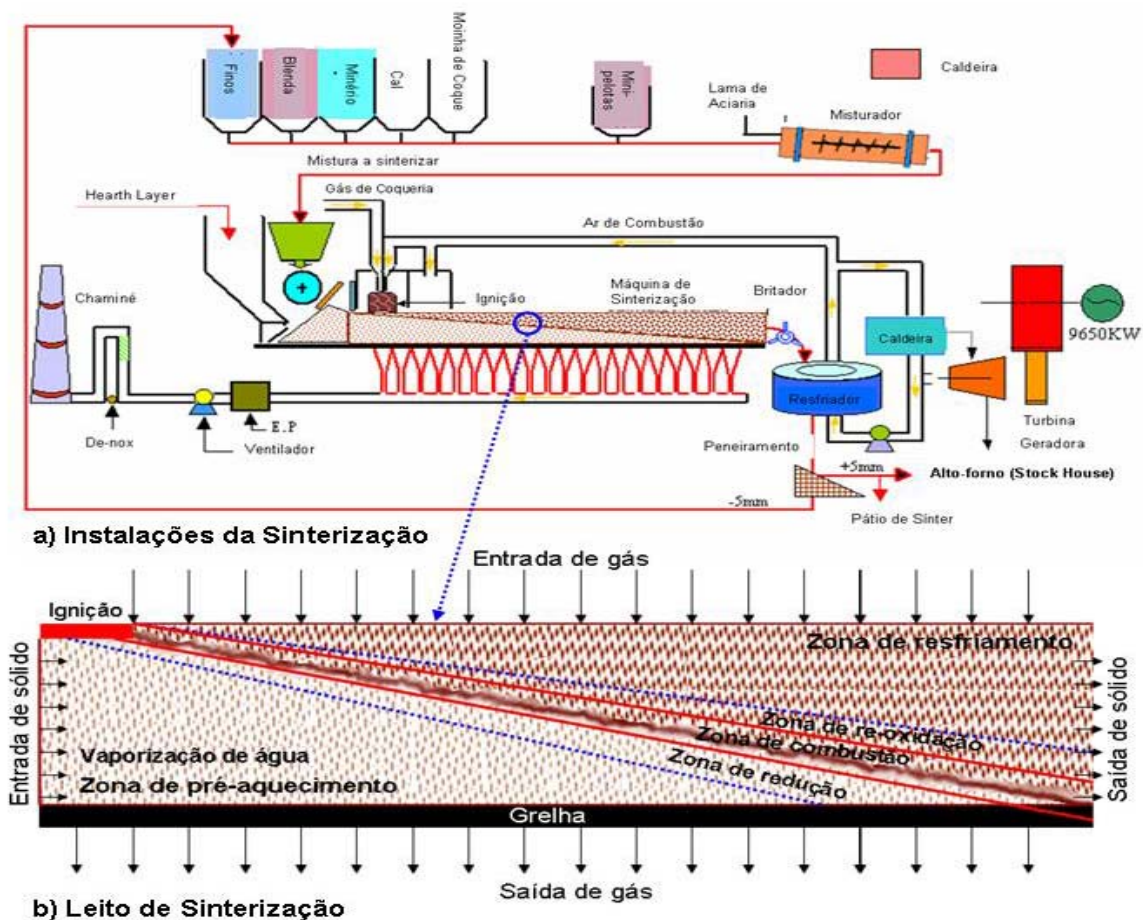


Figura 1 “Lay out” de uma planta de sinterização destacando o leito de sinterização e as diferentes zonas no interior do mesmo

O Programa das Nações Unidas para Proteção do Meio Ambiente (UNEP) e a Organização Mundial de Saúde (OMS) classificaram as dioxinas como poluentes

ambientais de preocupação global. O UNEP tem apelado para que os governos do mundo desenvolvam planos de ação a fim de reduzir e/ou eliminar as liberações de dioxina para o ambiente. Dessa forma, os seres humanos e os ecossistemas seriam protegidos contra danos provocados por esses poluentes químicos persistentes e bioacumulativos. Embora a contribuição da siderurgia ainda seja relativamente pequena e de difícil quantificação, existe um esforço crescente no sentido de conhecer e desenvolver técnicas capazes de minimizar a geração destas substâncias. Na figura 3 apresenta-se uma estimativa da contribuição das principais fontes de emissões destas substâncias segundo a toxicidade equivalente. Observa-se que neste estudo preliminar a siderurgia ocupa a 5ª colocação como a fonte mais poluidora, representando aproximadamente 11% do total de emissões.

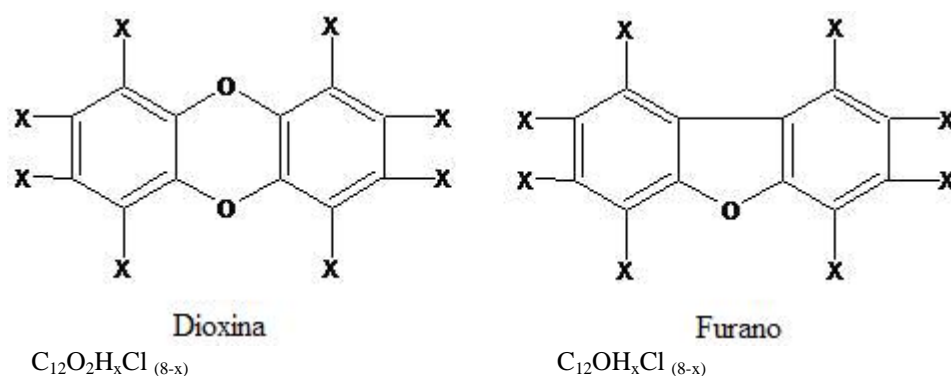
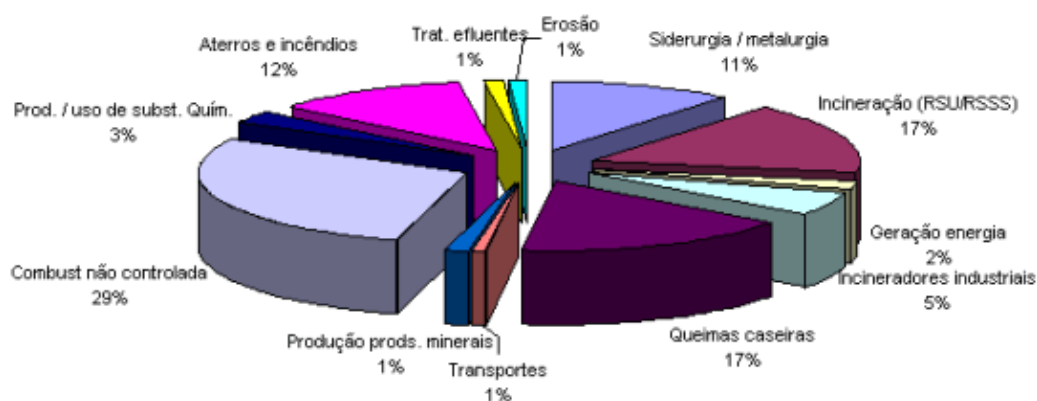


Figura 2. Estrutura básica de uma dioxina e furano

Principais fontes de emissão de dioxinas no mundo

(dados de inventários entre 1995 e 2005)



Dados obtidos dos inventários nacionais mais recentes disponíveis na internet dos seguintes países: Alemanha; Uruguay; Chile; Argentina; Ireland; Japão; México; Paraguai; EUA; Austrália; Dinamarca

Figura 3. Principais fontes de geração de dioxinas e furanos(toxicidade equivalente)

Modelos capazes de prever os principais fenômenos no interior do leito de sinterização têm sido desenvolvidos com diversas complexidades e objetivando aplicações distintas.⁽⁶⁻¹¹⁾ Modelos voltados para a previsão de dioxinas, no entanto, são raros e apresentam modelos simplificados para a cinética de formação e decomposição de

dioxinas e furanos.^(6,7,10,11) Neste trabalho o modelo chamado “de novo synthesis” é utilizado para investigar a formação e decomposição de dioxinas e furanos em condições de recirculação seletiva e parcial do gás de exaustão da esteira de sinterização.

2 MODELAGEM

O leito de sinterização pode ser modelado como um sistema bifásico e multicomponente. Desta forma, os principais fenômenos que ocorrem no interior do leito podem ser descritos por equações de transporte de momentum, energia e espécies químicas para cada fase. Um volume elementar no domínio de interesse é ocupado pelas duas fases simultaneamente, onde a eq. 1 se verifica.

$$\sum_{\text{sólidos}} f_i \varepsilon_i + \varepsilon_g = 1 \quad (1)$$

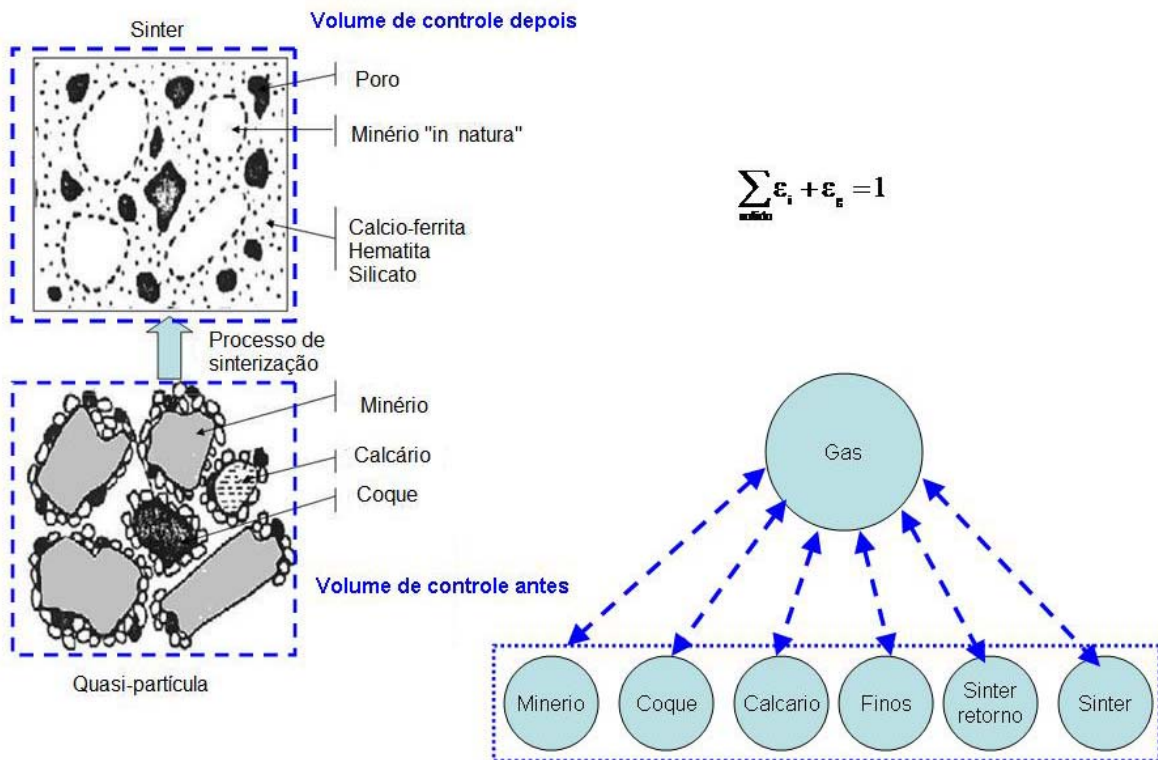


Figura 4. Mecanismo de sinterização e associação com o modelo multifásico

Onde i representa os sólidos componentes e f_i corresponde a fração do respectivo sólido no interior do volume de controle. As frações volumétricas dos sólidos componentes são determinados pelas eqs (2), (3) e (4) ponderados pela quantidade de cada componente no volume de controle. A região de amolecimento (semi-fusão) dos sólidos presente é modelada por correlações dos ensaios de amolecimento e fusão para as diferentes matérias-primas utilizadas que determinam a permeabilidade desta região e conseqüentemente tem grande influência na produtividade da sinterização.

$$\varepsilon_{coque} = 1 - [0,153 \text{Log}(\varphi_{coque} d_{coque}) + 0,724] \quad (2)$$

$$\varepsilon_k = 1 - 0,403[100(\varphi_k d_k)]^{0,14} \quad (3)$$

$$\varepsilon_m = f(\varepsilon_m, T) \quad (4)$$

As equações de transporte para momentum, continuidade, energia e espécies químicas para a fase gasosa são modeladas conforme Eq. (5)-(8) e similarmente para a fase sólida conforme Eq. (9)-(12).

Gás:

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon_g u_j)}{\partial t} + \text{div}(\rho_g \varepsilon_g \bar{U}_g u_j) = \text{div}[\varepsilon_g \mu_g \text{grad}(u_j)] - \text{grad}(P_g) + F_s^g \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon_g)}{\partial t} + \text{div}(\rho_g \varepsilon_g \bar{U}_g) = \sum_{i=1}^{nreacts} R_i^g \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon_g h_g)}{\partial t} + \text{div}(\rho_g \varepsilon_g \bar{U}_g h_g) = \text{div}\left[\varepsilon_g \frac{k_g}{C_{p,g}} \text{grad}(h_g)\right] + E_s^g + \sum_{i=1}^{nreacts} R_i^g \Delta h_i \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s \phi_{s,k})}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon_s \rho_s \bar{U}_s \phi_{s,k}) = \text{div}\left[\varepsilon_s \frac{D_k^s}{\varepsilon_s \rho_s} \text{grad}(\phi_{s,k})\right] + \sum_{i=1}^{nreacts} R_i^s \beta_k \quad (8)$$

Sólido:

$$\frac{\partial(\rho_s \varepsilon_s u_j)}{\partial t} + \text{div}(\rho_s \varepsilon_s \bar{U}_s u_j) = \text{div}[\varepsilon_s \mu_s \text{grad}(u_j)] - \text{grad}(P_s) - F_s^g - F_s^s \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho_s \varepsilon_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho_s \varepsilon_s \bar{U}_s) = \sum_{i=1}^{nreacts} R_i^s \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho_s \varepsilon_s h_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho_s \varepsilon_s \bar{U}_s h_s) = \text{div}\left[\varepsilon_s \frac{k_s}{C_{p,s}} \text{grad}(h_s)\right] - E_s^g + \sum_{i=1}^{nreacts} R_i^s \Delta h_i \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s \phi_{s,k})}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon_s \rho_s \bar{U}_s \phi_{s,k}) = \text{div}\left[\varepsilon_s \frac{D_k^s}{\varepsilon_s \rho_s} \text{grad}(\phi_{s,k})\right] + \sum_{i=1}^{nreacts} R_i^s \beta_k \quad (12)$$

O detalhamento das variáveis envolvidas no modelo representando velocidade, temperature e espécies químicas são apresentadas na Tabela 1. Na Tabela 3 apresenta-se as reações e transformações de fases consideradas neste modelo.^(6,7) As interações de momentum e energia são modeladas através das equações (13)-(17).

$$F_m = 150\mu_g \frac{1}{\left| \vec{U}_g - \vec{U}_s \right|} \left(\frac{\varepsilon_m}{(1-\varepsilon_m) d_m \varphi_m} \right)^2 + 1,75\rho_g \left(\frac{\varepsilon_m}{(1-\varepsilon_m) d_m \varphi_m} \right) \quad (13)$$

$$F_g^s = -F_s^g = \left[\sum_m f_m F_m \right] \left| \vec{U}_g - \vec{U}_s \right| (\vec{U}_g - \vec{U}_s) \quad (14)$$

$$\dot{E}_g^s = -\dot{E}_s^g = h_{g-s} A_{s-g} [T_s - T_g] \quad (15)$$

$$h_{s-g} = \frac{k_g}{d_s} \left[2.0 + 0.39(\text{Re}_{g-s})^{0.5} (\text{Pr}_g)^{1/3} \right] \quad (16)$$

$$A_{s-g} = \sum_m \left(f_m \frac{6\epsilon_m}{d_m \phi_m} \right) \quad (17)$$

Tabela 1. Momentum energia e espécies químicas consideradas no modelo

Gás	Momentum	$u_{1,g}, u_{2,g}, u_{3,g}, P_g, \epsilon_g$		
	Energia	h_g		
	Espécie química	N ₂ , O ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O, H ₂ , SiO, SO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀ , dioxinas, furanos, clorobenzeno		
Sólido	Momentum	$u_{1,s}, u_{2,s}, u_{3,s}, P_s, \epsilon_s$		
	Energia	h_s		
	Espécie química	Coque(finos)	C, Volatiles, H ₂ O, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , MnO, MgO, CaO, FeS, P ₂ O ₅ , K ₂ O, Na ₂ O, S ₂	
		Minerio	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, H ₂ O, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , MnO, MgO, CaO, FeS, P ₂ O ₅ , K ₂ O, Na ₂ O	
		Sinter(retorno)	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, H ₂ O, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , MnO, MgO, CaO, FeS, P ₂ O ₅ , K ₂ O, Na ₂ O	
		Material (semi-fundido)	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, H ₂ O, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , MnO, MgO, CaO, FeS, P ₂ O ₅ , K ₂ O, Na ₂ O, CaO.Fe ₃ O ₄ , Al ₂ O ₃ .MgO	
		Fundentes	CaO, H ₂ O, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , MnO, MgO, TiO ₂	
Sinter(prodoto)	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, H ₂ O, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , MnO, MgO, CaO, FeS, P ₂ O ₅ , K ₂ O, Na ₂ O, CaO.Fe ₃ O ₄ , Al ₂ O ₃ .MgO, dioxinas, furanos			

Total de 116 Equações diferenciais parciais

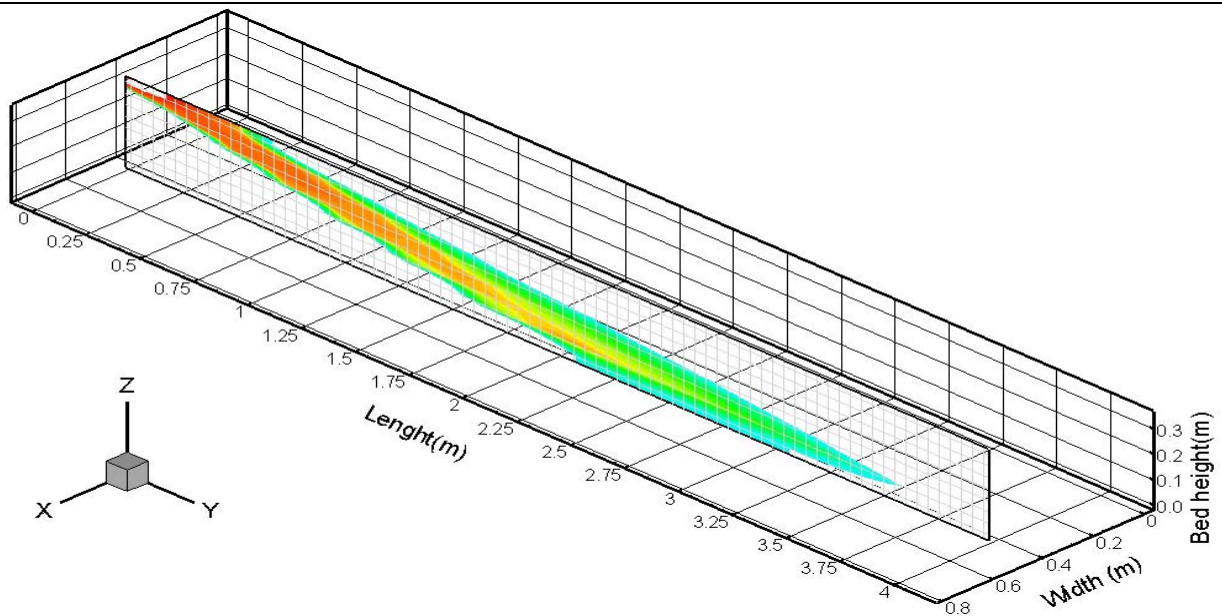
Tabela 2. Variáveis e subscritos usados nas equações

A_{s-g}	Área específica por unidade de leito [m ² /m ³]		Subscritos
\dot{E}_g^s	Taxa de transferência de energia entre o sólido e gas (kW)	g	Fase gás
f_m	Fração volumétrica do componente sólido(-)	s	Fase sólido
F_{g-s}^s	Interação de momentum entre gás e solido (N/m ³)	i	Índice pra reação química
h_{g-s}	Coefficiente global de troca de calor (W/m ² K)	j	Índice pra componente de velocidade
k_g	Efetiva condutividade térmica do gás (W/mK)	k	Índice pra fração volumétrica da fase
Pr_g	Numero de Prandtl relativo ao gás (-)	m	Índice pra componente da fase

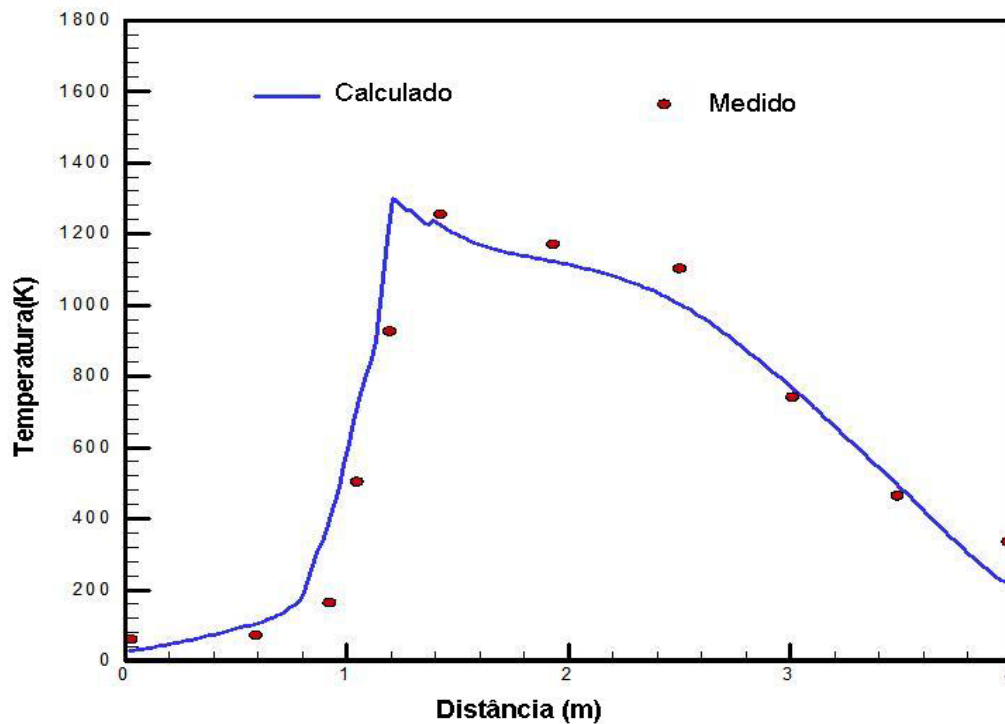
Tabela 3 Reações químicas consideradas no modelo

R _i	Reação química
Redução pelo CO	
1 _i	$3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{i}) + \text{CO}(\text{g}) \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{i}) + \text{CO}_2(\text{g})$ (i → ore, sin ter, fines, etc)
2 _i	$\frac{w}{4w-3}\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{i}) + \text{CO}(\text{g}) \rightarrow \frac{3}{4w-3}\text{Fe}_w\text{O}(\text{i}) + \text{CO}_2(\text{g})$ (i → ore, sin ter, fines, etc)
3 _i	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{i}) + \text{CO}(\text{g}) \rightarrow w\text{Fe}(\text{i}) + \text{CO}_2(\text{g})$ (i → ore, sin ter, fines, etc)
Redução pelo H₂	
4 _i	$3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{i}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{i}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$
5 _i	$\frac{w}{4w-3}\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{i}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \frac{3}{4w-3}\text{Fe}_w\text{O}(\text{i}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$
6 _i	$\text{Fe}_w\text{O}(\text{i}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow w\text{Fe}(\text{i}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ (i → ore, sin ter, fines, etc)
Re-oxidação do sólido	
7 _i	$w\text{Fe}(\text{i}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{Fe}_w\text{O}(\text{i})$
8 _i	$\frac{3}{4w-3}\text{Fe}_w\text{O}(\text{i}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \frac{w}{4w-3}\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{i})$
9 _i	$2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{i}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{i})$ (i → ore, sin ter, fines, etc)
Gaseificação pelo carbono	
10 _i	$\text{C}(\text{i}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}(\text{g})$
11 _i	$\text{C}(\text{i}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$
12 _i	$\text{C}(\text{i}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}(\text{g})$
13 _i	$\text{C}(\text{i}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + \text{CO}(\text{g})$ (i → coke breeze or coal)
Gaseificação dos voláteis	
14 _i	$\text{Volatiles}(\text{i}) + \alpha_1\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \alpha_2\text{CO}_2(\text{g}) + \alpha_3\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \alpha_4\text{N}_2(\text{g})$
15 _i	$\text{Volatiles}(\text{i}) + \alpha_5\text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \alpha_6\text{CO}(\text{g}) + \alpha_7\text{H}_2(\text{g}) + \alpha_8\text{N}_2(\text{g})$ (i → coke breeze or coal)
“Water gas shift”	
16	$\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$
Transformação de fases	
17 _i	$\text{H}_2\text{O}(\text{i}) \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ (i → ore, sin ter, coke)
18 _i	$\text{CaO}(\text{i}) \leftrightarrow \text{CaO}(\text{l})$
19 _i	$\text{MgO}(\text{i}) \leftrightarrow \text{MgO}(\text{l})$
20 _i	$\text{MnO}(\text{i}) \leftrightarrow \text{MnO}(\text{l})$
21 _i	$\text{Al}_2\text{O}_3(\text{i}) \leftrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3(\text{l})$ (i → ore, sin ter, coke)
22 _i	$\text{CaO}(\text{i}) + \text{FeO}(\text{i}) \leftrightarrow (\text{CaO}) \cdot (\text{FeO})$ (i → ore, sin ter, coke)
23 _i	$2\text{CaO}(\text{i}) + \text{FeO}(\text{i}) \leftrightarrow (\text{CaO})_2 \cdot (\text{FeO})$ (i → ore, sin ter, coke)
Formação de dioxinas/furanos	
24 _i	$48\text{C}_{(s)} + 2.5\text{O}_{2(g)} + 16\text{HCl}_{(g)} + 4\text{H}_{2(g)} \leftrightarrow \text{C}_{12}\text{OH}_5\text{Cl}_{3(g)} + \text{C}_{12}\text{O}_2\text{H}_5\text{Cl}_{3(g)} +$ $+ 2\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_2\text{OH}_{(g)} + 2\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_{3(g)}$
25 _i	$2\left[\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_2\text{OH}_{(s)}\right] \rightarrow \text{C}_{12}\text{OH}_5\text{Cl}_{3(s)} + \text{HCl}_{(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)}$
26 _i	$\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_2\text{OH}_{(s)} + \text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_{3(s)} + 0.5\text{O}_{2(g)} \rightarrow \text{C}_{12}\text{O}_2\text{H}_5\text{Cl}_{3(s)} + 2\text{HCl}_{(g)}$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES



a) Previsão da frente de sinterização para 30% de recirculação do volume do gás nas duas primeiras caixas de vento



b) Comparação da previsão de temperaturas do modelo com dados de medição

Figura 3 Previsão da frente de sinterização e comparação com medidas industriais

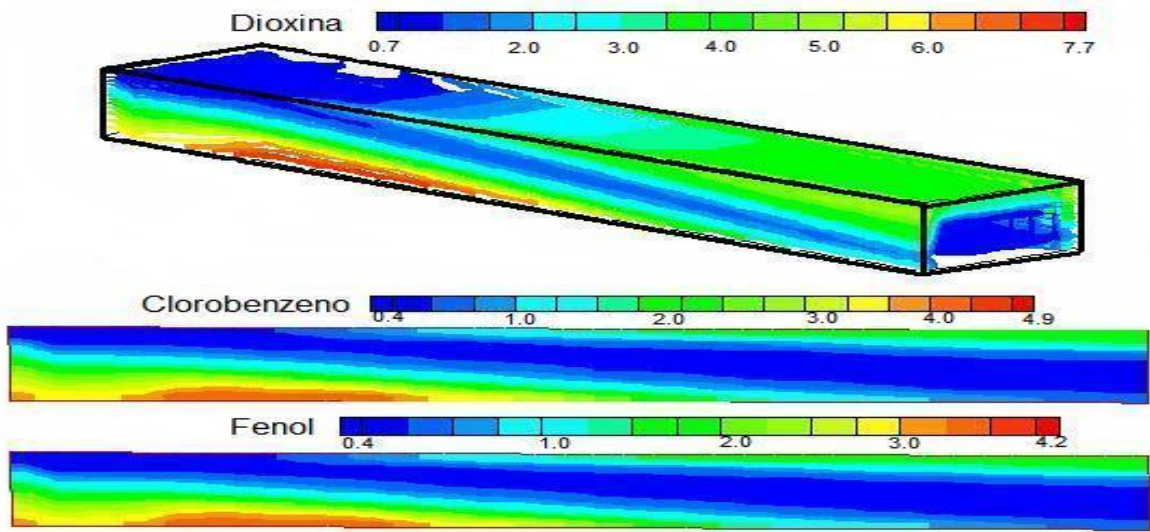


Figura 4. Previsão de dioxinas e precursores no gás para uma operação com 30% de recirculação do gás das duas primeiras caixas (ng/Nm^3)

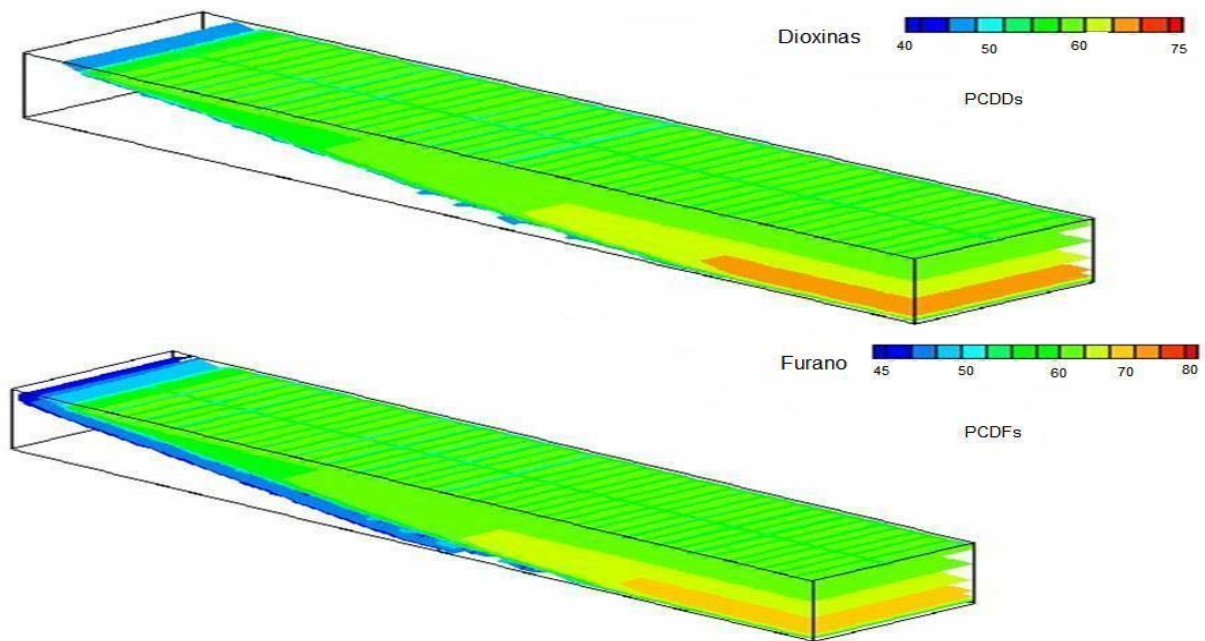


Figura 5. Distribuição de dioxinas e furanos na fase sólida ao longo do leito de sinterização (ng/m^3 leito)

Para verificar o ponto ótimo de recirculação do gás da sinterização foram feitas tentativas de recirculação na região de saída, central e de entrada, correspondendo a 20%, 60% e 20% do comprimento da esteira. O volume de gás recirculado foi aumentado continuamente enquanto as condições de sinterização não foram afetadas significativamente. Nas Figuras 3, 4 e 5 apresenta-se a melhor combinação de estabilidade operacional e emissão obtida na simulação. Em comparação com uma operação padrão onde o modelo indicava concentração da ordem de $15 \text{ ng}/\text{Nm}^3$ a recirculação de 30% do volume de gás gerado nos primeiros 20% do comprimento indicou emissões menores que $5 \text{ ng}/\text{Nm}^3$.

5 CONCLUSÕES

Um modelo multifásico e multicomponente foi desenvolvido e tem sido continuamente aperfeiçoado para investigar as emissões de dioxinas e furanos no processo de sinterização. O modelo é baseado na cinética de formação e decoposição de compostos organoclorados acoplados às equações de transporte de momentum, energia e massa das fases sólida e gasosa no interior do leito de sinterização. Com base nas previsões do modelo pode-se afirmar que operações ótimas de sinterização podem produzir concentrações de dioxinas no gás de exaustão menores que 5 ng/Nm^3 com recirculação de aproximadamente 30% do gás das 2 primeiras caixas de vento (<20% do comprimento)

REFERENCIAS

- 1 Waters, A. G. Litster, J.D. and Nicol, S.K., 1989 "A Mathematical Model for the Multicomponent Sinter Feed", ISIJ International, Vol. 29, pp. 274-283.
- 2 Cumming, M.J. and Thurlby, J. A. , 1990 " Development in Modelling and Simulation of Iron Ore Sintering", Ironmaking and Steelmaking, vol 17, pp 245-254.
- 3 Nath, N. K. Silva, A.J. and Chakraborti, N. , 1997 "Dynamic Process Modelling of Iron Ore Sintering", Steel Research, vol 68, pp 285-292.
- 4 Austin, P.R., Nogami, H. and Yagi, J., 1997, "A Mathematical Model of Four Phase Motion and Heat Transfer in the Blast Furnace", ISIJ International., Vol. 37, pp. 458-467.
- 5 Austin, P.R., Nogami, H. and Yagi, J., 1997, "A Mathematical Model for Blast Furnace Reaction Analysis Based on the Four Fluid Model", ISIJ International, Vol. 37, pp. 748-755.
- 6 Castro, J.A., Nogami, H. and Yagi, J., 2006, "Industrial Process Simulation Based on Multiphase Mathematical Model: Application to Predict the Sinter Plant Operation" Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2006, Curitiba, Brazil, pp. 1-10
- 7 Castro, J.A. Silva, A.J. , Nogami, H. e Yagi, J. , 2005, " Tecnologia em Metalurgia e Materiais, Vol 2, pp 45-52.
- 8 Castro, J.A., Nogami, H. and Yagi, J., 2002, "Three-dimensional Multiphase Mathematical Modeling of the Blast Furnace Based on the Multifluid Model", ISIJ International., Vol. 42, pp. 44-52.
- 9 Castro, J.A, 2001, "A multi-dimensional transient mathematical model of the blast furnace based on the multi-fluid model". Ph.D thesis, IMRAM – Institute for multidisciplinary research for advanced materials – Tohoku University – Japan
- 10 Harjanto, S., Kasai, E., Terui, T. and Nakamura, T. "Behavior of Dioxin During Thermal Remediation in the Zone Combustion Process, 2002, Chemosphere, vol. 47, pp.687-693.
- 11 Mitterlehner, J. Loeffler, G. Winter, F., Hofbauer, H., Schmid, H. Zwitter, E. , Buergler, H. Pammer, O. and Stiansy, H. , 2004 "Modeling and Simulation of Heat Front Propagation in the Iron Ore Sintering Process", ISIJ International., Vol. 44, pp. 11-20.