

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO NAS VENTANEIRAS DE MINI ALTOS-FORNOS

José Adilson de Castro ⁽¹⁾

Alexandre José da Silva ⁽¹⁾

Hiroshi Nogami ⁽²⁾

Jun-Ichiro Yagi ⁽²⁾

Resumo

Nos mini altos-fornos a carvão vegetal espera-se que a injeção de combustíveis auxiliares como carvão vegetal pulverizado e gás natural melhore o desempenho do processo reduzindo o custo de produção de gusa. Neste trabalho um modelo matemático capaz de simular as diversas condições operacionais em um mini alto-forno operando com injeção de combustível auxiliar é proposto e o efeito nas principais variáveis do processo são analisadas. Um modelo de cinco fases (gás, sólido, gusa, escória e finos) é proposto baseado em equações de transporte de energia, momentum e espécies químicas para cada fase individualmente. As fases interagem mutuamente transferindo energia, momentum e massa. As principais reações químicas são consideradas através do acoplamento entre as equações de transporte (termos fontes) e as taxas de reações. Adicionalmente as transformações de fases presentes (sólido-líquido) são consideradas. Como resultados do modelamento os campos de temperaturas para as fases, bem como os campos de distribuição das diversas espécies químicas são comparados com um alto-forno em condições normais de operação. Os resultados apresentados encontram-se em concordância com os apresentados em um forno em operação regular.

Palavras-chaves: simulação numérica, mini alto-forno, injeção auxiliar

Computer Simulation of Pulverized Charcoal Injection into the Mini Blast Furnace Process

Abstract

The blast furnace process has faced to increasing environmental pressure. The use of coke as reductant generates large amount of CO/CO₂ gas which normally is used in others plants such as thermoelectric or heating processes. However, finally this gas has to be discharged to the environment and therefore contributes to the greenhouse emissions. Therefore the use of a renewable energy source is desired. The direct use of charcoal combined with florests renewing is a promising technique that is currently used in the mini blast furnace releasing oxygen to the atmosphere. In addition, the kinetics of the charcoal is faster than the pulverized coal, which allows the use of high rates of injection through the tuyeres and simultaneously minimizing the unburned coal. Also the use of charcoal allows the production of hot metal with very low silicon content. In this paper the operation of the mini blast furnace with charcoal is analyzed using a three-dimensional comprehensive blast furnace model. The calculated result showed agreement with the actual mini blast furnace practice.

Key-words: Modeling, Fuel injection, Mini blast furnace

I. INTRODUÇÃO

No Brasil as condições de cultivo de biomassa como carvão vegetal resíduos de processamento da agro-indústria oferecem condições favoráveis ao desenvolvimento de tecnologias baseadas no aproveitamento de fontes renováveis de energia. Na indústria siderúrgica, existe uma capacitação técnica para a utilização de carvão vegetal diretamente como agente redutor. O carvão vegetal apresenta baixa resistência à degradação que em consequência permite apenas

sua utilização em altos-fornos de pequeno porte. Nestes fornos a utilização de injeção auxiliar é uma técnica atrativa do ponto de vista econômico, pois propicia a utilização de finos de carvão vegetal, bem como biomassa em geral com o objetivo de substituir o carvão granulado normalmente utilizado no processo.⁽¹⁾ O processo via carvão vegetal oferece vantagens do ponto de vista de teor de silício e enxofre, enquanto os teores de fósforo são

⁽¹⁾ Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica-EEIMVR-UFF

⁽²⁾ IMAM-Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials- Tohoku University

usualmente altos quando comparados com fornos operando a coque.⁽¹⁾ Um outro aspecto não menos relevante consiste na flexibilidade do processo, constituindo-se em instalações compactas e de baixo custo de investimento quando comparado aos grandes altos-fornos a coque.

Porém é com relação ao aspecto ambiental que os mini altos-fornos a carvão vegetal possui um diferencial importante, o que tenderá a tornar-se mais relevante a partir da tendência da legislação em taxar severamente os passivos ambientais nas usinas siderúrgicas. Um alto-forno operando a carvão vegetal retorna o oxigênio à atmosfera em um ciclo relativamente curto quando utilizadas técnicas modernas de cultivo e produção de carvão vegetal, com completo aproveitamento da biomassa. Neste contexto o Brasil possui uma posição de destaque, pois possui tecnologia de cultivo e manuseio de florestas além de larga experiência em operação de mini altos-fornos a carvão vegetal utilizando injeção de materiais pulverizados. Neste trabalho desenvolve-se uma ferramenta de análise do desempenho do processo baseado em um modelo total do alto-forno, onde fenômenos tais como escoamento gasoso, gusa, escória e carga são considerados em detalhe e acoplado aos fenômenos de troca de calor e cinética das reações químicas.

2. MODELAMENTO

No modelamento considera-se cinco fases distintas: sólido (carvão vegetal, minério granulado, sinter, pelota, calcário e eventualmente sucata), gás, gusa líquido, escória líquida e carvão vegetal pulverizado. Na Tabela I mostra-se as fases presentes e seus componentes considerados no modelamento. Um aspecto bastante relevante para o modelo consiste na formulação das taxas de reações de combustão do carvão, "sollution loss", combustão de voláteis etc., pois diferem bastante daquelas usualmente aplicadas ao coque.

O fenômenos que ocorrem no interior do reator são bem modelados pela equação geral de transporte, Equação I. Onde o coeficiente de transferência (Γ) assume diferentes significados conforme a equação a ser resolvida. No termo fonte (S_{ϕ}) introduz-se todos os termos não inclusos no lado esquerdo da equação. A

Equação I é uma típica equação resolvida pelo método de volumes finitos. No termo fonte, portanto estão contemplados os acoplamentos entre fases tais como transferência de momentum, energia e massa. Os modelo de transferência de momentum e energia foram coletados da literatura e adaptados para as condições do alto-forno em trabalhos anteriores.^(2,3,4,5)

Tabela I. Modelo de cinco fases aplicado ao mini alto-forno

Fases	Espécies químicas	
Gás	CO, CO ₂ , O ₂ , H ₂ , H ₂ O, N ₂ , SiO	
Sólidos	Minério	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O ganga
	Sinter	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O, ganga
	Pelota	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, CaO, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , H ₂ O, ganga
	Carvão	C, volatiles, SiC, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, H ₂ O, ganga
Gusa	Fe, C, Si, P, S, Mg	
Escória	FeO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, ganga	
Finos de Carvão	C, volatiles, SiC, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, H ₂ O, ganga	

A cinética de redução dos óxidos de ferro, bem como os modelos de incorporação do silício e carbono foram mantidos conforme a formulação apresentada para altos-fornos a coque,^(2,3,4,5) salvo as propriedades intrínsecas do carvão vegetal (área superficial e porosidade)

$$\frac{\partial(\epsilon_i \rho_i \phi_{i,k})}{\partial t} + \Delta \cdot (\epsilon_i \rho_i \bar{V}_i \phi_{i,k} - \epsilon_i \Gamma_{\phi} \nabla \phi_{i,k}) = S_{\phi_{i,k}} \quad (1)$$

O modelo de combustão do carbono e voláteis será detalhado a seguir.

Tabela 2. Reações envolvendo o carvão vegetal e finos de carvão vegetal

Combustão do carbono

1i	$C(i) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow CO(g)$ (parcial)	i= carvão, finos de carvão
2i	$C(i) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$ (completa)	i= carvão, finos de carvão

$$R_{1i} = \frac{a}{1+a} R_{ave} \text{ and } R_{2i} = \frac{1}{1+a} R_{ave}; R_{ave} = \left\{ \frac{\epsilon_s \rho_s \omega_{CO_2,ia}}{M_{O_2}} \right\} \left[\frac{d\phi_i}{A_i D_{CO_2, N_2}^{eff} Sh_i} + \frac{1}{\eta k_{ave}} \right]^{-1}$$

$$a = \exp\left(-\frac{12400}{1,987T_i}\right); k_{ave} = 3600RT_i \exp\left(-\frac{12920}{T_{ave}}\right); T_{ave} = \frac{T_g + T_i}{2}; A_i = \frac{6\epsilon_i}{d_i \phi_i}$$

$$\eta = \left[\frac{d_i}{6 \sqrt{\zeta_i D_{CO_2, N_2}^{eff}}} \right]^{-1} \left\{ \left[\tanh\left(\frac{d_i \sqrt{\frac{k_{10i} \delta_i}{\zeta_i D_{CO_2, N_2}^{eff}}}}\right) \right]^{-1} - \left[\frac{d_i}{2 \sqrt{\zeta_i D_{CO_2, N_2}^{eff}}} \right]^{-1} \right\}; \delta_{carvão} = 1; \delta_{finos} = 1; \zeta_{pe} = 0,8$$

"Sollution loss"

3i	$C(i) + CO_2(g) \rightarrow 2CO(g)$	i= carvão vegetal, finos
----	-------------------------------------	--------------------------

$$R_{3i} = \frac{\rho_s \omega_{CO_2,ia}}{M_{CO_2}} \left(\frac{1}{A_i k_{lim,CO_2}} + \frac{1}{\eta k_{10i}} \right)^{-1}$$

$$k_{10i} = \frac{k_i}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2}}; \rho_s \epsilon \rho_s, 82,056 \times 10^{-3} T_i; k_i = \frac{1}{60} \exp\left(19,875 - \frac{66350}{1,987T_i}\right);$$

$$k_2 = \exp\left(-6,688 + \frac{21421}{1,987T_i}\right); k_3 = \exp\left(31,615 - \frac{88168}{1,987T_i}\right)$$

$$P_{O_2} = \frac{82,056 \times 10^{-3} \rho_s T_i \omega_s}{M_{O_2}}; (j=CO, CO_2); k_{lim,CO_2} = D_{CO_2, N_2}^{eff} \frac{Sh_i}{d_i \phi_i}; A_i = \frac{6\epsilon_i}{d_i \phi_i}$$

$$\eta = \left[\frac{d_i}{6 \sqrt{\zeta_i D_{CO_2, N_2}^{eff}}} \right]^{-1} \left\{ \left[\tanh\left(\frac{d_i \sqrt{\frac{k_{10i} \delta_i}{\zeta_i D_{CO_2, N_2}^{eff}}}}\right) \right]^{-1} - \left[\frac{d_i}{2 \sqrt{\zeta_i D_{CO_2, N_2}^{eff}}} \right]^{-1} \right\}; T_{ave} = \frac{T_g + T_i}{2}$$

$$\delta_{carvão} = 1; \delta_{pe} = 1; \zeta_{finos} = 0,2$$

“Water gas”

4 _i	$C(i) + H_2O(g) \rightarrow CO(g) + H_2(g)$	$i = \text{carvão vegetal, finos}$
$R_4 =$	$\frac{P_s \omega_{H_2O}}{M_{H_2O}} \left[\frac{1}{A_1 k_{H_2O}} + \frac{1}{\eta k_{H_2O}} \right]; k_{H_2O} = D_{H_2O,N_2}^{T_{ref}} \frac{Sh_i}{d_i}; k_{H_2O} = \frac{k_4}{1 + k_1 P_{CO} + k_2 P_{CO_2} + k_3 P_{H_2O}} \omega_c \rho_c \epsilon 82,056 \times 10^{-3} T_i$	
$Sh_i =$	$1,5 Re_c^{0,55}; k_2 = 7,2 \frac{M_{H_2O}}{M_{CO}}; k_3 = \frac{M_{H_2O}}{M_{CO_2}} \exp \left(14,24 - \frac{18350}{T_i} \right); A_1 = \frac{6\epsilon_1}{d_i \phi_i}$	
$k_4 =$	$\frac{1}{3600 M_C} \exp \left(22,35 - \frac{26320}{T_i} \right); k_5 = \exp \left(29,59 - \frac{36760}{T_i} \right)$	
$\eta =$	$\left[\frac{d_i}{6 \sqrt{\zeta D_{H_2O,N_2}^{T_{ref}}}} \right]^{-1} \left[\tanh \left(\frac{d_i}{6 \sqrt{\zeta D_{H_2O,N_2}^{T_{ref}}}} \right) \right]^{-1} - \left[\frac{d_i}{2 \sqrt{\zeta D_{H_2O,N_2}^{T_{ref}}}} \right]^{-1}$	
$\delta_{\text{carvão}} = 1; \delta_{\text{finos}} = 1; \zeta_{\text{finos}} = 0,8; P_{\omega_i} =$	$\frac{82,056 \times 10^{-3} \rho_c T_i \omega_i}{M_{\omega_i}}$	

Redução direta pelo carbono

5 _i	$Fe_w O(\text{escoria}) + C(i) \rightarrow Fe(\text{gusa}) + CO(g)$	$i = \text{carvão vegetal, finos}$
$R_{5_i} =$	$k_{7_i} \left(\frac{P_{SiO_2} \epsilon_{SiO_2} \omega_{FeO_{SiO_2}}}{M_{FeO}} \right)^2 (0,078 A_1); A_1 = \frac{6\epsilon_1}{d_i \phi_i}; k_{7_i} = \frac{4,66 \times 10^4}{3600} \exp \left(\frac{-53300}{82,056 T_{\text{min}}} \right)$	
$T_{\text{min}} =$	$\min(T_i, T_{\text{dgl}})$	

Combustão de Voláteis

6	volateis (carvão, finos) + $\alpha_1 O_2 \rightarrow \alpha_2 CO_2(g) + \alpha_3 H_2O(g) + \alpha_4 N_2(g)$
$R_6 =$	$23,6 \left(\frac{H_e \epsilon_i}{\rho_e k_i} \right)^{1/4} \left(\frac{\epsilon_i}{k_i} \right) \min \left(\epsilon_{pe} \rho_{pe} \omega_{VM_{\text{vol}}}, \epsilon_g \rho_g \omega_{CO_2} \frac{M_{VM}}{\alpha_i M_{O_2}} \right)$
7	volateis (carvão, finos) + $\alpha_5 CO_2(g) \rightarrow \alpha_6 CO(g) + \alpha_7 H_2(g) + \alpha_8 N_2(g)$
$R_7 =$	$23,6 \left(\frac{H_e \epsilon_i}{\rho_e k_i} \right)^{1/4} \left(\frac{\epsilon_i}{k_i} \right) \min \left(\epsilon_{pe} \rho_{pe} \omega_{VM_{\text{vol}}}, \epsilon_g \rho_g \omega_{CO_2} \frac{M_{VM}}{\alpha_5 M_{CO_2}} \right)$
$k_i =$	$(0,03 \bar{U}_d)^2; \epsilon_i = \frac{k_i^{0,5}}{0,01}$

Os coeficientes estequiométricos das equações de combustão dos voláteis são determinados como segue:

$\delta =$	$\frac{\omega_{C_{VM}}}{M_C} + \frac{\omega_{H_{VM}}}{M_H} + \frac{\omega_{O_{VM}}}{M_O} + \frac{\omega_{N_{VM}}}{M_N}; \alpha_1 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C} + \frac{\omega_{H_{VM}}}{4\delta M_H} - \frac{\omega_{O_{VM}}}{2\delta M_O}; \alpha_2 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C}; \alpha_3 = \frac{\omega_{H_{VM}}}{4\delta M_H};$
$\alpha_4 =$	$\frac{\omega_{O_{VM}}}{2\delta M_O}; \alpha_5 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C} - \frac{\omega_{O_{VM}}}{2\delta M_O}; \alpha_6 = \frac{\omega_{C_{VM}}}{\delta M_C} + \alpha_5; \alpha_7 = \frac{\omega_{H_{VM}}}{\delta M_H}; \alpha_8 = \frac{\omega_{N_{VM}}}{2\delta M_N}$

A composição do carvão vegetal utilizado, bem como os finos injetados desempenham papel importante. Para as simulações que se seguem foram utilizados uma composição típica mostrada na Tabela 3.

Tabela 3. Composição química do carvão vegetal (carvão, voláteis e cinzas)

	Carbono fixo		Cinzas			Volateis		
Carvão vegetal (%)	70					4	25	
Volateis (%)	CO		CO ₂			H ₂	C _n H _m	
	9		20			64	7	
Cinzas (%)	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	P (P ₂ O ₅)	K ₂	Na ₂ O
	30	40	6,5	3	0,055	4,5	12,5	1,5

3. RESULTADOS/DISCUSSÕES

Com o objetivo de comparar o desempenho do alto-forno trabalhando com carvão vegetal e coque, dois casos típicos foram selecionados. No primeiro caso utiliza-se coque e carvão mineral pulverizado e no segundo caso utiliza-se carvão vegetal pelo topo e carvão vegetal pulverizado. Para manter a mesma base de

	Coque	Carvão vegetal
Produtividade (t _{gusa} /d/m ³)	2,22	2,36
“Fuel rate” (kg/t _{gusa})	495	593
Escória (kg/t _{gusa})	232	149
$\frac{CO_2}{CO + CO_2}$	0,6	0,53
Temperatura gás de topo (°C)	233	303

comparação, a temperatura do gusa foi mantida aproximadamente constante através de um calculo iterativo onde a distribuição da carga foi aos poucos alterada. Como resultado do processo iterativo, obteve-se a distribuição radial da relação minério/coque, conforme mostrado na Figura 1. Para o caso do alto-forno a coque, uma região central rica em coque foi carregada, diminuindo bruscamente ao passo que afasta-se do centro. Na periferia uma alta relação minério coque foi carregada. Espera-se que tal perfil de distribuição da carga gere um escoamento gasoso central e uma zona coesiva em “V” invertido.

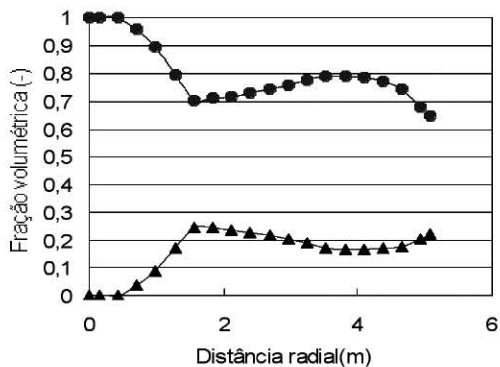
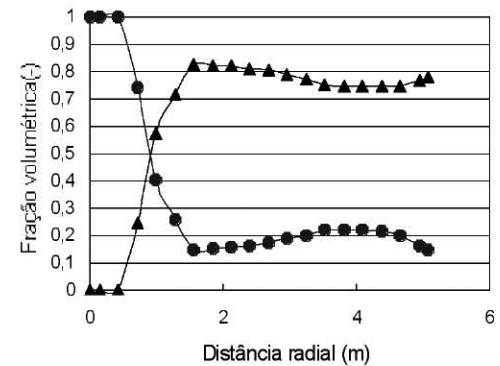


Figura 1. Distribuição radial da carga para os processos analisados (coque e carvão vegetal)

Na Figura 2 os campos de temperaturas para as duas condições analisadas são apresentados. Conforme pode ser observado a região da zona de combustão é sensivelmente alterada. No caso do carvão vegetal as isoterms estão mais próximas,

indicando um gradiente maior de temperaturas, quando comparado com a operação coque. Conforme o esperado, as isotermas para a operação a carvão vegetal estão em posições inferiores no alto-forno como um todo, porém o perfil “V” invertido é mais acentuado, pois uma quantidade maior de gás foi soprado. Conseqüentemente uma maior produtividade é evidenciado através da Tabela 4, além de um ligeiro aumento da temperatura do gás de topo. Resultados de simulação mostrados na tabela 3 revelaram que para se produzir qualidade similar de gusa, o alto-forno a carvão vegetal apresenta ligeiro aumento de produtividade (~7%), por outro lado o um aumento no consumo total de redutor foi previsto (~20%). Entretanto, devemos lembrar que no caso do coque utiliza-se uma fonte não renovável de carbono(carvão mineral).

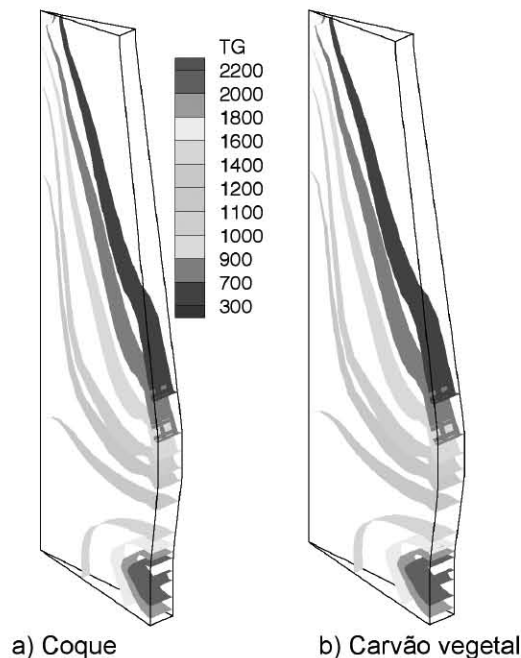


Figura 2. Distribuição de temperaturas no interior do alto-forno

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um modelamento baseado na adaptação de um modelo de alto-forno a coque, devidamente validado, onde a cinética de combustão do carvão vegetal é considerada tanto na condição de granulado quanto pulverizado. Um aumento de aproximadamente 7% na produtividade do alto-forno foi previsto pelo modelo quando operando a carvão vegetal. Resultado igualmente relevante é o consumo total de redutor, que no caso do alto-forno a carvão vegetal foi previsto um aumento da ordem de 20% quando comparado com alto-forno a coque, porém devemos salientar que esta fonte de carbono é renovável em um período relativamente curto(aproximadamente 5 anos)

5. NOMENCLATURA

A_i	Área superficial [m^2/m^3]	K_i	Constante cinética[varias]
d_i	Diâmetro da partícula [m]	M_i	Peso molar [g/mol]
ε_i	Fração volumétrica da i-ésima fase [-]	\varnothing	Variável de estado [varias]
ρ_i	Densidade da i-ésima fase [kg/m^3]	S_∞	Termo fonte para a variável
R_i	Taxa de reação [kmol/s]	w_i	Fração massica [-]
\bar{V}_i	Velocidade da i-ésima fase[m/s]	t	Tempo[s]
p	Pressão [Pa]	T_i	Temperatura [K]

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MORAES, R.L.; LIMA, W.O.; FERREIRA, R.M.; SANTOS, E.F.; CRUZ, J.; FONSECA, F.G. Start-up injeção de finos de carvão vegetal em mini-alto-forno. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS, 27., 2002, Vila Velha, ES. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002. p. 521-34.
- AUSTIN, P.R.; NOGAMI, H.; YAGI, J. A mathematical model for blast furnace reaction analysis based on the four fluid model. **ISIJ International**, Tokyo, v. 37, n.8, p 748-755, Aug. 1997.
- CASTRO, J.A.; SILVA, A.J.; GOMES, D.E.; NOGAMI, H.; YAGI, J. Three dimensional mathematical model of the blast furnace: application to simulate the charcoal mini blast furnace In: Proceedings of FOURTH JAPAN-BRAZIL SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING-ENERGY-ENVIRONMENT IN METALLURGICAL INDUSTRIES, 4.,2002, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: EPUSP, 2002. p. 41-52
- CASTRO J.A.; NOGAMI, H.; YAGI, J. Three-dimensional multiphase mathematical modeling of the blast furnace based on the multifluid model. **ISIJ International**, Tokyo, v. 42, n.1, p. 44-52, Jan. 2002.
- OMORI, Y. **Blast furnace phenomena and modeling**. London: Elsevier, 1987.