

La formación de capas de hierro en reactores de reducción directa[♦]

Parte II. Cinética de crecimiento

Ubaldo Ortiz,* Juan Aguilar,*
Jorge Berrún**, Ricardo Viramontes***

Abstract

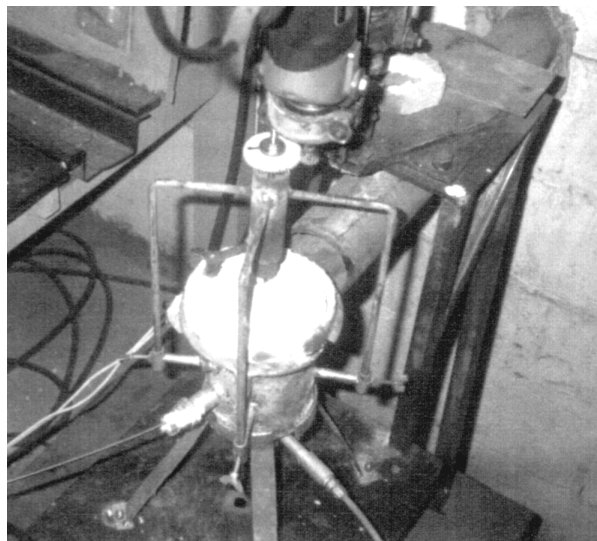
In the direct reduction reactors for iron ores, the product known as DRI (direct reduced iron) forms layers that are adhered to the firebrick wall ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$). In this second part the results of the tests conducted at laboratory and industrial scale were analyzed and a mechanism for describing the anchorage and growth of the layers was deduced. The importance of shear stress was confirmed and once that this factor was identified a method for diminishing the adhesion problem was proposed. The success of this method proves that the chosen variables were indeed important, and that the proposed mechanism is correct.

KeyWords: Refractories, direct reduction, layers, direct reduced iron

INTRODUCCIÓN

En la primera parte de este artículo se presentó la problemática de la formación de capas de hierro, llamadas en el ambiente industrial lajas o morros, en reactores de reducción directa. Se mencionó también que la formación de ellas generalmente implica pérdida de disponibilidad de las plantas cuando las capas se desprenden y bloquean la salida del reactor o perturban la calidad del producto, ya que algunas de ellas son bastante resistentes mecánicamente.

Quedó de manifiesto el éxito del método desarrollado para simular la formación de capas sobre las paredes de los reactores de lecho móvil en



Micro reactor.

las plantas industriales de reducción directa, ya que además de las condiciones de temperatura y esfuerzo normal que en principio eran suficientes para la formación de capas, se aplicó una carga que produjo un esfuerzo cortante y que constituye la diferencia con otros intentos para obtener las capas.

Es esta segunda parte se presentan los resultados del análisis estadístico de los resultados obtenidos con el equipo a nivel laboratorio, en el que se consideró la temperatura, el esfuerzo normal y cortante en la interfase pelet-refractario como variables importantes en la formación de capas. Los experimentos fueron diseñados para encontrar el mecanismo de adhesión con el que se inician las capas. Ya conociendo el mecanismo se

[♦] Este trabajo fue ganador del Premio Tecnos 2000 en la categoría de Publicación Tecnológica/Vinculación Empresa Grande e Institución, el cual fue entregado en ceremonia efectuada el 22 de noviembre de 2000 en CINTERMEX, Monterrey, N. L.

* Doctorado en Ingeniería de materiales. FIME-UANL.

** HYLSA

*** HYLSA. Se encuentra actualmente en CEMEX.

desarrollaron métodos y equipos para aplicar tratamientos a los refractarios, de forma que la adherencia de los materiales procesados, en este caso hierro metálico o mejor conocido como hierro esponja, disminuyese significativamente.

También se obtuvo un modelo cinético para el crecimiento de la capa en función del esfuerzo, el tiempo, y la temperatura. A continuación describimos el sistema a estudiar.

LA CONSISTENCIA DE LAS CAPAS FORMADAS

Ahora se sabe con certeza que el esfuerzo cortante juega un papel importante en la formación de capas. La comparación efectuada entre las capas industriales y las de laboratorio confirman que aspectos difusionales juegan un papel secundario en el anclaje de las capas mientras que el aspecto mecánico es relevante.

El sinterizado por otra parte es otro mecanismo que tiene lugar ya que las partículas de hierro esponja se unen, disminuyéndose la porosidad y aumentando la resistencia, a tal grado que la densidad de la capa es hasta un 50% mayor que la de la partícula de hierro esponja.

El esfuerzo normal en el reactor industrial tiene un valor típico de 3.1 Kg/cm^2 mientras que en el reactor piloto es del orden de 0.1 Kg/cm^2 . A partir de la ecuación de Rumpf (1-2) se pueden calcular las fuerzas puntuales entre las partículas en lecho empacado en función de la porosidad de éste, del diámetro de la partícula y del número de coordinación y el esfuerzo sobre el lecho. Nuestro cálculo arroja que los esfuerzos en los puntos reales de contacto son del orden de $250\text{-}2500 \text{ Kg/cm}^2$.

Por experiencia en el briqueteado en la planta piloto de HYLSA, se sabe que el hierro esponja fluye plásticamente y disminuye su porosidad a temperaturas por encima de los 650°C y se compacta con una presión mayor de 1000 Kg/cm^2 . Por lo tanto este fenómeno debe ocurrir en los puntos de contacto entre pelets y pared de refractario. En la tabla I se muestran la porosidad y análisis químico de los ladrillos refractarios. La porosidad del hierro esponja en promedio es del 60%.

Tabla I

Porosidad y análisis químico de los ladrillos refractarios

Porosidad aparente	11 - 15 %
Densidad	2.26 – 2.36 gr/cm^3
SiO ₂	51 - 55 %
Al ₂ O ₃	42 - 45 %
Fe ₂ O ₃	1.5 - 2.5 %
CaO	0.2 - 0.8 %
MgO	0.5 % máximo
TiO ₂	1.2 - 2.2 %
Na ₂ O + K ₂ O	0.5 - 1 %

Por lo tanto este fenómeno debe ocurrir en los puntos de contacto entre pelets y pared de refractario.

En la tabla II se presentan los resultados del análisis de varianza. En este análisis F representa el estadístico F, P es la probabilidad de error al aceptar la variable o interacción como importante. Cuando existen dos variables separadas por una coma en un renglón es porque las dos pueden ser importantes. Esto implica que el efecto medido corresponde a la suma de las dos pero se señaló el que es más consistente con las experiencias a nivel planta piloto e industrial así como los resultados

Tabla II. Análisis de varianza

Variable	Suma de cuadrados	F	P
pelet, velocidad, esfuerzo	1060.3	5019.2	0.009
pelet, tiempo, esfuerzo	95.2	450.8	0.030
Pelet	1116.3	5284.2	0.009
(metal) (pelet, esfuerzo, temperatura)	365.9	1731.8	0.015
Carbono	10.1	47.9	0.090
Velocidad	2686.4	12716.9	0.006
Tiempo	318.8	1509.0	0.016
Esfuerzo	2556.1	12100.0	0.006
Temperatura	994.6	4708.1	0.009
velocidad, tiempo	291.6	1380.4	0.017
velocidad, esfuerzo	2464.0	1164.0	0.006
velocidad, temperatura	950.5	4499.3	0.009
gas, carbono	0.6	2.6	0.348
pelet, esfuerzo	1106.9	5239.5	0.009
pelet, velocidad, tiempo, esfuerzo	80.6	381.8	0.032
pelet, velocidad	1055.7	4997.4	0.009
pelet, velocidad, esfuerzo, temperatura	349.8	1655.9	0.015
tiempo, esfuerzo	326.4	1545.1	0.016
cement, metal	0.0	0.0	0.952
velocidad, esfuerzo, temperatura	968.0	4582.3	0.009
pelet, tiempo	120.1	568.6	0.026
metal, tiempo	4.8	22.8	0.130
esfuerzo, temperatura	1008.0	4771.6	0.009
pelet, carbono	0.1	0.5	0.620
pelet, temperatura	316.3	1497.1	0.016
velocidad, tiempo, esfuerzo	306.3	1449.9	0.016
pelet, tiempo, temperatura	6.8	32.4	0.109
pelet, velocidad, temperatura	298.9	1414.9	0.017
metal, velocidad, tiempo	7.2	34.2	0.106
pelet, velocidad, tiempo	99.4	470.6	0.029
Error total	0.2		

observados en los experimentos en la sección de obtención del tratamiento para evitar el anclaje y la sección de obtención del modelo. Cuando existen dos o más variables no separadas por comas se trata de una interacción entre las mismas. Las variables e interacciones en negritas son las consideradas como más importantes.

La figura 1 muestra un diagrama de Pareto cuya nomenclatura es la siguiente: A presenta la variable tipo de gas (H₂ ó CO), B representa la variable de aplicación de cemento (si o no), C representa la variable tipo de pelet (Alzada o Peña Colorada), D representa la variable nivel de metalización del pelet (85 ó 95%), E representa la variable contenido de carbón del pelet (0.1 ó 3.5%), F representa la velocidad angular (0 ó 30 RPM), G representa el tiempo que dura el experimento (1 ó 30 minutos), H representa el esfuerzo normal aplicada (a través de una carga de 0.1 ó 3 1 Kg/cm²), I representa la temperatura (600 ó 950°C).

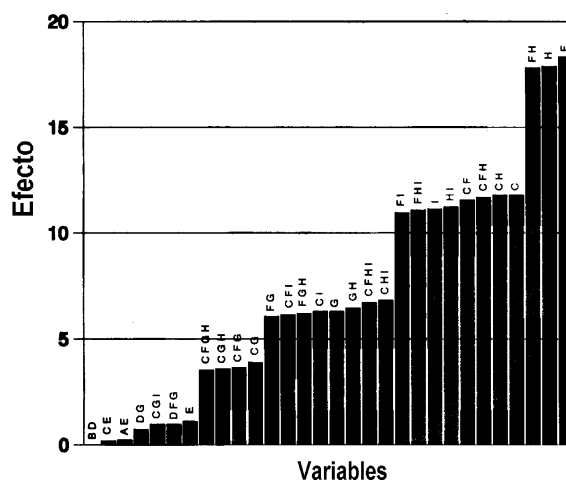


Fig. 1. Diagrama de Pareto que muestra el efecto de las variables. Las barras representan la diferencia entre el promedio de masa obtenida con los valores altos de las variables y los obtenidos con los valores bajos.

De esta figura se puede concluir que la variable más importante es la presencia del esfuerzo cortante que se da por la interacción de las variables movimiento y esfuerzo normal. Estas dos variables y su interacción son las tres primeras en orden de importancia considerando el efecto que tienen en la variable dependiente. Las que siguen en importancia son tipo de pelet, la temperatura y el tiempo.

Para confirmar que la variable más importante es el esfuerzo cortante, se propone un tratamiento basado en la disminución del mismo y que se note su efecto en la disminución de la masa depositada sobre la muestra de ladrillo. La idea era lograr una superficie más tersa y menos porosa, o sea con menos filos y huecos, para probar si la cantidad de masa adherida disminuía.

A fin de disminuir el área de contacto entre pelets y refractario se propuso quitar los filos y rellenar los poros mediante la fusión de la superficie del ladrillo. Se pensó en rellenar los poros con material refractario en polvo, después tumbar los excesos para que quedara la superficie lisa, y después tratar con una flama oxidante para fundir los filos y el material dentro de los poros. Para lograr el acabado deseado a escala laboratorio se utilizó un soplete quemando una mezcla de oxígeno-acetileno para fundir la superficie de las muestras. La temperatura máxima de la flama de acetileno con aire seco a 25°C es de 2586°C. Se decidió utilizar una gama de los materiales refractarios más comunes (Tabla III).

El procedimiento experimental para probar los tratamientos se describe a continuación.

Tabla III

Análisis químico de los materiales utilizados para el tratamiento de los ladrillos

Comp.	Are- na	Alu- min a	Ce m blan -co	Cali- za	SAB	Mag nesi a	Ce m gris
Fe ₂ O ₃	1.40	3.69	0.56	0.27	1.11	0.41	3.64
SiO ₂	95.2	13.5	19.9	0.83	52.4	6.40	19.0
MgO	0.04	3.65	1.21	1.06	0.21	87.1	2.4
CaO	0.08	1.04	65.2	65.2	0.40	1.56	63.6
Al ₂ O ₃	1.62	78.1	5.41	1.16	43.2	1.98	4.95
Na ₂ O	0.23	0.0	0.17	0.04	0.36	0.03	0.63
K ₂ O	1.23	0.0	0.01	0.0	0.07	0.35	0.45
PXC	0.28	0.0	3.42	28.7	0.22	1.45	5.48

SAB.-Polvo de ladrillo de sílica-alúmina

Se preparan muestras molidas de los materiales siguientes para ser aplicados a los ladrillos: silico-aluminoso, cal, magnesia, cemento gris, cemento blanco, alúmina, y arena sílica. Estos materiales se pasan a través de una malla 100. Las muestras de los ladrillos se limpian hasta asegurar que no existe contaminación con hierro esponja. Las muestras de polvo son analizadas en el laboratorio para conocer los porcentajes de Fe₂O₃, CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O. Se prepara una mezcla de los polvos con agua de forma que se puedan aplicar para rellenar los poros manteniendo la muestra del ladrillo en posición vertical para simular la aplicación en el reactor. Se aplica el soplete para fundir la superficie del ladrillo para que quede una superficie sin filos y sin huecos. Se corren los experimentos de formación de capas sobre las muestras de ladrillo de acuerdo al diseño de experimentos mostrado en la tabla IV.

Tabla IV

Diseño de experimentos para las condiciones de tratamiento de los ladrillos

Tratamiento	Descripción
T1	Fusión de la superficie sin agregar aditivo
T2	Adición de SAP y fusión de la superficie del ladrillo para cerrar los poros
T3	Adición de caliza y fusión de la superficie del ladrillo para cerrar los poros
T4	Adición de magnesia y fusión de la superficie del ladrillo para cerrar los poros
T5	Adición de cemento gris y fusión de la superficie del ladrillo para cerrar los poros
T6	Adición de cemento blanco y fusión de la superficie del ladrillo para cerrar los poros
T7	Ladrillo testigo (sin tratamiento alguno)
T8	Adición de alumina y fusión de la superficie del ladrillo para cerrar los poros
T9	Adición de arena y fusión de la superficie del ladrillo para cerrar los poros

En el análisis estadístico de los resultados se aplicó la prueba Kruskal-Wallis de estadística no paramétrica, el cual se puede utilizar cuando las muestras son pequeñas y las varianzas son diferentes. En la tabla V se presenta la masa (en miligramos) de hierro esponja adherida a las superficies.

Tabla V

Hierro esponja adherido en cada una de las muestras tratadas (mg)

T1	3.2	120.8	8.3	65.0	23.9
T2	0.6	0.4	0.1	0.6	0.4
T3	11.0	2.0	69.5	34.0	0.7
T4	23.3	24.6	21.4	7.2	7.0
T5	87.7	6.8	21.0	13.9	88.2
T6	12.9	15.7	59.2	17.3	6.5
T7	6.8	22.3	18.8	2.9	5.1
T8	1.5	2.8	4.7	2.1	8.8
T9	0.1	0.1	0.0	0.5	0.0

MODELO DE CRECIMIENTO DE CAPAS

Después de que se encuentra el mecanismo y un tratamiento para resolver la adhesión derivada del mismo, se desarrolló un modelo de crecimiento utilizando muestras de pelets de la planta industrial. Estos pelets están sujetos a una mayor variación en sus propiedades que los producidos en el laboratorio. Por lo tanto se busca, con la mayor variación inherente en los pelets de la planta industrial, poner a prueba las variables que resulten significativas en la etapa de búsqueda del mecanismo. Por ejemplo, se debe de obtener también como variable importante el nivel de esfuerzo, y con las variables de esfuerzo, tiempo y temperatura se debe de poder explicar una parte importante de la variación de la masa adherida como variable dependiente. Además utilizando la relación funcional entre las variables se puede describir más a fondo el fenómeno. Se obtuvo una correlación de tipo Arrhenius con la temperatura. El valor del parámetro, con unidades de energía, en el exponente sugiere un proceso de tipo físico como la deformación plástica del material.

El exponente de la variable esfuerzo concuerda con lo propuesto por Nagao de la Universidad de Tokio (3-7). En este diseño se utilizaron pelets, gases, aplicación de cemento, metalización, carbón, y velocidad típicos de la planta industrial. Las variables que se dejaron como independientes fueron: el nivel de esfuerzo, la temperatura, y el tiempo. Los pasos que se siguieron para la obtención del modelo se describen a continuación. Las pruebas se hicieron en el microreactor con hierro esponja de la planta con metalización entre 90 y 95%, y carbón entre 1 y 3%. El cemento no se aplicó porque los pelets de la planta ya tienen. Se utilizó una mezcla de gas con 75% H₂ y 25% CO para simular mejor la composición en la zona de formación de capas. La velocidad angular para

generar el esfuerzo cortante en la interfase pelet-refractario fue constante e igual a 30 rpm. El tiempo, el esfuerzo, y la temperatura se variaron, según las tablas VI y VII.

Tabla VI
Condiciones de operación del microreactor

Temperatura / tiempo	Según la Tabla VII
Esfuerzo normal / Velocidad angular	Según la Tabla VII / 30 rpm
Contenido de carbono	1 – 3%
Grado de metalización	Promedio de 90%
Tipo de Pelet	Alzada
Tipo de gas	75% H ₂ / 25% CO

Tabla VII

Diseño de experimentos y resultados de las pruebas aplicadas al modelo propuesto. Estas pruebas se llevaron a cabo en el microreactor

Exp.	Esfuerzo normal (Kg/cm ²)	Tiempo (min)	Temp. (°C)	Capa (mg)
1	3.1	15.5	600	0.9
2	3.1	30	600	3.2
3	1.6	15.5	775	0.7
4	0.1	1	600	0.2
5	0.1	30	950	0.4
6	3.1	30	775	4.7
7	1.6	1	950	2.3
8	0.1	30	775	0.8
9	3.1	15.5	775	4.8
10	0.1	30	600	0.2
11	0.1	1	950	0.1
12	1.6	15.5	950	1.1
13	0.1	15.5	950	1.5
14	1.6	1	600	0.2
15	0.1	15.5	600	0.2
16	3.1	30	950	2.6
17	1.6	1	775	1.2
18	1.6	30	775	5.1

Tabla VII. Continuación

19	3.1	1	600	1.1
20	3.1	15.5	950	7.1
21	1.6	15.5	600	2.0
22	3.1	1	775	0.7
23	1.6	30	600	0.3
24	0.1	15.5	775	0.2
25	3.1	1	950	1.2
26	1.6	30	950	3.3
27	0.1	1	775	0.1
28	1.6	1	950	0.9
29	1.6	30	775	1.3
30	3.1	15.5	950	9.5

Las tablas VIII, IX y X muestran los resultados estadísticos. La tabla IX confirma que las variables que resultaron importantes en la búsqueda del mecanismo también lo son en el modelo de crecimiento de las capas. La tabla X muestra los valores de los coeficientes de las variables del modelo

Tabla VIII
Análisis estadístico del modelo

	Suma cuad.	Grad. Lib.	Cuad. medios	F	P
Modelo	34.46	3	11.49	22.46	0.0
Error	13.29	26	0.51		
Total	47.75	29			

Tabla IX
Análisis estadístico de las variables

	Suma cuad.	Grad. Lib.	Cuad. Med.	F	P
Esfuerzo	23.44	1	23.44	45.85	.0
Tiempo	6.22	1	6.22	12.16	.0018
Temp.	4.80	1	4.80	9.38	.0050
Modelo	34.46	3			

Tabla X
Análisis estadístico de los coeficientes del modelo
($r^2 = 0.69$)

	Coef.	Error estándar	Valor t	P
Constante	4.6	0.97	4.77	0.0001
Esfuerzo	0.60	0.09	6.57	0.0
Tiempo	0.32	0.09	3.58	0.0014
Temp.	-3014	984	-3.06	0.0050

La conclusión es que, con más de 95% de confianza, sí hay diferencia entre las medias. Como consecuencia de estos resultados, se seleccionó la arena sílica para dar el tratamiento a los ladrillos. Las figuras 2 y 3 muestran superficies de ladrillos sin tratar y después del tratamiento.

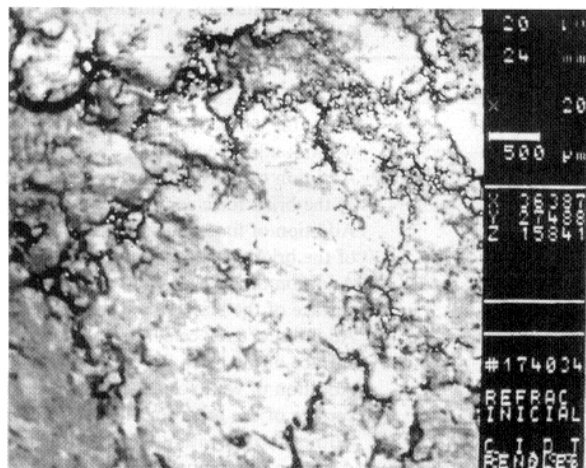


Fig. 2. Muestra de la superficie de un ladrillo sin tratar.

Las tres variables que se consideraron importantes para el modelo explican el 69% de la variación de la masa adherida. Para un fenómeno complejo como este, tomando en cuenta que la planta estaba procesando una mezcla de minerales Alzada / Peña Colorada que son pelets con

propiedades diferentes, se puede considerar aceptable la correlación.

La figura 4 muestra los datos observados contra los pronósticos.

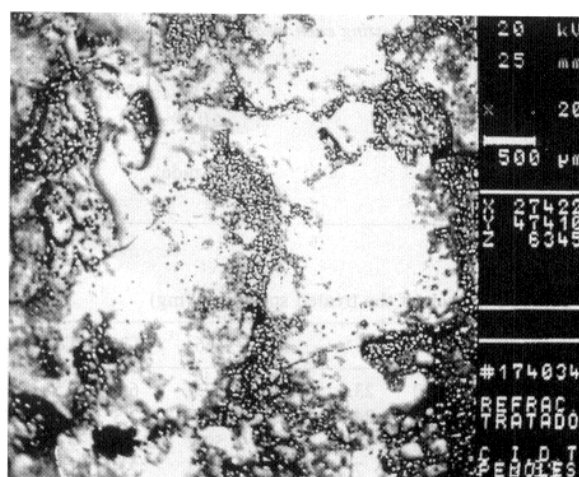


Fig. 3. Muestra de la superficie de un ladrillo tratado

PRONOSTICO VS OBSERVADO

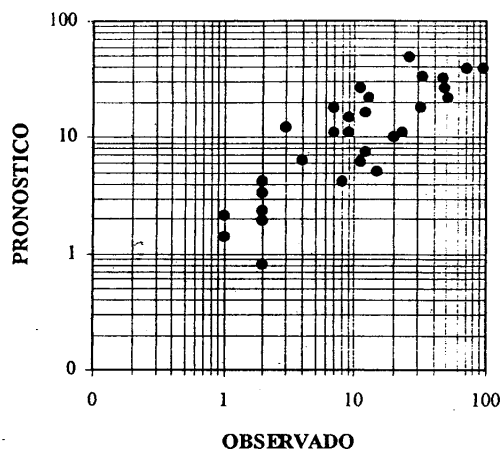


Fig. 4. Pronóstico de valor observado de masa adherida (mg X 10)

La ecuación que se obtuvo del análisis de los resultados es la siguiente:

$$M = 99.5\sigma^{0.6} e^{-5989/RT} t^{0.32}$$

T = temperatura (=) °K

σ = esfuerzo normal (=) Kg/cm²

t = tiempo (=) minutos

M = masa adherida (=) miligramos

R = constante de los gases (=) cal/mol °K

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Respecto al Mecanismo

En este trabajo se planteó la hipótesis de que el esfuerzo cortante era importante en la formación de capas en el laboratorio. Los resultados mostrados confirmaron la importancia del esfuerzo cortante. Ya habiendo obtenido las capas en el laboratorio, se diseñaron experimentos para obtener cuales otras variables e interacciones eran importantes. Mediante los resultados se demostró, con una confianza mayor al 95%, que existen otras variables e interacciones importantes pero ciertamente el esfuerzo cortante es la más importante de todas. Ante la imposibilidad práctica de hacer 2⁹=512 experimentos para separar completamente los efectos de cada variable e interacción, se seleccionaron las variables más prometedoras para obtener una solución del problema mediante su manipulación. En este caso ya se habían hecho pruebas en varias ocasiones variando todas las variables excepto el esfuerzo cortante, sin obtener la formación de capas. Ya que se demostró que esta variable era importante, se seleccionaron como importantes las otras variables e interacciones que combinadas con el esfuerzo normal, el movimiento, o ambos fueran consistentes con una mayor área de

contacto entre pelet y refractario. Por ejemplo: el tipo de pelet se seleccionó porque es lógico que un pelet más plástico se deformará más y habrá una mayor área de contacto, la temperatura se seleccionó porque a una mayor temperatura el pelet se deformará más provocando una mayor área de contacto.

El tiempo se seleccionó porque a mayor tiempo se expone más material al irse gastando el pelet. La metalización se eliminó porque se sabe que desde niveles promedio de metalización menores al 85% la superficie del pelet ya llegó a su valor asintótico de metalización. De esta forma, con la aplicación combinada de estadística y fisicoquímica, se demostró que las variables: movimiento, esfuerzo normal, tiempo, temperatura, tipo de pelet y sus interacciones son las importantes. En la tabla del análisis de varianza se señalaron las que son, basándose en los argumentos ya explicados, las más consistentes con las observaciones a nivel laboratorio, planta piloto, y planta industrial.

Tomando como base las variables e interacciones seleccionadas, el mecanismo de anclaje y crecimiento es el siguiente: Entrada de finos o material extruido en los poros o grietas del ladrillo debido a los esfuerzos cortantes. Sinterizado del hierro esponja disminuyendo su porosidad y al mismo tiempo aumentando su resistencia. Se sabe por la medición de la resistencia de los enlaces entre pelets que ésta puede llegar hasta 70 kg/cm² en tensión. Esta resistencia, tomando en cuenta la porosidad del ladrillo, que es aproximadamente 10%, es más que suficiente para sostener el peso de una capa. El hierro esponja sinterizado queda entrelazado con la porosidad del ladrillo formando lo que se puede llamar el anclaje de la capa. El proceso de crecimiento continúa al depositarse y sinterizarse más material fino que ya viene con el mineral o arrancado de la superficie de los pelets

por los esfuerzos cortantes. Los lugares preferidos de crecimiento serán donde se concentren los esfuerzos, esto es en las aristas de la superficie, los bordes, y donde haya más alta temperatura. El mecanismo de crecimiento se autoalimenta porque cualquier borde en la pared del reactor es un punto de concentración de esfuerzos en donde el pelet se degrada más, aportando más finos para el crecimiento de la capa.

La literatura de flujo de sólidos enseña que los bordes sobre la pared son puntos de concentración de esfuerzos porque la pared empieza a cargar por reacción en estos puntos, generándose de este modo esfuerzos locales mucho mayores que los esperados con pared lisa. Esto implica que el mecanismo de anclaje consiste en la generación de finos y su penetración a los poros para posterior sinterizado ya que dentro del poro la única energía impulsora para reforzar el ancla es la energía de superficie porque la presión de contacto no puede actuar dentro del poro. En el anclaje el esfuerzo cortante y el sinterizado actúan en serie. En cambio en el mecanismo de crecimiento actúan en paralelo. Los finos generados o alimentados en contacto con la superficie de la capa fluyen plásticamente impulsados por estas dos fuerzas para buscar una configuración termodinámicamente más estable formando una unión con el resto de la capa.

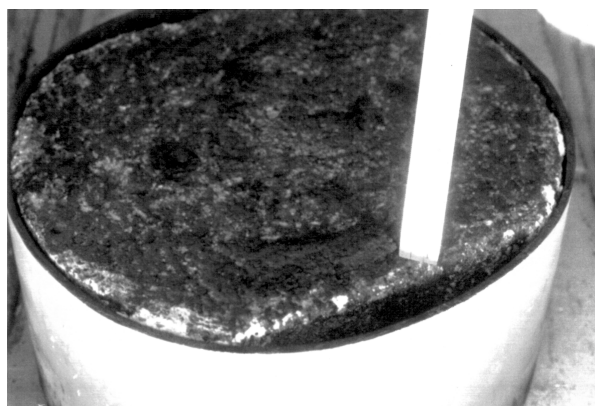
Tratamientos termoquímicos

Los resultados anteriores sirvieron como base para proponer tratamientos termoquímicos buscando evitar el anclaje. Los tratamientos propuestos se basan en la disminución del esfuerzo cortante entre el pelet y el refractario al tapan los poros y eliminar los filos de éste. El hecho de que se hayan obtenido superficies, como las tratadas con arena sílica y con polvo del mismo ladrillo, con calidad para evitar el anclaje confirma la validez de las conclusiones respecto al mecanismo. Es

importante aclarar que el tiempo de prueba de los tratamientos se inició con 30 minutos pero algunas de las superficies desgastaban el pelet en menos de 10 minutos. Sin embargo para asegurar el resultado, las muestras de arena sílica, tanto de laboratorio como industriales, se probaron sin que se les llegara a pegar ni un miligramo.

Respecto al modelo

En estos experimentos, una vez más, se pusieron a prueba las conclusiones obtenidas en la sección de búsqueda del mecanismo. El hecho de que las variables: tiempo, esfuerzo, y temperatura puedan explicar en gran medida la variación de la masa depositada confirma su importancia. El valor del parámetro de energía en el término exponencial del modelo indica un fenómeno que no es altamente dependiente de la temperatura como generalmente lo es una reacción química. El valor está más bien del lado bajo, implicando esto un proceso de tipo físico o de reacomodo a escala atómica. El valor del exponente de la variable esfuerzo concuerda con lo propuesto por Nagao T. para contactos con deformación plástica entre partículas. De nuevo, esto confirma las hipótesis.



Refractario con hierro esponja adherido.

CONCLUSIONES

Se demostró que el esfuerzo cortante es el origen de la formación de las capas a escala laboratorio. Esto explica una de las formas en que se logra el mecanismo de adhesión por entrelazado entre los sólidos granulares y las paredes de refractario. El mecanismo de entrelazado descrito en la literatura se aplica a materiales fibrosos, o partículas que se pueden entrelazar unas con otras por su forma. Lo aquí descrito consta de varios pasos: generación de finos con el nivel de esfuerzo adecuado para penetrar a los poros (extrusión del material), sinterizado de estos finos dentro del poro, y adhesión por sinterizado y flujo plástico para continuar creciendo la capa.

Se probó a escala laboratorio que la adhesión entre hierro esponja y el refractario se puede evitar tratando la superficie del refractario con arena sílica. El tratamiento se basa en la disminución de la porosidad en la superficie del ladrillo por fusión de ésta y de las partículas de arena sílica utilizadas como material de aporte, mediante una flama con temperatura superior a 1725°C. Al fundirse las partes más activas de la superficie, como son las aristas y los bordes de los poros, se rellenan los poros y grietas con los granos de arena sílica y se eliminan los fillos. De esta forma se lograron dos objetivos: se disminuyó el esfuerzo cortante que genera parte de los finos, y se taparon los huecos donde se introducen éstos, evitando así la formación de las anclas que soportan el peso de la capa. Se logró obtener una ecuación para calcular el crecimiento de la capa en función del esfuerzo, el tiempo, y la temperatura. Los métodos estadísticos confirmaron que el modelo y las variables son significativos con un nivel de confianza superior al 95%. Desde el punto de vista fisicoquímico, la forma de la ecuación y los valores de los parámetros concuerdan con lo esperado al plantear modelos del

flujo plástico de materiales bajo condiciones de esfuerzo y alta temperatura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al CONACYT por el apoyo para la realización de este trabajo, así como a la empresa HYLISA.

REFERENCIAS

1. RUMPF (H.).- The strength of granules and agglomerates, Proceedings of the international symposium on agglomeration, Philadelphia, Pa, April 12-14, 1961 – New York, London Interscience Publishers, 1962, p 379-418.
2. RUMPF (H.).- Particle adhesion proceedings of the 2nd International symposium on agglomeration, Atlanta, Ga, March 6-10, 1977 Baltimore, Md Port City Press Inc. 1977 p 97-126.
3. NAGAO (T.).- A study of the statics of granular materials Bulletin of JSME, 1967 Volume 10, Number 41, p 775-785
4. NAGAO (T.).- The stress-strain relations of granular materials, 1st report Bulletin of JSME, 1978 Volume 21, Number 157, p 1077-1084.
5. NAGAO (T.).- The stress-strain relations of granular materials, 2nd report Bulletin of JSME, 1979 Volume 22, Number 164, p 148-155.
6. NAGAO (T.).- The stress-strain relations of granular materials, 3rd report Bulletin of JSME, 1979 Volume 22, Number 167, p 636-641.
7. NAGAO (T.).- The principle of similarity in the mechanics of granular materials, 1st report International Chemical Engineering, 1986 Volume 26, Number 4, p 716-723.