

# UTILIZAÇÃO DE GÁS COMBUSTÍVEL NA SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO<sup>1</sup>

Vagner Silva Guilherme<sup>2</sup>  
Alexandre Boscaro Franca<sup>2</sup>  
Jose Adilson de Castro<sup>2</sup>

## Resumo

Visando estudar alternativas ao processo tradicional de sinterização, a utilização de gases combustíveis tais como GN, GC e GLP tem sido proposta como tecnologias capazes de proporcionarem reduções significativas no consumo de combustíveis sólidos, além de propiciarem maior controle da qualidade física e metalúrgica do sinter. Neste estudo, é utilizado um modelo de sinterização para avaliar a injeção de gás combustível. O modelo de sinterização é baseado em equações de transporte de *momentum*, energia e espécies químicas em sistemas multifásicos. São analisados quatro casos de injeção de gás combustível visando uma operação estável do processo. Resultados de simulação indicam que um menor consumo de combustível sólido com a injeção de gás combustível e aumento da frente de combustão fez aumentar a fração de cálcio silicatos que por consequência melhora a redutibilidade.

**Palavras-chave:** Sinterização; GN; GC; GLP; Simulação computacional.

## USE OF GAS FUEL IN IRON ORE SINTERING

### Abstract

In order to study alternatives to the traditional process of sintering, the use of gaseous fuels such as NG, CG and LPG has been proposed as technologies that can provide significant reductions in consumption of solid fuels, and also propitiate better quality control of physical and metallurgical sinter. In this study, we used a model of sintering to evaluate the injection of gas fuel. The sintering model is based on transport equations of momentum, energy and chemical species in multiphase systems. We analyze four cases of injection of gas fuel to a stable operation of the process. Simulation results indicate that a lower consumption of solid fuel with the injection of gas and increase of the fuel combustion front increased the fraction of calcium silicates, which consequently improves the reductibility.

**Key words:** Sintering; NG, CG, LPG, Computer simulation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

<sup>2</sup> Programa de Pós Graduação Engenharia Metalúrgica/UFF/Pólo de Volta Redonda.

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de sinterização tem por finalidade produzir sinter para o processo de redução em altos fornos. Envolve mecanismos complexos de troca de calor, *momentum* e massa. Um dos aspectos mais relevantes do processo é o consumo energético que incide sobre custo do gusa e 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 a composição das matérias primas utilizadas na sinterização e no histórico térmico na esteira de sinterização.

A qualidade química, mecânica e metalúrgica, associada a uma alta taxa de produtividade e de baixo consumo de energia, está relacionada, entre outros fatores, com a qualidade intrínseca dos minérios de ferro empregados na mistura a sintetizar. Na maioria das usinas siderúrgicas brasileiras, o sinter é produzido a partir de uma mistura composta por vários minérios, sendo que em alguns casos são empregadas dezenas de tipos diferentes. O sinter apresenta uma grande heterogeneidade química e microestrutural resultado da fusão total, parcial ou incompleta de alguns constituintes minerais da carga.<sup>(1)</sup>

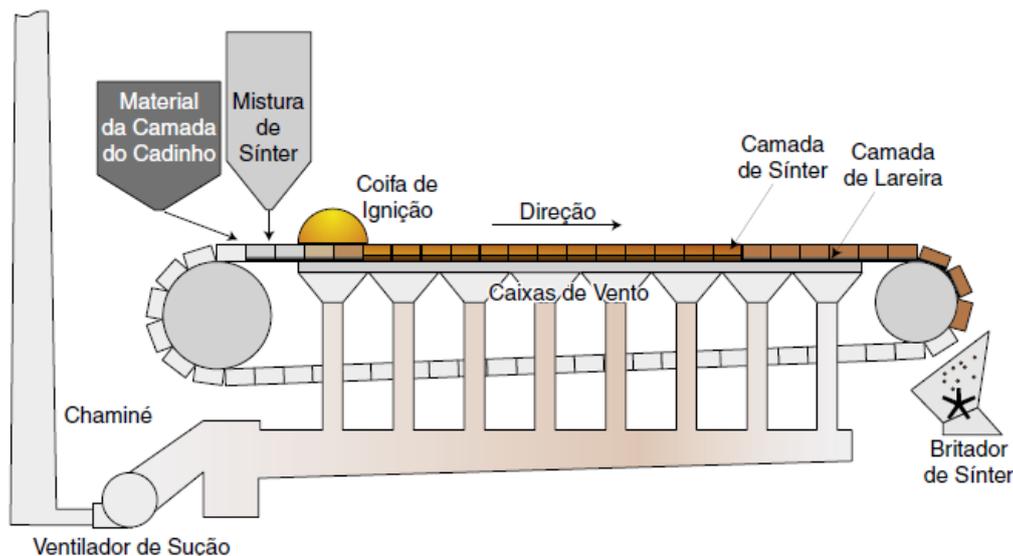


Figura 1. Esquema básico de um sinterizador.<sup>(2)</sup>

O processo conforme mostrado na Figura 1 é realizado em uma esteira móvel, onde a mistura de minério (*sinter feed*), fins de coque, calcário e água é continuamente carregada formando um denso leito. Nos primeiros metros da esteira, os queimadores a gás natural e ar promovem a ignição. O ar é então succionado através do leito poroso e direcionado para as caixas de vento localizadas abaixo da esteira rolante. O contato do ar quente com a moinha de coque da mistura promove a combustão deste gerando energia para a propagação da chamada frente de combustão, formando uma fina zona que se propaga pelo leito, à medida que a esteira se move. Várias reações químicas e transformações de fases ocorrem no interior do leito, parte do material se torna pastoso tornando-se novamente sólido ao trocar calor com o gás frio que esta sendo succionado.<sup>(3)</sup>

## 2 METODOLOGIA

Através da discretização das equações de transporte, utilizando-se o método de volumes finitos,<sup>(4)</sup> podemos realizar simulações para previsão e caracterização do processo estudado. Objetivando simular os fenômenos internos na sinterização, o presente trabalho busca verificar se a injeção de gás combustível ao longo da esteira no processo de sinterização confere melhores propriedades físicas e mecânicas ao sínter. Para isso iremos usar um modelo computacional para simulação do processo, desenvolvido por Castro et al.<sup>(5)</sup> No mesmo implementaremos varias situações para avaliar a qualidade do produto.

O modelo consiste em formular os fenômenos internos do leito de sinterização por meio de equações de transporte de *momentum*, energia e espécies químicas para cada fase envolvida. Neste estudo são consideradas duas fases (sólido e gás), o conceito de interação das fases é mostrado na Figura 2.

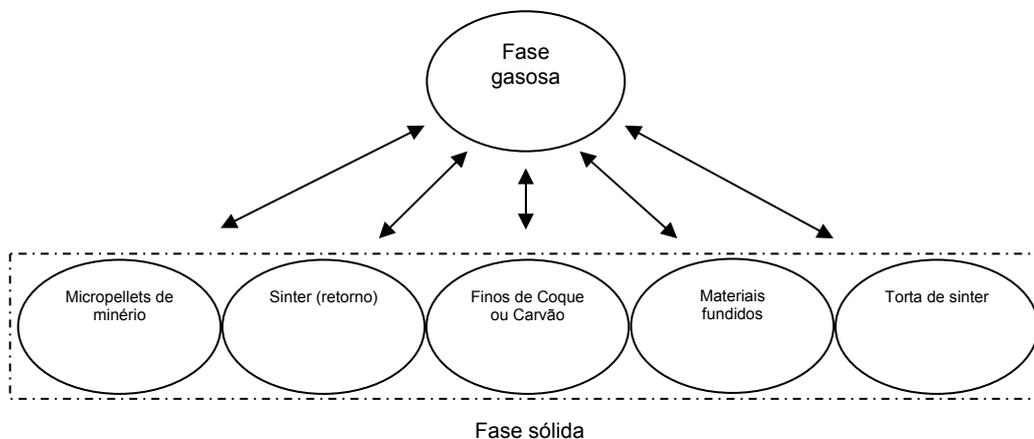


Figura 2. Interação entre as fases.<sup>(3)</sup>

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 ( $H$ ).  $\rho$  e  $\varepsilon$  representam as massas específicas e frações volumétricas das fases, respectivamente, enquanto  $\Gamma$  é a difusividade efetiva, que pode representar viscosidade dinâmica, para o caso das equações de *momentum*, difusividades térmicas quando se tratam das equações de entalpia ou difusividade molecular para as equações de balanço de espécies químicas.<sup>(6)</sup> Nesta equação, o 1º termo do lado esquerdo representa o termo transiente e o segundo quantifica a convecção, enquanto o 1º termo do lado direito é a contribuição devido à difusão e o segundo agrupa os chamados termos fontes.

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

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. A Tabela 1 apresenta as fases e espécies químicas consideradas no modelo.<sup>(7)</sup>

**Tabela 1.** Fases e espécies químicas consideradas no modelo

Fase	Espécie Química	
<b>Gás</b>	CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , 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> , C <sub>12</sub> OH <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , C <sub>12</sub> O <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , HCl, C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub> OH	
<b>Sólido</b>	<b>Minério</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, H <sub>2</sub> O, SiO <sub>2</sub> , C <sub>12</sub> OH <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , C <sub>12</sub> O <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Fe <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> , CaO
	<b>Sínter (retorno)</b>	C, Volatiles, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, H <sub>2</sub> O, Ganga, SiO <sub>2</sub> , C <sub>12</sub> OH <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , C <sub>12</sub> O <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Fe <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> , CaO
	<b>Finos de Coque ou Carvão</b>	C, Volatiles, H <sub>2</sub> O, SiO <sub>2</sub> , C <sub>12</sub> OH <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , C <sub>12</sub> O <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> , CaO
	<b>Materiais Fundidos</b>	C, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , C <sub>12</sub> OH <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , C <sub>12</sub> O <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , CaO
	<b>Torta de Sinter</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, H <sub>2</sub> O, SiO <sub>2</sub> , C <sub>12</sub> OH <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , C <sub>12</sub> O <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Fe <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> , CaO

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do processo de sinterização foi conduzida por meio de cinco condições distintas:

- caso base: condição de operação de uma planta industrial de alta produtividade;
- caso 1: substituição parcial do combustível sólido por Gás Natural (GN) alimentado pelas regiões das 10 primeiras caixas de vento;
- caso 2: a mesma configuração do caso 2, porém ao invés de GN, utilização de Gás de Coqueria (GC);
- caso 3: a mesma configuração alimentando por Gás Liquefeito de Petróleo (GLP); e
- caso 4: a mesma configuração alimentada pela mistura de GN e GC.

O principal objetivo da seleção dos casos apresentados é comparar novas possibilidades com condições atuais de operação do processo. São selecionados um caso base e quatro casos com utilização de gases combustíveis (Nos quatro casos 2% do volume do gás de sucção). Os resultados de simulação apresentaram operações estáveis indicados pelo fechamento do balanço de massa (erro < 0,01) e de condições operacionais. A Tabela 2 apresenta a composição química dos respectivos gases utilizados nas simulações.

**Tabela 2.** Gases combustíveis

GN		Gás de Coqueria		GLP	
Componentes	Fração em Massa	Componentes	Fração em Massa	Componentes	Fração em Massa
CH <sub>4</sub>	0,901	CH <sub>4</sub>	0,25	CH <sub>4</sub>	0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,052	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,005	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,013	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,005	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,50
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,006	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,50
N <sub>2</sub>	0,026	N <sub>2</sub>	0,10	N <sub>2</sub>	0
CO	0	CO	0,06	CO	0
CO <sub>2</sub>	0	CO <sub>2</sub>	0,03	CO <sub>2</sub>	0
H <sub>2</sub>	0,002	H <sub>2</sub>	0,55	H <sub>2</sub>	0

A Tabela 3 mostra algumas condições de operação utilizadas nas simulações e parâmetros operacionais (fornecidos pela simulação) os quais indicam estabilidade operacional.

**Tabela 3.** Parâmetros operacionais calculados pelo modelo

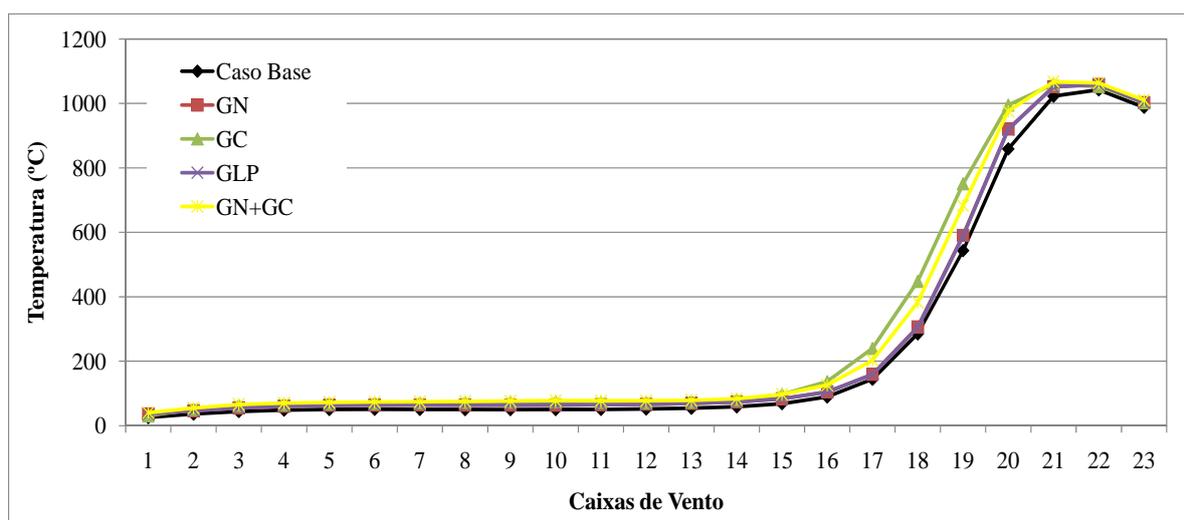
Parâmetros	Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Produtividade (t/h)	868,09	874,42	873,10	874,41	874,00
Temperatura de ignição (°C) *	1680,00	1680,00	1680,00	1680,00	1680,00
Velocidade da esteira (m/mim) *	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95
Gás de Topo (Nm <sup>3</sup> /tsinter)	823,07	820,14	840,36	816,34	829,70
Nº de Caixas de Vento *	23	23	23	23	23
Largura de leito (m) *	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48
Altura do leito (m) *	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
Comprimento do leito (m) *	89	89	89	89	89

Gás de Saída	Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
CO <sub>2</sub> (%)	9,64	9,66	9,65	9,71	9,64
CO (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H <sub>2</sub> (%)	0,00	0,00	2,09	0,00	1,02
H <sub>2</sub> O (%)	10,78	10,79	11,64	10,84	11,26

(\*) Dado de entrada

A Figura 3 apresenta os valores de temperatura ao longo do leito, onde os respectivos casos são comparados ao caso base. Esses resultados de temperatura fornecidos pela simulação são observados na interface do leito de sinterização com a esteira.



**Figura 3.** Valores de temperatura previstos pelo modelo.

Podemos visualizar essa distribuição de temperatura ao longo do leito na Figura 4. A mesma apresenta a distribuição de temperatura para os casos analisados. Nela são observadas poucas mudanças no perfil de temperatura, porém existe um pequeno aumento da espessura da frente de combustão quando o gás combustível é

adicionado ao processo. O perfil de temperatura longitudinal é esperado, devido ao processo se realizar numa esteira móvel. Onde o ar succionado em contato com os finos de coque da mistura promove uma frente de combustão, que se propaga ao longo do leito.

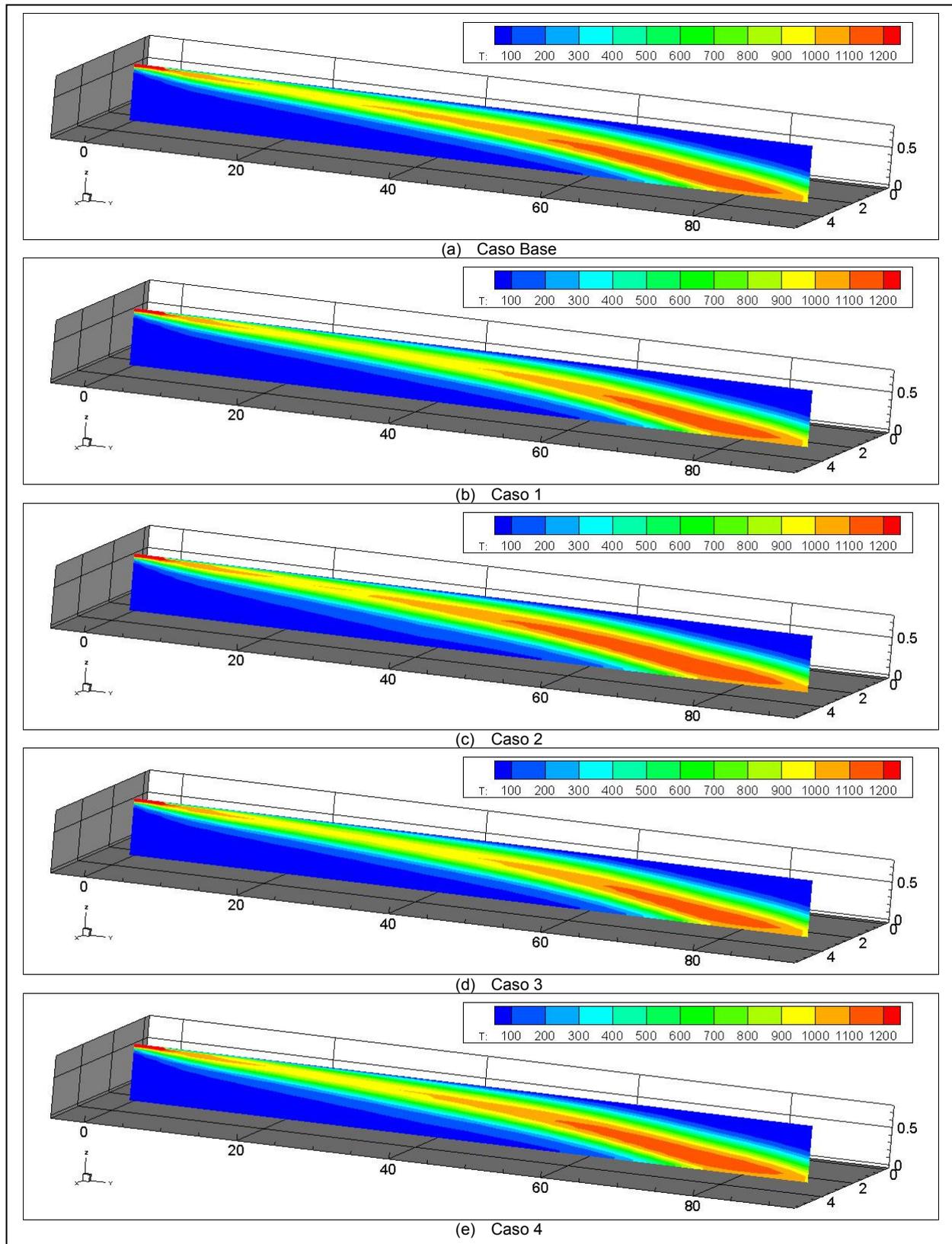


Figura 4. Frente de combustão prevista pelo modelo.

Os resultados de simulação indicam que a utilização de gases combustíveis (GN, GC, GLP e GN+GC) no processo de sinterização aumenta a espessura da frente de combustão, propiciando um aumento do tempo de residência do material na temperatura de sinterização (Figura 5).

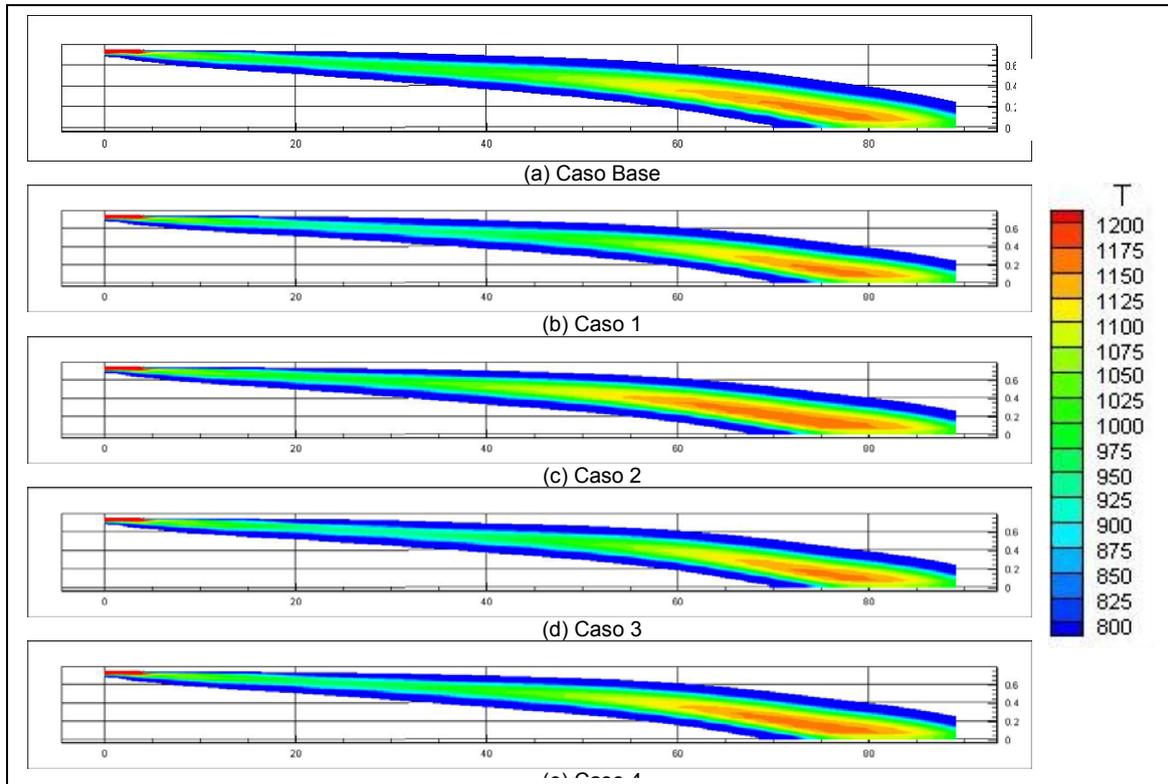


Figura 5 – Posicionamento da frente de combustão no leito de sinterização.

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

Tabela 4. Composição química do sínter

Composição do sínter	Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
CaO (%)	6,71	6,71	6,79	6,71	6,72
MgO (%)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
SiO <sub>2</sub> (%)	5,17	5,17	5,17	5,17	5,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81
C (%)	0,34	0,35	0,30	0,35	0,32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	82,64	82,63	82,56	82,63	82,65
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (%)	0,10	0,10	0,09	0,10	0,09
FeO (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Outros aspectos importantes deste estudo são sumarizados nas Figuras 6 e 7, onde são apresentados o consumo de combustível por tonelada de sínter produzido e a quantidade de cálcio ferrita resultante das simulações.

A Figura 6 mostra os resultados da simulação onde fora feito a substituição parcial de combustível sólido por combustível gasoso. Ao injetarmos gases combustíveis no processo de sinterização o consumo de combustível sólido estimado diminui. Entretanto, tal operação eleva o consumo total de energia do processo, embora seja possível a utilização de combustível sólido de menor qualidade.

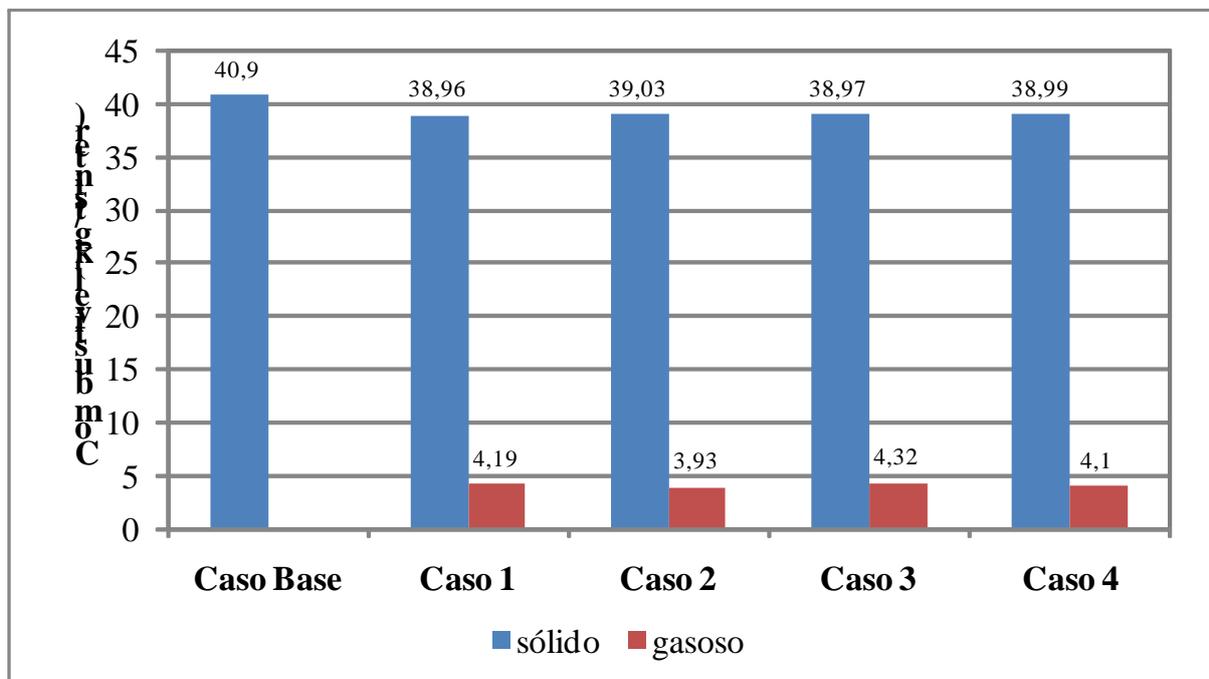


Figura 6. Previsão de consumo de combustível.

A Figura 7 apresenta a quantidade de cálcio ferrita estimada pelo modelo. Podemos observar que a injeção de gás combustível aumenta a quantidade da mesma em todos os casos. Isso é justificável devido o aumento do tempo de residência do material a temperatura elevada. O modelo estima o valor de cálcio ferrita através do diagrama de equilíbrio, onde o mesmo se baseia no histórico térmico do material. Quanto maior o tempo de residência do material à temperatura elevada maior a quantidade de cálcio ferrita.

O processo de sinterização é usado para fundir parcialmente e agregar os finos de minério de ferro, de maneira que sua resistência mecânica dependerá da quantidade e tipo de material fundido entre as partículas. 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 a elevada temperatura, aumentamos a resistência mecânica do material, pois aumentamos a quantidade de materiais fundidos. E por conseqüência, a produtividade do processo devido à menor quantidade de finos, entretanto deve se evitar a formação de fases vítreas que fragilizam o material.

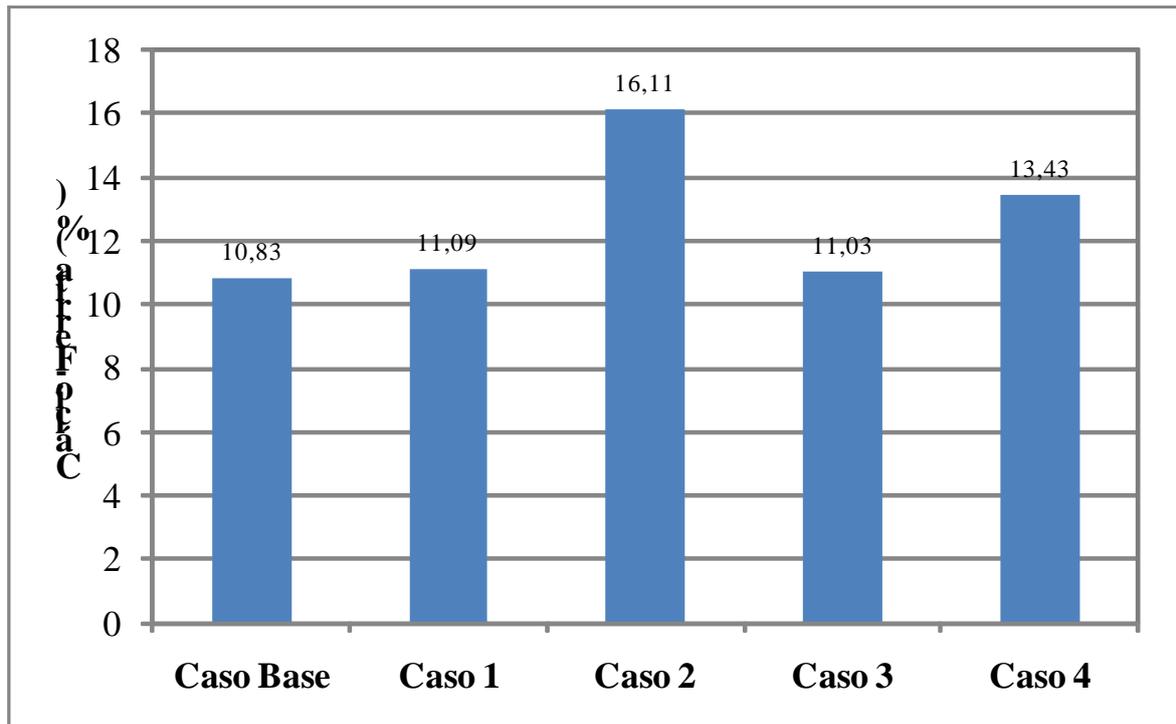


Figura 7. Quantidade de cálcio ferrita.

#### 4 CONCLUSÃO

Este trabalho investiga o desempenho do processo de sinterização operando com a injeção de gás combustível. 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. Baseado nos resultados de simulação é enfatizado as seguintes conclusões:

Ao utilizarmos gases combustíveis no processo de sinterização temos menor consumo de combustível sólido. Porém o consumo total de energia do processo é elevado, embora seja possível a utilização de combustível sólido de menor qualidade, que não foi explorado neste trabalho.

As simulações mostraram que a injeção de gás combustível proporciona um aumento na frente de combustão em todos os casos, que por consequência aumenta a fração de cálcio ferrita no sínter, melhorando a redutibilidade do mesmo. Esse aumento do tempo de residência do material a 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 sínter.

#### Agradecimentos

Ao suporte financeiro concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Universidade Federal Fluminense (UFF) que forneceu toda estrutura necessária para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 VIEIRA, C. B.; ROSIÈRE, C. A.; PENA, E. Q.; SESHADRI, V.; ASSIS, P. S., *Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica*, R. Esc. Minas, Ouro Preto, 56(2): 97-102, abr. jun. 2003.
- 2 GEERDES, M.; TOXOPEUS, H.; VLIET, C. V. D., *Modern Blast Furnace Ironmaking – An Introduction*. Ijmuiden, 2004.
- 3 GUILHERME, V. S., *Estudo da emissão de dioxinas e furanos na planta de sinterização*. Dissertação de Mestrado. Volta Redonda: UFF, Jun. 2010.
- 4 PATANKAR, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Washington: Hemisphere Publishing Company, 1985. 197p
- 5 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.
- 6 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
- 7 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.