



Rem: Revista Escola de Minas

ISSN: 0370-4467

editor@rem.com.br

Escola de Minas

Brasil

Silva Guilherme, Vagner; Adilson de Castro, Jose  
Utilização de gás de coqueria na sinterização de minério de ferro  
Rem: Revista Escola de Minas, vol. 65, núm. 3, julio-septiembre, 2012, pp. 357-362  
Escola de Minas  
Ouro Preto, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56424723012>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

## Utilização de gás de coqueria na sinterização de minério de ferro

### *Use of coke oven gas in iron ore sintering*

**Vagner Silva Guilherme**

Programa de Pós-Graduação Engenharia  
Metalúrgica, UFF - Universidade Federal  
Fluminense, Pólo de Volta Redonda.  
[vsguilherme@metal.eeimvr.uff.br](mailto:vsguilherme@metal.eeimvr.uff.br)

**Jose Adilson de Castro**

Programa de Pós-Graduação Engenharia  
Metalúrgica, UFF - Universidade Federal  
Fluminense, Pólo de Volta Redonda.  
[adilson@metal.eeimvr.uff.br](mailto:adilson@metal.eeimvr.uff.br)

### Resumo

Visando a estudar novas alternativas para o processo de sinterização, a utilização de gases combustíveis tem proporcionado reduções significativas no consumo de combustíveis sólidos, além de propiciar maior controle da qualidade física e metalúrgica do síter. Nesse estudo, é utilizado um modelo de sinterização para avaliar a injeção de gás de coqueria no processo. Foram analisados cinco casos de injeção de gás de coqueria, visando, sempre, a uma operação estável do processo. Os resultados de simulação indicam um menor consumo de combustível sólido com a injeção do gás de coqueria e alargamento da frente de combustão. Como resultado desse processo, houve um aumento da fração de cálcio-silicatos, o que propiciou uma melhoria na redutibilidade e uma redução na quantidade de  $\text{CO}_2$  no gás de saída.

**Palavras-chave:** Sinterização, gás de coqueria, simulação computacional.

### Abstract

*In order to study new alternatives for the sintering, the use of gaseous fuels has provided a significant reduction in the consumption of solid fuels, and also propitiates better quality control of physical and metallurgical sinter properties. In this study, a sintering model is proposed to evaluate the injection of coke oven gas in the process. We analyze five cases of coke oven gas injection always seeking a stable operational process. The simulation results indicate a lower consumption of solid fuel with the injection of coke oven gas and an increase of the combustion front. As a result, this increased the fraction of calcium silicates, which consequently improved the reducibility and also reduced the amount of  $\text{CO}_2$  in the output gas.*

**Keywords:** Sintering, coke oven gas, computer simulation.

### 1. Introdução

O processo de sinterização é usado para fundir, parcialmente, os finos de minério de ferro. Também é utilizado com o objetivo de agregá-los. A referida sinterização tem, como finalidade, produzir síter para o processo de redução em altos-fornos. A resistência mecânica do agregado dependerá da quantidade e do tipo de material fundido entre as partículas (Geerdes et al., 2004).

Um dos aspectos mais relevantes do processo é o consumo energético que inci-

de sobre o custo do gusa e das emissões de particulados e gases. Os itens de qualidade de maior relevância, para o processamento no alto-forno, são resistência mecânica e redutibilidade do aglomerado, que estão, intrinsecamente, ligados à composição das matérias-primas utilizadas na sinterização e no histórico térmico na esteira de sinterização (Guilherme et al., 2011).

Nos últimos anos, a redução da emissão de  $\text{CO}_2$  se tornou uma questão urgente na indústria do aço como medi-

da preventiva contra o aquecimento global. Na siderurgia, aproximadamente, 60% das emissões acontecem nas sinterizações feitas em altos-fornos. Por tudo isso, a redução da quantidade de coque usado, tanto na sinterização, como no alto-forno tem sido exigida (Oyama et al., 2011).

2. Modelamento matemático

Através da discretização das equações de transporte, utilizando o método de volumes finitos (Patankar, 1985), pode-se realizar simulações para previsão e caracterização de processos. O modelo consiste em descrever os fenômenos que ocorrem no interior do leito de sinterização de minério de ferro num sistema de

Na busca por melhorias no processo de sinterização, a injeção de combustível gasoso vem se tornando uma técnica alternativa, capaz de ampliar a frente de combustão e diminuir o consumo de coque, proporcionando melhores propriedades ao síter, além de estabilidade operacional. O presente trabalho buscou

verificar se a injeção de gás de coqueria (GC), ao longo da esteira, no processo de sinterização, confere melhores propriedades físicas e mecânicas ao síter. Para esse estudo, foi utilizado o modelo computacional para simulação do processo de sinterização de minério de ferro (Castro et al., 2005).

duas fases, que interagem entre si, transferindo *momentum*, massa e energia. Nesse modelo, foram implementadas, diferentes condições de operação para avaliar a qualidade do produto. Os fenômenos de transferência de *momentum*, energia e espécies químicas, para cada fase envolvida no interior do leito, estão

representados na Equação 1 (Equação geral de transporte). Nessa equação, o 1º termo do lado esquerdo representa o termo transiente. Já o 2º termo quantifica a convecção. O 1º termo do lado direito representa a contribuição que ocorre devido à difusão. O 2º termo agrupa os chamados termos-fontes.

∂(ρi εi ϕi,k) / ∂t + div (ρi εi V̄i ϕi,k) = div (Γi,k grad (ϕi,k)) + Si,k (1)

A Equação 1 sintetiza o balanço de todas as grandezas listadas na Tabela 1, em que os índices *i* referem-se às fases e *K*, às variáveis envolvidas no balanço, como: espécies químicas pertencentes à fase *i*, componentes de velocidades (*u*) e entalpias (*H*). Os índices *ρ* e *ε* represen-

tam as massas específicas e as frações volumétricas das fases, respectivamente, enquanto *Γ* é a difusividade efetiva, que pode representar viscosidade dinâmica, para o caso das equações de *momentum*, difusividades térmicas, quando se trata das equações de entalpia, ou difusividade

molecular, para as equações de balanço de espécies químicas (Guilherme, 2010). Em um escoamento multifásico, como os componentes encontram-se misturados, pode-se caracterizar a presença de cada um por sua fração molar ou por sua fração mássica (Guilherme, 2010).

Fase	Espécie Química
Gás	CO, CO2, O2, H2, H2O, N2, CH4, C2H6, C3H8, C4H10, C12OH5Cl3, C12O2H5Cl3, HCl, C6H6, C6H3Cl3, C6H3Cl2OH
Sólido	Minério
	Síter (retorno)
	Finos de Coque ou Carvão
	Materiais Fundidos
	Torta de Síter

Tabela 1 Fases e espécies químicas consideradas no modelo.

3. Resultados e discussão

Foram selecionados um cenário base e outros cinco com a utilização de GC, com 2%, 4%, 6%, 8% e 10% do volume do gás de sucção. Foi utilizado o gás de coqueria, por ser um gás rico em H2. Esse gás possui alta energia por unidade de peso, comparativamente a qualquer combustível. Especificamente, a quantidade de energia libertada, durante a reação do hidrogênio, é cerca de

2,5 vezes que o poder de combustão de um hidrocarboneto (gasolina, gasóleo, metano, propano, etc...), como mostra a Tabela 2 (Santos & Santos, 2005). Os resultados das simulações apresentaram operações estáveis. Tais resultados são indicados pelo fechamento do balanço de massa (erro < 0,01) e pelas condições operacionais. A Tabela 3 apresenta a composição

química do respectivo gás utilizado nas simulações. Os valores de temperatura, da interface do leito de sinterização com a esteira, obtidos pelas simulações, são apresentados na Figura 1. Foram feitas as seguintes considerações nas simulações:

- Cenário-base: condição de operação de uma planta industrial de alta produtividade.

Tabela 2  
Poder calorífico de  
diferentes combustíveis.

Combustível	Valor do Poder Calorífico Superior (a 25°C e 1 atm)	Valor do Poder Calorífico Inferior (a 25°C e 1 atm)
Hidrogênio	141,86 KJ/g	119,93 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g	50,02 KJ/g
Propano	50,36 KJ/g	45,6 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g	44,5 KJ/g
Gasóleo	44,8 KJ/g	42,5 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g	18,05 KJ/g

Tabela 3  
Gás de Coqueria.

Componentes	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Fração em massa	0,25	0,005	0,005	0	0,10	0,06	0,03	0,55

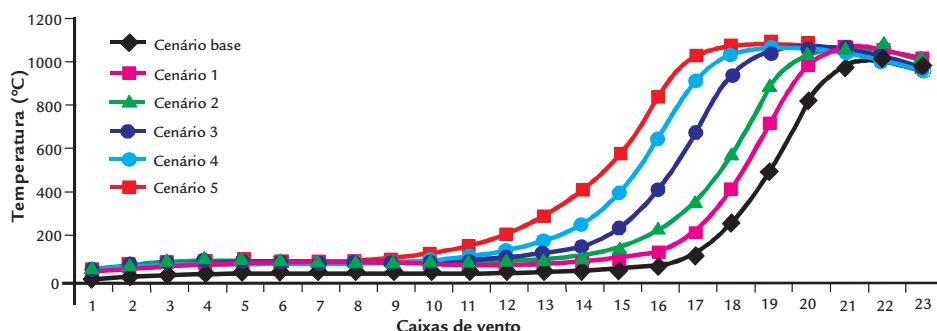
- Cenário 1: substituição parcial do combustível sólido por GC com 2% do volume do gás de sucção, alimentado pelas regiões das 10 primeiras caixas de vento.
- Cenário 2: mesma configuração do cenário 1 porém com 4% do volume do gás de sucção.
- Cenário 3: mesma configuração do cenário 1 porém com 6% do volume do gás de sucção.

- Cenário 4: mesma configuração do cenário 1 porém com 8% do volume do gás de sucção.
- Cenário 5: mesma configuração do cenário 1 porém com 10% do volume do gás de sucção.

Quando se observa a Figura 1, pode-se visualizar, primeiramente, um perfil básico de temperatura (característico do processo). Também é possível observar os casos alternativos descritos a

seguir. Quando o GC foi adicionado no processo, aconteceu um pequeno deslocamento do perfil de temperatura para a esquerda, porém mantendo os mesmos níveis de temperatura no final da esteira. Isso aconteceu, gradativamente. Observou-se que, quanto maior o volume de gás injetado no processo, maior o deslocamento da curva, proporcionando o alargando da frente de combustão, como é visto na Figura 2. Com isso, o tempo de

Figura 1  
Valores de temperatura  
previstos pelo modelo.



residência do material, na temperatura de sinterização, foi aumentado, proporcionando uma melhor aglomeração.

A composição química do sínter obtida com as simulações é vista na Tabela 4. O modelo mostra que não ocorre variação significativa na composição química do sínter, apesar da injeção do GC.

Outros aspectos importantes são sumarizados na Figura 3, na qual é apresentado o consumo de combustível por tonelada de sínter, a produtividade, a

quantidade de cálcio-ferrita no sínter e a quantidade de CO<sub>2</sub> no gás de saída, processos obtidos com as simulações.

A Figura 3(A) mostra o consumo previsto de combustível, quando foi feita a substituição parcial de combustível sólido pelo combustível gasoso. O consumo de finos de coque diminuiu com a injeção do gás de coqueria, existindo, nesse caso, a possibilidade da utilização de um combustível sólido de qualidade inferior, porém isso não foi abordado nas simula-

ções. Entretanto os resultados mostram que tal operação eleva o consumo global de energia do processo. Na Figura 3(B), é apresentada a produtividade obtida em cada cenário. Pode-se observar que a produtividade aumenta com a injeção do GC, fato esperado, pois, quando foi retirada uma parcela de finos de coque no processo, esse volume foi substituído por finos de minério de ferro. Como foi mantido o leito com as mesmas dimensões em todos os cenários, espera-

Tabela 4  
Composição química do sínter.

Composição do sínter	Cenário-Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
CaO (%)	6,70	6,79	6,94	6,75	6,74	6,74
MgO (%)	1,20	1,20	1,20	1,21	1,21	1,21
SiO <sub>2</sub> (%)	5,17	5,17	5,17	5,21	5,21	5,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,81	3,81	3,81	3,84	3,84	3,84
C (%)	0,34	0,30	0,28	0,24	0,24	0,25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	82,64	82,56	82,48	82,67	82,69	82,68
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (%)	0,10	0,09	0,05	0,01	0,01	0,01

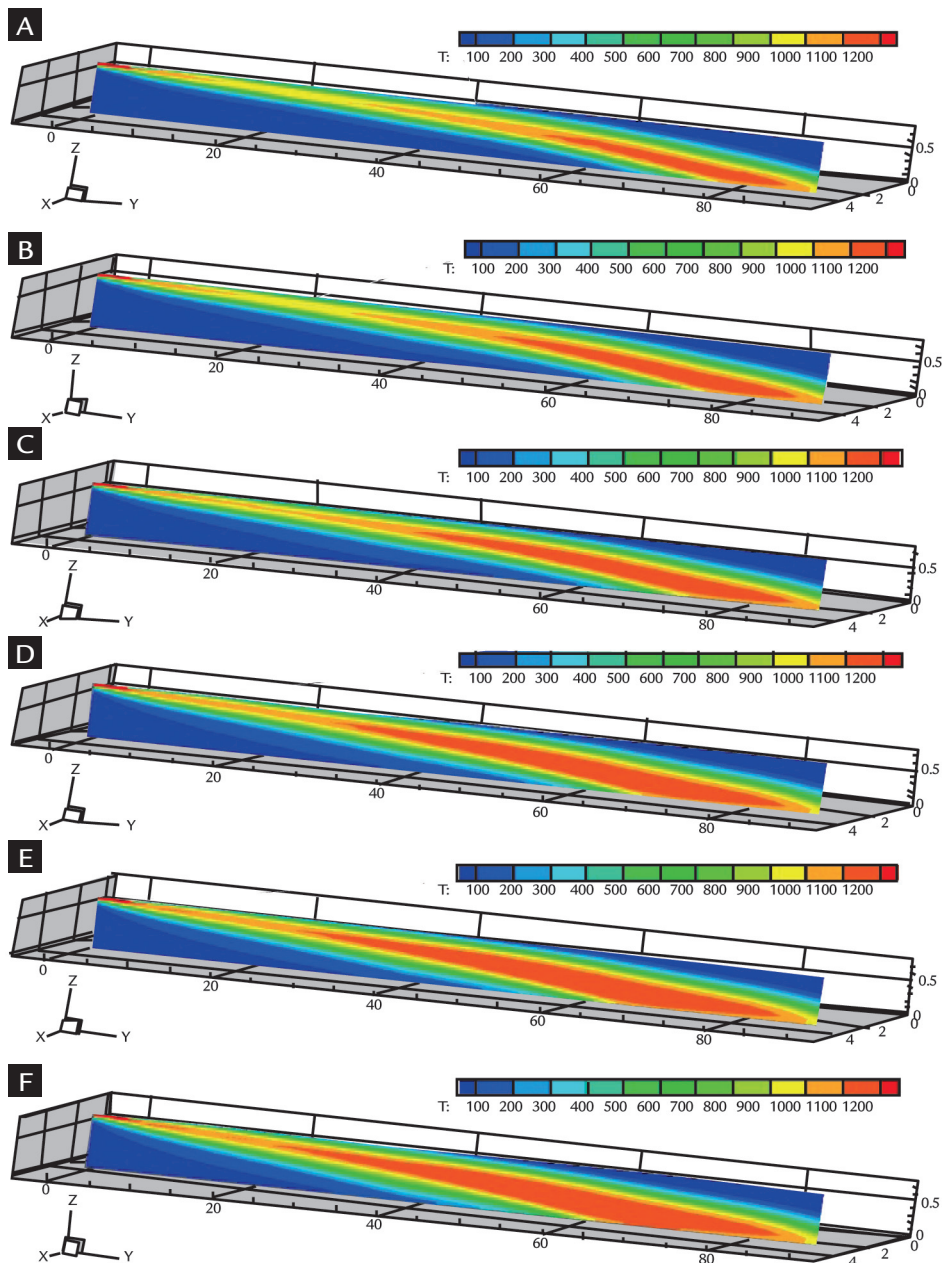


Figura 2  
Frente de combustão  
prevista pelo modelo.  
(A) Cenário base.  
(B) Cenário 1.  
(C) Cenário 2.  
(D) Cenário 3.  
(E) Cenário 4.  
(F) Cenário 5.

se maior produtividade. A Figura 3(C) apresenta a quantidade de cálcio-ferrita no sínter estimada pelo modelo. Pode-se observar que a injeção de gás de coqueria aumenta a quantidade da mesma em todos os casos. Isso é justificável devido ao aumento do tempo de residência do material à temperatura elevada. O modelo estima o valor de cálcio-ferrita através do diagrama de equilíbrio, o qual é baseado no histórico térmico do material. Quanto maior o tempo de residência do material à temperatura elevada, maior a quantidade de cálcio-ferrita (Guilherme et al., 2011). Na Figura 3(D), foi apre-

sentada a quantidade de  $\text{CO}_2$  no gás de saída. Foi percebido que com a injeção do GC foi possível reduzir os níveis de  $\text{CO}_2$  no gás de saída. Esse fato é muito importante nos dias atuais, pois a redução da emissão de  $\text{CO}_2$  se tornou uma questão urgente na indústria de aço como medida preventiva contra o aquecimento global (Oyama et al., 2011).

O processo de sinterização é usado para fundir, parcialmente, os finos de minério de ferro, de maneira que sua resistência mecânica dependerá da quantidade e tipo de material fundido entre as partículas. Também é utilizado para

agregá-los. A resistência mecânica do sínter influencia a produtividade da sinterização, uma vez que uma baixa resistência mecânica resulta numa alta taxa de reciclagem de finos. Com o aumento do tempo de residência do material à elevada temperatura, aumenta-se a resistência mecânica do material, pois aumenta-se a quantidade de materiais fundidos e, por consequência, aumenta-se a produtividade do processo, fato que é devido à menor quantidade de finos. No entanto, deve-se evitar a formação de fases vítreas, uma vez que elas fragilizam o material (Guilherme et al., 2011).

#### 4. Conclusões

Esse trabalho investiga o desempenho do processo de sinterização que opera com a injeção de GC. O modelo

é baseado em equações de *momentum*, energia e espécies químicas de duas fases coexistindo simultaneamente no leito de

sinterização. A utilização de gás combustível mostra-se uma técnica promissora. Tendo como base os resultados de simu-

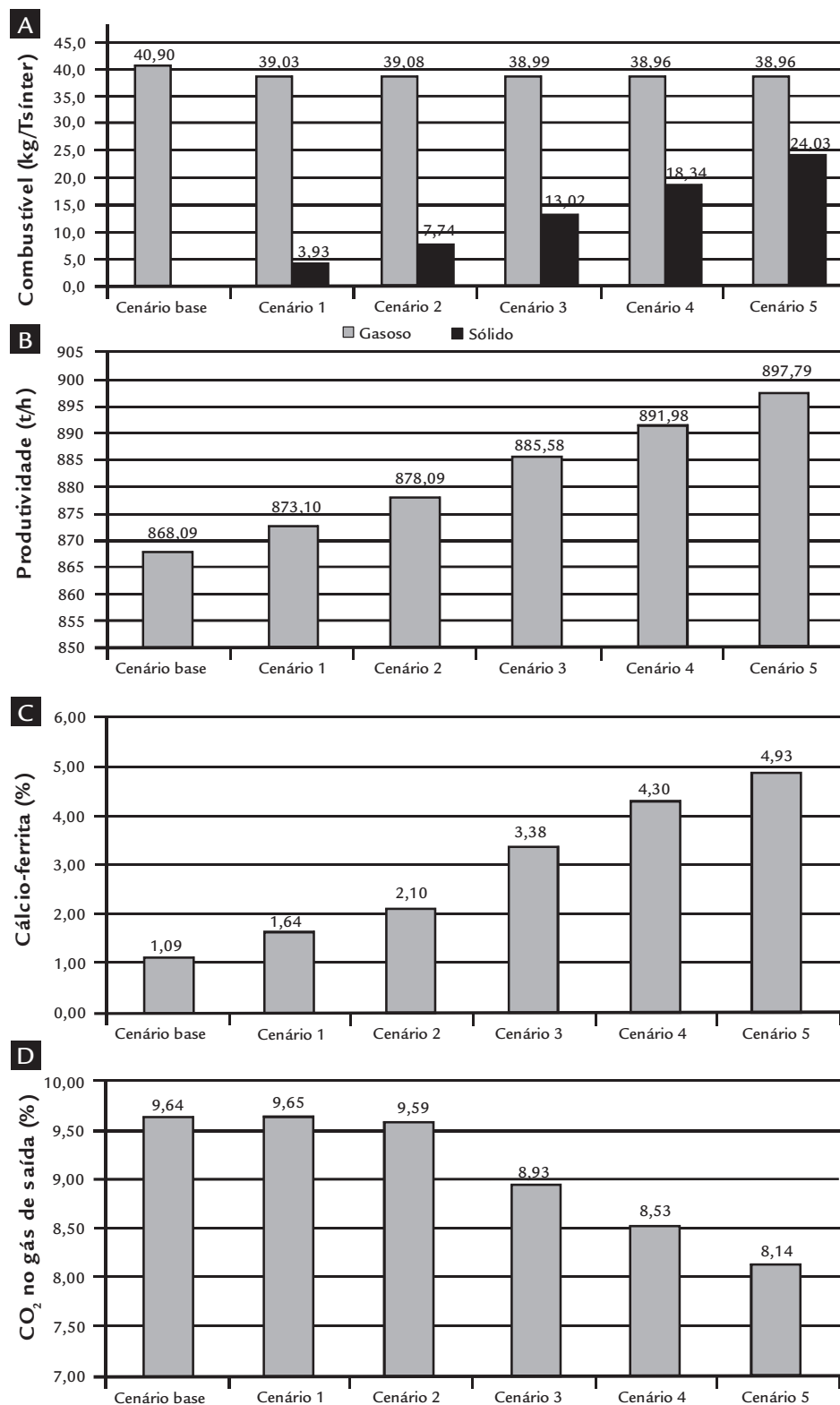


Figura 3

(A) Previsão de consumo de combustível.

(B) Produtividade.

(C) Quantidade de cálcio-ferrita

(D) Quantidade de CO<sub>2</sub> no gás de saída.

lação são enfatizadas algumas conclusões, as quais estão apresentadas a seguir.

Quando se utiliza o gás de coque no processo de sinterização, tem-se menor consumo de finos de coque. No entanto, o consumo total de energia do processo é elevado, embora seja possível a utilização de combustível sólido de menor qualidade, o que não foi explorado nesse trabalho.

As simulações mostraram que a

injeção de GC proporciona um alargamento gradativo na frente de combustão, ou seja, quanto maior a quantidade de gás injetado, maior a espessura da frente de combustão. Tal processo, por consequência, aumenta a fração de cálcio-ferrita no sinter, melhorando a redutibilidade do mesmo. Esse aumento do tempo de residência do material à elevada temperatura, proporciona maior formação de fase líquida e, por

consequência, maior produtividade do processo, pois, dessa forma, haverá melhor aglomeração, aumentando a resistência mecânica do sinter.

Outro aspecto importante a ser destacado está relacionado com a emissão de CO<sub>2</sub>, pois o processo apresenta resultados que mostram que a injeção do GC, no processo de sinterização, reduz a emissão de CO<sub>2</sub>, fato importantíssimo nos dias atuais devido ao efeito estufa.



## 5. Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro concedido e à Universidade Federal Fluminense (UFF), que forneceu toda a estrutura necessária para a realização desse trabalho.

## 6. Referências bibliográficas

- CASTRO, J. A., SILVA, A. J., NOGAMI, H., YAGI J. Modelo matemático tridimensional multi-fásico da geração de dioxinas no leito de sinterização. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v. 2, n. 1, p. 45-49, jul.-set. 2005.
- CASTRO, J. A., BALTAZAR, A. W. S. Estudo numérico da reciclagem de CO<sub>2</sub> na zona de combustão do alto-forno. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v.6, n. 1, p. 13-18, jul.-set. 2009
- CASTRO, J. A., NOGAMI, H., YAGI, J. Numerical investigation of co-injection of pulverized coal and natural gas to the with oxygen enrichment. *ISIJ International*, v. 42, n. 11, p. 1203-11, Nov. 2002.
- GEERDES, M., TOXOPEUS, H., VLIET, C. V. D. *Modern blast furnace ironmaking - an introduction*. Ijmuiden, 2004.
- GUILHERME, V. S. *Estudo da emissão de dioxinas e furanos na planta de sinterização*. Volta Redonda: UFF, Jun. 2010. (Dissertação de Mestrado).
- GUILHERME, V. S., FRANÇA, A. B., CASTRO, J. A. Utilização de gás combustível na sinterização de minério de ferro. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO & TECNOLOGIA MINERAL, 41. *Anais...* Vila Velha, ES, 2011.
- OYAMA, N., IWAMI, Y., YAMAMOTO, T., MACHIDA, S., HIGUCHI, T., SATO, H., SATO, M., TAKEDA, K., WATANABE, Y., SHIMIZU, M., NISHIOKA, K. Development of secondary-fuel injection technology for energy reduction in the iron ore sintering process. *ISIJ International*, v. 51, n. 06, p. 913-921, Mar. 2011.
- PATANKAR, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Washington: Hemisphere Publishing Company, 1985. 197p.
- SANTOS, F. M., SANTOS, F. A. O combustível “hidrogênio”. *RE - Educação, Ciência e Tecnologia*, n. 31, maio de 2005.

---

Artigo recebido em 08 de dezembro de 2011. Aprovado em 23 de janeiro de 2012.