

# ESTUDO DA CINÉTICA DE REDUÇÃO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO EM ALTOS FORNOS: PARTE II – EFEITO DO EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO<sup>1</sup>

Erick Ledyan de Almeida<sup>2</sup>  
Giselle de Mattos Araújo<sup>3</sup>  
José Adilson de Castro<sup>4</sup>

## Resumo

A redução dos óxidos de ferro em altos fornos tem sua evolução em termos fenomenológicos afetada por um conjunto de parâmetros e propriedades. Dentro destes a atmosfera redutora é de vital importância para o adequado controle do processo. Tem-se por objetivo estudar os efeitos da variação de temperatura sobre os gases redutores, tanto do ponto de vista da fração reagida quanto das taxas de redução desenvolvidas. Partindo-se de relações matemáticas que modelam a cinética de redução estabelecidas anteriormente, avaliam-se os efeitos da variação da temperatura em dois de seus termos, a difusividade e a concentração de equilíbrio, e seus consequentes desdobramentos na evolução dos parâmetros que descrevem a cinética. Tais análises tomam como base um perfil térmico desenvolvido pela carga sólida no interior de um alto forno em marcha de produção, sendo aplicado aos modelos de redução de uma interface ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}$ ), e de três interfaces ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ ). Os resultados obtidos mostram a diferença entre as atmosferas de redução propostas, bem como evidenciam o mecanismo físico controlador da cinética e a etapa de redução mais lenta.

**Palavras-chave:** cinética; perfil térmico; equilíbrio.

## KINETIC STUDY OF IRON ORE PELLETS REDUCTION IN BLAST FURNACES: PART II – THERMODYNAMIC EQUILIBRIUM EFFECT

### Abstract

The iron oxides reduction in blast furnace has its evolution in phenomenological terms affected by a set of parameters and properties. The reducing atmosphere is vital for proper process control. This work aims to study the effects of temperature variation on the reducing gases, both in terms of fractional reduction as the developed reduction rate. Starting from mathematical relationships previously established, which describes reduction kinetic, estimates about effects of temperature on two of its terms – the diffusivity and equilibrium concentration – were conducted, and its consequent effects in evolution of parameters that describes the kinetics. Those analysis are premised on a thermal profile developed by the solid charge inside a blast furnace production, being applied both to single interface model ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}$ ) and to three interfaces model ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ ). The results show the difference between two considered reducing atmospheres, beyond indicating physical mechanism controlling the kinetics and the slowest reduction step.

**Key words:** kinetic, thermal profile, equilibrium.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

<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 - RJ

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

## 1 INTRODUÇÃO

A redução de óxidos de ferro em altos fornos consiste hoje na mais importante forma de se obter ferro metálico a partir de seus minérios, seja na forma bruta como hematita bitolada, ou na de aglomerados de finos como a pelota e o sinter. Por esta razão o completo entendimento deste fenômeno é de extrema importância para os siderurgistas, principalmente do ponto de vista da redução em condições operacionais de um alto forno. Uma importante forma de se estudar a redução em altos fornos é através de estudos analíticos e simulações computacionais,<sup>(1-10)</sup> visto o alto custo de testes realizados em escala prática. A cinética de ocorrência da redução sofre diversas influências de diversos parâmetros, entre eles a difusividade das espécies gasosas envolvidas, e condições de equilíbrio das reações. O entendimento destes efeitos, especialmente na condição não-isotérmica característica de altos fornos é de grande valia.

A redução de partículas de hematita em baixas temperaturas (entre 550 e 650°C) foi objeto de estudo de Rodriguez, Conejo e Bedolla.<sup>(11)</sup> 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.

Li e X. Hong<sup>(12)</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. Com os resultados obtidos, os autores puderam concluir que o tratamento não-isotérmico dado ao processo de redução levou à variações na entalpia da reação mantendo, porém excelente correlação entre seus resultados calculados e aqueles de referência na literatura.

A influência da composição da atmosfera redutora foi avaliada por Moon e Rhee,<sup>(13)</sup> que estudaram o comportamento em redução de compactos de finos de hematita. 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.

Bonalde, Henriquez e Manrique<sup>(14)</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.

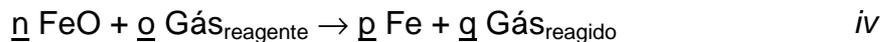
Em artigo dedicado ao estudo da cinética de redução da hematita pelo carbono, Y.K. Rao<sup>(15)</sup> avaliou os efeitos de parâmetros tais como temperatura, tamanho de partícula, proporção Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C. Seus resultados mostraram que todas estas variáveis afetam consideravelmente a cinética da redução, e também que a formação do CO a partir das partículas de C é o passo limitante de todo o processo.

O objetivo deste trabalho é estudar a cinética de redução numa condição não isotérmica, utilizando para isso o perfil térmico desenvolvido pela carga sólida durante sua residência no alto forno (antes da fusão), considerando para isso duas atmosferas redutoras (CO e H<sub>2</sub>).

## 2 DESENVOLVIMENTO

A redução dos óxidos de ferro acontece em reações do tipo sólido-gás, com a presença de uma interface que separa as regiões reagida e não-reagida,

caracterizando assim o modelo cinético generalizado conhecido como modelo do núcleo não-reagido. Neste trabalho a redução é abordada, do ponto de vista das reações, segundo dois modelos: o de uma única interface de reação (com a redução da hematita diretamente a ferro), e também o de três interfaces (com a redução gradual hematita-magnetita-wustita-ferro), descritos respectivamente pela reação *i*, e *ii*, *iii* e *iv*.



Fenômenos caracterizados por reações sólido-gás, possuem etapas (ou atividades) distintas ao longo de sua ocorrência, que envolvem transferência de massa no sólido (difusão) e a reação química propriamente dita acontecendo na interface. O estágio mais lento será chamado “mecanismo controlador” da cinética.

Partindo-se de equações previamente estabelecidas<sup>(16)</sup> para o modelo cinético proposto, desenvolve-se aqui a análise inicialmente do mecanismo controlador ao longo da redução mediante o perfil térmico adotado, e em seguida faz-se o levantamento dos parâmetros cinéticos (fração reduzida e taxa de redução) ao longo do trajeto da carga no alto forno.

## 2.1 Modelamento Matemático

Em função do mecanismo controlador as equações a serem aplicadas para avaliação do tempo adimensional (tempo absoluto para alcançar 100% de redução) aliado à cada mecanismo, bem como as frações reduzidas e taxas de redução são determinadas por equações diferenciadas, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Equações da cinética de redução<sup>(16)</sup>

Equação	Controle pela difusão	Controle pela reação química
Tempo adimens.	$\tau_D = \frac{\rho_{\text{sólido}} \cdot R^2 \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)}{6 \cdot a \cdot D_{\text{ef}} \cdot (C_{\text{gás}} - C_{\text{gás, equil}})}$	$\tau_{RQ} = \frac{\rho_{\text{sólido}} \cdot R \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)}{a \cdot k_{RQ} \cdot (C_{\text{gás}} - C_{\text{gás, equil}})}$
Fração reduzida ( $\alpha$ )	$1 - 3 \cdot (1 - \alpha)^{2/3} + 2 \cdot (1 - \alpha) = \left[ \frac{6 \cdot a \cdot D_{\text{ef}}^{\text{gás}} \cdot (C_{\text{gás}} - C_{\text{gás, equil}})}{\rho_{\text{sólido}} \cdot R^2 \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \cdot (t)$	$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = \left[ \frac{a \cdot k_{RQ} \cdot (C_{\text{gás}} - C_{\text{gás, equil}})}{\rho_{\text{sólido}} \cdot R \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \cdot (t)$
Taxa de redução	$\frac{dr_n}{dt} = \left\{ \left[ \frac{a \cdot R \cdot D_{\text{ef}}^{\text{gás}} \cdot (C_{\text{gás}} - C_{\text{gás, equil}})}{\rho_{\text{sólido}} \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \cdot \left[ \frac{1}{(r_n^2 - r_n^2 \cdot R)} \right] \right\}$	$\frac{dr_n}{dt} = - \left[ \frac{a \cdot (C_{\text{gás}} - C_{\text{gás, equil}})}{\rho_{\text{sólido}} \cdot (1 - \varepsilon_0 \cdot \gamma)} \right] \cdot (k_{RQ})$

As equações envolvem propriedades físicas como raio da pelota ( $R$ ), densidade do sólido ( $\rho_{\text{sólido}}$ ), porosidade ( $\epsilon_0$ ), tortuosidade ( $\gamma$ ), raio do núcleo ( $r$ ) no instante de tempo ( $t$ ). Porém dependem também de parâmetros químicos como o coeficiente estequiométrico do sólido reagente ( $a$ ), além da difusividade efetiva que é termicamente ativada – lei de Arrhenius, conforme equação (1) – e da concentração de equilíbrio, relacionada à energia (pela constante de equilíbrio) que é dependente da temperatura – equação (2).

$$D_{\text{eff}} = D_0 \cdot \exp(E/RT) \quad (1)$$

$$K_{\text{equil}} = \frac{\sum \text{prod}}{\sum \text{react}} = \exp(-\Delta G_0/RT) = \exp[-(\Delta H_0 - T \cdot \Delta S_0)/RT] \quad (2)$$

O termo  $k_{RQ}$ , é uma constante de velocidade para reações de primeira ordem, representada por uma relação entre as concentrações do gás no instante ( $t$ ) e no início da reação, e o tempo. O modelo cinético adotado considera que a reação tem início efetivamente quando a barreira do equilíbrio é vencida, passando então a contribuir para a evolução da redução. Desta forma  $k_{RQ}$  é então expresso por:

$$k_{RQ} = \frac{1}{t} \cdot \ln\left(\frac{C_{\text{gás},t}}{C_{\text{gás},\text{equil}}}\right) \quad (3)$$

Desta forma têm-se termos nas expressões que dependem da temperatura, não podendo ser considerados constantes em uma situação de redução não-isotérmica. Suas variações terão efeitos diretos no comportamento da cinética, seja por um ou por outro mecanismo controlador.

A seguir as equações acima são aplicadas à um perfil de temperaturas que reproduz as variações térmicas da carga sólida em um alto forno.

### 3 RESULTADOS

As avaliações não-isotérmicas estiveram baseadas no perfil térmico a seguir, condizente com aquele descrito pela carga sólida ferrífera em um alto forno. Os dados da variação tempo/temperatura/altura do forno foram obtidos por simulação computacional.<sup>(7)</sup> A Figura 1 mostra o perfil térmico adotado, estando demarcada no gráfico a região que corresponde ao intervalo de temperatura (aproximadamente entre 650°C e 1.150°C, ou seja, 923 K e 1.423 K) no qual acontece a maior parte da redução, e acima desta pode ocorrer a fusão (zona de amolecimento e fusão).

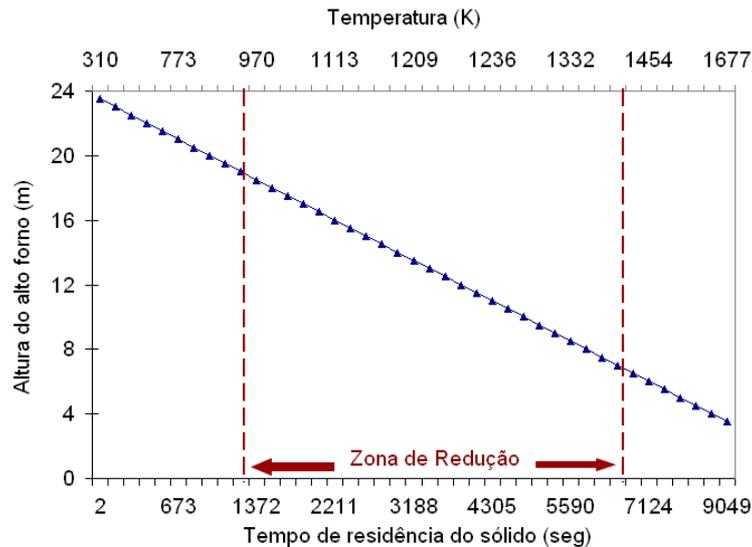


Figura 1. Perfil térmico da carga sólida ferrífera no interior do alto forno.

Este perfil térmico foi aplicado tanto para o modelo de uma quanto o de três interfaces.

### 3.1 Modelo de uma Interface de Redução ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}$ )

Para determinar o mecanismo controlador em cada reação e conseqüentemente definir as equações da cinética a serem consideradas, avaliou-se os tempos adimensionais necessários quanto difusão e reação química na interface, individualmente, são os mecanismos controladores. As análises são feitas para pelotas de raio 12 mm, densidade 4,7 g/cm<sup>3</sup>, e porosidade e tortuosidade respectivamente 0,25 e 0,50, sendo estes valores mantidos constantes ao longo dos cálculos. Foram adotadas duas atmosferas redutoras, CO e H<sub>2</sub> (puros). Isso permitiu caracterizar seus comportamentos distintos, e criar bases para futuros estudos em atmosfera de redução mista. Propriedades destes gases – difusividade efetiva e constante de equilíbrio dependentes da temperatura – foram obtidas a partir da literatura.<sup>(7,17)</sup> A Figura 2 mostra a evolução de  $\tau_D$  e  $\tau_{RQ}$  para a redução da hematita a ferro puro – interface única – ao longo do trajeto da pelota no AF (valores em escala logarítmica em virtude da grande diferença dos valores absolutos determinados).

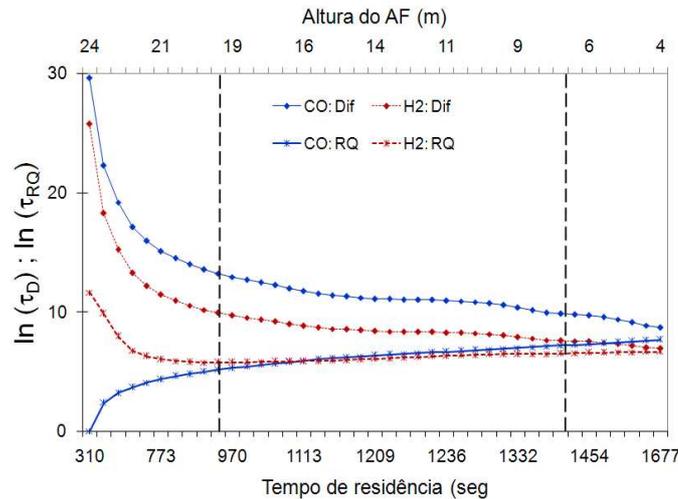


Figura 2. Evolução dos tempos adimensionais ao longo das redução.

Como se pode ver, a etapa da difusão no sólido reagido é aquela que requer os maiores tempos absolutos para se chegar a 100% de reação, mantendo esta tendência ao longo de todo o perfil térmico, e sendo assim o então o mecanismo mais lento ocorrendo no processo de redução, e conseqüentemente o estágio controlador. A figura mostra também que a medida em que a temperatura aumenta há uma aproximação das curvas de  $\ln(\tau_D)$  e  $\ln(\tau_{RQ})$  para ambos os gases. Este fato pode ser explicado pela difusividade que é termicamente ativada, e com isso tende a ser facilitada em temperaturas mais elevadas. A difusividade também explica os tempos inferiores observados para o  $H_2$ , que possui menor tamanho de molécula e conseqüente facilidade para se difundir quando comparado ao  $CO$ .<sup>(12)</sup>

Tendo em vista a predominância da difusão, e a aproximação das curvas acontecer fora da região de redução, adota-se esta etapa como controladora do processo para a redução em uma única interface.

Sendo a difusividade e a concentração de equilíbrio termicamente dependentes, há então um perfil de variação destes parâmetros em função da temperatura, o qual é apresentado na Figura 3 para a redução ( $Fe_2O_3 \rightarrow Fe$ ).

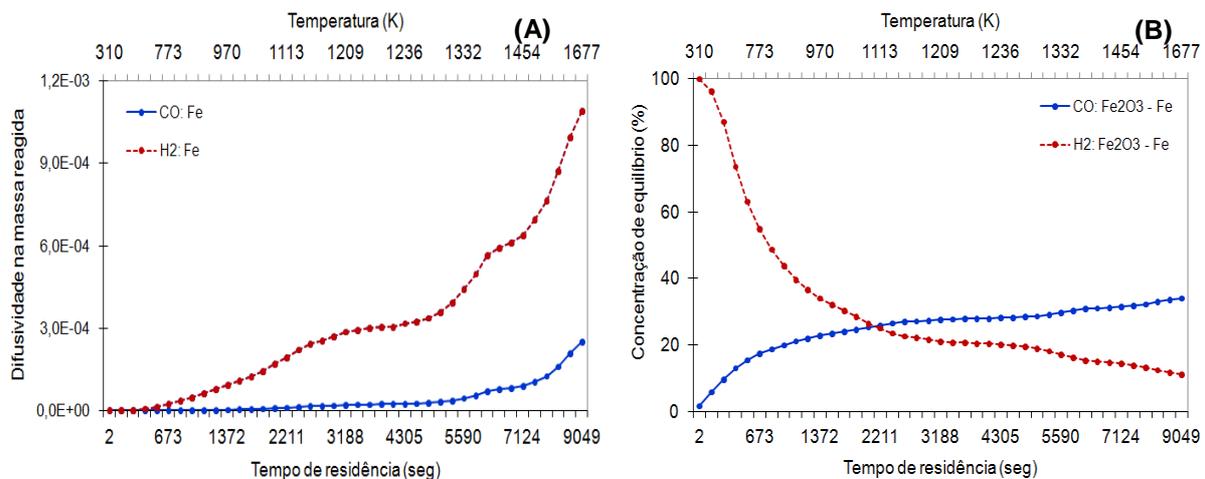
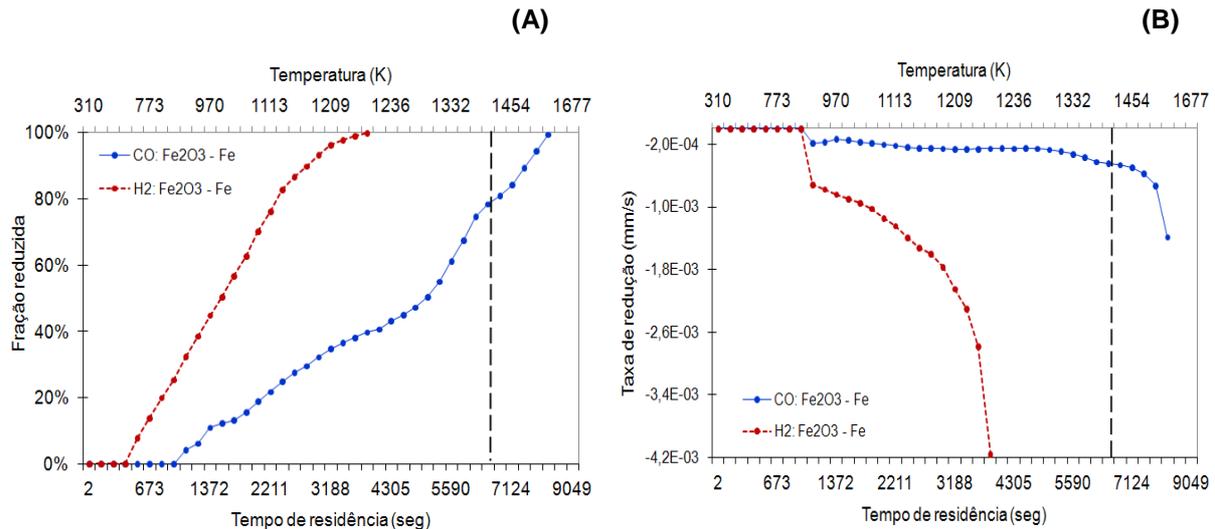


Figura 3. Variação da difusividade, em (A), e da concentração de equilíbrio, em (B).

A difusividade que é termicamente ativada exibiu o comportamento previsto, aumento com a temperatura. E mais uma vez a diferença de tamanho das moléculas mostra seu efeito, gerando maiores ganhos de difusividade para o hidrogênio.

Para as concentrações de equilíbrio o comportamento observado foi contrário para os dois gases analisados. Considerando-se uma concentração de gás no forno fixa, enquanto a barreira termodinâmica para o hidrogênio diminui com a temperatura (visto o decréscimo de  $C_{H_2, \text{equil}}$ ), para o CO ela aumenta, tornando a concentração de gás efetivamente disponível para a redução gradualmente menor.

Estas tendências se refletiram nas frações reduzidas e taxas de redução desenvolvidas, como se pode ver em (4-A) e (4-B).



**Figura 4.** Evolução do processo de redução ao longo do trajeto da pelota dentro do AF, em (A) para a fração reduzida, e em (B) para a taxa de redução.

Diferenças na difusividade e na concentração de equilíbrio entre CO e H<sub>2</sub>, levaram a condições de redução mais favoráveis para o segundo. Como se pode notar nos gráficos da Figura 4, mediante uma atmosfera de hidrogênio uma vez iniciada a redução esta se torna progressivamente mais rápida, alcançando sua totalidade antes do fim da zona de redução. Este fato não é observado para o CO, que alcança em torno de 80% de massa reagida ao fim da mesma região do forno.

Estes resultados mostram a ineficiência do CO como agente redutor, e também o comportamento acelerado do H<sub>2</sub>. Bonalde, Henriquez e Manrique<sup>(14)</sup> em estudo isotérmico obteve resultados intermediários ao utilizar uma mistura de CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> como gás reagente. Em um conceito termodinâmico pode-se modelar uma mistura de gases redutores, os quais além de estabelecerem uma relação de equilíbrio entre as concentrações das espécies redutoras, pode adicionalmente levar em conta um balanço das contribuições das difusividades (ao variar a diferença entre as concentrações de equilíbrio e na mistura de redução).

### 3.2 Modelo de Três Interfaces de Redução (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> → FeO → Fe)

Assim como feito para o modelo anterior, a evolução dos tempos adimensionais para ambos os mecanismos de controle foi determinada, porém desta vez considerando separadamente cada uma das etapas da redução (reações ii, iii e iv), e cada uma das atmosferas redutoras. Estes resultados estão apresentados na

Figura 6, sendo (A) a redução  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ , em (B)  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$ , e em (C)  $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ .

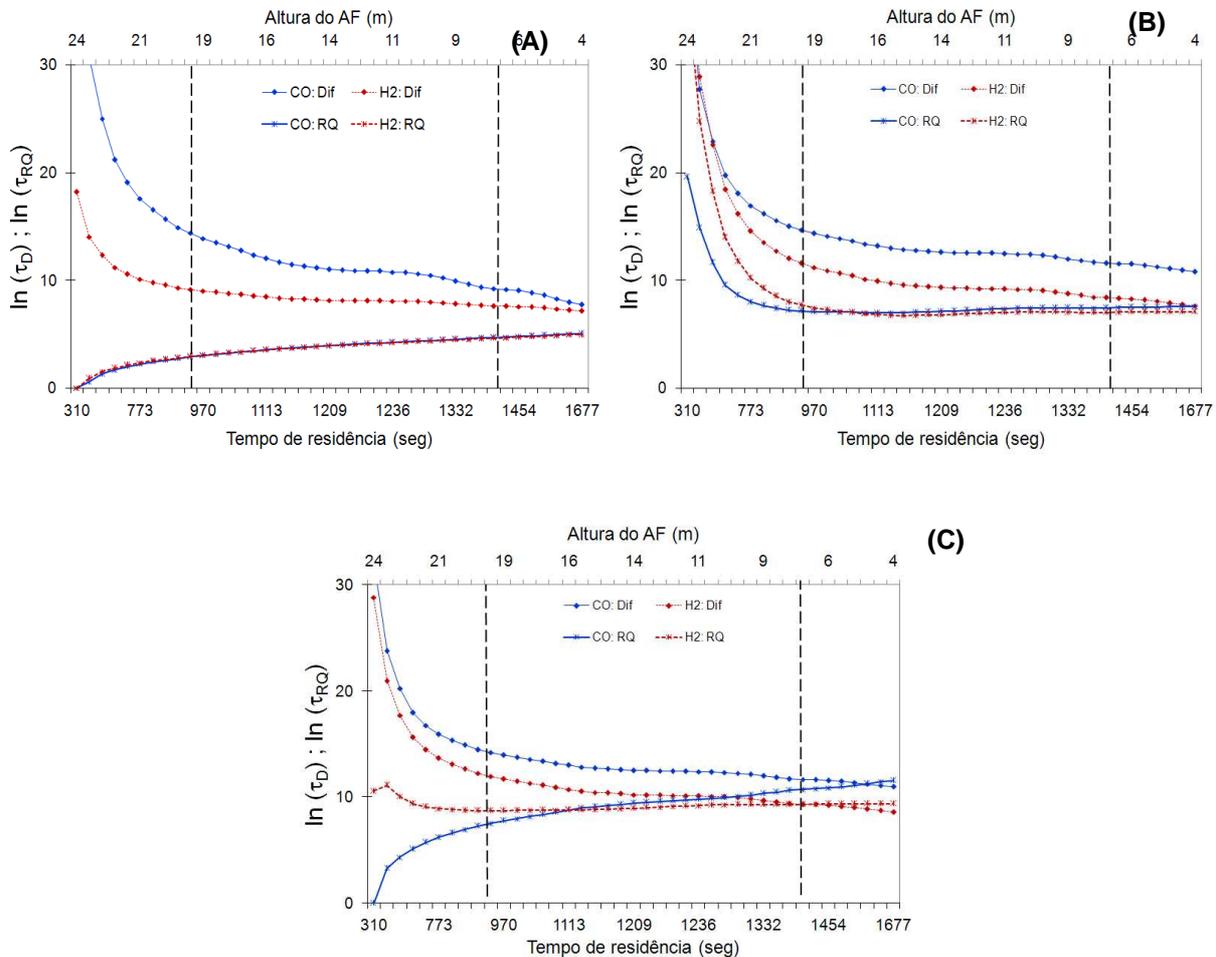


Figura 5. Variação do tempos adimensionais dentro do alto forno, em (A) para a reação *ii*, em (B) para *iii*, e em (C) para a redução em *iv*.

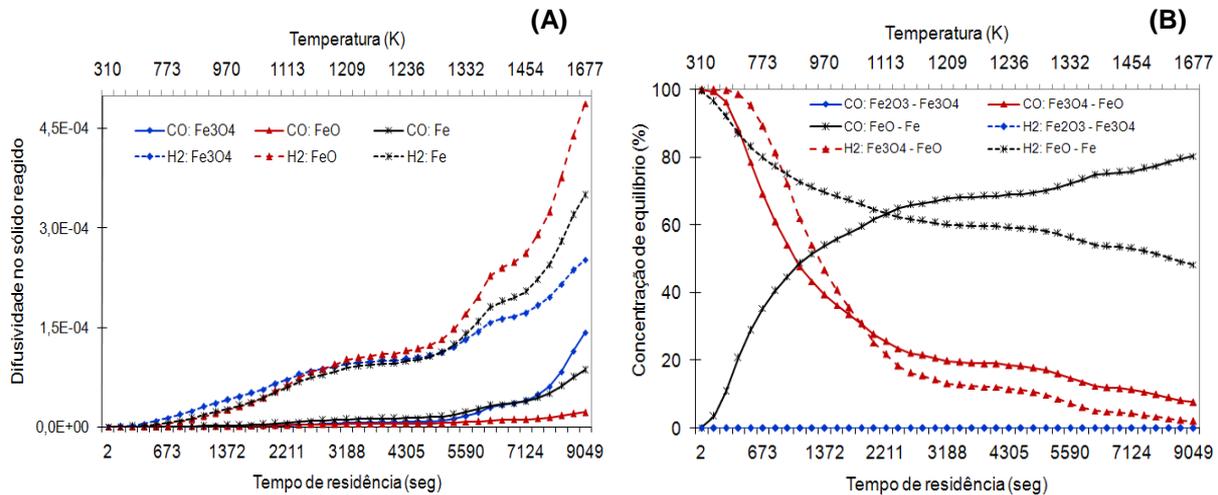
Os gráficos mostrados na Figura 5 evidenciam mais uma vez a difusão no sólido reagido como etapa controladora do processo. Em 5-A tanto para CO quanto  $\text{H}_2$  este mecanismo demanda maiores tempos adimensionais para a reação em cada instante e temperatura, ao longo de toda a zona de redução, mostrando nítido afastamento em relação às curvas referentes ao mecanismo da reação química. Este comportamento também é observado para a redução de magnetita para wustita (gráfico 5-B).

Na Figura 5-C, pode-se observar que para a redução pelo CO há uma aproximação entre as curvas para  $\tau_D$  e  $\tau_{RQ}$  porém isso acontece fora da zona de redução. Para o  $\text{H}_2$  isto também acontece, mas deve-se notar que as curvas para este gás se cruzam próximo ao fim desta região, aproximadamente no último quarto desta faixa. Isso indica uma alternância entre os mecanismos controladores, criando nesta região do forno uma condição de controle misto do processo.

Analisando de forma conjunta os resultados mostrados na Figura 5 e aqueles do modelo de uma interface, optou-se por manter a difusão na camada reduzida como etapa controladora tanto para CO quanto para  $\text{H}_2$ . Apesar da região de controle misto observada em 5-C, esta acontece já no fim da zona de redução, e conforme observado nas análises anteriores, por ter alta difusividade e barreira

termodinâmica decrescente, a redução pelo hidrogênio acontece rapidamente, com a pelota chegando ao fim da zona de redução já totalmente reagida.

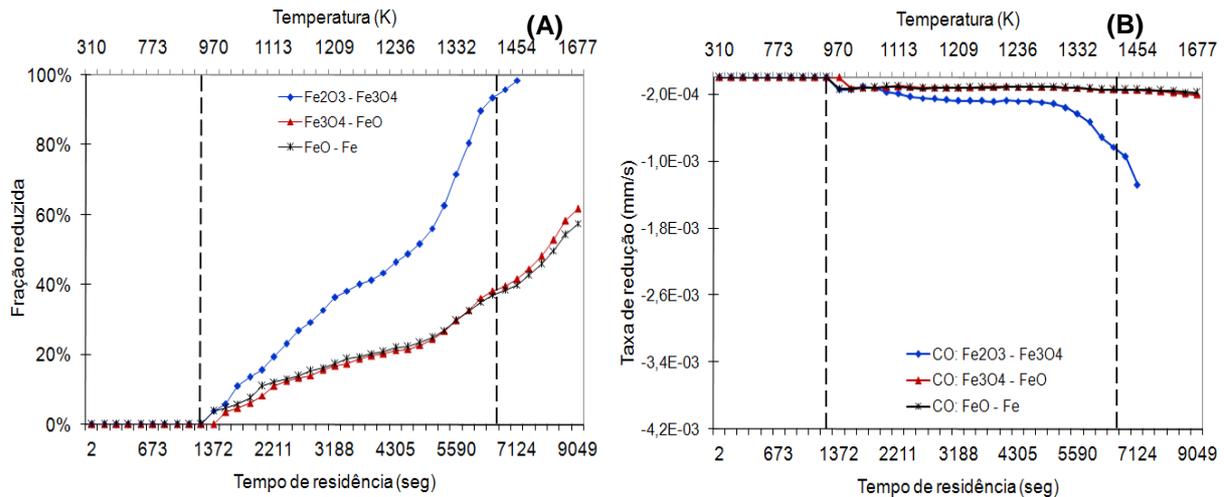
Novamente as difusividades na massa reduzida ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$  e  $\text{Fe}$ ) foram avaliadas dentro do perfil térmico considerado, bem como as concentrações de equilíbrio para os gases redutores em cada uma das reações do modelo de três interfaces. A Figura 6 mostra as variações destes parâmetros ao longo da evolução do tempo e da temperatura.



**Figura 6.** Variação da difusividade, em (A), e da concentração de equilíbrio, em (B).

As curvas na Figura 6 reforçam a tendência do  $\text{H}_2$  como redutor mais eficiente, visto suas maiores difusividades e menores concentrações de equilíbrio (menor barreira termodinâmica). Na Figura 6-B é importante notar que as concentrações obtidas para a reação  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$  são muito baixas tanto para o CO quanto para o  $\text{H}_2$ , sendo da ordem de  $10^{-3}$ . Levando-se então em conta este fato e adicionalmente a pouca variação da difusividade dos gases entre os diferentes sólidos reagidos (6-A), pode-se prever que esta será a etapa mais rápida da redução, visto a menor barreira termodinâmica, pois todo o gás que difunde até a interface contribui efetivamente para o progresso deste passo da redução.

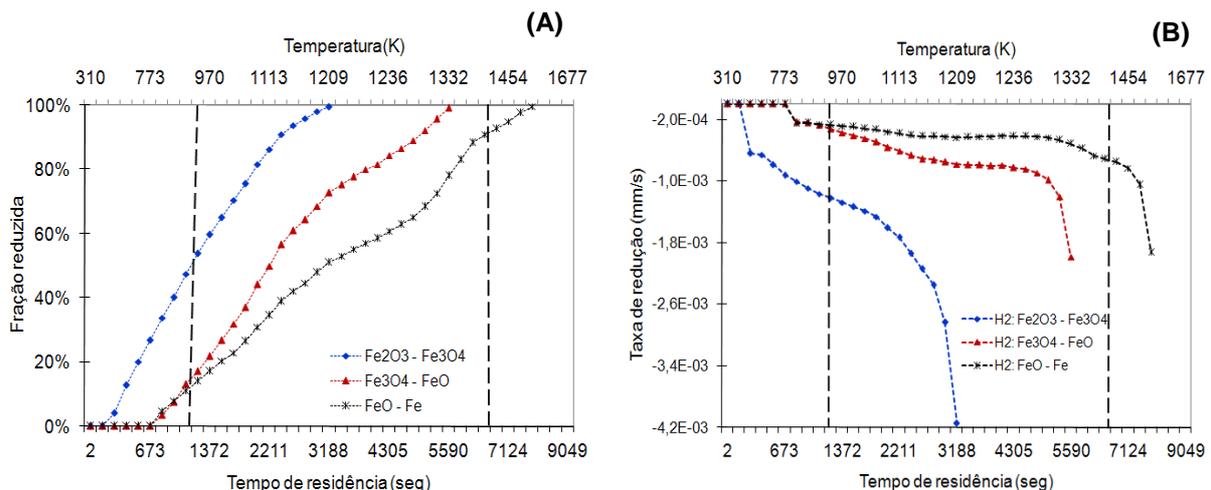
A influência destes parâmetros pode ser vista na Figura 7 que mostra a evolução da fração reagida (em A) e da taxa de redução (em B) em cada uma das interfaces, quando CO é adotado como agente redutor.



**Figura 7.** Evolução do processo de redução ao longo do trajeto da pelota dentro do AF, em (A) para a fração reduzida, e em (B) para a taxa de redução, sendo CO o agente redutor.

Para o CO, a Figura 7-A mostra mais uma vez a ineficiência deste gás como agente redutor. Como previsto anteriormente, a redução para a primeira interface foi a mais acelerada chegando a quase 100% de reação ao fim da zona de redução. Porém as demais interfaces apresentaram tendências praticamente iguais, não completando a redução em toda a massa de sólido reagente, sendo a fração reduzida depois ao fim do perfil térmico da ordem de 60%. As taxas de redução em cada interface complementam esta análise, na Figura 7-B pode-se notar a taxa para a primeira interface evoluindo de uma forma mais acelerada, quando comparada às duas outras, que assim como observado em (A) exibem curvas praticamente sobrepostas, não permitindo a definição de uma etapa mais lenta.

A Figura 8 apresenta respectivamente as variações da fração reduzida (8-A) e da taxa de redução (8-B) nas três interfaces, quando H<sub>2</sub> é usado como agente redutor.



**Figura 8.** Evolução do processo de redução ao longo do trajeto da pelota dentro do AF, em (A) para a fração reduzida, e em (B) para a taxa de redução, sendo H<sub>2</sub> o agente redutor.

Assim como previsto anteriormente, o uso do hidrogênio como agente redutor acarretou as maiores taxas de redução ao longo do perfil térmico, e também os

melhores resultados de progresso das etapas de redução. A Figura 8-A mostra a forma como para este gás os três estágios da redução se complementam, com tendências das curvas semelhantes, porém em instantes diferentes do processo, permitindo o progresso conjunto e gradativo das três interfaces, sendo que as duas primeiras têm sua meta de 100% de redução alcançada ainda antes do fim da zona de redução.

As curvas da Figura 8 A e B mostram a terceira etapa da redução (wustita para ferro) como sendo a mais lenta, por desenvolver tanto as menores taxas de redução quanto os mais baixos índices de fração reduzida, caracterizando assim, esta como a etapa controladora do processo, fato que é comprovado pela literatura. Li e Hong<sup>(12)</sup> afirmam que há um consenso de que o último estágio de redução é aquele controlador do processo. Bonalde, Henriquez e Manrique<sup>(14)</sup> apresenta em seu artigo considerações acerca da redução, entre elas aquela de que redução da hematita à wustita acontece muito rapidamente, logo na fase inicial da redução. Warner<sup>(18)</sup> aponta como uma das principais características da redução o fato de a reação wustita → ferro ser o estágio controlador do processo. E Dutta e Ghosh<sup>(19)</sup> realizaram experimentos de redução, e consideraram apenas os dados do último estágio para fins de análise. Estas informações da literatura estão alinhadas com os resultados obtidos pelo modelo proposto quando da análise não-isotérmica realizada.

#### 4 CONCLUSÃO

A introdução do perfil de temperaturas na análise permitiu a avaliação de parâmetros tais como a difusividade e concentrações de equilíbrio do ponto de visto termodinâmico. Tais fatores tiveram grande influência tanto na determinação do mecanismo controlador do processo quanto na diferença de evolução da redução para os dois gases considerados. Para o hidrogênio como agente redutor a cinética se apresentou bem mais eficiente do que para o monóxido de carbono, tanto no modelo de uma quanto no de três interfaces. Este fato foi creditado a diferença de difusividades entre os gases.

O modelo de três interfaces, por abordar a redução de forma gradativa permitiu no caso do hidrogênio a determinação de uma etapa mais lenta (de wustita para ferro), resultado este em concordância com a literatura. Além disso, o estudo da redução nas três interfaces em um ambiente de temperaturas variáveis deixou claras as contribuições individualizadas dos gases em cada uma das reações de redução, apontando etapas mais rápidas e possibilidades de mudança no mecanismo de controle, ao longo da evolução da carga no interior do alto forno.

#### Agradecimentos

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

#### REFERÊNCIAS

- 1 YAGI, J.; Mathematical Modeling of the flow of four fluids in a packed bed; ISIJ International, v33, N.6, (1993), p.619-639.
- 2 YAGI, J.; MUCHI, I.; Theoretical estimation on longitudinal distributions of process variables in blast furnace and its productivity, Transactions ISIJ, v10, (1970), p.392-405.
- 3 AUSTIN, P.R.; NOGAMI, H.; YAGI, J. ISIJ International, v37, (1997), p.748-756.

- 4 LAHIRI, A , K ; SESHADRI, V.; Analysis of the blast furnace process based on a dynamic model, Journal of Iron and Steel Institute, (1969), p293-307.
- 5 TAKATANI,K.; INADA T. UJISAWA, Y.; ISIJ International, v37, (1999), p.15-23.
- 6 SUGIYAMA, T ; SUGATA, M; Development of Two-Dimensional blast furnace total model and its application, Proceedings of the first international conference and exhibition on computer applications to materials science and Engineering-CAMSE'90, Tokyo, Elsevier Science Publishers B.V.(1990), p.545-552.
- 7 CASTRO, J. A; A Multi-Dimensional Transient Mathematical Model of Blast Furnace Based on Multi-fluid Model, Ph.D Thesis, IAMP-Institute For Advanced Materials Processing- Tohoku University-Sendai-Japan (2000).
- 8 AUSTIN, P.R; NOGAMI, H.; YAGI, J.; ISIJ International, v37, (1997), p.458-467.
- 9 OMORI, Y. Blast Furnace Phenomena and Modeling; NY: Elsevier Applied Science, 1987, 629p.
- 10 CASTRO, J. A; NOGAMI, H. YAGY, J.; Three-Dimensional multi-phase mathematical modeling of the blast furnace based on the multi-fluid model, ISIJ International, v. 41, n.1, . p.44-52 Jan. 2002.
- 11 RODRÍGUEZ, R.A.D.; CONEJO, A.N., BEDOLLA, E.B.; Kinetics of reduction of  $Fe_2O_3$  particles with  $H_2$ -CO mixtures at low temperatures, Iron and Steelmaker (I and SM), v. 30, n. 1, p.25-33, 2003.
- 12 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.
- 13 MOON, I.-J.; RHEE, C.-H.; Reduction of hematite compacts by  $H_2$ -CO gas mixtures, Steel Research, v. 69, n. 8, p.302-306, 1998.
- 14 BONALDE, A.; HENRIQUEZ, A.; MANRIQUE,M.; Kinetic Analysis of the iron oxide reduction using hydrogen-carbon monoxide mixtures as reducing agent, ISIJ International, v. 45, n. 9, p.1255-1260, 2005.
- 15 RAO, Y.K.; The kinetics of reduction of hematite by carbon, Metallurgical Transactions, v. 2, p.1439-1447, May – 1971.
- 16 MATTOS, G.A.; Estudo analítico da cinética de redução de pelotas de minério de ferro em altos fornos; Qualificação de Doutorado – PPGEM/UFF-VR, 2010.
- 17 DONSKOI, E.; McELWAIN, D.L.S.; WIBBERLEY, L.J.; Estimation and modeling of parameters for direct reduction in iron ore/coal composites: Part II. Kinetic Parameters, Metallurgical and Materials Transactions B, v. 34B, p.255-266, April 2003.
- 18 WARNER, N.A.; Reduction kinetics of hematite and the influence of gaseous diffusion, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, v. 230, p.163-176, 1964.
- 19 DUTTA, S.K.; GHOSH, A.; Kinetics of gaseous reduction of iron ore fines, ISIJ International, v. 33, N. 11, p.1168-1173, 1993.