

# ESTUDO DA CINÉTICA DE REDUÇÃO DE ÓXIDOS DE FERRO EM ATMOSFERAS COM COMPOSIÇÃO MISTA<sup>1</sup>

Roberto Okada Junior<sup>2</sup>  
Giselle de Mattos Araújo<sup>3</sup>  
José Adilson de Castro<sup>4</sup>

## Resumo

Uma das etapas obrigatórias da produção de ferro primário é a etapa de redução dos óxidos de ferro, onde se destacam os processos de alto forno e redução direta em forno de cuba. A etapa de redução no estado sólido, em ambos os processos, desempenha papel fundamental e em geral determina o tempo de residência necessário, o que em última análise define a produtividade dos mesmos. O tema abordado tem por objetivo estudar a redução química dos componentes da carga ferrífera de um alto forno, ou seja, a etapa de redução no estado sólido. O mecanismo de reação e sua cinética são analisados ao longo do projeto tanto do ponto de vista teórico/analítico (equações termodinâmicas da cinética de redução), quanto do ponto de vista experimental (laboratório). Algumas equações foram desenvolvidas para que representem a cinética de redução para dois gases redutores, tanto através das variações da fração reagida e do raio da região não reagida com o tempo, bem como da variação da taxa de redução ao longo do processo. Foram utilizadas atmosferas mistas contendo nitrogênio, oxigênio e nitrogênio para várias proporções diferentes.

**Palavras-chave:** Cinética; Fração reagida; Taxa de redução; Atmosfera mista.

## KINETIC STUDY OF IRON OXIDES REDUCTION IN ATMOSPHERES WITH MIXED COMPOSITION

### Abstract

One of the steps required in the production of iron is the primary step of reduction of iron oxides, which highlight the process of blast furnace and direct reduction in shaft furnace. The reduction step in solid form, in both cases, plays an important role and often determines the residence time required, which ultimately defines the productivity of the same. The topic aims to study the chemical reduction of iron load components of a blast furnace, ie the reduction step in the solid state. The reaction mechanism and kinetics are analyzed throughout the project both from a theoretical/analytical (thermodynamic equations of the kinetics of reduction) and from the experimental point of view (laboratory). Some equations were developed for representing the kinetics of reduction for two reducing gases, both through the variation of fraction reacted and unreacted radius of the region over time, as well as varying the reduction rate during the process. Have been used mixed atmospheres containing nitrogen, oxygen and nitrogen for various proportions.

**Key words:** Kinetic; Fraction reacted; Reduction rate; Mixed atmospheres.

<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> Aluno de graduação – Eng. Metalúrgica, bolsista de Iniciação Científica – UFF/EEIMVR – RJ.

<sup>3</sup> Eng. Metalúrgica, M.Sc., Aluna de doutorado – UFF/EEIMVR/PPGEM; Professora – DEMM/POLI/UFRJ.

<sup>4</sup> Eng. Metalúrgico, Ph.D., Professor – UFF/EEIMVR/PPGEM – RJ.

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à complexidade dos estudos da cinética da redução em alto forno, já que existe uma série de parâmetros que afetam este fenômeno, simulações computacionais são usadas para o aperfeiçoamento destas técnicas. Porém, tais simulações devem ser baseadas em equações que descrevam de forma coerente todos os fenômenos envolvidos. O processo de redução do minério de ferro vem sendo estudado ao longo do desenvolvimento da metalurgia.

Moon e Rhee<sup>(1)</sup> estudaram o comportamento em redução de produtos compactos obtidos com finos de hematita. A atmosfera adotada foi uma mistura de gases CO e H<sub>2</sub>, e a temperatura dos testes variou entre 800°C e 950°C. Eles observaram que em toda a faixa de temperatura avaliada a taxa de redução decresce com o conteúdo de CO na mistura de gases. Além disso, a variação da constante de reação (constante cinética) para o H<sub>2</sub> foi de duas a três vezes maior do que para o CO.

Rodriguez, Conejo e Bedolla<sup>(2)</sup> estudaram a cinética do processo de redução de partículas de hematita em baixas temperaturas (entre 550°C e 650°C). Seus resultados mostraram que naquelas condições a taxa de redução decresce se há um aumento na concentração de CO na mistura de gases de redução.

El-Geassy e Nasr<sup>(3)</sup> avaliaram o efeito da estrutura original (através da imposição de diferentes porosidades) de aglomerados de finos de hematita na cinética de redução. Seus experimentos simularam o processamento isotérmico, entre 500°C e 1.100°C, mediante a presença de uma atmosfera redutora de CO. Seus resultados mostraram que nas etapas iniciais da redução a taxa de reação aumentava com a temperatura de processamento e com a porosidade original da amostra. Com o decorrer do processo, a menor taxa de redução foi observada entre 950°C e 975°C, tendo sido atribuída à sinterização e densificação do material.

Towhidi e Szekely<sup>(4)</sup> estudaram a influência da deposição de carbono na cinética de redução de pelotas comerciais, sob a ação de uma atmosfera redutora composta por um misto de CO, H<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>. Eles determinaram que, nas condições avaliadas, a deposição de carbono ocorre para temperaturas de processamento da redução abaixo de 900°C, sendo que para altas temperaturas, porém com elevadas concentrações de H<sub>2</sub>, a deposição de carbono diminui.

Li e Hong<sup>(5)</sup> desenvolveram um modelo matemático para a previsão de um processo de redução não-isotérmico, usando como gases redutores o hidrogênio e o monóxido de carbono. O modelo numérico utilizou o método dos Volumes Finitos para a solução das equações, tendo sido então validado por comparações com informações sobre cinética obtidas da literatura. Com os resultados obtidos, os autores puderam concluir que o tratamento não-isotérmico dado ao processo de redução levou a variações na entalpia da reação mantendo, porém excelente correlação entre seus resultados calculados e aqueles de referência na literatura.

Dong et al.<sup>(6)</sup> em estudo de 2007 desenvolveram uma revisão dos avanços mais recentes no campo da redução em altos fornos, na tentativa de prever as tendências para as pesquisas futuras nesta área. Seu trabalho evidencia a importância do tratamento dos fenômenos que ocorrem em um alto forno do ponto de vista de processo multifásico, onde gases, sólidos e líquidos têm diversificadas interações e contribuições ao longo de seus trajetos no interior do AF. Em suas observações finais concluem a importância do tratamento do processo de redução como um processo contínuo, mas ressaltam também o surgimento e crescimento gradual de recentes pesquisas focadas em regiões ou “momentos” discretos do processo de redução como um todo.

Piotrowski et al.<sup>(7)</sup> desenvolveram também estudo sobre a cinética do processo de redução, porém os conceitos físicos adotados foram os do modelo topoquímico, que considera o processo de redução do ponto de vista da nucleação e crescimento de novas fases. Eles buscaram determinar o estágio da transformação que controla cada reação do processo de redução. De acordo com as conclusões dos autores, o comportamento das curvas de variação do grau de conversão (redução) com o tempo sugere a ocorrência de mecanismos de reação em concordância com o modelo cinético topoquímico de Avrami-Erofe, adotado no estudo, obtendo-se satisfatória acurácia estatística. Eles observaram ainda que os estágios iniciais da redução podem ser interpretados teoricamente como nucleações de cristais e crescimento 1D na interface gás/sólido, os quais mudam gradualmente para um controle difusional.

Bonalde, Henriquez e Manrique<sup>(8)</sup> desenvolveram um modelo matemático para a cinética de redução de pelotas e compararam os resultados alcançados com os dados obtidos experimentalmente. Seus resultados e conclusões mostraram que o modelo matemático formulado obteve sucesso ao se aproximar da tendência mostrada nos experimentos. Observaram que a redução mediante o H<sub>2</sub> como agente redutor é consideravelmente mais eficiente, tendo os testes em atmosfera mista (H<sub>2</sub> e CO) sofrido as influências dos dois redutores (Figura 1).

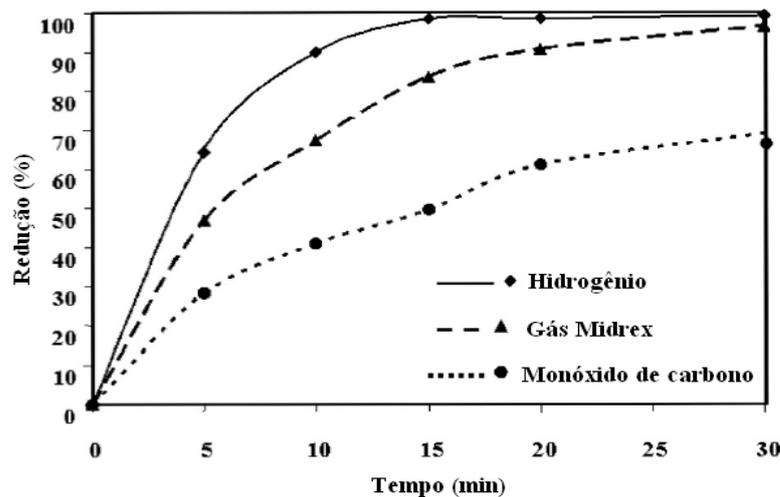


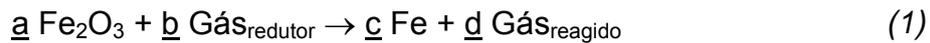
Figura 1. Evolução da redução obtida por Bonalde, Henriquez e Manrique<sup>(8)</sup> para o gás Midrex.

Os estudos acima mostram algumas de várias possibilidades para análises que envolvem o estudo teórico e experimental do processo de redução dos minérios de ferro.

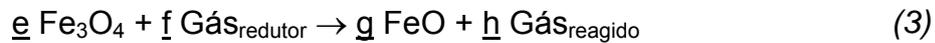
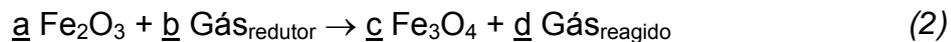
Este artigo tem o objetivo de estudar a cinética de redução de óxidos de ferro (pelotas) mediante atmosferas redutoras de CO e H<sub>2</sub> e gás Midrex, considerando para isso os modelos de uma e de três interfaces de redução. Um modelo cinético que reúne parâmetros físicos – tais como densidade, porosidade, tortuosidade, geometria – e parâmetros termodinâmicos – difusividade, concentrações de equilíbrio – foi elaborado, tendo sido inicialmente avaliado em condições de redução isotérmica, e em seguida para um perfil térmico condizente com um alto forno em marcha controlada de produção.

## 2 DESENVOLVIMENTO

A carga ferrífera de um alto-forno é composta basicamente por hematitas bitoladas, sinter e pelotas. Nos três casos o ferro se encontra inicialmente presente na forma de um óxido ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) denominado “hematita”. O processo de redução que ocorre dentro dos altos-fornos é essencialmente uma seqüência de reações químicas do tipo redução que tiram pouco a pouco o oxigênio combinado com o ferro. Esta reação ocorre em atmosfera gasosa, constituída de um gás redutor, que pode ser o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ , obtido da reação do coque), e também o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e o nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), que são injetados no interior do forno. A reação abaixo exemplifica uma reação de redução, qualquer que seja o gás redutor adotado.



Em termos conceituais o fenômeno da redução pode ser estudado através de equações físico-químicas que prevêm a evolução da reação de redução ao longo da massa da matéria-prima particulada. Este modelo analítico depende basicamente da ocorrência de uma reação química de redução entre o óxido de ferro e o gás redutor, avaliando a cinética de transferência de massa através da criação de uma região reagida (produto reduzido) e outra não-reagida (óxido não-reduzido). Porém, a redução da hematita a ferro não acontece diretamente, há a formação de óxidos intermediários ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e  $\text{FeO}$ , magnetita e wustita, respectivamente), conforme mostrado abaixo.



Com isso, se considerarmos a reação de redução passo a passo, teremos diferentes regiões reagidas e não-reagidas, em função da reação observada, como representado no esquema abaixo (Figura 2), que mostra uma partícula de óxido de ferro (hematita) em redução.

A evolução da região reagida dependerá da cinética do processo de redução, ou seja, da taxa de ocorrência da reação de redução. Esta taxa pode ser matematicamente modelada partindo-se de conceitos físico-químicos.<sup>(9)</sup>



(a) Redução com uma interface:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}$

(b) Redução com três interfaces:  
 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$

**Figura 2.** Representação das regiões reagida e não-reagida em uma partícula de hematita, em (a) para o modelo com uma interface (modelo de redução direta); e em (b) o modelo de três interfaces (modelo de redução indireta).

Tomando como exemplo a reação química de redução direta pelo CO (5), podemos dizer que sua velocidade de ocorrência depende da taxa de consumo dos reagentes ou de geração dos produtos, conforme mostrado na expressão a seguir:

$$\frac{1}{a} \cdot \left( -\frac{dC_A}{dt} \right) = \frac{1}{b} \cdot \left( -\frac{dC_B}{dt} \right) = \frac{1}{c} \cdot \left( -\frac{dC_C}{dt} \right) = \frac{1}{d} \cdot \left( -\frac{dC_D}{dt} \right) \quad (5)$$

Considerando-se um componente qualquer da reação, podemos escrever uma expressão direta para a velocidade da reação:

$$v_i = \left( \frac{dC_B}{dt} \right) = k \cdot C_A^x \cdot C_B^y \dots \quad (6)$$

Que de uma forma mais generalizada pode ser reescrita como:

$$v_i = \left( \frac{dC_i}{dt} \right) = k \cdot C_i^n \quad (7)$$

Onde  $C_i$  é a concentração da espécie química  $i$ ,  $k$  é a constante de velocidade da reação e  $n$  é a ordem da reação.

A constante  $k$  será modelada em função do mecanismo considerado – transferência de massa ou reação química. Li e Hong<sup>(5)</sup> construíram modelo levando em conta as transferências de massa no gás e no sólido reagido (difusão) e também a reação química. Moon e Rhee<sup>(1)</sup> propuseram um mecanismo de controle misto para a redução de compactos de hematita, enquanto Bonalde, Henriquez e Manrique<sup>(8)</sup> obtiveram que tanto para a redução seja pelo CO ou por  $\text{H}_2$ , inicialmente tem-se um controle misto com os mecanismos competindo até aproximadamente 50% de redução, passando então a ser controlado pela difusão do gás na massa reagida, e ao longo de todo processo a etapa de transferência de massa no gás pode ser desprezada. Kang et al.<sup>(10)</sup> estudaram o efeito da forma geométrica (não-esférica) do óxido de ferro na taxa de redução aplicando para isso um modelo de controle misto do processo.

Neste estudo são avaliadas separadamente a cinética do ponto de vista da transferência de massa no sólido reduzido e também da reação química acontecendo na interface, visando determinar para o modelo proposto o mecanismo controlador. Os efeitos do transporte de massa no gás não são considerados.

## 2.1 Equação da Cinética de Redução para Gases Puros

Foram desenvolvidas equações que mostram a fração reagida ( $\alpha$ ) em função do tempo (8) e outra para a evolução da taxa de redução para um processo controlado pela difusão na camada reagida (9):

$$1 - 3 \cdot (1 - \alpha)^{2/3} + 2 \cdot (1 - \alpha) = \left[ \frac{6 \cdot a \cdot D_{ef}^{gás} \cdot (C_{gás} - C_{gás, equil})}{\rho_{sólido} \cdot R^2 \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \cdot (t) \quad (8)$$

$$\frac{dr_n}{dt} = \left\{ \left[ \frac{a \cdot R \cdot D_{ef}^{gás} \cdot (C_{gás} - C_{gás, equil})}{\rho_{sólido} \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \cdot \left[ \frac{1}{(r_n^2 - r_n^2 \cdot R)} \right] \right\} \quad (9)$$

Onde  $D_{ef}$  é a difusividade efetiva do reagente gasoso na massa sólida reagida;  $\rho_{sólido}$  a densidade;  $\varepsilon_0$  a porosidade e  $\gamma$  a tortuosidade.

Nesta etapa foram utilizadas duas atmosferas redutoras distintas: CO e H<sub>2</sub> (puros).

## 2.1 Equação da cinética de redução para gases mistos

No estudo da cinética de redução para gases mistos, serão utilizadas as próprias Equações (8) e (9), porém, em várias etapas e com algumas modificações. Os gases utilizados nesse processo são: nitrogênio, para fazer a purga da atmosfera, oxigênio e monóxido de carbono que são os gases redutores.

Para obtenção da equação da fração reagida para gases compostos, será utilizada a

Equação (8), porém com uma modificação significativa. O termo  $C_{gás, equil}$  será desconsiderado, pois em atmosfera mista existem outras reações competindo pelos gases, como a reação de Boudouard ( $C_{(s)} + CO_{2(g)} = CO_{(g)}$ ) e a do gás shift ( $CO_{2(g)} + H_{2(g)} = CO_{(g)} + H_2O_{(g)}$ ), então o sistema não nunca irá entrar em equilíbrio.

O termo à direita da igualdade da Equação (8) ficará da seguinte forma para o H<sub>2</sub> e CO respectivamente:

$$\left[ \frac{6 \cdot a \cdot D_{ef}^{H_2} \cdot C_{H_2}}{\rho_{sólido} \cdot R^2 \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \cdot (t) \quad (10)$$

$$\left[ \frac{6 \cdot b \cdot D_{ef}^{CO} \cdot C_{CO}}{\rho_{sólido} \cdot R^2 \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \cdot (t) \quad (11)$$

Com isso, somando-se (10) e (11), a equação da fração reagida para gases compostas fica da seguinte forma:

$$1 - 3 \cdot (1 - \alpha)^{2/3} + 2 \cdot (1 - \alpha) = \left[ \frac{6 \cdot a \cdot D_{ef}^{H_2} \cdot C_{H_2}}{\rho_{sólido} \cdot R^2 \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} + \frac{6 \cdot b \cdot D_{ef}^{CO} \cdot C_{CO}}{\rho_{sólido} \cdot R^2 \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \cdot (t) \quad (12)$$

De forma análoga, a equação para a taxa de redução terá o termo  $C_{gás, equil}$  desconsiderado pela mesma razão citada acima. Então o termo à direita da Equação (9) ficará da seguinte forma para o H<sub>2</sub> e CO respectivamente:

$$\left[ \frac{\alpha \cdot R \cdot D_{ef}^{H_2} \cdot C_{H_2}}{\rho_{sólido} \cdot R^2 \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \left[ \frac{1}{r_N^2 - r_N^2 \cdot R} \right] \quad (13)$$

$$\left[ \frac{b \cdot R \cdot D_{ef}^{CO} \cdot C_{CO}}{\rho_{sólido} \cdot R^2 \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \left[ \frac{1}{r_N^2 - r_N^2 \cdot R} \right] \quad (14)$$

Com isso, somando-se (9) e (10), a equação da taxa de redução para gases compostas fica da seguinte forma:

$$\frac{dr_N}{dt} = \left[ \frac{\alpha \cdot R \cdot D_{ef}^{H_2} \cdot C_{H_2}}{\rho_{sólido} \cdot R^2 \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} + \frac{b \cdot R \cdot D_{ef}^{CO} \cdot C_{CO}}{\rho_{sólido} \cdot R^2 \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \left[ \frac{1}{r_N^2 - r_N^2 \cdot R} \right] \quad (11)$$

### 3 RESULTADOS E ANÁLISE

Depois de desenvolver as Equações (8) e (11), serão simulados alguns gráficos para avaliar se o modelo criado está coerente.

Uma vez definidos os mecanismos controladores de cada reação, foram calculadas suas respectivas evoluções de fração reduzida e taxa de redução. As propriedades consideradas são:  $R=13$  mm,  $\rho=4,7$  g/m<sup>3</sup>,  $\varepsilon_0=0,25$   $\gamma=0,50$ , tendo sido mantidas constantes ao longo das análises. As outras propriedades dos gases, como a difusividade efetiva e a constante de equilíbrio, foram obtidas a partir da literatura. Para este cálculo, será usada apenas a porcentagem da composição dos gases redutores.

Visando avaliar o modelo proposto, a fração reduzida e taxa de redução foram determinadas considerando-se a difusão na massa sólida reagida como estágio controlador da cinética de redução. As Figuras 3 e 4 mostram os parâmetros cinéticos para o modelo de uma interface ( $Fe_2O_3 \rightarrow Fe$ ), para uma composição de 25,5% de CO, 3,8% de H<sub>2</sub> e 70,7% de N<sub>2</sub> e levando em conta apenas os gases redutores, a composição fica em 87% de CO e 13% de H<sub>2</sub>, a uma temperatura de 973 K:

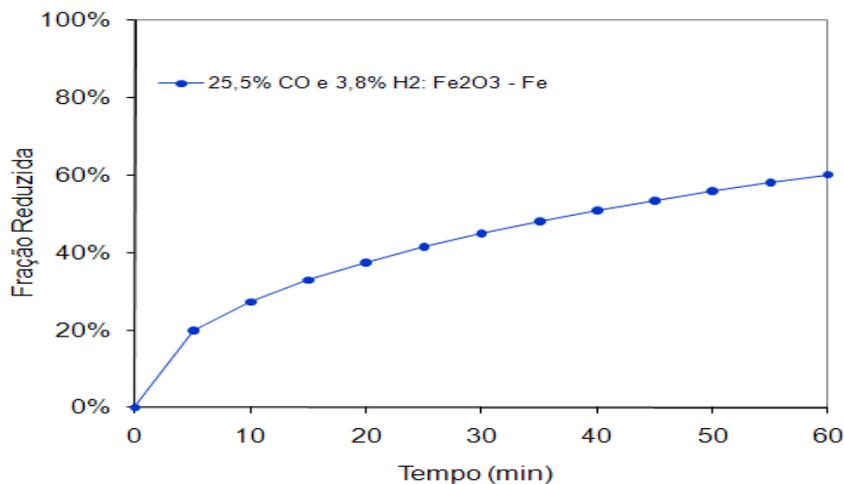
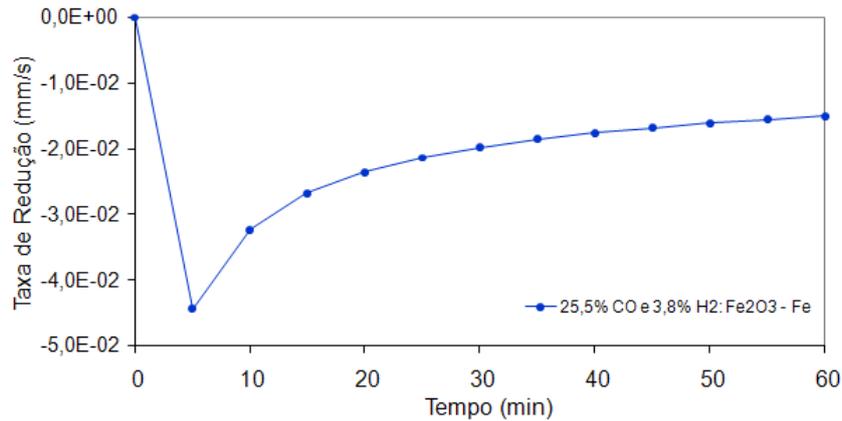
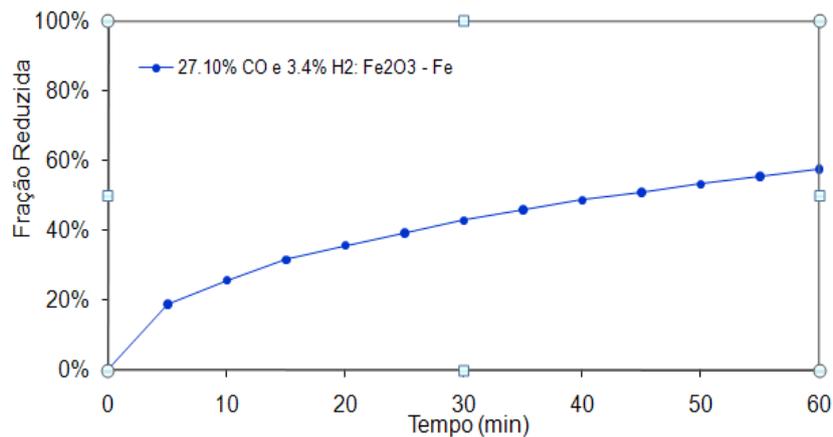


Figura 3. Evolução da fração reagida com o tempo para o gás misto de CO com H<sub>2</sub>, a 973 K.

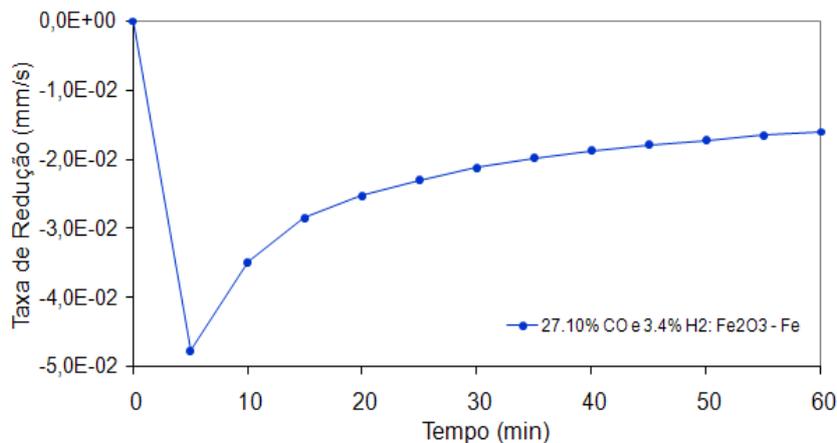


**Figura 4.** Evolução da taxa de redução com o tempo para o gás misto de CO com H<sub>2</sub>, a 973 K.

As Figuras 5 e 6 mostram os parâmetros cinéticos para o modelo de uma interface ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}$ ), para uma composição de 27,1% de CO, 3,4% de H<sub>2</sub> e 69,5% de N<sub>2</sub> e levando em conta apenas os gases redutores, a composição fica em 89% de CO e 11% de H<sub>2</sub>, a uma temperatura de 1.173 K:



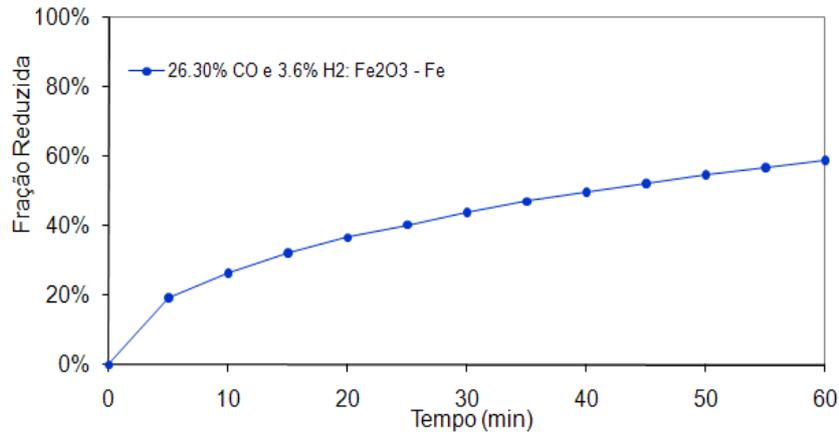
**Figura 5.** Evolução da fração reagida com o tempo para o gás misto de CO com H<sub>2</sub>, a 1.123 K.



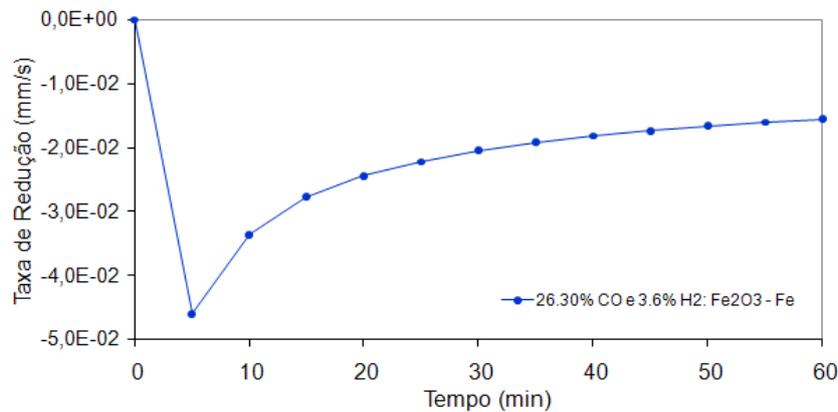
**Figura 6.** Evolução da taxa de redução com o tempo para o gás misto de CO com H<sub>2</sub>, a 1.123 K.

As Figuras 7 e 8 mostram os parâmetros cinéticos para o modelo de uma interface ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}$ ), para uma composição de 27,1% de CO, 3,4% de H<sub>2</sub> e 69,5% de N<sub>2</sub>

e levando em conta apenas os gases redutores, a composição fica em 89% de CO e 11% de H<sub>2</sub>, a uma temperatura de 1.173 K:

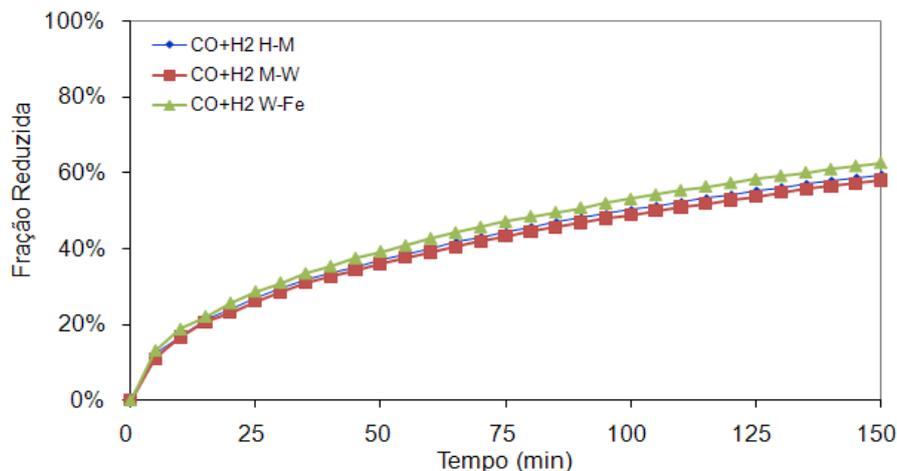


**Figura 7.** Evolução da fração reagida com o tempo para o gás misto de CO com H<sub>2</sub>, a 1.373 K.

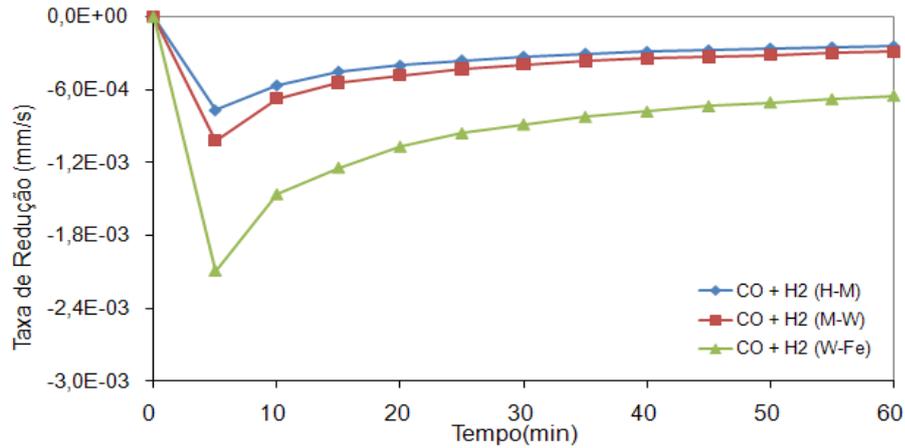


**Figura 8.** Evolução da taxa de redução com o tempo para o gás misto de CO com H<sub>2</sub>, a 1.373 K.

As mesmas análises de fração reduzida e taxa de redução foram feitas para o modelo de três interfaces, considerando uma composição de 85% para o CO e de 15% para H<sub>2</sub>. Seus resultados são mostrados nas Figuras (9) e (10):



**Figura 9.** Evolução das frações reduzidas com o tempo para o gás misto de CO com H<sub>2</sub>, a 1.123 K (850°C), no modelo de três interfaces.

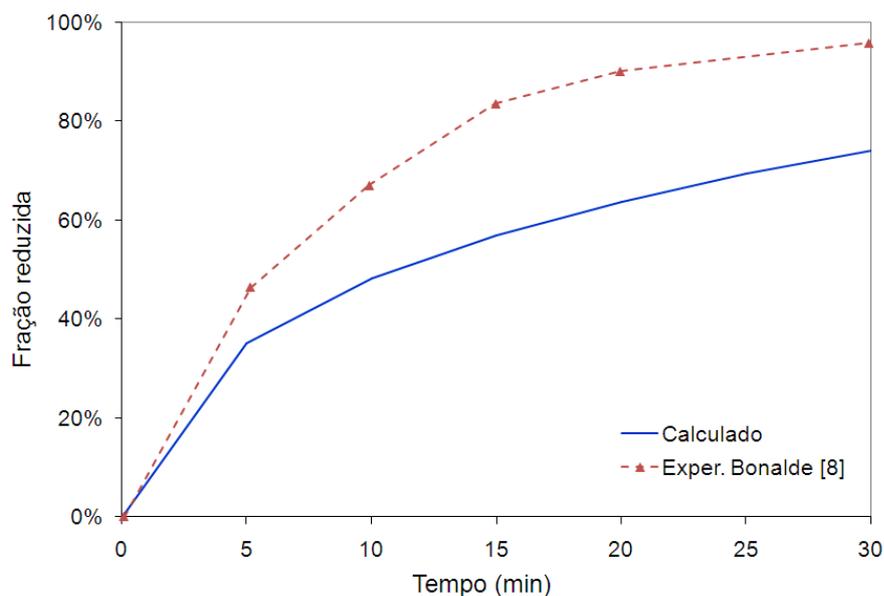


**Figura 10.** Evolução das taxas de redução com o tempo para o gás misto de CO com H<sub>2</sub>, a 1.123 K (850°C), no modelo de três interfaces.

No gráfico da Figura 9 mostra que a fração reduzida da terceira interface ( $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ ) é a mais rápida enquanto a primeira e segunda interfaces estão quase sobrepostas. Já o gráfico da Figura 10 mostra que a taxa de redução da terceira interface também é a mais rápida e a primeira e segunda interfaces estão também quase totalmente sobrepostas.

A redução e a taxa de redução para o gás puro de CO é ineficiente, porém, os quatro modelos simulados acima possuem quantidade bem maior de CO do que de H<sub>2</sub> em sua composição mista e mesmo assim, os resultados obtidos foram bastante eficientes. Isso acontece porque nos gases mistos de CO com H<sub>2</sub>, acontecem várias reações, entre elas a reação de Boudouard ( $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ ) e a reação do vapor d'água ( $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$ ) que geram gases redutores, aumentando a capacidade de redutibilidade.

Por fim, a última simulação será a do gás comercial composto de CO(34%), H<sub>2</sub>(55,7%), CH<sub>4</sub>(4%) e CO<sub>2</sub>(2%) denominado Midrex. As composições apenas dos gases redutores são: 62% de H<sub>2</sub> e 38% de CO:



**Figura 11.** Comparativo entre os resultados numérico e experimental para o gás Midrex.

Observando-se as curvas do gráfico na Figura 11 observa-se tendências de comportamento aproximados, porém com o modelo numérico afastado ainda daqueles resultados obtidos experimentalmente por Bonalde.<sup>(8)</sup> Este fato indica a necessidade de ajustes nos parâmetros do modelo numérico, visando torná-lo mais correto.

A próxima etapa deste trabalho será a obtenção de dados experimentais a partir de trabalhos realizados no forno do laboratório com amostras de pelotas. Os dados práticos serão anotados e posteriormente comparados com as simulações. Outra coisa a ser feita é a comparação de dados simulados com a literatura.

#### 4 CONCLUSÃO

- As equações desenvolvidas simularam curvas que estão dentro dos padrões da cinética de redução;
- quanto maior a porcentagem de gás hidrogênio na mistura, maior o grau de redutibilidade; e
- apesar da ineficiência de redução por monóxido de carbono, em uma mistura contendo o gás hidrogênio, formam um bom agente redutor.

#### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES e CNPq pelo apoio fornecido na realização deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- 1 MOON, I.-J.; RHEE, C.-H.; Reduction of hematite compacts by H<sub>2</sub>-CO gas mixtures, **Steel Research**, v. 69, n. 8, p.302-306, 1998;
- 2 RODRÍGUEZ, R.A.D.; CONEJO, A.N., BEDOLLA, E.B.; Kinetics of reduction of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles with H<sub>2</sub>-CO mixtures at low temperatures, **Iron and Steelmaker (I and SM)**, v. 30, n. 1, p.25-33, 2003;
- 3 EL-GEASSY, A.A.; NASR, M.I.; Influence of the original structure on the kinetics and mechanisms of carbon monoxide reduction of hematite compacts, **ISIJ International**, Tokyo, v. 30, n. 6, p.417-425, 1990;
- 4 TOWHIDI, N.; SZEKELY, J.; The influence of carbon deposition on the reduction kinetics of commercial grade hematite pellets with CO, H<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>, **Metallurgical Transactions B**, v. 14, n. 3, p.359-367, 1983;
- 5 LI, Q.J.; HONG, X.; Non-isothermal kinetic model for reduction of ferrous oxide with hydrogen and carbon monoxide, **Ironmaking & Steelmaking**, v. 36, n. 1, p.24-28, 2009;
- 6 DONG, X.; YU, A., YAGI, J., ZULLI, P.; Modelling of multiphase flow in a blast furnace: Recent developments and future work, **ISIJ International**, Tokyo, v. 47, n. 11, p.1553-1570, 2007;
- 7 PIOTROWSKI, K.M.; MONDAL, K., WILTOWSKI, T., DYDO, P., RIZEG, G.; Topochemical approach of kinetics of the reduction of hematite to wüstite, **Chemical Engineering Journal**, v. 131, p.73-82, 2007;
- 8 BONALDE, A.; HENRIQUEZ, A.; MANRIQUE, M.; Kinetic Analysis of the iron oxide reduction using hydrogen-carbon monoxide mixtures as reducing agent, **ISIJ International**, Tokyo, v. 45, n. 9, p.1255-1260, 2005;
- 9 LEVENSPIEL, O.; Engenharia das Reações Químicas - Volume I - Cinética Química Aplicada, Editora Edgard Blücher, 1ª reimpressão, 1980.
- 10 KANG, H.W.; CHUNG, W.S., MURAYAMA, T., ONO, Y.; Effect of iron ore shape on gaseous reduction rate, **ISIJ International**, v. 38, n. 11, p.1194-1200, 1998;