

REVISÃO DO MODELO ESTÁTICO DOS CONVERSORES LD DA CSN PARA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE AGENTES EXOTÉRMICOS ¹

Antônio Augusto Martins ²
Carlos Tadeu de Carvalho Reis ²
Elsomar Biancard ³
Rodrigo da Silva Magalhães ²
Wellington Ferreira Barbosa ²

Resumo

A flexibilização no uso de diferentes agentes exotérmicos, quando o balanço térmico do conversor LD é desfavorável, constitui uma importante variável estratégica na fabricação de aço na Aciaria da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional) uma vez que possibilita aliar disponibilidade de oferta com competitividade econômica. Em função deste contexto, o Modelo de Cálculo de Carga da CSN, foi reestruturado para permitir por em prática tal flexibilização. No presente trabalho serão apresentados os cálculos termodinâmicos dos diferentes tipos de agentes exotérmicos (FeSi, SiC e Briquete de FeSi) utilizados no modelo. O Briquete de FeSi apresentou uma melhor relação kcal/real comparado com os outros materiais, entretanto após a realização dos testes práticos em escala industrial, verificou-se que o Briquete de FeSi ocasionou um aumento significativo no volume de escória quando da sua utilização, inviabilizando o seu uso. Quanto ao SiC obteve o segundo melhor resultado em kcal/real, não apresentando nenhuma interferência no processo. Partindo de uma análise técnica e econômica, podemos concluir que o melhor agente exotérmico a ser utilizado entre os três é o SiC com base nos atuais valores de mercado.

Palavras-chave: Exotérmico; Modelo; Silício; Carbetto.

CSN'S STATIC MODEL REVIEW FOR UTILIZATION OF DIFFERENTS TYPES OF EXOTHERMIC AGENTS

Abstract

The relaxation in thermal agents uses, when BOF thermal balance is unfavorable, it's a strategic important variable for steelmaking on CSN steel-plant, since it's combine availability with economical competitiveness. With this issue, CSN Charge Calculation Model, was restructure to put in practice the relaxation. In this paper will be showed thermodynamics calculation of three thermal agentes (FeSi, SiC and FeSi briquette) used in this model. The FeSi Briquette present best factor kcal/R\$ than other materials, though after industrial trials, it's cause a significant increase in slag volume and this prevent your use. The SiC was the second best option, not show any interference to the process. With economical and thecnical analysis, can complete that the SiC is the best choice, with base on maket values.

Key words: Exothermic; Model; Silicon; Carbide.

¹ *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 27 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Engenheiro Metalurgista - CSN*

³ *Engenheiro Metalurgista*

1 INTRODUÇÃO

No processo dos Fornos Básicos a Oxigênio, quando há ocorrência de um balanço térmico desfavorável, surge à necessidade da adição de materiais que forneçam energia ao sistema, no sentido de atingir as condições de final de sopro desejadas. A falta de reserva térmica ocorre devido a diversas condições:

- teor de silício baixo no gusa líquido;
- temperatura baixa no gusa líquido; e
- necessidade de utilização de uma quantidade de sucata na carga a fim de aumentar o volume de produção com a mesma quantidade de gusa líquido.

Vários são os materiais que podem ser utilizados para fornecer energia ao sistema. Entretanto, outros fatores tais como manuseio, armazenagem, rendimento e principalmente custo restringem as opções de materiais exotérmicos.

Os materiais utilizados tradicionalmente como agentes exotérmicos em conversores são: Ferro Silício, Carbetos de Silício e Briquetes a base de silício e carbono. Esses materiais são fornecedores de silício e/ou carbono que, ao serem oxidados, contribuem com um aporte térmico necessário para complementação do balanço térmico do conversor.

Siderúrgicas com limitações no setor de redução tem como opção para o aumento na produção de aço, a prática operacional de aumento na percentual de sucata na carga dos conversores acima do equilíbrio térmico, forçando a utilização dos materiais exotérmicos.

Inicialmente o modelo termo químico da CSN foi concebido para utilização de apenas um agente exotérmico, FeSi. O objetivo principal deste trabalho é a flexibilização do modelo de cálculo de carga para permitir a utilização de diferentes tipos de materiais exotérmicos

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Ferro silício

Liga metálica produzida em fornos elétricos a arco submerso utilizando como matéria prima o quartzo de alta pureza, carvão vegetal, minério de ferro, carepa e sucata. O seu aspecto físico mostra uma superfície metálica prateada com um formato de “pedras” e uma granulometria média em torno de 35 mm.

No refino primário, esta liga tem como função a geração de calor. No refino secundário os objetivos seriam a desoxidação do aço e ou fornecimento do elemento de liga Si ao banho metálico.

2.1.2 Carbetos de silício

O carbeto de silício é geralmente produzido em fornos de resistência elétrica, a partir da areia quartzosa e coque de petróleo, matérias-primas excepcionalmente puras, através da redução carbo-térmica, segundo a fórmula elementar:



Durante o processo de desenformamento parte do material sai na forma granulada e outra parte na forma de finos. Estes finos podem ser aglomerados formando assim o Pellet de Carbetto de Silício, que tem uma resistência mecânica maior que o granulado, que possui uma instabilidade mecânica devido a sua estrutura frouxa e porosa. Esta resistência é importante, pois quando é adicionado, a pressão e o atrito que ocorrem nas colunas de carregamento produzem excesso de partículas finas que, quando enfiados no BOF, produzem desvantagens para o funcionamento do forno.

Conforme o método de fabricação do pellet de carbetto de silício e o tipo de operação do forno, variam não só o peso bruto dos pellets mas também o seu teor de silício, que pode situar-se entre 35% e 75% em massa.

O Pellet de Carbetto de Silício possui um aspecto sólido, de forma retangular e medindo cerca de 50x30x20mm. Sua composição química varia de acordo com a necessidade de utilização.

2.1.3 Briquetes de ferro silício

Os Briquetes de Ferro Silício são obtidos a partir de um processo de aglomeração, no qual as partículas dos resíduos são aglomeradas juntamente com a liga metálica de ferro silício (FeSi -75%), obtendo-se assim um produto com tamanho e parâmetros mecânicos adequados ao seu armazenamento e aplicação.⁽¹⁾

O briquete de ferro silício possui aspecto sólido, de forma retangular e medindo cerca de 70x40x30 mm. Sua composição química varia de acordo com a necessidade de utilização.

2.2 A Metodologia de Formulação do Balanço Térmico

Um balanço térmico deve ser realizado para verificar a geração de calor proporcionada para cada material exotérmico a ser adicionado nos conversores a oxigênio da CSN. Dessa forma, pode-se fazer uma avaliação técnica econômica para a utilização dos diversos agentes capazes de gerar um aporte térmico para o processo, quando este estiver com falta de reserva térmica.

A formulação do balanço térmico consiste em calcular, através da Termodinâmica Clássica, a entalpia inicial (das adições) e a entalpia final (dos produtos) de cada material exotérmico nas temperaturas indicadas. Após os cálculos, a diferença entre entalpia final e a entalpia inicial serve para aquecer o sistema composto por aço mais escória ou, aproximadamente, somente aço (os cálculos foram baseados para a adição de 1 kg de material exotérmico no conversor).

O modelo estático da CSN foi reestruturado de modo a permitir duas estratégias operacionais: operar com percentual de gusa na carga variável, no limite da reserva térmica, com uso de uma quantidade mínima de material refrigerante de modo a absorver as variações do processo de refino, ou operar com gusa fixo na carga, equalizando o balanço térmico através de agentes exotérmicos ou material refrigerante. No segundo caso, na falta de reserva térmica, o nível 2 buscará automaticamente no nível 1 qual agente exotérmico está disponível no silo de adição e fará o cálculo da quantidade necessária a ser adicionada.

2.2.1 Formulação do balanço térmico para o ferro silício

Para o cálculo de entalpia da adição de FeSi no aço, é necessário assumir algumas condições de contorno:

➤ Temperaturas:

- A temperatura de referência é 25°C (298K);
- Ferro Silício (FeSi) a temperatura ambiente (25°C);
- Oxigênio a temperatura ambiente (25°C);
- A cal (CaO) a temperatura ambiente (25°C);
- O aço a temperatura de 1600°C;
- A escória a temperatura 1630°C;

➤ Balanço de Massa:

- 1kg de Fe-Si contendo 75% em massa de silício (0,25kg Fe, 0,75kg Si);
- O oxigênio é suficiente para oxidar todo o silício adicionado a sílica (SiO₂), que vai para escória ou seja, não fica silício dissolvido no aço.
- O ferro do agente exotérmico FeSi (0,25kg) se incorpora totalmente ao aço;
- Para se manter uma basicidade igual a 3 se faz necessária uma adição de 4,821kg de cal;
- Ocorre a formação do composto 2CaO.SiO₂ até consumir completamente um dos dois reagentes. No caso, como cada 60g de SiO₂ reagem com 112g de CaO, a proporção em massa é quase exatamente 2 e assume-se o consumo completo dos dois reagentes, ocorrendo então, na escória, apenas 4,606kg de 2CaO.SiO₂;
- De acordo com o diagrama Fe-Si, como mostra a figura 1, a 0,75 de Si tem-se duas fases: o composto FeSi₂ e Si puro [2]. Porém, 1 kg de FeSi deve ter, aproximadamente, 0,5kg de Si puro e 0,5kg de FeSi₂;

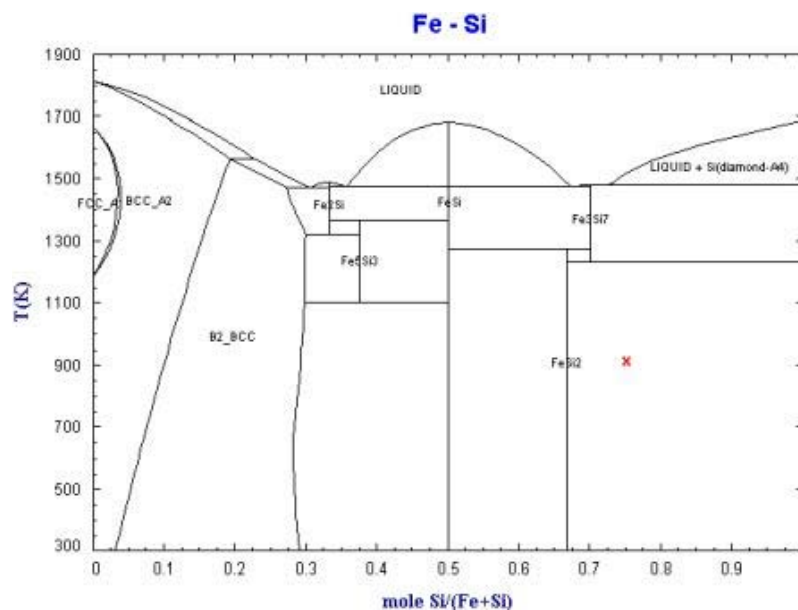


Figura 1: Diagrama de equilíbrio Fe-Si.⁽²⁾

➤ Balanço térmico:

Na formulação do balanço térmico, as entalpias dos elementos puros, à temperatura ambiente, são consideradas iguais a zero. Para simplificar, a entalpia do CaO a temperatura ambiente é também considerada zero.

→ Entalpia inicial: é dada pela soma das entalpias do FeSi e do CaO

- Entalpia do Ferro-Silício:

$$H_{FeSi}^{298} = m_{Si} \times H_{Si}^{298} + m_{FeSi_2} \times \Delta H_{FeSi_2}^{f,298} = m_{FeSi_2} \times \Delta H_{FeSi_2}^{f,298} \quad (2)$$

- Entalpia da cal:

$$H_{CaO}^{298} = 0 \quad (3)$$

→ Entalpia final: é dada pela soma das entalpias do Fe, do composto $2CaO.SiO_2$ e do CaO:

- Entalpia do ferro:

$$H_{Fe}^T = m_{Fe} \times (A + BT)_{Fe} \quad (4)$$

- Entalpia do composto $2CaO.SiO_2$:

$$H_{CaOSiO_2}^{298} = \Delta H_{2CaOSiO_2}^{f,298} + \Delta H_{SiO_2}^{298} \quad (5)$$

- Entalpia do CaO:

$$H_{CaO}^{298} = 0$$

2.2.2 Formulação do balanço térmico para o pellet de carvão de silício

Para o cálculo de entalpia da adição de Carvão de Silício ao aço, as mesmas condições de contorno adotadas para o FeSi são assumidas:

➤ Balanço de Massa:

→ 1kg de pellet de carvão de silício contendo em massa: 73% de SiC, 12% de C, livre, 11% SiO_2 e 4% de CaO.

→ O oxigênio é suficiente para oxidar todo o silício adicionado a sílica (SiO_2), que vai para escória ou seja, não fica silício dissolvido no aço.

→ Para se manter uma basicidade igual a 3 se faz necessária uma adição 3,57kg de cal, já subtraído a cal contida no material.

→ Ocorre a formação do composto $2CaO.SiO_2$ até consumir completamente um dos dois reagentes. No caso, como cada 60g de SiO_2 reagem com 112g de CaO, a proporção em massa é quase exatamente 2 e assume-se o consumo completo dos dois reagentes, ocorrendo então na escória, apenas 3,448kg de $2CaO.SiO_2$

De acordo com o diagrama SiC, como mostra a figura 2, a 0,7 de Si tem-se uma única fase: o composto SiC.

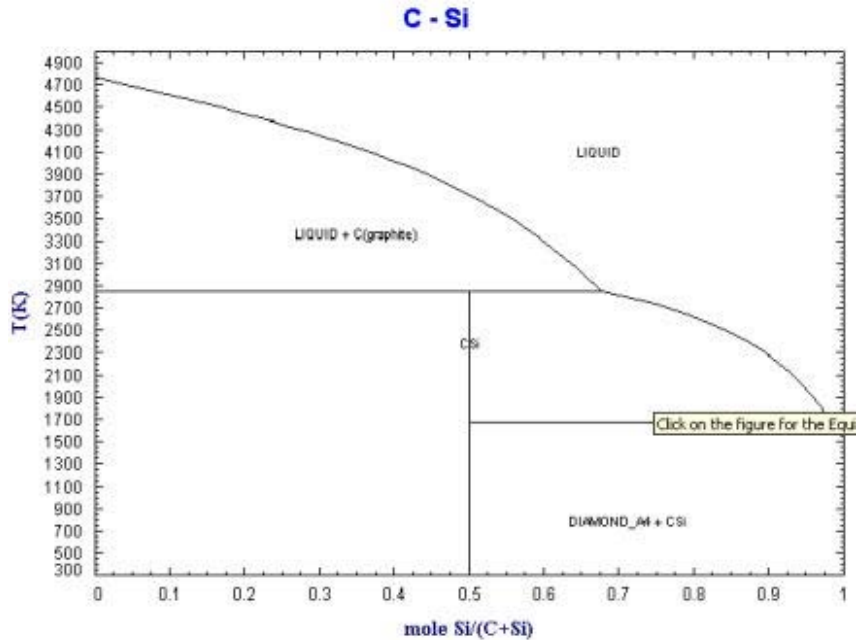


Figura 2: Diagrama de equilíbrio Si-C. ⁽²⁾

➤ **Balço térmico:**

As condições adotadas para o balanço de energia são as mesmas citadas para o FeSi.

→Entalpia Inicial: é dada pela soma das entalpias do FeSi, CaO e do SiC

- Entalpia da sílica (SiO₂):

$$H_{SiO_2}^{298} = m_{SiO_2} \times \Delta H_{SiO_2}^{f,298} \quad (6)$$

- Entalpia da cal (CaO):

$$H_{CaO}^{298} = m_{CaO} \times \Delta H_{CaO}^{f,298} = 0 \quad (7)$$

- Entalpia do carbetto de silício (SiC):

$$H_{SiC}^{298} = m_{SiC} \times \Delta H_{SiC}^{f,298} \quad (8)$$

→Entalpia final: é dada pela soma das entalpias do composto 2CaO.SiO₂, CO e do CaO:

- Entalpia do composto 2CaO.SiO₂

$$H_{CaOSiO_2}^{298} = \Delta H_{2CaOSiO_2}^{f,298} + \Delta H_{SiO_2}^{298} \quad (9)$$

- Entalpia do gás CO:

$$H_{CO}^T = m_{CO} \times \Delta H_{CO}^{f,298} + m_{CO} \times (A + BT)_{CO} \quad (10)$$

- Entalpia da cal (CaO):

$$H_{CaO}^T = m_{CaO} \times \Delta H_{CaO}^{f,298} + m_{CaO} \times (A + BT)_{CaO} \quad (11)$$

2.2.3 Formulação do balanço térmico para o briquete de ferro silício

As mesmas condições de contorno adotadas para o FeSi-75% são válidas para o Briquete de FeSi.

➤ Balanço de Massa:

→ 1kg de Briquete de Ferro Silício contendo em massa: 47% de Si, 22% de C, 0,5% de Fe, 3% de SiC, 13% SiO₂, 11% de CaO e 3,5% de Al₂O₃;

→ O oxigênio é suficiente para oxidar todo o silício adicionado a sílica (SiO₂), que vai para escória ou seja, não fica silício dissolvido no aço.

→ Para se manter uma basicidade igual a 3 se faz necessária uma adição de 3,44 kg de cal (já subtraída do total de cal presente no Briquete de FeSi);

→ Ocorre a formação do composto 2CaO.SiO₂ até consumir completamente um dos dois reagentes. No caso, como cada 60g de SiO₂ reagem com 112g de CaO, a proporção em massa é quase exatamente 2 e assume-se o consumo completo dos dois reagentes, ocorrendo então, na escória, apenas 3,389kg de 2CaO.SiO₂ ;

➤ Balanço Térmico:

Na formulação do balanço térmico as entalpias dos elementos puros a temperatura ambiente são consideradas iguais a zero. Para simplificar, a entalpia do CaO a temperatura ambiente é também considerada zero.

→ Entalpia inicial: é dada pela soma das entalpias da sílica, do CaO, do SiC, do carbono, do alumínio, do silício e do ferro.

- Entalpia da Sílica (SiO₂):

$$H_{SiO_2}^{298} = m_{SiO_2} \times \Delta H_{SiO_2}^{f,298} \quad (12)$$

- Entalpia da Cal (CaO):

$$H_{CaO}^{298} = m_{CaO} \times \Delta H_{CaO}^{f,298} = 0 \quad (13)$$

- Entalpia do Carbetto de Silício (SiC) :

$$H_{SiC}^{298} = m_{SiC} \times \Delta H_{SiC}^{f,298} \quad (14)$$

- Entalpia do Carbono (C):

$$H_C^{298} = m_C \times \Delta H_C^{f,298} = 0 \quad (15)$$

- Entalpia do Óxido de Alumínio (Al₂O₃):

$$H_{Al_2O_3}^{298} = m_{Al_2O_3} \times \Delta H_{Al_2O_3}^{f,298} = 0 \quad (16)$$

- Entalpia do Silício (Si):

$$H_{Si}^{298} = m_{Si} \times \Delta H_{Si}^{f,298} = 0 \quad (17)$$

- Entalpia do Ferro (Fe):

$$H_{Fe}^T = m_{Fe} \times \Delta H_{Fe}^{f,298} = 0 \quad (18)$$

→Entalpia final: é dada pela soma das entalpias do CO, do composto 2CaO.SiO₂, do Al₂O₃, do ferro no aço e do CaO.

- Entalpia do gás CO:

$$H_{CO}^T = m_{CO} \times \Delta H_{CO}^{f,298} + m_{CO} \times (A + BT) \quad (19)$$

- Entalpia do composto 2CaO.SiO₂:

$$H_{CaOSiO_2}^{298} = \Delta H_{2CaOSiO_2}^{f,298} + \Delta H_{SiO_2}^{298} \quad (20)$$

- Entalpia do Óxido de Alumínio (Al₂O₃):

$$H_{Al_2O_3}^{298} = m_{Al_2O_3} \times \Delta H_{Al_2O_3}^{f,298} + m_{Al_2O_3} \times (A + BT) \quad (21)$$

- Entalpia do Ferro (Fe):

$$H_{Fe}^T = m_{Fe} \times \Delta H_{Fe}^{f,298} + m_{Fe} \times (A + BT)_{Fe} \quad (22)$$

- Entalpia do Óxido do CaO:

$$H_{CaO}^T = m_{CaO} \times \Delta H_{CaO}^{f,298} + m_{CaO} \times (A + BT)_{CaO} \quad (23)$$

2.3 Metodologia do Teste Prático

Com a impossibilidade da medição exata da quantidade de energia gerada com a adição de agentes exotérmicos no conversor a oxigênio da CSN, devido às imprecisões do modelo estático, os testes realizados foram apenas para verificar possíveis interferências com o processo. A energia gerada por cada tipo de agente será calculada pela termodinâmica clássica.

Foram testados dois novos agentes exotérmicos nos conversores da CSN, Briquete de FeSi e Pellet de Carbetto de Silício (SiC). Inicialmente foi alterada a porcentagem de sucata usada na carga dos conversores de 15% para 18%, possibilitando assim o uso de agente exotérmico sem grandes adições de material refrigerante (minério de ferro), o que traria grandes prejuízos para o processo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados dos Testes Práticos

No primeiro teste o material exotérmico utilizado no conversor foi o Briquete de FeSi. Em média, adicionou-se 1ton de Briquete de FeSi por corrida. Foi observado um aumento significativo no volume de escória no conversor, sendo necessário a utilização de dois potes para a retirada da escória formada durante o sopro, onde normalmente, utiliza-se somente um pote. Este aumento foi devido ao material conter grande quantidade de sílica (SiO_2) na sua composição, o que leva a um aumento significativo na quantidade de fundentes (cal) a ser adicionado para manter a basicidade desejada para escória. Os demais parâmetros operacionais se mantiveram estáveis, conforme mostra a tabela 3.1, onde se podem comparar resultados operacionais das corridas teste em relação as corridas normais no mesmo período.

Tabela 1: Parâmetros operacionais analisados no teste com o agente exotérmico Briquete de Ferro Silício no conversor da CSN

	Corridas Normais no mesmo período	Corridas Teste
Acerto Simultâneo	49,8	44 %
Consumo Fundente	61,7	78 kg/t
Media temp. FS	1673	1665 °c
Media CFS	0,041	0,057 %
Ressopro	16,1	50 %
FeO	27,86	24,5 %
Basicidade	3,8	3,8
MgO	10,85	12,1 %

Na Tabela 1 os resultados mostraram um aumento de 16,3% no consumo de fundente (cal), promovendo uma elevação do volume de escória no conversor. O aumento no volume de escória gerou atraso operacional devido a necessidade de trocar o pote de escória antes do carregamento da próxima corrida, ocasionando assim, perda de produção.

O segundo material exotérmico testado no conversor foi o Pellet de Carbetto de Silício (SiC). Adicionou-se, em média, 650 kg por corrida sem qualquer prejuízo aos resultados operacionais, conforme mostra a Tabela 2. Entretanto, no momento da adição do SiC, há um aumento no volume de gases gerados no conversor devido a reação do carbono contido no material com oxigênio, gerando gás CO. Para contornar este problema foi estipulado que a adição deverá ocorrer até os três minutos iniciais de sopro, onde a geração de gás é pequena. Quando ocorrer necessidade de adição deste agente exotérmico após este período, a mesma deverá ser em bateladas de 300 kg.

Tabela 2: Parâmetros operacionais analisados no teste com o agente exotérmico Pellet de Carbetto de Silício no conversor da CSN.

	Corridas Normais no mesmo período	Corridas Teste
Acerto Simultâneo	48	61 %
Consumo Fundentes	61,0	71,74 kg.t
Média temperatura FS	1673	1671 °C
Média %C FS	0,048	0,053 %
Pessopro	17,38	12,5 %
FeO	27,14	24,1 %
Basicidade	389	3,6
MgO	10,35	9,9 %

Conforme é mostrado na Tabela 2, os parâmetros analisados tiveram um baixo desvio entre as corridas normais e as de teste. Dessa forma, a utilização do SiC não trouxe nenhuma alteração prejudicial nos parâmetros operacionais da aciaria.

3. 2 Resultados dos Cálculos Termodinâmicos

Nas Tabelas 3, 4 e 5 respectivamente se pode verificar os resultados dos cálculos termodinâmicos para adição do FeSi, Pellet de Carbetto Silício (SiC) e Briquete de FeSi.

Tabela 3: Balanço térmico da adição de 1kg de ferro silício (FeSi –75%) no aço.

Entrada: (a 25°C)		Saída: (a 1600°C)	
Elemento/Substância	Entalpia (Kcal)	Elemento/Substância	Entalpia (Kcal)
Ferro Silício (FeSi)	-77,954	Ferro no aço (Fe)	80,623
Cal (CaO)	0	Composto 2CaO.SiO ₂	-4132,283
		Cal (CaO)	919,749
Total Entrada =	-77,954	Total Saída =	-3131,911
Saída - Entrada = -3053,957 (Kcal)			

Tabela 4: Balanço térmico da adição de 1kg Pellet de Carbetto de Silício (SiC) no aço.

Entrada: (a 25°C)		Saída: (a 1600°C)	
Elemento/Substância	Entalpia (Kcal)	Elemento/Substância	Entalpia (Kcal)
Sílica (SiO ₂)	-395	Composto 2CaO.SiO ₂	-3825,276
Cal (CaO)	0	Gás (CO)	-394,506
Carbetto (SiC)	-273	Cal (CaO)	688,182
Total Entrada =	-668,654	Total Saída =	-3551,599
Saída - Entrada = -2882,946 (Kcal)			

Tabela 5: Balanço térmico da adição de 1kg Briquete de FeSi no aço.

Entrada: (a 25°C)		Saída: (a 1600°C)	
Elemento/Substância	Entalpia (Kcal)	Elemento/Substância	Entalpia (Kcal)
Sílica (SiO ₂)	-467,515	Gás (CO)	-266,192
Cal (CaO)	0	Composto 2CaO.SiO ₂	-3039,523
Carbono (C)	0	Alumina (Al ₂ O ₃)	21,019
Carbetto (SiC)	-11,221	Ferro (Fe)	1,642
Alumina (Al ₂ O ₃)	0	Cal (CaO)	620,981
Silício (Si)	0		
Total Entrada =	-478,737	Total Saída =	-2662,073
Saída - Entrada = -2183,336 (Kcal)			

Os resultados indicam que, dentre os materiais testados, o FeSi-75% é o que gera um maior aporte térmico para o sistema. No entanto, quando se analisa a relação entre a geração de calor e custo do agente exotérmico, o FeSi-75% deixa de ser o agente exotérmico mais atrativo, tendo como base os valores atuais de mercado conforme Tabela 6.

Tabela 6: Avaliação econômica dos diferentes Agentes exotérmicos.

Materiais	Relação
FeSi	534 kcal/R\$
Carbetto Silício	718 kcal/R\$
Briquete FeSi	759 kcal/R\$

4 CONCLUSÕES

As alterações do modelo de cálculo de carga, na situação de balanço térmico desfavorável, para a utilização de agentes exotérmicos diversos, tais como, Pellet de Carvão de Silício, Briquete de Ferro Silício e FeSi (já utilizado), permitiram uma flexibilização operacional em função da disponibilidade de mercado e da compatibilidade por preço desses materiais.

Dentre os agentes exotérmicos considerados, o SiC apresentou a melhor relação Kcal/R\$ para condição atual de mercado, diante da impossibilidade do uso do Briquete de FeSi, devido aos problemas operacionais descritos no presente trabalho. No entanto, o modelo foi preparado para o seu uso com uma composição contendo um maior teor de Si, ainda a ser testada.

REFERÊNCIAS

- 1 LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. *Tratamento de minérios*. 4.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT; 2004. p. 613-34.
- 2 SCIENTIFIC GROUP THERMODATA EUROPE (SGTE) Disponível em: <<http://www.sgte.org>>. Acesso em: 28 nov. 2008.