



MODELO CINÉTICO DA TAXA DE FUSÃO DE SUCATAS DE ALTA DENSIDADE EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO¹

Tiago Seixas Bittencourt²

Sérvio Romulo Medeiros Passos³

Breno Tiago de Souza Albuquerque⁴

Eduardo Sérgio Coelho⁵

Fernando Souza Cândido⁶

Resumo

Um modelo matemático foi proposto para a compreensão dos parâmetros cinéticos envolvidos no fenômeno de fusão de metálicos com elevada densidade em contato com aço líquido. Baseado em equações de transferência de calor e massa buscou-se compreender os mecanismos de fusão de sucatas de alta densidade em Fornos Elétricos a Arco (FEA), bem como as etapas controladoras do fenômeno de fusão. A experiência operacional indica que a fusão de sucatas de alta densidade é pouco influenciada pela ação do arco elétrico, ao contrário do que ocorre com as demais sucatas. No caso de sucatas com densidades superiores a 1,5 t/m³, doravante classificadas como sucatas de alta densidade, o mecanismo de fusão ocorre devido ao contato dessas com o aço líquido (seja ele formado durante a fusão da sucata de baixa densidade, seja pelo aço líquido remanescente da corrida anterior, operacionalmente conhecido como fundo úmido ou pé líquido). Deste modo, a transferência de calor e massa entre o aço líquido e os sólidos de alta densidade dispersos no banho, controla o fenômeno de fusão deste tipo de metálico em fornos elétricos a arco.

Palavras chave: Taxa de fusão; Sucata de alta densidade; Modelo cinético.

KINETIC MODEL OF HIGH DENSITY SCRAP MELTING RATE IN ELECTRIC ARC FURNACES

Abstract

A mathematical model was proposed for the full understanding of the kinetic parameters involved in the high density scrap melting phenomenon in contact with liquid steel. Based on heat and mass transfer equations, the model got to understand the mechanisms of high density scrap melting in Electric Arc Furnaces (EAF), as well, the controlling steps of the melting phenomenon. The operational experience suggests that the high density scrap melting is less influenced by the electric arc action, unlike what occurs with other scraps. In the case of scrap with densities exceeding 1.5 t / m³, from now on classified as high density scrap, the fusion mechanism happen due to contact of itself with the liquid steel (either it's formed during the melt low density scrap, or liquid steel remaining from the previous heat, operationally known as hot heel). Thus, the heat and mass transfer between liquid steel and high density solids dispersed in the bath controls the fusion phenomenon for this type of scrap in electric arc furnaces.

Key words: Melting rate; High density scrap; Kinetic model.

¹ *Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro de Desenvolvimento, M.Sc. Companhia Siderúrgica Nacional*

³ *Engenheiro Especialista. Companhia Siderúrgica Nacional*

⁴ *Supervisor de Fornos. Companhia Siderúrgica Nacional*

⁵ *Gerente de Aciaria de Aços Longos. Companhia Siderúrgica Nacional*

⁶ *Gerente Geral de Produção de Aços Longos, M.Sc. Companhia Siderúrgica Nacional*



1 INTRODUÇÃO

A crescente ofensiva da produção de aço via rota semi integrada, aliado ao complexo modelo de recirculação de sucata ferrosa no mercado de metálicos, vem despertando interesse particular de engenheiros e pesquisadores do mundo todo, a respeito dos mecanismos envolvidos na operação de fusão e refino em Fornos Elétricos a Arco (FEA).

A disparidade entre o incremento dos volumes de produção de aço e a disposição dos bens de consumo para a reciclagem, cria uma dicotomia no mercado de metálicos, além de uma instabilidade na relação de oferta e demanda de sucata para a produção de aço via rota semi integrada. Os modelos de recirculação de sucata atualmente aceitos contemplam uma vida econômica média para cada bem de consumo, que varia de nação para nação, bem como possui elevada variação entre bens de consumo. Estudos recentes divulgados pelo IaBr (Instituto Aço Brasil) indicam que o tamanho da disponibilidade de metálicos no mercado é da ordem de 400 kg/t aço bruto produzido, dividido em três classes a saber: (i) sucata interna (30 kg/t), proveniente da recirculação no interior da própria siderúrgica; (ii) sucata industrial (140 kg/t), advinda das perdas de processo nos clientes das siderúrgicas (montadoras, embaladoras, etc) e; (iii) sucata de obsolescência (230 kg/t), fruto da recirculação dos bens de consumo da sociedade.⁽¹⁾

Dado o exposto, é razoável pensar que cargas alternativas devem ser pensadas e desenvolvidas como sucedâneos à sucata ferrosa em Fornos Elétricos. Atualmente, uma prática já consolidada é a utilização de Ferro Gusa (sólido ou líquido) na carga dos fornos elétricos que, além de representar um substituto ferroso compatível ao FEA, consigo ainda, inúmeros benefícios ao processo de fusão e refino, dentre os quais podemos destacar: redução do consumo de energia, eletrodos, cales, além de melhoria no rendimento metálico global do reator. Outra alternativa também consolidada na prática operacional das aciarias elétricas, é o Ferro Esponja, que pode ser carregado junto à sucata no FEA ou ainda continuamente através de correias transportadoras que dosam o material a ser alimentado no FEA. Alguns aspectos negativos, de ordem estratégica e operacional inviabilizaram o emprego de Ferro Esponja na siderurgia semi integrada brasileira, no entanto, a compatibilidade físico-química em relação à sucata é razoavelmente boa.⁽²⁾

Além dos materiais alternativos e das sucatas de recirculação em curto e médio prazo, existem materiais que são ofertados ao mercado de metálicos esporadicamente em lotes isolados, como é o caso de sucatas estruturais, proveniente do desmantelamento de galpões, navios, plataformas de extração de petróleo, entre outras. Tanto a sucata proveniente de materiais estruturais, como os materiais sucedâneos imediatos à sucata (Ferro Gusa e Ferro Esponja), possuem pelo menos uma característica em comum: sua elevada densidade (em geral superior a 1,0 t/m³) que, por sua vez, influenciam diretamente o processo de fusão desses materiais no FEA.

O presente trabalho propõe um modelo cinético, baseado na solução de equações diferenciais que modelam os fenômenos de transferência de calor e massa entre a sucata e o banho de aço líquido, cuja finalidade principal é inferir detalhes sobre os mecanismos que regem o fenômeno de fusão. Caffer et al.,⁽³⁾ realizaram um estudo experimental para avaliar as características de fusão do Ferro Esponja, cujos dados experimentais serviram como base para a validação do modelo cinético proposto neste trabalho.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Operação de Fusão e Refino no FEA

Os Fornos Elétricos a Arco (FEA), usados desde o século XIX na fabricação de aços, vem aumentando sua participação na produção mundial de aços graças a, sobretudo: (i) aos reduzidos investimentos iniciais (*Capex – Capital Expenditure*), em geral substancialmente inferiores ao *Capex* de usinas integradas e (ii) aos avanços tecnológicos alcançados durante o século passado. Atualmente os FEA são utilizados para produzir desde aços destinados à construção civil e perfis comerciais até mesmo alguns produtos planos (com algumas restrições), passando pelos aços ligados.

O processo semi integrado inicia-se com a seleção/classificação da sucata de acordo com suas características físico químicas. Fruehan et al.,⁽⁴⁾ descrevem o processo de fabricação de aço em aciarias elétricas como sendo o processo através do qual a sucata é fundida formando um banho metálico, o qual é refinado primariamente através da oxidação dos elementos de acordo com sua afinidade com o oxigênio, segundo a relação proposta por Ellingham.⁽⁵⁾ Após o refino oxidante, o banho segue para uma etapa de refino secundário, onde pequenos ajustes de composição química e temperatura são realizados para que, finalmente o material, possa ser solidificado sob a forma de tarugos, blocos ou placas.

A Figura 1 mostra a relação de Ellingham,⁽⁵⁾ para os principais elementos e seus óxidos, i.e, a correspondência linear entre a energia livre de Gibbs relativa à sua formação e a temperatura. Observe que, óxidos complexos de elementos como Cobre, Níquel, Molibdênio e Chumbo, em geral presentes como resíduos na sucata ferrosa, apresentam, para uma mesma temperatura, níveis de energia livre, substancialmente superiores a energia livre do óxido de ferro. Portanto, de acordo com a hierarquia termodinâmica, a reação de oxidação de Cobre, Níquel, Molibdênio e Chumbo só seria possível caso houvesse a oxidação de todo o conteúdo de Ferro do banho, o que oneraria substancialmente o resultado da aciaria, preocupação latente na rota semi integrada.

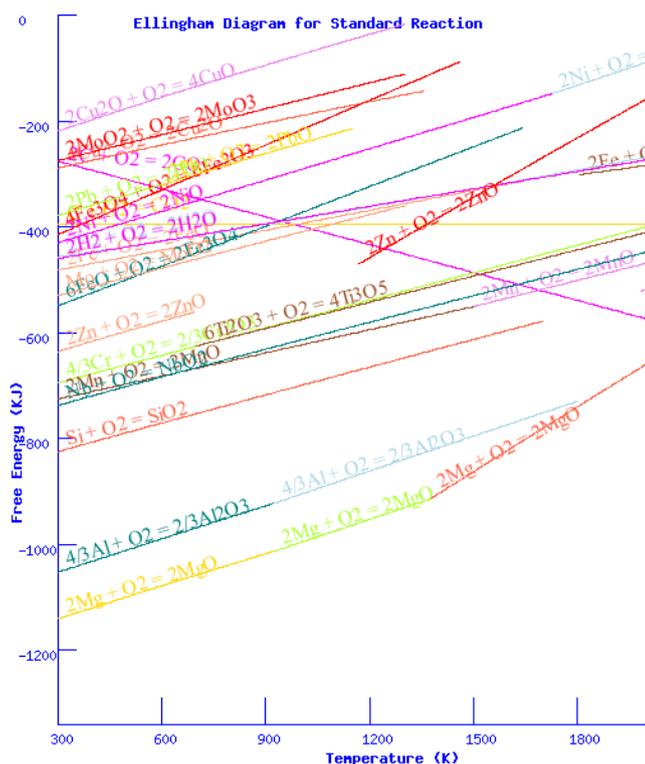


Figura 1. Diagrama de Ellingham para os principais óxidos. Energia livre de Gibbs x Temperatura.⁽⁵⁾

De acordo com Pehlke,⁽⁶⁾ o refino do metal é a eliminação das impurezas não desejáveis ao aço. Em siderurgia o termo refino é usado em dois sentidos: químico e físico. O sentido químico consiste na redução de elementos indesejáveis, tais como Silício, Carbono, Fósforo e Enxofre, sejam em condições oxidantes ou redutoras dependendo da natureza do elemento. Os gases presentes no aço líquido, também podem ser removidos através de processos sob vácuo, atualmente capazes de reduzir os níveis de Nitrogênio, Oxigênio e Hidrogênio a alguns poucos ppm's. O Sentido físico consiste principalmente na eliminação das segregações e controle da morfologia das inclusões, auxiliando na homogeneização da estrutura, podendo inclusive contribuir para o controle microestrutural do material.

O refino primário inicia-se imediatamente após a fusão da carga no Forno Elétrico a Arco (FEA), onde elementos químicos com maior afinidade com o Oxigênio, de acordo com a hierarquia proposta por Ellingham,⁽⁵⁾ tais como Silício, Carbono, Alumínio, Fósforo, Cromo e até mesmo o Ferro, são oxidados e removidos do banho, formando uma camada de óxidos simples e/ou complexos que por sua natureza física (densidade e tensão superficial) emergem à camada de aço líquido, formando o que se chama em siderurgia de escória. Apesar de possuir a função de receber os óxidos provenientes da reação do banho com o oxigênio, a escória possui um limite de solubilidade, i.e, um limite de saturação, a partir do qual a escória não é mais capaz de reter óxidos e, portanto, a reação de oxidação é cessada.

O refino primário é marcado pelas etapas de descarburização, dessiliciação, desfosforização do banho de aço líquido. Reações paralelas de oxidação de Alumínio, Cromo, Magnésio e outros elementos existentes na carga que possuam afinidade podem ocorrer, no entanto, não protagonizam papel relevante nessa etapa. Valentini, Colla e Vannucci,⁽⁷⁾ desenvolveram um modelo neural que concentra em diferentes camadas de uma rede neural, inúmeros modelos de descarburização, dessiliciação e desfosforização disponíveis na literatura, de modo a prever o regime



ótimo de operação de conversores. A Tabela 1 mostra as principais reações que ocorrem no refino primário segundo Valentini, Colla e Vannucci,⁽⁷⁾ A ordem segundo a qual elas ocorrem, segue a hierarquia termodinâmica, proposta por Ellingham.⁽⁵⁾

Tabela 1. Principais reações que ocorrem durante o refino primário dos aços

Reação	Descrição
$\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{FeO}$	Oxidação do Ferro
$\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$	Oxidação do Silício
$\text{Mn} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{MnO}$	Oxidação do Manganês
$5\text{FeO} + 2\text{P} = \text{P}_2\text{O}_5 + 5\text{Fe}$	Desfosforação
$2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$	Descarburação
$2\text{Al} + \frac{3}{2} \text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3$	Oxidação do Alumínio

2.2 Massa Específica da Sucata

Massa específica é definida como sendo a razão entre a massa de um determinado corpo, e o volume que este ocupa no espaço. No caso específico de sucatas, a densidade varia em função de suas características físicas, bem como em função dos processos de beneficiamento através dos quais elas passam. Industrialmente adotam-se medidas para densificar sucatas antes de carregá-las nos FEA's, no entanto, a relação entre os ônus e bônus dessa operação ainda é discutida e não constitui foco do presente trabalho. A Tabela 2 mostra os dados de massa específica de alguns tipos de sucata, segundo aferição industrial periódica.

Tabela 2. Massa Específica das sucatas comumente utilizadas nas aciarias elétricas

Sucata	Massa Específica (t/m ³)
Pacote estamparia	1,0
Estamparia solta	0,6
Ferro Fundido	2,0
Cavaco de aço	0,3
Forjada	0,9
Miúda	0,8
Oxicorte	1,2
Shredder	1,0
Mista	0,4
Gusa	3,5

2.3 Temperatura Líquidus

Define-se temperatura *liquidus* como sendo uma temperatura acima da qual um elemento ou mistura assume o estado físico líquido. No caso específico do aço, a temperatura *liquidus* é definida pela linha *liquidus* do diagrama Ferro Carbono, conforme mostrado na Figura 2. Observa-se que, à medida que se incorpora carbono à liga ferrosa, reduz-se a temperatura de fusão do aço. Portanto, é razoável concluir que, ligas Fe-C com conteúdo de carbono maior, possuem maior propensão ou facilidade para fundirem, todavia, outros parâmetros tais como densidade, dimensões, agitação e temperatura do banho, entre outros, influenciam o fenômeno. Em linhas gerais, sucatas de elevada densidade, mesmo possuindo baixa temperatura *liquidus* têm relativa dificuldade de fundir. Outro parâmetro que afeta substancialmente a taxa de fusão é o potencial de oxidação do banho.

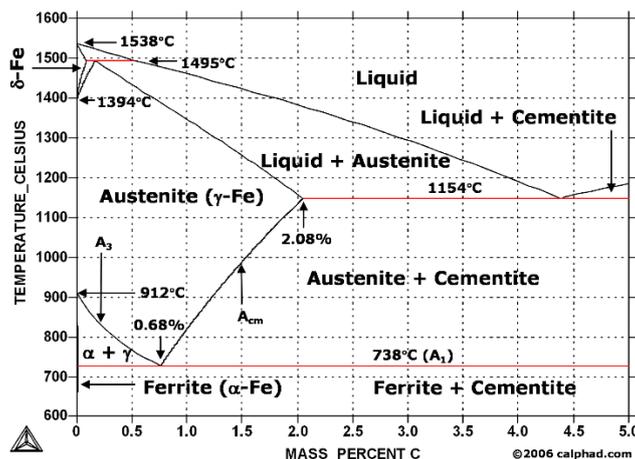


Figura 2. Diagrama Fe-C. Temperatura *liquidus* de uma liga Fe-C qualquer [ThermoCalc].

2.4 Modelos Cinéticos para Fusão de Sólidos em Meios Líquidos

Caffer et al.,⁽³⁾ definiram três distintas possibilidades ou modos de fusão para briquetes de Ferro Esponja em contato com aço líquido; são elas:

- **Transferência de calor** $\rightarrow T_{banho} \gg T_{liquidus}$

Taxa de fusão governada pela taxa de transferência de calor do banho de aço líquido para o sólido;

- **Transferência de massa** $\rightarrow C_{banho} \gg C_{sucata}$

Etapa onde ocorre a dissolução do carbono do banho para a interface sólido/líquido, diminuindo a temperatura *liquidus* do sólido até que se inicie a fusão.

- **Transferência de calor e massa** $\rightarrow T_{banho} = T_{liquidus} \quad C_{banho} = C_{sucata}$

Tanto a transferência de calor, como a transferência de massa influenciam na taxa de fusão.

O estudo cinético da evolução de uma reação química pode ser realizado através de vários métodos, dentre os quais se pode destacar os métodos integral (1ª e 2ª ordem) e o método diferencial. A equação 1 descreve genericamente a abordagem integral/diferencial empregada em modelos cinéticos de distintas naturezas.

$$\frac{dC_i}{dt} = kC_i^\alpha \quad (1)$$

Onde:

$\frac{dC}{dt}$: taxa de consumo/incremento de uma espécie química i qualquer em função do

tempo;

k: Constante cinética da equação;

C_i: Contração da espécie química i em um instante t;

α: Expoente cinético da equação.



3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 3 mostra um desenho esquemático das condições gerais de fusão de sólidos semi-submersos em banho líquido, o qual serviu como base de abstração para a formulação do modelo cinético de fusão da sucata no banho de aço líquido. Observe que existe uma diferença entre as composições e temperaturas do banho para o sólido semi submerso. Além disso, o potencial de oxidação do banho e o carbono disponível no sólido geram CO/CO₂, os quais servem como catalisadores para a fusão, renovando as condições térmicas e difusionais da frente de fusão a cada instante.

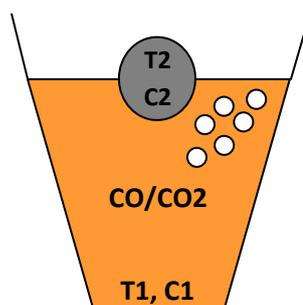


Figura 3. Desenho esquemático do fenômeno modelado matematicamente.

A Figura 4 mostra o comportamento temporal de uma dimensão característica da sucata durante sua fusão em contato com o banho de aço líquido. Quatro etapas descrevem referido fenômeno, são elas: (i) solidificação de uma casca de aço em volta da sucata sólida em contato com o banho, (ii) refusão da camada solidificada formada na primeira etapa, (iii) fusão da sucata em uma baixa taxa de fusão e (iv) fusão da sucata em uma elevada taxa de fusão.

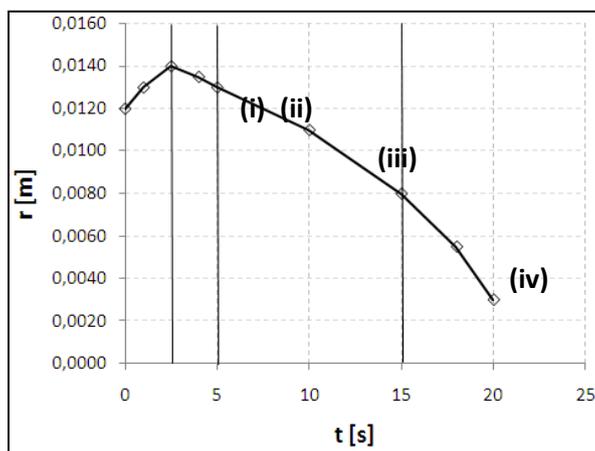


Figura 4. Comportamento térmico do fenômeno de fusão de sucata ferrosa em banho de aço líquido.⁽³⁾

Um modelo cinético, baseado na transferência de calor foi desenvolvido de modo a determinar o fluxo de calor instantâneo que passa entre o material sólido e líquido. Buscou-se ainda, determinar os parâmetros que influenciam a taxa de fusão do material, tais como, temperatura, volume, grau de oxidação e agitação do banho, bem com a dimensão característica do metálico semi submerso no mesmo. A equação 2, descreve o fluxo de calor por condução unidimensional, a qual é resolvida para as condições de contorno descritas na Figura 5.



$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \cdot r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

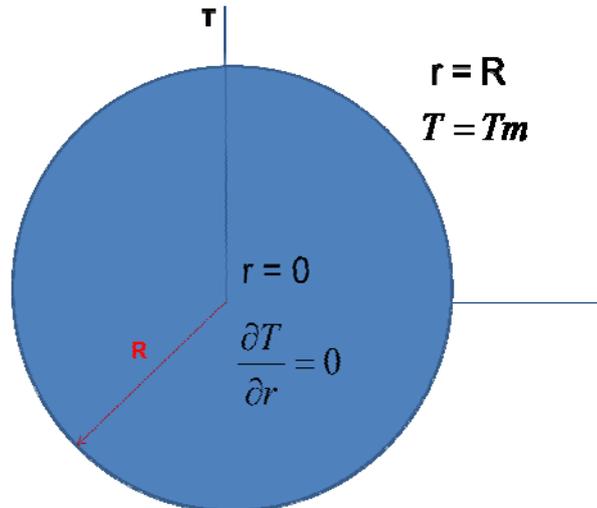


Figura 5. Condições de contorno para solução do problema de transmissão de calor e massa.

Considera-se ainda que, como a fusão é um fenômeno dependente do tempo, a interface sólido-líquido, doravante chamada de frente de fusão, é móvel, cuja posição em relação ao tempo ($\frac{\partial r}{\partial t}$) é dada pela equação 3. A equação 3 representa basicamente um balanço de energia, onde a taxa de fusão do material é igual a diferença de fluxo de calor na frente de fusão e o calor conduzido da frente de fusão na direção do centro do material.

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \frac{h \left[T_{\text{banho}} - T_{\text{liquidus}} - k \frac{\partial T}{\partial x} \right]}{\rho \Delta H} \quad (3)$$

Foi considerada ainda, a agitação do banho, provocada essencialmente pela evolução de gases (majoritariamente CO/CO₂) no banho. O coeficiente de transferência de calor guarda relação com a agitação do banho de acordo com a equação 4, onde a constante A_1 e o coeficiente α é de 0,30 e 0,45, respectivamente de acordo com Mori e Sakuraya.⁽⁸⁾

$$k_{\text{ther}} = A_1 \cdot r_{CO}^\alpha \quad (4)$$

Resolvendo simultaneamente o problema de calor e massa para as condições de contorno descritas, obtém-se a equação 5, que equaciona a taxa de fusão da sucata em função da dimensão característica da sucata, da quantidade de sucata adicionada ao banho e das temperaturas do banho líquido (que varia em função da frente de fusão), da temperatura inicial do sólido adicionado ao banho, do volume do banho de aço líquido, da agitação natural (geração de CO/CO₂) ou forçada (injeção de gases pela soleira do FEA) do banho, além das características físicas da sucata (calor sensível e calor latente).



$$m \cdot = \frac{m_{liq} \times K_{ther} \times K_{area} \times \left(\frac{1}{m_{sol}} \right) \times (T_{liq} - T_{sol}) \times \left(\frac{T_{sol}}{T_{Tliq}} \right)}{\lambda_{Fe} + C_p^{Fe} \times (T_{liq} - T_{sol})} \quad (5)$$

Onde:

m_{liq} : tamanho do fundo úmido ou pé líquido

m_{sol} : quantidade de material sólido adicionado

K_{ther} : coeficiente de condutividade térmica do banho de aço líquido

K_{area} : constante de área do metálico a ser fundido (dimensão característica)

m_{sol} : Quantidade de sucata de alta densidade na carga

T_{liq} : Temperatura do fundo úmido

T_{sol} : Temperatura da sucata

λ_{Fe} : Calor latente de fusão da sucata

C_p^{Fe} : Calor sensível

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validação do modelo, foi feita uma análise da taxa de fusão de uma sucata pesada, oriunda do processo de oxicorte, com densidade de 1,2 t/m³ e dimensões de 500 x 300 x 1000 mm, sendo que a última dimensão, denominada dimensão característica, tratada como variável independente do modelo.

A Figura 6 mostra a correlação entre a taxa de fusão e o tamanho do fundo úmido ou pé líquido, para diferentes isotermas. Observe que, existe uma correlação diretamente proporcional entre a taxa de fusão e o aumento tanto do fundo úmido, como da temperatura do banho, fato que operacionalmente, possui razoável sentido.

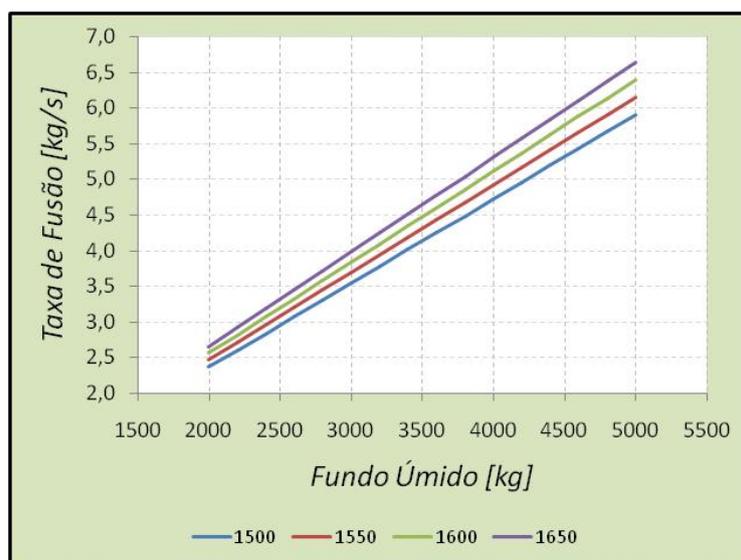


Figura 6. Correlação entre a taxa de fusão da sucata e o tamanho e temperatura do fundo úmido.

A Figura 7 mostra a correlação entre a taxa de fusão e a dimensão característica da sucata (comprimento), implicitamente equacionada na constante de área da sucata. Há uma correlação exponencial negativa entre as variáveis, i.e.,



quanto maior o comprimento da sucata de alta densidade carregada no FEA, menor a taxa de fusão da mesma. Todavia, vale ressaltar que a produtividade da operação de oxicorte guarda correlação inversamente proporcional com o tamanho da sucata a ser cortada. Portanto, há um equilíbrio entre o que é operacionalmente favorável para a fusão no FEA e o que é operacionalmente viável para o pátio.

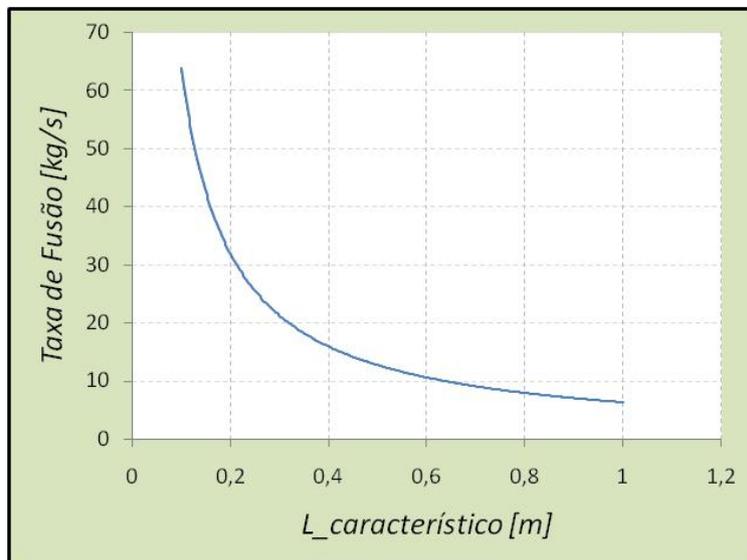


Figura 7. Correlação entre a taxa de fusão da sucata e a dimensão característica da sucata (comprimento).

A Figura 8 mostra a correlação entre a taxa de fusão e a taxa de geração de gases no banho, implícita na constante de condutividade térmica do banho, equação 4. Ao aumentar a geração de gases, a condutividade térmica do banho também aumenta, devido a renovação constante da frente de fusão, que por sua vez, guarda relação proporcional direta com a taxa de fusão da sucata.

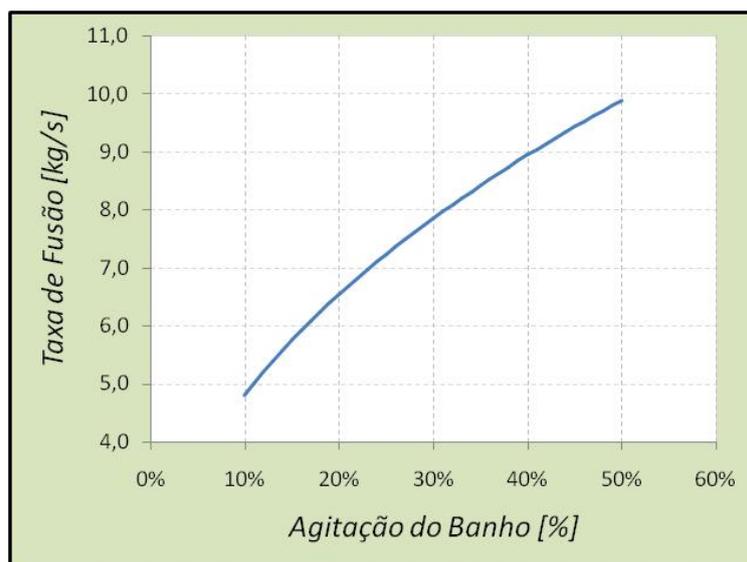


Figura 8. Correlação entre a taxa de fusão da sucata e a taxa de agitação do banho.

5 CONCLUSÕES



Baseado nos resultados do modelo cinético de fusão de sucatas de alta densidade em Fornos Elétricos a Arco conclui-se que:

- a transferência de calor e massa rege o fenômeno de fusão de sucata, quando em contato com o aço líquido;
- existe uma etapa inicial no fenômeno de fusão de sucata em banho de aço líquido, onde há uma solidificação de uma camada em volta da sucata, que serve como substrato para minimização da energia livre de volume requerida para a solidificação;
- após a formação de uma camada sólida ao redor da sucata, há difusão de certos elementos químicos do interior da sucata para a camada solidificada, fazendo com que haja uma redução da temperatura *liquidus* do composto sólido (sucata + camada solidificada);
- a temperatura do banho possui relação direta com a taxa de fusão, pois está diretamente relacionada ao fluxo de calor na frente de fusão, que por sua vez, é proporcional à diferença de temperatura entre a sucata e o banho;
- a agitação do banho, causada basicamente pela evolução de gases gerados no processo (CO e CO₂), incrementa o coeficiente de transferência de calor e, conseqüentemente, a taxa de fusão das sucatas; e
- o potencial de oxidação do banho, medido indiretamente pelo carbono livre no mesmo, afeta substancialmente a taxa de fusão, haja visto que a evolução de gases do tipo CO e CO₂ está diretamente relacionada a oferta ou não de C e O₂ para que tais reações ocorram.

REFERÊNCIAS

- 1 Instituto Aço Brasil (IaBr). <http://www.acobrasil.org.br> . Acesso em maio de 2011.
- 2 HONEYANDS, T.; VARCOE, D.; TROTTER, D. Optimising the continuous feeding of HBI to produce quality steel from EAF. SEASI Japan Conference, 2002.
- 3 CAFFER, G.; RAFIEI, P.; HONEYANDS, T.; TROTTER, D. Understanding the melting characteristics of HBI in iron and steel melts. SEASI Quarterly, vol. 34, nº 1, 2005.
- 4 FRUEHAN, R.J. The making, shaping and treating of steel. 11th edition steelmaking and refining volume, Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998.
- 5 ELLINGHAM, H. J. T. Chemistry of the Elements. Journal Soc. Chem. Ind. (London), vol. 63. pp 125, 1944.
- 6 PEHLKE, R.D. BOF Steelmaking: Introduction, theory and design. New York, AIME, v.1, pt.1, p. 256-258, 1975.
- 7 VALENTINI, R.; COLLA, V.; VANNUCCI, M. Neural predictor of the end point in a converter. Revista de Metalurgia, v. 40, n.6, p. 416-419, 2004.
- 8 MORI, K.; SAKURAYA, T. Rate of dissolution of solid iron in a carbon saturated liquid iron alloy with evolution of CO. Transactions ISIJ, vol. 22, pp. 984-990, 2001.