

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

Jose Adilson de Castro

Programa de Pós-Graduação Engenharia Metalúrgica, UFF - Universidade Federal Fluminense, Pólo de Volta Redonda.
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 sinter. 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 CO₂ 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 CO₂ 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 sinter 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 CO₂ 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 sínter, 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 sínter. 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.

$$\frac{\partial(\rho_i \epsilon_i \phi_{i,k})}{\partial t} + \text{div}(\rho_i \epsilon_i \vec{V}_i \phi_{i,k}) = \text{div}(\Gamma_{\phi_{i,k}} \text{grad}(\phi_{i,k})) + S_{\phi_{i,k}} \quad (1)$$

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, CO ₂ , O ₂ , H ₂ , H ₂ O, N ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀ , C ₁₂ OH ₅ Cl ₃ , C ₁₂ O ₂ H ₅ Cl ₃ , HCl, C ₆ H ₆ , C ₆ H ₃ Cl ₃ , C ₆ H ₃ Cl ₂ OH	
Sólido	Minério	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, H ₂ O, SiO ₂ , C ₁₂ OH ₅ Cl ₃ , C ₁₂ O ₂ H ₅ Cl ₃ , Al ₂ O ₃ , MgO, Fe ₂ Cl ₆ H ₁₂ O ₆ , CaO
	Sínter (retorno)	C, Volatiles, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, H ₂ O, Ganga, SiO ₂ , C ₁₂ OH ₅ Cl ₃ , C ₁₂ O ₂ H ₅ Cl ₃ , Al ₂ O ₃ , MgO, Fe ₂ Cl ₆ H ₁₂ O ₆ , CaO
	Finos de Coque ou Carvão	C, Volatiles, H ₂ O, SiO ₂ , C ₁₂ OH ₅ Cl ₃ , C ₁₂ O ₂ H ₅ Cl ₃ , Al ₂ O ₃ , MgO, Fe ₂ O ₃ , Fe ₂ Cl ₆ H ₁₂ O ₆ , CaO
	Materiais Fundidos	C, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, MgO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , C ₁₂ OH ₅ Cl ₃ , C ₁₂ O ₂ H ₅ Cl ₃ , CaO
	Torta de Sínter	Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeO, Fe, H ₂ O, SiO ₂ , C ₁₂ OH ₅ Cl ₃ , C ₁₂ O ₂ H ₅ Cl ₃ , Al ₂ O ₃ , MgO, Fe ₂ Cl ₆ H ₁₂ O ₆ , CaO

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 ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	N ₂	CO	CO ₂	H ₂
Fração em massa	0,25	0,005	0,005	0	0,10	0,06	0,03	0,55

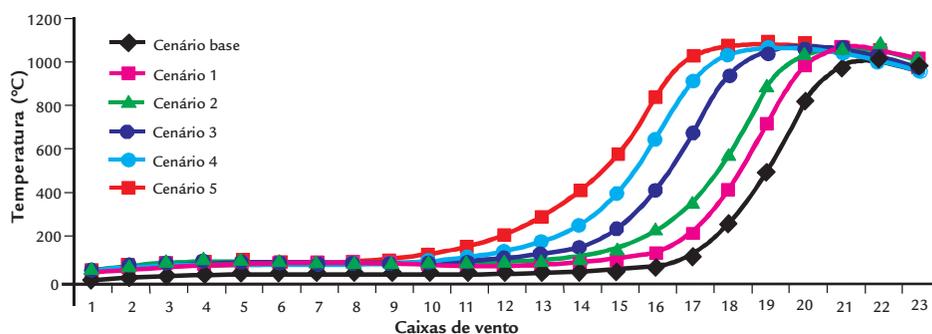
- Cenário 1: substituição parcial do combustível sólido por GC com 2% do volume do gás de sucção, alimentado pelas regiões das 10 primeiras caixas de vento.
- Cenário 2: mesma configuração do cenário 1 porém com 4% do volume do gás de sucção.
- Cenário 3: mesma configuração do cenário 1 porém com 6% 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 CO₂ 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 ₂ (%)	5,17	5,17	5,17	5,21	5,21	5,21
Al ₂ O ₃ (%)	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 ₂ O ₃ (%)	82,64	82,56	82,48	82,67	82,69	82,68
Fe ₃ O ₄ (%)	0,10	0,09	0,05	0,01	0,01	0,01

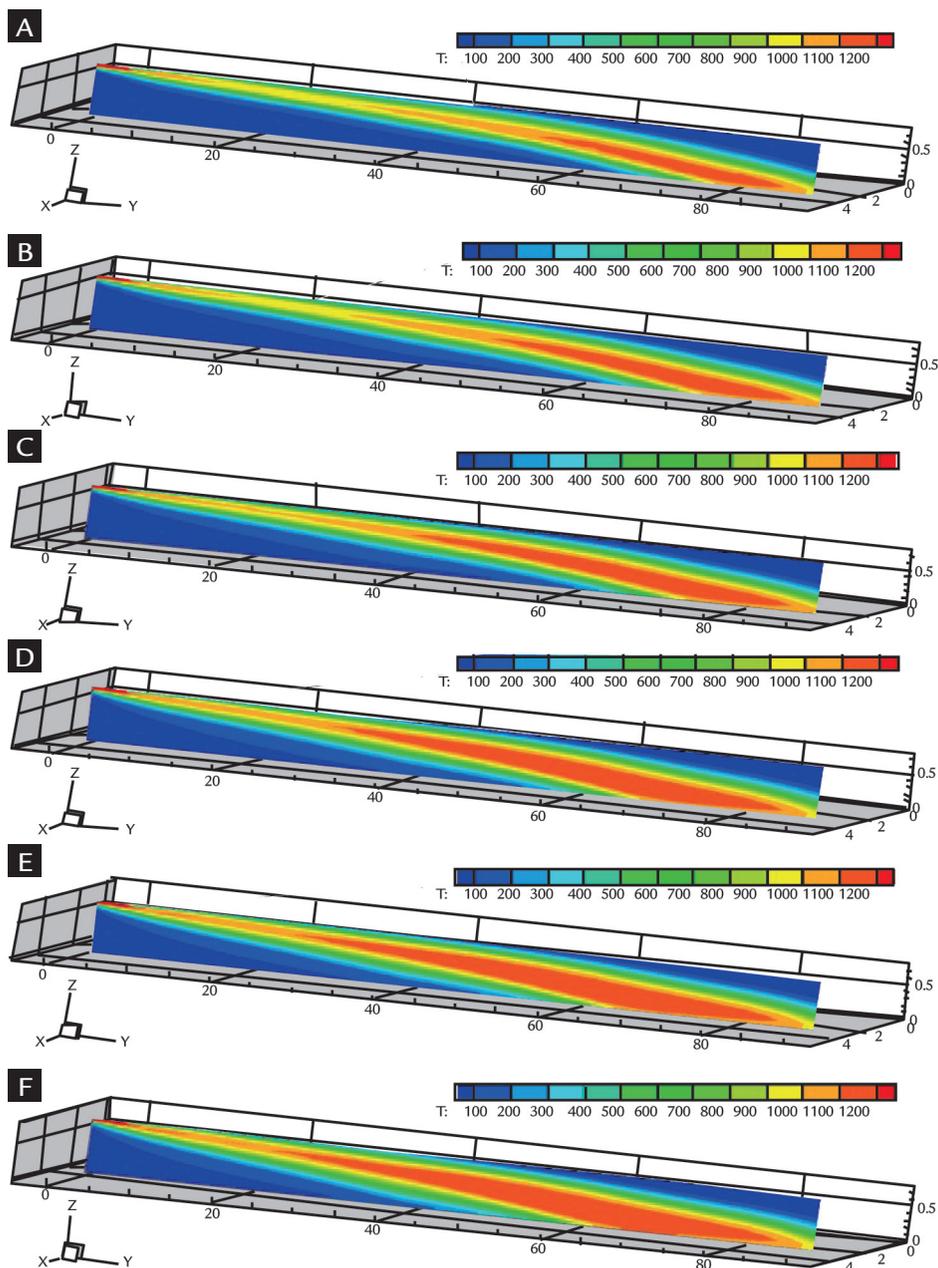


Figura 2
Frente de combustão
prevista pelo modelo.
(A) Cenário base.
(B) Cenário 1.
(C) Cenário 2.
(D) Cenário 3.
(E) Cenário 4.
(F) Cenário 5.

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 CO_2 no gás de saída. Foi percebido que com a injeção do GC foi possível reduzir os níveis de CO_2 no gás de saída. Esse fato é muito importante nos dias atuais, pois a redução da emissão de 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-

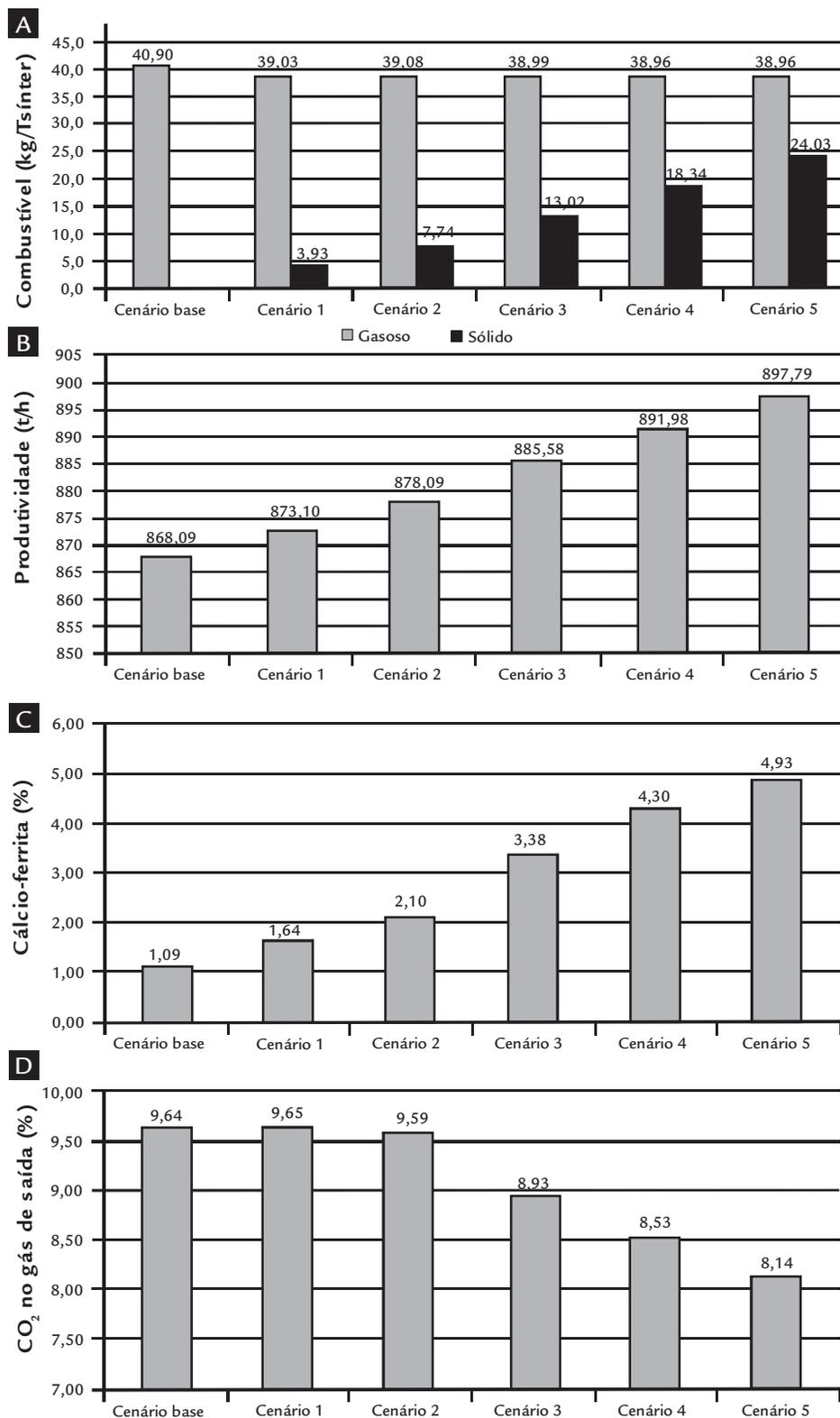


Figura 3
 (A) Previsão de consumo de combustível.
 (B) Produtividade.
 (C) Quantidade de cálcio-ferrita
 (D) Quantidade de CO₂ no gás de saída.

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 reutilização 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 CO₂, pois o processo apresenta resultados que mostram que a injeção do GC, no processo de sinterização, reduz a emissão de CO₂, 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 CO₂ 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.