

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES



MECANISMO DE FORMACION DE CAPAS SOBRE LAS
PAREDES EN LOS REACTORES DE REDUCCION DIRECTA

T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA DE MATERIALES

QUE PRESENTA

M. en C. JORGE DOMINGO BERRUN CASTAÑON

MONTERREY, N. L.

JULIO DE 1995

MECANISMO DE FORMACION DE CAPAS SOBRE LAS
PAREDES EN LOS REACTORES DE REDUCCION DIRECTA

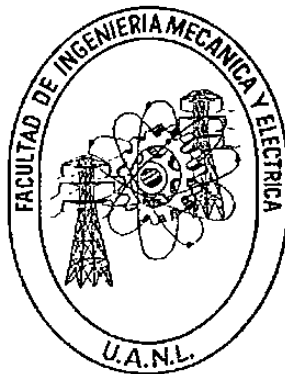
J. D. BERBUN C.

FD
Z5853
.M2
FIME
1995
B4



1020112511

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES



MECANISMO DE FORMACION DE CAPAS SOBRE LAS PAREDES EN LOS
REACTORES DE REDUCCION DIRECTA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA
DE MATERIALES

QUE PRESENTA

M. en C. JORGE DOMINGO BERRUN CASTAÑON

Julio, 1995.

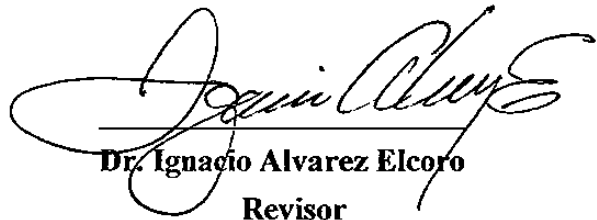
MECANISMO DE FORMACION DE CAPAS SOBRE LAS PAREDES
EN LOS REACTORES DE REDUCCION DIRECTA




Dr. Ubaldo Ortiz Méndez
Asesor



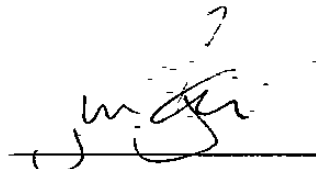
Dr. Carlos A. Guerrero Salazar
Revisor



Dr. Ignacio Alvarez Elcoro
Revisor



Dr. Juan A. Aguilar Garib
Revisor



Dr. Luis R. Farías Martínez
Revisor



FONDO TE

AGRADECIMIENTO

Esta tesis no hubiese sido posible sin el apoyo de HYLSA, CONACYT, y FIME-UANL. Se agradece la asesoría del Dr. Ubaldo Ortiz, el soporte financiero de CONACYT, y la aprobación del estudio a la División Tecnología de HYLSA.

INDICE

RESUMEN	5
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE FOTOGRAFIAS	8
1. INTRODUCCION	10
1.1 ASPECTOS GENERALES	10
1.2 DESCRIPCION DEL SISTEMA A ESTUDIAR	12
1.2.1 EL PROCESO INDUSTRIAL	12
1.2.2 EL REACTOR	13
1.2.3 LAS CAPAS	13
2. OBJETIVO	23
3. ESTUDIO BIBLIOGRAFICO	24
3.1 PUBLICACIONES QUE SEÑALAN LA IMPORTANCIA DEL FENOMENO DE FORMACION DE CAPAS	24
3.2 EJEMPLOS DE PROCESOS INDUSTRIALES DONDE EXISTE FORMACION DE CAPAS	25
3.3 REPASO DE LOS MECANISMOS DE ADHESION MENCIONADOS EN LA LITERATURA	26
3.4 LA ECUACION DE RUMPF PARA EL CALCULO DE ESFUERZOS PUNTUALES	29
3.5 REFORZAMIENTO DE LA ADHESION POR LA DEFORMACION DE LAS SUPERFICIES EN CONTACTO	30
3.6 EL AREA REAL DE CONTACTO ENTRE DOS SUPERFICIES	30
3.7 TABLA DE PROPIEDADES DE FASES DE LOS REFRACTARIOS	36
4. CARACTERIZACION DEL LADRILLO SIN TRATAMIENTO Y DEL FIERRO ESPONJA	36
5. BALANCE DE FUERZAS Y CALCULO DEL ESFUERZO NORMAL A LA PARED DEL REACTOR	41

6. EXPERIMENTACION	42
6.1 CELDA DE CORTE CON MOVIMIENTO RECTILINEO HORIZONTAL	42
6.2 CELDA DE CORTE CON MOVIMIENTO ROTACIONAL	44
6.3 EXPERIMENTACION PARA ESTUDIAR MECANISMO DE ADHESION	50
6.3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	52
6.3.2 DESCRIPCION DE EQUIPO	54
6.3.3 EXPERIMENTOS	54
6.3.4 RESULTADOS	55
6.4 PRUEBA DE TRATAMIENTOS PARA EVITAR ANCLAJE	60
6.4.1 PLANTEAMIENTO DE HIPOTESIS	60
6.4.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	60
6.4.3 RESULTADOS	64
7. EXPERIMENTACION PARA OBTENER MODELO DE CRECIMIENTO DE LAS CAPAS	73
7.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	73
7.2 RESULTADOS	74
8. ESPECIFICACIONES DE TRATAMIENTOS Y DIBUJOS PARA PRUEBA A ESCALA INDUSTRIAL	78
9. DISCUSION DE RESULTADOS	85
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
11. BIBLIOGRAFIA	90
12. APENDICES	92
12.1 CALCULO DE ESFUERZOS PUNTUALES	92
12.2 CALCULO DE ESFUERZOS NORMALES A LA PARED	93

RESUMEN

Los ladrillos refractarios son de los materiales más usados en los equipos de proceso de alta temperatura en las industrias productoras de acero, cemento, vidrio, etc. Al igual que otros materiales de construcción que trabajan en condiciones extremas de operación, los refractarios juegan un papel importante en la disponibilidad de los equipos de proceso, ya que su cambio o reparación generalmente implica paro del equipo. Debido a esto es obvio que un mejor conocimiento de las propiedades de los refractarios ayudará a mejorar su calidad, así como los procedimientos de selección del refractario más adecuado para cada necesidad.

Uno de los fenómenos que se presentan en los reactores u hornos que tienen pared interna de refractario es la formación de capas que al ir incrementando su tamaño y resistencia generalmente producen perturbaciones en la calidad del producto o bajan la capacidad o disponibilidad de la planta por paros no programados o programados para deshacerse de las mismas. En el ambiente industrial a estas capas se les llama “lajas”, “morros”, etc.

En los reactores de reducción directa se presenta este fenómeno, se forman capas de fierro esponja adheridas al ladrillo silico-aluminoso. La descripción del mecanismo de anclaje y crecimiento de las capas constituye el propósito de esta tesis.

Se logró la simulación de la formación de capas en el laboratorio en base al diseño de equipo que permitió aplicar esfuerzos de corte a la interfase pelet-refractario bajo condiciones de atmósfera reductora y alta temperatura. Se midió la masa de fierro esponja adherida a las muestras de ladrillos en un diseño de experimentos con nueve variables independientes. Se identificó el mecanismo de anclaje y crecimiento de las capas. Se obtuvieron resultados que indican la factibilidad de resolver el problema de adhesión mediante un tratamiento del refractario. También se desarrolló un método y el equipo adecuado para aplicar el tratamiento antiadherente a escala industrial. Este tratamiento tiene varios usos potenciales en la tecnología de reducción directa. Se lograron tratar aproximadamente 2000 ladrillos para el reactor de HYLSA Monterrey y 4000 para el reactor de HYLSA Puebla.

LISTA DE TABLAS

1. Densidad y porosidad de capas	16
2. Composición química de capa sacada de un reactor industrial en Hylsa	16
3. Propiedades de algunas fases del ladrillo y el hierro	36
4. Porosidad y macroanálisis químico	36
5. Análisis del ladrillo en HYL	37
6. Porosidad del hierro esponja	40
7. Análisis químico típico del hierro esponja	41
8. Diseño de experimentos y resultados	53
9. Análisis de varianza	58
10. Análisis químico de polvos usados en los tratamientos	61
11. Diseño de experimentos para tratamientos	63
12. Miligramos adheridos a las muestras tratadas	68
13. Analisis de resultados de los tratamientos	72
14. Diseño de experimentos para obtención del modelo	74
15. Análisis estadístico del modelo	74
16. Análisis estadístico de las variables	75
17. Análisis estadístico de los coeficientes	75

LISTA DE FIGURAS

1. Equipo para simular capas sin aplicar esfuerzo cortante	11
2. Diagrama de flujo del proceso	12
3. Esquema encontrado en la literatura que describe el problema de las capas	24
4. Conceptos de fricción, cohesión, y adhesión que muestra la literatura	24
5. Clasificación de los mecanismos de adhesión propuesta por Rumpf	25
6. Modelos de rugosidad de pared	31
7. Modelos de rugosidad de partículas	31
8. Modelo de contacto inicial entre dos superficies	34
9. Análisis de superficie del ladrillo por espectroscopia de rayos x	40
10. Esquema de celda con movimiento rectilíneo horizontal	42
11. Celda rotacional	45
12. Esquema de microreactor	50
13. Gráfica de efectos tipo Pareto	59
14. Pronóstico vs valor observado de la masa adherida	76
15. Masa adherida vs temperatura y esfuerzo	77
16. Esquema del equipo para tratar ladrillos por separado	80
17. Esquema del equipo para tratar ladrillos en el reactor	81

LISTA DE FOTOGRAFIAS

1	Fragmento de una capa sacada del reactor	10
2	Marcas dejadas por las capas al desprenderse del reactor	13
3	Marcas dejadas por las capas al desprenderse del reactor	14
4	Sección transversal de una capa	14
5	Cara exterior de una capa	15
6	Capa con refractario adherido	17
7	Corte transversal de capa con refractario	17
8	Aspecto de la superficie de una capa	18
9	Superficies de fierro esponja	18
10	Aspecto de interfase en capa de laboratorio	19
11	Aspecto de interfase en capa industrial	19
12a.	Mapeo puntual de fierro en capa industrial	20
12b.	Mapeo de fierro en área de capa industrial	20
13	Mapeo puntual de fierro en capa de laboratorio	21
14.	Mapeo de calcio en capa industrial	21
15.	Mapeo de potasio en capa industrial	22
16.	Mapeo de calcio en capa de laboratorio	22
17	Mapeo de potasio en capa de laboratorio	23
18.	Superficie del pelet de Alzada a 2000x	32
19	Superficie del pelet de Peña Colorada a 2000x	32
20.	Superficie de refractario sin tratamiento a 500x	33
21.	Superficie de refractario sin tratamiento a 1000x	33
22.	Mapeo de silicio en capa industrial	38
23	Mapeo de aluminio en capa industrial	38
24.	Mapeo de potasio en capa industrial	39
25.	Mapeo de calcio en capa industrial	39
26.	Celda con movimiento rectilíneo horizontal	43
27.	Levantamiento del anillo	44
28	Celda rotacional	46
29.	Ladrillo listo para probarse	47
30.	Fierro esponja en anillo inferior	48
31	Comparación de capa real vs simulada	49
32.	Refractario con fierro esponja adherido	49
33.	Microreactor	51

34	Microreactor en operación	51
35	Panorámica del laboratorio	52
36	Cortadora de muestras de ladrillo refractario	55
37	Muestra de ladrillo con capa	56
38	Fierro esponja separado del refractario	56
39	Tratamiento con soplete	61
40	Ladrillo sin tratamiento	64
41	Ladrillo tratado con polvo de Alúmina	64
42	Ladrillo tratado con polvo de ladrillo sílico-aluminoso	65
43	Ladrillo tratado con polvo de cemento blanco	65
44	Ladrillo tratado con polvo de cemento gris	66
45	Ladrillo tratado con polvo de magnesita	66
46	Ladrillo tratado con polvo de cal	67
47	Ladrillo fundido, sin aplicar polvo	67
48	Ladrillo tratado con polvo de arena sílica	68
49	Capa en ladrillo sin tratamiento	69
50	Capa en ladrillo fundido	69
51	Capa en ladrillo tratado con polvo de alúmina	70
52	Capa en ladrillo tratado con polvo de magnesita	70
53	Capa en ladrillo tratado con polvo de cemento blanco	71
54	Capa en ladrillo tratado con polvo de cemento gris	71
55	Capa en ladrillo tratado con polvo de cal	72
56	Desarrollo de método y equipo	78
57	Desarrollo de método y equipo	79
58	Desarrollo de método y equipo	79
59	Muestra de ladrillo sin tratar a 20x	82
60	Muestra tratada a 20x	82
61	Muestra sin tratar a 500x	83
62	Muestra tratada a 500x	83
63	Ladrillo tratado ya instalado	84