

1. INTRODUCCION

1.1 ASPECTOS GENERALES

Existen reactores donde el material procesado se adhiere a las paredes formando capas, en el ambiente industrial se les llama lajas, morros, etc. Este fenómeno se puede presentar, por ejemplo, en los reactores de lecho móvil y hornos rotatorios a escala industrial. Se entiende por capa una formación de material aglomerado que se adhiere a la pared de los reactores en alguna parte donde las condiciones de esfuerzos, temperatura, composición y tamaño de partícula alcanzan los valores críticos para que la capa crezca. El fenómeno de las capas 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. Algunas capas son bastante resistentes mecánicamente. La Fotografía 1 muestra un fragmento de una capa sacada de un reactor durante un paro por mantenimiento.



Fotografía 1. Fragmento de una capa sacada del reactor.

En el pasado hubo varios intentos para simular en el laboratorio la formación de capas sobre las paredes de los reactores de lecho móvil en las plantas industriales de reducción directa. Un ejemplo de un equipo para tratar de simularlas se muestra en la Figura 1.

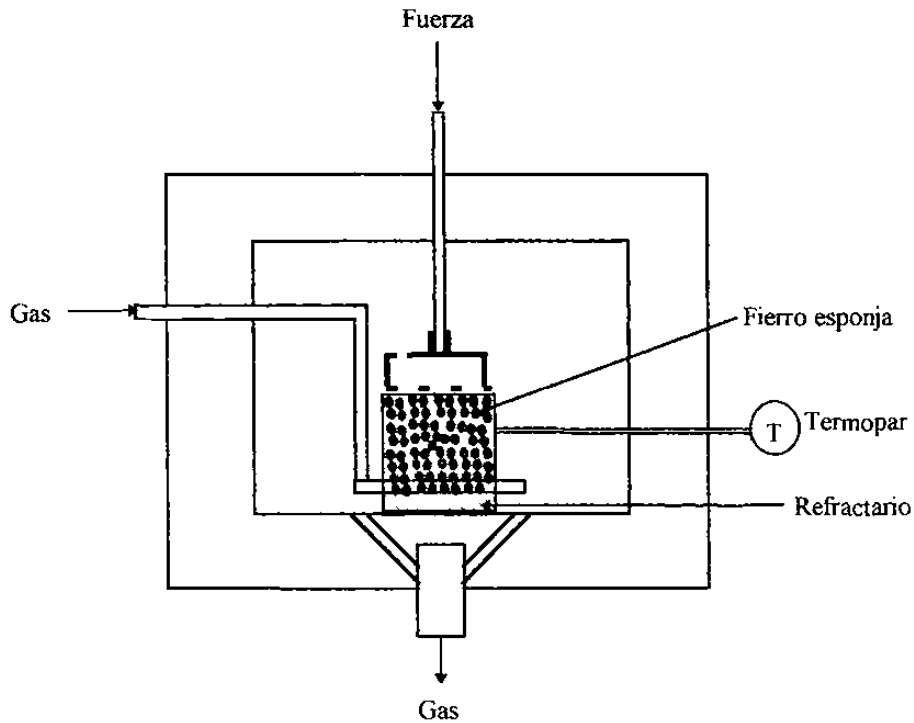


Figura 1. Equipo para simular capas sin aplicar esfuerzo cortante.

Este equipo se construyó y operó en 1983 con el fin de reproducir las capas en el laboratorio. En ese equipo solo se aplicaba una fuerza vertical sobre la muestra, los esfuerzos normales fueron hasta de 5 kg/cm^2 . Las condiciones de operación de temperatura y esfuerzo normal eran suficientes para la formación de capas pero no se obtenía su reproducción porque el esfuerzo cortante no era aplicado.

En esta tesis se presentan los resultados de un equipo a nivel laboratorio que considera la temperatura, esfuerzo normal y esfuerzo cortante en la interfase pelet-refractario como variables importantes en la formación de capas. Este equipo hizo posible la reproducción del fenómeno a escala laboratorio dando así oportunidad de diseñar experimentos para encontrar el mecanismo de adhesión con el que se inician las capas.

Ya conociendo el mecanismo se desarrollaron métodos y equipos para aplicar tratamientos a los refractarios de forma que la adherencia de los materiales procesados, en este caso hierro esponja,

disminuyese significativamente. El método es original (se está tramitando una patente), eficiente, y de muy bajo costo.

También se obtuvo un modelo cinético para el crecimiento de la capa en función del esfuerzo, el tiempo, y la temperatura.

1.2 DESCRIPCION DEL SISTEMA A ESTUDIAR

1.2.1 EL PROCESO

Dentro de la industria siderúrgica destaca por su importancia a nivel mundial la ruta reducción directa-horno eléctrico para producir acero. El proceso HYL de reducción directa es conocido mundialmente. La Figura 2 muestra un diagrama de flujo muy simplificado de los principales equipos usados en la producción de hierro esponja. Se alimentan al reactor pellets de mineral de hierro que se transforman en hierro esponja al quitarles el oxígeno con el gas reductor. El gas reductor se produce al reaccionar el gas natural con vapor de agua en el reformador. Los equipos principales son: (1) reformador, (2) calentador, (3) enfriadores, (4) absorbidora de CO₂, (5) compresores, y (6) reactor.

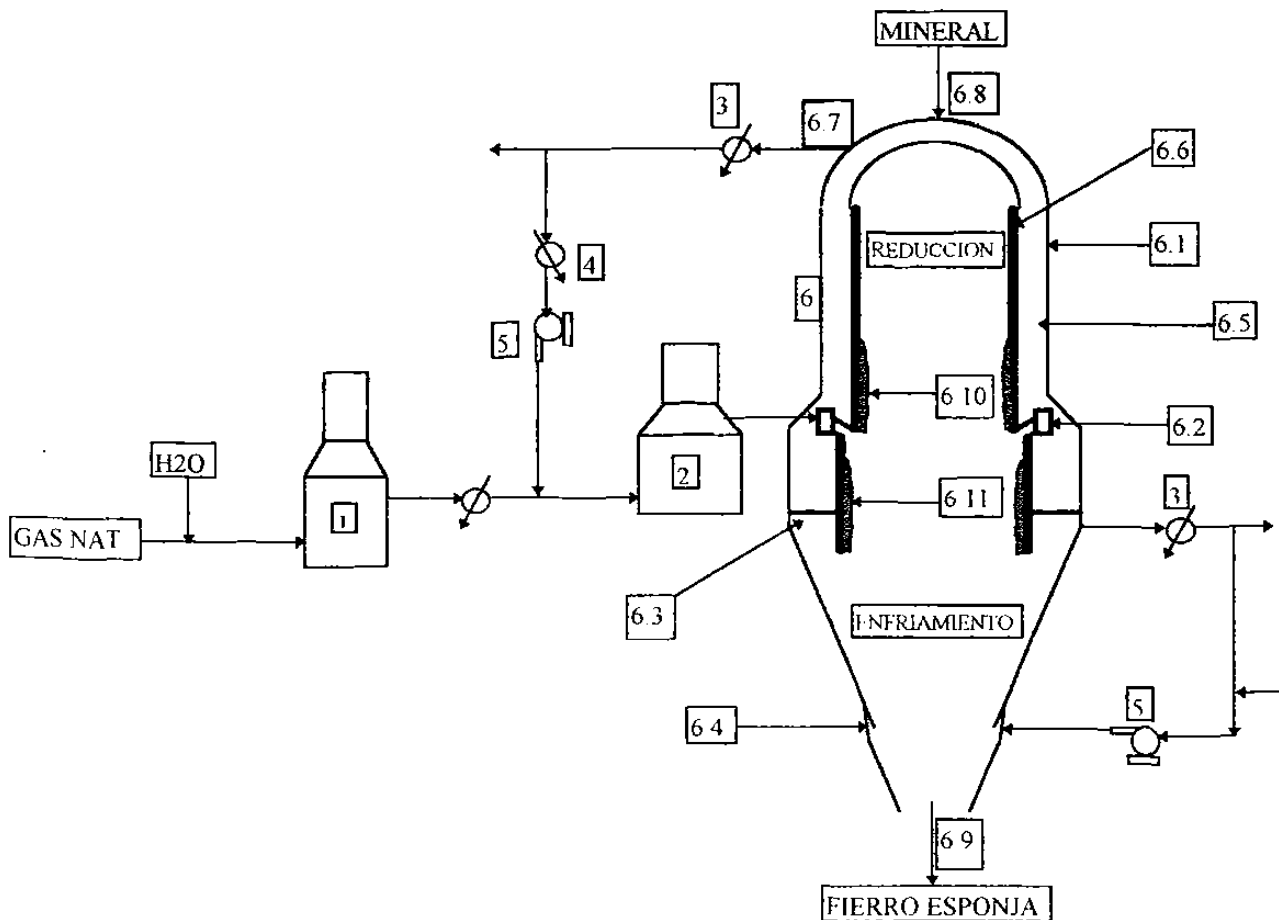


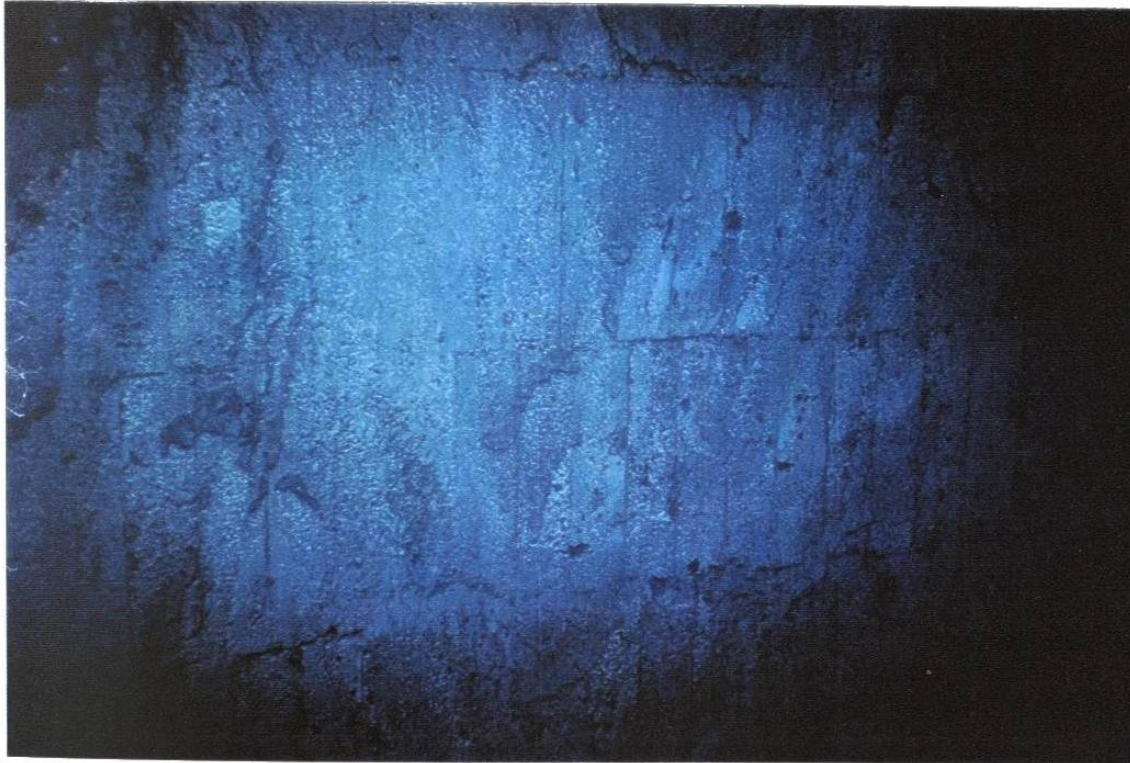
Figura 2 Diagrama de flujo del proceso.

1.2.2 EL REACTOR

Este es un recipiente con una coraza de acero (6.1), un plenum de entrada de gas caliente (6.2), un plenum de salida de gas de enfriamiento (6.3), un plenum de entrada de gas frío (6.4), una capa de concreto refractario aislante (6.5), y una capa de ladrillo en contacto con el hierro esponja (6.6). También tiene una salida de gas reductor (6.7), una entrada de mineral (6.8), y una salida de hierro esponja (6.9)

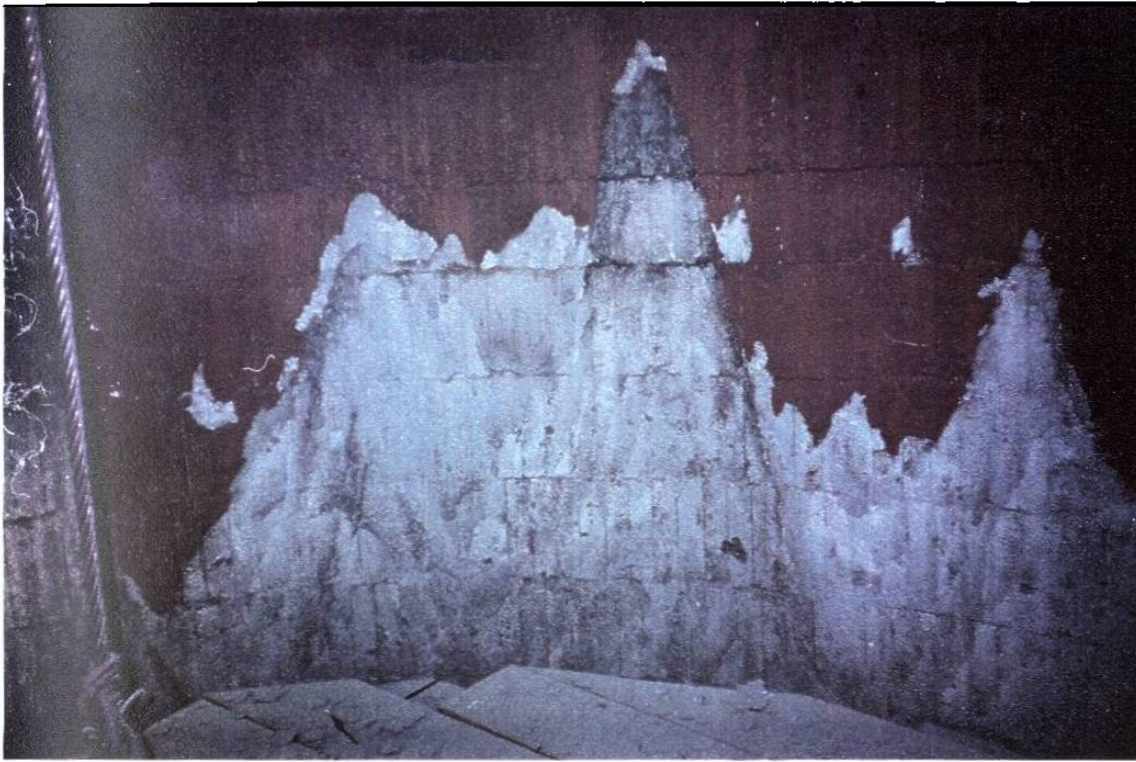
1.2.3 LAS CAPAS

Estas se forman en las posiciones 6.10 y 6.11 indicadas en la Figura 2. Son capas de material aglomerado que llegan a medir hasta aproximadamente 15 cm de espesor y entre 2 y 3 m de altura, extendiéndose algunas veces en todo el perímetro del reactor. Las Fotografías 2 y 3 muestran las marcas dejadas por las capas al desprenderse del reactor.



Fotografía 2. Marcas dejadas por las capas al desprenderse del reactor.

Cuando una capa se desprende durante la operación se presentan algunas perturbaciones en el flujo de sólidos. Cuando hay un paro programado se dedica algún tiempo a tumbarlas y sacarlas del reactor.



Fotografía 3. Marcas dejadas por las capas al desprenderse del reactor.

La Fotografía 4 muestra la sección transversal de un fragmento de capa.



Fotografía 4 Sección transversal de una capa.

La Fotografía 5 muestra la cara externa de una capa.



Fotografía 5. Cara exterior de una capa.

La Tabla 1 muestra los valores de densidad y porosidad de muestras de capas sacadas de los reactores en diferentes fechas.

La densidad aparente de una capa es aproximadamente un 50% mayor a la de una partícula de fierro esponja. La composición química es básicamente hierro metálico, la Tabla 2 muestra un análisis químico típico de una capa.

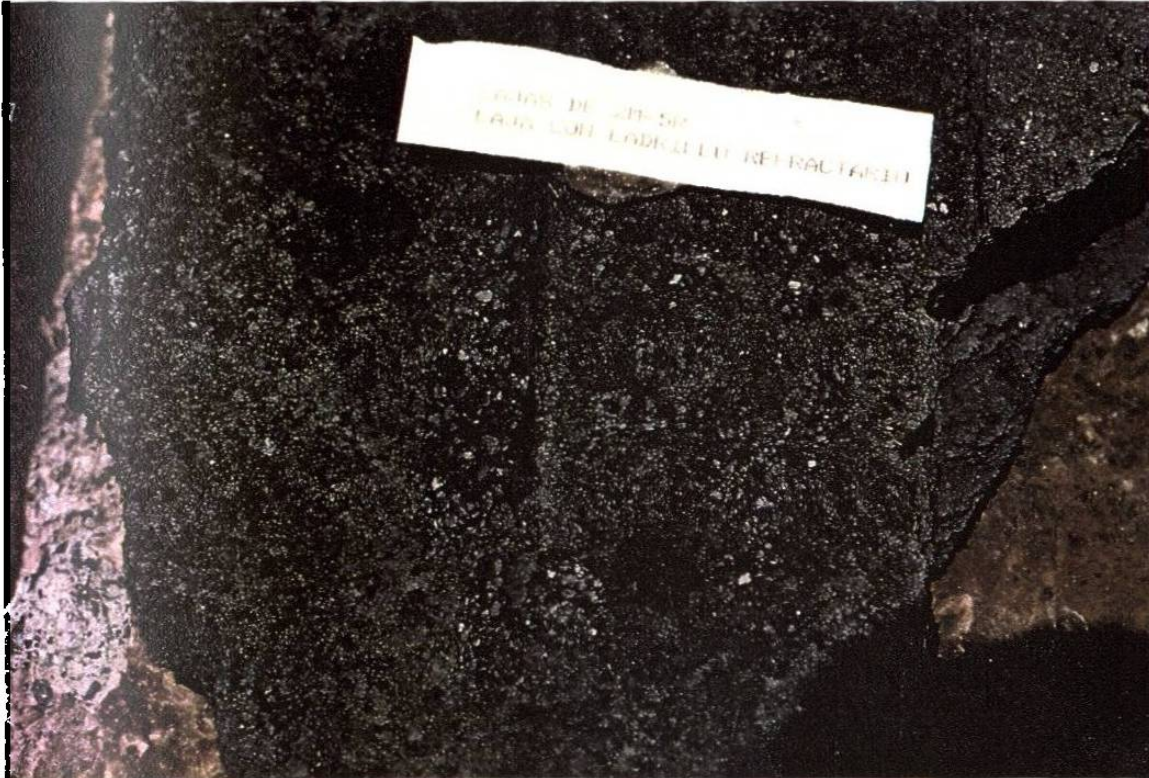
Tabla 1. Densidad y porosidad de capas
2M5 (MAYO 1994) 3M5 (FEB. 1992)

Muestra	Densidad	Porosidad	Densidad	Porosidad
No.	gr/cm ³	%	gr/cm ³	%
1	4.0	42.2	4.2	38.4
2	3.9	45.2	4.3	36.5
3	3.8	45.1	3.7	47.2
4	3.9	43.4	4.2	38.4
5	3.8	44.8	4.2	39.5
6	3.9	43.2	4.3	37.6
7	4.0	41.5	4.4	35.7
8	3.9	42.5	4.5	35.7
9	3.9	43.9	4.8	32.1
10	4.0	42.9	4.1	41.0
11	3.9	42.4	4.1	43.2
12	3.9	42.8	5.0	29.9
13	4.0	42.5	4.1	39.7
14	3.9	42.7	4.1	41.3
15	4.0	41.2	4.2	37.7
16	4.0	42.1	4.2	43.3

Tabla 2 Composición química de capa sacada de un reactor industrial en Hylsa (2M5)

Identificación	%	Identificación	%
Fe tot.	89.040	MgO	0.670
Fe met.	82.700	CaO	2.380
Fe met. Fe tot	92.880	NiO+Cr ₂ O ₃	0.041
FeO	7.114	CuO+CdO	0.140
Fe ₂ O ₃	1.158	PbO	0.120
C	2.060	ZnO	0.253
S	0.008	TiO ₂	0.177
P	0.033	V ₂ O ₅	0.121
SiO ₂	2.450	MnO	0.264
Al ₂ O ₃	0.790	K ₂ O+Na ₂ O	0.168

La Fotografía 6 muestra una capa con refractario adherido. La Fotografía 7 muestra un corte transversal donde se aprecia la capa adherida al refractario

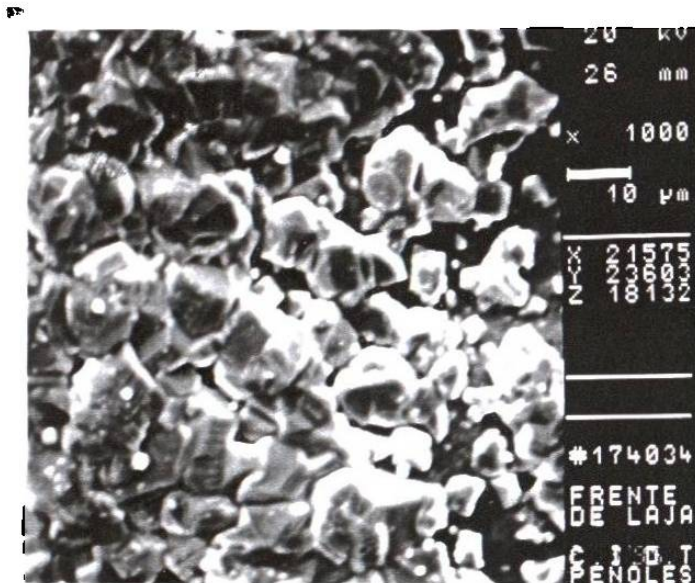


Fotografía 6 Capa con refractario adherido.

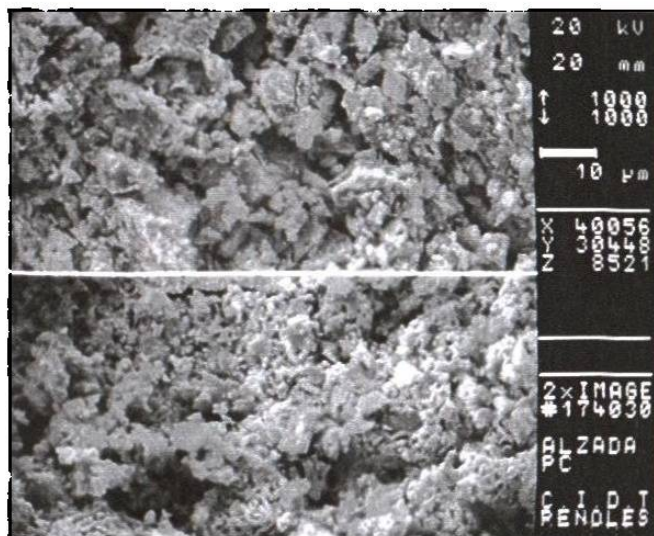


Fotografía 7 Corte transversal de capa con refractario (6x)

La Fotografía 8 muestra el aspecto microscópico de una capa a 1000 aumentos. Si esta fotografía se compara con la Fotografía 9, correspondiente a la superficie de los pelets, se aprecia una gran diferencia en la porosidad. Esto muestra el proceso de densificación que sucede al pasar las partículas a formar parte de la capa.

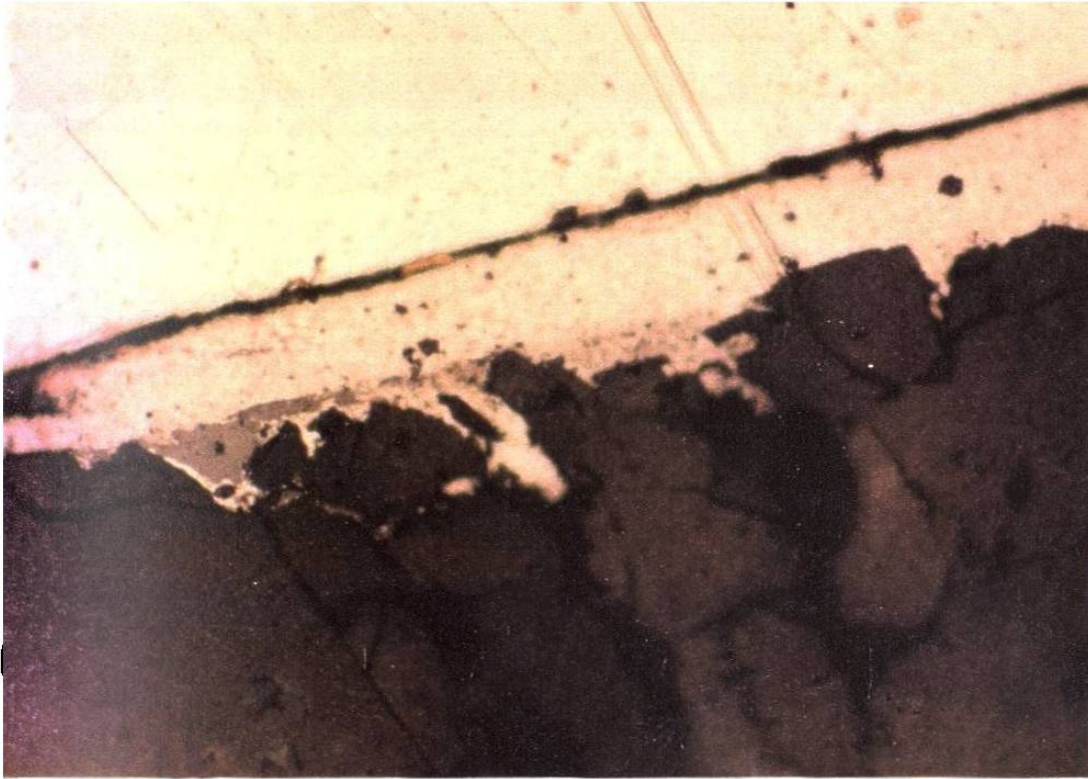


Fotografía 8. Aspecto de la superficie de una capa (1000x).

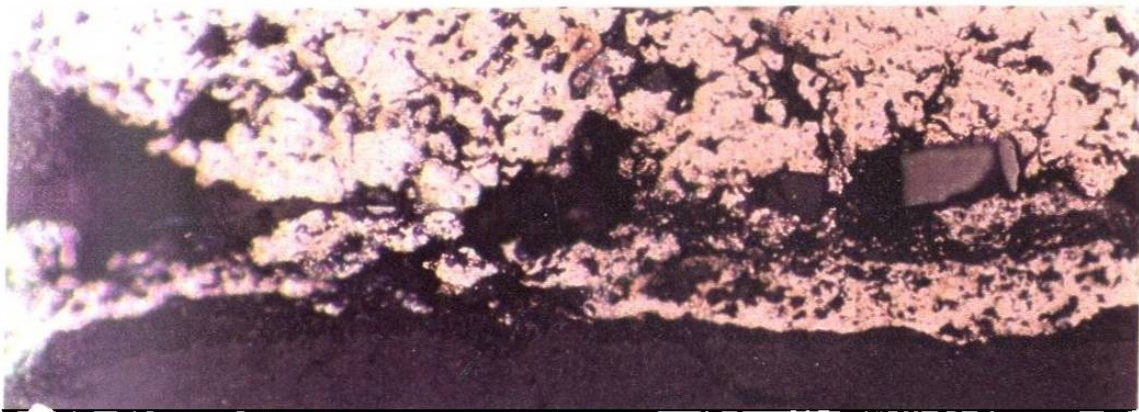


Fotografía 9. Superficies de hierro esponja (1000x).

Las Fotografías 10 y 11 muestran la interfase capa-refractario en las capas de laboratorio e industriales respectivamente

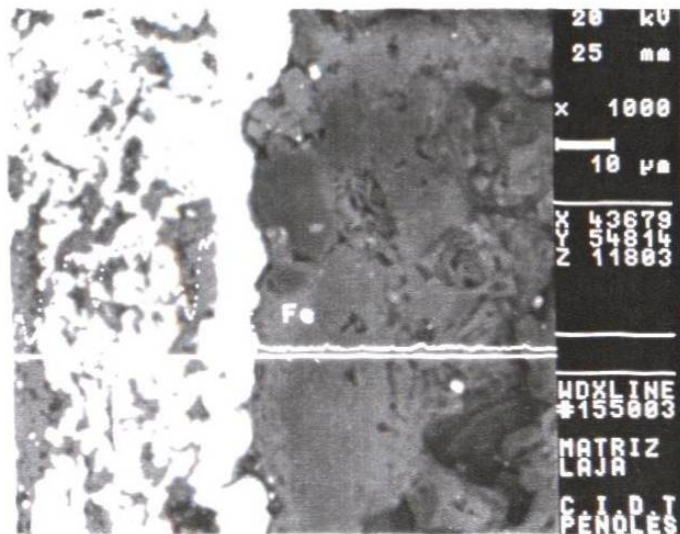


Fotografía 10. Aspecto de interfase en capa de laboratorio (400x).

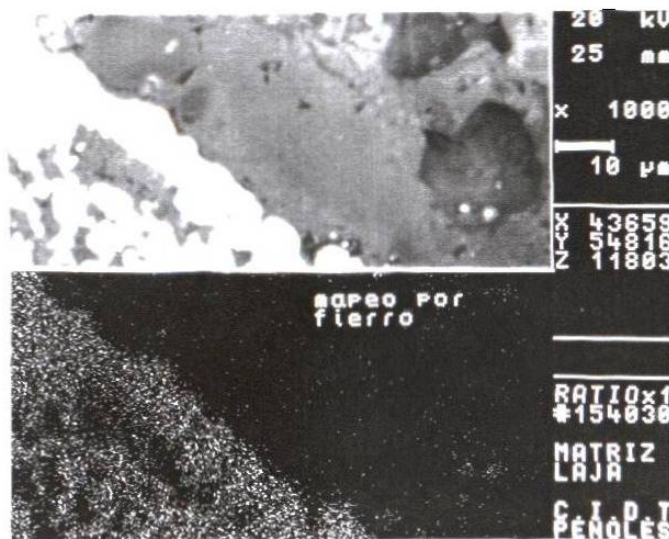


Fotografía 11 Aspecto de interfase en capa industrial (400x).

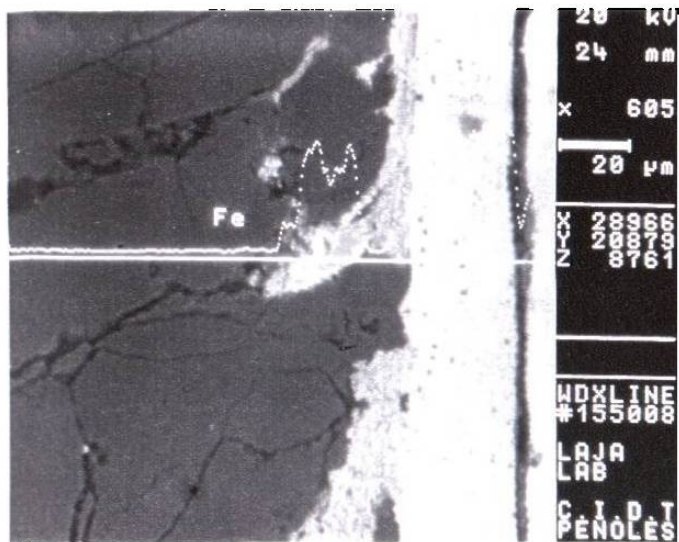
Las Fotografías 12 y 13 muestran los mapeos de hierro en muestras de capa adheridas al refractario a escala industrial y laboratorio respectivamente. Se puede observar que el hierro no se difunde dentro de la matriz del refractario, ésto es que el anclaje primario es mecánico. No obstante en las muestras industriales, después de un año de operación, se tiene una difusión del calcio, como se muestra en la Fotografía 14, dentro de la matriz del refractario y un desplazamiento del potasio, como se muestra en la Fotografía 15. Esto puede considerarse como parte del mecanismo de anclaje secundario ya que las capas simuladas en el laboratorio solo muestran el anclaje mecánico, Fotografías 16 y 17.



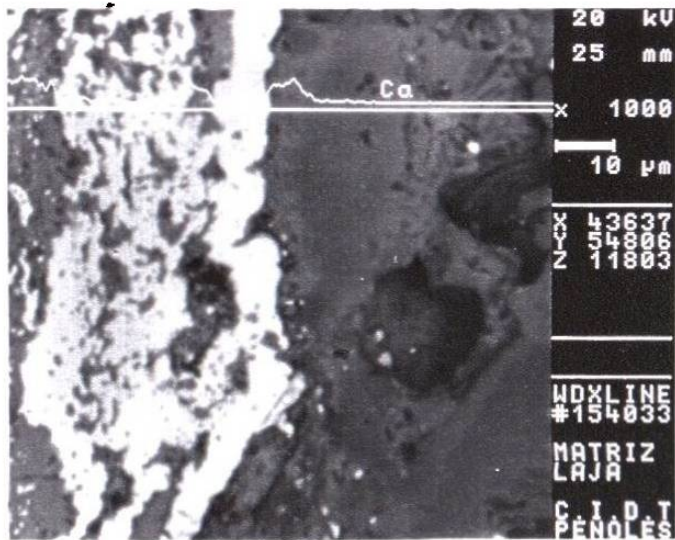
Fotografía 12a. Mapeo puntual de hierro en capa industrial.



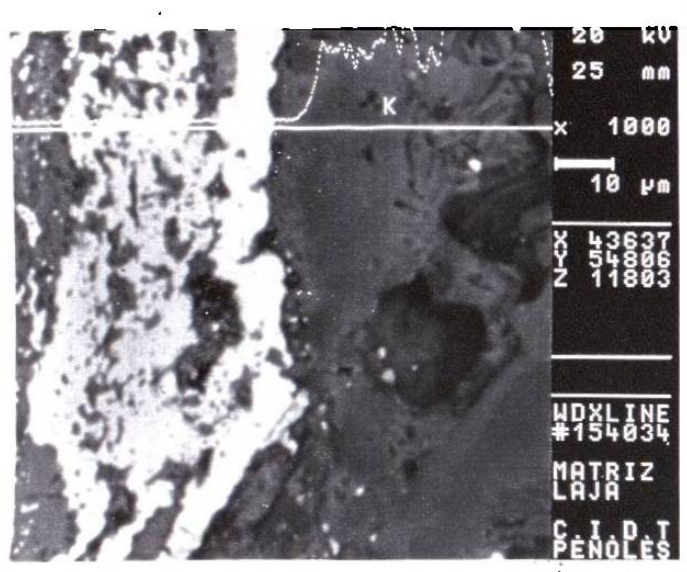
Fotografía 12b. Mapeo de hierro en área de capa industrial.



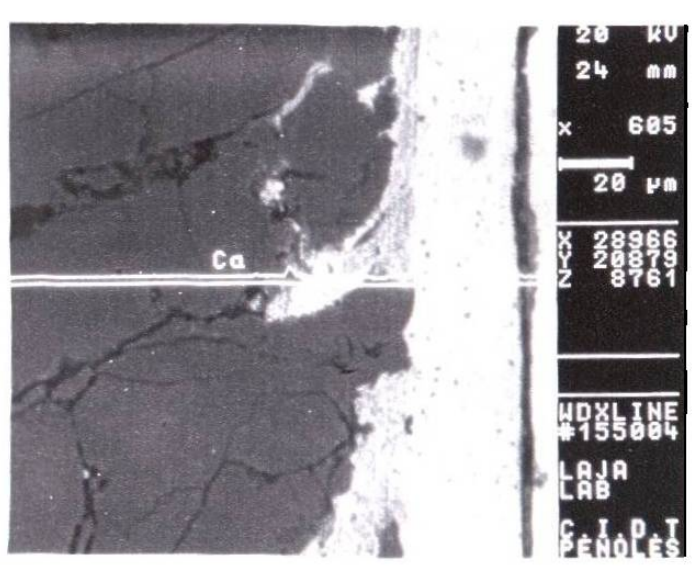
Fotografía 13. Mapeo puntual de fierro en capa de laboratorio.



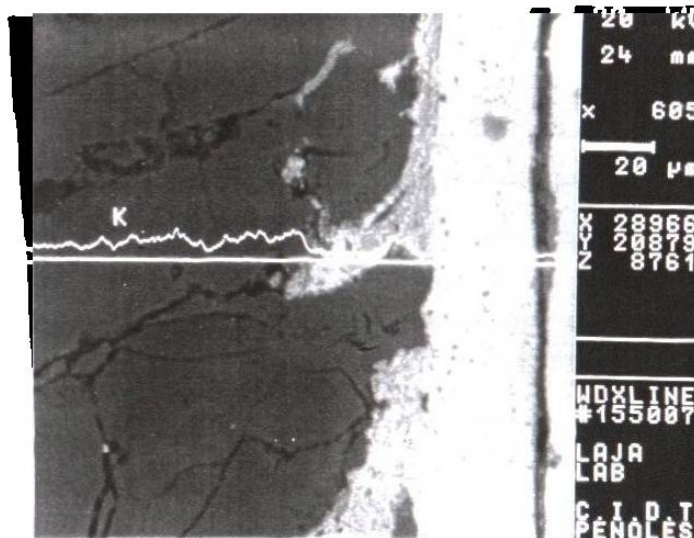
Fotografía 14. Mapeo de calcio en capa industrial.



Fotografía 15. Mapeo de potasio en capa industrial.



Fotografía 16. Mapeo de calcio en capa de laboratorio.



Fotografía 17. Mapeo de potasio en capa de laboratorio.

2. OBJETIVOS

1. Diseñar un equipo para simular la formación de capas en el laboratorio aplicando esfuerzo cortante en la interfase pelet-refractario con posibilidad de cambiar la temperatura, atmósfera reductora y otras variables típicas del proceso que pudieran ser importantes.
2. Entender cuales son las variables e interacciones importantes en los procesos de anclaje y crecimiento de las capas para proponer un mecanismo de anclaje de las capas en el refractario.
3. Una vez conocido el mecanismo de anclaje, proponer métodos y aparatos para aplicar un tratamiento que disminuya significativamente la adherencia del fierro esponja al refractario, y por lo tanto la formación de capas, buscando que estos métodos puedan aplicar el tratamiento a los ladrillos por separado o ya instalados en el reactor.

3. ESTUDIO BIBLIOGRAFICO

3.1 PUBLICACIONES QUE SEÑALAN LA IMPORTANCIA DEL FENOMENO DE FORMACION DE CAPAS

En la literatura (2 y 3) se menciona como un problema común el acumulamiento de los sólidos granulares en partes de los sistemas de manejo y almacenamiento. Las Figuras 3 y 4 muestran como Bates (4) y Roberts (2) reconocen y describen como un problema el residuo permanente en las tolvas o partes de los sistemas de manejo. Este problema está asociado con la adhesión entre el sólido granular y la pared. Para que la acumulación de las capas tenga lugar, es necesario que las fuerzas que tienden a desprender la capa, por ejemplo la fuerza de gravedad, sean insuficientes para vencer las fuerzas de adhesión que tienden a formar la capa. Los mecanismos de adhesión han sido descritos con mayor detalle por Rumpf (15) como se muestra en la Figura 5.

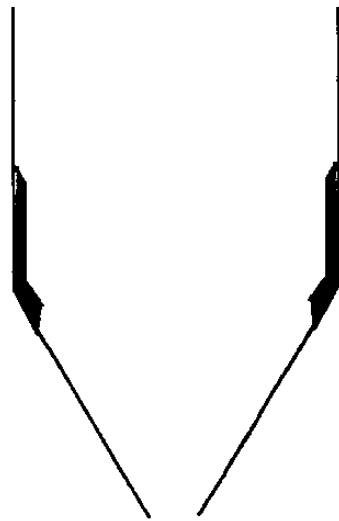


Figura 3. Esquema encontrado en la literatura que describe el problema de formación de capas.

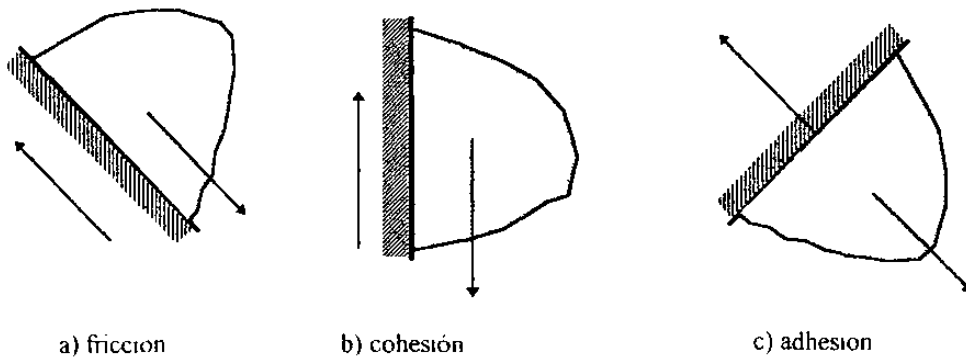


Figura 4 Conceptos de fricción, cohesión, y adhesión que muestra la literatura (2) de flujo de sólidos.

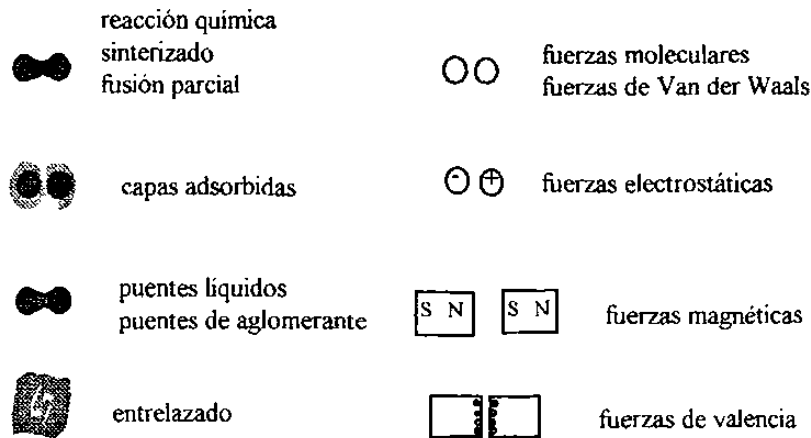


Figura 5. Clasificación de los mecanismos de adhesión propuesta por Rumpf

3.2 EJEMPLOS DE PROCESOS INDUSTRIALES DONDE EXISTE FORMACION DE CAPAS

Se sabe que en varios procesos industriales la formación de capas sobre las paredes de los reactores u hornos causa los problemas siguientes: variaciones en la calidad, disminución de la productividad (baja el volumen activo de reacción), paros de planta debido a la obstrucción de la salida o desprendimiento de parte del refractario cuando las capas se caen, etc. Algunos ejemplos de estos procesos son los siguientes: Hornos rotatorios que producen o tratan materiales cerámicos como los diversos tipos de cemento o escorias, hornos de tipo shaft, rotatorio, o lecho fluidizado (6) que reducen minerales de hierro. La literatura (5) muestra cómo la compañía Sumitomo de Japón, después de varios años de investigación y desarrollo, para resolver un problema de formación de capas en un horno rotatorio tuvo que recurrir al cambio de un ladrillo silico-aluminoso por uno de carburo de silicio. El cambiar los ladrillos es mucho más costoso que solo tratar la superficie de trabajo del ladrillo, sobre todo cuando se tiene que recurrir a cambiar un ladrillo comercial por uno más sofisticado.

3.3 MECANISMOS DE ADHESION

La adhesión es la atracción que se manifiesta entre los átomos o moléculas de cuerpos diferentes que se encuentran en contacto. La adhesión ideal simplemente significa el trabajo reversible, por unidad de área, necesario para separar dos fases que inicialmente tienen una interfase común.

La producción de una unión entre dos materiales requiere la activación de fuerzas adhesivas. En el caso de la formación de capas, explicar el mecanismo de anclaje y crecimiento es identificar las variables decisivas y su interacción en el proceso, entre las partículas de fierro esponja y la pared que produce una unión adhesiva con una determinada resistencia, porosidad y estructura. Al conocer las variables importantes se podrá seleccionar el mecanismo ya publicado que mejor concuerde o proponer uno diferente

A continuación se analiza brevemente cada uno de los mecanismos de adhesión reportados en la literatura, descartando aquellos que no influyen en el mecanismo de fijación o crecimiento de las capas.

Mecanismos de adhesión que no tienen lugar en este fenómeno:

1. Fuerzas de Van der Waals

La fuerza de Van der Waals es una atracción entre átomos y moléculas aun cuando no están cargados eléctricamente, resulta de las interacciones entre los momentos dipolares fluctuantes debido a la movilidad de los electrones y actúa en todas las combinaciones de la materia dentro de la distancia de influencia de estas interacciones, aproximadamente 1000 \AA . London en 1930 (20) demostró la existencia de este tipo de fuerza eléctrica entre átomos. Esta fuerza es conocida como fuerza de dispersión. Esta fuerza es siempre atractiva y surge del hecho que aun los átomos neutros constituyen sistemas de cargas oscilantes porque tienen un núcleo positivo y electrones negativos. La fuerza de dispersión depende de la propagación de campos eléctricos oscilantes o, alternativamente, del intercambio de fotones virtuales entre átomos; presumiblemente, ésta se propaga a la velocidad de la luz en el medio.

2. Potencial electrostático de contacto

Además de las fuerzas de Van der Waals, dos materiales en contacto desarrollan un potencial de contacto que da lugar a una fuerza de atracción electrostática. El estado de energía local de las superficies y las funciones de trabajo de los electrones, las cuales dependen de los materiales, son los factores decisivos que desarrollan el potencial de contacto

3. Cargas electrostáticas en exceso

Para los conductores, las cargas en exceso se balancean al entrar en contacto. Para no conductores, ellas producen fuerzas de atracción las cuales se calculan con la fórmula de Coulomb.

El papel que pudieran jugar estas tres fuerzas en la formación de capas tiene que ver con mantener las partículas menores de 1000 Angstroms cerca de la pared hasta que puedan ser introducidas a los poros del refractario empujadas por otras partículas o por el gas. Sin embargo estas fuerzas no pueden ser las determinantes en el mecanismo de anclaje y crecimiento de las capas porque de ser así también habría capas en el reactor piloto que produce 1Ton/hr de fierro esponja y usa el refractario con las mismas características que el reactor industrial. En el reactor piloto no se forman capas.

4. Atracción magnética.

No es factible que esto influya en la formación de las capas porque el refractario no es magnético, además a las temperaturas existentes en la zona de formación de capas tampoco el fierro esponja es magnético.

5 Puentes líquidos

6. Presión capilar dentro de poros llenos de líquido

7 Unión por agentes altamente viscosos

Estos mecanismos, 5, 6, y 7, no pueden influir en la formación de capas porque no existe una fase líquida, diferente al fierro esponja y al refractario, que produzca la unión.

8 Puentes sólidos

A temperaturas elevadas los puentes sólidos se pueden desarrollar por difusión de moléculas de una partícula a otra en los puntos de contacto. Los puentes sólidos también se pueden hacer por reacción química, cristalización de sustancias disueltas, pegamentos que endurecen y solidificación de componentes fundidos.

8.1 Sales que cristalizan

8.2 Aglutinantes que se endurecen

8.3 Puentes o uniones originados por fusión con posterior solidificación

8.4 Puentes originados por sinterizado

8.5 Puentes formados por reacción química o difusión por diferencia en concentración

Para que 8.1 y 8.2 influyeran en el mecanismo de formación de capas sería necesaria la acción de un agente externo diferente al refractario y al fierro esponja.

Para que 8.3 u 8.4 fueran considerados se tendría la formación de una unión continua entre el fierro esponja y el refractario. Se puede observar en las fotografías 10 y 11 que tal cosa no existe. Se puede diferenciar claramente cual es refractario y cual es fierro esponja. Cuando se

hace un mapeo con la sonda del microscopio electrónico, Fotografías 12 y 13, se observa como el nivel de fierro es el esperado en el refractario, tanto en las capas de laboratorio como en las industriales. Por lo tanto no hay una sola fase sinterizada o fundida que tenga igual composición a uno y otro lado de la interfase.

Mecanismos de adhesión que si tienen lugar en este fenómeno:

Mecanismos 8.5, difusión o reacción química.

Las Fotografías 14 y 15 muestran que en las capas del reactor industrial hay una zona de aproximadamente 5 micras en el refractario contiguo a la interfase donde existen una concentración más baja de potasio y una concentración más alta de calcio que en el resto del ladrillo, ésto implica que el mecanismo 8.5 está presente. Las Fotografías 16 y 17 muestran el mapeo de la microsonda aplicado a una capa de laboratorio. La Fotografía 17 muestra que el potasio sigue en su lugar aunque se aprecia una tendencia al enriquecimiento de las zonas cercanas a la superficie, como si el potasio se estuviese difundiendo lentamente para salir del refractario. La Fotografía 16 muestra una difusión incipiente del calcio aunque en ésta es mucho menos claro, o quizá despreciable, comparado con la capa industrial.

Mecanismo 9, entrelazado o anclaje mecánico

Dado que se observa claramente, tanto en la capa industrial como en la de laboratorio, que hay una separación química del fierro a uno y otro lado de la interfase pero existe un contacto íntimo entre fierro esponja y refractario, podemos formular la hipótesis que el mecanismo de anclaje primario es físico, debido a la penetración del fierro esponja en los poros impulsado por los esfuerzos cortantes, esto implica la presencia del mecanismo 9. También podemos decir que existe un anclaje secundario, que sucede después del mecánico, el cual no se distingue claramente en las capas de laboratorio, que consiste en la difusión del calcio dentro del ladrillo impulsado por un gradiente de concentración

No obstante que el sinterizado (8.4) se descarta como mecanismo iniciador del anclaje, este toma parte en el aumento de resistencia de las anclas y crecimiento de las capas porque las partículas de fierro esponja se unen, disminuyéndose la porosidad y aumentando la resistencia, en parte impulsadas por la energía de superficie a tal grado que la densidad de la capa es hasta un 50% mayor que la de la partícula de fierro esponja

Por lo tanto el mecanismo propuesto por esta tesis para el anclaje sería como sigue: se inicia por la extrusión o penetración mecánica de los finos del fierro esponja a los poros o grietas del refractario con el subsecuente sinterizado que da resistencia al ancla sobre la cual después crece la capa. Este mecanismo sería el generador de las anclas y explicaría también el crecimiento al penetrar los finos y sinterizarse dentro de los poros de la capa. Simplemente el pelet, blando y poroso, al arrancársele pequeños fragmentos, debido a los

esfuerzos cortantes contra las aristas de la superficie y orillas de los poros, penetran éstos por extrusión o empujados por el mismo pelet a los poros para después sinterizarse y dar lugar al proceso ya explicado.

Otra posibilidad es que los finos generados por la fricción con la pared u otros mecanismos se adhieran a la pared por las fuerzas 1, 2, y 3 y después sean empujados dentro de los poros continuando con el proceso de sinterizado y crecimiento ya descrito. Otra posibilidad es una combinación de ambos; 1, 2, 3, y 8 5, 9

En base a lo observado en el laboratorio, planta piloto, y planta industrial, se prefiere elegir solo los mecanismos 9 y 8 5 ya que los mecanismos 1, 2, y 3 se pueden eliminar tentativamente porque en la planta piloto también debe haber finos que se puedan adherir a la pared por fuerzas de Van der Waals así como que se puedan meter a los poros pero nunca se han observado capas. Si acaso el mecanismo 1 está presente es en forma secundaria. En las plantas piloto e industrial se tienen composiciones de gases y sólidos, perfiles de temperatura, y flujos por unidad de área muy similares. Todo esto debe ser así para que el proceso pueda funcionar bien químicamente. La mayor diferencia entre planta piloto e industrial está en el nivel de esfuerzos en la pared. Esto indica que la formación de capas está directamente relacionada con el nivel de esfuerzo cortante en la pared. Reconociendo esta situación, desde el principio que se intentó simular la formación de capas, ver Figura 1, se hicieron experimentos a escala de banco poniendo especial atención a tener el nivel de esfuerzos adecuados pero no se consideró que el esfuerzo cortante era el importante. Desarrollar el equipo para aplicar esfuerzos cortantes era complicado. Lo que permitió el desarrollo de esta forma de probar fue el poner ventanas a los equipos operando a alta temperatura para poder observar y controlar la aplicación de los esfuerzos y el suministro de material a la superficie de contacto. El diseño de este equipo es una de las aportaciones de esta tesis.

Resumiendo, los mecanismos 1, 2, y 3 quedan descartados como indispensables en base a que no se han detectado capas en la planta piloto donde también ha habido muchos finos en algunas condiciones de operación. Los mecanismos del 4 al 8 4 quedan descartados por definición y en base a lo observado en el microscopio electrónico. Por lo tanto, todo indica que la variable clave para el anclaje y crecimiento es tener un cierto nivel de esfuerzo cortante. Esto se investigó con el diseño de experimentos en la sección para determinar el mecanismo.

3.4 LA ECUACION DE RUMPF PARA EL CALCULO DE ESFUERZOS PUNTUALES

La ecuación de Rumpf (8) ver descripción en Apéndice 12.1, se puede usar para el cálculo de fuerzas puntuales entre las partículas en una cama empacada en función de la porosidad de cama, el diámetro de partícula, número de coordinación, y el esfuerzo sobre la cama.

Esta ecuación nos muestra que en los puntos de contacto existe un efecto multiplicativo de la fuerza para ciertas configuraciones geométricas de la cama. Esto quiere decir que si por ejemplo el esfuerzo sobre la cama es de 1Kg/cm^2 , la fuerza puntual, para los parámetros típicos de una cama de fierro esponja, puede ser de hasta $2.5\text{ Kg/punto de contacto}$.

3.5 REFORZAMIENTO DE LAS FUERZAS ADHESIVAS MEDIANTE LA DEFORMACION DE LAS SUPERFICIES EN CONTACTO

Por los efectos de las fuerzas de atracción y de presión de contacto adicional, los cuerpos están sujetos a deformaciones elásticas y plásticas. En la literatura (15) se menciona que generalmente el aumento de la fuerza adhesiva debido a la deformación elástica no juega un papel importante. Sin embargo en el caso de la deformación plástica el aumento en la fuerza adhesiva puede ser más importante.

Se ha reportado (15) que la fuerza adhesiva promedio de las partículas en contacto con una pared o superficie plana ha aumentado hasta por un factor de 10 cuando se sometieron a esfuerzos a compresión. Este reforzamiento de las fuerzas adhesivas se ha explicado por la deformación de las nanorugosidades de dimensiones de $10 - 30 \text{ \AA}$. La presión de contacto deforma las rugosidades y en consecuencia la distancia entre la partícula y la pared disminuye, aumentando las fuerzas adhesivas considerablemente. Es bien conocido en la literatura el reforzamiento con el tiempo de los enlaces adhesivos con la ayuda del sinterizado y la deformación viscoelástica provocada por las fuerzas externas como la generada por el propio peso del sólido. Para la formación de cuellos de sinterizado entre dos esferas impulsados por la tensión superficial y la presión de contacto se ha reportado (15) la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{b}{x}\right)^2 = \left(\frac{4\gamma}{5x} + \frac{2F_t}{5\pi x^2}\right) \frac{t}{\eta}$$

En esta fórmula $F_t = F_0 + F_p$, siendo F_p la fuerza externa y F_0 la fuerza adhesiva. t es el tiempo, η la viscosidad, γ la tensión superficial, x el diámetro, y b el diámetro del cuello de sinterizado. Se supone que la resistencia a la deformación está basada en un modelo de flujo viscoso.

3.6 EL AREA REAL DE CONTACTO ENTRE DOS SUPERFICIES

Roberts et al.(29) mencionan que la interacción entre el sólido granular y la pared depende de las siguientes propiedades del sólido granular: tamaño de partícula, composición química, temperatura, dureza, rugosidad, tiempo de almacenamiento; y las siguientes propiedades de la

pared: dureza de la superficie, rugosidad, composición química y vibraciones. La Figura 6 muestra diversos modelos de rugosidad de la superficie de la pared como los propone Ooms (28).



Figura 6. Modelos de rugosidad de pared.

Nagao (13) propone, como se muestra en la Figura 7, varios modelos de rugosidad de las partículas.

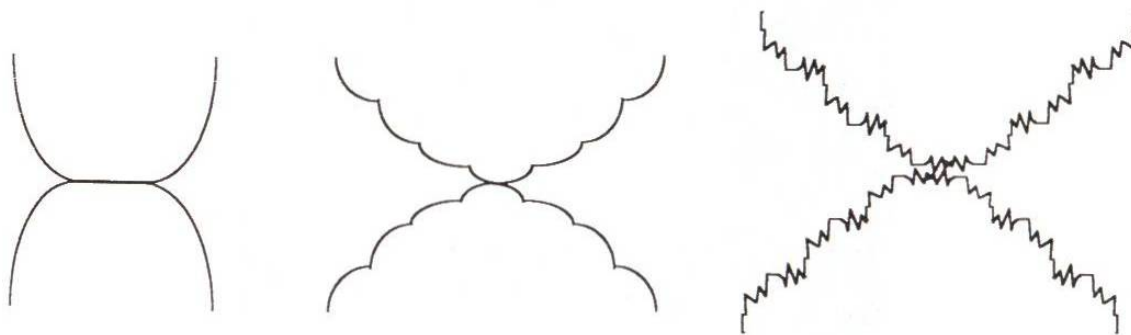
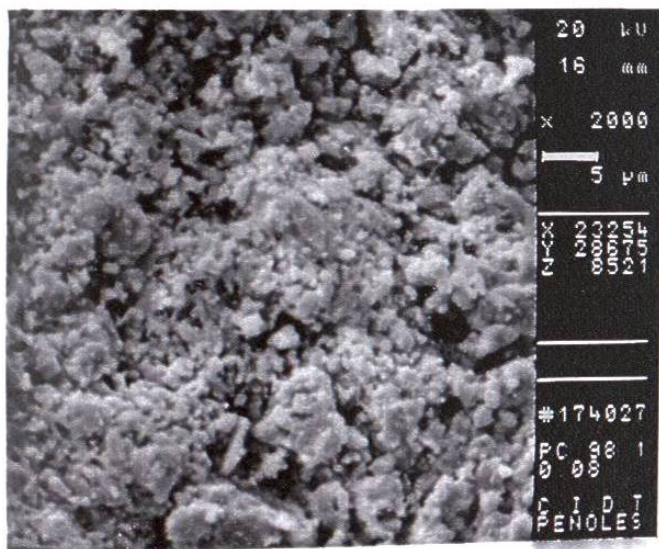


Figura 7. Modelos de rugosidad de partículas.

Las Fotografías 18 y 19 tomadas con el microscopio electrónico muestran el tamaño de las protuberancias de los pelets de hierro esponja.

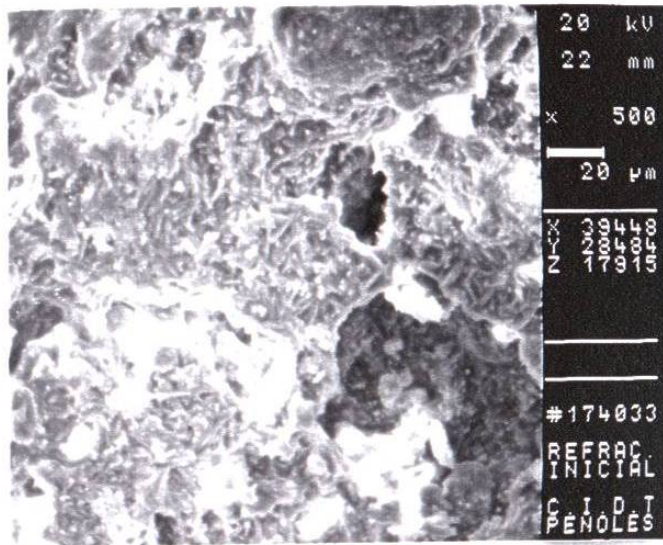


Fotografía 18. Superficie de pelets de Alzada a 2000 x.

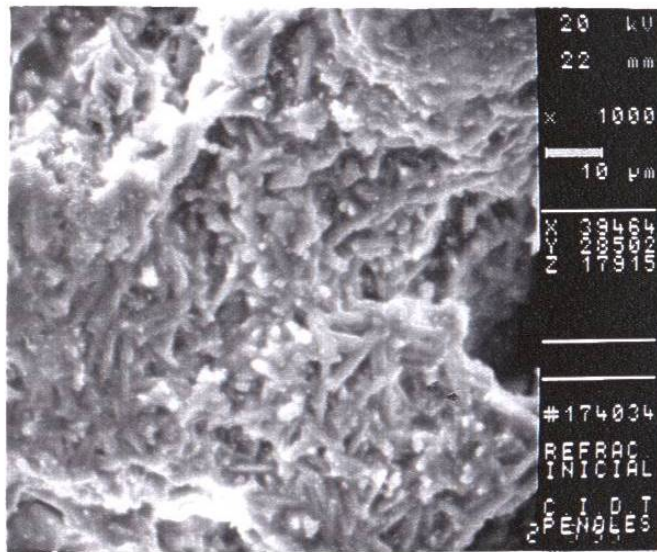


Fotografía 19. Superficie de pelets de Peña Colorada a 2000x.

Las fotografías 20 y 21 muestran la superficie del refractario.



Fotografía 20. Superficie de refractario sin tratamiento a 500x.



Fotografía 21. Superficie de Refractario sin tratamiento a 1000x.

Con estas imágenes en mente podemos estimar la multiplicación de los esfuerzos puntuales debido a la geometría de la cama v a la geometría de las rugosidades. Por lo tanto es comprensible que los esfuerzos puntuales iniciales lleguen a ser de 100 a 1000 veces mayores que los esfuerzos sobre el área aparente de la partícula en el punto de contacto. Por esto el material fluye plásticamente en algunos puntos hasta lograr un equilibrio de fuerzas. En seguida, si la temperatura es suficientemente alta, el sinterizado continúa disminuyendo la porosidad e incrementando aún más el área de contacto reforzando simultáneamente el enlace.

Existe evidencia (20) de que aun superficies de apariencia muy lisa son irregulares en una escala molecular de distancias. La naturaleza de tales irregularidades puede ser estudiada por microscopía electrónica. A resoluciones de 10 Angstroms se pueden apreciar imperfecciones, escalones, etc. sobre la superficie, así como las marcas dejadas por una superficie que se desliza sobre otra. Técnicas de difracción de electrones de baja energía han proporcionado mucha información acerca de las estructuras superficiales. Recientemente también el microscopio de fuerza atómica se ha usado para estudiar fenómenos superficiales. Los resultados de tales estudios han dejado claro que las superficies de materiales cristalinos pueden tener escalones bastante irregulares de cientos o miles de angstroms de profundidad y que superficies lapeadas o lijadas pueden ser bastante irregulares en esta escala de distancias. Aun superficies de metal pulidas no son realmente lisas.

Como resultado de la naturaleza irregular, aun de las más lisas superficies disponibles, dos superficies que se ponen en contacto se tocarán solo en regiones aisladas. De hecho en el contacto inicial, uno esperaría a lo máximo tener solamente tres puntos de contacto, pero aun para cargas muy pequeñas, el esfuerzo en esos puntos sería suficiente para causar deformación que produciría múltiples contactos. Las regiones iniciales de contacto parecerían como en la Figura 8.



Figura 8. Modelo de contacto inicial entre dos superficies.

Si mediante la ecuación de Rumpf se estimó una fuerza de hasta 2.5 Kg en el punto de contacto, y tomando en cuenta que las áreas reales son del orden de 100 a 1000 veces menores que el área aparente, entonces los esfuerzos en los puntos reales de contacto pueden llegar hasta 250 ~ 2500 Kg/cm². Obviamente mucho antes de llegar a ese valor el material fluye plásticamente incrustándose en el primer poro o grieta en su trayectoria. Esto también explica el reforzamiento de los enlaces adhesivos impulsado por la deformación plástica. Por experiencia en el briqueteado en la planta piloto de Hylsa se sabe que el hierro esponja fluye plásticamente y disminuye su porosidad dramáticamente cuando a temperaturas mayores o iguales a 650 °C es compactado con una presión de aproximadamente 1000 Kg/cm² en adelante. Creemos que lo mismo está sucediendo en los puntos de contacto entre pelets y pared de refractario. Esto permite formular la hipótesis de que los mecanismos de anclaje y crecimiento de la capa se deben en parte a la extrusión de los finos o protuberancias de la superficie del hierro esponja dentro de los poros del refractario o de la capa.

En resumen, ha sido bastante claro que el contacto entre dos superficies está limitado a una pequeña fracción del área aparente y que como una consecuencia de esto se pueden desarrollar altos esfuerzos locales. Por lo tanto, cuando dos superficies se ponen en contacto, la presión es extremadamente alta en los pocos puntos iniciales de contacto, y la deformación inmediatamente ocurre. Este flujo plástico continúa hasta que la presión local llega a un valor característico de esfuerzo de cedencia del material más suave. Normalmente el área real de contacto A se determina por la presión de cedencia P_m y la carga W .

$$A = W/P_m$$

Para la mayoría de los metales, P_m está en el rango de 10 a 100 Kg/mm², de forma que en un experimento de fricción con una carga de 10 Kg, el área de contacto real sería ciertamente del orden de 0.001 cm².

Un aspecto interesante de la interacción partículas-pared es la manera en la cual el área de contacto cambia cuando hay deslizamiento. Este cambio se puede medir ya sea por conductividad en el caso de metales, o por la adhesión normal, o sea, la fuerza para separar las dos superficies. Como un ejemplo de este efecto de los esfuerzos cortantes, se ha medido (20) que una bola de acero presionada brevemente contra una superficie de Indio con una carga normal de 15g requirió aproximadamente los mismos 15g para separarla. Sin embargo cuando se deslizaba, un coeficiente de fricción de 5 fue medido y, al detenerla, la fuerza normal requerida para separarla se había elevado hasta 100g. La relación de 100g a 15g se puede tomar como la relación de las áreas de contacto en ambos casos, **ésto indica que los esfuerzos cortantes generaron casi 7 veces más área que los esfuerzos normales.**

3.7 PROPIEDADES DE ALGUNAS FASES DEL LADRILLO Y DEL FIERRO

La Tabla 3 muestra algunas propiedades encontradas en la literatura. Lo importante es la diferencia en dureza entre las fases del refractario y el hierro.

Tabla 3. Propiedades de algunas fases del ladrillo y el hierro

Identificación	Formula	T. fusión	Dureza	Densidad
Silimanita	Al ₂ O ₃ -SiO ₂	1880*	6.5-7.5	3.23-3.27
Mulita	3Al ₂ O ₃ -2SiO ₂	1810	6-7	
Corundum	Al ₂ O ₃	2050	9	3.95-4.10
Tridimita	SiO ₂	1710	7	2.65
Hierro	Fe	1535	4-5	7.85

* a esta temperatura se transforma en Mulita

4. CARACTERIZACION DE LAS SUPERFICIES DEL LADRILLO SIN TRATAMIENTO Y DEL FIERRO ESPONJA

La Tabla 4 muestra los datos dados por el fabricante respecto a la porosidad y el análisis químico del ladrillo. La Tabla 5 muestra los análisis medidos en el laboratorio de Hylsa.

Tabla 4. Porosidad y macroanálisis químico
Ladrillo refractario (datos del fabricante)

Porosidad aparente	°o	11.0 - 15.0
Densidad	gr/cm ³	2.26 - 2.36
Análisis Químico		
SiO ₂	°o	51.0 - 55.0
Al ₂ O ₃	°o	42.0 - 45.0
Fe ₂ O ₃	°o	1.5 - 2.5
CaO	%	0.2 - 0.8
MgO	°o	0.0 - 0.5
TiO ₂	°o	1.2 - 2.2
Na ₂ O + K ₂ O	%	0.5 - 1.0