

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

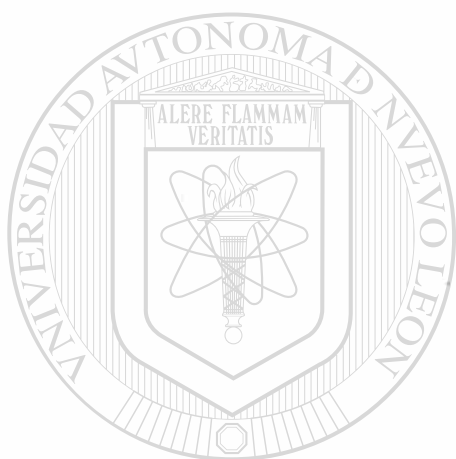
MECANISMO DE FORMACION DE CAPAS SOBRE LAS
PAREDES EN LOS REACTORES DE REDUCCION DIRECTA

J. D. BERBUN C.

TD
Z5853
.M2
FIME
1995
B4



1020112511



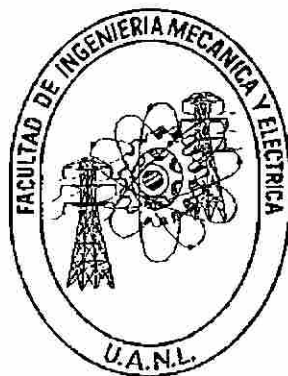
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA
DE MATERIALES

QUE PRESENTA

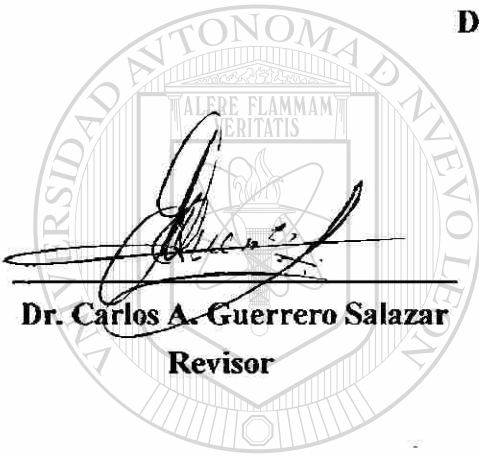
M. en C. JORGE DOMINGO BERRUN CASTAÑÓN

Julio, 1995.

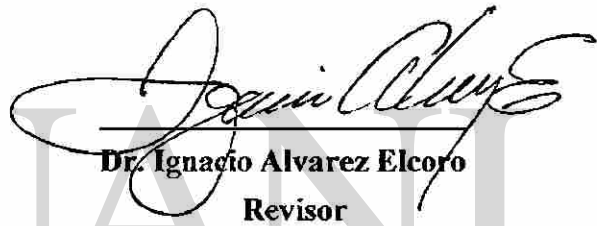
MECANISMO DE FORMACION DE CAPAS SOBRE LAS PAREDES
EN LOS REACTORES DE REDUCCION DIRECTA



Dr. Ubaldo Ortiz Méndez
Asesor



Dr. Carlos A. Guerrero Salazar
Revisor

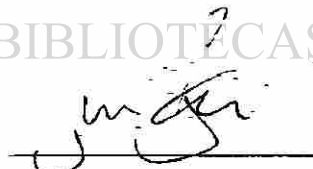


Dr. Ignacio Alvarez Elcoro
Revisor

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



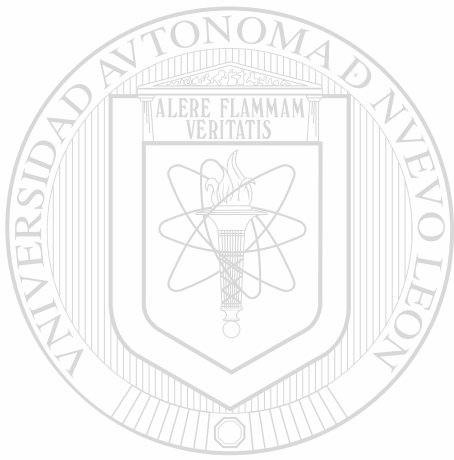
Dr. Juan A. Aguilar Garib
Revisor



Dr. Luis R. Farías Martínez
Revisor

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



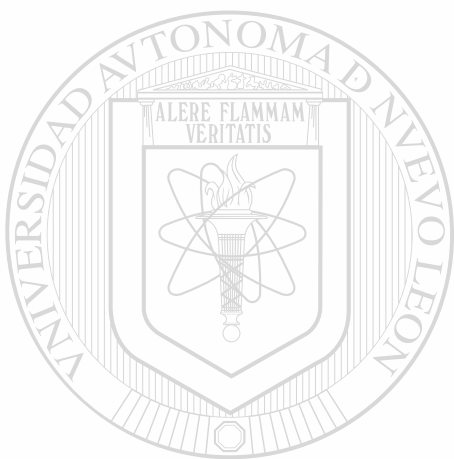
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



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.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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 hierro 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 hierro 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. Análisis 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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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 area 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
<hr/>		
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

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.

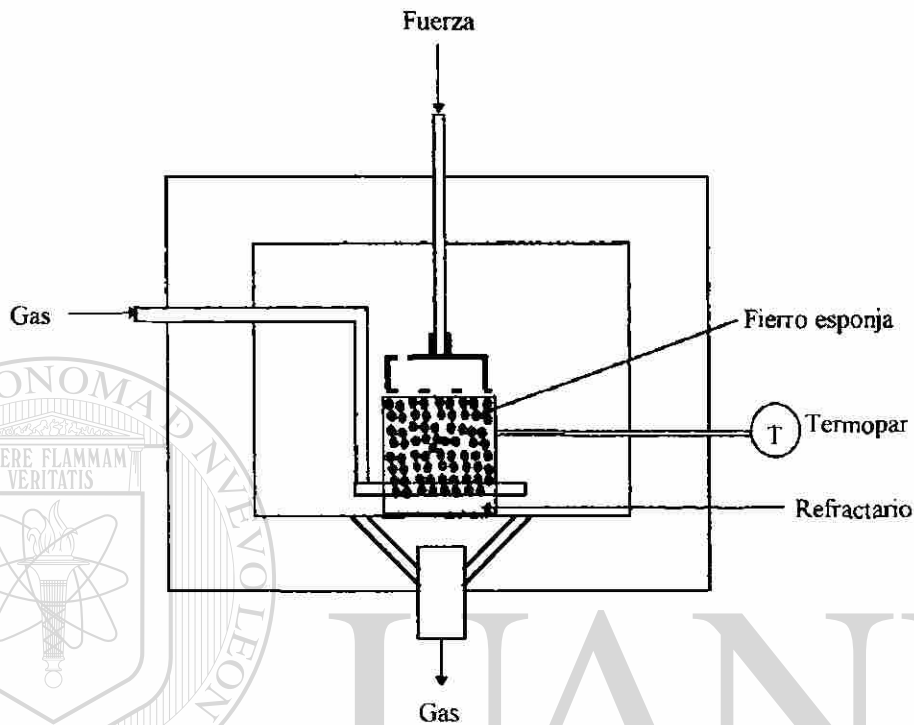


Figura 1. Equipo para simular capas sin aplicar esfuerzo cortante.

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 fierro 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.

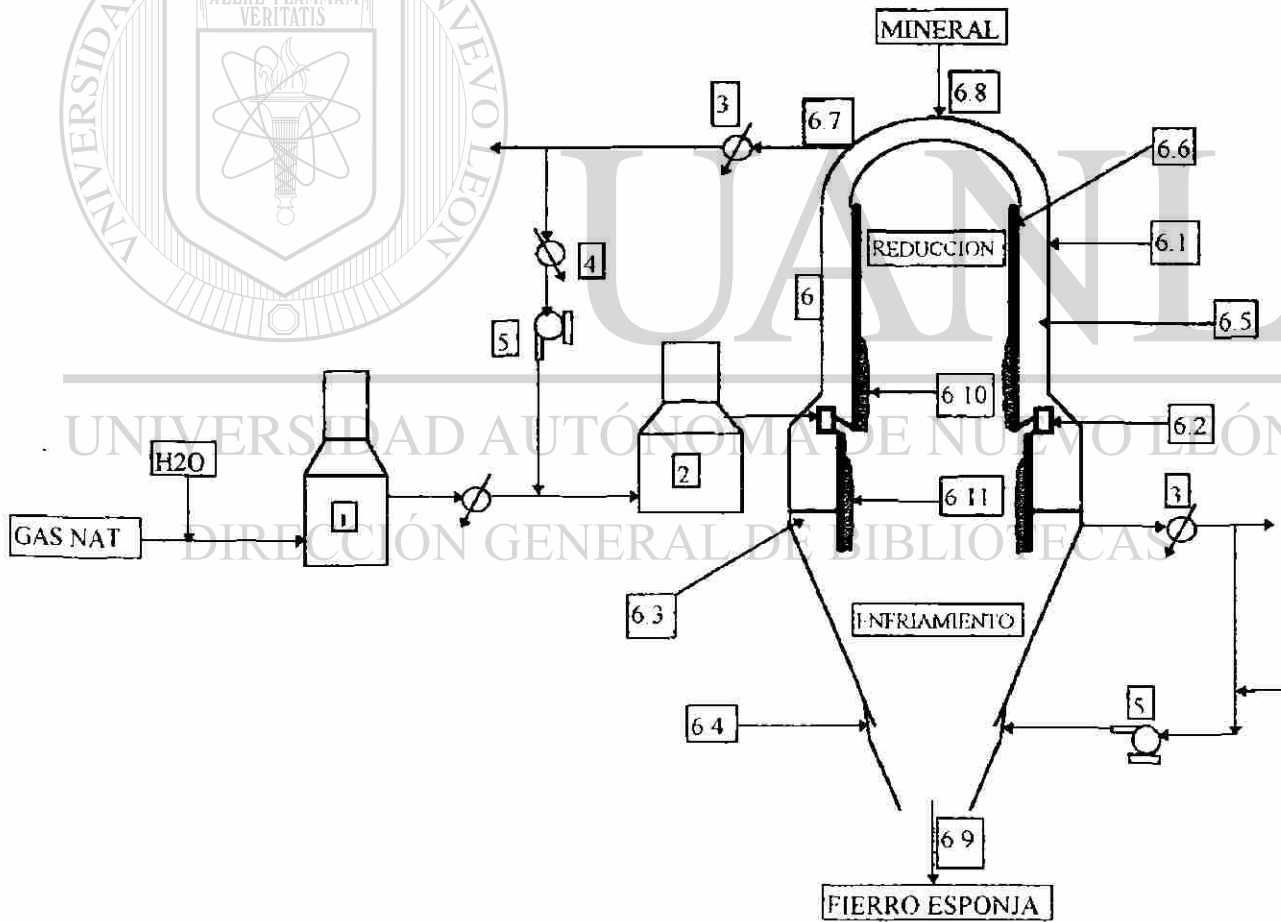


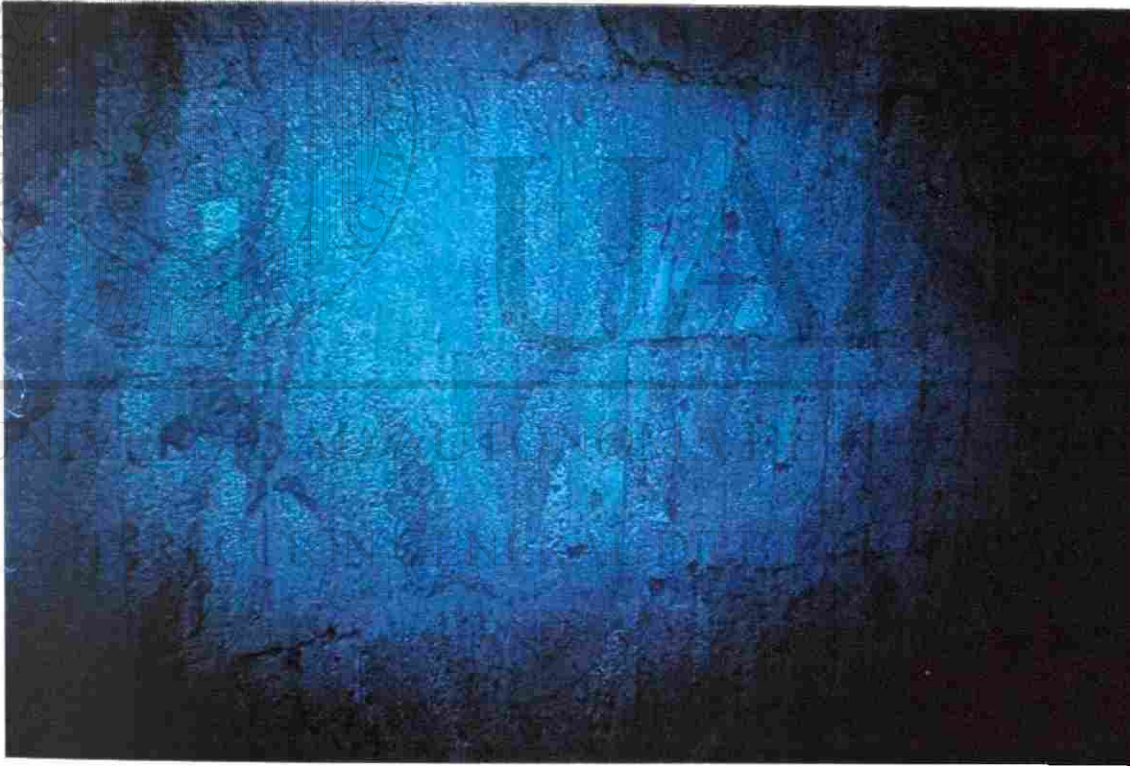
Figura 2 Diagrama de flujo del proceso.

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 fierro esponja (6.6). También tiene una salida de gas reductor (6.7), una entrada de mineral (6.8), y una salida de fierro 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.

Quando 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 hierro esponja. La composición química es básicamente hierro metálico, la Tabla 2 muestra un análisis químico típico de una capa.

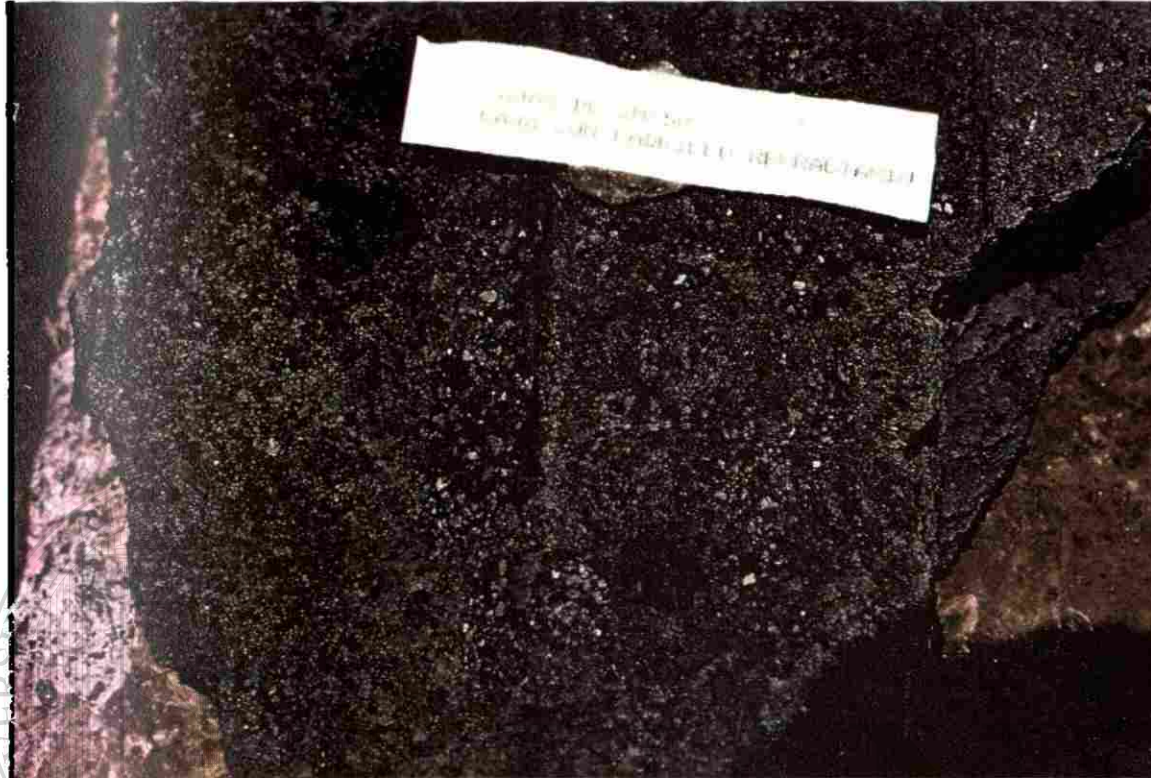
Tabla 1. Densidad y porosidad de capas
2M5 (MAYO 1994) 3M5 (FEB. 1992)

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

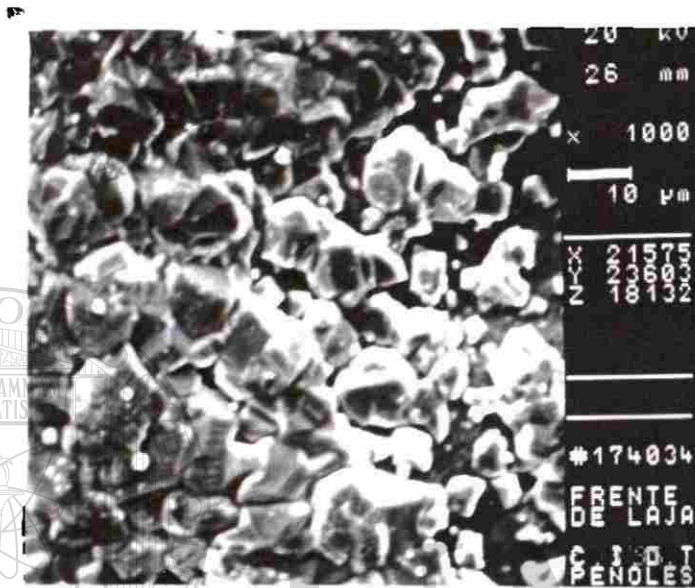


Fotografía 6 Capa con refractario adherido.

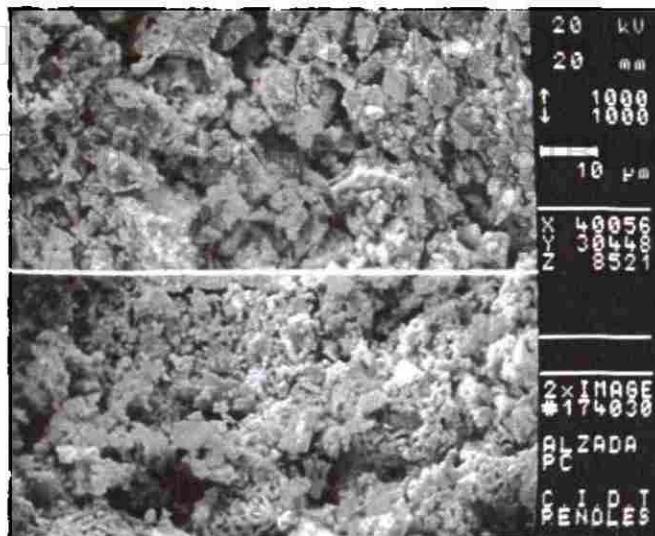


Fotografía 7 Corte transversal de capa con refractario (6x)

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.

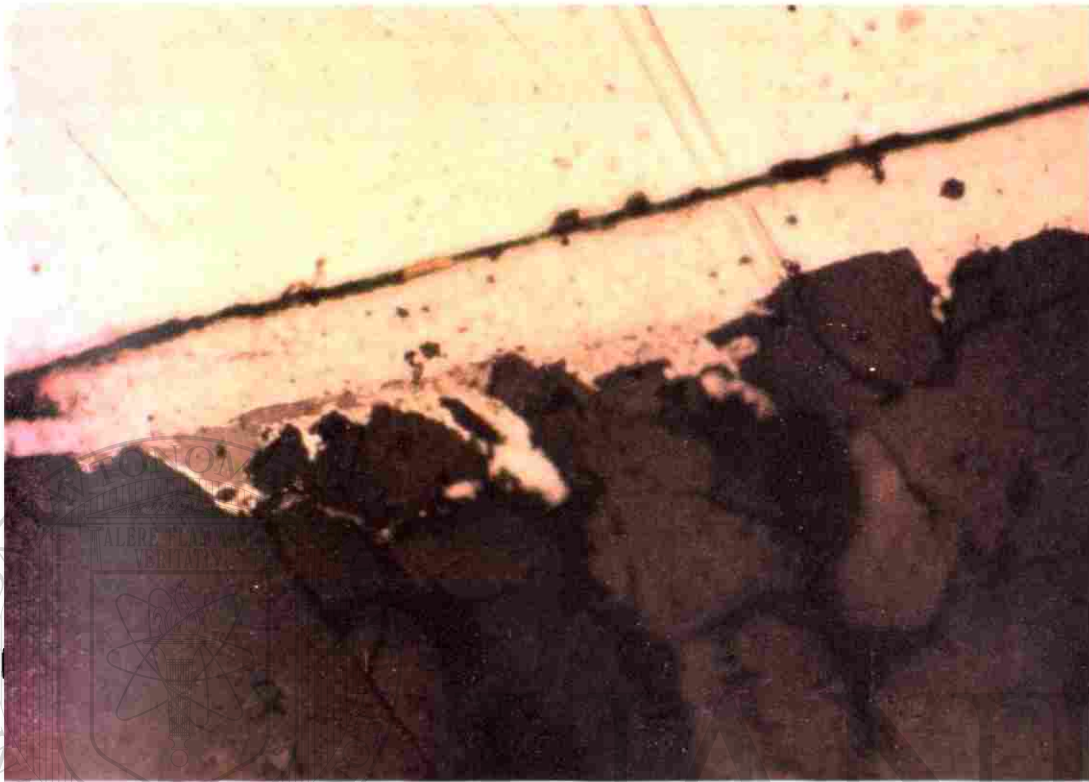


Fotografía 8. Aspecto de la superficie de una capa (1000x).



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).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

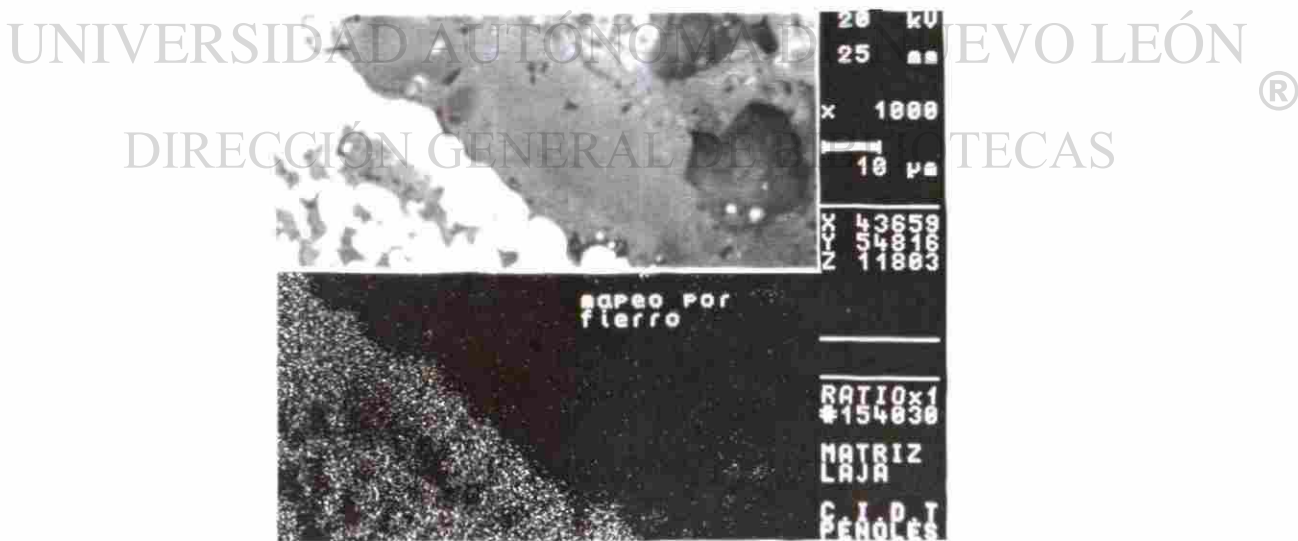


Fotografía 11 Aspecto de interfase en capa industrial (400x).

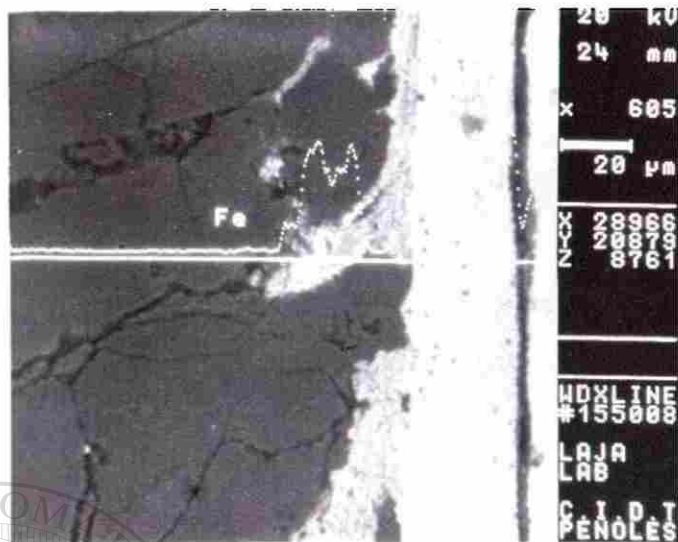
Las Fotografías 12 y 13 muestran los mapeos de hierro en muestras de capa adheridas al refractario a escala industrial y laboratorio respectivamente. Se puede observar que el hierro no se difunde dentro de la matriz del refractario, ésto es que el anclaje primario es mecánico. No obstante en las muestras 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.



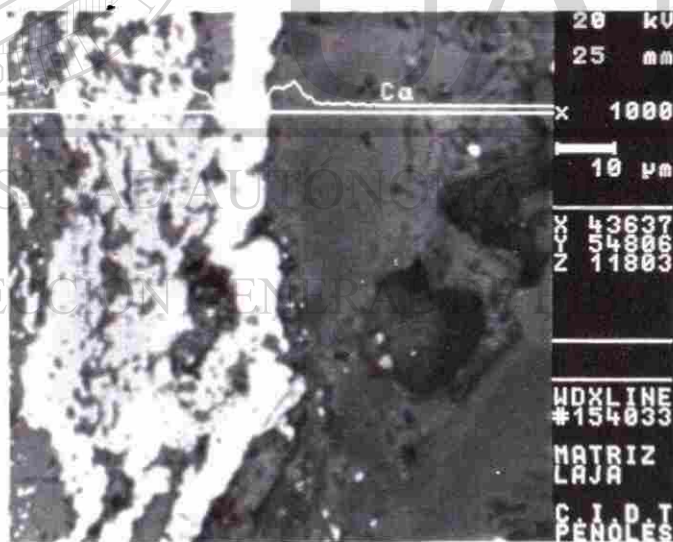
Fotografía 12a. Mapeo puntual de hierro en capa industrial.



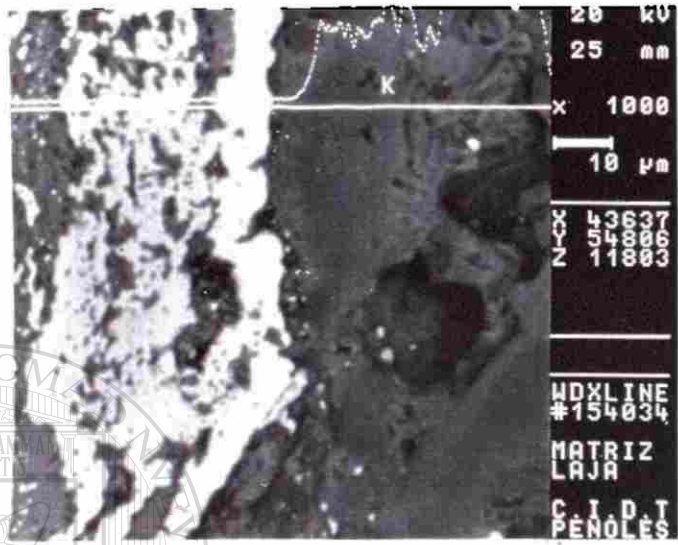
Fotografía 12b. Mapeo de hierro en área de capa industrial.



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



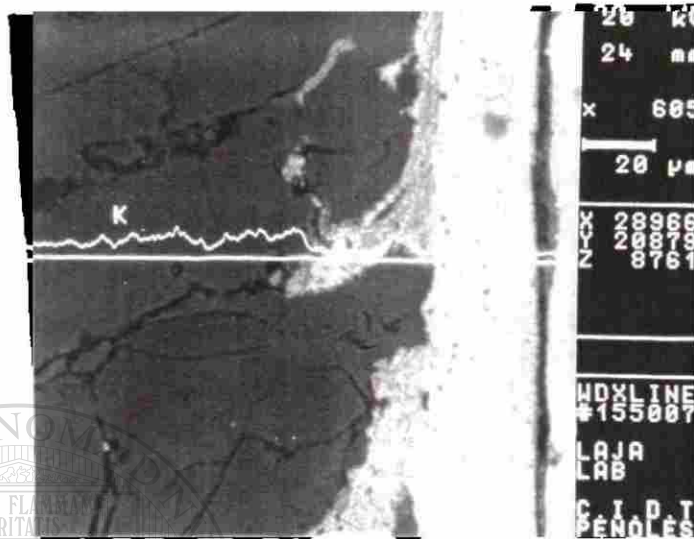
Fotografía 14. Mapeo de calcio en capa industrial.



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 hierro 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.

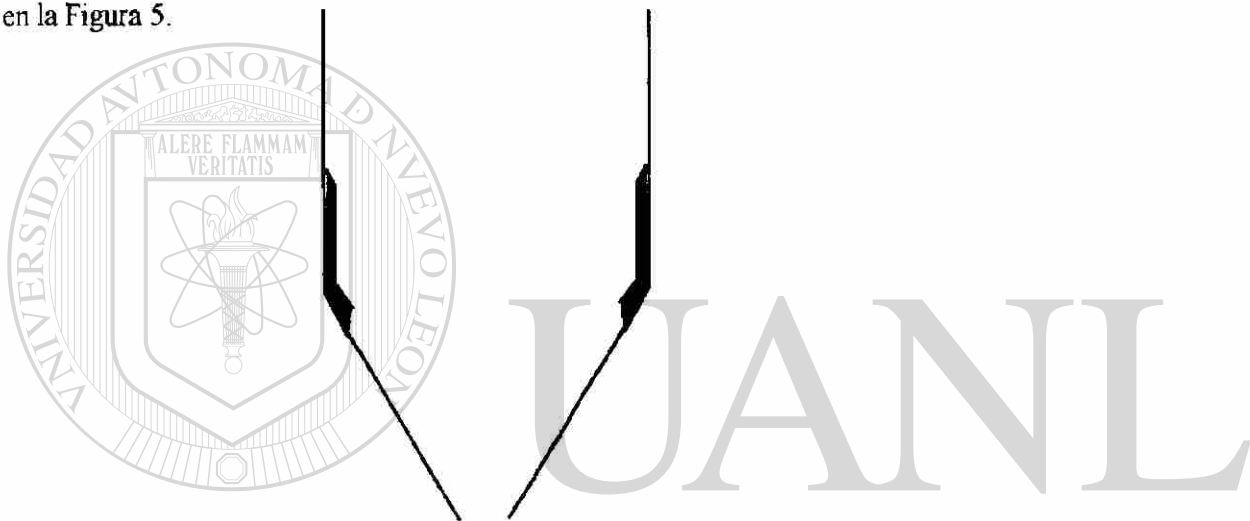


Figura 3. Esquema encontrado en la literatura que describe el problema de formación de capas.

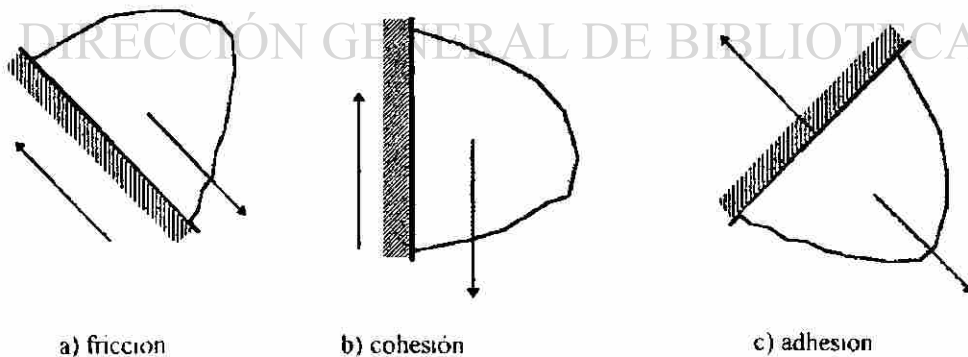


Figura 4. Conceptos de fricción, cohesión, y adhesión que muestra la literatura (2) de flujo de sólidos.

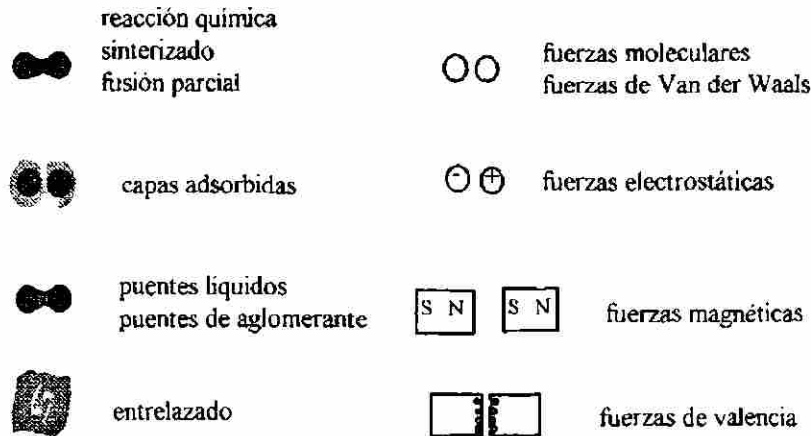


Figura 5. Clasificación de los mecanismos de adhesión propuesta por Rumpf

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 Å. 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 o 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, esto 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 de 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 de 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 posibilitó 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).



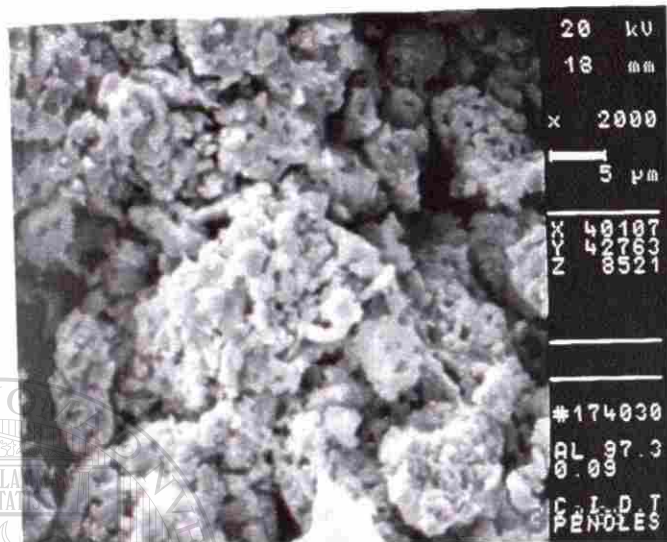
Figura 6. Modelos de rugosidad de pared.

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

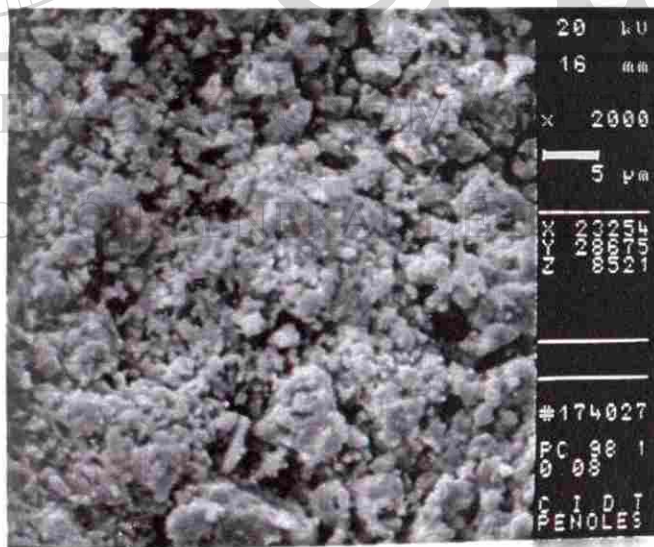


Figura 7. Modelos de rugosidad de partículas.

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

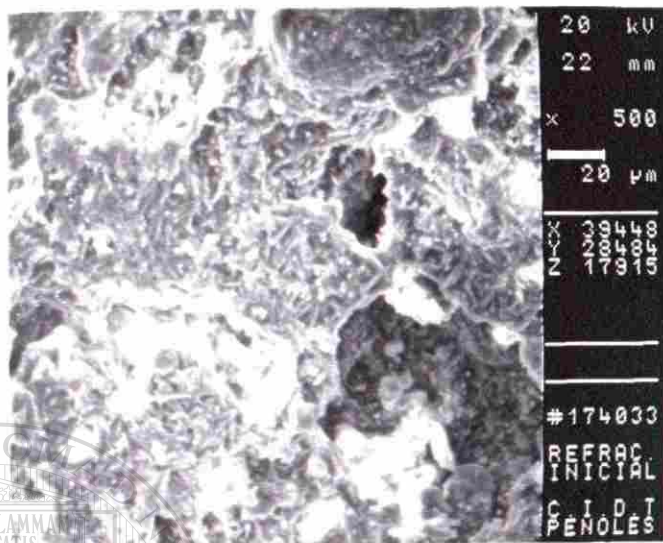


Fotografía 18. Superficie de pellets de Alzada a 2000 x.

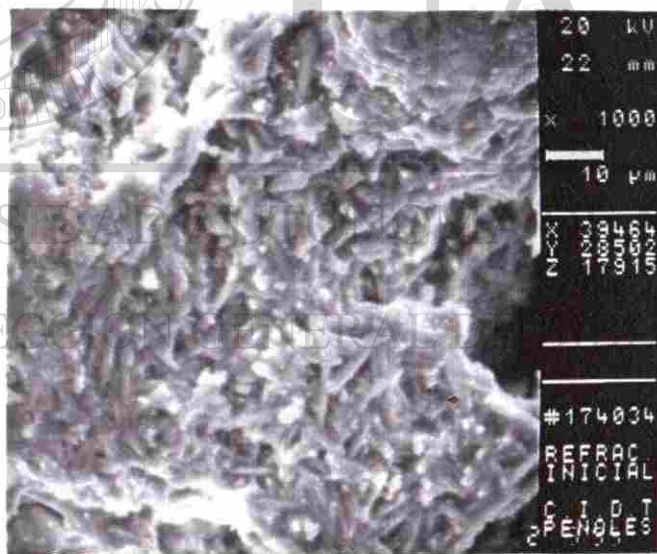


Fotografía 19. Superficie de pellets de Peña Colorada a 2000x.

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 y 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 aun 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 tocan 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.

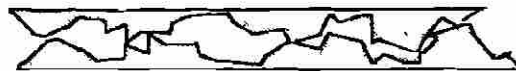


Figura 8. Modelo de contacto inicial entre dos superficies.

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	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
Tridinita	SiO ₂	1710	7	2.65
Hierro	Fe	1535	4-5	7.85

* a esta temperatura se transforma en Mulita

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

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	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
Tridinita	SiO ₂	1710	7	2.65
Hierro	Fe	1535	4-5	7.85

* a esta temperatura se transforma en Mulita

4. CARACTERIZACIÓN 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)

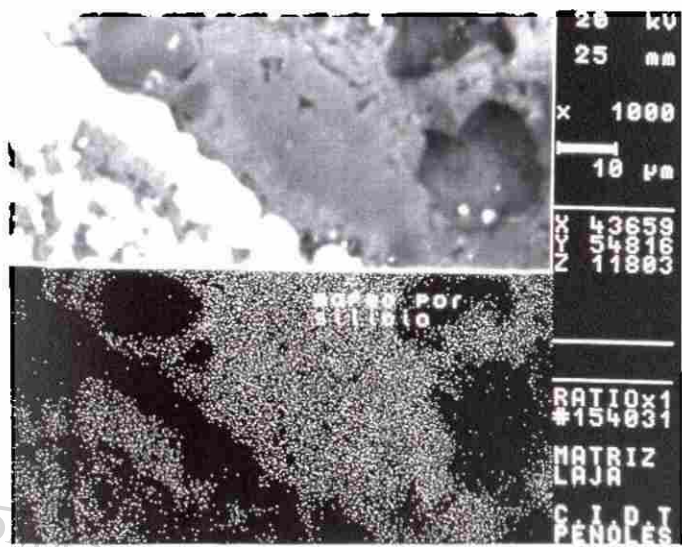
Porosidad aparente	%	11.0 - 15.0
Densidad	gr/cm ³	2.26 - 2.36
Análisis Químico		
SiO ₂	%	51.0 - 55.0
Al ₂ O ₃	%	42.0 - 45.0
Fe ₂ O ₃	%	1.5 - 2.5
CaO	%	0.2 - 0.8
MgO	%	0.0 - 0.5
TiO ₂	%	1.2 - 2.2
Na ₂ O + K ₂ O	%	0.5 - 1.0

Tabla 5. Analisis del ladrillo en HYL

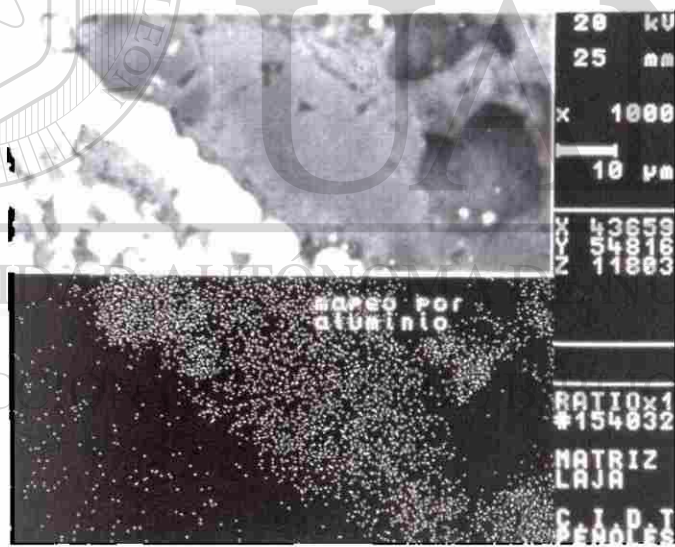
Identificacion	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Fe total	0.510	0.310	0.210
Fe ₂ O ₃	0.729	0.443	0.300
C	0.040	0.020	0.020
S	0.002	0.001	0.002
P	0.058	0.056	0.088
SiO ₂	53.300	52.280	53.240
Al ₂ O ₃	42.640	43.950	43.040
MgO	0.180	0.184	0.198
MnO	0.038	0.036	0.040
CaO	0.230	0.246	0.280
NiO	0.000	0.002	0.014
Cr ₂ O ₃	0.040	0.040	0.048
PbO	0.000	0.000	0.000
ZnO	0.000	0.000	0.000
TiO ₂	1.980	1.960	2.170
V ₂ O ₅	0.026	0.026	0.026
CuO	0.072	0.020	0.036
Na ₂ O	0.046	0.117	0.064
K ₂ O	0.143	0.324	0.190
CdO	0.018	0.018	0.044

MICROANALISIS QUIMICO

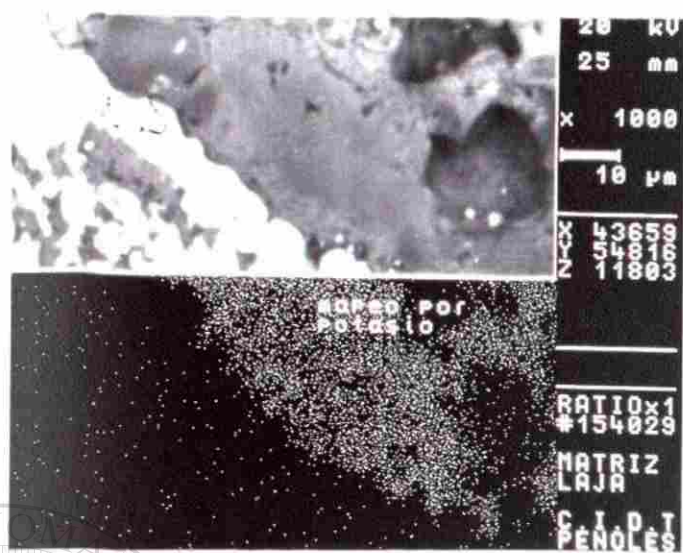
Las fotografías de la 22 a la 25, y la Figura 9, muestran los mapeos, mediante el microscopio electrónico, de los principales elementos químicos que forman el ladrillo. Se observa que hay concordancia entre el análisis micro y el macro, excepto en la zona de la interfase del ladrillo ya que en esta hay una disminución del potasio que es sustituido por el calcio.



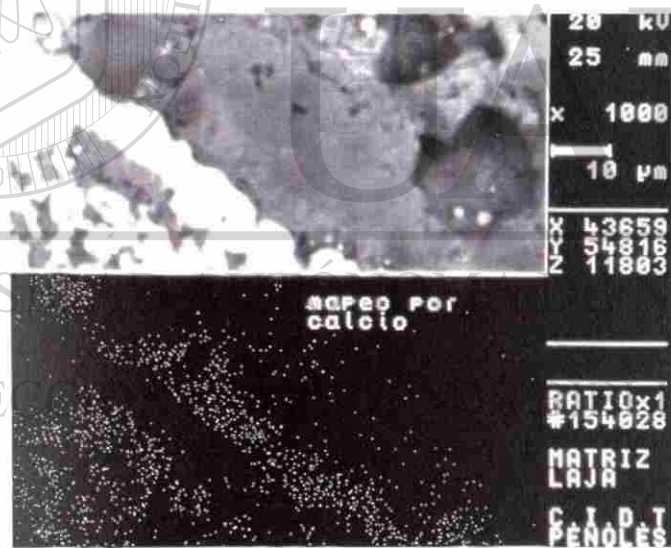
Fotografía 22. Mapeo de silicio en capa industrial.



Fotografía 23. Mapeo de aluminio en capa industrial.



Fotografía 24. Mapeo de Potasio en capa industrial.



Fotografía 25. Mapeo de calcio en capa industrial.

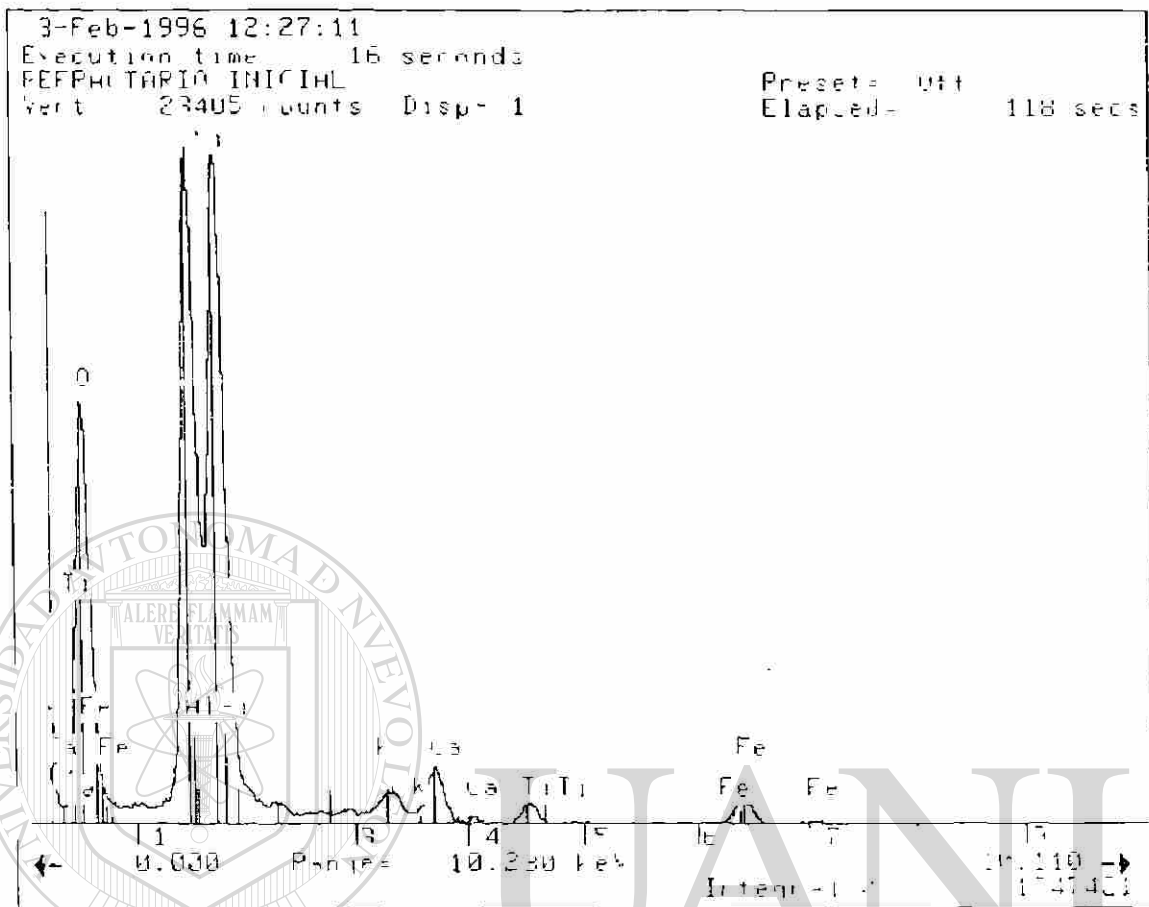


Figura 9 Analisis de superficie de ladrillo por espectroscopia de rayos x (EDX)

CARACTERIZACION DEL HIERRO ESPONJA

La Tabla 6 muestra los valores de porosidad medidos a 5 muestras de pelets

Tabla 6 Porosidad del hierro esponja

Muestra	Porosidad
Número	%
1	58.04
2	61.22
3	61.68
4	60.26
5	58.61

La Tabla 7 muestra un análisis químico típico del hierro esponja.

Tabla 7. Análisis químico típico del hierro esponja.

ESPECIE	% I-N PL:SO
Fe tot	89.27
Fe met.	83.92
Met.	94.01
FeO	6.66
C	2.23
S	0.012
P	0.024
SiO ₂	2.16
MgO	0.54
CaO	2.21
Al ₂ O ₃	0.74
Otros	1.50

En base a lo encontrado en la literatura, las propiedades mostradas en las tablas de la 3 a la 7, las figuras de la 6 a la 9, y las Fotografías 18 a 21 se explica que la falla a corte ocurra en el hierro esponja. Por lo tanto, parte de las partículas que entran a los poros del refractario son las que se generan por la interacción de las duras superficies del refractario con la superficie menos dura y mucho más porosa del hierro esponja.

Con estas observaciones, con lo investigado en la literatura y algunos cálculos se empezaron a formular y analizar hipótesis con respecto al mecanismo de anclaje y crecimiento. Las siguientes secciones tratan en detalle el desarrollo de la investigación.

5. BALANCE DE FUERZAS Y CALCULO DEL ESFUERZO NORMAL A LA PARED DEL REACTOR

Antes de diseñar el equipo y los procedimientos para simular la formación de las capas fue necesario calcular los perfiles de esfuerzos normales y cortantes a la pared del reactor. Un ejemplo de esos cálculos se encuentra en el Apéndice 12.2. Se puede observar que el máximo esfuerzo normal a la pared del reactor 3M5 en su zona cónica es de aproximadamente 2.8 Kg/cm². Tomando en cuenta lo calculado para varios valores de los parámetros se decidió considerar como representativo del máximo esfuerzo normal un valor de 3.1 Kg/cm² para el reactor industrial y 0.1 Kg/cm² para el reactor piloto.

Ya con los esfuerzos calculados se diseñó equipo para intentar formar una capa en el laboratorio.

6. EXPERIMENTACION

6.1 CELDA DE CORTE CON MOVIMIENTO RECTILINEO HORIZONTAL

Antes de hacer un diseño de experimentos más completo, se decidió probar la hipótesis de la importancia del esfuerzo cortante. La primera celda que se usó se muestra en la Figura 10 y en la Fotografía 26.

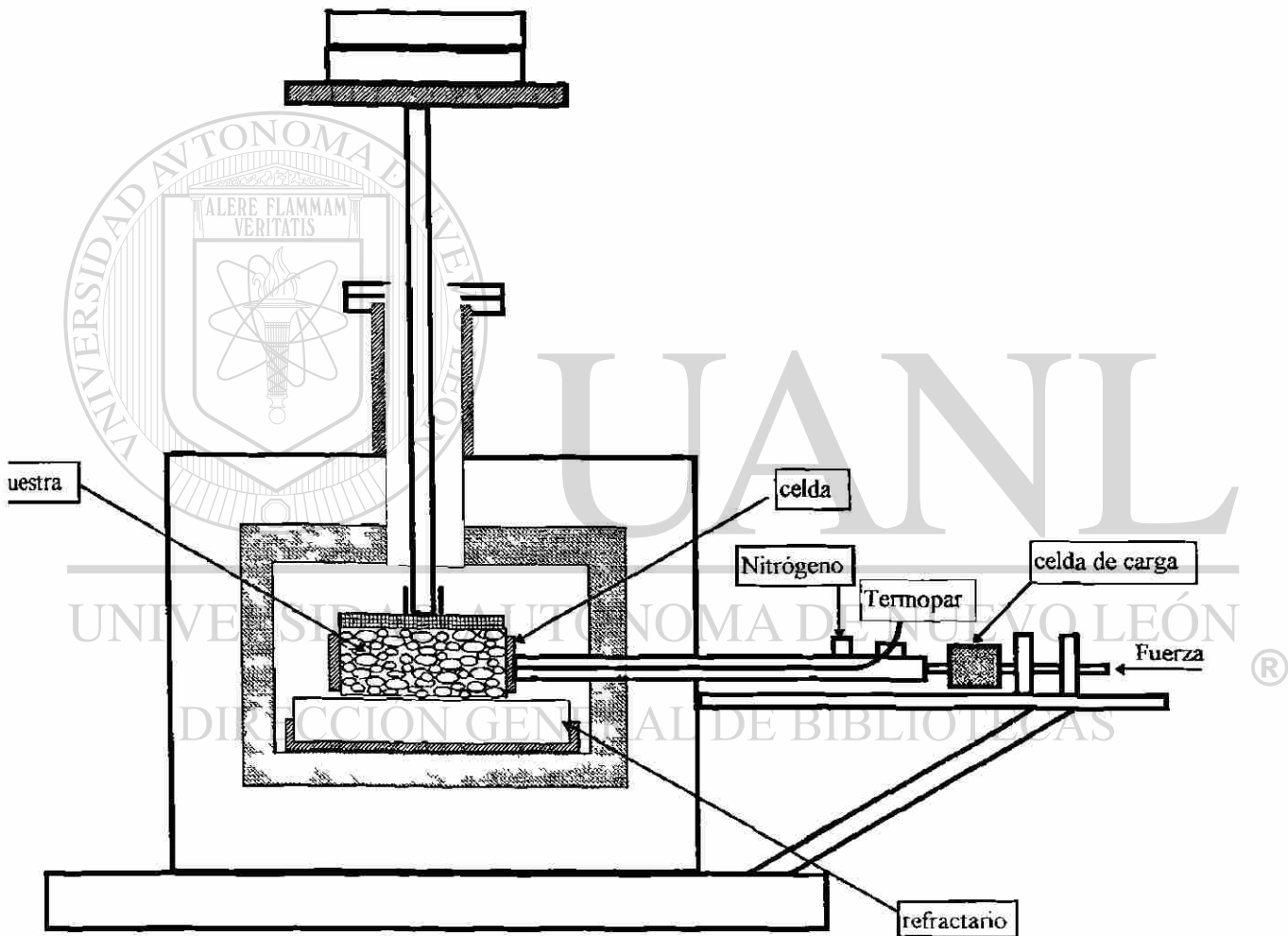


Figura 10. Esquema de celda con movimiento rectilíneo horizontal.



Fotografía 26. Celda con movimiento rectilíneo horizontal.

Esta celda permitía una operación de máximo 5 ciclos antes de que se perdiera la muestra por el levantamiento del anillo que la contiene y empuja. La Fotografía 27 muestra la operación en caliente y el levantamiento del anillo que obliga a detener la prueba. Este tipo de arreglo es útil para medir coeficientes de fricción pero no es adecuado para operar suficientes ciclos como se requiere para formar una capa.



Fotografía 27 Levantamiento del anillo

6.2 CELDA DE CORTE ROTACIONAL

Para lograr tiempos de operación más largos se cambió el diseño a una celda rotacional. Para evitar el derrame de la muestra conforme se aplica esfuerzo normal y movimiento, se invirtió la posición del refractario a la parte superior y la muestra a la parte inferior, siendo esta empujada hacia arriba conforme se consumía. La Figura 11 y la Fotografía 28 muestran el arreglo de la celda rotacional.

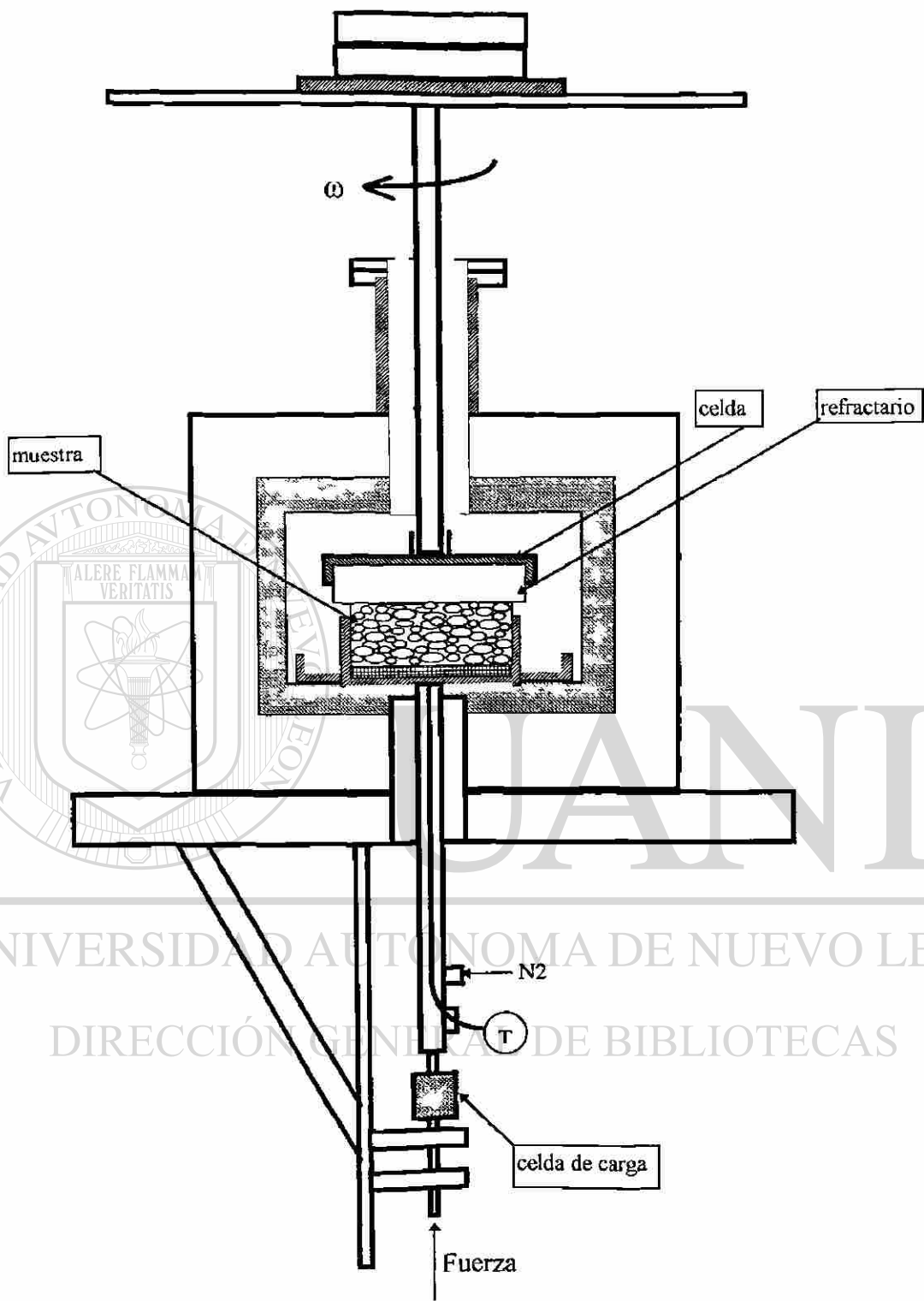
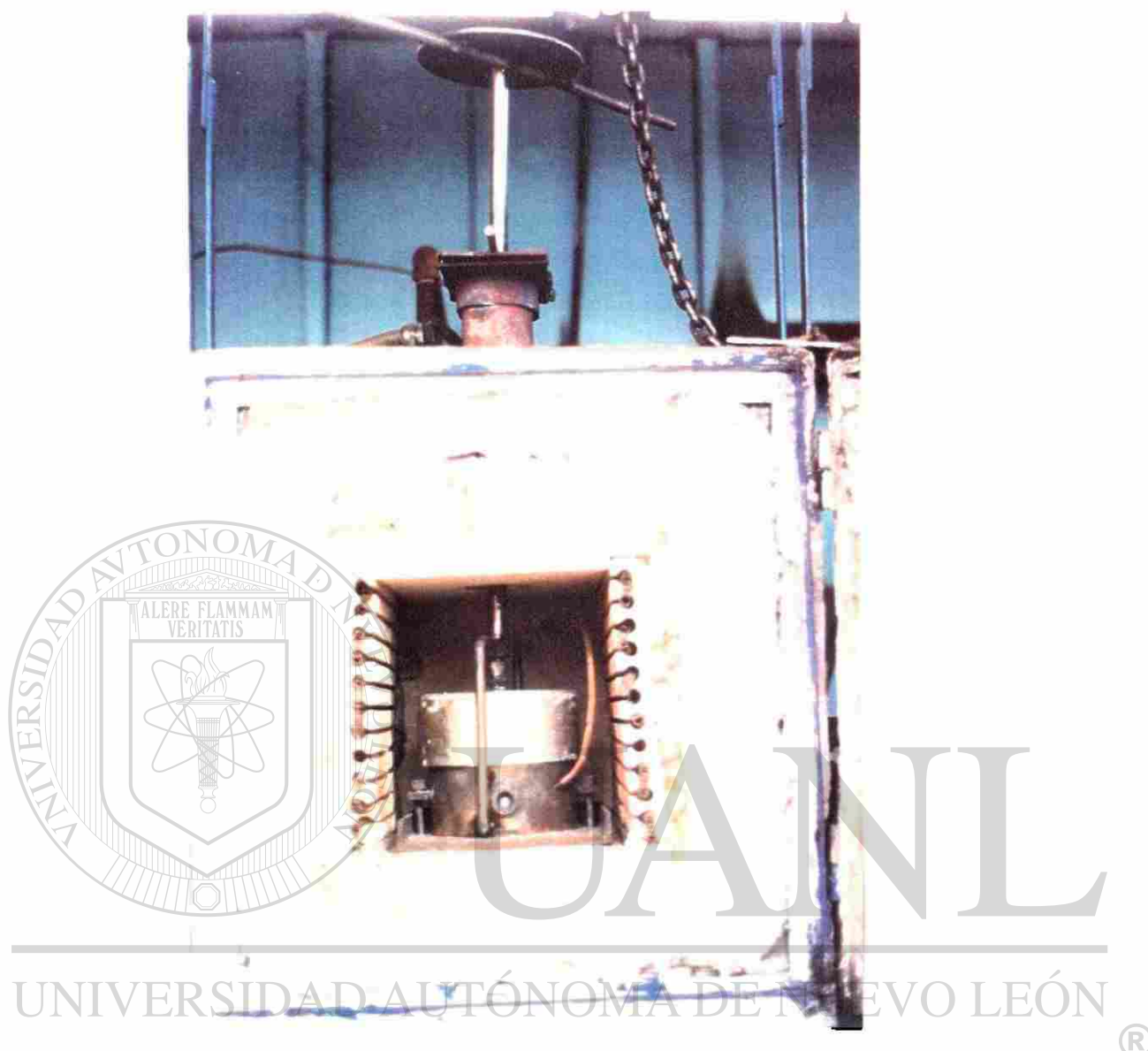


Figura 11. Celda rotacional.



Fotografía 28. Celda rotacional

El procedimiento utilizado es el siguiente

Se corta el ladrillo refractario y se monta en el anillo superior de la celda como se muestra en la Fotografía 29. Se prepara la muestra de hierro esponja con una granulometría $1 - 9.5 \text{ mm} - 15.9 \text{ mm}$ y se llena el anillo inferior de la celda como se muestra en la Fotografía 30. Se coloca y se fija la celda dentro de la mufla. Se coloca el termopar en contacto con el hierro esponja. Se empuja el hierro esponja hacia arriba para asegurar el contacto con el refractario y evitar el contacto con el anillo metálico. Se cierra y se purga el horno con flujo de N_2 , 20 lts/min. Se enciende la mufla pasando N_2 , y controlando la temperatura hasta estabilizarla en $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Se coloca el peso encima del plato para consolidar la muestra a 0.4 kg/cm^2 .

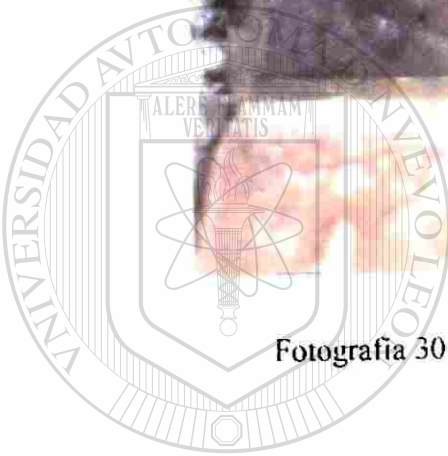
Se hace girar el anillo superior para transmitir esfuerzo cortante a la interfase pelet-refractario, controlando la velocidad tangencial entre 3 y 5 cm/min que es aproximadamente la velocidad del material en el reactor. Se verifica la separación entre los anillos continuamente. En caso necesario, se empuja la muestra hacia arriba y se continúa la rotación hasta terminar la muestra o acumular 10 horas de operación. Se quita la consolidación (esfuerzo normal), se apaga la mufla, y se deja enfriar con flujo de N₂. Se corta el flujo de N₂, se abre la mufla, y se saca la celda. Se toman las fotografías para verificar el estado final del refractario.



Fotografía 29 Ladrillo listo para probarse.



Fotografía 30 Fierro esponja en anillo inferior



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

Las Fotografía 31 muestra la comparación entre los trozos de la capa real y la capa simulada La Fotografía 32 muestra el refractario con el fierro esponja pegado

De esta forma se confirmó nuestra hipótesis el esfuerzo cortante es una variable importante en el proceso de generación de capas. Ya con este resultado se procedió a hacer un diseño de experimentos más elaborado para estudiar el mecanismo de fijación



Fotografía 31 Comparacion de capa real vs simulada.



Fotografía 32 Refractario con fierro esponja adherido

6.3 EXPERIMENTACION PARA ESTUDIAR MECANISMO DE ADHESION

Debido a la cantidad de recursos requeridos para operar el equipo a escala banco se decidió diseñar un microreactor para la simulacion de capas tomando en cuenta más variables. La Figura 12 muestra un esquema del mismo. Las Fotografías 33 y 34 muestran el microreactor en operación. La Fotografía 35 muestra una panorámica donde se ve el microreactor, los rotámetros y el controlador de temperatura.

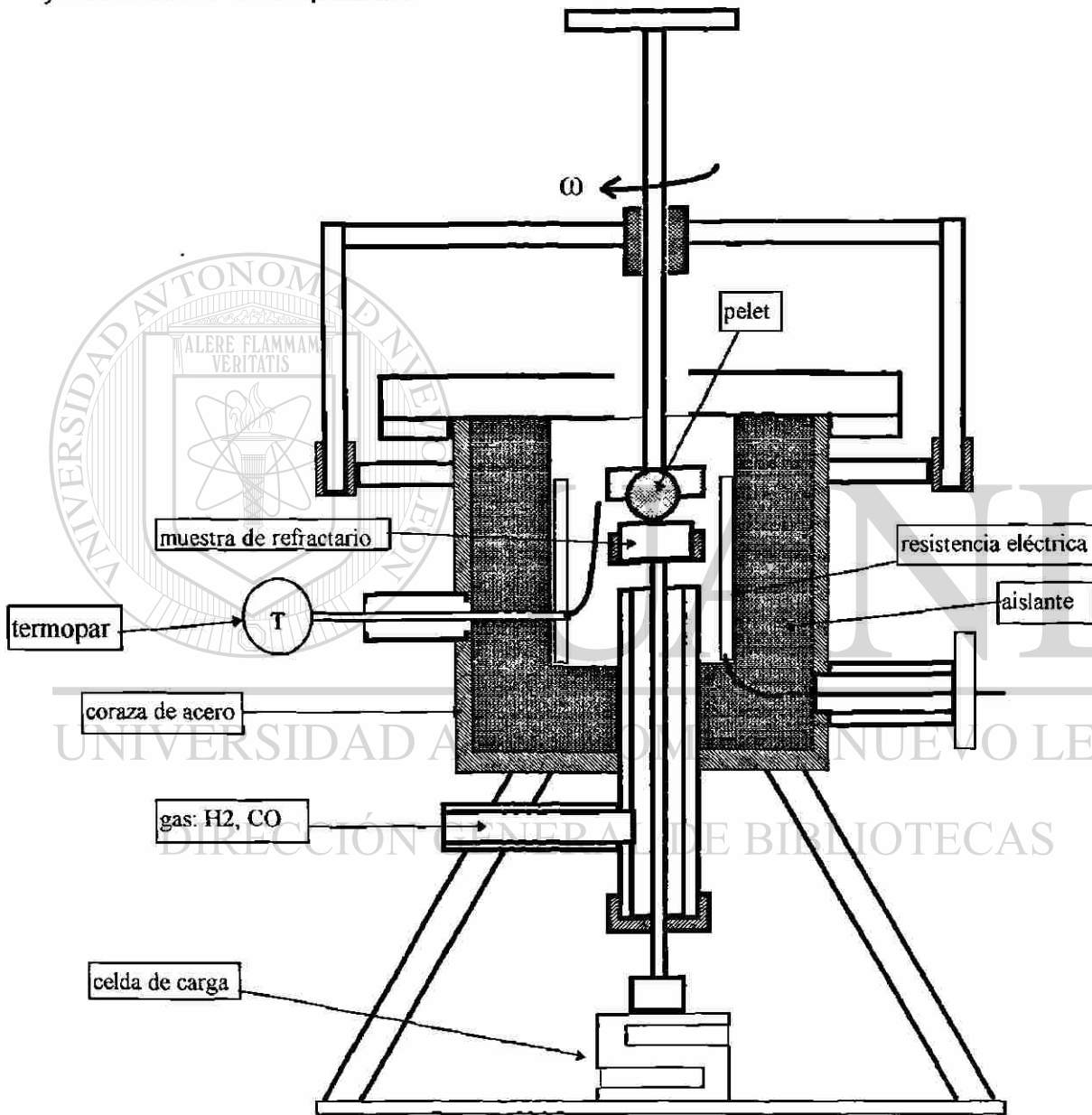
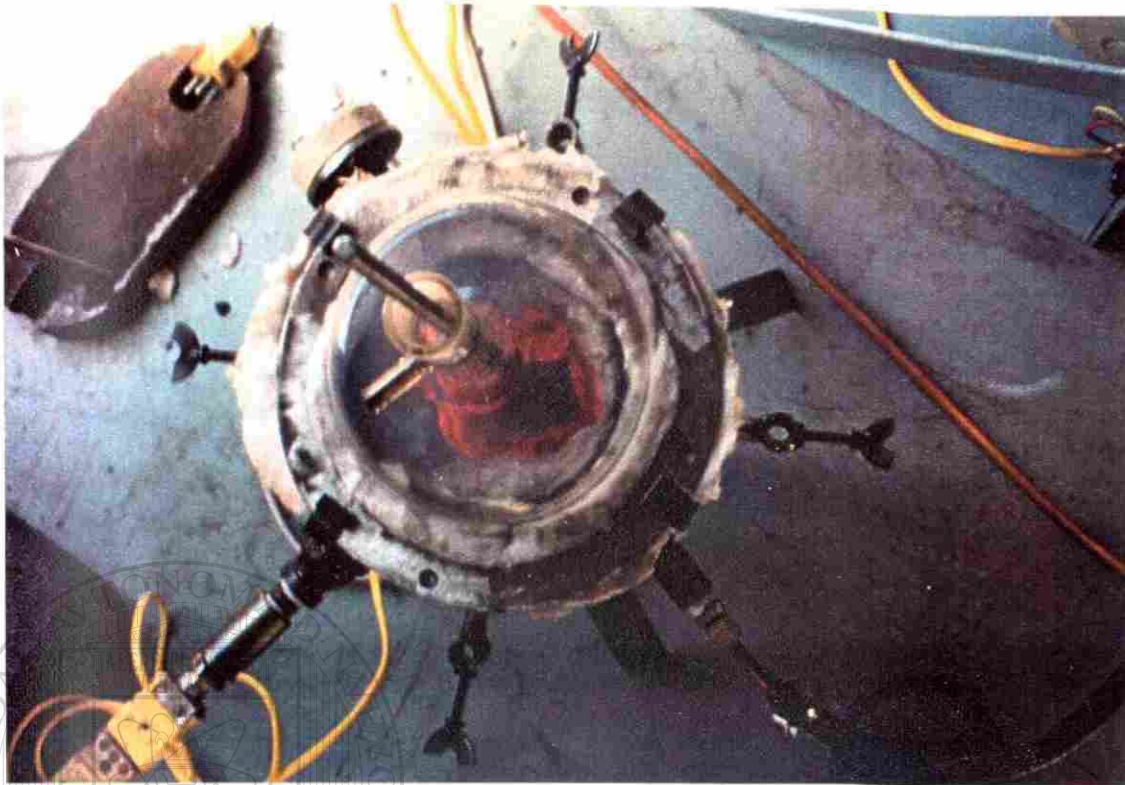
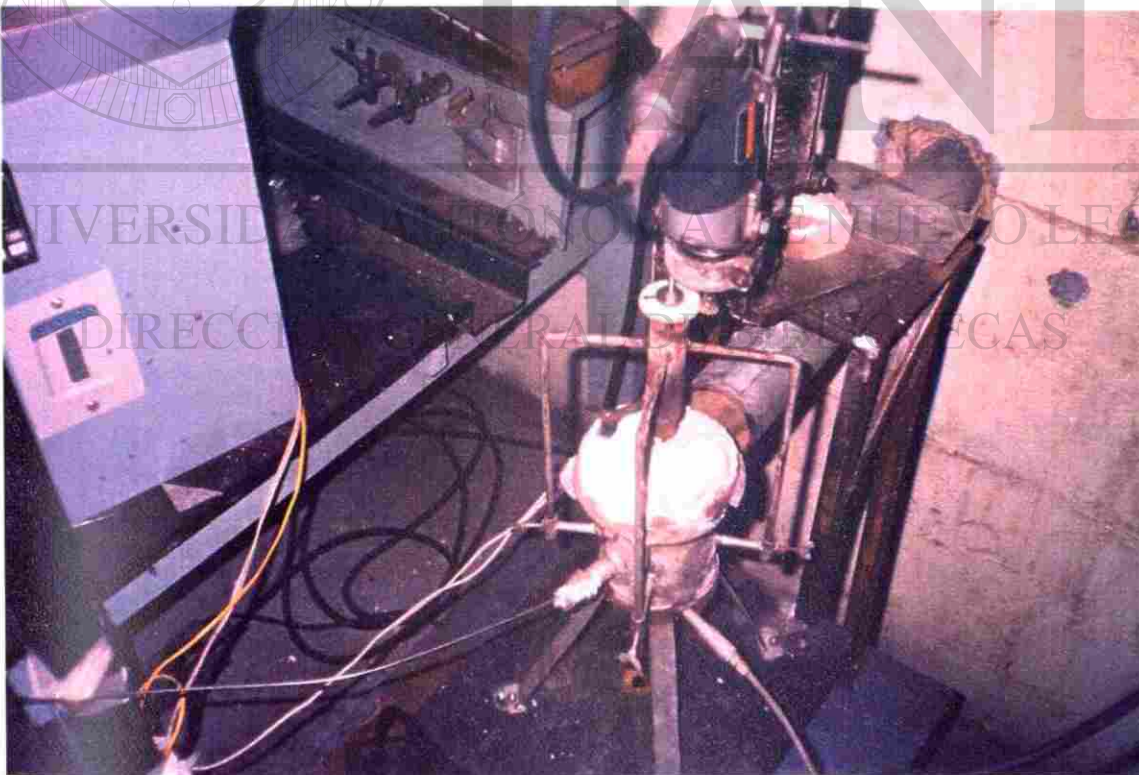


Figura 12. Esquema de microreactor.

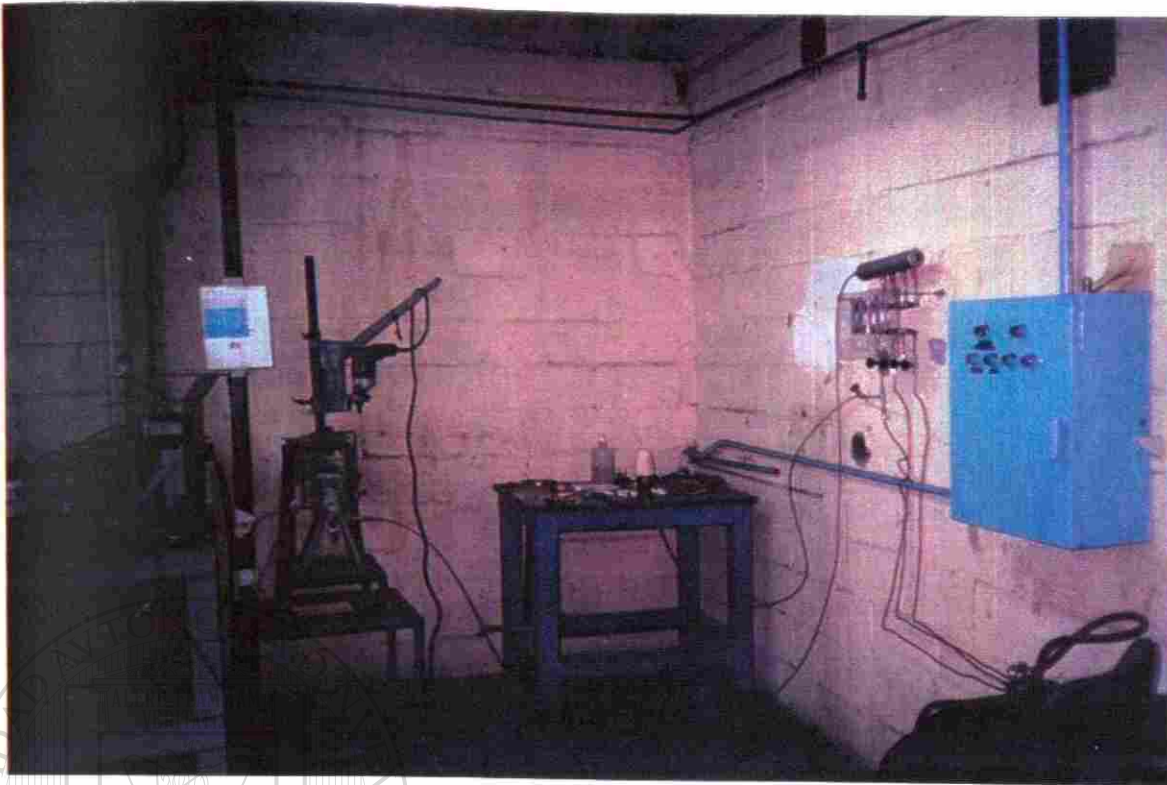


Fotografía 33. Microreactor.



Fotografía 34 Microreactor en operación

1020112511



Fotografía 35 Panorámica del laboratorio.

6.3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Cuando se estudia un fenómeno complejo, como es identificar el mecanismo de la formación de capas, inicialmente se considera que muchas variables pueden tener efecto en la variable dependiente o respuesta. En estos casos se recomienda usar los diseños fraccionados. Estos reducen el tiempo y costo de la experimentación. En estos diseños se reduce el número de corridas experimentales en base a agrupar algunas de las variables principales con las interacciones. En seguida se usa el análisis de varianza para identificar cuales grupos son los importantes. En seguida se aplica el conocimiento fisicoquímico del sistema para sugerir cuales de las variables o interacciones de cada grupo son las realmente importantes. Obviamente es recomendable confirmar estas conclusiones con otros experimentos. Esta confirmación se hará con la obtención del tratamiento para evitar la formación de capas y en la obtención del modelo cinético de crecimiento de la capa. En el estudio de las capas se consideraron 9 variables en el diseño de experimentos inicial. Algunas que, después de lo observado hasta el momento, son obviamente importantes como lo es el nivel de esfuerzo, otras porque son típicas del proceso y pueden tener una interacción importante o bien se les quiere descartar de una manera objetiva. Las variables consideradas son las siguientes: esfuerzo, temperatura, adición de cemento, tipo de pellet, % de metalización, % de carbono, velocidad, tiempo, y tipo de gas. Después se corrieron

otros diseños para la confirmación de las variables importantes encontradas en esta etapa. La Tabla 8 muestra el diseño seleccionado para estimar cuales de las nueve variables son importantes. La columna con el encabezado Cem indica si se aplicó o no cemento. Met significa la relación de fierro metalico a fierro total en el pelet. A y PC significan que se usaron pelets de dos tipos de minerales diferentes. Alzada y Peña Colorada.

Tabla 8. Diseño de experimentos y resultados

Exp	Gas	Cem	Pelet	Met		Vel	Tiempo	Esfuerzo	Temp	Capas
				%	%					
						RPM	min	Kg/cm ²	C	(gr) 10 ³
1	CO	SI	A	95	3.5	0	1	3.1	950	0.2
2	H2	SI	A	95	0.1	30	1	3.1	950	76.8
3	H2	SI	A	95	3.5	0	30	0.1	600	0.1
4	CO	NO	PC	85	3.5	30	1	3.1	950	14.7
5	CO	SI	A	85	3.5	30	30	0.1	950	0.1
6	CO	NO	PC	95	0.1	30	1	3.1	600	0.3
7	H2	NO	PC	85	3.5	30	30	0.1	600	0.0
8	CO	SI	PC	85	0.1	30	30	3.1	950	29.7
9	H2	NO	A	85	3.5	0	1	0.1	950	0.0
10	H2	NO	PC	95	0.1	30	30	0.1	950	0.6
11	CO	NO	A	95	0.1	0	30	3.1	950	1.9
12	H2	NO	A	85	0.1	30	30	3.1	600	45.7
13	H2	SI	A	85	0.1	0	30	0.1	950	0.2
14	CO	SI	A	85	0.1	0	1	3.1	600	0.0
15	CO	SI	A	95	0.1	30	30	0.1	600	2.1
16	CO	SI	PC	95	3.5	30	30	3.1	600	7.1
17	CO	SI	PC	85	3.5	0	1	0.1	600	0.0
18	CO	NO	A	95	3.5	30	1	0.1	600	0.7
19	H2	SI	PC	95	3.5	30	1	0.1	950	1.8
20	CO	NO	PC	95	3.5	0	30	0.1	950	0.0
21	CO	NO	A	85	0.1	30	1	0.1	950	0.4
22	H2	NO	PC	95	3.5	0	1	3.1	600	0.0
23	H2	SI	PC	95	0.1	0	30	3.1	600	0.0
24	H2	SI	PC	85	0.1	30	1	0.1	600	0.8
25	CO	NO	A	85	3.5	0	30	3.1	600	0.5
26	H2	SI	PC	85	3.5	0	30	3.1	950	0.0
27	H2	NO	PC	85	0.1	0	1	3.1	950	0.3
28	H2	NO	A	95	3.5	30	30	3.1	950	112.3
29	H2	NO	A	95	0.1	0	1	0.1	600	0.0
30	CO	NO	PC	85	0.1	0	30	0.1	600	0.0
31	CO	SI	PC	95	0.1	0	1	0.1	950	0.0
32	H2	SI	A	85	3.5	30	1	3.1	600	3.3

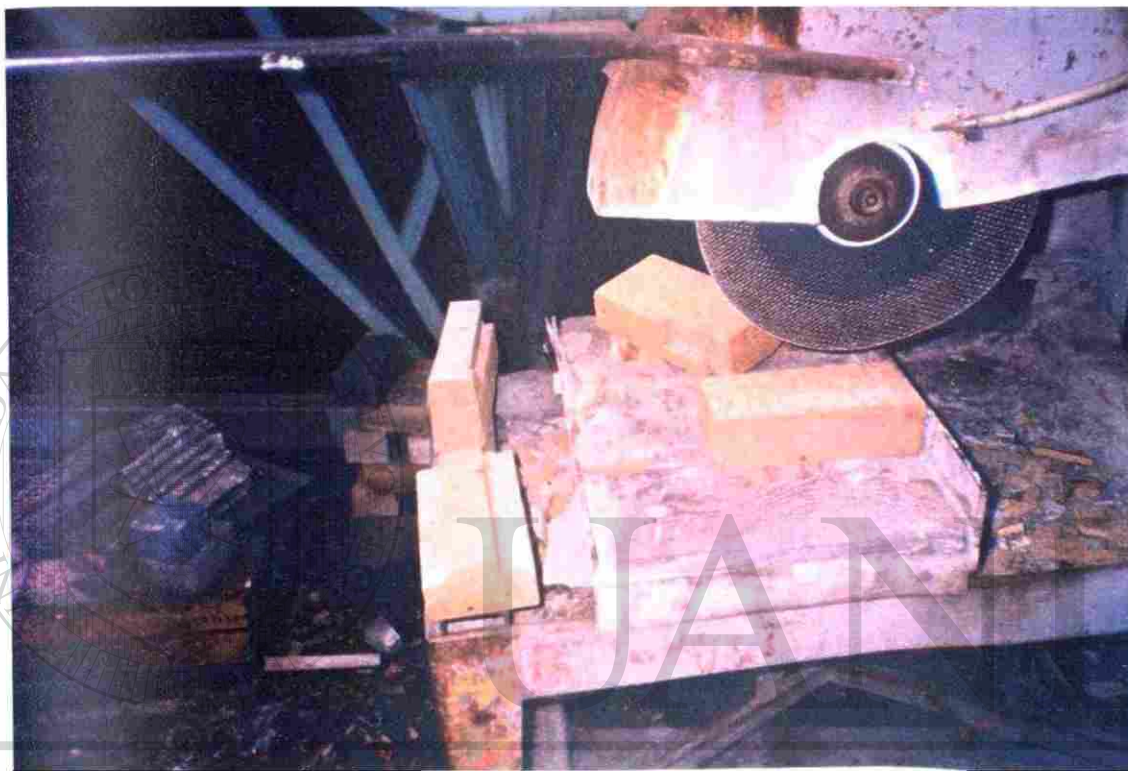
6.3.2 DESCRIPCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo experimental se muestra en la Figura 12 y en las Fotografías 33 y 34. Los principales componentes son los siguientes:

1. Coraza de reactor de acero al carbón,
2. Celda de carga para medir esfuerzo aplicado a la muestra,
3. Porta muestra de refractario,
4. Porta muestra de pelet,
5. Motor y engranes para hacer girar el pelet,
6. Resistencia eléctrica para calentar,
7. Aislante,
8. Termopar,
9. Controlador e indicador de temperatura,
10. Cilindros de gas reductor y nitrógeno,
11. Rotámetros para medir flujo de gas.

6.3.3 EXPERIMENTOS

En seguida se describe el procedimiento experimental llevado a cabo en cada una de las pruebas. Se corta y se seca la muestra de ladrillo. La Fotografía 36 muestra la cortadora de refractario. Se coloca la muestra del ladrillo en el portamuestra. Se pasa flujo de nitrógeno. Se precalienta hasta la temperatura deseada. Se calibra la velocidad angular contando las revoluciones y tomando el tiempo con un cronómetro. Se fija el pelet en el portapelet usando cemento refractario. Se aplica cemento al pelet en una suspensión de 15 partes de cemento gris por 100 partes de agua en peso. Se cambia el flujo de nitrógeno por gas reductor. Se coloca el pelet dentro del reactor y se esperan dos minutos para que la superficie se caliente. Se pone el pelet en contacto con el refractario y se aplica el esfuerzo normal. Se hace girar el pelet sobre la muestra de refractario para aplicar el esfuerzo cortante. Se mantienen las condiciones de operación durante el tiempo deseado. Se detiene la rotación. Se quita el esfuerzo normal. Se sustituye el gas reductor por nitrógeno. Se saca el pelet y la muestra de refractario. Se enfría la muestra en atmósfera de nitrógeno. Se saca la muestra de refractario del enfriador cuando la temperatura sea menor de 70 C. Se desprende la capa y se tritura para separar el fierro magnéticamente. Se pesa la capa en la balanza analítica.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Fotografía 36 Cortadora de muestras de ladrillo refractario
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

6.3.4 RESULTADOS

La Fotografía 37 muestra refractario con el hierro esponja adherido. La Fotografía 38 muestra el hierro esponja separado con el iman después de triturar la muestra listo para pesarse en la balanza analítica.



Fotografía 37 Muestra de ladrillo con capa



Fotografía 38 Hierro e pomice separado del refractario

La Tabla 9 muestra los resultados del análisis de varianza. La nomenclatura de esta tabla es la siguiente: A representa la variable tipo de gas (H₂ ó CO), B representa la variable de aplicación de cemento (sí ó no), C representa la variable tipo de pelet (Alzada ó Peña Colorada), D representa la variable nivel de metalización del pelet (85 ó 95%), E representa la variable porcentaje 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 aplicado (0.1 ó 3.1 Kg/cm²), I representa la temperatura (600 ó 950°C). En la literatura (14) se encuentran detalles de los significados y la forma de calcular los conceptos siguientes usados en el análisis de varianza: S de C significa suma de cuadrados. G de L significa grados de libertad. CM significa cuadrados medios. *F* significa el valor del estadístico *F* usado en análisis de varianza. P es la probabilidad de equivocarse al aceptar que la variable o interacción es 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 la que es más consistente con las experiencias a nivel planta piloto e industrial así como los resultados 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.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 9 Analisis de varianza

VARIABLE	S de C	G de I	CM	F	P
CFH	1060.3	1	1060.3	5019.2	0.009
CGH	95.2	1	95.2	450.8	0.030
C	1116.3	1	1116.3	5284.2	0.009
D, CHI	365.9	1	365.9	1731.8	0.015
L	10.1	1	10.1	47.9	0.090
F	2686.4	1	2686.4	12716.9	0.006
G	318.8	1	318.8	1509.0	0.016
H	2556.1	1	2556.1	12100.0	0.006
I	994.6	1	994.6	4708.1	0.009
FG	291.6	1	291.6	1380.4	0.017
FH	2464.0	1	2464.0	11664.0	0.006
FI	950.5	1	950.5	4499.3	0.009
AE	0.6	1	0.6	2.6	0.348
CH	1106.9	1	1106.9	5239.5	0.009
CFGH	80.6	1	80.6	381.8	0.032
CF	1055.7	1	1055.7	4997.4	0.009
CFHI	349.8	1	349.8	1655.9	0.015
GH	326.4	1	326.4	1545.1	0.016
BD	0.0	1	0.0	0.0	0.952
FHI	968.0	1	968.0	4582.3	0.009
CG	120.1	1	120.1	568.6	0.026
DG	4.8	1	4.8	22.8	0.130
HI	1008.0	1	1008.0	4771.6	0.009
CE	0.1	1	0.1	0.5	0.620
CI	316.3	1	316.3	1497.1	0.016
FGH	306.3	1	306.3	1449.9	0.016
CGI	6.8	1	6.8	32.4	0.109
CFI	298.9	1	298.9	1414.9	0.017
DFG	7.2	1	7.2	34.2	0.106
CFG	99.4	1	99.4	470.6	0.029
Error Total	0.2	1	0.2		

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, temperatura y tiempo.

6.4 PRUEBA DE TRATAMIENTOS PARA EVITAR ANCLAJE

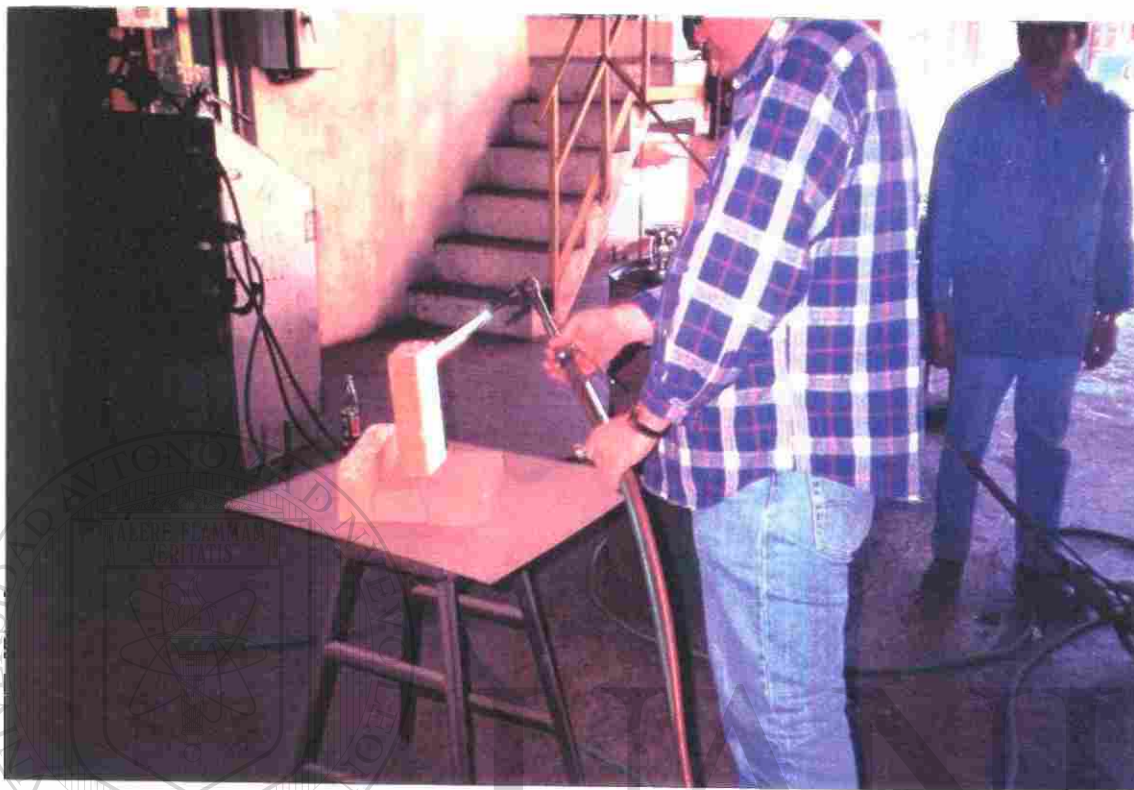
6.4.1 PLANTEAMIENTO DE HIPOTESIS

Una manera de confirmar que la variable más importante es el esfuerzo cortante, es proponer un tratamiento basado en la disminución del mismo y que se note el efecto en la masa depositada sobre la muestra de ladrillo. Basado en lo encontrado en la sección de mecanismo se pensó la manera de disminuir el esfuerzo cortante entre pelet y refractario. 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. Sin embargo no era fácil lograr este acabado con suficiente estabilidad a las condiciones de operación de los reactores. Los azulejos comerciales no tienen tal resistencia. Se probaron ladrillos tratados por proveedores de refractarios con tratamientos en la superficie con temperaturas de fusión de hasta 1300 °C sin tener resultados adecuados. Se sabe que existen otras piezas que podrían dar el servicio, sin embargo, se busca resolver el problema con el mínimo costo y también enfocando el resultado a otras aplicaciones claves para mejorar la tecnología de reducción directa, se ensayó la manera de evitar el anclaje de las capas en los ladrillos conservando el mismo tipo de ladrillo. Aunque se probaron y se conocen otros tipos de ladrillos refractarios con una superficie mucho más tersa que el silico-aluminoso, como pueden ser los de alta alúmina, la instalación de este tipo de ladrillos implica hacer reingeniería para ver si es factible su uso en el reactor

6.4.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

TRATAMIENTOS A ESCALA LABORATORIO

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 flama oxidante para fundir los filos y el material dentro de los poros. Para lograr el acabado deseado a escala laboratorio se usó un soplete quemando una mezcla de oxígeno-acetileno para fundir la superficie de las muestras. La literatura (19) reporta una temperatura máxima de flama, de acetileno con aire seco a 25 °C, de 2586 °C. La Fotografía 39 muestra un ensayo para preparar las muestras. Se decidió usar una gama de los materiales refractarios más comunes. Los análisis químicos se muestran en la Tabla 10.



Fotografía 39. Tratamiento con soplete.

Tabla 10. Analisis químico de polvos usados en los tratamientos.

IDENTIFICACION	ARENA	ALUMINA	CEM BCO.	CAL	LSA	MGO	CEM GRIS
Fe ₂ O ₃	1.40	3.69	0.56	0.27	1.11	0.41	3.64
SiO ₂	95.20	13.52	19.98	0.83	52.44	6.40	19.08
MgO	0.04	3.65	1.21	1.06	0.21	87.16	2.40
CaO	0.08	1.04	65.73	65.21	0.40	1.56	63.66
Al ₂ O ₃	1.62	78.14	5.41	1.16	43.23	1.98	4.95
Na ₂ O	0.23	0.00	0.17	0.04	0.36	0.03	0.63
K ₂ O	1.23	0.00	0.01	0.00	0.07	0.35	0.45
PXC	0.28	0.00	3.42	28.76	0.22	1.45	5.48

LSA – polvo de ladrillo silico-aluminoso.

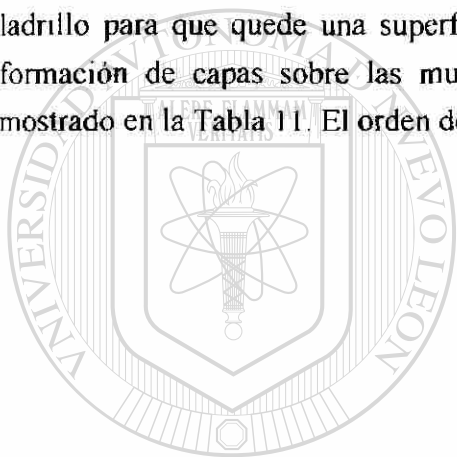
PROCEDIMIENTO

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

Se preparan muestras molidas de los materiales siguientes para ser aplicados a los ladrillos: ladrillo sílico-aluminoso, cal, magnesita, cemento gris, cemento blanco, alúmina, y arena sílica.

Estos materiales son pasados a través de una malla 100. Las muestras de los ladrillos son limpiadas hasta asegurar que no existe contaminación con hierro esponja.

Las muestras de polvo son analizadas en el laboratorio para conocer los porcentajes de: Fe_2O_3 , CaO , MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O . 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 11. El orden de los experimentos fue aleatorio.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 11. Diseño de experimentos para tratamientos.

TRATAMIENTOS								
T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T 9
t ₁₁	t ₂₁	t ₃₁	t ₄₁	t ₅₁	t ₆₁	t ₇₁	t ₈₁	t ₉₁
t ₁₂	t ₂₂	t ₃₂	t ₄₂	t ₅₂	t ₆₂	t ₇₂	t ₈₂	t ₉₂
t ₁₃	t ₂₃	t ₃₃	t ₄₃	t ₅₃	t ₆₃	t ₇₃	t ₈₃	t ₉₃
t ₁₄	t ₂₄	t ₃₄	t ₄₄	t ₅₄	t ₆₄	t ₇₄	t ₈₄	t ₉₄
t ₁₅	t ₂₅	t ₃₅	t ₄₅	t ₅₅	t ₆₅	t ₇₅	t ₈₅	t ₉₅

T1 fundir la superficie del ladrillo sin agregarle aditivo.

T2 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de polvo del mismo ladrillo para tapar los poros.

T3 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de cal para tapar los poros.

T4 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de magnesita para tapar los poros

T5 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de cemento gris para tapar los poros

T6 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de cemento blanco para tapar los poros

T7 ladrillo sin tratamiento que servira de prueba testigo

T8 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de alumina para tapar los poros

T9 fundir la superficie del ladrillo despues de agregarle mortero de arena silica para tapar los poros

Las condiciones de operación serán Temperatura 950 C, Esfuerzo normal 3 l Kg/cm², Velocidad angular para aplicar esfuerzo cortante 30 rpm, Carbon < 0 l^oo. Metalizacion > 95 %o. Mineral Alzada, Tiempo 5 minutos, gas H2, sin aplicacion de cemento En los otros pasos se procedio de acuerdo a como está especificado en el procedimiento de busqueda de mecanismo Estas condiciones fueron seleccionadas por ser las más favorables para la formación de capas segun lo demostraron los resultados de los experimentos en la seccion para encontrar el mecanismo

6.4.3 RESULTADOS

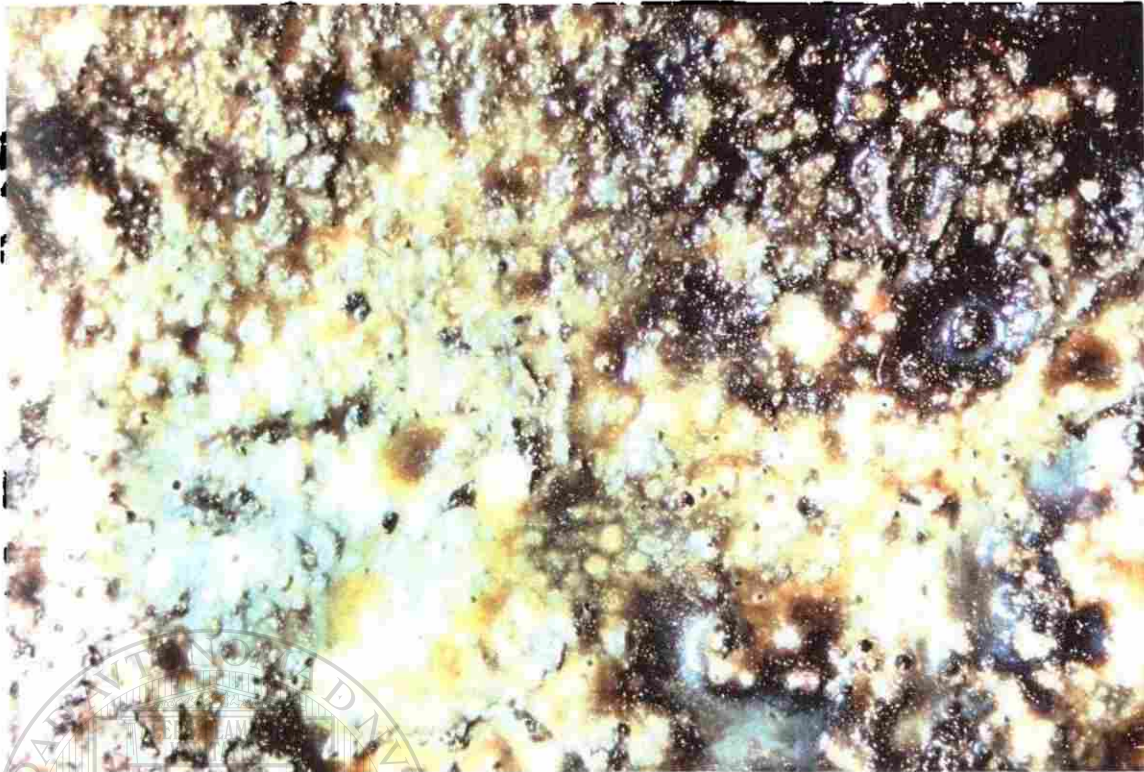
Las Fotografías de la 40 a la 48 muestran como quedaban las muestras despues del tratamiento. Todas estan tomadas a 6x



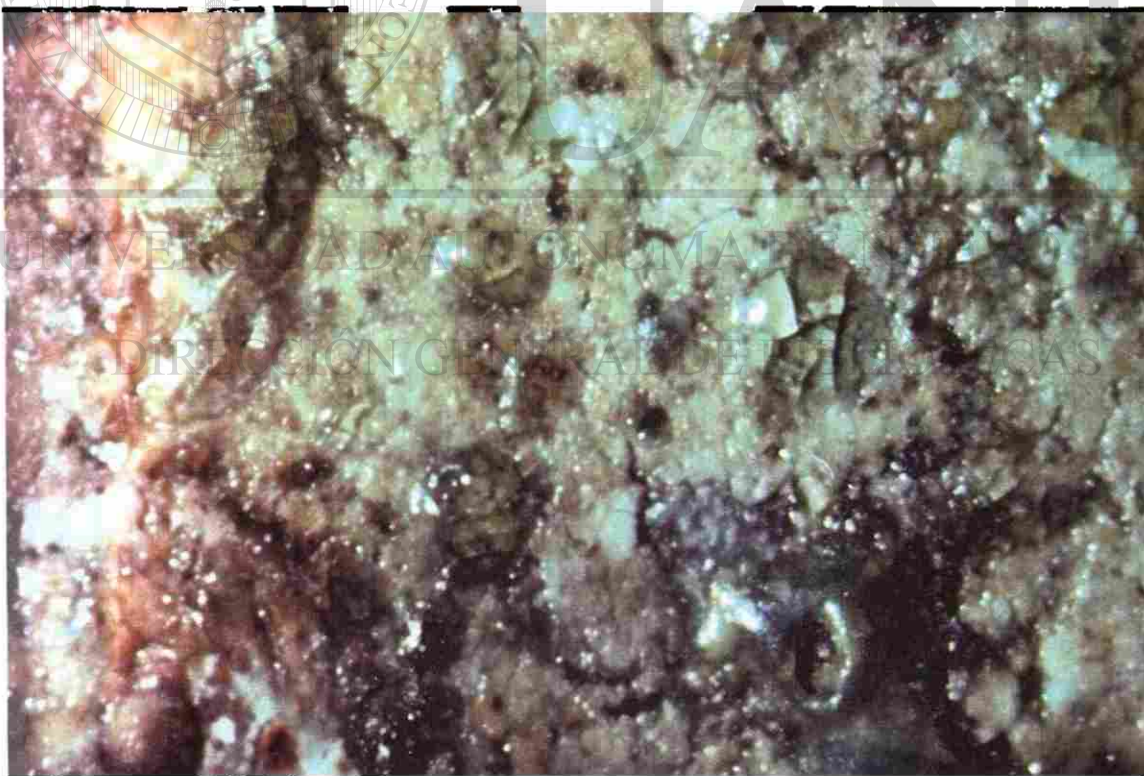
Fotografía 40 Ladrillo sin tratamiento.



Fotografía 41 Ladrillo tratado con polvo de alumina



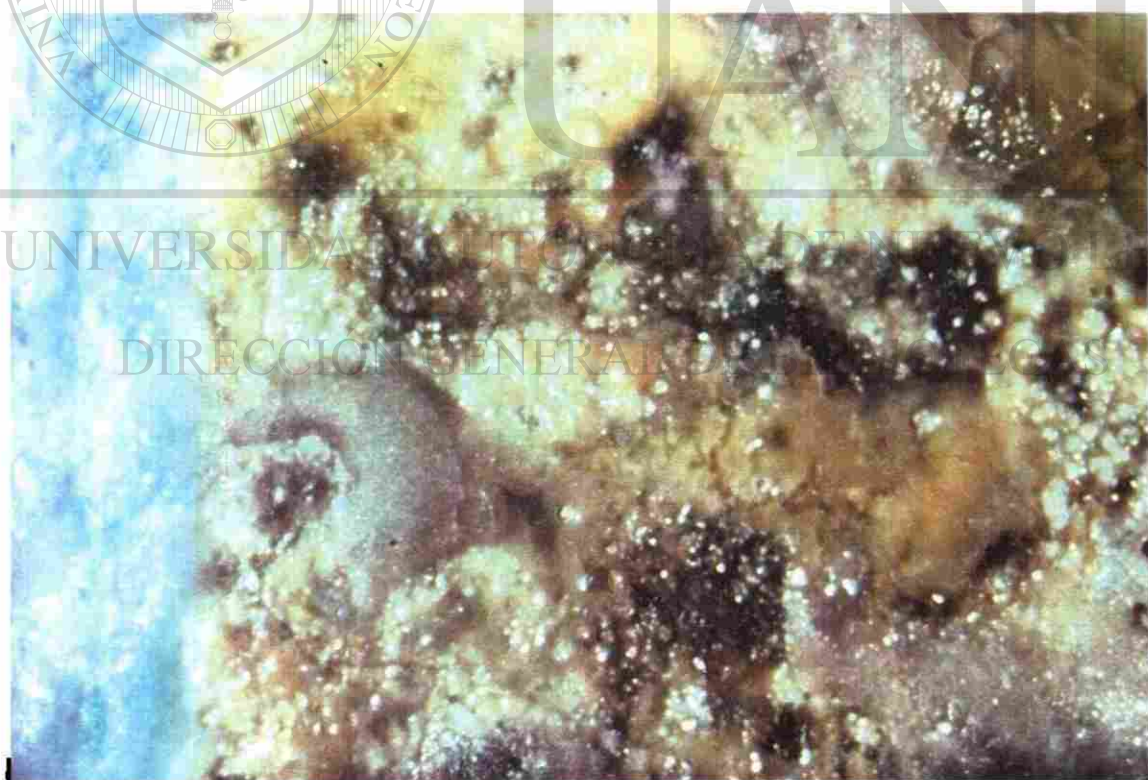
Fotografía 42 Ladrillo tratado con polvo de ladrillo silico-aluminoso.



Fotografía 43 Ladrillo tratado con polvo de cemento blanco



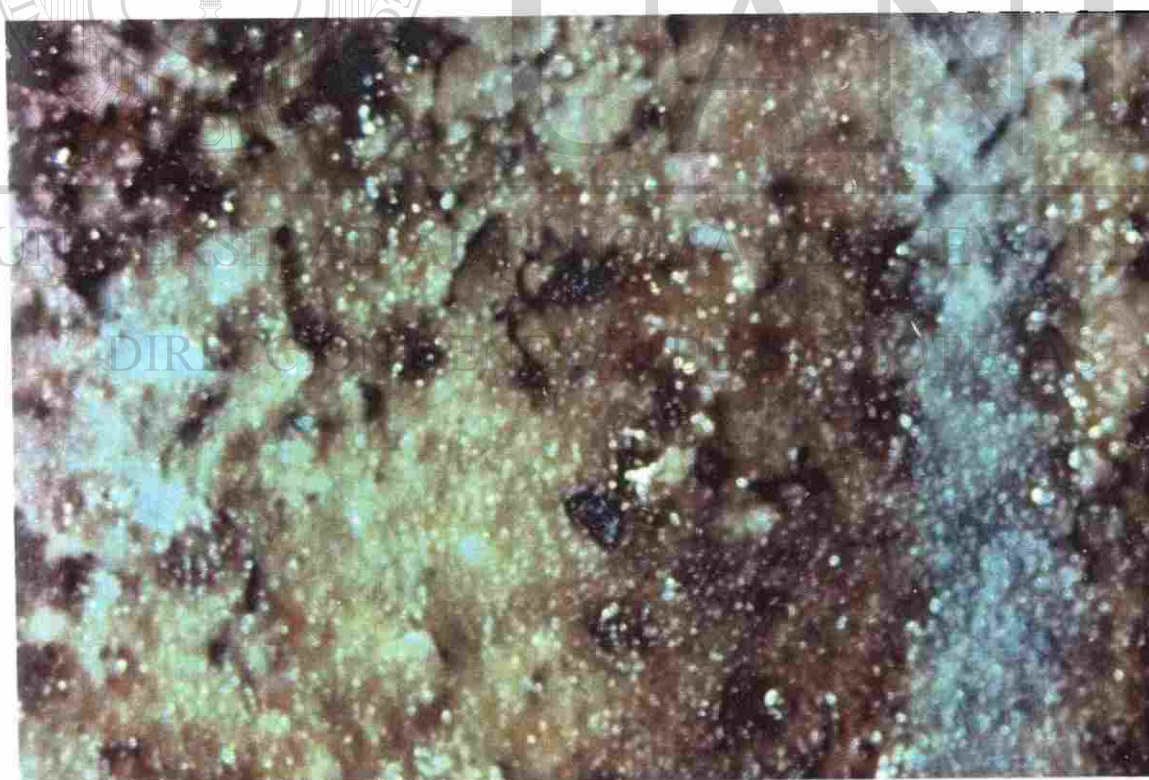
Fotografía 44. Ladrillo tratado con polvo de cemento gris



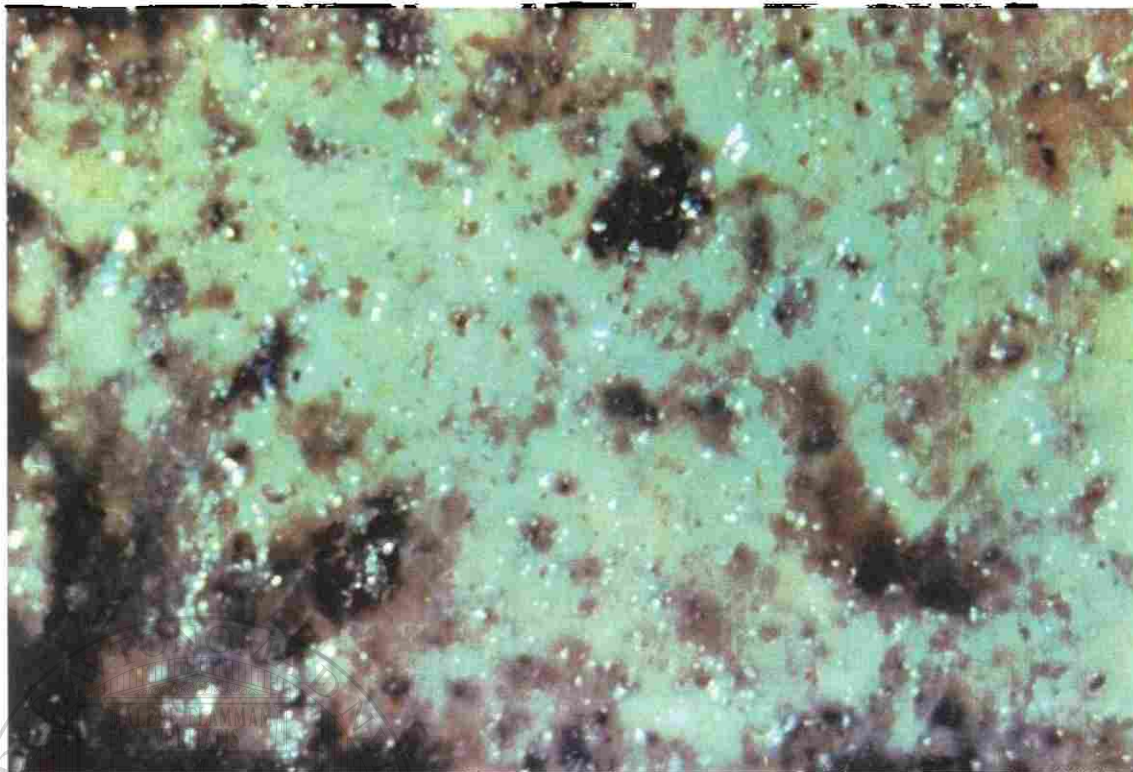
Fotografía 45. Ladrillo tratado con polvo de magnesita



Fotografía 46 Ladrillo tratado con polvo de cal



Fotografía 47 Ladrillo fundido sin aplicar polvo



Fotografía 48. Ladrillo tratado con polvo de arena sílica.

La Tabla 12 muestra los miligramos de fierro esponja adheridos a las superficies

Tabla 12. Miligramos adheridos a las muestras tratadas.

ST	ARENA	LSA	CAL	ALUM	FUND	C.B	C.G.	MGO
6.8	0.1	0.6	11.0	1.5	3.2	12.9	87.7	23.3
22.3	0.1	0.4	2.0	2.8	120.8	15.7	6.8	24.6
18.8	0.0	0.1	69.5	4.7	8.3	59.2	21.0	21.4
2.9	0.5	0.6	34.0	2.1	65.0	17.3	13.9	7.2
5.1	0.0	0.4	0.7	8.8	23.9	6.5	88.2	7.0

S.T sin tratamiento, LSA ladrillo sílico-aluminoso, ALUM alúmina, FUND fundido, C.B. cemento blanco, C G cemento gris.

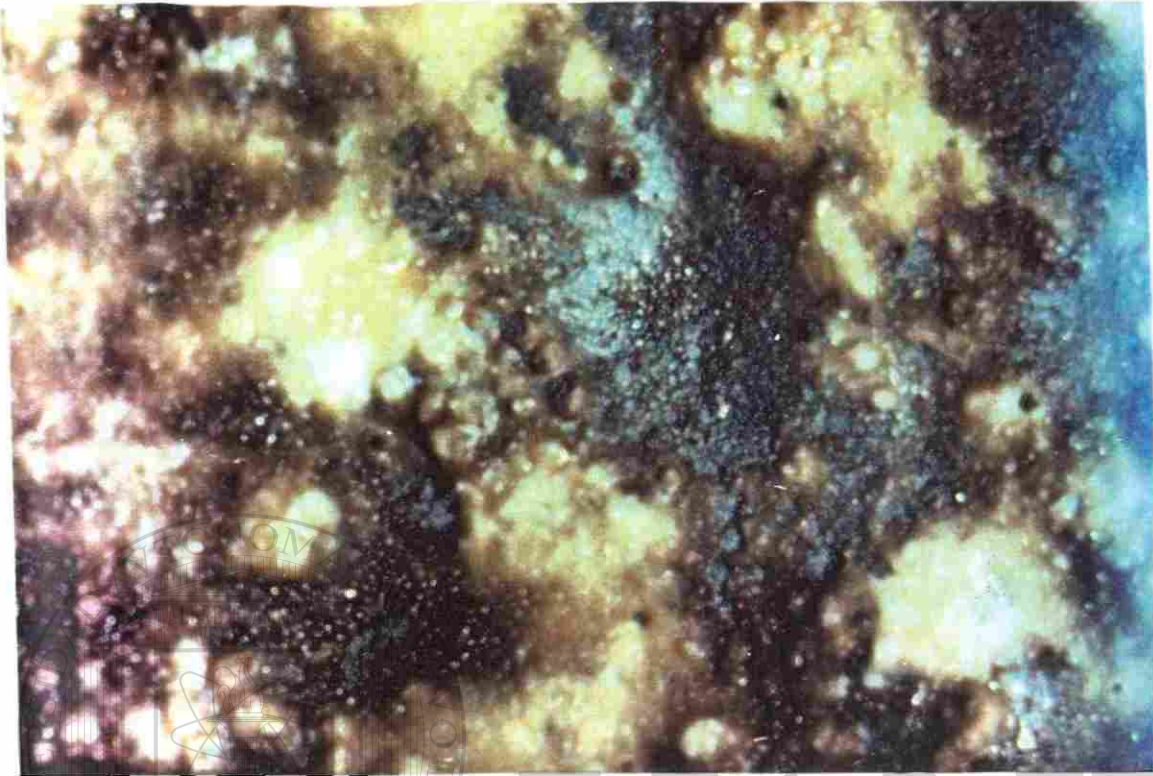
Las Fotografías de la 49 a la 55 muestran el fierro esponja adherido a la superficie del refractario.



Fotografía 49 Capa en ladrillo sin tratamiento.



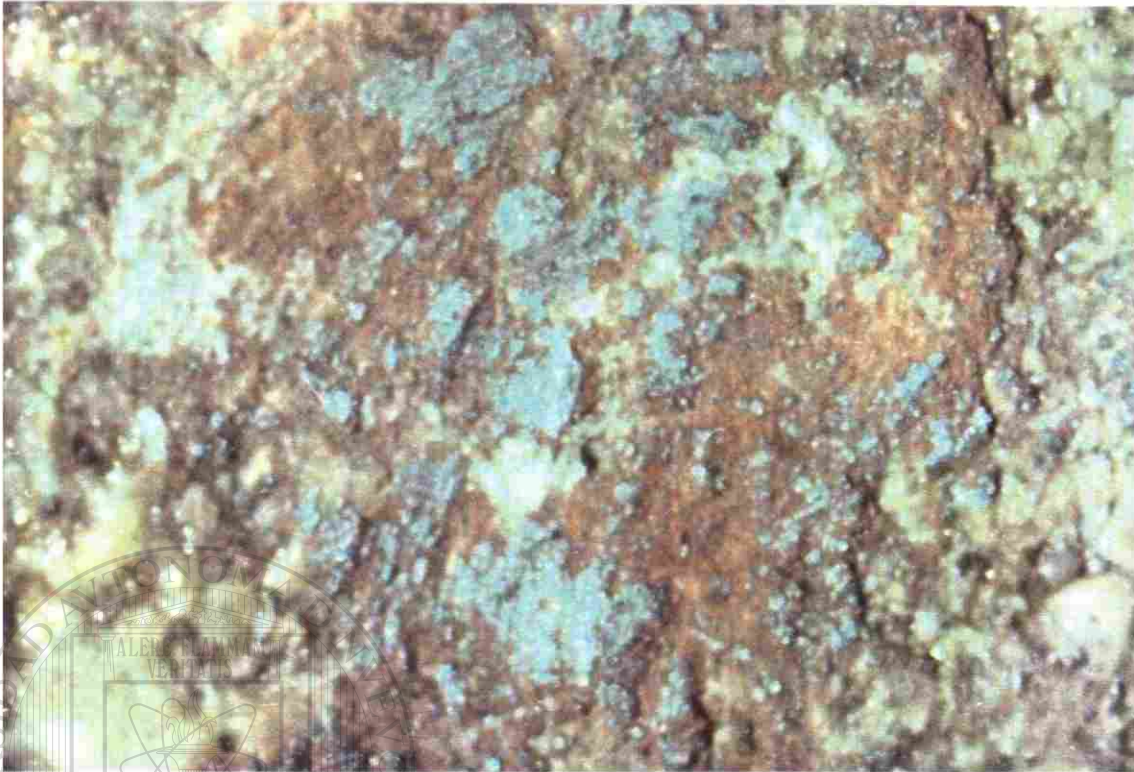
Fotografía 50 Capa en ladrillo fundido



Fotografía 51. Capa en ladrillo tratado con polvo de alumina



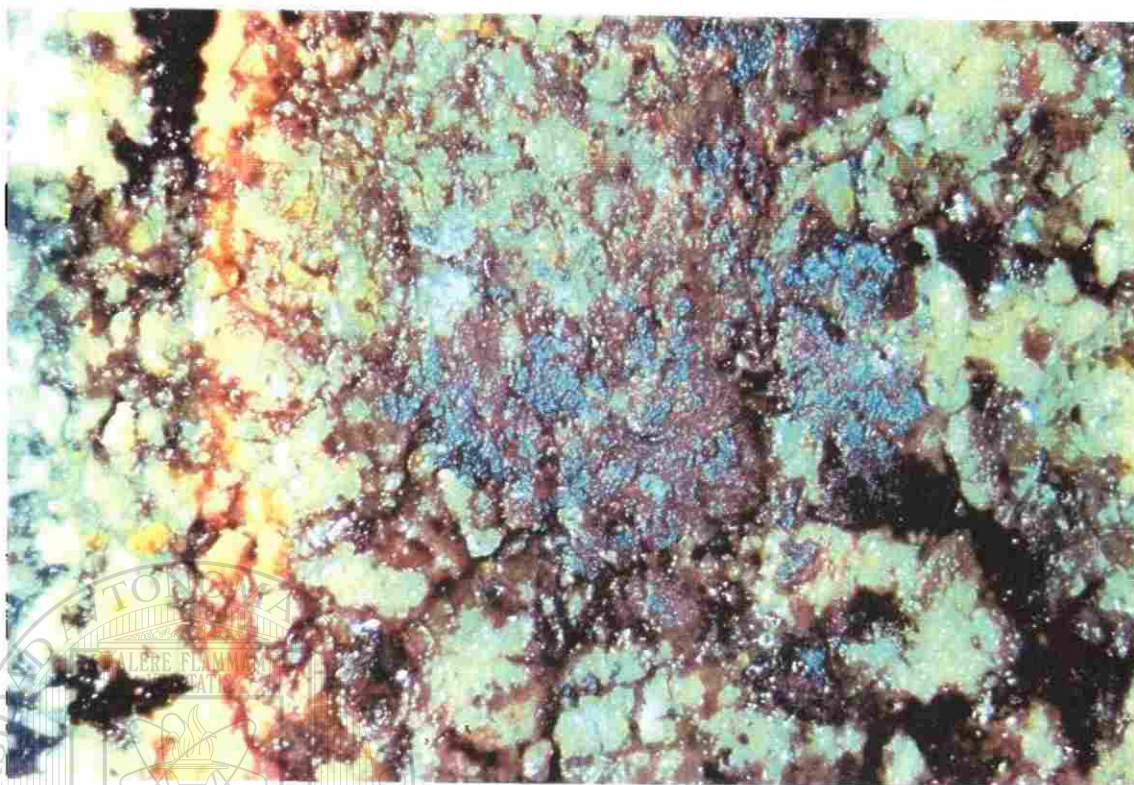
Fotografía 52. Capa en ladrillo tratado con polvo de manganita



Fotografía 53 Capa en ladrillo tratado con polvo de cemento blanco



Fotografía 54 Capa en ladrillo tratado con polvo de cemento gris



Fotografía 55. Capa en ladrillo tratado con polvo de cal

El análisis estadístico de estos resultados se encuentra en la Tabla 13. Se aplicó la prueba Kruskal-Wallis de estadística no paramétrica. Este procedimiento se puede usar cuando las muestras son pequeñas y las varianzas son diferentes. A los resultados se les asigna un rango de menor a mayor, se calcula un rango promedio de cada muestra, y se aplica el procedimiento descrito en la literatura (14) o implícito en los paquetes estadísticos (Statgraphics, SPSS, etc.).

Tabla 13. Análisis de resultados de los tratamientos.

POLVO APLICADO	TAMAÑO DE MUESTRA	RANGO PROMEDIO DE LA MASA ADHERIDA
SIN TRATAMIENTO	5	24.7
ARENA	5	3.8
SILICO-ALUMINOSO	5	7.2
CAL	5	26.4
ALUMINA	5	17.0
FUNDIDO	5	33.0
CEMENTO BLANCO	5	29.8
CEMENTO GRIS	5	34.1
MAGNESITA	5	31.0

La conclusión es que, con más de 95% de confianza, si hay diferencia entre las medias. Como consecuencia de estos resultados, se seleccionó la arena sílica para dar el tratamiento a los ladrillos



Fotografía 26. Celda con movimiento rectilíneo horizontal.

Esta celda permitía una operación de máximo 5 ciclos antes de que se perdiera la muestra por el levantamiento del anillo que la contiene y empuja. La Fotografía 27 muestra la operación en caliente y el levantamiento del anillo que obliga a detener la prueba. Este tipo de arreglo es útil para medir coeficientes de fricción pero no es adecuado para operar suficientes ciclos como se requiere para formar una capa.



Fotografía 27 Levantamiento del anillo

6.2 CELDA DE CORTE ROTACIONAL

Para lograr tiempos de operación más largos se cambió el diseño a una celda rotacional. Para evitar el derrame de la muestra conforme se aplica esfuerzo normal y movimiento, se invirtió la posición del refractario a la parte superior y la muestra a la parte inferior, siendo esta empujada hacia arriba conforme se consumía. La Figura 11 y la Fotografía 28 muestran el arreglo de la celda rotacional.

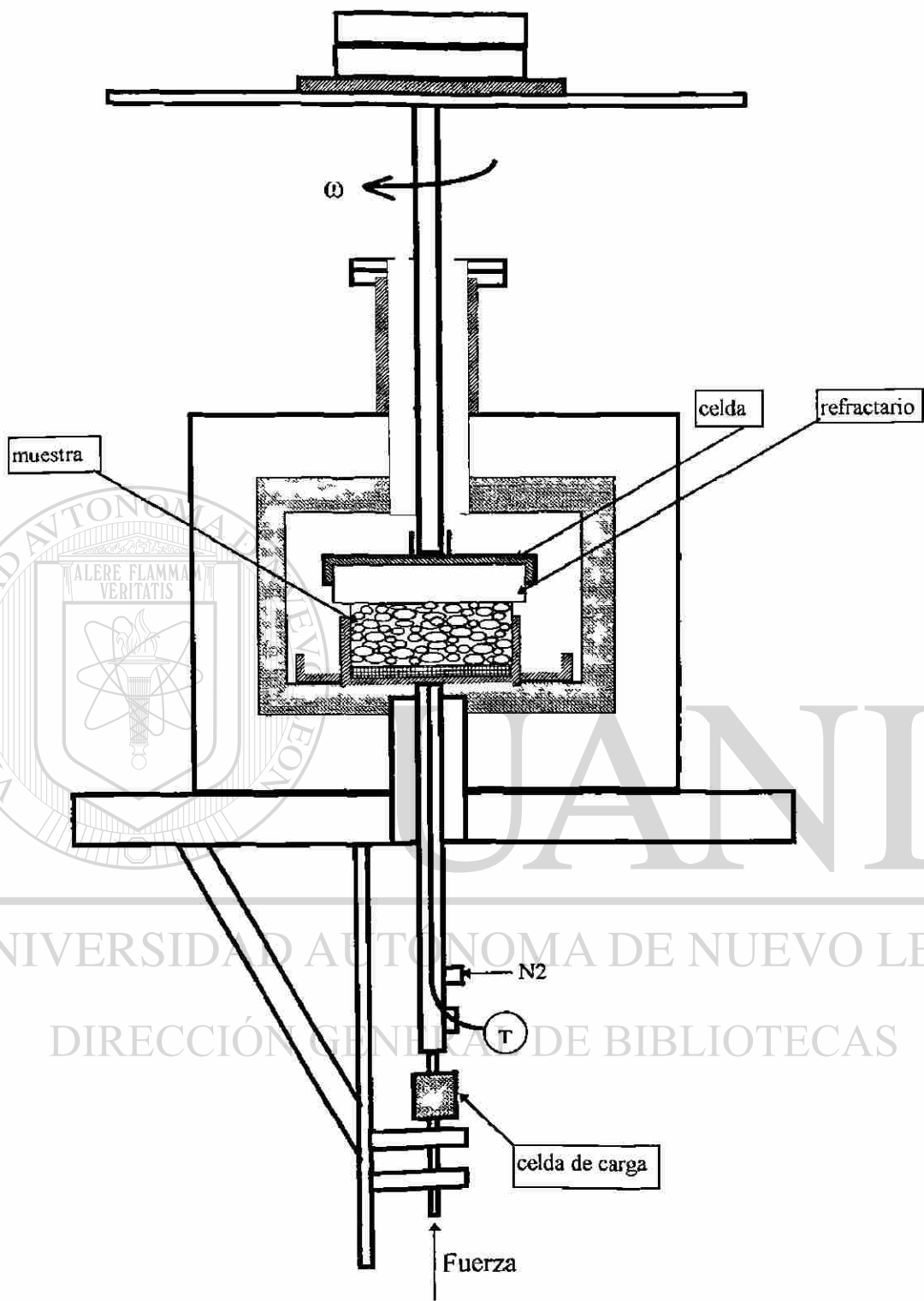
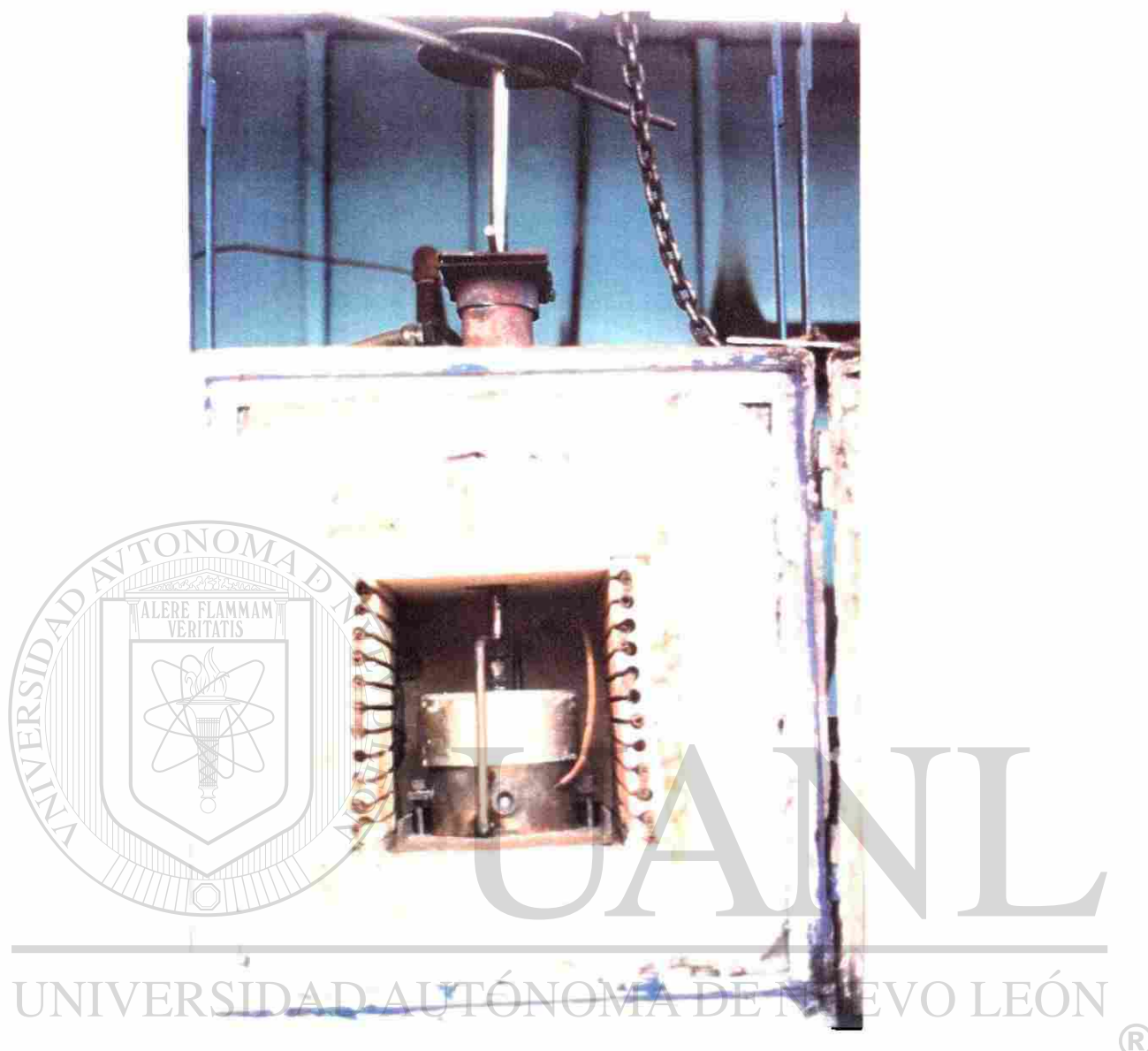


Figura 11. Celda rotacional.



Fotografía 28. Celda rotacional

El procedimiento utilizado es el siguiente

Se corta el ladrillo refractario y se monta en el anillo superior de la celda como se muestra en la Fotografía 29. Se prepara la muestra de hierro esponja con una granulometría $1 - 9.5 \text{ mm} - 15.9 \text{ mm}$ y se llena el anillo inferior de la celda como se muestra en la Fotografía 30. Se coloca y se fija la celda dentro de la mufla. Se coloca el termopar en contacto con el hierro esponja. Se empuja el hierro esponja hacia arriba para asegurar el contacto con el refractario y evitar el contacto con el anillo metálico. Se cierra y se purga el horno con flujo de N_2 , 20 lts/min. Se enciende la mufla pasando N_2 , y controlando la temperatura hasta estabilizarla en $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Se coloca el peso encima del plato para consolidar la muestra a 0.4 kg/cm^2 .

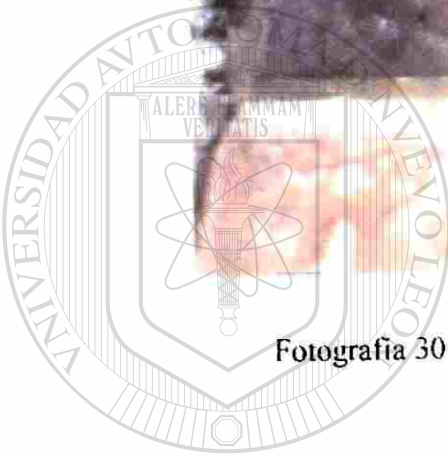
Se hace girar el anillo superior para transmitir esfuerzo cortante a la interfase pelet-refractario, controlando la velocidad tangencial entre 3 y 5 cm/min que es aproximadamente la velocidad del material en el reactor. Se verifica la separación entre los anillos continuamente. En caso necesario, se empuja la muestra hacia arriba y se continúa la rotación hasta terminar la muestra o acumular 10 horas de operación. Se quita la consolidación (esfuerzo normal), se apaga la mufla, y se deja enfriar con flujo de N₂. Se corta el flujo de N₂, se abre la mufla, y se saca la celda. Se toman las fotografías para verificar el estado final del refractario.



Fotografía 29 Ladrillo listo para probarse.



Fotografía 30 Fierro esponja en anillo inferior



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

Las Fotografía 31 muestra la comparación entre los trozos de la capa real y la capa simulada La Fotografía 32 muestra el refractario con el fierro esponja pegado

De esta forma se confirmó nuestra hipótesis el esfuerzo cortante es una variable importante en el proceso de generación de capas. Ya con este resultado se procedió a hacer un diseño de experimentos más elaborado para estudiar el mecanismo de fijación



Fotografía 31 Comparacion de capa real vs simulada.



Fotografía 32 Refractario con fierro esponja adherido

6.3 EXPERIMENTACION PARA ESTUDIAR MECANISMO DE ADHESION

Debido a la cantidad de recursos requeridos para operar el equipo a escala banco se decidió diseñar un microreactor para la simulacion de capas tomando en cuenta más variables. La Figura 12 muestra un esquema del mismo. Las Fotografías 33 y 34 muestran el microreactor en operación. La Fotografía 35 muestra una panorámica donde se ve el microreactor, los rotámetros y el controlador de temperatura.

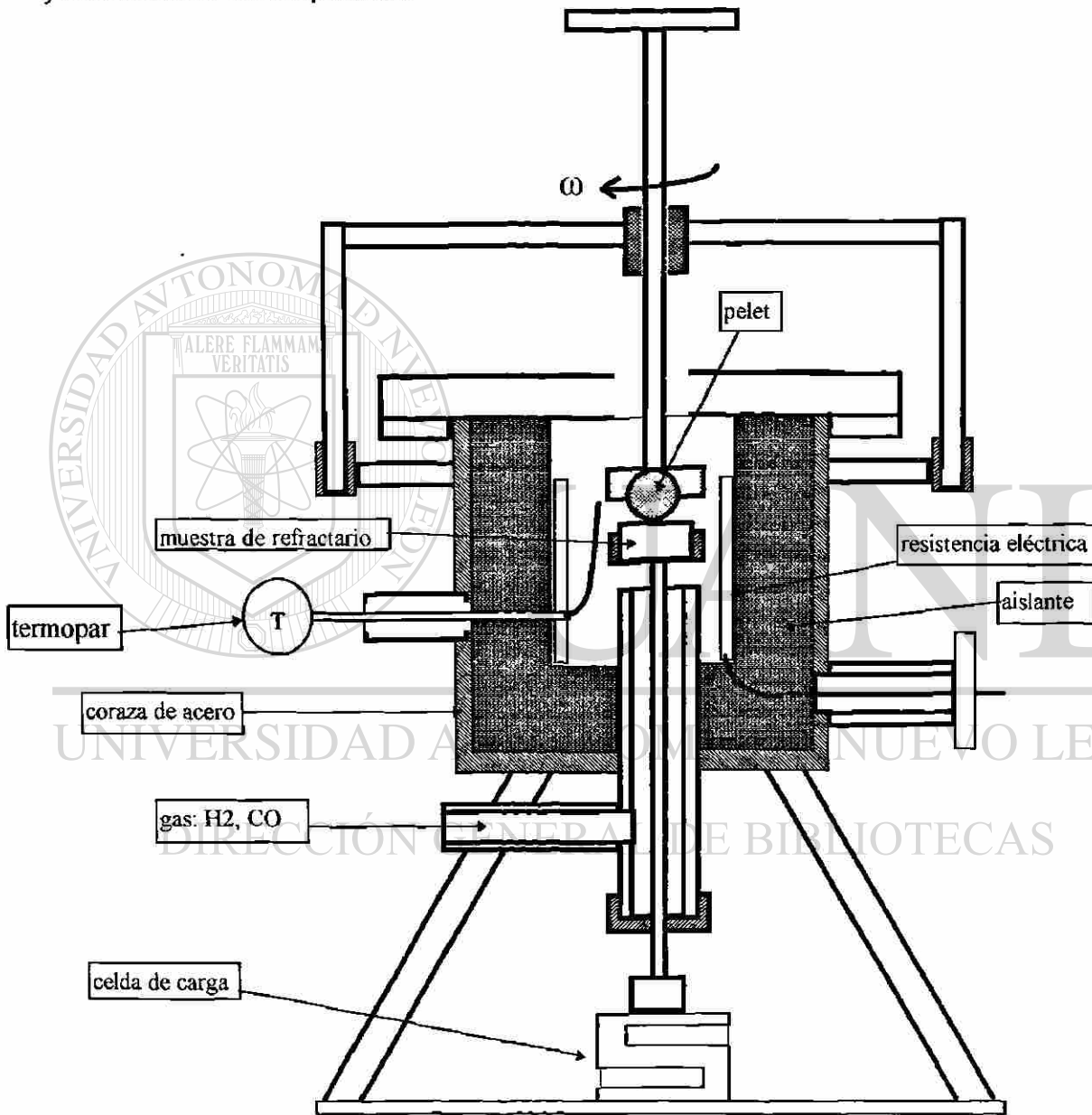
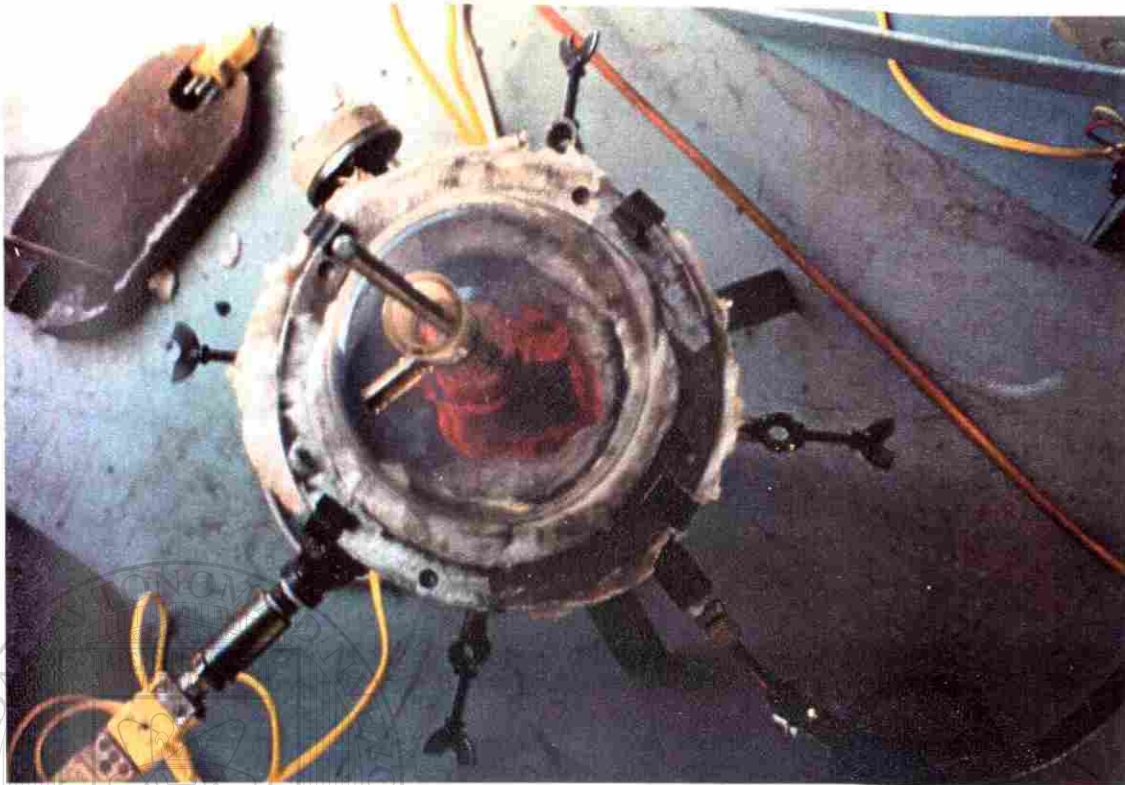
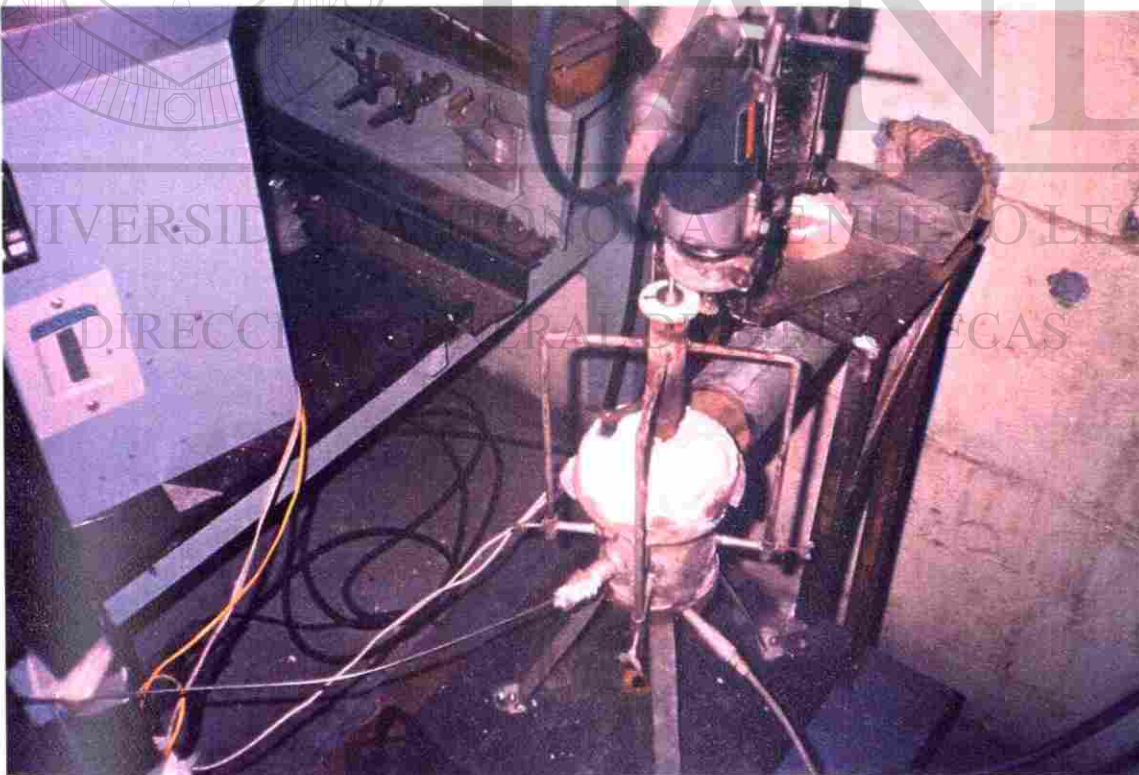


Figura 12. Esquema de microreactor.

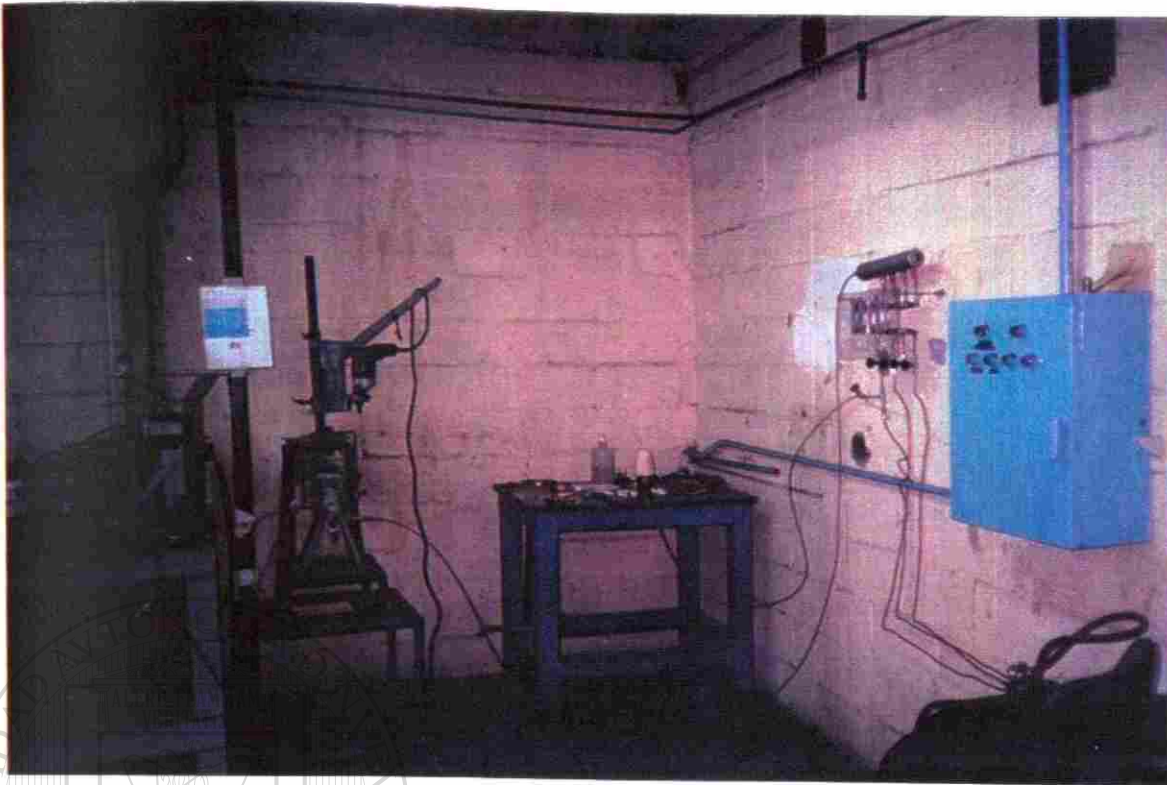


Fotografía 33. Microreactor.



Fotografía 34 Microreactor en operación

1020112511



Fotografía 35 Panorámica del laboratorio.

6.3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Cuando se estudia un fenómeno complejo, como es identificar el mecanismo de la formación de capas, inicialmente se considera que muchas variables pueden tener efecto en la variable dependiente o respuesta. En estos casos se recomienda usar los diseños fraccionados. Estos reducen el tiempo y costo de la experimentación. En estos diseños se reduce el número de corridas experimentales en base a agrupar algunas de las variables principales con las interacciones. En seguida se usa el análisis de varianza para identificar cuales grupos son los importantes. En seguida se aplica el conocimiento fisicoquímico del sistema para sugerir cuales de las variables o interacciones de cada grupo son las realmente importantes. Obviamente es recomendable confirmar estas conclusiones con otros experimentos. Esta confirmación se hará con la obtención del tratamiento para evitar la formación de capas y en la obtención del modelo cinético de crecimiento de la capa. En el estudio de las capas se consideraron 9 variables en el diseño de experimentos inicial. Algunas que, después de lo observado hasta el momento, son obviamente importantes como lo es el nivel de esfuerzo, otras porque son típicas del proceso y pueden tener una interacción importante o bien se les quiere descartar de una manera objetiva. Las variables consideradas son las siguientes: esfuerzo, temperatura, adición de cemento, tipo de pellet, % de metalización, % de carbono, velocidad, tiempo, y tipo de gas. Después se corrieron

otros diseños para la confirmación de las variables importantes encontradas en esta etapa. La Tabla 8 muestra el diseño seleccionado para estimar cuales de las nueve variables son importantes. La columna con el encabezado Cem indica si se aplicó o no cemento. Met significa la relación de fierro metálico a fierro total en el pelet. A y PC significan que se usaron pelets de dos tipos de minerales diferentes. Alzada y Peña Colorada.

Tabla 8. Diseño de experimentos y resultados

Exp	Gas	Cem	Pelet	Met		Vel	Tiempo	Esfuerzo	Temp	Capas
				%	%					
						RPM	min	Kg/cm ²	C	(gr) 10 ³
1	CO	SI	A	95	3.5	0	1	3.1	950	0.2
2	H2	SI	A	95	0.1	30	1	3.1	950	76.8
3	H2	SI	A	95	3.5	0	30	0.1	600	0.1
4	CO	NO	PC	85	3.5	30	1	3.1	950	14.7
5	CO	SI	A	85	3.5	30	30	0.1	950	0.1
6	CO	NO	PC	95	0.1	30	1	3.1	600	0.3
7	H2	NO	PC	85	3.5	30	30	0.1	600	0.0
8	CO	SI	PC	85	0.1	30	30	3.1	950	29.7
9	H2	NO	A	85	3.5	0	1	0.1	950	0.0
10	H2	NO	PC	95	0.1	30	30	0.1	950	0.6
11	CO	NO	A	95	0.1	0	30	3.1	950	1.9
12	H2	NO	A	85	0.1	30	30	3.1	600	45.7
13	H2	SI	A	85	0.1	0	30	0.1	950	0.2
14	CO	SI	A	85	0.1	0	1	3.1	600	0.0
15	CO	SI	A	95	0.1	30	30	0.1	600	2.1
16	CO	SI	PC	95	3.5	30	30	3.1	600	7.1
17	CO	SI	PC	85	3.5	0	1	0.1	600	0.0
18	CO	NO	A	95	3.5	30	1	0.1	600	0.7
19	H2	SI	PC	95	3.5	30	1	0.1	950	1.8
20	CO	NO	PC	95	3.5	0	30	0.1	950	0.0
21	CO	NO	A	85	0.1	30	1	0.1	950	0.4
22	H2	NO	PC	95	3.5	0	1	3.1	600	0.0
23	H2	SI	PC	95	0.1	0	30	3.1	600	0.0
24	H2	SI	PC	85	0.1	30	1	0.1	600	0.8
25	CO	NO	A	85	3.5	0	30	3.1	600	0.5
26	H2	SI	PC	85	3.5	0	30	3.1	950	0.0
27	H2	NO	PC	85	0.1	0	1	3.1	950	0.3
28	H2	NO	A	95	3.5	30	30	3.1	950	112.3
29	H2	NO	A	95	0.1	0	1	0.1	600	0.0
30	CO	NO	PC	85	0.1	0	30	0.1	600	0.0
31	CO	SI	PC	95	0.1	0	1	0.1	950	0.0
32	H2	SI	A	85	3.5	30	1	3.1	600	3.3

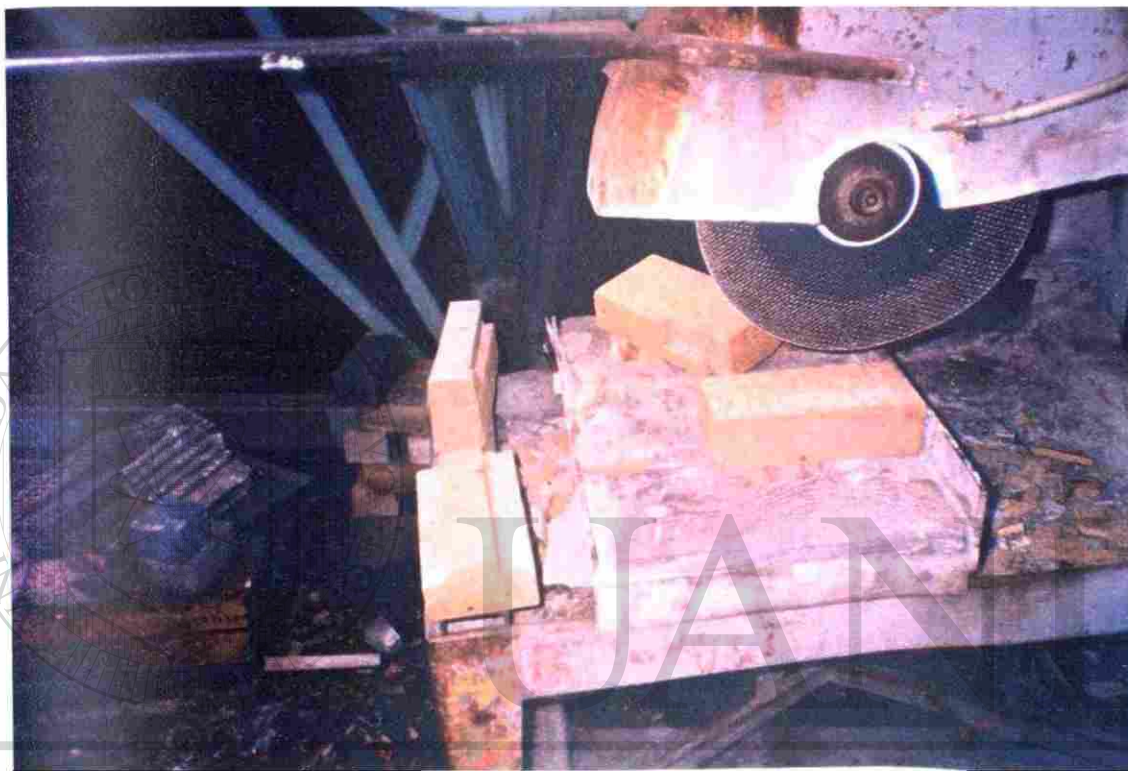
6.3.2 DESCRIPCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo experimental se muestra en la Figura 12 y en las Fotografías 33 y 34. Los principales componentes son los siguientes:

1. Coraza de reactor de acero al carbón,
2. Celda de carga para medir esfuerzo aplicado a la muestra,
3. Porta muestra de refractario,
4. Porta muestra de pelet,
5. Motor y engranes para hacer girar el pelet,
6. Resistencia eléctrica para calentar,
7. Aislante,
8. Termopar,
9. Controlador e indicador de temperatura,
10. Cilindros de gas reductor y nitrógeno,
11. Rotámetros para medir flujo de gas.

6.3.3 EXPERIMENTOS

En seguida se describe el procedimiento experimental llevado a cabo en cada una de las pruebas. Se corta y se seca la muestra de ladrillo. La Fotografía 36 muestra la cortadora de refractario. Se coloca la muestra del ladrillo en el portamuestra. Se pasa flujo de nitrógeno. Se precalienta hasta la temperatura deseada. Se calibra la velocidad angular contando las revoluciones y tomando el tiempo con un cronómetro. Se fija el pelet en el portapelet usando cemento refractario. Se aplica cemento al pelet en una suspensión de 15 partes de cemento gris por 100 partes de agua en peso. Se cambia el flujo de nitrógeno por gas reductor. Se coloca el pelet dentro del reactor y se esperan dos minutos para que la superficie se caliente. Se pone el pelet en contacto con el refractario y se aplica el esfuerzo normal. Se hace girar el pelet sobre la muestra de refractario para aplicar el esfuerzo cortante. Se mantienen las condiciones de operación durante el tiempo deseado. Se detiene la rotación. Se quita el esfuerzo normal. Se sustituye el gas reductor por nitrógeno. Se saca el pelet y la muestra de refractario. Se enfría la muestra en atmósfera de nitrógeno. Se saca la muestra de refractario del enfriador cuando la temperatura sea menor de 70 C. Se desprende la capa y se tritura para separar el fierro magnéticamente. Se pesa la capa en la balanza analítica.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Fotografía 36 Cortadora de muestras de ladrillo refractario
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

6.3.4 RESULTADOS

La Fotografía 37 muestra refractario con el hierro esponja adherido. La Fotografía 38 muestra el hierro esponja separado con el iman después de triturar la muestra. Listo para pesarse en la balanza analítica.



Fotografía 37 Muestra de ladrillo con capa



Fotografía 38 Hierro e pomice separado del refractario

La Tabla 9 muestra los resultados del análisis de varianza. La nomenclatura de esta tabla es la siguiente: A representa la variable tipo de gas (H₂ ó CO), B representa la variable de aplicación de cemento (sí ó no), C representa la variable tipo de pelet (Alzada ó Peña Colorada), D representa la variable nivel de metalización del pelet (85 ó 95%), E representa la variable porcentaje 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 aplicado (0.1 ó 3.1 Kg/cm²), I representa la temperatura (600 ó 950°C). En la literatura (14) se encuentran detalles de los significados y la forma de calcular los conceptos siguientes usados en el análisis de varianza: S de C significa suma de cuadrados. G de L significa grados de libertad. CM significa cuadrados medios. *F* significa el valor del estadístico *F* usado en análisis de varianza. P es la probabilidad de equivocarse al aceptar que la variable o interacción es 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 la que es más consistente con las experiencias a nivel planta piloto e industrial así como los resultados 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.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 9 Analisis de varianza

VARIABLE	S de C	G de I	CM	F	P
CFH	1060.3	1	1060.3	5019.2	0.009
CGH	95.2	1	95.2	450.8	0.030
C	1116.3	1	1116.3	5284.2	0.009
D, CHI	365.9	1	365.9	1731.8	0.015
L	10.1	1	10.1	47.9	0.090
F	2686.4	1	2686.4	12716.9	0.006
G	318.8	1	318.8	1509.0	0.016
H	2556.1	1	2556.1	12100.0	0.006
I	994.6	1	994.6	4708.1	0.009
FG	291.6	1	291.6	1380.4	0.017
FH	2464.0	1	2464.0	11664.0	0.006
FI	950.5	1	950.5	4499.3	0.009
AE	0.6	1	0.6	2.6	0.348
CH	1106.9	1	1106.9	5239.5	0.009
CFGH	80.6	1	80.6	381.8	0.032
CF	1055.7	1	1055.7	4997.4	0.009
CFHI	349.8	1	349.8	1655.9	0.015
GH	326.4	1	326.4	1545.1	0.016
BD	0.0	1	0.0	0.0	0.952
FHI	968.0	1	968.0	4582.3	0.009
CG	120.1	1	120.1	568.6	0.026
DG	4.8	1	4.8	22.8	0.130
HI	1008.0	1	1008.0	4771.6	0.009
CE	0.1	1	0.1	0.5	0.620
CI	316.3	1	316.3	1497.1	0.016
FGH	306.3	1	306.3	1449.9	0.016
CGI	6.8	1	6.8	32.4	0.109
CFI	298.9	1	298.9	1414.9	0.017
DFG	7.2	1	7.2	34.2	0.106
CFG	99.4	1	99.4	470.6	0.029
Error Total	0.2	1	0.2		

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, temperatura y tiempo.

6.4 PRUEBA DE TRATAMIENTOS PARA EVITAR ANCLAJE

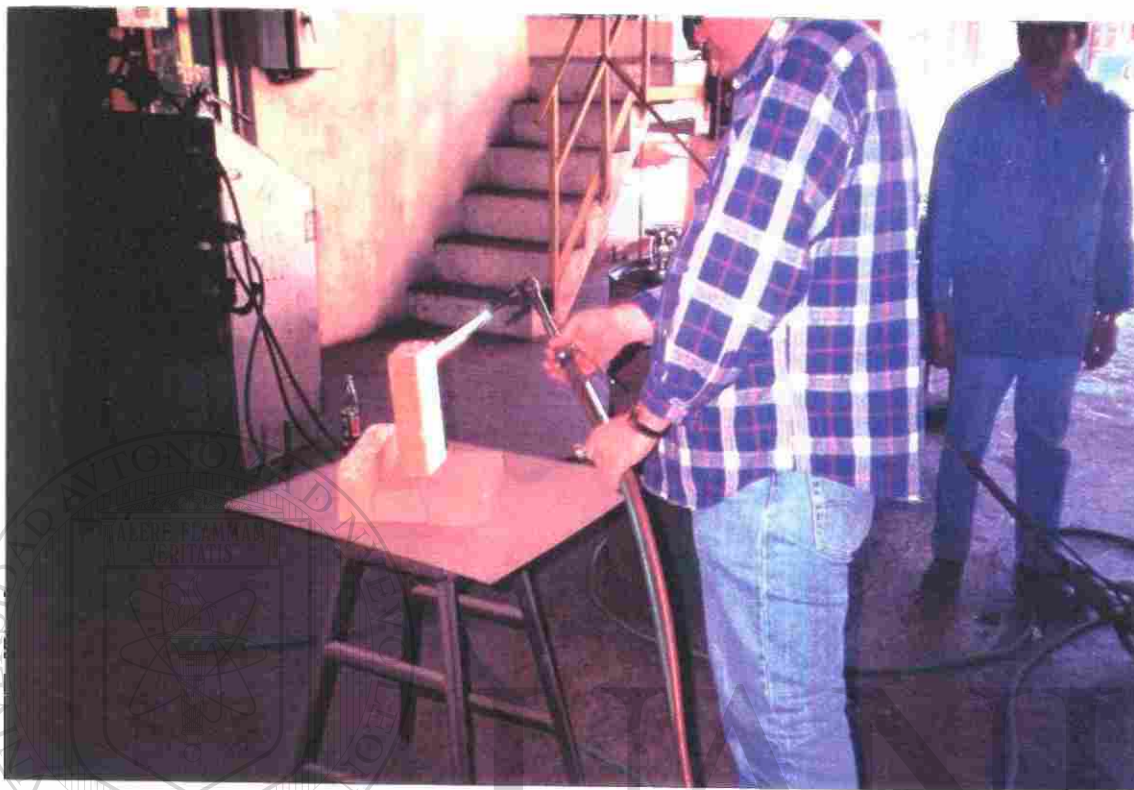
6.4.1 PLANTEAMIENTO DE HIPOTESIS

Una manera de confirmar que la variable más importante es el esfuerzo cortante, es proponer un tratamiento basado en la disminución del mismo y que se note el efecto en la masa depositada sobre la muestra de ladrillo. Basado en lo encontrado en la sección de mecanismo se pensó la manera de disminuir el esfuerzo cortante entre pelet y refractario. 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. Sin embargo no era fácil lograr este acabado con suficiente estabilidad a las condiciones de operación de los reactores. Los azulejos comerciales no tienen tal resistencia. Se probaron ladrillos tratados por proveedores de refractarios con tratamientos en la superficie con temperaturas de fusión de hasta 1300 °C sin tener resultados adecuados. Se sabe que existen otras piezas que podrían dar el servicio, sin embargo, se busca resolver el problema con el mínimo costo y también enfocando el resultado a otras aplicaciones claves para mejorar la tecnología de reducción directa, se ensayó la manera de evitar el anclaje de las capas en los ladrillos conservando el mismo tipo de ladrillo. Aunque se probaron y se conocen otros tipos de ladrillos refractarios con una superficie mucho más tersa que el silico-aluminoso, como pueden ser los de alta alúmina, la instalación de este tipo de ladrillos implica hacer reingeniería para ver si es factible su uso en el reactor

6.4.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

TRATAMIENTOS A ESCALA LABORATORIO

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 flama oxidante para fundir los filos y el material dentro de los poros. Para lograr el acabado deseado a escala laboratorio se usó un soplete quemando una mezcla de oxígeno-acetileno para fundir la superficie de las muestras. La literatura (19) reporta una temperatura máxima de flama, de acetileno con aire seco a 25 °C, de 2586 °C. La Fotografía 39 muestra un ensayo para preparar las muestras. Se decidió usar una gama de los materiales refractarios más comunes. Los análisis químicos se muestran en la Tabla 10



Fotografía 39. Tratamiento con soplete.

Tabla 10. Analisis químico de polvos usados en los tratamientos.

IDENTIFICACION	ARENA	ALUMINA	CEM BCO.	CAL	LSA	MGO	CEM GRIS
Fe ₂ O ₃	1.40	3.69	0.56	0.27	1.11	0.41	3.64
SiO ₂	95.20	13.52	19.98	0.83	52.44	6.40	19.08
MgO	0.04	3.65	1.21	1.06	0.21	87.16	2.40
CaO	0.08	1.04	65.73	65.21	0.40	1.56	63.66
Al ₂ O ₃	1.62	78.14	5.41	1.16	43.23	1.98	4.95
Na ₂ O	0.23	0.00	0.17	0.04	0.36	0.03	0.63
K ₂ O	1.23	0.00	0.01	0.00	0.07	0.35	0.45
PXC	0.28	0.00	3.42	28.76	0.22	1.45	5.48

LSA – polvo de ladrillo silico-aluminoso.

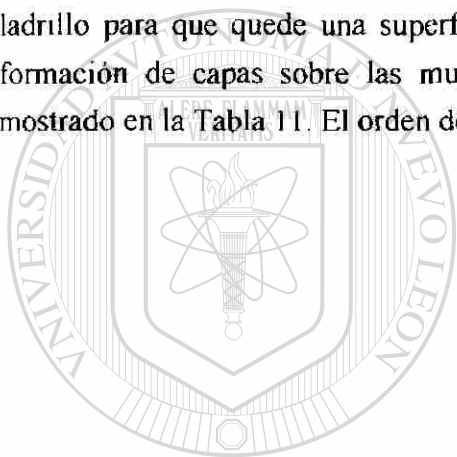
PROCEDIMIENTO

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

Se preparan muestras molidas de los materiales siguientes para ser aplicados a los ladrillos: ladrillo sílico-aluminoso, cal, magnesita, cemento gris, cemento blanco, alúmina, y arena sílica.

Estos materiales son pasados a través de una malla 100. Las muestras de los ladrillos son limpiadas hasta asegurar que no existe contaminación con hierro esponja.

Las muestras de polvo son analizadas en el laboratorio para conocer los porcentajes de: Fe_2O_3 , CaO , MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O . 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 11. El orden de los experimentos fue aleatorio.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 11. Diseño de experimentos para tratamientos.

TRATAMIENTOS								
T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T 9
t ₁₁	t ₂₁	t ₃₁	t ₄₁	t ₅₁	t ₆₁	t ₇₁	t ₈₁	t ₉₁
t ₁₂	t ₂₂	t ₃₂	t ₄₂	t ₅₂	t ₆₂	t ₇₂	t ₈₂	t ₉₂
t ₁₃	t ₂₃	t ₃₃	t ₄₃	t ₅₃	t ₆₃	t ₇₃	t ₈₃	t ₉₃
t ₁₄	t ₂₄	t ₃₄	t ₄₄	t ₅₄	t ₆₄	t ₇₄	t ₈₄	t ₉₄
t ₁₅	t ₂₅	t ₃₅	t ₄₅	t ₅₅	t ₆₅	t ₇₅	t ₈₅	t ₉₅

T1 fundir la superficie del ladrillo sin agregarle aditivo.

T2 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de polvo del mismo ladrillo para tapar los poros.

T3 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de cal para tapar los poros.

T4 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de magnesita para tapar los poros

T5 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de cemento gris para tapar los poros

T6 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de cemento blanco para tapar los poros

T7 ladrillo sin tratamiento que servira de prueba testigo

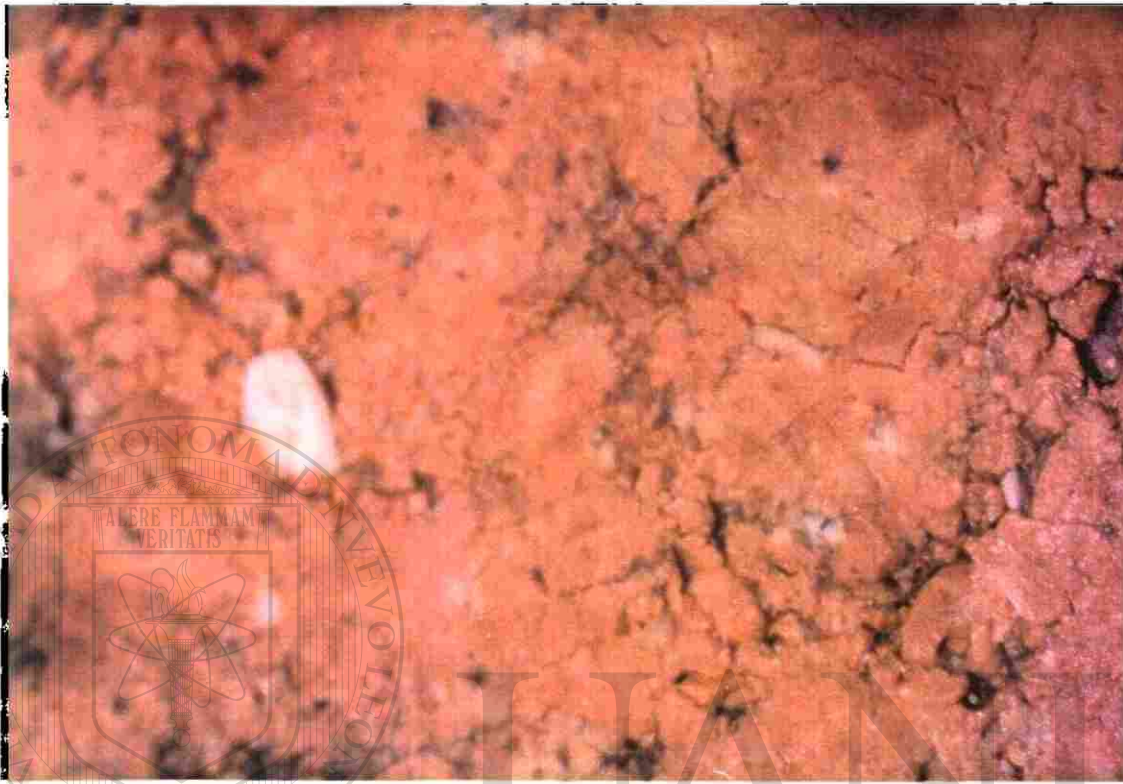
T8 fundir la superficie del ladrillo después de agregarle mortero de alumina para tapar los poros

T9 fundir la superficie del ladrillo despues de agregarle mortero de arena silica para tapar los poros

Las condiciones de operación serán Temperatura 950 C, Esfuerzo normal 3 l Kg/cm², Velocidad angular para aplicar esfuerzo cortante 30 rpm, Carbon < 0 l^oo. Metalizacion > 95 %o. Mineral Alzada, Tiempo 5 minutos, gas H2, sin aplicacion de cemento En los otros pasos se procedio de acuerdo a como está especificado en el procedimiento de busqueda de mecanismo Estas condiciones fueron seleccionadas por ser las más favorables para la formación de capas segun lo demostraron los resultados de los experimentos en la seccion para encontrar el mecanismo

6.4.3 RESULTADOS

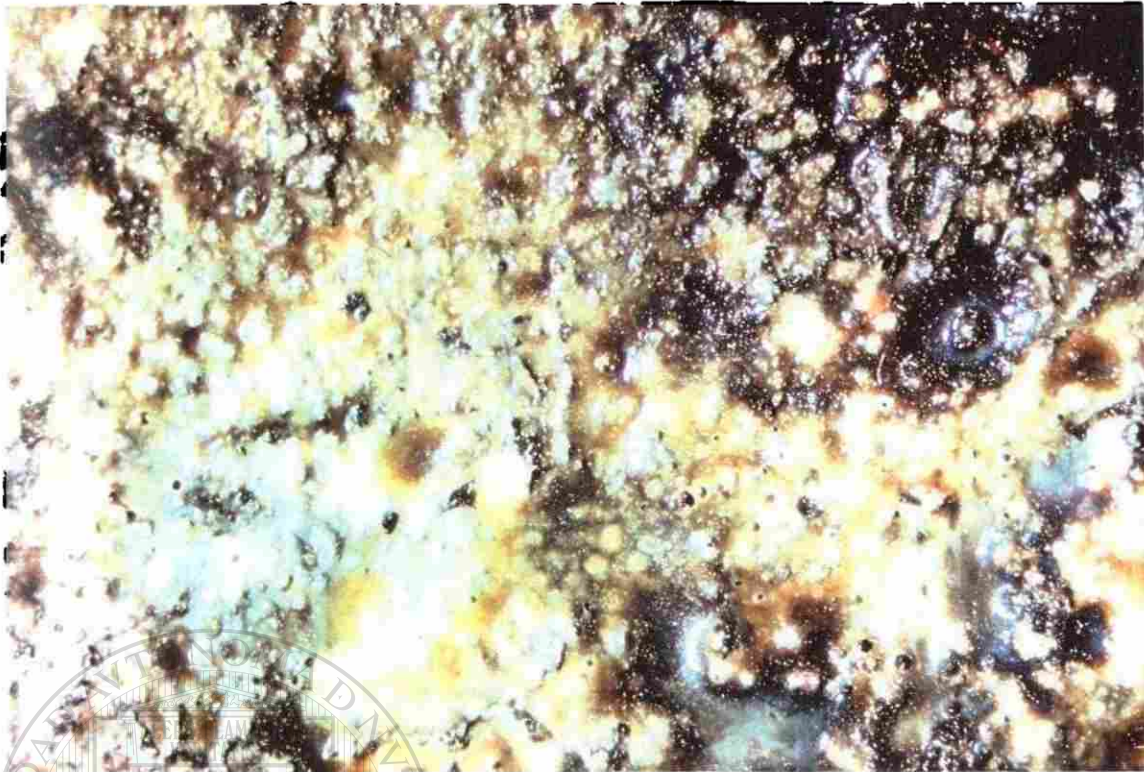
Las Fotografías de la 40 a la 48 muestran como quedaban las muestras despues del tratamiento. Todas estan tomadas a 6x



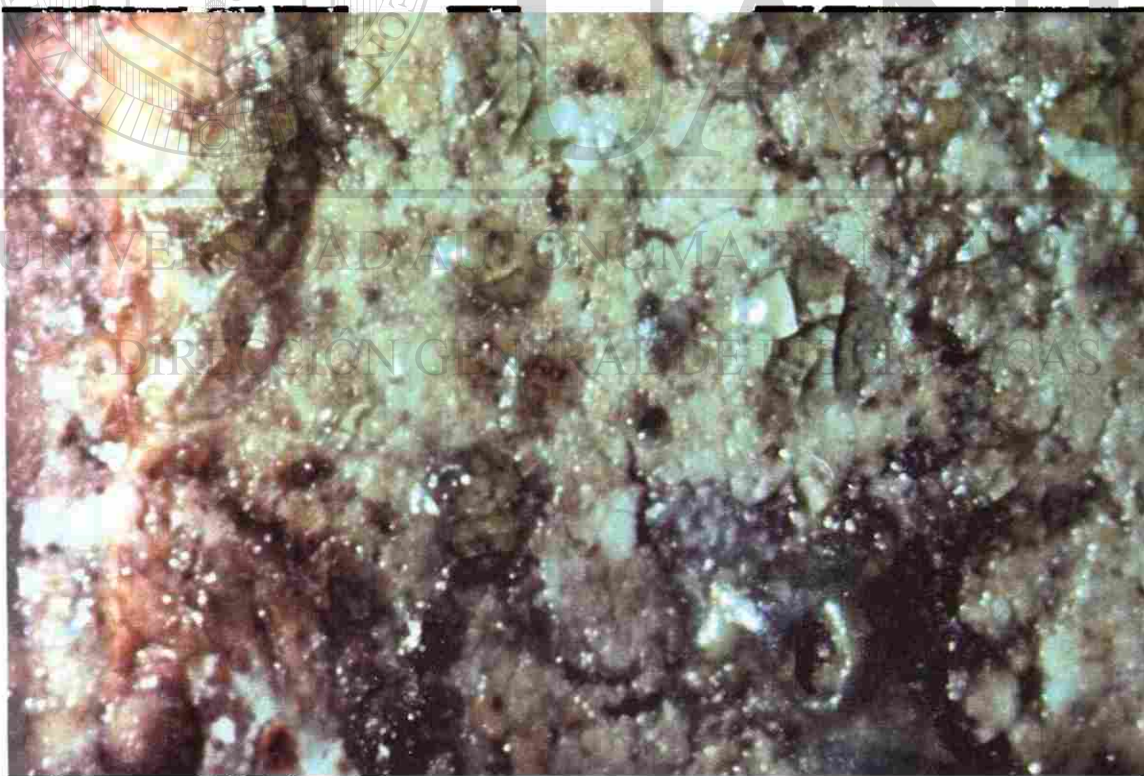
Fotografía 40 Ladrillo sin tratamiento.



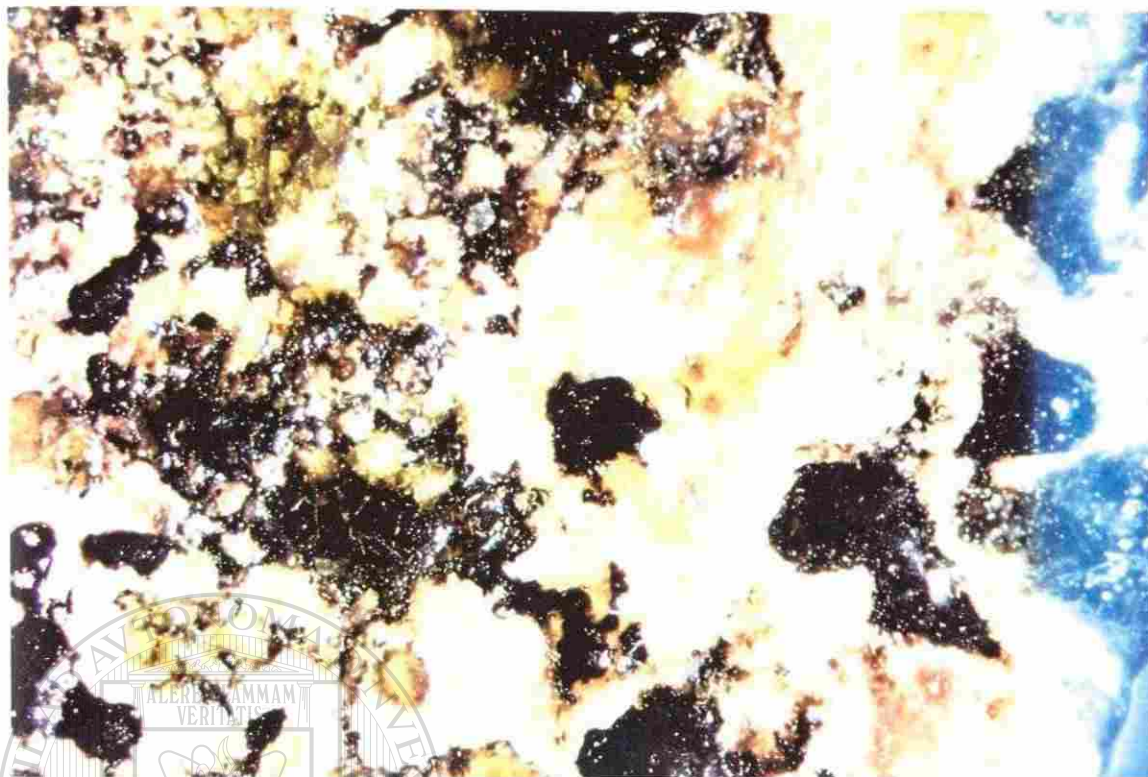
Fotografía 41 Ladrillo tratado con polvo de alumina



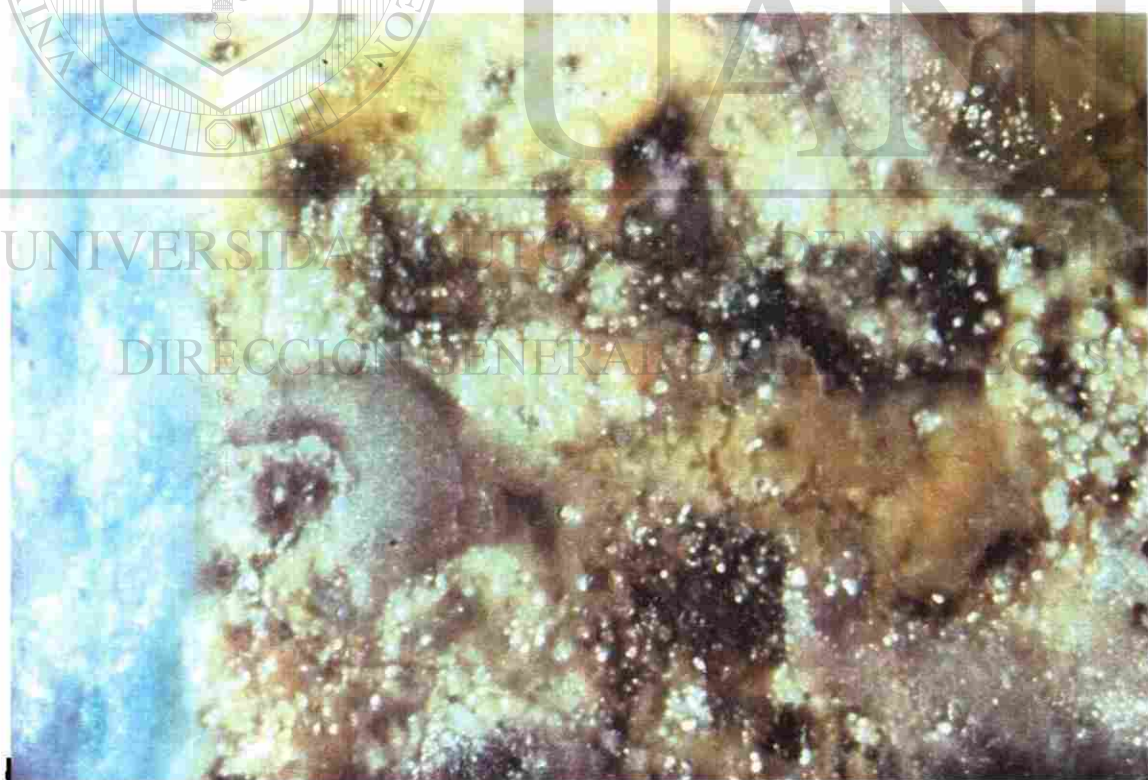
Fotografía 42 Ladrillo tratado con polvo de ladrillo silico-aluminoso.



Fotografía 43 Ladrillo tratado con polvo de cemento blanco



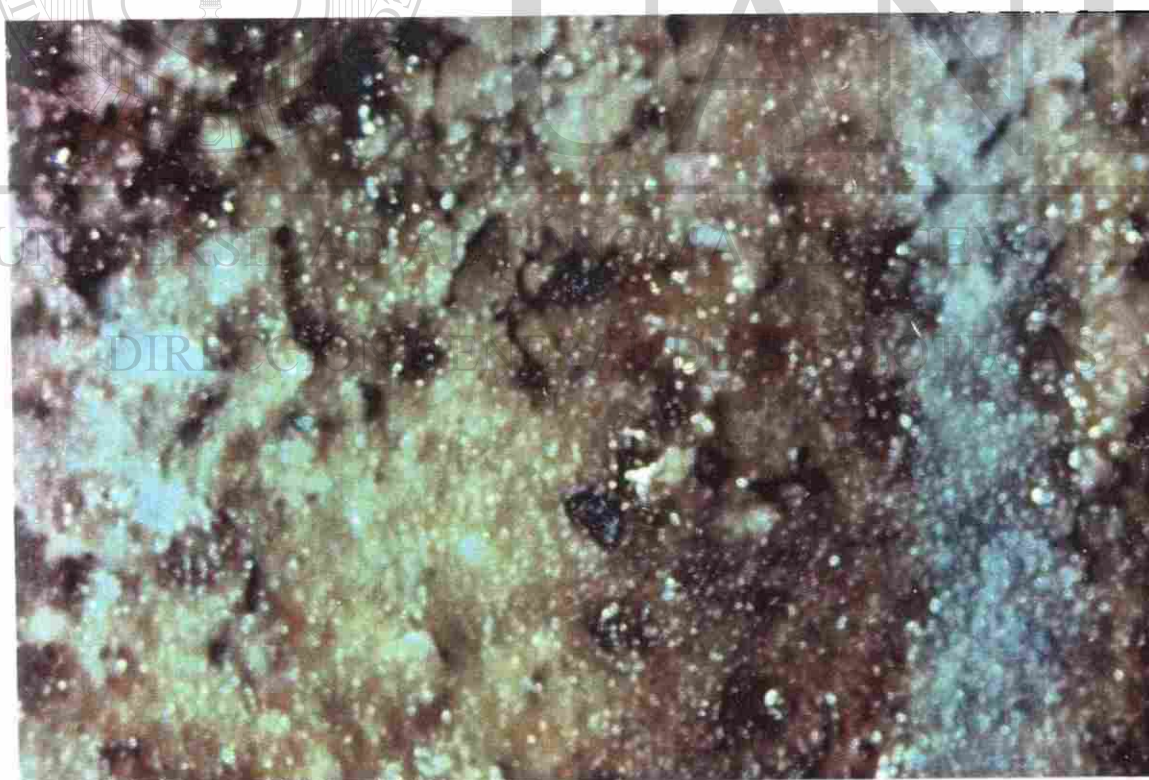
Fotografía 44. Ladrillo tratado con polvo de cemento gris



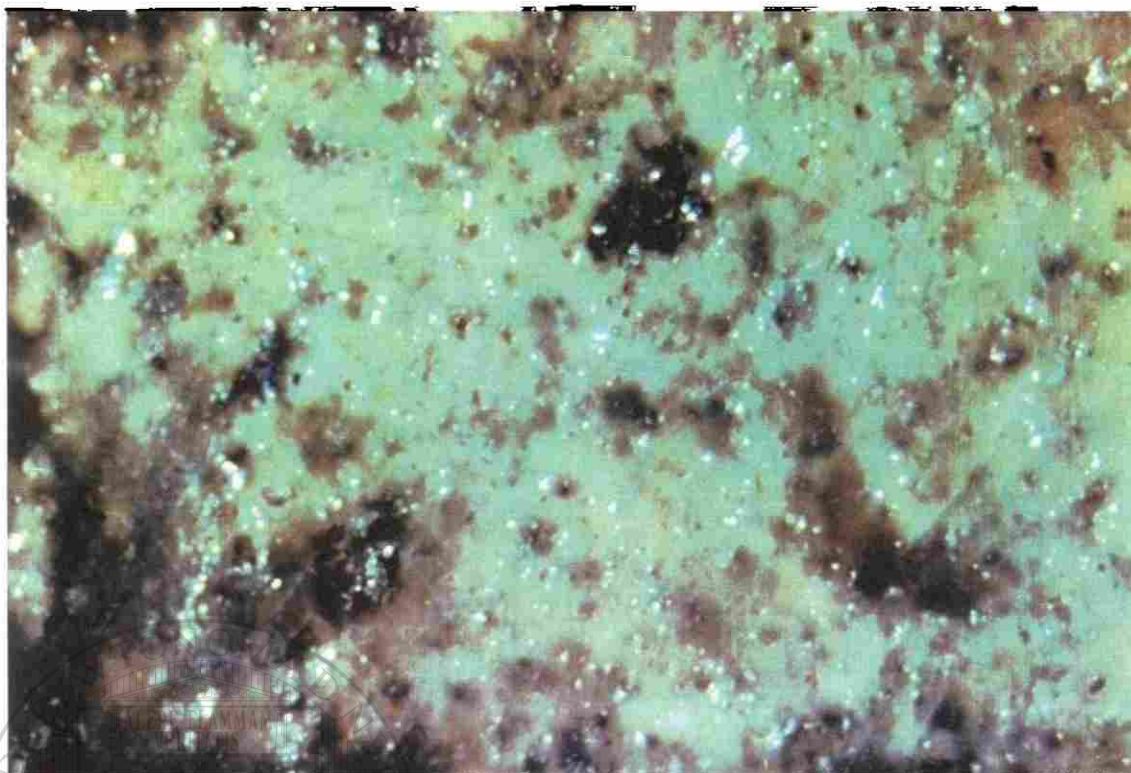
Fotografía 45. Ladrillo tratado con polvo de magnesita



Fotografía 46 Ladrillo tratado con polvo de cal



Fotografía 47 Ladrillo fundido sin aplicar polvo



Fotografía 48. Ladrillo tratado con polvo de arena sílica.

La Tabla 12 muestra los miligramos de fierro esponja adheridos a las superficies

Tabla 12. Miligramos adheridos a las muestras tratadas.

ST	ARENA	LSA	CAL	ALUM	FUND	C.B	C.G.	MGO
6.8	0.1	0.6	11.0	1.5	3.2	12.9	87.7	23.3
22.3	0.1	0.4	2.0	2.8	120.8	15.7	6.8	24.6
18.8	0.0	0.1	69.5	4.7	8.3	59.2	21.0	21.4
2.9	0.5	0.6	34.0	2.1	65.0	17.3	13.9	7.2
5.1	0.0	0.4	0.7	8.8	23.9	6.5	88.2	7.0

S.T sin tratamiento, LSA ladrillo sílico-aluminoso, ALUM alúmina, FUND fundido, C.B. cemento blanco, C G cemento gris.

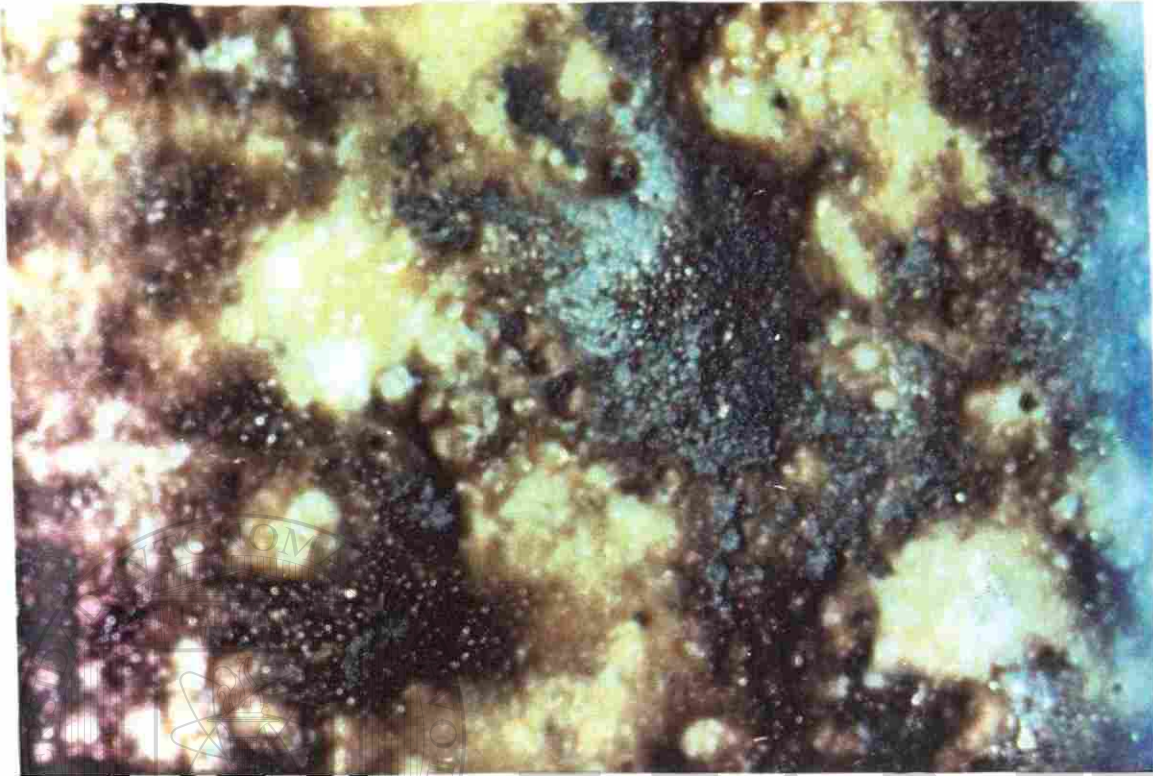
Las Fotografías de la 49 a la 55 muestran el fierro esponja adherido a la superficie del refractario.



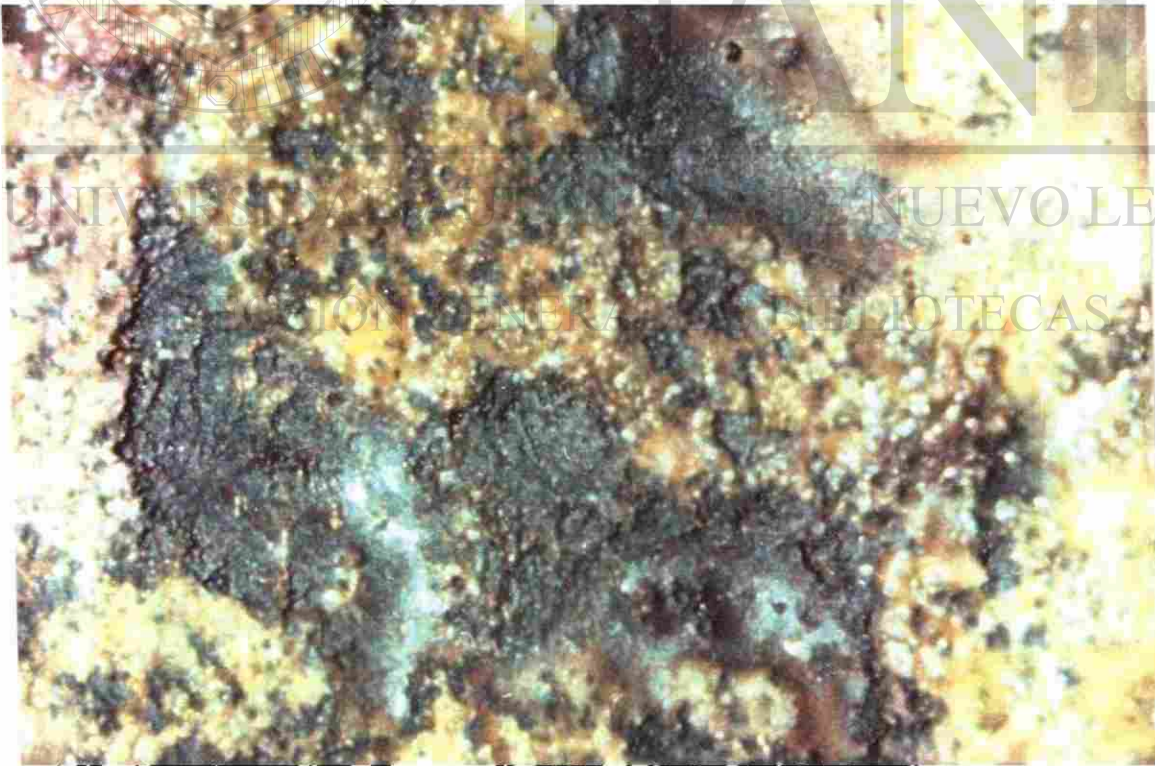
Fotografía 49 Capa en ladrillo sin tratamiento.



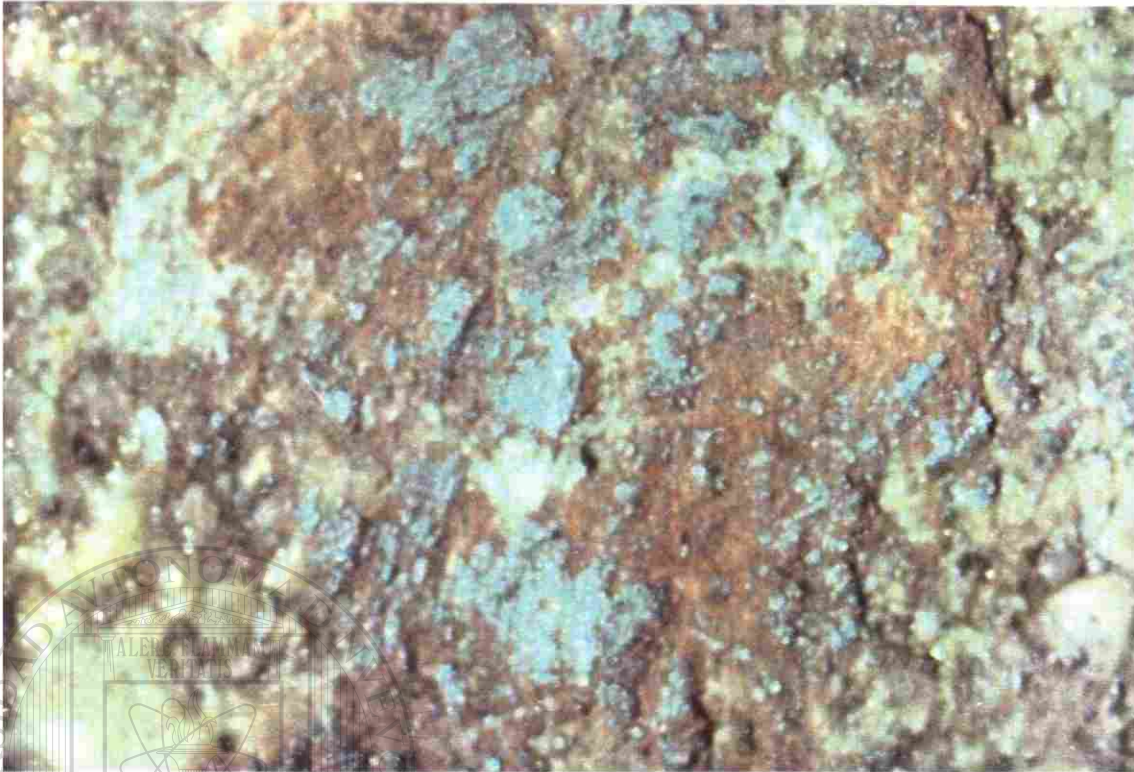
Fotografía 50 Capa en ladrillo fundido



Fotografía 51. Capa en ladrillo tratado con polvo de alumina



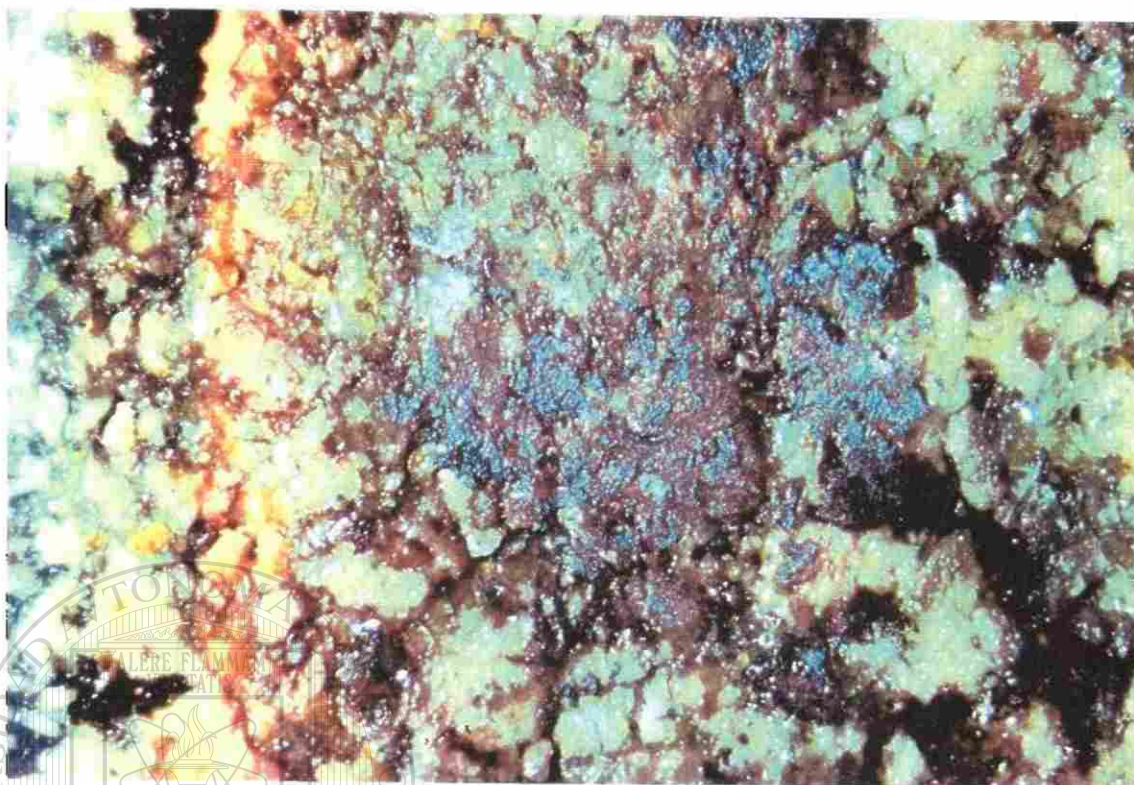
Fotografía 52. Capa en ladrillo tratado con polvo de manganita



Fotografía 53 Capa en ladrillo tratado con polvo de cemento blanco



Fotografía 54 Capa en ladrillo tratado con polvo de cemento gris



Fotografía 55. Capa en ladrillo tratado con polvo de cal

El análisis estadístico de estos resultados se encuentra en la Tabla 13. Se aplicó la prueba Kruskal-Wallis de estadística no paramétrica. Este procedimiento se puede usar cuando las muestras son pequeñas y las varianzas son diferentes. A los resultados se les asigna un rango de menor a mayor, se calcula un rango promedio de cada muestra, y se aplica el procedimiento descrito en la literatura (14) o implícito en los paquetes estadísticos (Statgraphics, SPSS, etc.).

Tabla 13. Análisis de resultados de los tratamientos.

POLVO APLICADO	TAMAÑO DE MUESTRA	RANGO PROMEDIO DE LA MASA ADHERIDA
SIN TRATAMIENTO	5	24.7
ARENA	5	3.8
SILICO-ALUMINOSO	5	7.2
CAL	5	26.4
ALUMINA	5	17.0
FUNDIDO	5	33.0
CEMENTO BLANCO	5	29.8
CEMENTO GRIS	5	34.1
MAGNESITA	5	31.0

La conclusión es que, con más de 95% de confianza, si hay diferencia entre las medias. Como consecuencia de estos resultados, se seleccionó la arena sílica para dar el tratamiento a los ladrillos

7. MODELO DE CRECIMIENTO DE LAS CAPAS

Después de haber encontrado el mecanismo y un tratamiento para resolver la adhesión derivada del mismo, a continuación se presenta un modelo de crecimiento que se obtuvo usando 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 resultaron 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 usando 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 (13) de la Universidad de Tokio. En este diseño se usaron 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.

7.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

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 usó 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, esfuerzo, y temperatura se variaron según la Tabla 14.

El Diseño de experimentos y resultados se muestran en la Tabla 14

Tabla 14 Diseño de experimentos para obtencion de modelo.

EXPERIMENTO	ESFUERZO kg/cm	TIEMPO minutos	TEMPERATURA C	CAPA gr*10 ³
1	5.1	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
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

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

7.2 RESULTADOS

Las Tablas 15, 16, y 17 muestran los resultados estadísticos. Para obtenerlos se puede usar cualquier paquete estadístico como el Statgraphics. La literatura (14) explica el significado de los términos: suma de cuadrados (S.D.F.C.), grados de libertad (G.L.), cuadrados medios (C.M.), estadístico F , y probabilidad de equivocarse al considerar que el modelo es significativo (P).

Tabla 15 Análisis estadístico del modelo.

FUENTE	S.D.F.C	G.L	C.M	F	P
MODELO	34.46	3	11.49	22.46	0.0000
ERROR	13.29	26	0.51		
TOTAL	47.75	29			

Tabla 16 Analisis estadístico de las variables.

VARIABLE	S D E C	G L	C M	F	P
LESFUERZO	23.44	1	23.44	45.85	0.0000
lTIEMPO	6.22	1	6.22	12.16	0.0018
lTEMP	4.80	1	4.80	9.38	0.0050
MODULO	34.46	3			

Esta tabla 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 17 muestra los valores de los coeficientes de las variables del modelo.

Tabla 17 Analisis estadístico de los coeficientes.

VARIABLE	COEFICIENTE	ERROR ESTANDAR	VALOR DE t	P
constante	4.60	0.97	4.77	0.0001
lesfuerzo	0.60	0.09	6.57	0.0000
l tiempo	0.32	0.09	3.58	0.0014
l temp	3014	984	-3.06	0.0050

r = 0.69

Las tres variables resultaron importantes para el modelo explicando un 69% de la variación de la masa adherida. Para un fenómeno complejo como éste y 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. Las Figuras 14 y 15 muestran los datos observados vs lo pronosticos y la grafica del modelo en tres dimensiones. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$M = 99.5 * \sigma^{0.6} * e^{\frac{-5989}{R*T}} * t^{0.32}$$

T temperatura () K

σ esfuerzo normal () Kg.cm²

t tiempo () minutos

M masa adherida () miligramos

R constante de los gases ideales () cal.grmol⁻¹.K

PRONOSTICO VS OBSERVADO

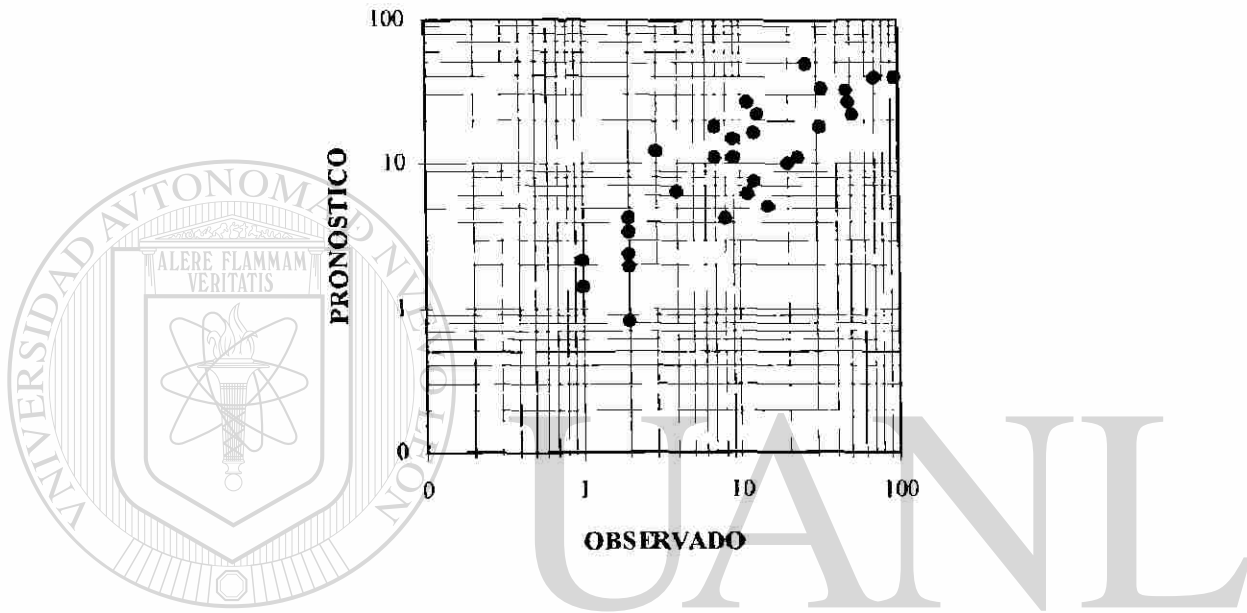
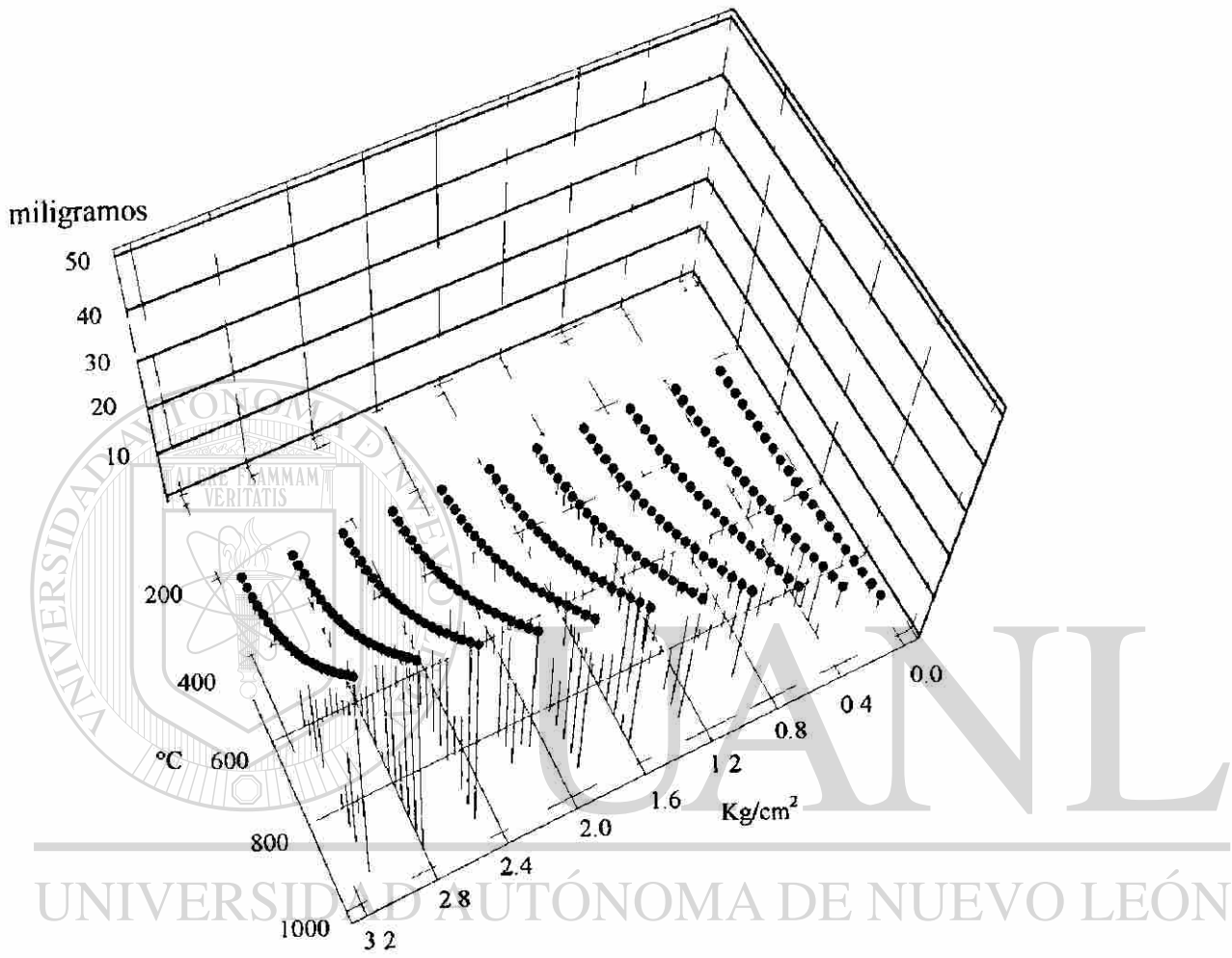


Figura 14. Pronóstico vs valor observado de la masa adherida, (-) mg. * 10.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Figura 15. Masa adherida vs temperatura y esfuerzo.

8. TRATAMIENTOS A ESCALA INDUSTRIAL

El soplete comun usado para tratar las muestras a escala laboratorio no fue, por mucho, adecuado para el tratamiento a escala industrial. Se tuvo que diseñar un quemador y un procedimiento especial, que actualmente se esta patentando. Las Fotografías de la 56 a la 58 muestran algunas etapas del desarrollo del metodo y aparato. Las Figuras 16 y 17 muestran los esquemas de los equipos para hacer el tratamiento a escala industrial a los ladrillos por separado y ya instalados respectivamente. El procedimiento es el siguiente:

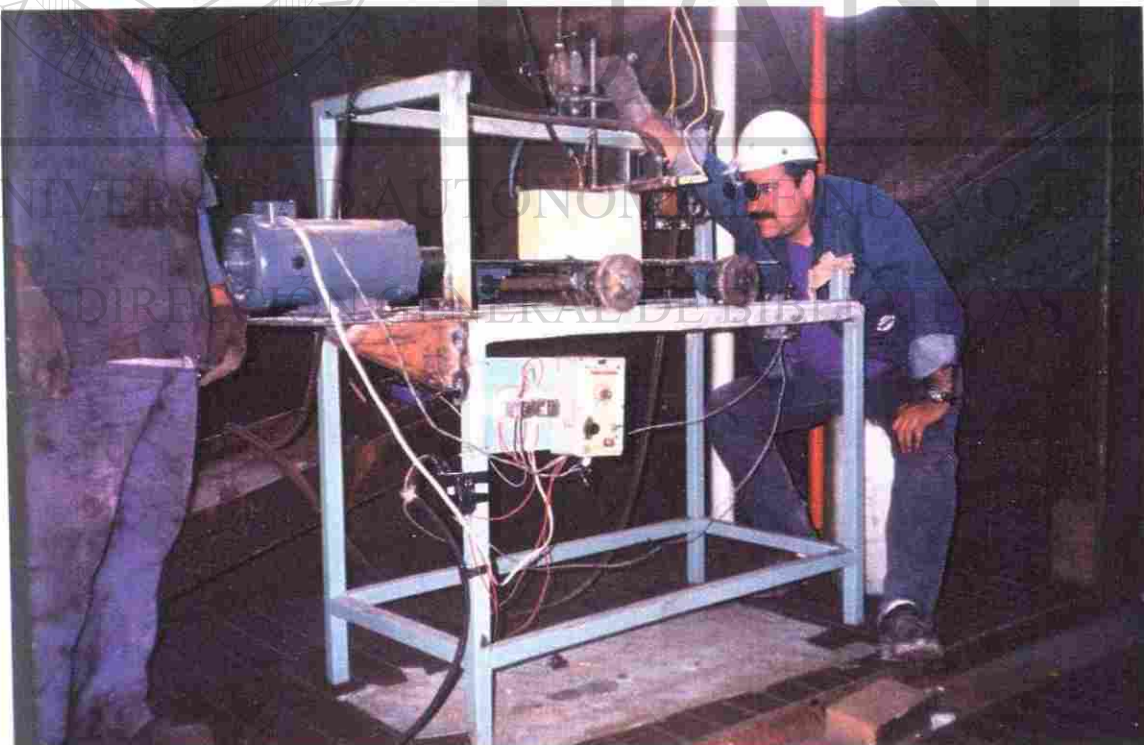
Se aplica el polvo refractario a la superficie del ladrillo para tapar los poros. Se quita el exceso del polvo. Se coloca el ladrillo en la mesa deslizante. Se ajusta la velocidad entre 0.5 y 2.0 cm/seg. Se ajusta el flujo de acetileno a 6 lts./min, y se enciende el quemador. Se ajusta el flujo de oxigeno a 15 lts/min. Se ajusta la distancia de separación entre la superficie del ladrillo y el quemador, este ajuste debe ser continuo.



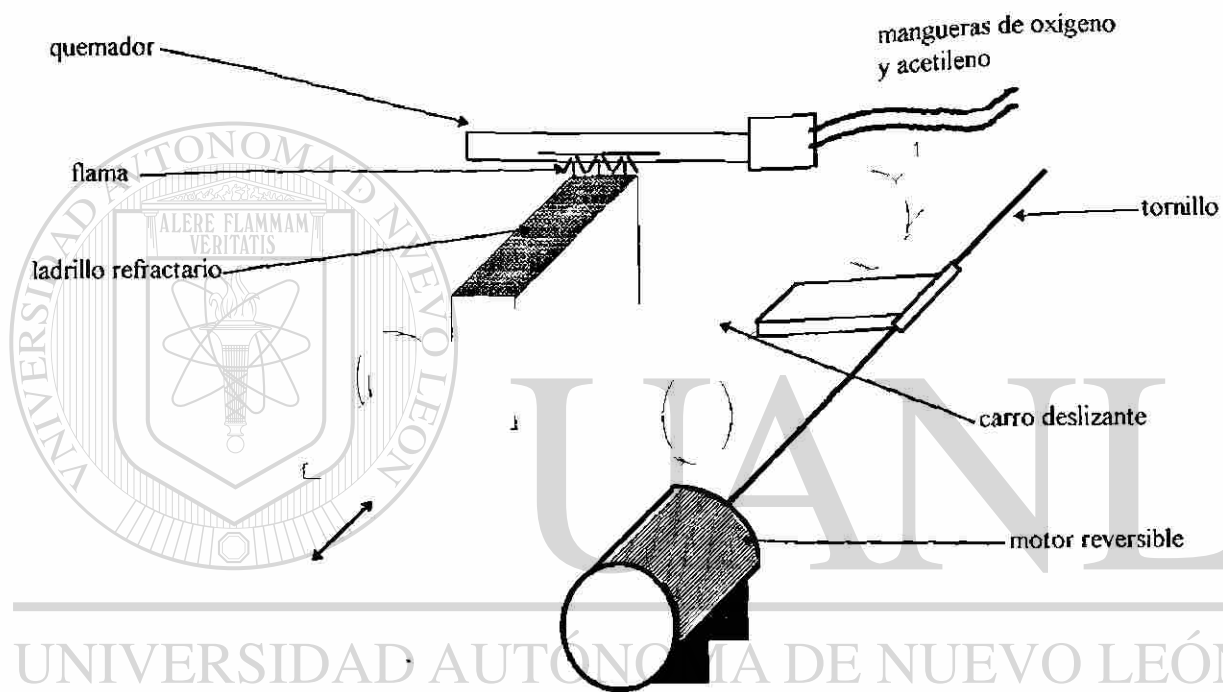
Fotografía 56. Desarrollo de metodo y equipo



Fotografía 57 Desarrollo de metodo y equipo



Fotografía 58 Desarrollo de metodo y equipo



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Figura 16. Esquema del equipo para tratar ladrillos por separado.

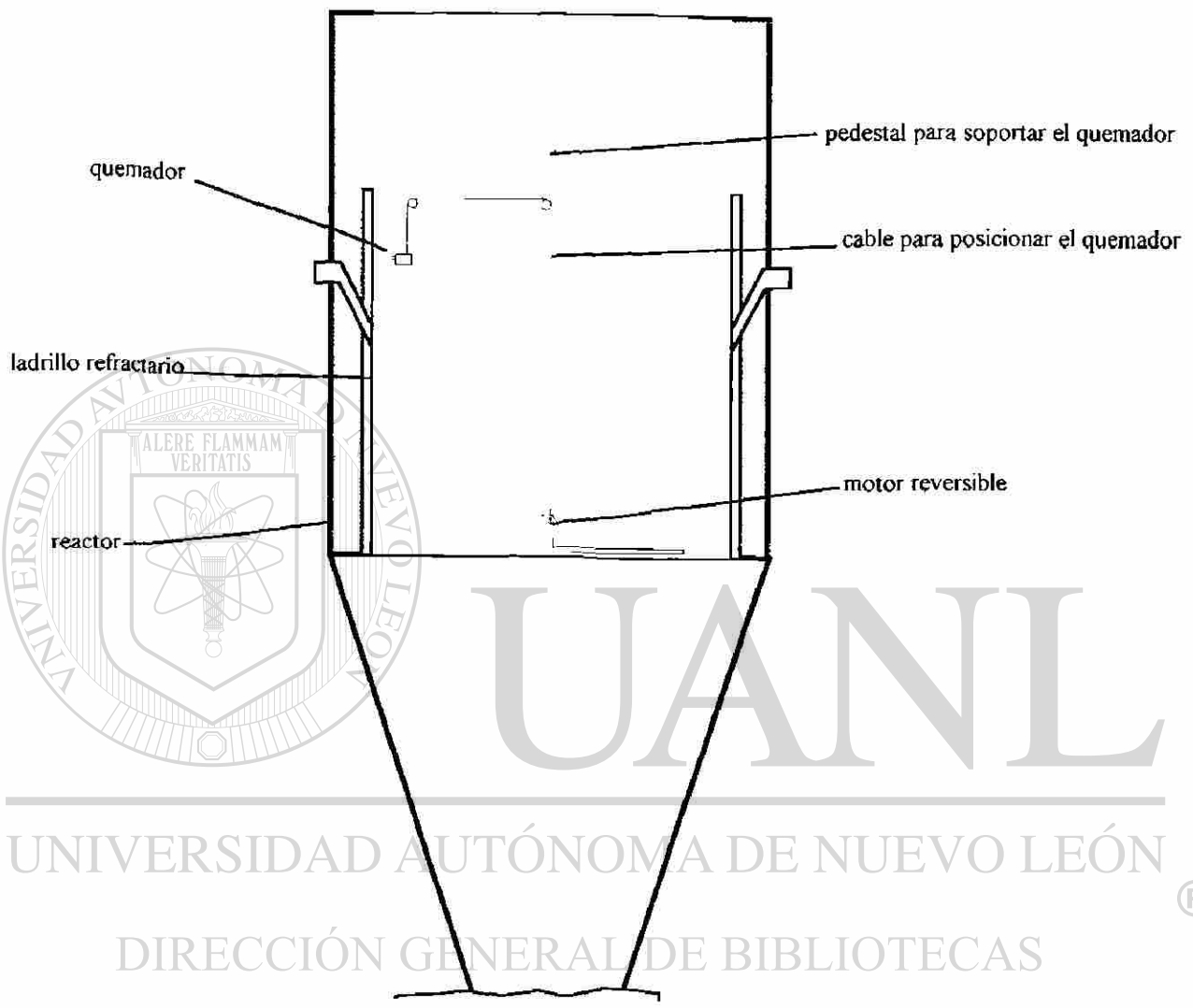
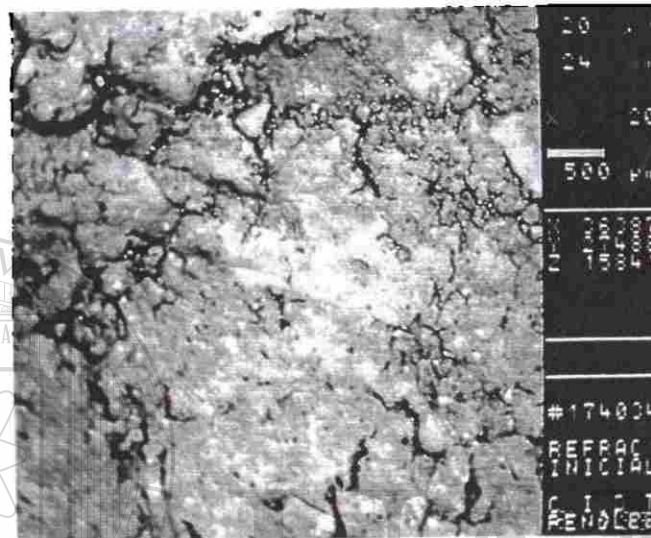


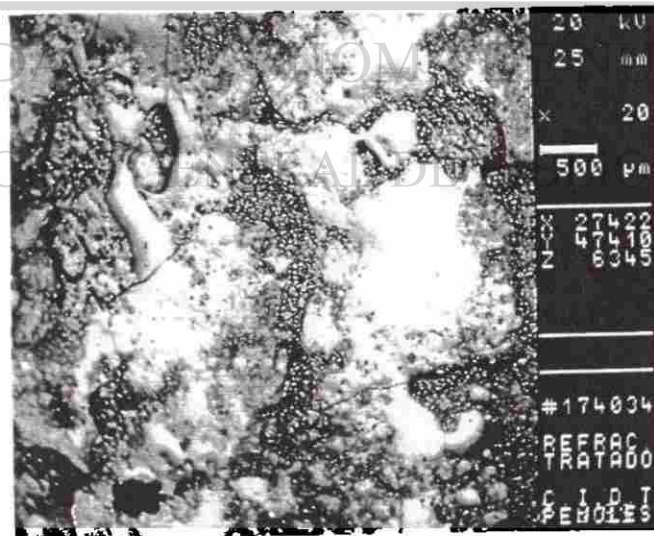
Figura 17. Esquema del equipo para tratar ladrillos en el reactor.

Con este procedimiento se trataron aproximadamente 2000 ladrillos usados para un reactor de HYI SA Monterrey y 4000 nuevos para el reactor de HYI SA Puebla. La diferencia fue que en Puebla el tratamiento se hizo al ladrillo ya instalado.

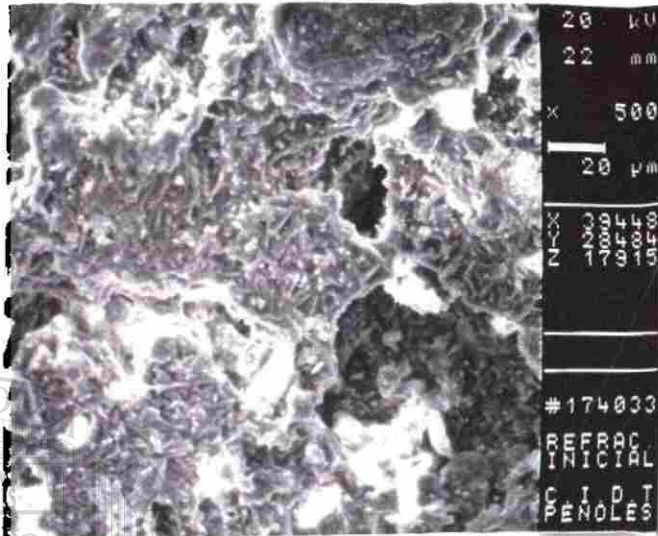
Las fotografías de la 59 a la 67 muestran la comparación de las muestras testigo tratadas a escala industrial con las muestras de ladrillo sin tratar.



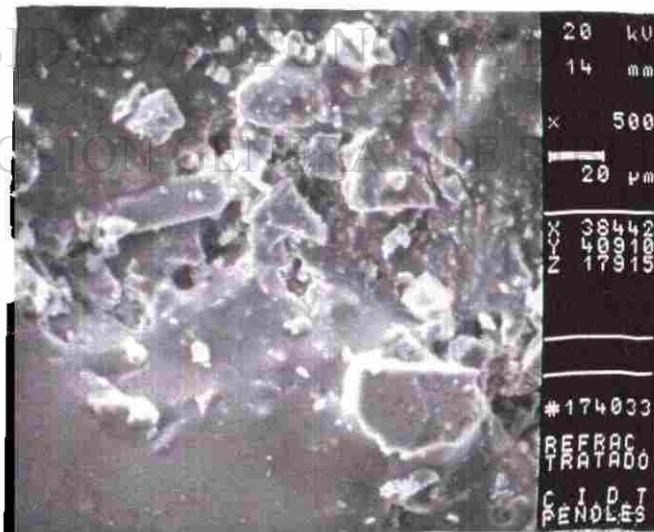
Fotografía 59 Muestra de ladrillo sin tratar a 20x



Fotografía 60 Muestra tratada a 20x

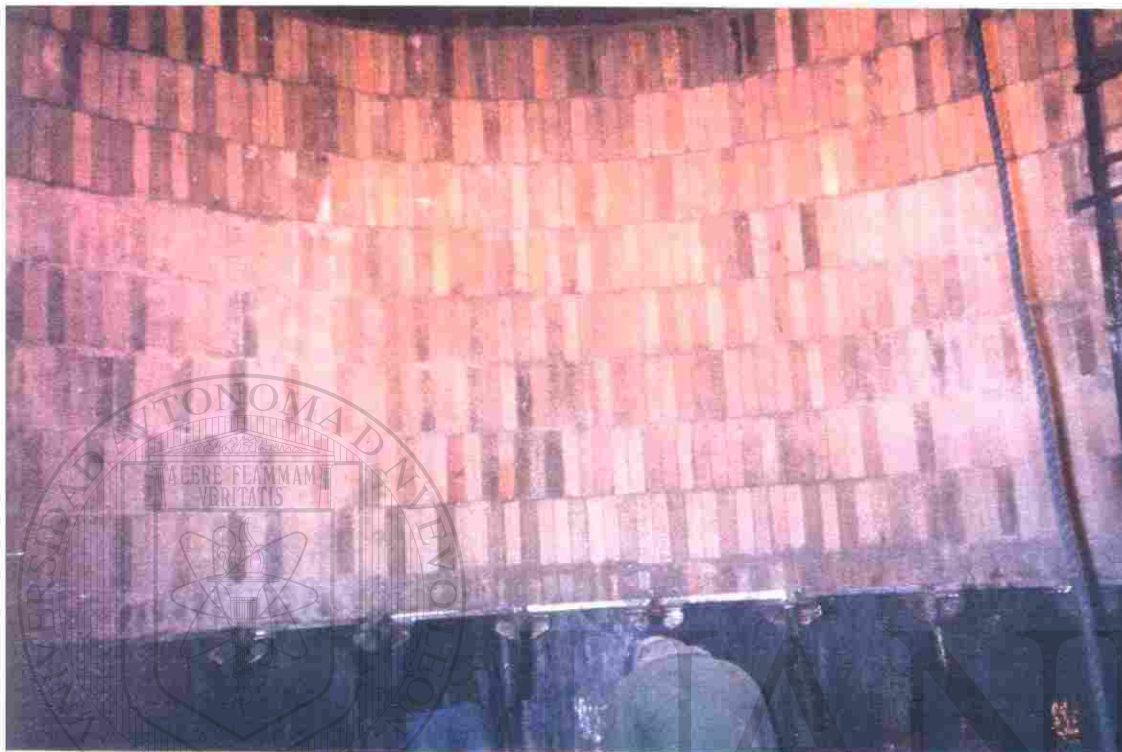


Fotografía 61 Muestra sin tratar a 500x



Fotografía 62 Muestra tratada a 500x

La fotografía 63 muestra parte del ladrillo tratado instalado en el reactor



Fotografía 63 Ladrillo tratado ya instalado

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

9. DISCUSION DE RESULTADOS

RESPECTO AL MECANISMO

En la sección de experimentos para encontrar el mecanismo se planteó la hipótesis de que el esfuerzo cortante era importante en la formación de capas en el laboratorio. Los resultados mostrados en las fotografías 31 y 32 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 de la Tabla 8 y el análisis de varianza de la Tabla 9 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. Dado que en esta tabla algunos de los efectos son en realidad la suma de los efectos de dos o más variables o interacciones, se tiene que aplicar un criterio de selección para señalar las importantes. Ante la imposibilidad práctica de hacer $2^9 = 512$ experimentos para separar completamente los efectos de cada variable e interacción, el investigador aplica su conocimiento fisicoquímico del sistema para seleccionar 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 deformara más y habrá una mayor área de contacto, la temperatura se seleccionó porque a una mayor temperatura el pelet se deformara 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, en base a 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:

1. Entrada de finos o material extruido en los poros o grietas del ladrillo debido a los esfuerzos cortantes.

2. Sinterizado del fierro 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/cm^2 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 fierro esponja sinterizado queda entrelazado con la porosidad del ladrillo formando lo que se puede llamar el anclaje de la capa.

3. 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.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

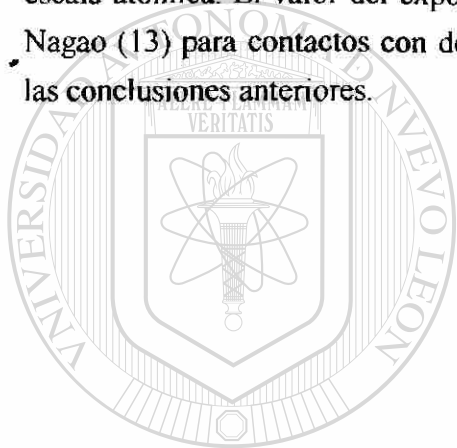
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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 tapar 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 acomodación a escala atómica. El valor del exponente de la variable esfuerzo concuerda con lo propuesto por Nagao (13) para contactos con deformación plástica entre partículas. De nuevo, esto confirma las conclusiones anteriores.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Se logró la formación de capas en el laboratorio gracias a un nuevo diseño donde se usa una celda rotacional que permitió aplicar esfuerzos de corte a la interfase pelet-refractario, con renovación de material según demandaba la degradación. 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 anclaje y crecimiento aquí explicado no se encuentra descrito en la literatura revisada. El mecanismo de entrelazado descrito en la literatura habla de que aplica a materiales fibrosos, o partículas que se puedan 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 refractario se puede evitar tratando la superficie del refractario con arena sílica. El tratamiento se basa en la disminución de la porosidad de la superficie del ladrillo por fusión de ésta y las partículas de arena sílica, usadas 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, y los granos de arena sílica, se rellenan los poros y grietas y se eliminan los filos. 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 los finos, evitando así la formación de las anclas que soportan el peso de la capa. Se desarrolló equipo y procedimientos para aplicar el tratamiento a escala industrial tanto a los ladrillos por separado, como ya instalados en el reactor. Una pieza fundamental del equipo para hacer el tratamiento es el quemador especial que se diseñó para que fuera seguro, con la flama estable, adaptable a ladrillos de diversos tamaños, y además portátil. Se trataron aproximadamente 6000 ladrillos para dos reactores industriales diferentes. La calidad que se puede lograr en la superficie de los ladrillos tratados hace factible el uso de otras geometrías que darán mayor flexibilidad al reactor para el procesamiento de minerales más baratos.

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.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda revisar las especificaciones de calidad de los ladrillos. Específicamente, se recomienda revisar la variabilidad de la composición química y la distribución y tamaño de la porosidad. Durante la aplicación del tratamiento se detectó la heterogeneidad de algunos ladrillos que requerían de un tiempo de secado mucho más largo que los otros. Estos ladrillos eran de color rojizo. Estos ladrillos se comportan en forma diferente a los ladrillos blancos al estar expuestos a la cédula de secado. Pensamos que hay posibilidades de que estos ladrillos se comporten en forma diferente al estar expuestos a los gases reductores, o a los transitorios en la operación de las plantas. Al disminuir la variabilidad en las propiedades de los ladrillos se podría mejorar la calidad y espesor de la capa antiadherente
2. Estudiar la dependencia del valor del exponente de la variable esfuerzo en la ecuación del modelo de crecimiento como una función de la dimensión fractal de la partícula. Pensamos que la adhesión entre partículas, y entre partículas y pared depende de las superficies efectivas de contacto, y éstas de las respectivas dimensiones fractales.
3. Continuar con el diseño de un equipo para secar y calentar el ladrillo y luego aplicarle el tratamiento. Si el ladrillo está totalmente seco y caliente, se evita su decrepitación ya sea por la expulsión súbita del vapor o por el choque térmico. Al aplicar este procedimiento, se podrá controlar la calidad y espesor de la capa superficial con mayor facilidad.
4. Basándose en este desarrollo, que disminuye la fricción y la adhesión entre los pellets de hierro esponja y el ladrillo refractario, se recomienda calcular diseños de reactor que puedan procesar minerales más baratos, o sea más degradables y adhesivos.

11. BIBLIOGRAFIA

1. **JENIKE (A.W.), JOHANSON (J.R.), CARSON (J.W.)**.- Bin loads part 2, concepts. **Journal of engineering for industry, Trans. ASME**. 1973, Series B, Vol. 95, No. 1, p. 1-5.
2. **ROBERTS (A.W.)**.- Bulk solids handling, recent developments and future directions. **Bulk solids handling**. March 1991, Volume 11, Number 1, p. 17-35.
3. **PIETSCH (W.B.)**.- Adhesion and agglomeration of solids during storage, flow, and handling. **Journal of engineering for industry, Trans. ASME**. May, 1969, p. 435-449.
4. **BATES (L.)**.- The storage, feed and collection of loose solids. **Powder handling and processing**. April / June, 1994, Volume 6, Number 2, p. 215-221.
5. **KOCHIHIRA (G.), SATO (M.), UEKI (H.), MIYAMOTO (S.)**.- Dust treatment facilities and its operation in kashima steel works of sumitomo metal ind. **Mc Master Symposium No. 21, Mc Master University, Hamilton, Ontario, Canada, May 11-13, 1993**.- Ontario : W-K Lu, 1993, p. 116-131.
6. **GRANDSEN (J.F.), SHEASBY (J.S.)**.- The sticking of iron ore during reduction by hydrogen in a fluidized bed. **Canadian metallurgical quarterly**. 1974, Vol. 13, Number 4, p. 649-657.
7. **WEAST (R.C.)**.- Handbook of chemistry and physics.- Boca raton, Florida : CRC Press Inc., 1984-1985, p. F-19.
8. **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.
9. **NAGAO (T.)**.- A study of the statics of granular materials. **Bulletin of JSME**, 1967. Volume 10, Number 41, p. 775-785.
10. **NAGAO (T.)**.- The stress-strain relations of granular materials, 1st report. **Bulletin of JSME**, 1978. Volume 21, Number 157, p. 1077-1084.
11. **NAGAO (T.)**.- The stress-strain relations of granular materials, 2nd report. **Bulletin of JSME**, 1979. Volume 22, Number 164, p. 148-155.
12. **NAGAO (T.)**.- The stress-strain relations of granular materials, 3rd report. **Bulletin of JSME**, 1979. Volume 22, Number 167, p. 636-641.
13. **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.
14. **MILLER (I.)**.- Probabilidad y estadística para ingenieros.- México : Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A. , 1985. p. 298-462.
15. **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.
16. **PIETSCH (W.)**.- Pressure agglomeration-state of the art. **Proceedings of the 2nd international symposium on agglomeration, Atlanta, Ga., March 6-10, 1977**.- Baltimore, Md. : Port City Press Inc., 1977. p. 649-677.
17. **CHESTERS (J.H.)**.- Refractories: production and properties.- London : The Iron and Steel Institute, 1973. p. 262-324.
18. **PERRY (R.H.), CHILTON (C.H.)**.- Chemical engineers handbook.- México : McGraw-Hill Kogakusha, 1973, Chapter 3, p. 6-24.

19. **HOUGEN (O.A.), WATSON (K.M.), RAGATS (R.A.)**.- Principios de los procesos químicos.- México : Editorial Reverté, 1972, p. 409.
20. **ADAMSON (A.W.)**.- Physical chemistry of surfaces, third edition.- New York : John Wiley and Sons, 1976, p. 426-454.
21. **GRANT (N.J.), MULLENDORE (A.W.)**.- Deformation and fracture at elevated temperatures.- Cambridge, Massachusetts : The M. I. T. Press, 1965, p. 67-89.
22. **MACKENZIE (J.K.), SHUTTLEWORTH (R.)**.- A phenomenological theory of sintering **Proc. phys. soc.** LXII, 1949, Volume 12-B, p. 833-852.
23. **BIRD (R.B.), STEWART (W.E.), LIGTHFOOT (E.N.)**.- Fenómenos de transporte.- México : Editorial Reverté, S. A. , 1964, p. 27-30.
24. **FLEISCHMAN (M.), TILDESLEY (D.J.), BALL (R.C.)**.- Fractals in the natural sciences.- New Jersey : Princeton University Press, 1989, p. 3-16.
25. Catálogo de Refractarios Green.- México : Peñoles, S. A., 1992, p. 4.
26. **SZEKELY (J.), EVANS (J.W.), SOHN (H.Y.)**.- Gas-solid reactions.- New York : Academic Press, 1976, p. 54-56.
27. **SCHMALZRIED (H.)**.- Solid state reactions. **Monographs in modern chemistry, Volume 12**.- Weinheim, Deerfield, Florida, Basel : Verlag Chemie., 1981, p. 11-18.
28. **OOMS (M.), ROBERTS (A.W.)**.- Significant influence on wall friction in the gravity flow of bulk solids. **Bulk solids handling**. 1985, Volume 5, Number 6, p. 1271-1277.
29. **ROBERTS (A.W.), OOMS (M.), SCOTT (O.J.)**.- Surface friction and wear in the storage, gravity flow and handling of bulk solids. **Proc. conf. War on wear, wear in the mining and mineral extraction industry, Instn. of mech. engs., Nottingham, U.K., 1984**.- New South Wales : The University of Newcastle, 1984, p. 123-134.
30. **MANDELBROT (B.B.), PASSOJA (D.E.), PAULLAY (A.J.)**.- Fractal character of surfaces of metals. **Nature**. 1984, Volume 308, p. 721-722.
31. **NARITA (K.), KANEKO (D.), KIMURA (Y.)**.- Study on clustering and its prevention in the shaft furnace for direct reduction process. **Trans. ISIJ**. 1980, Volume 20, p. 228-235.
32. **JENIKE (A.W.), ELSEY (P.J.), WOOLEY (R.H.)**.- Flow properties of bulk solids. **ASME**. 1960, Volume 60, p. 1-14.
33. **BEN-JACOB (E), GARIK (P.)**.- The formation of patterns in non-equilibrium growth. **Nature**. 1990, Volume 343, p. 523-530.

12. APENDICES

12.1 CALCULO DE ESFUERZOS PUNTUALES

ECUACION DE RUMPF (8)

$$\sigma_z = \frac{9(1-\varepsilon)}{8\pi d^2} kH$$

donde:

σ_z fuerza por unidad de área de cama

ε porosidad entre partículas

d diametro de partícula

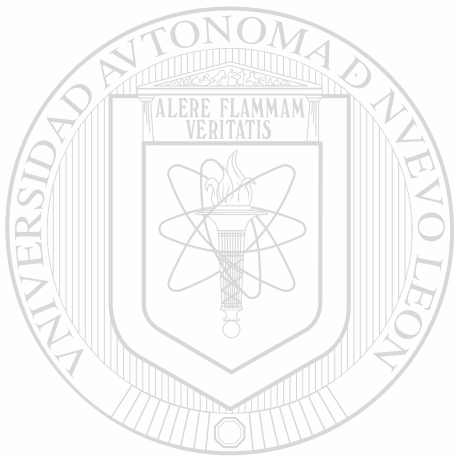
k número promedio de puntos de contacto entre una partícula y sus vecinas

H fuerza en el punto de contacto

Mediante esta ecuación podemos estimar los esfuerzos puntuales. Por ejemplo para $\varepsilon = 0.4$, $d = 1.27$ cm, y $k = 3$, $\sigma_z = 1$ Kg/cm². En este caso H sería igual a 2.5 Kg. pero el esfuerzo puntual sería tomando en cuenta el área de contacto puntual que es de 100 a 1000 veces menor que el área transversal de la partícula. Por lo tanto en los puntos de contacto realmente existen esfuerzos que hacen fallar plásticamente al material. Si la temperatura es propicia para que haya un sinterizado entonces se refuerzan los enlaces por la mayor área de contacto generada por la falla plástica del material en los puntos de contacto. Esta adhesión, que existe entre el material caliente que fluye plásticamente en los puntos de contacto donde se generan grandes esfuerzos cortantes por la interacción de los esfuerzos a compresión y el movimiento, es la que permite el crecimiento de las capas.

12.2 CALCULO DEL ESFUERZO NORMAL A LA PARED

PERFILES DE PRESION EN REACTOR 3M5 PARA APLICACION A PRUEBAS DE ADHESION Y SIMULACION DE LAJAS



UANL

Ing. María del Carmen Rodríguez G.

Asesor: Ing. Jorge Berrón

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Abril de 1992

INDICE

PRESIONES MAXIMAS EN ZONAS CILINDRICA Y CONICA DEL REACTOR

Objetivos ----- 1

Dimensiones del reactor ----- 1

Resultados ----- 1

Conclusiones ----- 3

Apendices

I PERFILES DE PRESION

I.1.Comparación de esfuerzos.

I.2.Variación de esfuerzos

"Refractario nuevo vs usado"

I.3. Esfuerzo cortante a la pared

II PROGRAMA DE COMPUTADORA

II.1.Programa PERFILES que calcula los esfuerzos en el reactor.

III.ECUACIONES UTILIZADAS PARA LA SUMA DE FUERZAS EN EL REACTOR

III.1.Igualacion de fuerzas. en el cono

IV.PERFILES DE PRESION REACTOR R2



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



PRESIONES MAXIMAS EN ZONAS CILINDRICA Y CONICA DEL REACTOR

Calculadas con el programa "PERFILES"

Objetivos:

1.- Ajustar condición de operación de prueba de adhesión para simular reactores con descarga fría o descarga caliente.

2.- Proporcionar esfuerzos normales y cortantes en la pared para simulación de lajas.

Dimensiones del reactor:

Diaméto del cilindro 1 = 4.796 mts.

Altura cilindro 1 = 7.764 mts.

Diaméto del cilindro 2 = 5.545 mts..

Altura cilindro 2 = 8.763 mts.

alfa=16°(ángulo del cono con la vertical).

Altura del cono = 9.429 mts.

Densidad en el cilindro 1 = 1900 Kg/m³.

Densidad en el cilindro 2 y cono = 1600 Kg/m³.

phi_{cono} =11° (Pared metálica pulida).

Resultados

$K_{cilindro}=0.4$ $\Delta=25^\circ$ $\phi_{cilindro}=45^\circ$ (Refractario Nuevo).

	Z (mts)	Presión en Z Kg/cm ²	Presión normal a la pared Kg/cm ²	Esfuerzo cortante en la pared Kg/cm ²
cil1	7.764	0.526	0.211	0.211
cil2	16.527	1.036	0.414	0.414
cono	+16.527	1.036	2.162	0.420

$K_{cilindro}=0.4$ $\Delta=25^\circ$ $\phi_{cilindro}=35^\circ$ (Refractario Usado).

	Z (mts)	Presión en Z Kg/cm ²	Presión normal a la pared Kg/cm ²	Esfuerzo cortante en la pared Kg/cm ²
cil1	7.764	0.680	0.272	0.190
cil2	16.527	1.337	0.535	0.374
cono	+16.527	1.337	2.789	0.542

$K_{cilindro}=0.6$ $\Delta=14^\circ$ $\phi_{cilindro}=45^\circ$ (Refractario Nuevo).

	Z (mts)	Presión en Z Kg/cm ²	Presión normal a la pared Kg/cm ²	Esfuerzo cortante en la pared Kg/cm ²
cil1	7.764	0.366	0.223	0.223
cil2	16.527	0.721	0.440	0.440
cono	+16.527	0.721	1.056	0.205

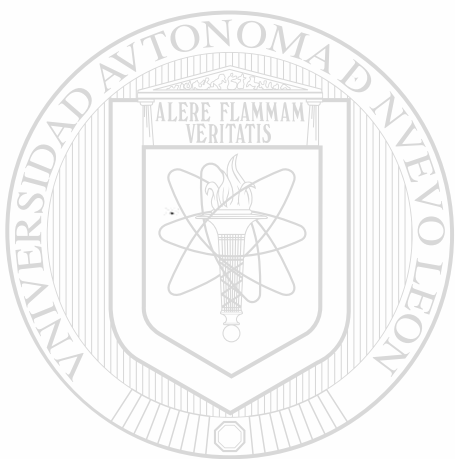
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
 $K_{cilindro}=0.6$ $\Delta=14^\circ$ $\phi_{cilindro}=35^\circ$ (Refractario Usado). ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

	Z (mts)	Presión en Z Kg/cm ²	Presión normal a la pared Kg/cm ²	Esfuerzo cortante en la pared Kg/cm ²
cil1	7.764	0.499	0.305	0.213
cil2	16.527	0.983	0.600	0.420
cono	+16.527	0.983	1.439	0.280

Conclusiones:

1.- En algunas zonas del reactor, según se calcula de acuerdo a las teorías de Walker y Walters, existen esfuerzos que son un 85% mayores que el 1.5 Kg/cm² actualmente usado como máxima presión en la prueba de adhesión.

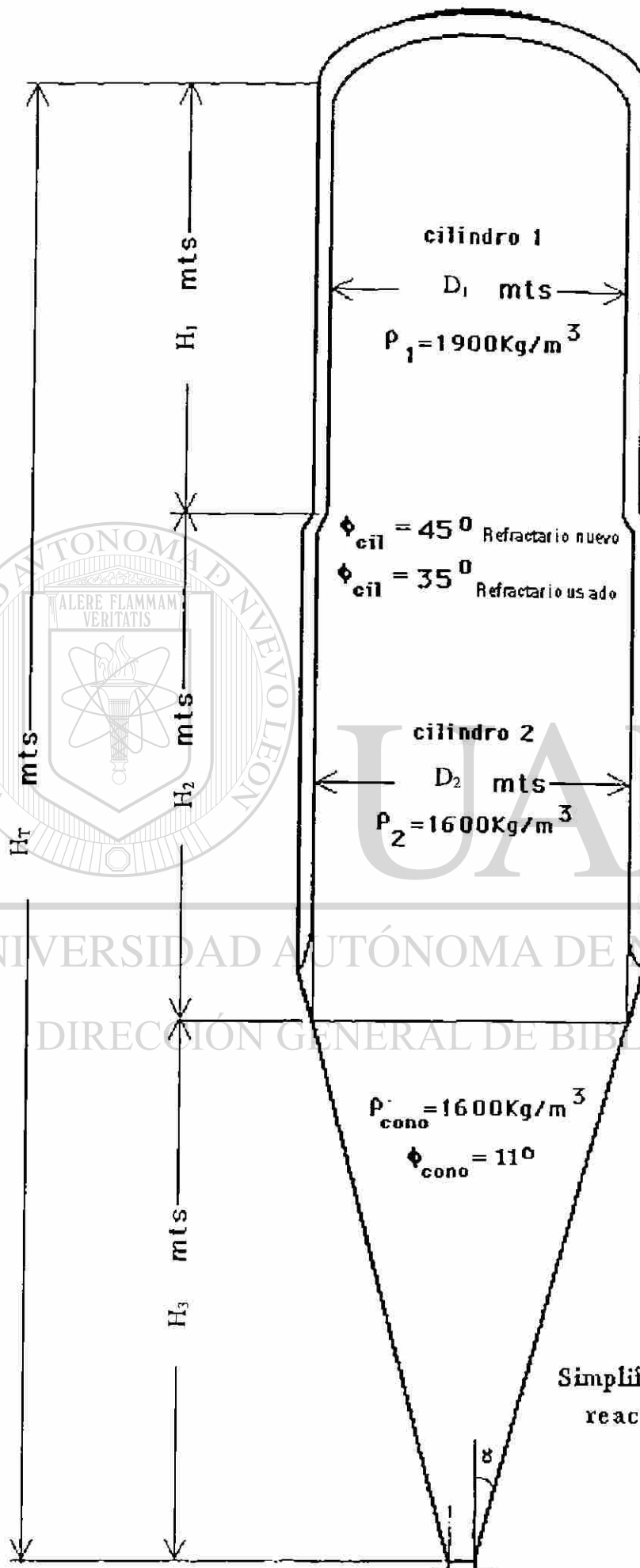


UANL

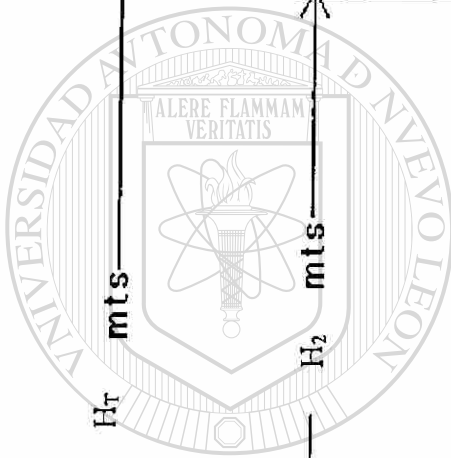
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Simplificaciones de la geometría del reactor 3M5 para propósitos de cálculo

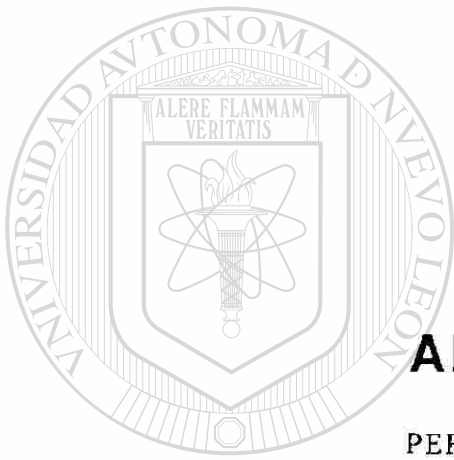


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





APENDICE I

PERFILES DE PRESION

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

COMPARACION DE ESFUERZOS

PHI DEL CILINDRO DE 450



K=0.6 K=0.4

mcrg



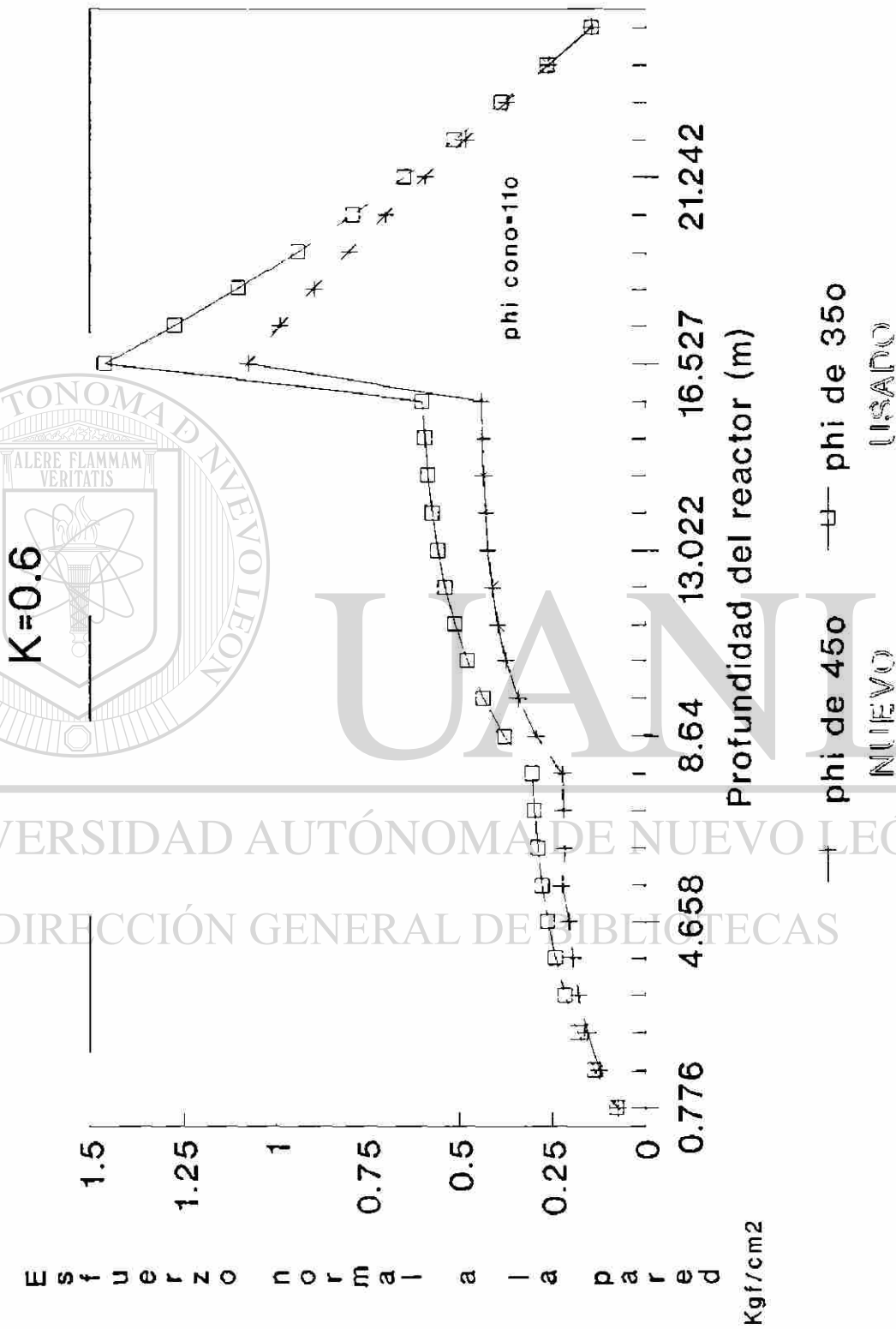
COMPARACION DE ESFUERZOS

PHI DEL CILINDRO DE 350



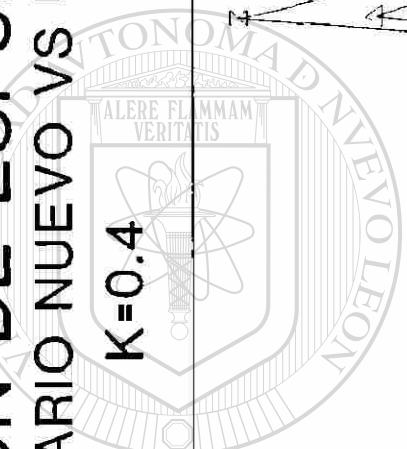
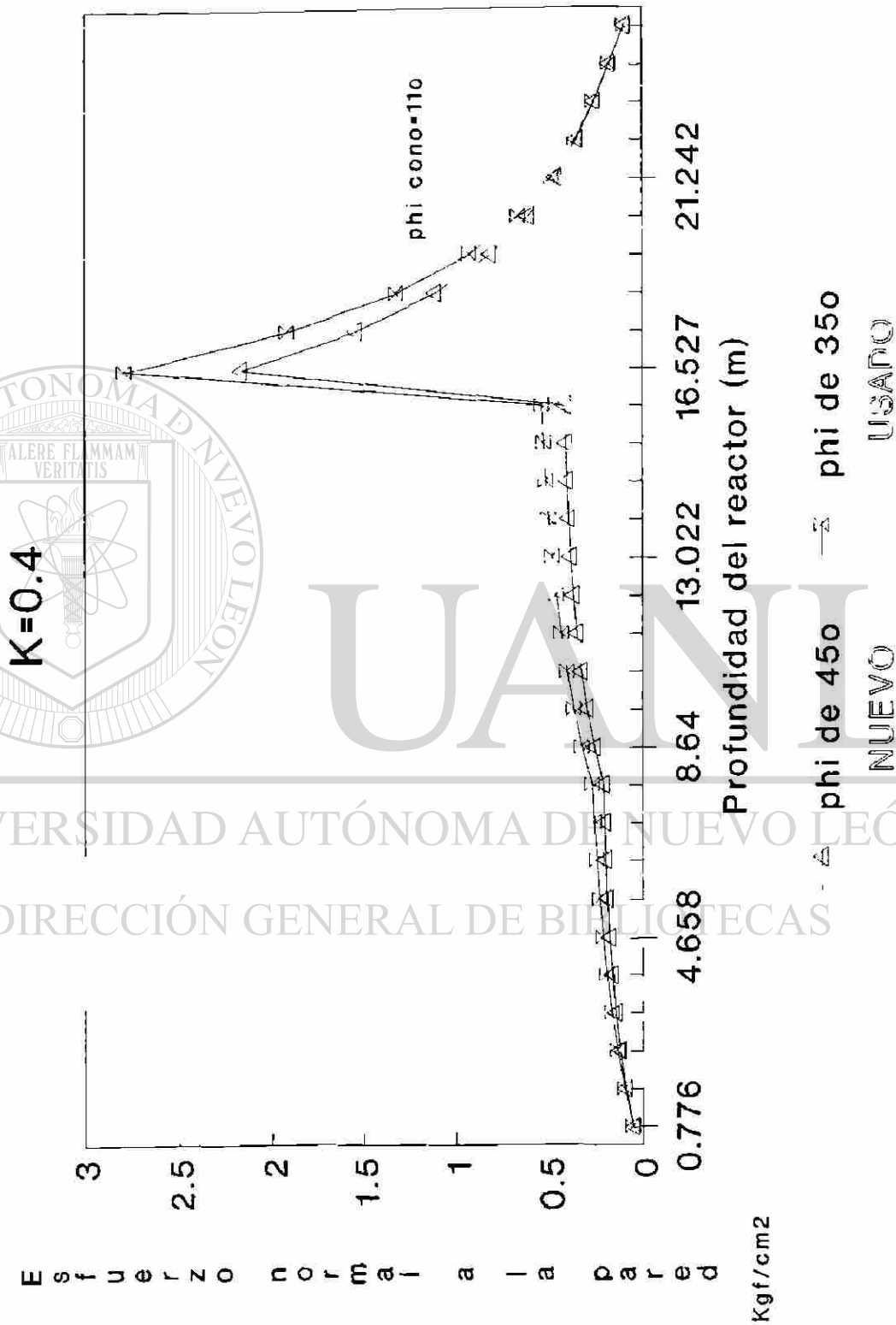
mcrjg

VARIACION DE ESFUERZOS REFRACTARIO NUEVO VS USADO



mcrg

VARIACION DE ESFUERZOS REFRACTARIO NUEVO VS USADO

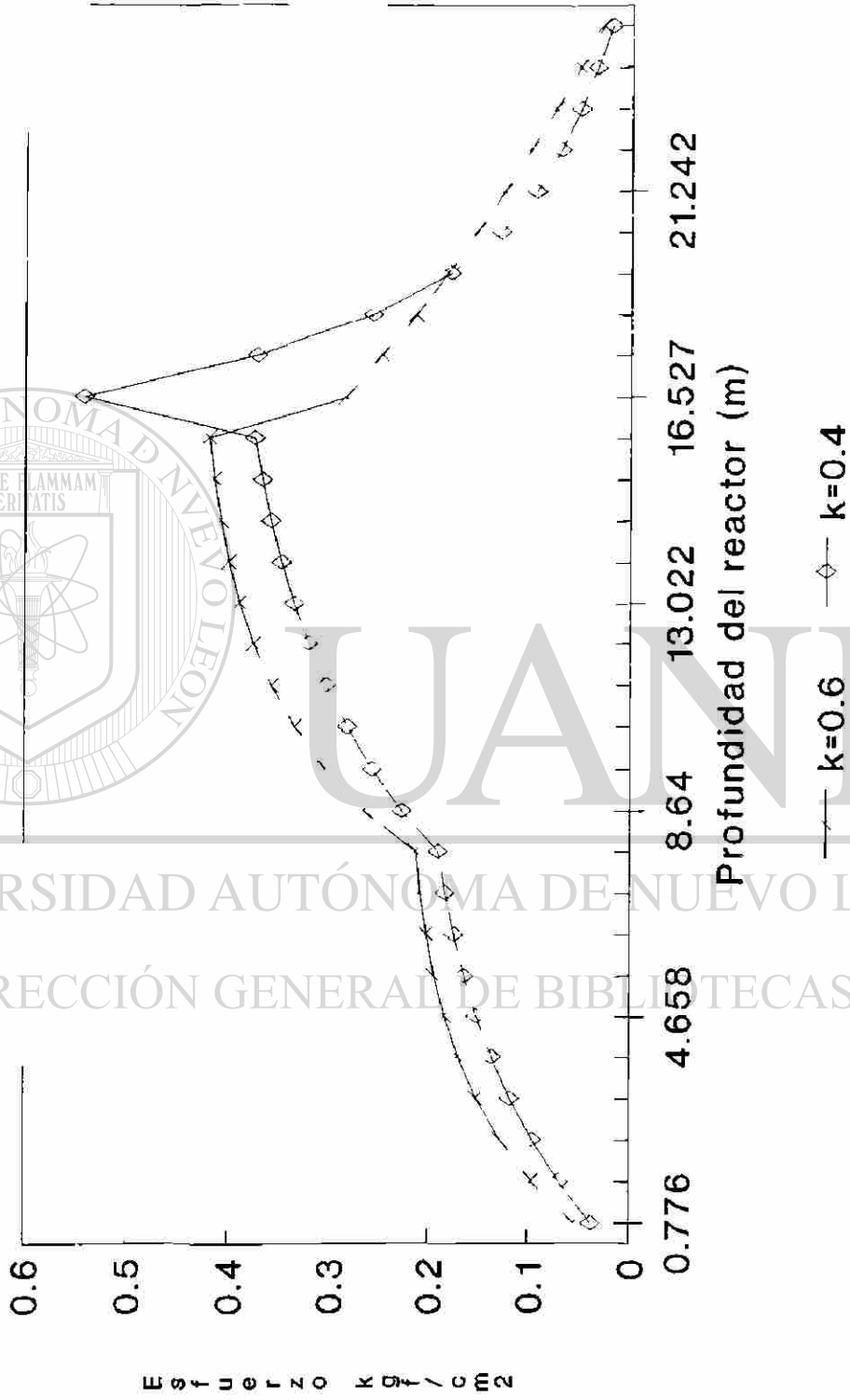


UANL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ESFUERZO CORTANTE

A LA PARED

phi de 350



mcrg

ESFUERZO CORTANTE A LA PARED

phi de 45o

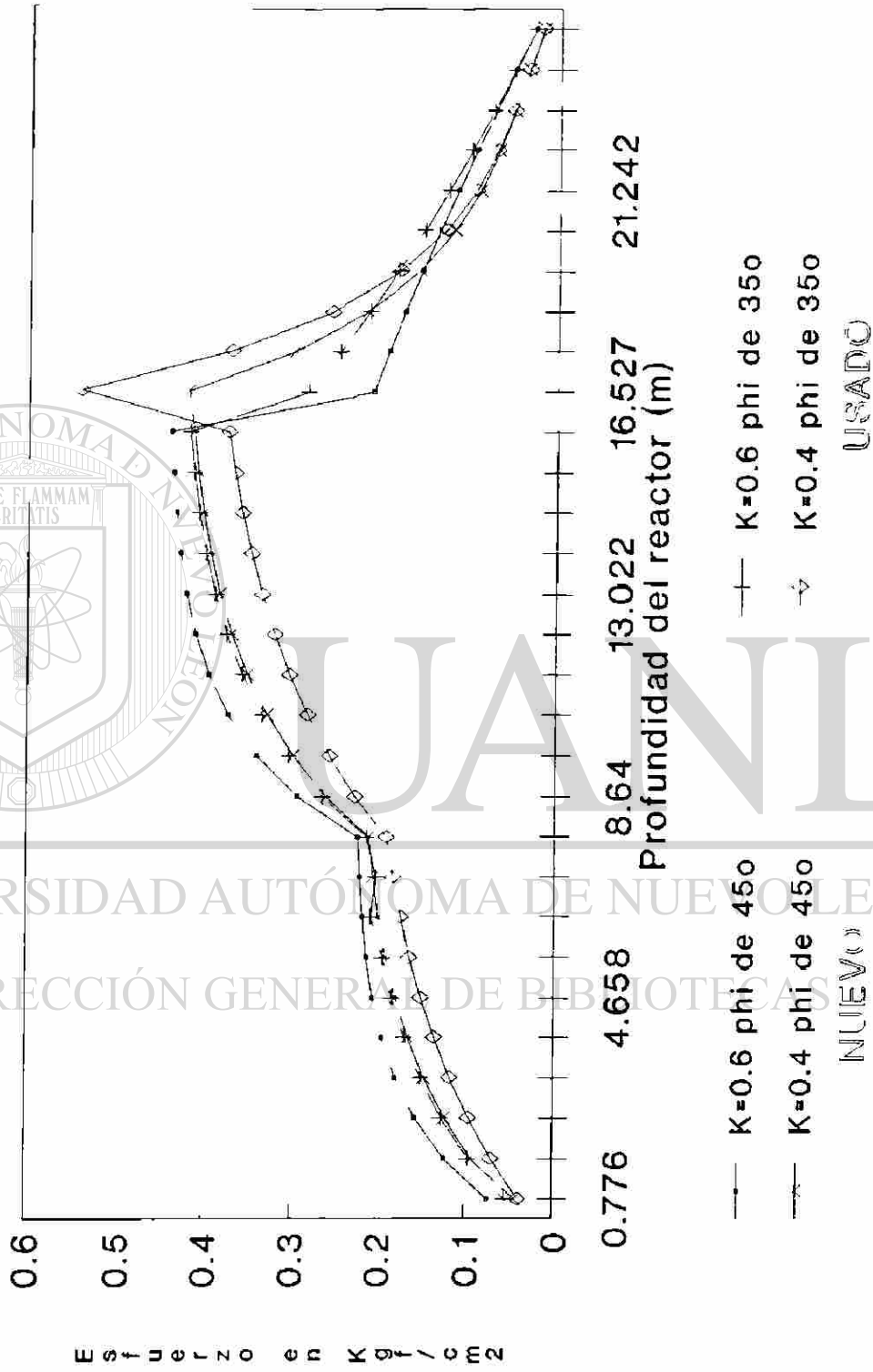


(K=0.6) * + (K=0.4)

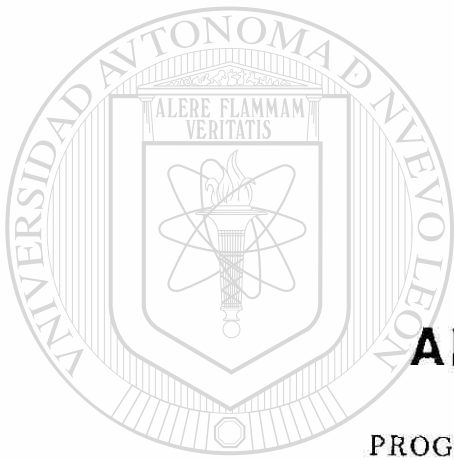


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ESFUERZO CORTANTE A LA PARED



morg



APENDICE II

PROGRAMA DE COMPUTADORA

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

PROGRAMA PERFILES QUE CALCULA LOS ESFUERZOS EN EL REACTOR

Introducción:

Este programa proporciona los esfuerzos generados en el reactor, en las regiones cilíndrica y cónica, a diferentes intervalos de altura.

Los esfuerzos calculados son:

Esfuerzo en Z	(σ_z)
Esfuerzo normal a la pared	(σ_w)
Esfuerzo cortante en la pared	(τ_w)

Ecuaciones utilizadas

En la sección cilíndrica.

$$\gamma = \rho g$$

$$\mu = \tan \phi_{cil}$$

$$\kappa_j = (1 - \sin \delta) / (1 + \sin \delta)$$

$$\sigma_z = \gamma D / (4 \mu \kappa_j) (1 - \exp(-4 \mu \kappa_j z / D)) \quad \text{Ecuación de Janssen}$$

$$\sigma_w = \kappa_j \sigma_z$$

$$\tau_w = \mu \kappa_j \sigma_z$$

U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En la sección cónica. *Teoría de Walter*

$$2\varepsilon = \pi/2 + \phi_{\text{cono}} \pm \cos^{-1} (\sin \phi_{\text{cono}} / \sin \delta)$$

+ Condición estática

- Condición dinámica

$$\eta = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(2\varepsilon + 2\alpha)}{\cos(2\varepsilon + 2\alpha) + 1/\sin \delta} \right)$$

$$E = \frac{\sin \delta \sin(2\varepsilon + 2\alpha)}{(1 - \sin \delta \cos(2\varepsilon + 2\alpha))}$$

$$c = (\tan \eta / \tan \delta)^2$$

$$y = \frac{2}{3c} (1 - (1-c)^{3/2})$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$D_n = \frac{\cos \eta (1 + \sin^2 \delta) \pm 2 (\sin^2 \delta - \sin^2 \eta)^{1/2}}{\cos \eta ((1 + \sin^2 \delta) \pm 2 y \sin \delta)}$$

$$\cos \eta ((1 + \sin^2 \delta) \pm 2 y \sin \delta)$$

+ Condición estática

- Condición dinámica

$$K = 2 \left(\frac{E D_n}{\tan \alpha} + D_n - 1 \right)$$

$$F = \frac{\sin \delta \sin 2\varepsilon}{1 - \sin \delta \cos(2\varepsilon + 2\alpha)}$$

Para $2\varepsilon + 2\alpha$ menor que π

$$\sigma_z = \gamma D \frac{(1 - 2 Z/D \tan \alpha)}{2 \tan \alpha (K-1)} (1 - (1 - 2 Z/D \tan \alpha)^{K-1}) + \sigma_{z_0} (1 - 2 Z/D \tan \alpha)^K$$

$$\sigma_w = \frac{F D n}{\mu} \sigma_z$$

$$\tau_w = F D n \sigma_z$$

Para $2\varepsilon + 2\alpha$ mayor que π

Teoría de Walker

$$\sigma_z = \sigma_{z_0} + (Z - Z_0) \cdot \gamma D$$

$$\sigma_w = \frac{\sin 2\alpha \cos \phi}{\sin(\phi + 2\alpha) + \sin \phi} \sigma_z \quad \tau_w = \mu \sigma_w$$

Nomenclatura

$\alpha(=)$ Angulo del cono medido de la vertical.

$\varepsilon(=)$ Angulo entre el esfuerzo principal y el normal en la pared del cono.

δ = Angulo efectivo de fricción interna

$\gamma(=)$ Peso específico

$\mu(=)$ Coeficiente de fricción con la pared ($\tan \phi$)

$\phi(=)$ Angulo cinemático de fricción interna del cilindro o cono.

ρ = Densidad del sólido

σ_z = Esfuerzo en z (Kg/cm²).

σ_w = Esfuerzo normal a la pared (Kg/cm²).

τ_w = Esfuerzo cortante a la pared (Kg/cm²).

D = Diámetro del cilindro

Dn = Factor de distribución.

g = Aceleración de la gravedad

Kj = Valor constante del cilindro para la ecuación de Janssen.

Manual del Usuario

- 1.- Teclar <PERFILES> para la ejecución del programa.
- 2.- Teclar <RETURN> para continuar.
- 3.- Teclar, después de que se pida, los datos de delta, phi, alpha, diámetro del cilindro 1, altura del cilindro, densidad del material, número de intervalos deseados para esta sección; presionando <RETURN> después de teclar cada dato.
- 4.- Después aparecerán los resultados de los esfuerzos en Kg/cm², agregándose las componentes en el eje x y y de los esfuerzos cortante y normal a la pared en el siguiente orden:

Z(m) sigmaz sigmaw sigmawy sigmawx taow taowy taowx

Teclar <RETURN> para continuar en el cilindro 2.

- 5.- Teclar los valores de diámetro del cilindro 2, altura del mismo, densidad del material en esta zona y el número de intervalos deseados para la evaluación de los esfuerzos en esta sección. Teclar <RETURN> para continuar.

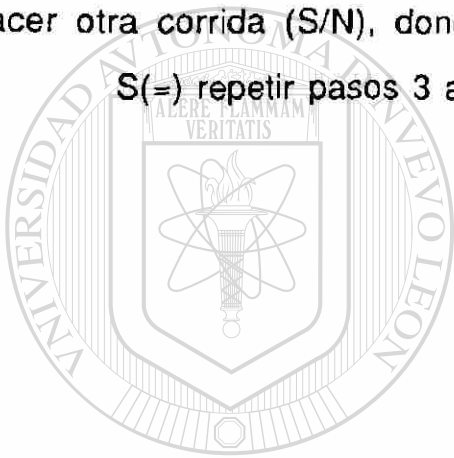
6.- Se presentaran los resultados igual que el punto 4. Teclear <RETURN> para continuar con la sección cónica.

7.- Teclear los datos de phi, altura y número de intervalos para el cono, además de si es o no condición estática. Teclear <RETURN> y aparecerá el resultado de las variables necesarias para el cálculo de los esfuerzos, tales como F,Dn,E,n,etc. Teclear <RETURN>. Aparecerán por último los esfuerzos que se presentan en el cono en el mismo orden que para el cilindro.

8.- Se preguntará al usuario, después de exponer los resultados, si desea hacer otra corrida (S/N), donde:

S(=) repetir pasos 3 al 7

N(=) Fin del programa

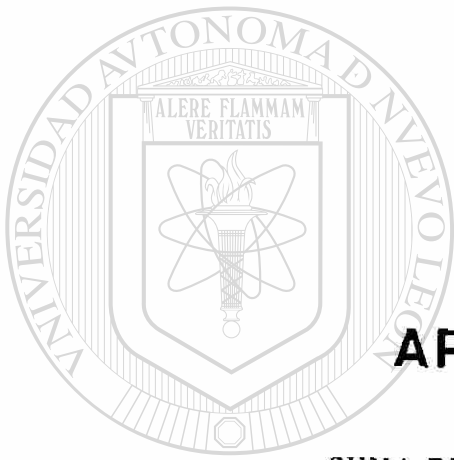


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



APENDICE III

UANL

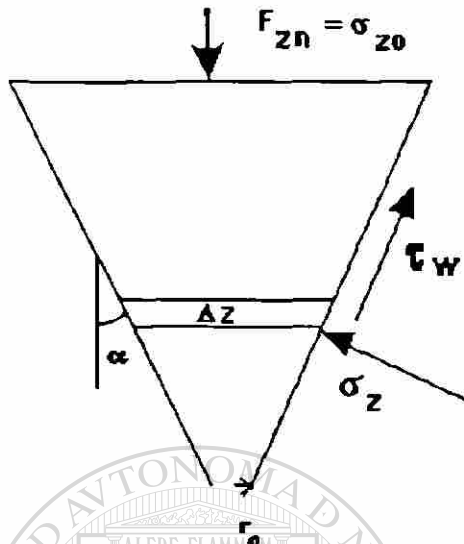
SUMA DE FUERZAS EN EL REACTOR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

IGUALACION DE FUERZAS EN EL CONO



$$\Delta r = \Delta z \tan \alpha$$

$$r_{i+1} = r_i + \Delta z \tan \alpha$$

$$\text{Area de la superficie lateral} = \pi ((r_i + r_{i+1}) (\Delta z^2 + (\Delta z \tan \alpha)^2)^{1/2})$$

Balance de Fuerzas

$$F_{zn} + W = \sum ((r_i + r_{i+1}) (\Delta z^2 + (\Delta z \tan \alpha)^2)^{1/2} \pi) (\sigma_{wi} \sin \alpha + \tau_{wi} \cos \alpha)$$

$$F_{zn} + W = (\Delta z^2 + (\Delta z \tan \alpha)^2)^{1/2} \pi \sum ((r_i + r_{i+1}) (\sigma_{wi} \sin \alpha + \tau_{wi} \cos \alpha))$$

$$\frac{F_{zn} + W}{\cos \alpha} = (\Delta z^2 + (\Delta z \tan \alpha)^2)^{1/2} \pi \sum ((r_i + r_{i+1}) (\sigma_{wi} \tan \alpha + \tau_{wi}))$$

$$\frac{F_{zn} + W}{\cos \alpha} = (\Delta z^2 + (\Delta z \tan \alpha)^2)^{1/2} \pi \sum ((2r_i + r_{i+1} - r_i) \sigma_{wi} (\tan \alpha + \tan \phi))$$

$$\frac{F_{zn} + W}{\cos \alpha} = (\Delta z^2 + (\Delta z \tan \alpha)^2)^{1/2} \pi \sum ((2r_i + \Delta z \tan \alpha) \sigma_{wi} (\tan \alpha + \tan \phi))$$

quedando finalmente que:

$$\underline{F_{zn+W}} = (\Delta z^2 + (\Delta z \tan \alpha)^2)^{1/2} \pi (\tan \alpha + \tan \phi) \sum (2r_i + \Delta z \tan \alpha) \sigma_{wi} \cos \alpha$$

α (=) Angulo del cono medido de la vertical

ϕ (=) Angulo cinemático de fricción interna

σ_{wi} (=) Esfuerzo normal a la pared en el intervalo i

F_{zn} (=) Fuerza en z ejercida por el cilindro (condición frontera)

$$F_{zn} = \sigma_{zo} * \text{Area transversal}$$

Donde

$$r_0 = 0.2875 \text{ mts}$$

$$r_{i+1} = r_i + \Delta z \tan \alpha$$

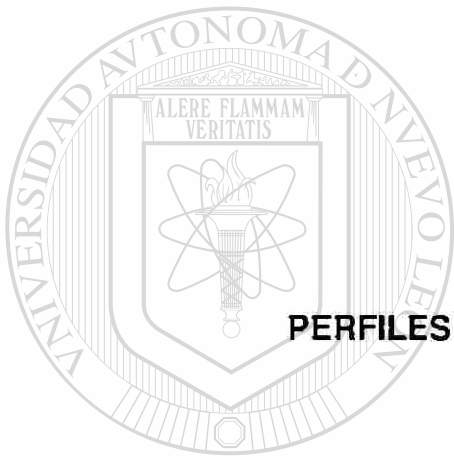
Para esta ecuación se toma un número considerable de intervalos y por medio del programa PERFILES se obtienen los esfuerzos normales a la pared en cada Δz . Después se realiza la sumatoria de la ecuación comenzando de la parte inferior del cono r_0 hacia la interfase cono-cilindro.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Resultados

$$\underline{F_{zn+W}} = (\Delta z^2 + (\Delta z \tan \alpha)^2)^{1/2} \pi (\tan \alpha + \tan \phi) \sum (2r_i + \Delta z \tan \alpha) \sigma_{wi} \cos \alpha$$

	Desviación %	
304,388.1 = 312,374.2	2.62%	Para 30 intervalos
304,388.1 = 309,669.6	1.74%	Para 50 intervalos
<u>304,388.1</u> = <u>304,677.9</u>	0.1%	Para 100 intervalos



APENDICE IV
PERFILES DE PRESION DEL REACTOR R2

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

PRESIONES MAXIMAS EN EL REACTOR R2

Calculadas con el programa <PERFILES>

Dimensiones del reactor:

Cilindro 1:

Diámetro = 0.81 mts

Altura = 3.29 mts

Densidad del sólido = 1900 Kg/m³

Cilindro 2:

Diámetro = 1.20 mts

Altura = 2.85 mts

Densidad del sólido = 1600 Kg/m³

Cono

Densidad del sólido = 1600 Kg/m³

Altura = 1.82 mts

alfa = 15° (ángulo del cono con la vertical) phi_{cono} = 11°

Resultados

K_{cilindro} = 0.4 Delta = 25° phi_{cilindro} = 45°

Z (Mts)	Presión en Z Kg/cm ²	Presion normal a la pared Kg/cm ²	Esfuerzo cortante en la pared Kg/cm ²
3.290	0.095	0.038	0.038
cilindro 6.140	0.210	0.085	0.085
cono +6.140	0.210	0.435	0.085

$$K_{\text{cilindro}}=0.4 \quad \Delta=25^{\circ} \quad \phi_{\text{cilindro}}=35^{\circ}$$

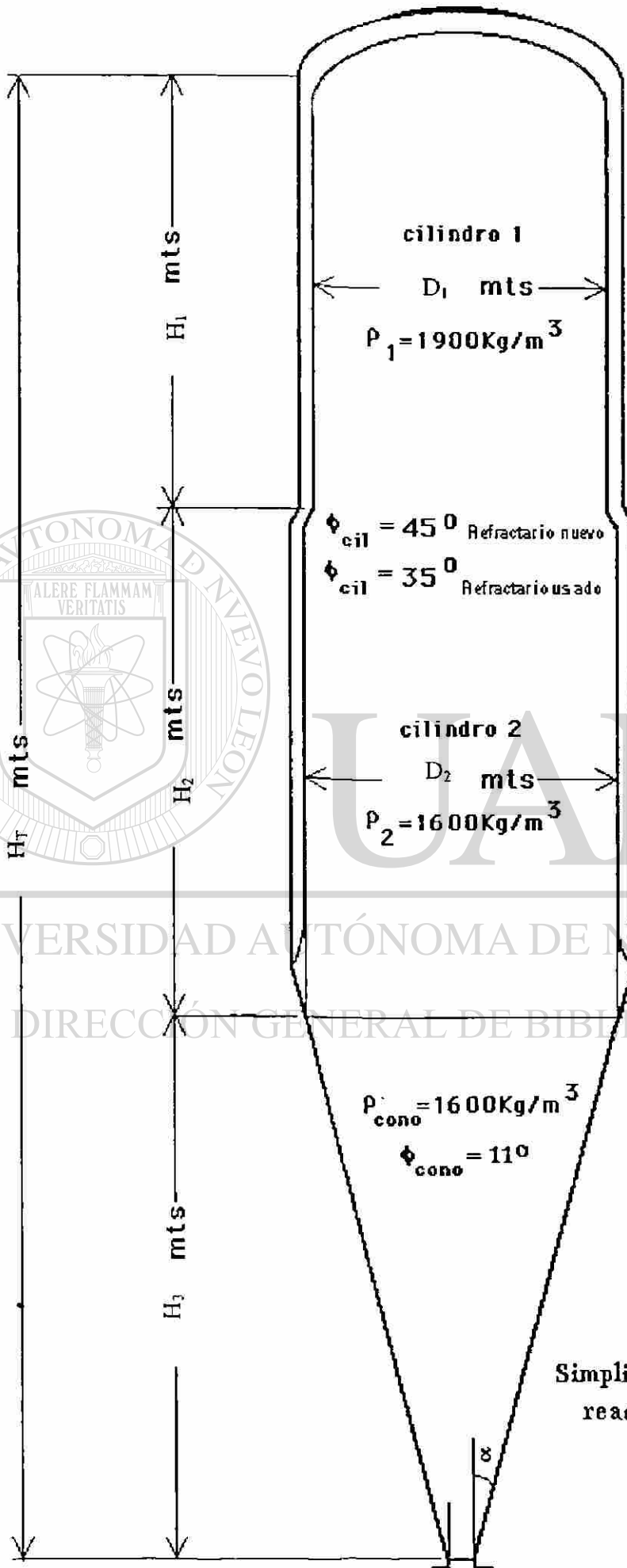
Z (Mts)	Presión en Z Kg/cm ²	Presión normal a la pared Kg/cm ²	Esfuerzo cortante en la pared Kg/cm ²
3.290	0.134	0.054	0.038
cilindro 6.140	0.291	0.118	0.083
cono +6.140	0.291	0.603	0.117

$$K_{\text{cilindro}}=0.6 \quad \Delta=14^{\circ} \quad \text{y} \quad \phi_{\text{cilindro}}=45^{\circ}$$

Z (Mts)	Presión en Z Kg/cm ²	Presión normal a la pared Kg/cm ²	Esfuerzo cortante en la pared Kg/cm ²
3.290	0.063	0.038	0.038
cilindro 6.140	0.141	0.086	0.086
cono +6.140	0.141	0.206	0.040

$$K_{\text{cilindro}}=0.6 \quad \Delta=14^{\circ} \quad \text{y} \quad \phi_{\text{cilindro}}=35^{\circ}$$

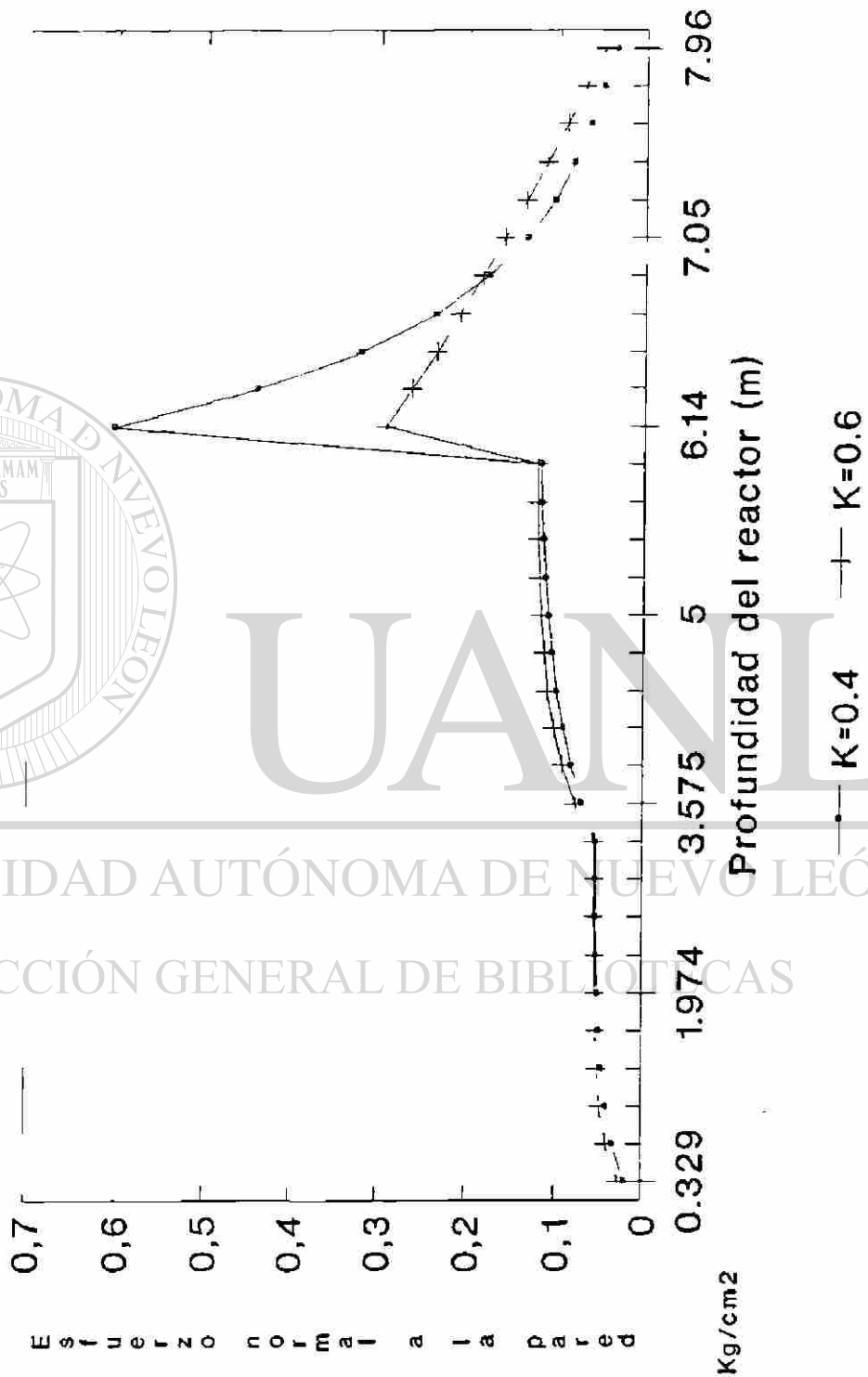
Z (Mts)	Presión en Z Kg/cm ²	Presión normal a la pared Kg/cm ²	Esfuerzo cortante en la pared Kg/cm ²
3.290	0.090	0.055	0.038
cilindro 6.140	0.200	0.122	0.086
cono +6.140	0.200	0.292	0.057



Simplificaciones de la geometria del reactor R2 para propósitos de cálculo

COMPARACION DE ESFUERZOS PHI DEL CILINDRO DE 350

Reactor Planta Piloto



COMPARACION DE ESFUERZOS

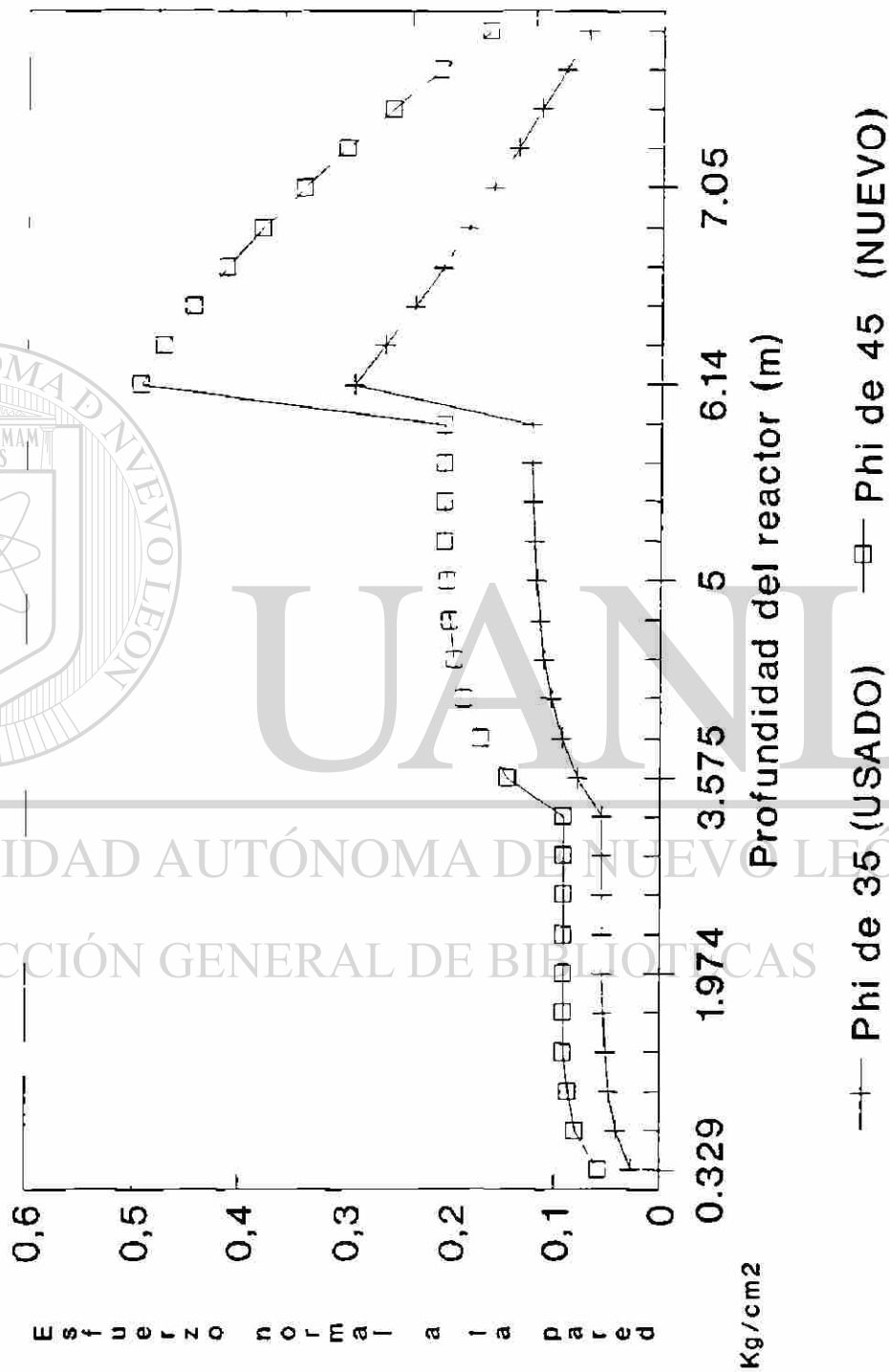
PHI DEL CILINDRO DE 450

Reactor *Planta Piloto*



VARIACION DE ESFUERZOS REFRACTARIO NUEVO VS USADO

K=0.6



mcr9

VARIACION DE ESFUERZOS REFRACTARIO NUEVO VS USADO

K=0.4

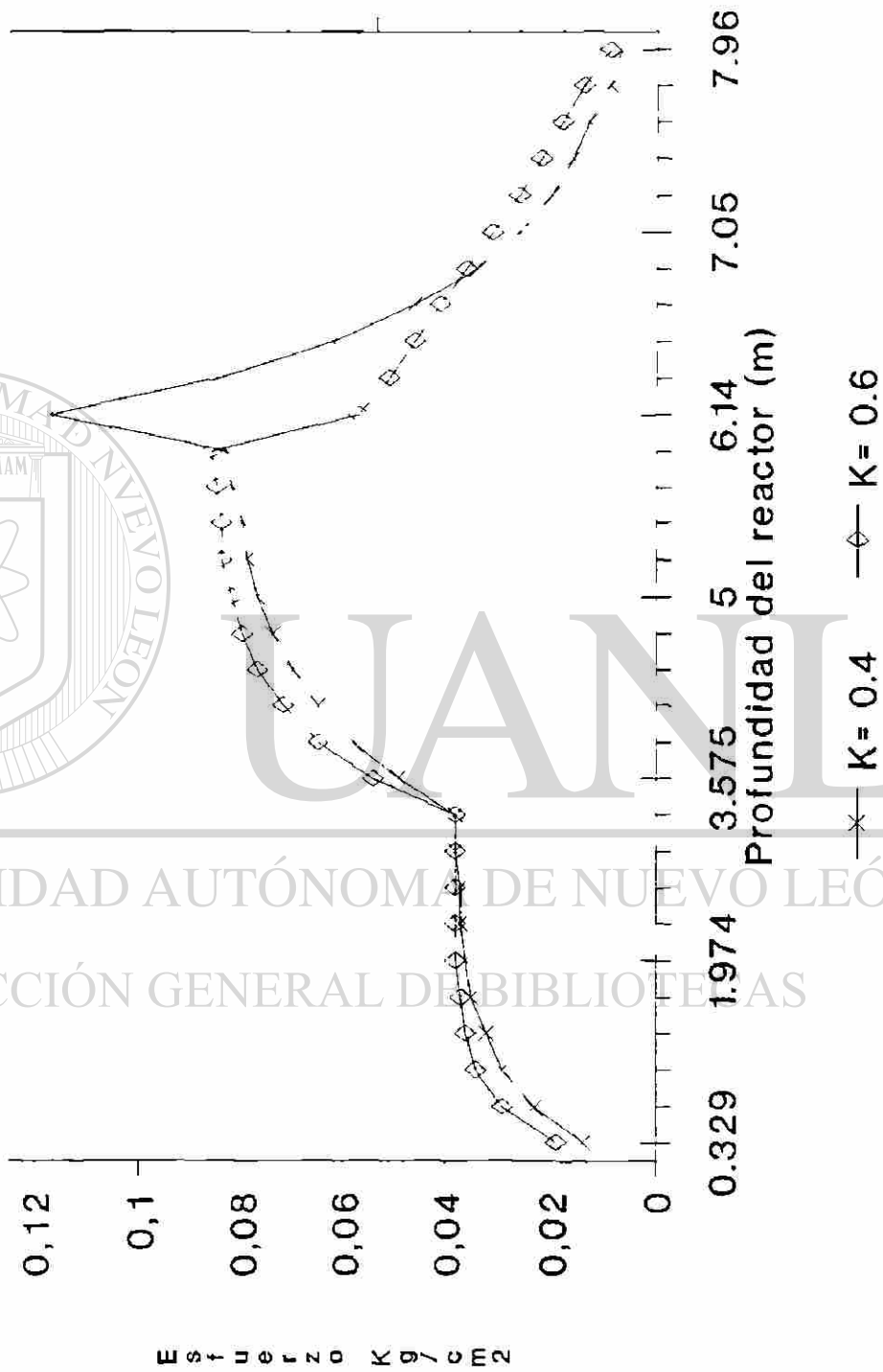


---+ phi de 350 (USADO) —+ phi de 450 (NUEVO)

mcrg

ESFUERZO CORTANTE A LA PARED

PHI DE 350



ESFUERZO CORTANTE A LA PARED

PHI DE 450



—△— K=0.4 —⊗— K=0.6

mcrg

