

## REVISION CRITICA DE LOS MODELOS DE CINETICA DE REDUCCION DE MINERAL DE HIERRO

Juan A. Aguilar Garib  
U.A.N.L., F.I.M.E., Doctorado en Ingenieria de Materiales

### RESUMEN

El primer paso para la simulación de un proceso en general, es la revisión de los modelos existentes para describir el proceso que se desea simular. En este trabajo se hace una revisión crítica de los modelos que describen la cinética de reducción de mineral de hierro que más frecuentemente se encuentran en la literatura.

### INTRODUCCION

Cuando se requiere simular un proceso, lo primero que se debe hacer es revisar los modelos existentes que describan al proceso. En este caso la reducción mineral de hierro, por lo que se requiere conocer la descripción matemática de los fenómenos que rigen al proceso global, tales como la transferencia de calor, la termodinámica de las reacciones y la cinética de las mismas. En este trabajo se presenta una revisión general de los modelos que normalmente se pueden encontrar reportados en la literatura y se discuten mediante una comparación entre los diferentes aspectos que cada uno de ellos considera.

### MODELOS DE REDUCCION

El conocimiento general del fenómeno de reducción como reacción química y como proceso permite aceptar que todos los modelos están basados en los mismos principios, solo que dependiendo de las hipótesis que se acepten es el tipo de modelo que resulta.

Una primera aproximación consiste en suponer que la reducción desde hematita hasta hierro metálico ocurre en una sola etapa asignando una expresión para la reacción global.

En muchos casos solamente se determinan los coeficientes de regresión de relaciones empíricas en las que se ha supuesto que la reacción siga una expresión dada.

Esta aproximación es aceptable siempre que se pretenda caracterizar el comportamiento de un mineral frente a cierta atmósfera sin la intención de explicar el fenómeno.

Considerando una cinética global, uno de los modelos más aceptados es el de B. B. L. y H. U. Ross<sup>1</sup>, que suponen que la cinética de reducción está controlada por el área de interfase óxido/metal y por los mecanismos de difusión gaseosa, se acepta que la atmósfera

no se agota, lo cual es indispensable para obtener parámetros cinéticos, y se acepta también que la adsorción

no tiene un papel importante. La expresión correspondiente es:

$$\frac{k_p}{r_0 d_0} (C_0 - C_e) t = [1 - (1 - R)^{1/3}] + k_p \frac{r_0}{k_d} \left[ \frac{1}{2} - \frac{R}{3} - \frac{(1 - R)^{2/3}}{2} \right]$$

con:

$$A = \frac{k_d}{d_0} [C_0 - C_{eq}]$$

y:

$$B = \frac{k_d}{k_p}$$

En donde  $k_p$  es la constante de rapidez de reacción en el límite de fase,  $r_0$  es el radio inicial del pelet,  $d_0$  es la densidad inicial del pelet,  $C_0$  es la concentración de gas en la superficie del pelet,  $C_e$  es la concentración de equilibrio Fe/FeO a la temperatura de reducción,  $t$  es el tiempo de reducción,  $R$  es el grado de reducción y  $k_d$  es la constante de difusión del gas.

Aunque una de las hipótesis originales se refiere al control por área óxido/metal, en realidad, de modo general se considera que la cinética de reducción puede ser

controlada por reacción química, difusión o por ambas; asignando constantes de balance para cada uno de los regímenes.

Con las curvas de reducción de la figura 1 se construyen las figuras 2 y 3, en las cuales se muestra la validez del modelo.

Aún cuando este modelo se basa en geometría esférica, en algunos trabajos se ha utilizado para seguir la cinética de reducción de briquetas<sup>2</sup> de mineral que no tienen forma de esfera suponiendo que el frente de reacción tiende a ser esférico.

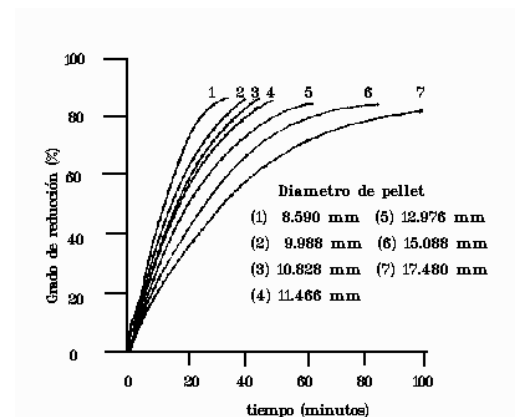


Figura 1. Reducción de pellets de óxido férrico grado reactivo sinterizados a 1600°C y reducidos a 750°C (B.B.L., H.U. Ross<sup>1</sup>)

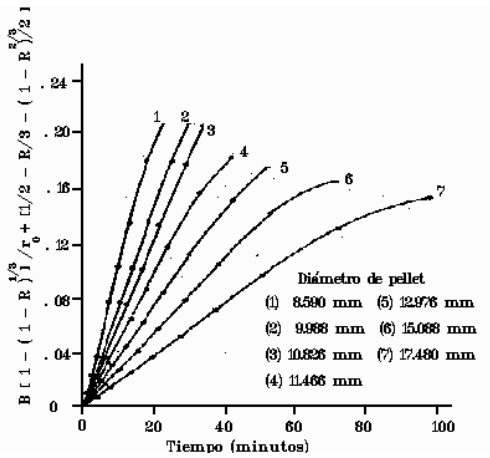


Figura 2. Reducción de pelets de óxido férrico grado reactivo a 750°C (B.B.L., H.U. Ross<sup>1</sup>)

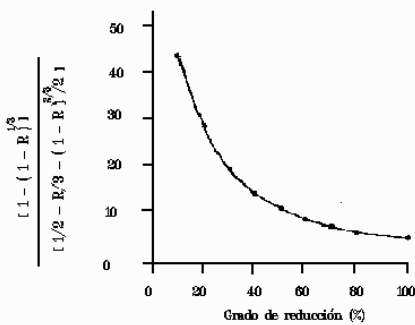


Figura 3. Variación de las contribuciones relativas de los mecanismos de área de interfase y difusión del gas con respecto al grado de reducción (B.B.L., H.U. Ross<sup>1</sup>)

En otros modelos como el de A.K. Lahari y V. Seshadri<sup>3</sup> se considera también un frente de reducción concéntrico o de coraza, pero se modela para una esfera en la cual la difusión de las especies es a través de poros.

La base de este modelo es suponer que tanto el mineral, como el mineral reducido son porosos, y que el área de los poros es aproximadamente constante durante la reducción. Además, como se muestra en la figura 4 la zona 1 está completamente reducida y está rodeada por una película de gas, la zona 2 corresponde a la zona de reacción.

La expresión que se propone para esta situación es:

$$W_0 \frac{R}{A_0(P_0 - P_e)} \left\{ \frac{3}{2} [1 - (1-f)^{2/3}] - \frac{Rf}{R+y} \right\} = k_d t$$

En donde  $W_0$  es el peso inicial del pellet,  $R$  es el radio del pellet,  $A_0$  es el área exterior del pellet,  $P_0$  es la presión parcial del gas reductor,  $P_e$  es la presión de equilibrio,  $f$  es la fracción reducida del pellet,  $y$  es el espesor de la capa de gas,  $k_d$  es el coeficiente de difusión del gas y  $t$  es el tiempo de reducción.

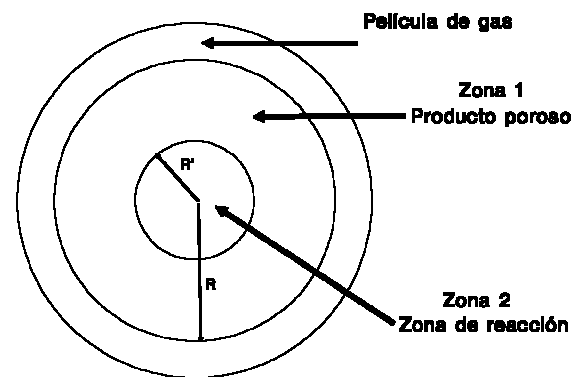


Figura 4. Modelo de reacción para un pellet poroso (A.K. Lahiri, V. Seshadri<sup>3</sup>)

Por otra parte W. M. McKewan<sup>4,5</sup> presenta una ecuación que se basa en la hipótesis de que la interfase óxido/metal controla la reducción. La expresión es:

$$r_0 d_0 [1 - (1 - R)^{1/3}] = Kt$$

En donde  $r_0$  es el radio inicial del pelet,  $d_0$  es la densidad del pelet,  $R$  es el grado de reducción,  $t$  es el tiempo de reducción y  $K$  es una constante de proporcionalidad para la rapidez de reacción

La figura 5 muestra que aparentemente las ecuaciones 4 y 5 satisfacen los experimentos realizados.

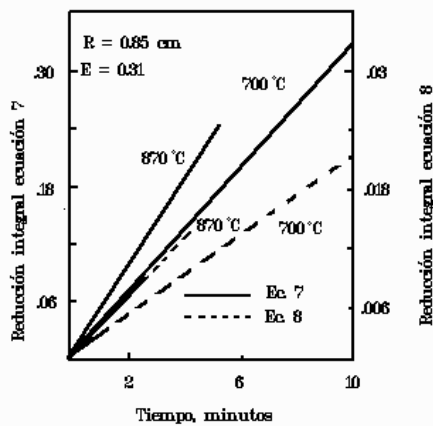


Figura 5. Reducción de pelet poroso de FeO en hidrógeno (A.K. Lahiri, V. Seshadri<sup>3</sup>)

Utilizando el modelo de A. K. Lahiri, Kawasaki<sup>6</sup> reporta una serie de experimentos, en los cuales la rapidez de reducción de una esfera de óxido de hierro en hidrógeno y monóxido de carbono fue observada

entre los 700°C y los 1200°C. La expresión cinética utilizada fue propuesta por N. D. Smith<sup>7</sup> y también fue verificada por Kawasaki:

$$r_0 C_0 [1 - (1 - R)^{1/3}] = Kt$$

En donde  $r_0$  el radio del pelet,  $C_0$  es la concentración del reductor,  $R$  es el grado de reducción,  $K$  es la constante de rapidez de reacción y  $t$  es el tiempo de reducción.

Como observación adicional, en la figura 6 se muestra como el centro del mineral prácticamente no se reduce, apoyando a un proceso topoquímico.

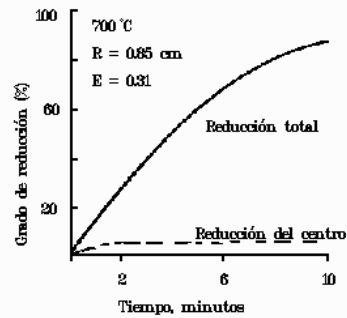


Figura 6. Reducción de pelet poroso de FeO en hidrógeno (A.K. Lahiri, V. Seshadri<sup>3</sup>)

Otro modelo que se ha propuesto para una sola etapa es el de Yagui<sup>8</sup> que toma en cuenta a los procesos que intervienen en la reducción de una forma análoga a un circuito eléctrico, incluyendo a la película de gas, la capa de hierro reducido y el centro de óxido.

La ecuación que resulta es:

$$\frac{(C_0 - C_e)t}{f} - \frac{(3 - 3f + f^2)}{K_g} = \frac{r_0}{6D}(3f - 2f^2) + \frac{K}{K_r(1 + K)}$$

con:

$$f = 1 - (1 - R)^{1/3}$$

En donde R es el grado de reducción,  $C_0$  es la concentración de reductor,  $C_e$  es la concentración de equilibrio, K es la constante de equilibrio,  $K_g$  es la constante de adsorción,  $K_r$  es la constante de reacción y D es el coeficiente de difusión del reductor.

En los modelos anteriores se ha considerado a la reducción como un proceso de una sola etapa, y para procesos de este tipo no debe excluirse la reacción de primer orden:

$$\ln\left(\frac{1}{1 - R}\right) = kt$$

En donde R es el grado de reducción, k es la constante de rapidez de reacción y t es el tiempo de reacción.

Aunque esta ecuación no puede ser considerada como un modelo en sí, tiene la ventaja de que es sencilla de utilizar y se apega bien a pruebas experimentales.

Otros modelos sí toman en cuenta los diferentes óxidos que tiene el hierro y consideran por lo tanto las diferentes etapas.

El modelo de S. P. Trushenski y Kun

Li<sup>9</sup> propone cinéticas separadas para la hematita, la magnetita y la wustita, y supone que la reacción de hematita a magnetita se puede llevar únicamente en esa dirección, en tanto que las reacciones magnetita a wustita y wustita a hierro sí se podrían llevar a cabo en la dirección contraria, todas las reacciones son de primer orden; se incluye además un factor de sinterización para explicar los cambios de área que ocurren durante la reducción.

En las figuras 7 y 8 se observa como los datos del modelo se apegan perfectamente a los datos de reducción fraccionada, además en la figura 9 se hace una comparación de este modelo no topoquímico con el de Szekely<sup>10</sup>.

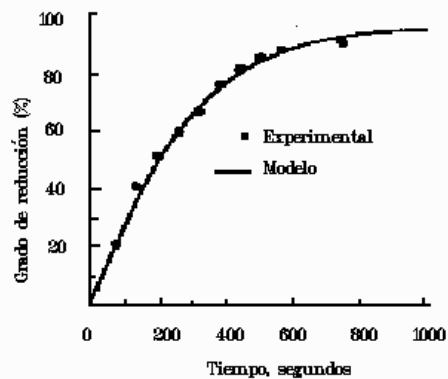


Figura 7. Comparación del modelo con datos experimentales de reducción de hematita a magnetita a 775°C, 14.1% CO (S.P. Trushenski, Kun Li<sup>9</sup>)

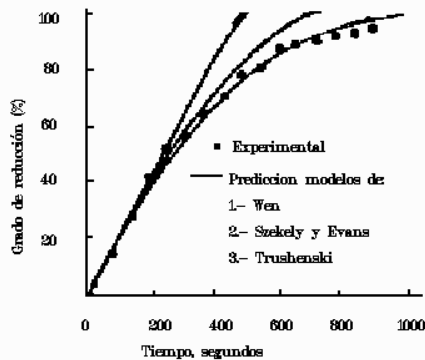


Figura 8. Comparación del modelo no-topoquímico con otros modelos. Reducción de hematita a magnetita a 750°C, 10.7% CO,  $r_0=0.675$  cm (Trushenski, Kun Li<sup>9</sup>)

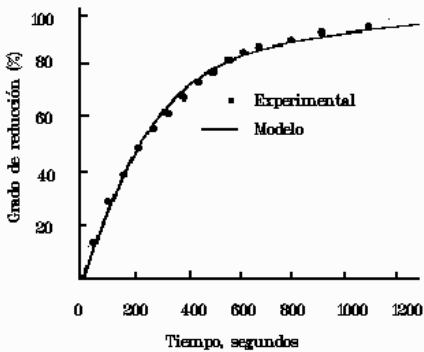


Figura 9: Comparación del modelo con los datos experimentales de reducción de magnetita a wustita a 800°C, 49.11% CO,  $r_0=0.635$  cm (S.P. Trushenski, Kun Li<sup>9</sup>)

Aunque Trushenski considera que la reducción no es topoquímica, acepta que a alta temperatura el comportamiento fue más bien topoquímico.

Por otra parte K. O. Yu<sup>11</sup> utiliza un método de elemento finito aplicado al modelo de Trushenski, él encuentra dificultades para generalizar los resultados, pero sí puede aceptar que es posible extrapolar el comportamiento de un pelet al lecho dentro de un reactor aunque existen problemas en cuanto a la difusión de las especies, y en cuanto a la isothermicidad del sistema. En la figura 10 se muestra una comparación entre los resultados de un modelo simplificado y un modelo de multielemento contra los datos experimentales.

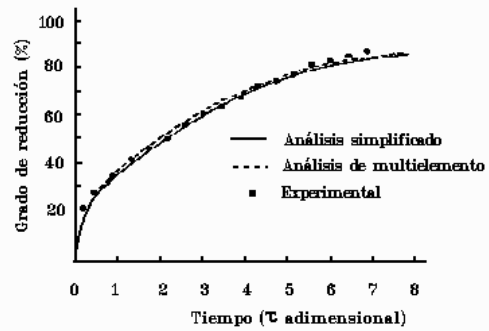


Figura 10. Comparación de los análisis simplificado y multielemento contra los datos experimentales (K.O. Yu, P.P. Gillis<sup>11</sup>)

Dentro de los modelos que consideran que la reducción se lleva a cabo en tres etapas, en forma topoquímica. Uno de ellos es el modelo de Q. T. Say<sup>12</sup> el cual supone que la reducción de minerales de hierro con monóxido de carbono e hidrógeno están bien comprendidas, y en este modelo se manejan las etapas siguientes:

- Transporte del reductor gaseoso desde la fase gaseosa hasta la superficie de la partícula.
- Difusión del reductor a través de la capa de hierro poroso hasta la interfase hierro/wustita.
- Parte del reductor reacciona con la wustita y forma hierro.
- El reductor que no ha reaccionado difunde a través de la capa de wustita hasta la interfase wustita/magnetita.
- Una parte del reductor reacciona con la magnetita y forma wustita.
- El reductor que no ha reaccionado difunde a través de la capa de magnetita hasta la interfase magnetita/hematita.
- Reacción química de reducción de hematita a magnetita.
- Salida de los productos de reacción en sentido contrario a la reducción.

Y las hipótesis son:

- La rapidez de reacción se calcula sumando las contribuciones de la reducción con hidrógeno y monóxido de carbono, ya que se supone que son independientes.
- Se desprecia el efecto catalítico del pelet, por lo que se acepta que la reacción  $H_2 + CO_2 = H_2O + CO$  no ocurre
- El proceso de difusión a través de poros sigue el comportamiento de mezcla binaria.

Say propone que las constantes cinéticas son de la forma Arrhenius

y mediante experimentos individuales, es decir, para cada etapa de oxidación determina tales valores y como muestran las figuras 11 y 12, predice las curvas de reducción.

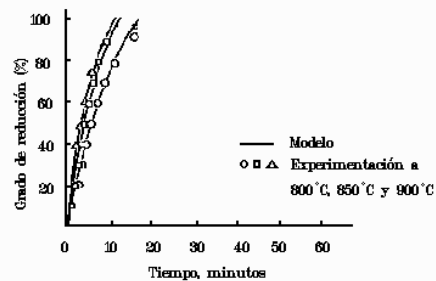


Figura 11. Comparación entre los datos experimentales y la predicción teórica para la reducción de hematita con hidrógeno (Q.T. Say<sup>12</sup>)

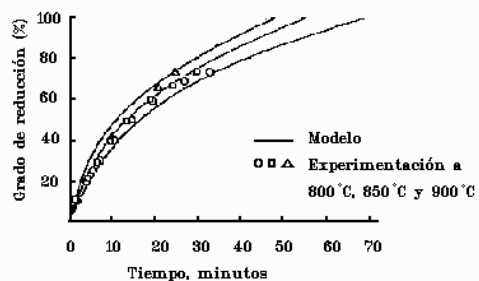


Figura 12. Comparación de los datos experimentales con la predicción del modelo para la reducción de hematita con monóxido de carbono (Q.T. Say<sup>12</sup>)

Por otra parte Tokuda<sup>13</sup> obtiene una ecuación en la cual reúne los pasos

en que la reducción se lleva a cabo, en primer lugar hace una clasificación de las etapas elementales:

- Difusión tanto de reductor como de reductor oxidado a través de la película gaseosa que rodea al pelet.
- Difusión tanto de reductor como de reductor oxidado a través del hierro o mineral reducido.
- Reacción química en la interfase hierro/óxido.

En segundo lugar se calcula la transferencia del reductor a través de la película gaseosa.

Una ecuación empírica para el coeficiente de transferencia de masa ( $k_f$ ) en una esfera es:

$$\frac{k_f d}{D} = 2 + 0.6 \text{Re}^{1/2} \text{Sh}^{1/3}$$

En donde  $d$  es el diámetro de la muestra,  $D$  es el coeficiente de difusión del gas,  $\text{Re}$  es el número de Reynolds y  $\text{Sh}$  es el número de Schmidt.

En tercer lugar se toma el coeficiente de transferencia de masa entre la superficie y la interfase de reacción.

Esta situación se divide en tres casos.

#### Caso 1

Difusión del sólido a través de la capa de óxido.

El proceso de reducción generalmente tiene lugar con la transferencia de oxígeno y iones hierro entre la interfase de reacción y la superficie de la muestra cuando el agente reductor tiene un potencial reductor que resulta insuficiente para la reducción a hierro metálico, pero suficiente para algún óxido.

En este caso, el oxígeno se remueve de la superficie de la muestra, ahora, si el hierro difunde por un mecanismo de vacancias en la red, el cual controla el proceso, se tiene la expresión cinética;

$$\frac{dx}{dt} = -D_{\text{Fe}} \Delta C \frac{V}{X}$$

En donde  $X$  es el espesor de la capa de óxido a ser reducida,  $D_{\text{Fe}}$  es el coeficiente de difusión del hierro en el óxido,  $\Delta C$  es la diferencia de concentración de la especie iónica entre la interfase de reacción y la superficie,  $V$  es el volumen molar de la capa formada por los iones hierro difundidos.

Esto es válido cuando la reducción es desde  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ó  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a  $\text{FeO}$ , que es cuando el ion metálico se comporta como un agente reductor. En el trabajo de Tokuda, el espesor de la capa de  $\text{FeO}$  crece de manera parabólica tomada contra el tiempo de reducción, como se muestra:

$$X^2(t) = kt$$



### Caso 2

Difusión del sólido a través de hierro metálico.

Aquí se presenta el caso de difusión a través de la capa de hierro que se forma durante la reducción de wustita, por esto k se escribe como:

$$k = 2D_0 \Delta C (1-y) \frac{M_{Fe}}{\rho_{Fe}} M_O$$

En donde D es el coeficiente de difusión del oxígeno en hierro metálico,  $\Delta C$  es la diferencia de concentración de oxígeno entre la interfase de reacción y la superficie de la muestra,  $M_{Fe}$  es el peso atómico del hierro,  $M_O$  es el peso atómico del oxígeno y  $\rho_{Fe}$  es la densidad del hierro metálico.

### Caso 3

Proceso de difusión de especies gaseosas entre partículas.

La ecuación que se toma en cuenta para cuantificar la difusión por este caso es:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{3D_{eff} (H_2O_{eq} - H_2O)}{(1-\varepsilon)C_0 r_0^2} \frac{1}{\left(\frac{1}{1-R}\right)^3 - 1}$$

En donde  $D_{eff}$  es el coeficiente de difusión efectivo,  $H_2O$  es la concentración de agua,  $H_2O_{eq}$  es la concentración de agua en equilibrio Fe/FeO,  $r_0$  es el radio del pelet y  $\varepsilon$  es la porosidad con:

$$D_{eff} = D_0 \varepsilon \xi$$

$\xi$  es el factor laberíntico

Al integrar la ecuación anterior se tiene que:

$$3r_0^2 [1 - (1-R)^{1/3} - 2R] = kt$$

Con R representando al grado de reducción.

En cuarto lugar: se tiene la reacción de remoción de oxígeno en la interfase. A este respecto ha sido confirmado que la cantidad de oxígeno removido;

$$\frac{-dN_O}{dt}$$

en la interfase es proporcional al área de reacción y a la presión parcial del reductor, así la rapidez de reacción puede ser escrita como:

$$-\frac{dN_O}{dt} = kAP$$

En donde k es la rapidez de reacción, A es el área de reacción y P es la presión parcial del reductor, que puede ser  $P - P_{eq}$

Si el óxido es esférico entonces la ecuación válida es:

$$r_0 d_0 [1 - (1-R)^{1/3}] = kt$$

En donde  $d_0$  es la densidad del oxígeno removible.

El quinto punto es la nucleación y el crecimiento del hierro. Esto es

importante en la reducción de wustita a hierro, aunque para el caso de magnetita a wustita no lo es tanto porque los dos tienen la misma estructura cristalina, mientras que el hierro y la wustita son diferentes y en realidad se puede, de acuerdo a algunos investigadores, detectar el crecimiento de una fase a expensas de la otra.

Lo que Tokuda hace es superponer los cinco puntos anteriores de manera que generen un modelo global para la reducción de mineral de hierro.

Otro de los modelos ha sido propuesto por Y. Hara<sup>14</sup>, él propone

que la reacción es topoquímica, se hace un estudio de cada etapa de reducción y luego las corazas en cada estado son superpuestas agregando el efecto de la resistencia entre cada coraza de óxido, un modelo global puede tomar estos efectos y agruparlos en términos que cubren toda las etapas, se puede considerar además el efecto de la resistencia de la entrada del gas a la partícula de óxido, aunque la representación es más bien compleja. Las ecuaciones se muestran a continuación:

$$\frac{V_1 R_G T W_3}{P 4 \pi r_0^2} = A_3(A_3 + B_2 + B_3 + F) + (A_2 + B_2)(B_3 + F)(Y - Y_{e1})$$

$$- A_3(B_2 + B_3 + F) + B_2(B_3 + F)(Y - Y_{e2})$$

$$- A_2(B_3 + F)(Y - Y_{e3})$$

$$\frac{V_2 R_G T W_3}{P 4 \pi r_0^2} = (A_1 + B_1 + B_2)(A_3 + B_3 + F) + A_3(B_3 + F)(Y - Y_{e2})$$

$$- B_2(A_3 + B_3 + F) + A_3(B_3 + F)(Y - Y_{e1})$$

$$- (A_1 + B_1)(B_3 + F)(Y - Y_{e3})$$

$$\frac{V_3 R_G T W_3}{P 4 \pi r_0^2} = (A_1 + B_1)(A_2 + B_2 + B_3 + F) + A_2(B_2 + B_3 + F)(Y - Y_{e3})$$

$$- A_2(B_3 + F)(Y - Y_{e1})$$

$$- (A_1 + B_1)(B_3 + F)(Y - Y_{e2})$$

En donde:

$$A_1 = \frac{1}{(1-R_1)^{2/3}} \frac{1}{k_{c1} \left(1 + \frac{1}{K_1}\right)}$$

$$A_2 = \frac{1}{(1-R_1)^{2/3}} \frac{1}{k_{c2} \left(1 + \frac{1}{K_2}\right)}$$

$$A_3 = \frac{1}{(1-R_1)^{2/3}} \frac{1}{k_{c3} \left(1 + \frac{1}{K_3}\right)}$$

$$B_1 = \frac{(1-R_2)^{1/3} - (1-R_1)^{1/3}}{(1-R_1)^{1/3} (1-R_2)^{1/3}} \frac{r_0}{D_{e1}}$$

$$B_2 = \frac{(1-R_3)^{1/3} - (1-R_2)^{1/3}}{(1-R_2)^{1/3} (1-R_3)^{1/3}} \frac{r_0}{D_{e2}}$$

$$B_3 = \frac{1 - (1-R_3)^{1/3}}{(1-R_3)^{1/3}} \frac{r_0}{D_{e3}}$$

$$F = \frac{1}{k_F}$$

$$W_3 = (A_1 + A_2)(A_3(A_2 + B_2 + B_3 + F) + (A_3 + B_2)(B_3 + F)) + A_2(A_3(B_2 + B_3 + F) + B_2(B_2 + F))$$

En donde P es la presión,  $R_G$  es la constante universal de los gases, T es la temperatura, W es el flujo de mineral, Y es la concentración de reductor,  $Y_e$  es la concentración de equilibrio, A es la resistencia a la reacción química, B es la resistencia a la difusión transgranular, R es el grado de reducción, K es la constante de equilibrio y k es la constante de reacción química.

Los subíndices se refieren al tipo de reacción, la primera reacción es hematita a magnetita, la segunda es magnetita a wustita y la tercera es wustita a hierro, éstas pueden ser tanto con  $H_2$  como con CO.

Y. Hara utiliza un reactor continuo y obtiene pelets como los que se muestran en las figuras 13, 14 y 15, en la figura 13 se muestra un corte de los pelets a la entrada del reactor, utilizando una mezcla  $H_2/CO$ ,  $800^\circ C$  (derecha) e  $H_2$  puro,  $900^\circ C$ . En la

figura 14 se muestra un corte de los pelets de la parte media, y finalmente en la figura 15 se muestran los pelets reducidos que salen del reactor. Estas figuras muestran que la hipótesis de reducción topoquímica es válida.

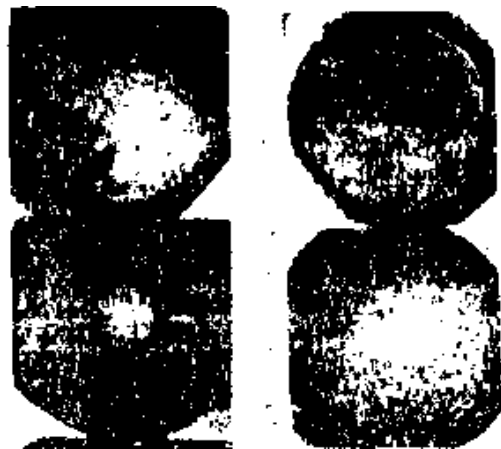


Figura 13. Reducción topoquímica en la entrada al reactor (Y. Hara<sup>14</sup>)

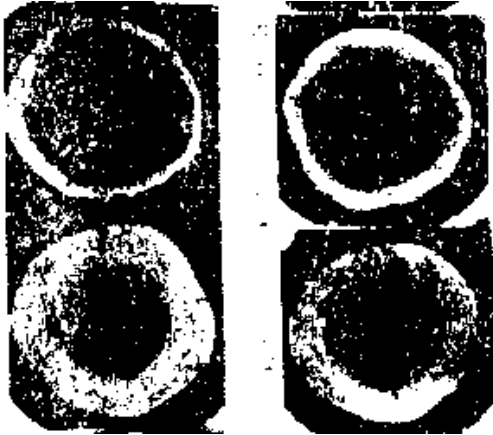


Figura 14. Reducción topoquímica en la parte media del reactor (Y. Hara<sup>14</sup>)

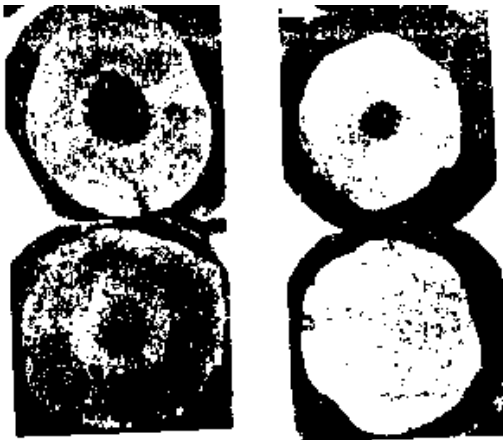


Figura 15. Reducción topoquímica en la salida del reactor (Y. Hara<sup>14</sup>)

#### CONCLUSION

Del análisis de los modelos presentados se desprende que en general la mayoría se apegan bien a resultados experimentales globales. Se observa además que en la mayoría de los casos se considera que la reducción se lleva a cabo a temperatura y la composición del

gas reductor constantes. Esto no es enteramente cierto para los casos en que la reducción se desarrolla dentro de reactores, por lo que resulta que aunque los modelos buscan apegarse al fenómeno no es posible integrarlos directamente a la simulación de un lecho, especialmente fijo, por tener una fuerte etapa transitoria, ya que dentro de esta etapa las condiciones reductoras del gas cambian significativamente.

De aquí que el tipo de modelación que se realice deba estar apegado al proceso en el cual se lleva a cabo el fenómeno de reducción directa. Muchas veces los modelos son capaces de describir la reducción en un rango estrecho de condiciones por las causas ya mencionadas.

#### REFERENCIAS

- [1] Seth (B.B.L), Ross (H.U.).- Application of a generalized rate equation to the gaseous reduction of iron oxide. Canadian Metallurgical Quarterly, v. 5, n° 4, p. 315-328
- [2] Seth (B.B.L.).- Kinetics of hydrogen reduction of ferric oxide briquettes. Journal of the Iron and Steel Institute, August 1969, p. 1104-1109
- [3] Lahiri (A.K.), Seshadri (V.).- Kinetics of reaction of porous solid with gas. Journal of the Iron and Steel Institute, November 1968, p. 1118-1123

- [4] McKewan (W.M.).- Kinetics of iron ore reduction. Transactions of the metallurgical society of AIME, December 1958, v. 212, p. 791-793
- [5] McKewan (W.M.).- Kinetics of iron ore reduction. Transactions of the metallurgical society of AIME, February 1960, v. 218, p. 2-6
- [6] Kawasaki (E.), Sanclrainte (J.), Walsh (T.J.).- Kinetics of reduction of iron oxide with carbon monoxide and hydrogen. AIChE Journal, March 1962, v. 8, n° 48, p. 48-52
- [7] Smith (N.D.), McKewan (W.M.).- Blast furnace, coke oven and raw materials. Comm. Proc., 1961, v. 21, n° 3
- [8] Yagui (T.), Ono (Y.).- A method of analysis for reduction of iron oxide in mixed control kinetics. Iron and Steel Institute of Japan, 1968, p. 377-381
- [9] Trushenski (S.P.), Li (K.), Philbrook (W.O.).- Non-Topochemical reduction of iron oxides. Metallurgical Transactions, May 1974, v. 5, p. 1149-1158
- [10] Szekely (J.), Evans (J.).- . Metallurgical Transactions, 1971, v. 2
- [11] Yu (K.O.), Gillis (P.P.).- Mathematical simulation of direct reduction. Metallurgical Transactions B, March 1981, v. 12B, p. 111-120
- [12] Say (Q.T.), Ray (W.H.), Szekely (J.).- The modeling of hematite reduction with hydrogen plus carbon monoxide mixtures: Part I: Behavior of Single Pellets. AIChE Journal, November 1976, v. 22, n° 6, p. 1064-1079
- [13] Tokuda (M.), Yoshikoshi (H.), Ohtani (M.).- Kinetics of the reduction of iron ore. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, May 1973, v. 13
- [14] Hara (Y.).- Mathematical model of the shaft furnace for reduction of iron ore pellet. Tetsu-to-Hogane, 1976, v. 62, n° 3, p. 315-323
- [15] Hines (A.), Maddox (R.).- Transferencia de masa, fundamentos y aplicaciones: Prentice Hall Hispanoamericana, 1987
- [16] Okura (A.).- A study of non isothermal reduction of iron ores. Tetsu-to-Hogane, 1975, v. 61, n° 9, p. 2151-2159
- [17] Ishida (M.), Wen (C.).- . AIChE Journal, 1968, v. 14
- [18] Trushenski (S.P.).- .Ph. D. Thesis: Carnegie - Mellon University, PA., 1971

#### AGRADECIMIENTOS

El autor agradece su apoyo a CONACYT y a HYLSA SA de CV, Departamento de Investigación y Desarrollo