

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 carbon 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	ESPEURZO kg/cm	TIEMPO minutos	TEMPERATURA C	CAPA gr*10 ³
1	3.1	15.5	600	0.9
2	3.1	30	600	3.2
3	1.6	15.5	775	0.7
4	0.1	1	600	0.2
5	0.1	30	950	0.4
6	3.1	30	775	4.7
7	1.6	1	950	2.3
8	0.1	30	775	0.8
9	3.1	15.5	775	4.8
10	0.1	30	600	0.2
11	0.1	1	950	0.1
12	1.6	15.5	950	1.1
13	0.1	15.5	950	1.5
14	1.6	1	600	0.2
15	0.1	15.5	600	0.2
16	3.1	30	950	2.6
17	1.6	1	775	1.2
18	1.6	30	775	5.1
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

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
ITEMP	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
ltiempo	0.32	0.09	3.58	0.0014
ltemp	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 los pronósticos y la gráfica 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 K

PRONOSTICO VS OBSERVADO

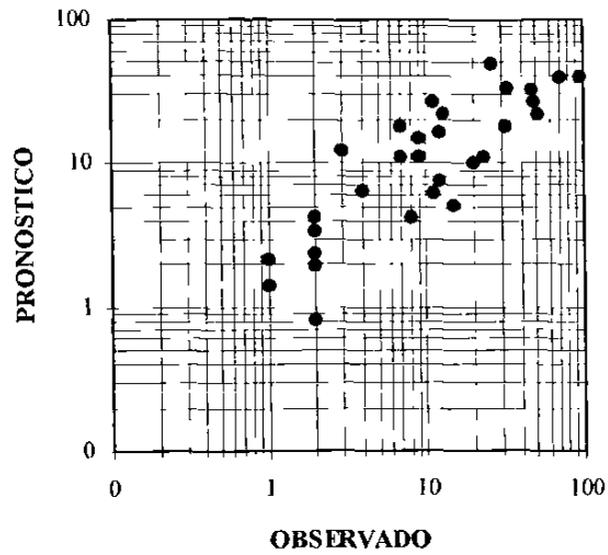


Figura 14. Pronóstico vs valor observado de la masa adherida, (-) mg. * 10.

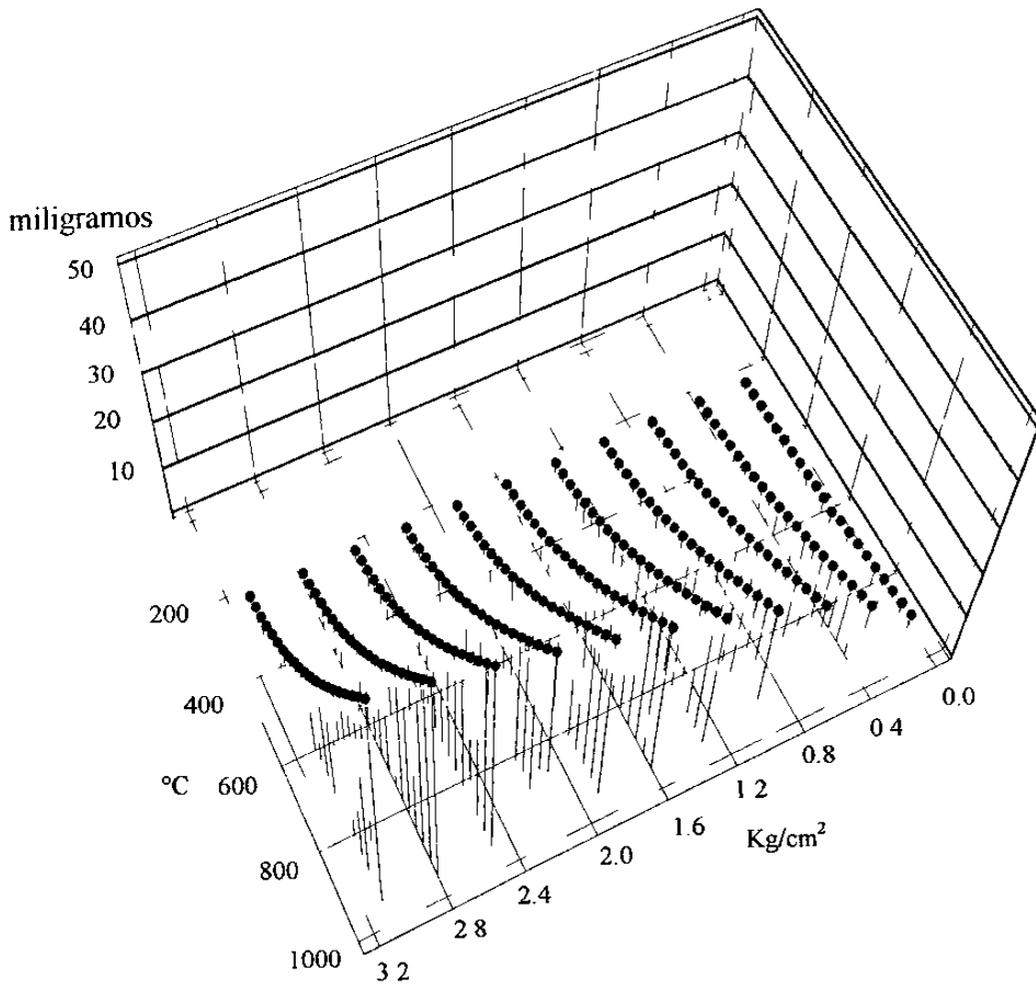


Figura 15. Masa adherida vs temperatura y esfuerzo.

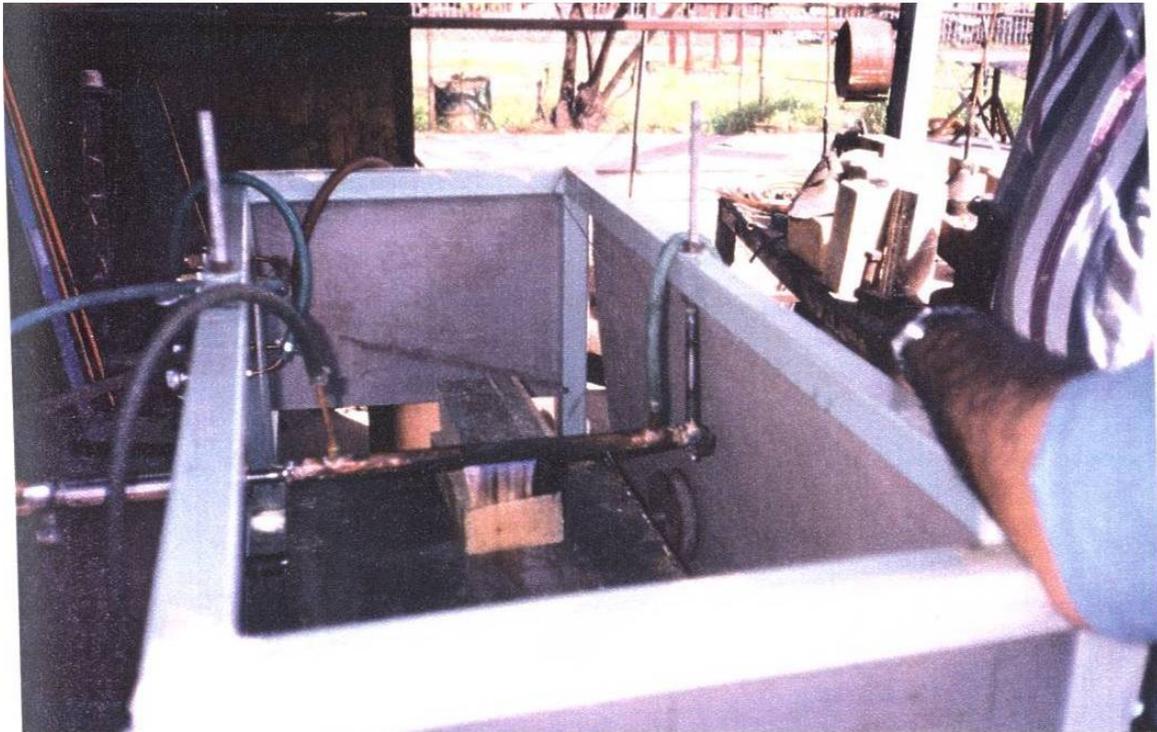
8. TRATAMIENTOS A ESCALA INDUSTRIAL

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:

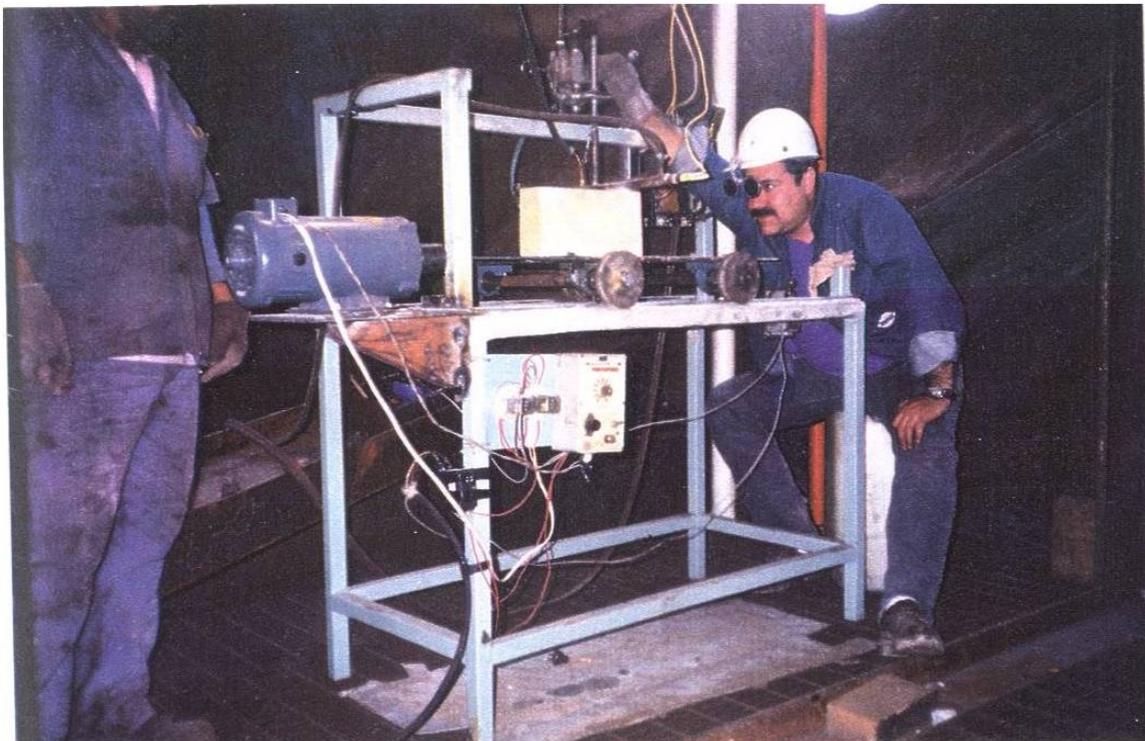
Se aplica el polvo refractario a la superficie del ladrillo para tapar los poros. Se quita el exceso del polvo. Se coloca el ladrillo en la mesa deslizante. Se ajusta la velocidad entre 0.5 y 2.0 cm/seg. Se ajusta el flujo de acetileno a 6 lts./min, y se enciende el quemador. Se ajusta el flujo de oxigeno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

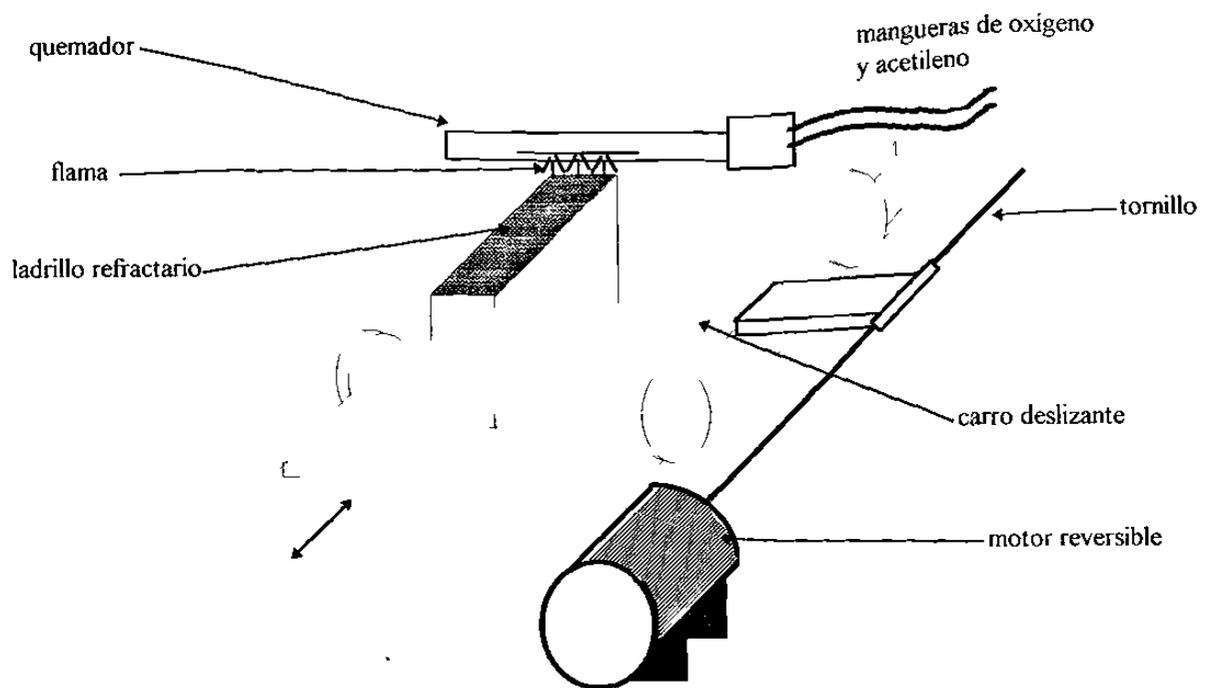


Figura 16. Esquema del equipo para tratar ladrillos por separado.

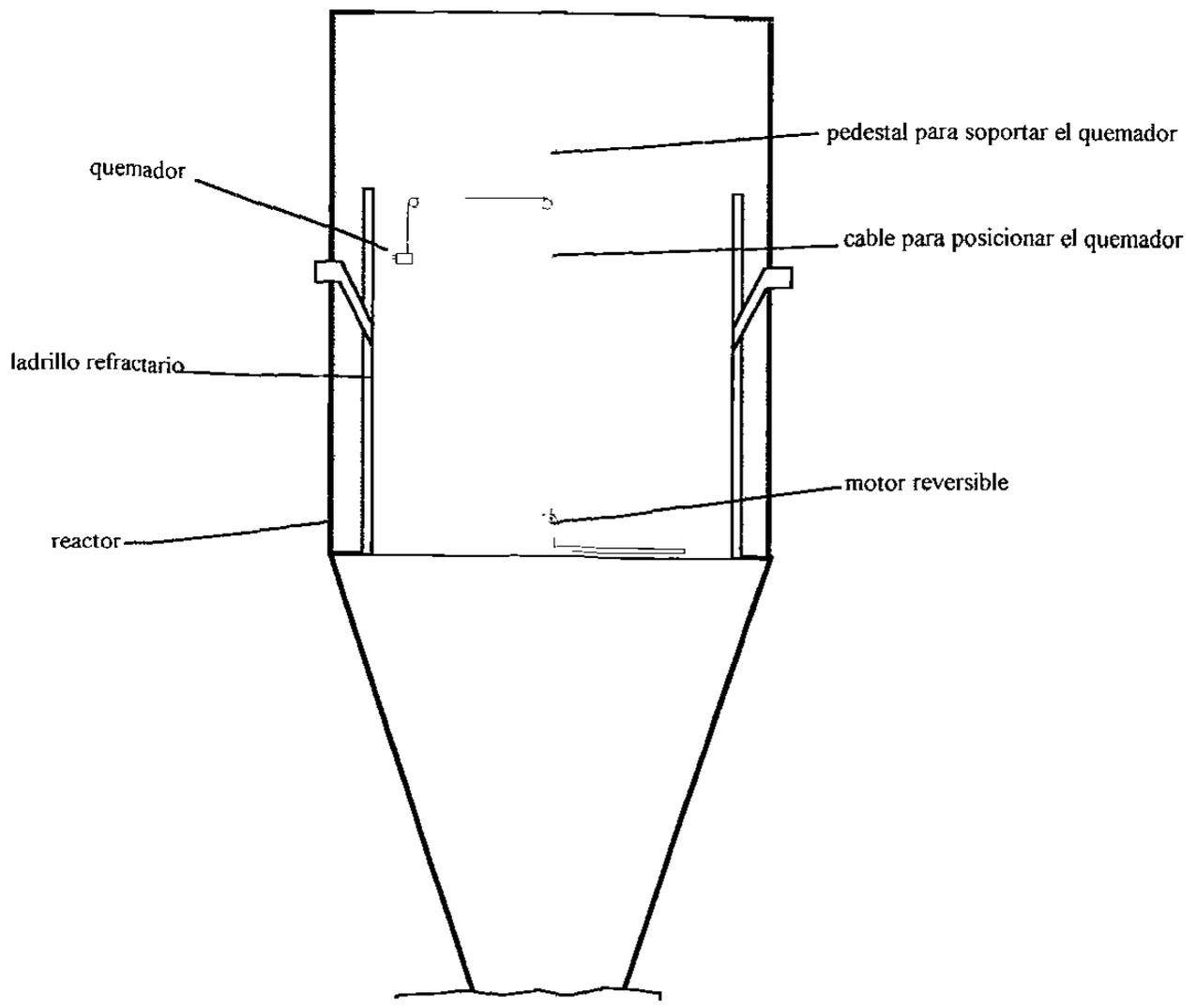
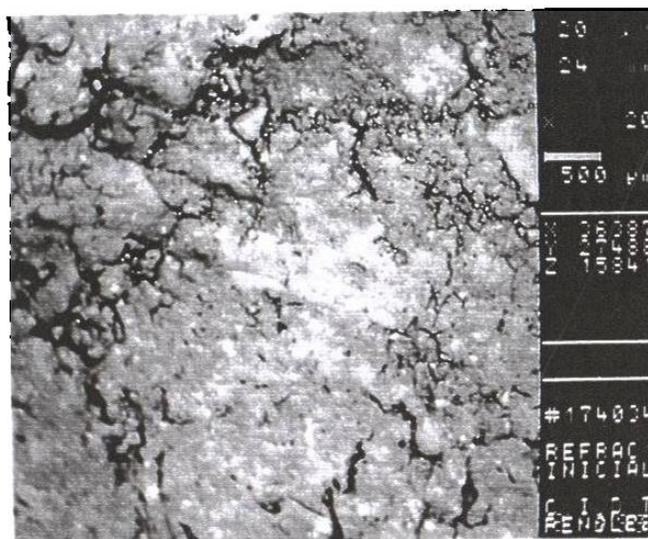


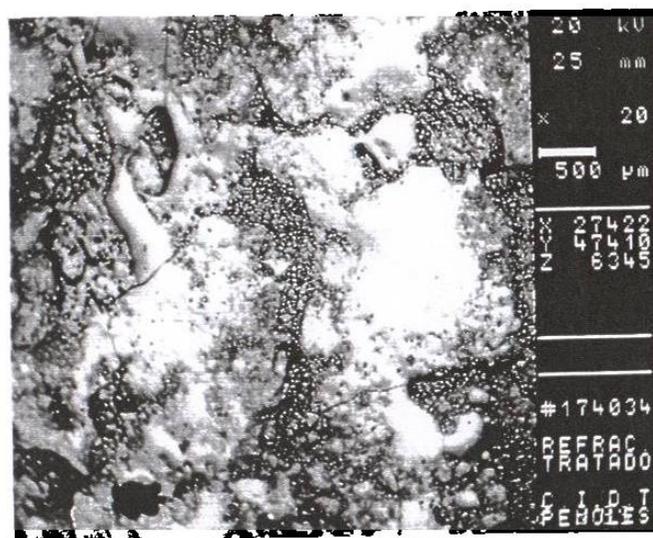
Figura 17. Esquema del equipo para tratar ladrillos en el reactor.

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.

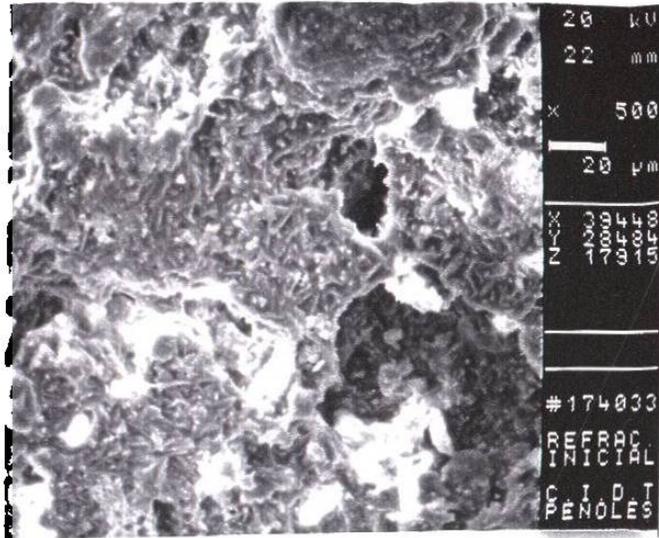
Las fotografías de la 59 a la 67 muestran la comparación de las muestras testigo tratadas a escala industrial con las muestras de ladrillo sin tratar.



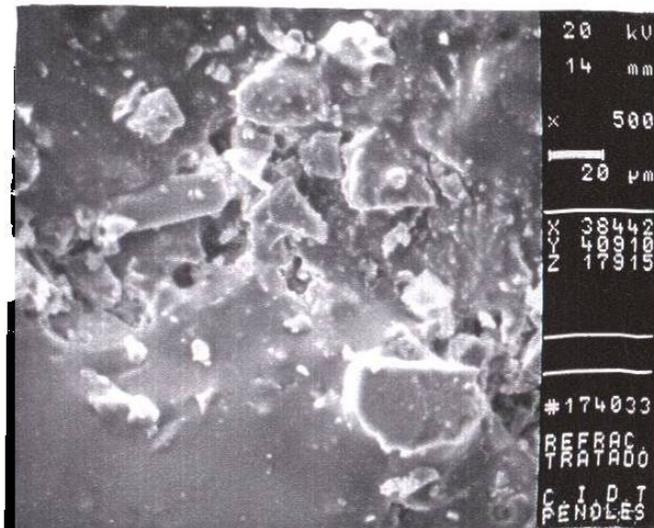
Fotografía 59 Muestra de ladrillo sin tratar a 20x



Fotografía 60 Muestra tratada a 20x

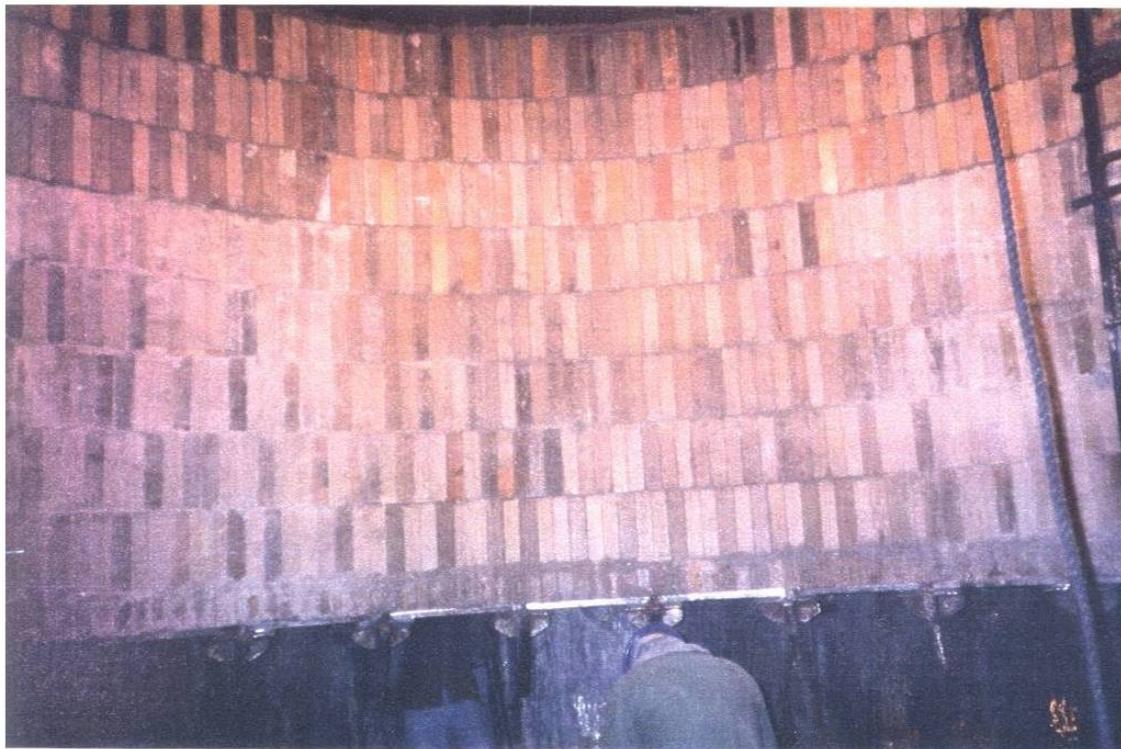


Fotografía 61 Muestra sin tratar a 500x



Fotografía 62 Muestra tratada a 500x

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



Fotografía 63 Ladrillo tratado ya instalado

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 físicoquímico 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 físicoquímica, 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, ésto es en las aristas de la superficie, los bordes, y donde haya más alta temperatura. El mecanismo de crecimiento se autoalimenta porque cualquier borde en la pared del reactor es un punto de concentración de esfuerzos en donde el pelet se degrada más, aportando más finos para el crecimiento de la capa. La literatura de flujo de sólidos enseña que los bordes sobre la pared son puntos de concentración de esfuerzos porque la pared empieza a cargar por reacción en estos puntos, generándose de este modo esfuerzos locales mucho mayores que los esperados con pared lisa.

Esto implica que el mecanismo de anclaje consiste en la generación de finos y su penetración a los poros para posterior sinterizado ya que dentro del poro la única energía impulsora para reforzar el ancla es la energía de superficie porque la presión de contacto no puede actuar dentro del poro. En el anclaje el esfuerzo cortante y el sinterizado actúan en serie. En cambio en el mecanismo de crecimiento actúan en paralelo. Los finos generados o alimentados en contacto con la superficie de la capa fluyen plásticamente impulsados por estas dos fuerzas para buscar una configuración termodinámicamente más estable formando una unión con el resto de la capa.

TRATAMIENTOS TERMOQUIMICOS

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 reajuste 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.

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 fierro 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. **KOCHIHARA (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 (L.)**.- 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. engns., 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 area transversal de la partícula. Por lo tanto en los puntos de contacto realmente existen esfuerzos que hacen fallar plasticamente 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 plastica del material en los puntos de contacto. Esta adhesión, que existe entre el material caliente que fluye plasticamente en los puntos de contacto donde se generan grandes esfuerzos cortantes por la interaccion de los esfuerzos a compresion 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

Ing. María del Carmen Rodríguez G.

Asesor: Ing. Jorge Berrún

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

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).

	<u>Z</u> <u>(mts)</u>	<u>Presión en Z</u> <u>Kg/cm2</u>	<u>Presión normal a</u> <u>la pared Kg/cm2</u>	<u>Esfuerzo cortante</u> <u>en la pared Kg/cm2</u>
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 <u>(mts)</u>	Presión en Z <u>Kg/cm2</u>	Presión normal a <u>la pared Kg/cm2</u>	Esfuerzo cortante <u>en la pared Kg/cm2</u>
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).

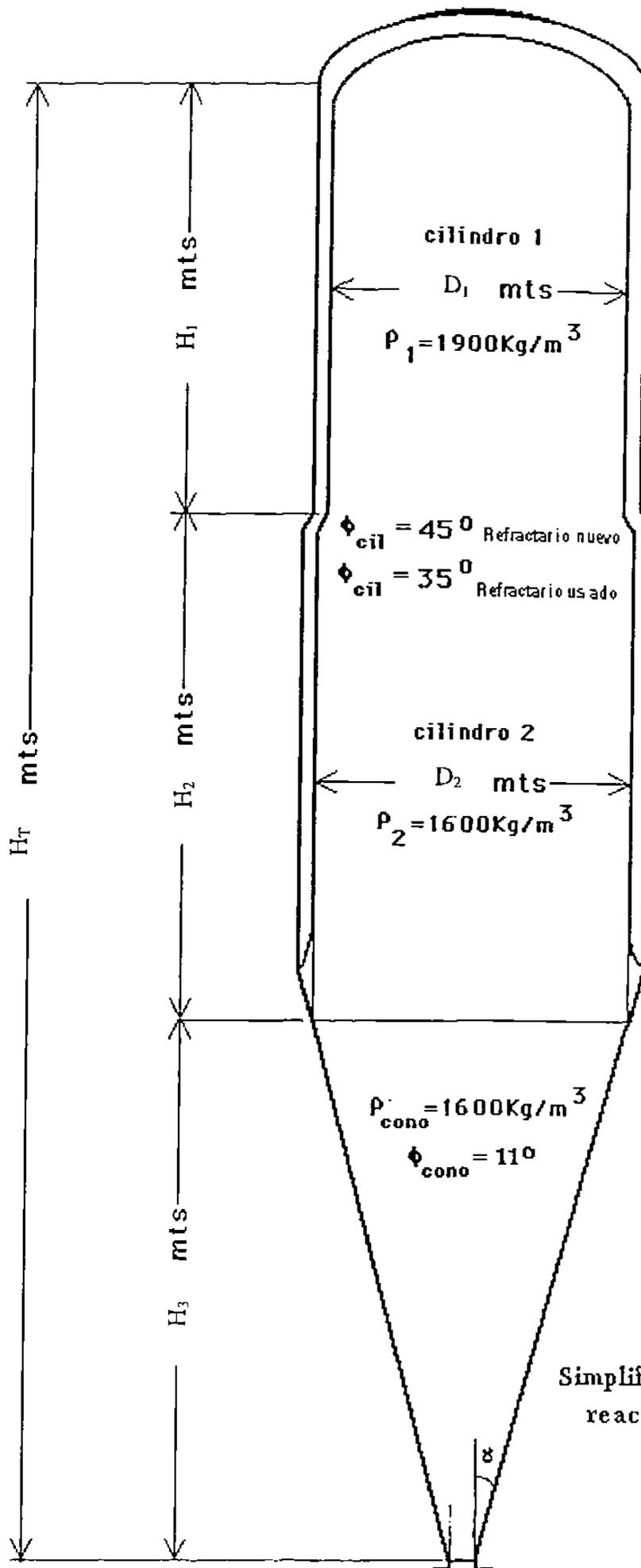
	Z <u>(mts)</u>	Presión en Z <u>Kg/cm2</u>	Presión normal a <u>la pared Kg/cm2</u>	Esfuerzo cortante <u>en la pared Kg/cm2</u>
cil1	7.764	0.366	0.223	0.223
cil2	16.527	0.721	0.440	0.440
cono	+16.527	0.721	1.056	0.205

$K_{cilindro}=0.6$ $\Delta=14^{\circ}$ $\phi_{cilindro}=35^{\circ}$ (Refractario Usado).

	Z <u>(mts)</u>	Presión en Z <u>Kg/cm2</u>	Presión normal a <u>la pared Kg/cm2</u>	Esfuerzo cortante <u>en la pared Kg/cm2</u>
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.

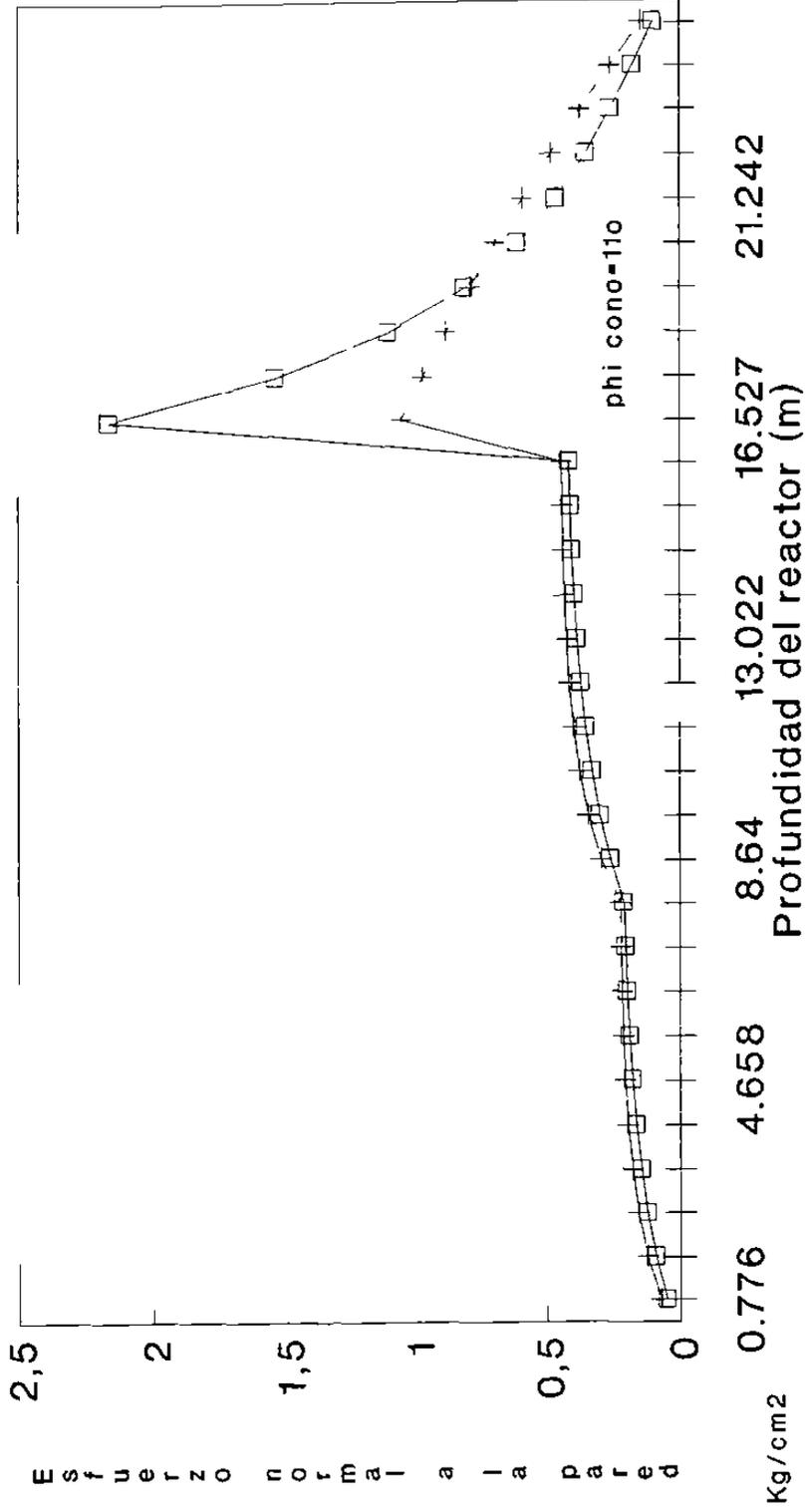


Simplificaciones de la geometría del reactor 3M5 para propósitos de cálculo

APENDICE I

PERFILES DE PRESION

COMPARACION DE ESFUERZOS PHI DEL CILINDRO DE 450

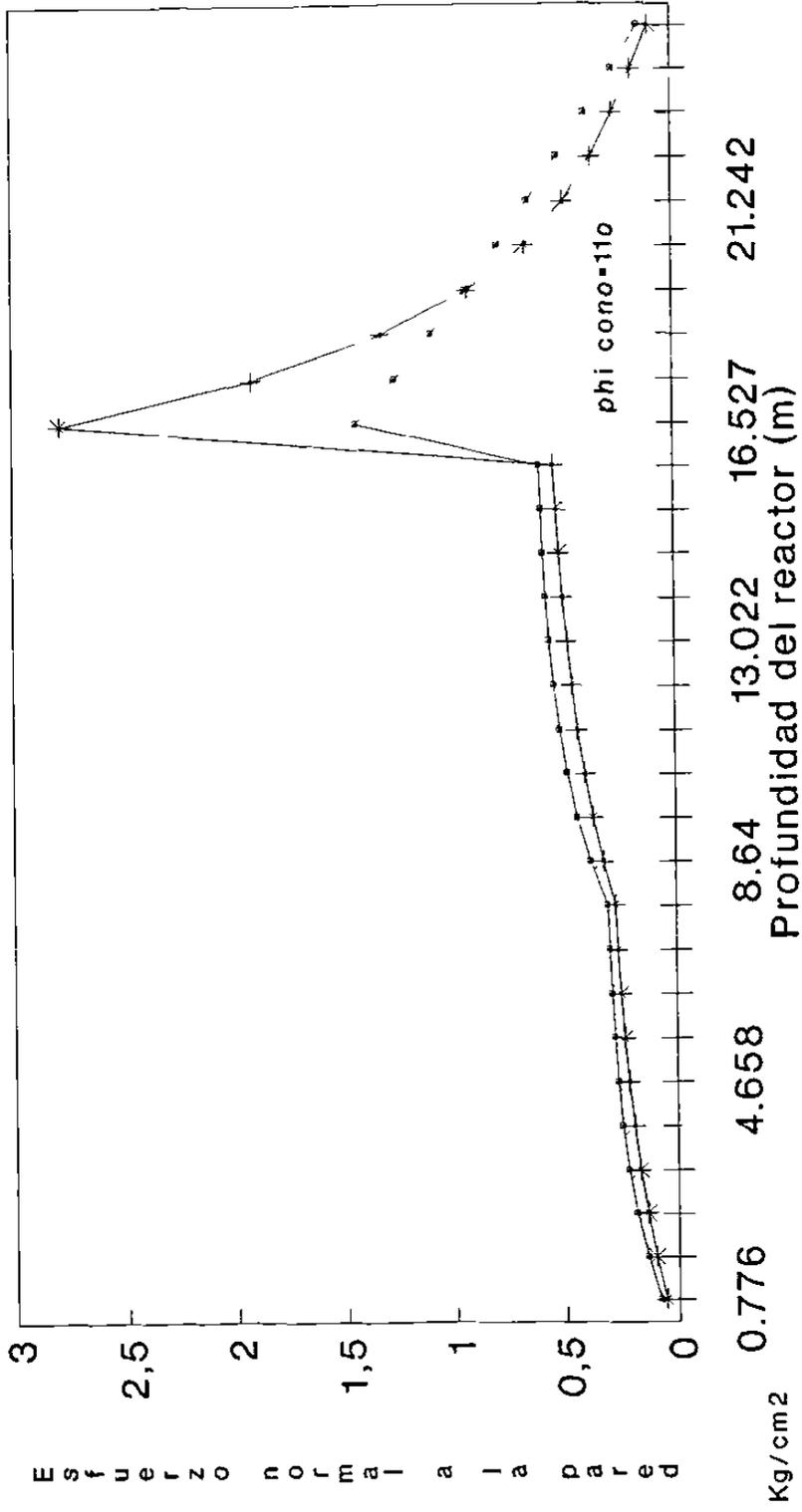


+ K=0.6 □ K=0.4

mcrq

COMPARACION DE ESFUERZOS

PHI DEL CILINDRO DE 350

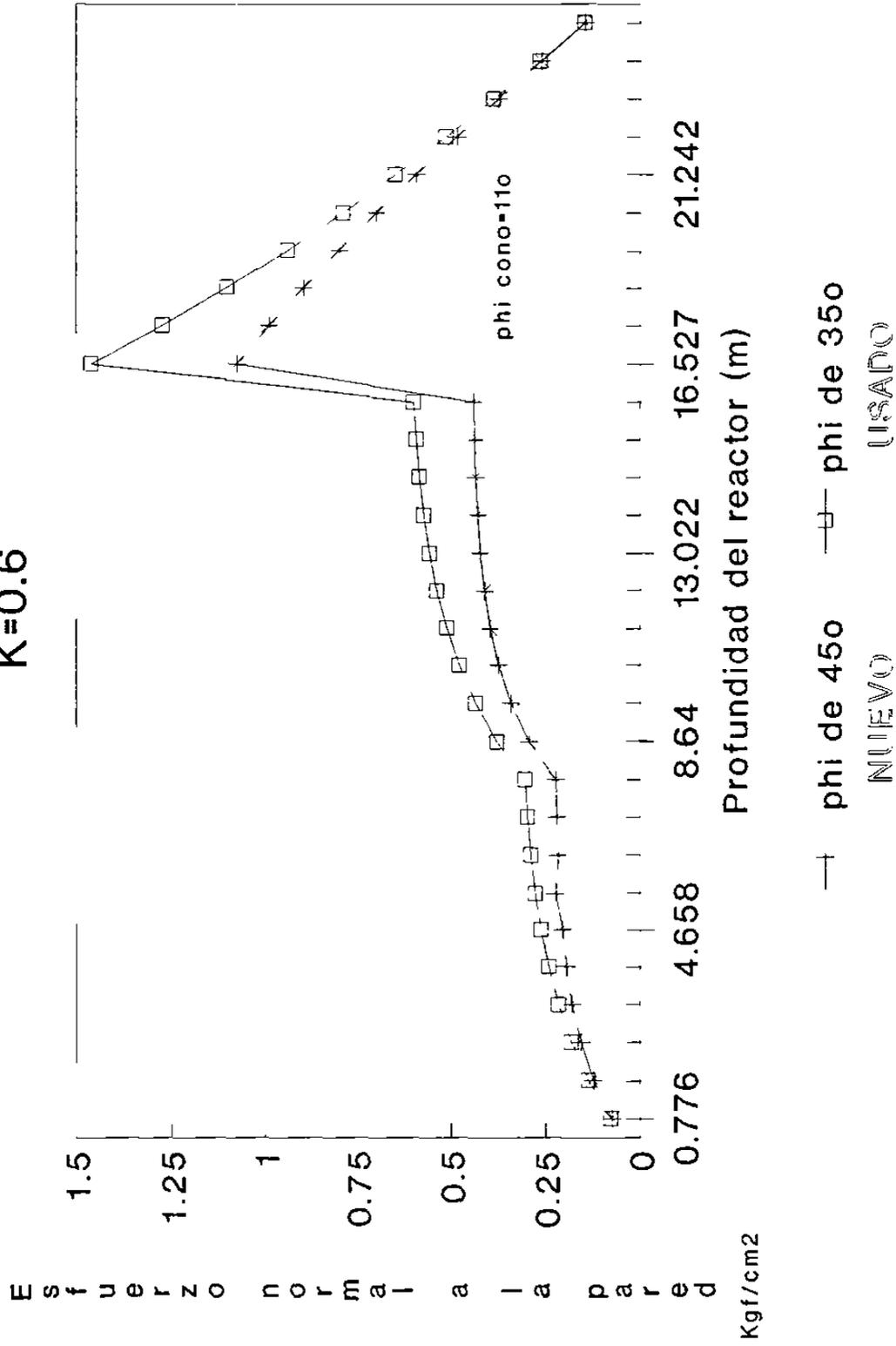


• K=0.6 † K=0.4

mcrj

VARIACION DE ESFUERZOS REFRACTARIO NUEVO VS USADO

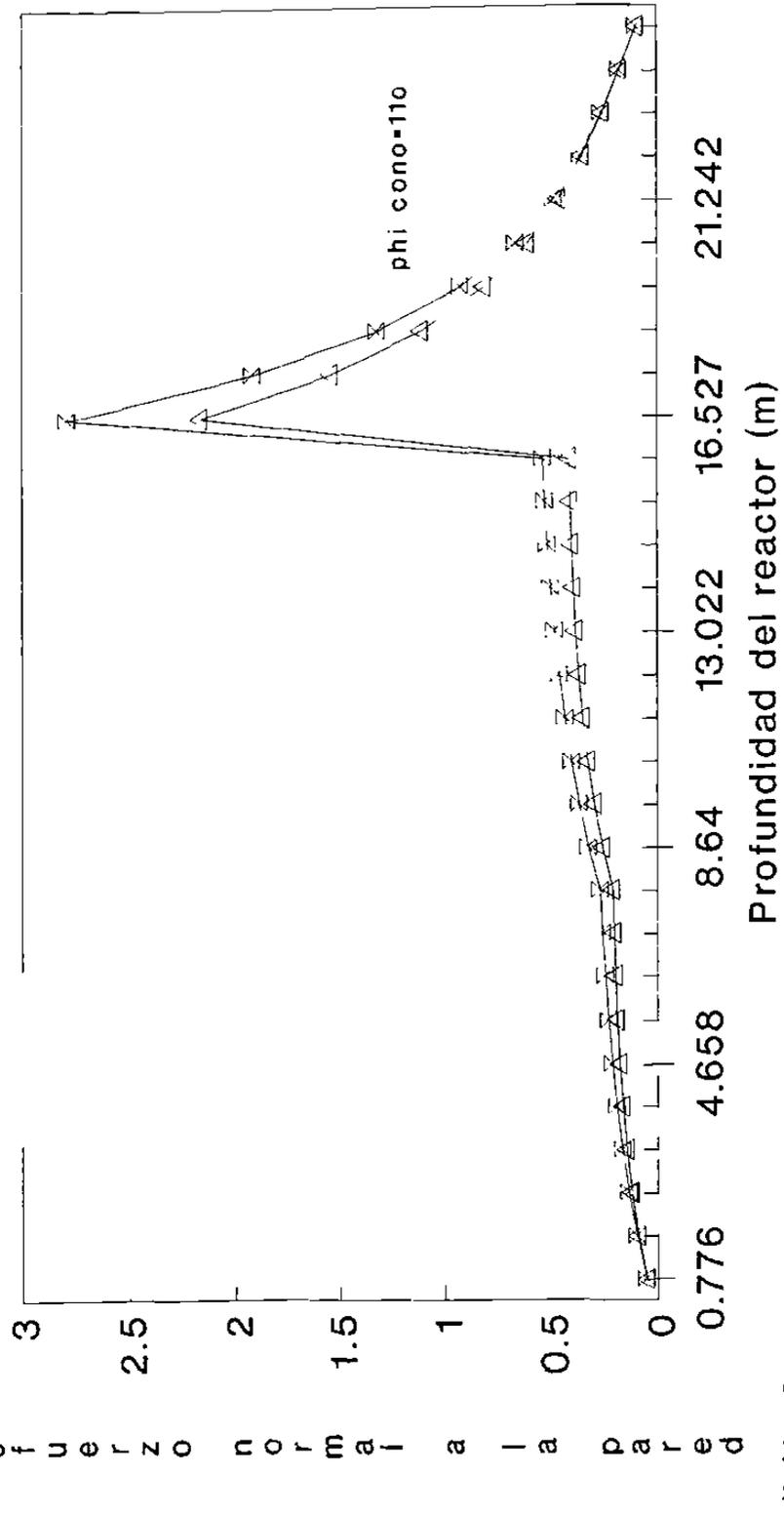
K=0.6



mcrgr

VARIACION DE ESFUERZOS REFRACTARIO NUEVO VS USADO

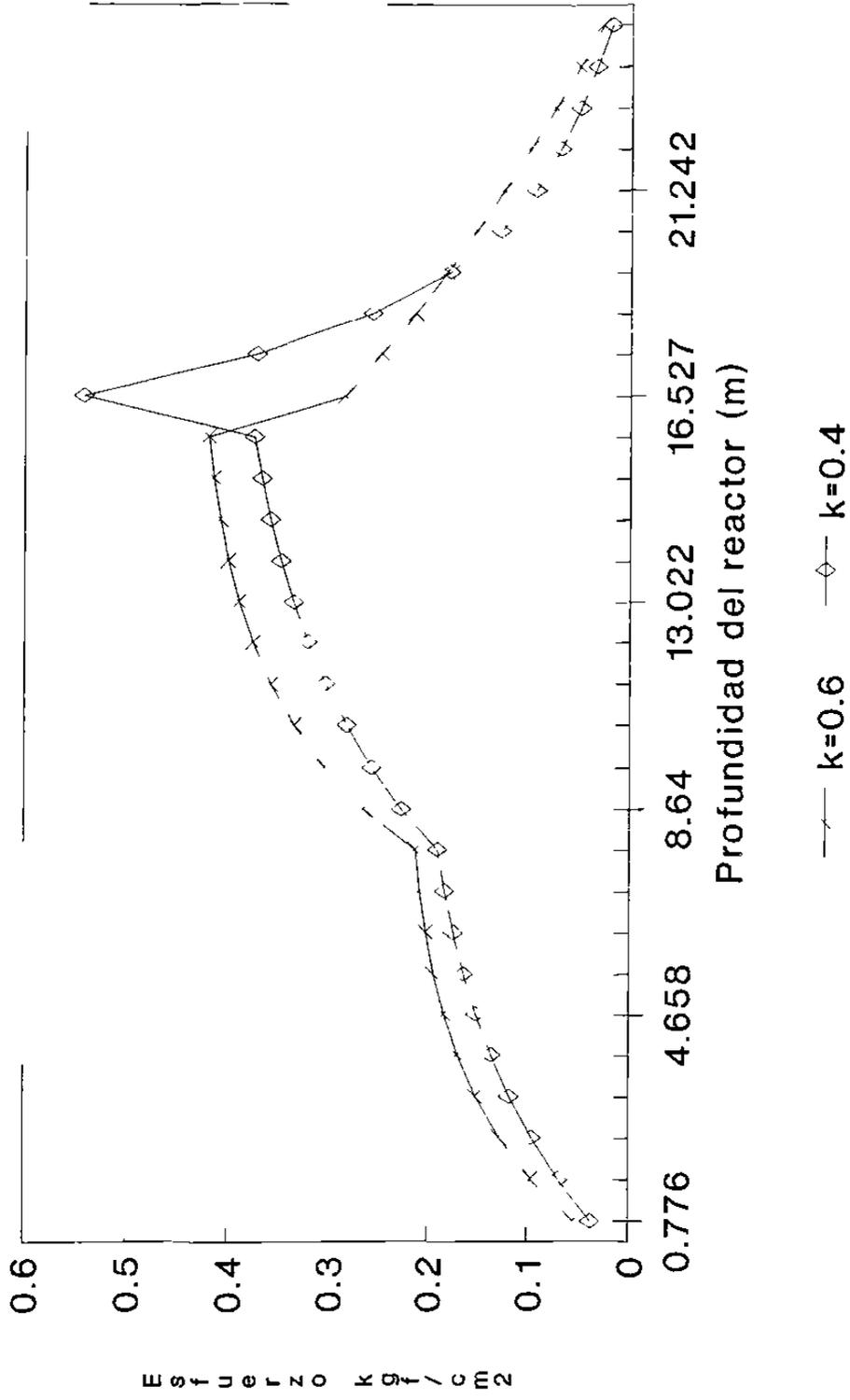
K=0.4



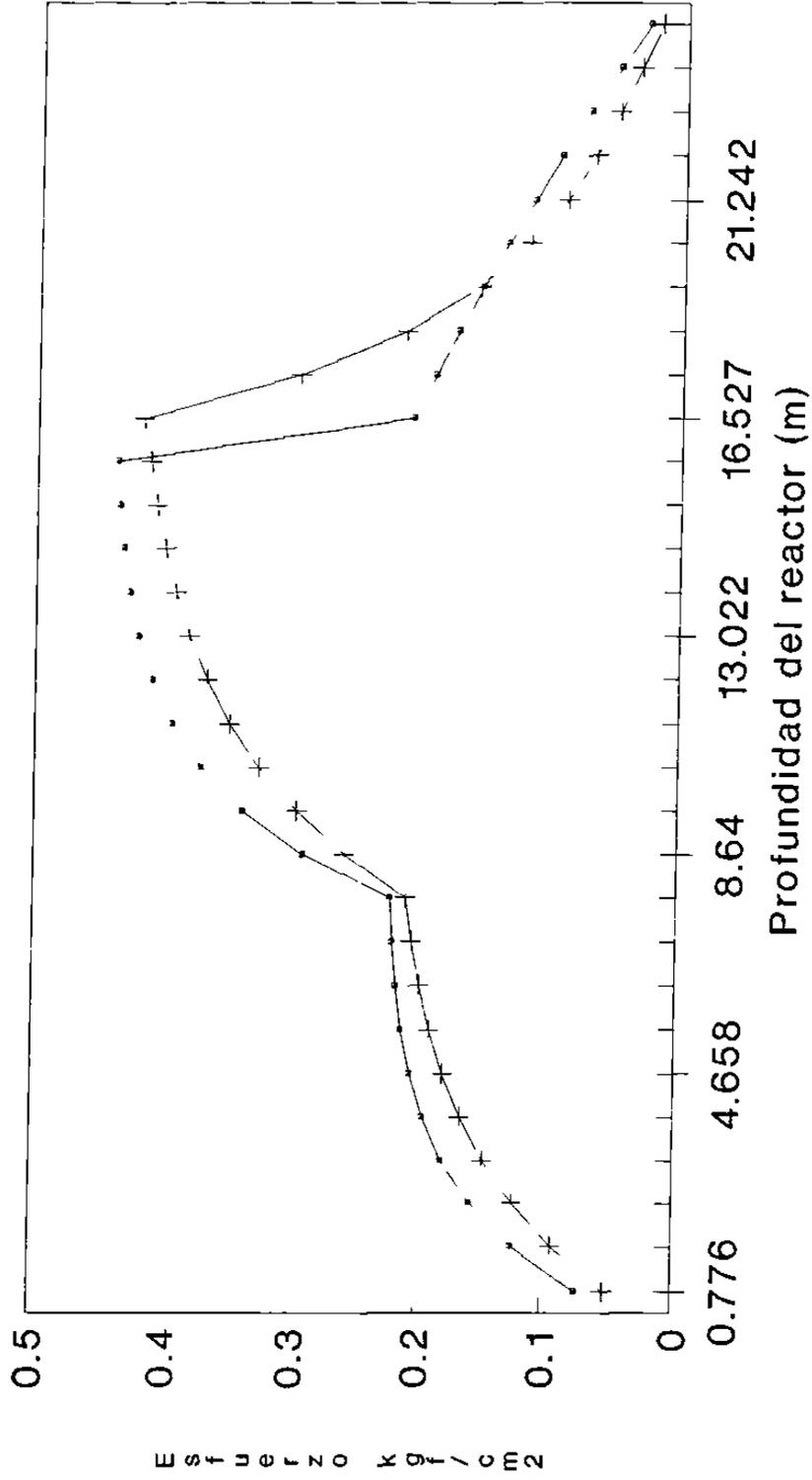
▲ phi de 450 NUEVO
 ■ phi de 350 USADO

mcrg

ESFUERZO CORTANTE A LA PARED phi de 35o

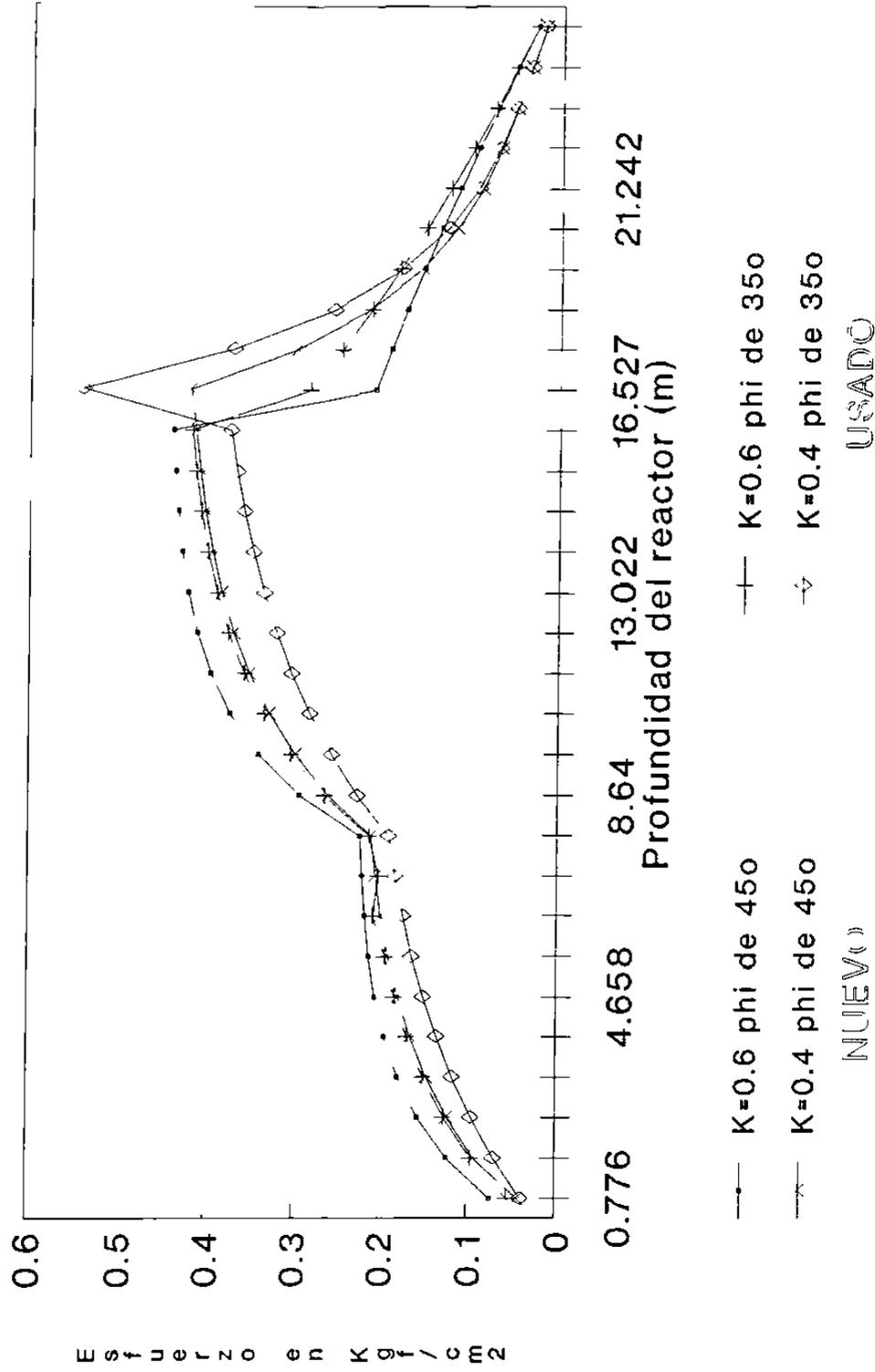


ESFUERZO CORTANTE A LA PARED phi de 45o



mcrg

ESFUERZO CORTANTE A LA PARED



mcrq

APENDICE II

PROGRAMA DE COMPUTADORA

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.

$$\gamma = \rho g$$

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

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

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

$$\sigma_w = K_j \sigma_z$$

$$\tau_w = \mu K_j \sigma_z$$

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

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

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

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

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

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

+ 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*

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

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

$$\tau_w = \mu \sigma_w$$

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. Teclar <RETURN> para continuar con la sección cónica.

7.- Teclar los datos de phi, altura y número de intervalos para el cono, además de si es o no condición estática. Teclar <RETURN> y aparecerá el resultado de las variables necesarias para el cálculo de los esfuerzos, tales como F,Dn,E,n,etc. Teclar <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:

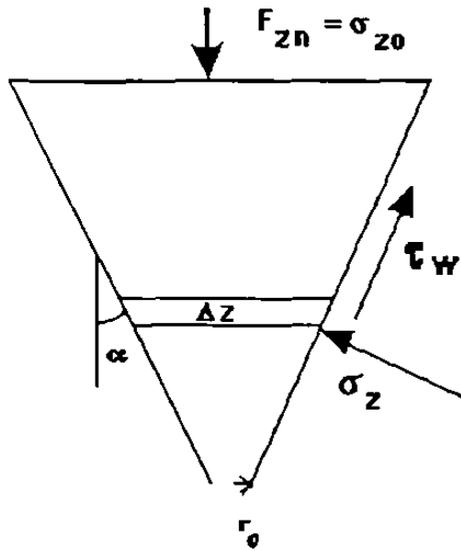
S(=) repetir pasos 3 al 7

N(=) Fin del programa

APENDICE III

SUMA DE FUERZAS EN EL REACTOR

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

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

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

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

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

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

quedando finalmente que:

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

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.

Resultados

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

		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

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) $\phi_{\text{cono}} = 11^\circ$

Resultados

		$K_{\text{cilindro}} = 0.4$	$\Delta = 25^\circ$	$\phi_{\text{cilindro}} = 45^\circ$
	Z (Mts)	Presión en Z	Presion normal a	Esfuerzo cortante
		<u>Kg/cm²</u>	<u>la pared Kg/cm²</u>	<u>en la pared Kg/cm²</u>
	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

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

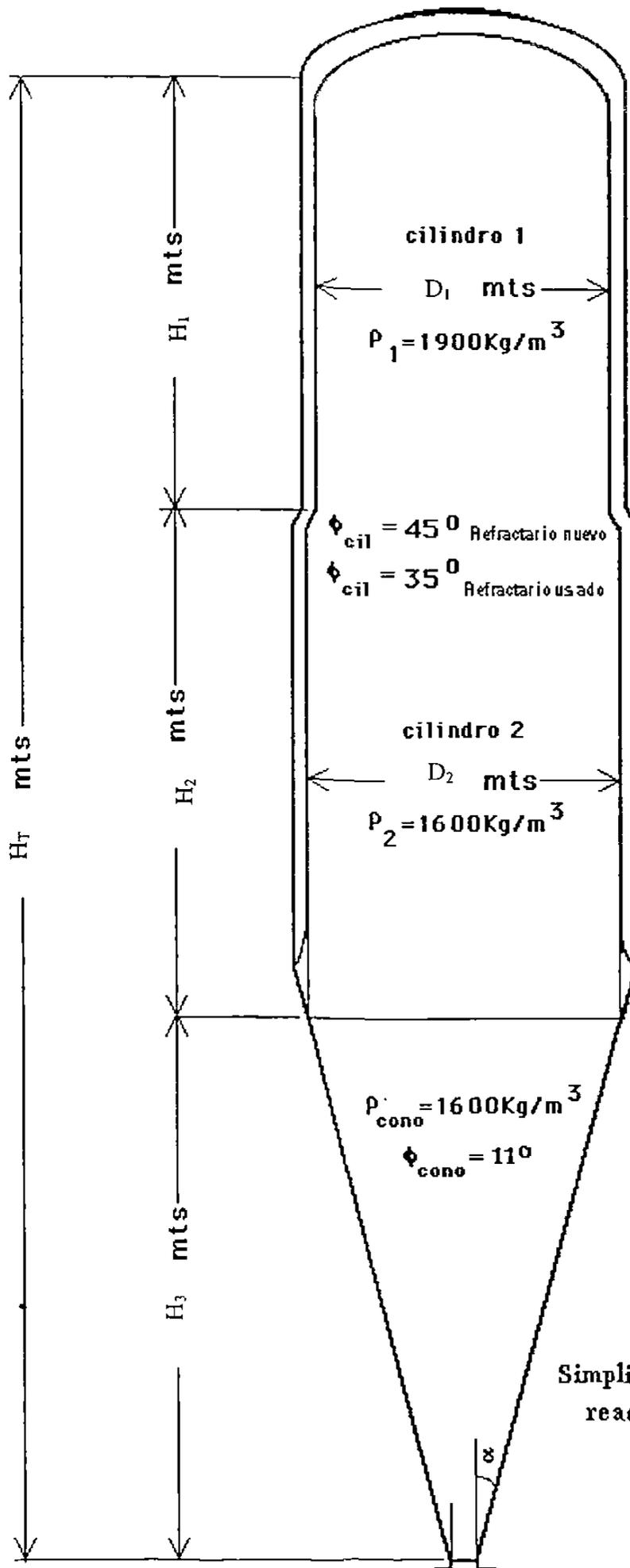
	Z (Mts)	Presión en Z Kg/cm ²	Presion normal a la pared Kg/cm ²	Esfuerzo cortante en la pared Kg/cm ²
	3.290	0.134	0.054	0.038
cilindro	6.140	0.291	0.118	0.083
cono	+6.140	0.291	0.603	0.117

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

	Z (Mts)	Presión en Z Kg/cm ²	Presion 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

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

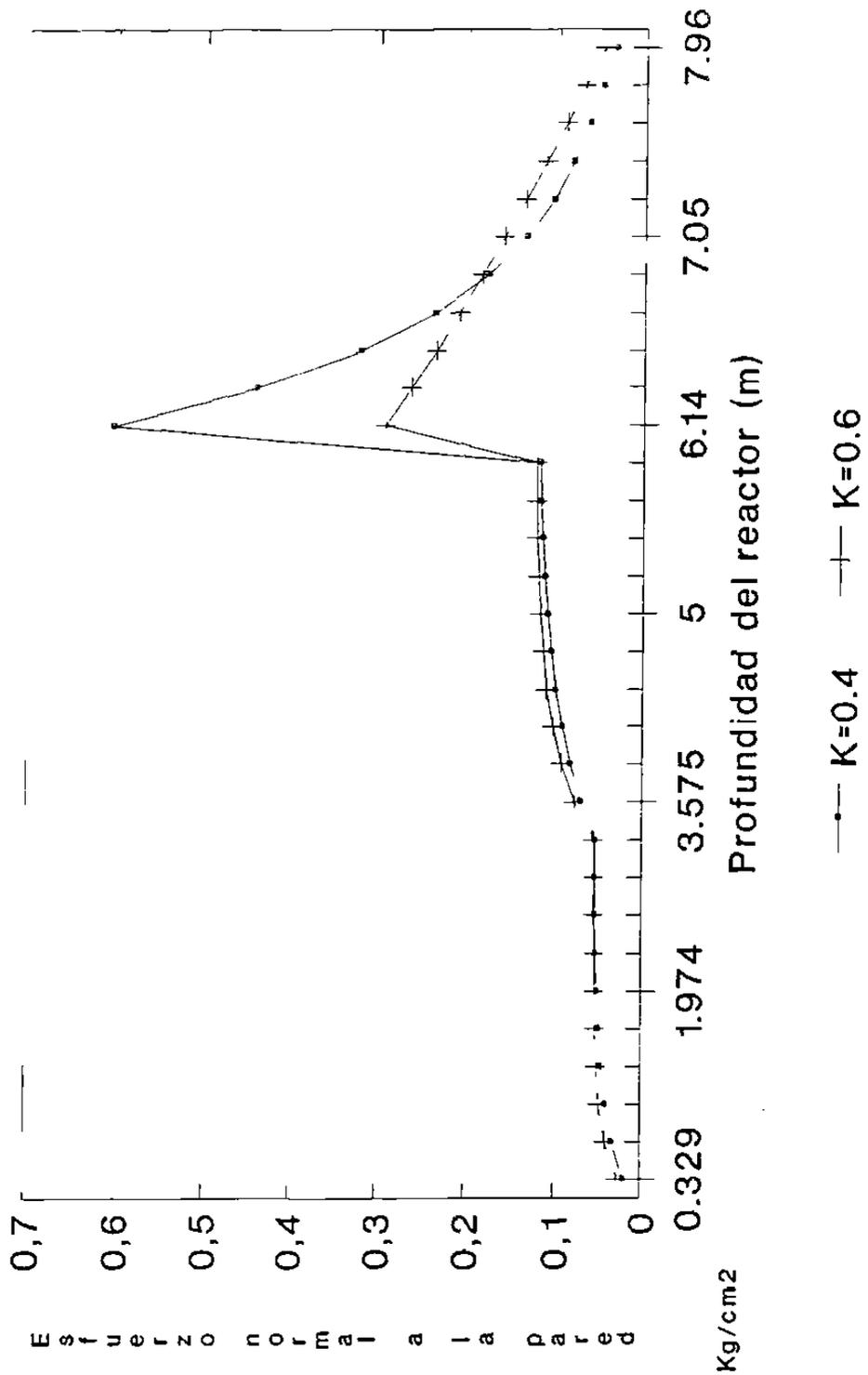
	Z (Mts)	Presión en Z Kg/cm ²	Presion normal a la pared Kg/cm ²	Esfuerzo cortante en la pared Kg/cm ²
	3.290	0.090	0.055	0.038
cilindro	6.140	0.200	0.122	0.086
cono	+6.140	0.200	0.292	0.057



Simplificaciones de la geometría del reactor R2 para propósitos de cálculo

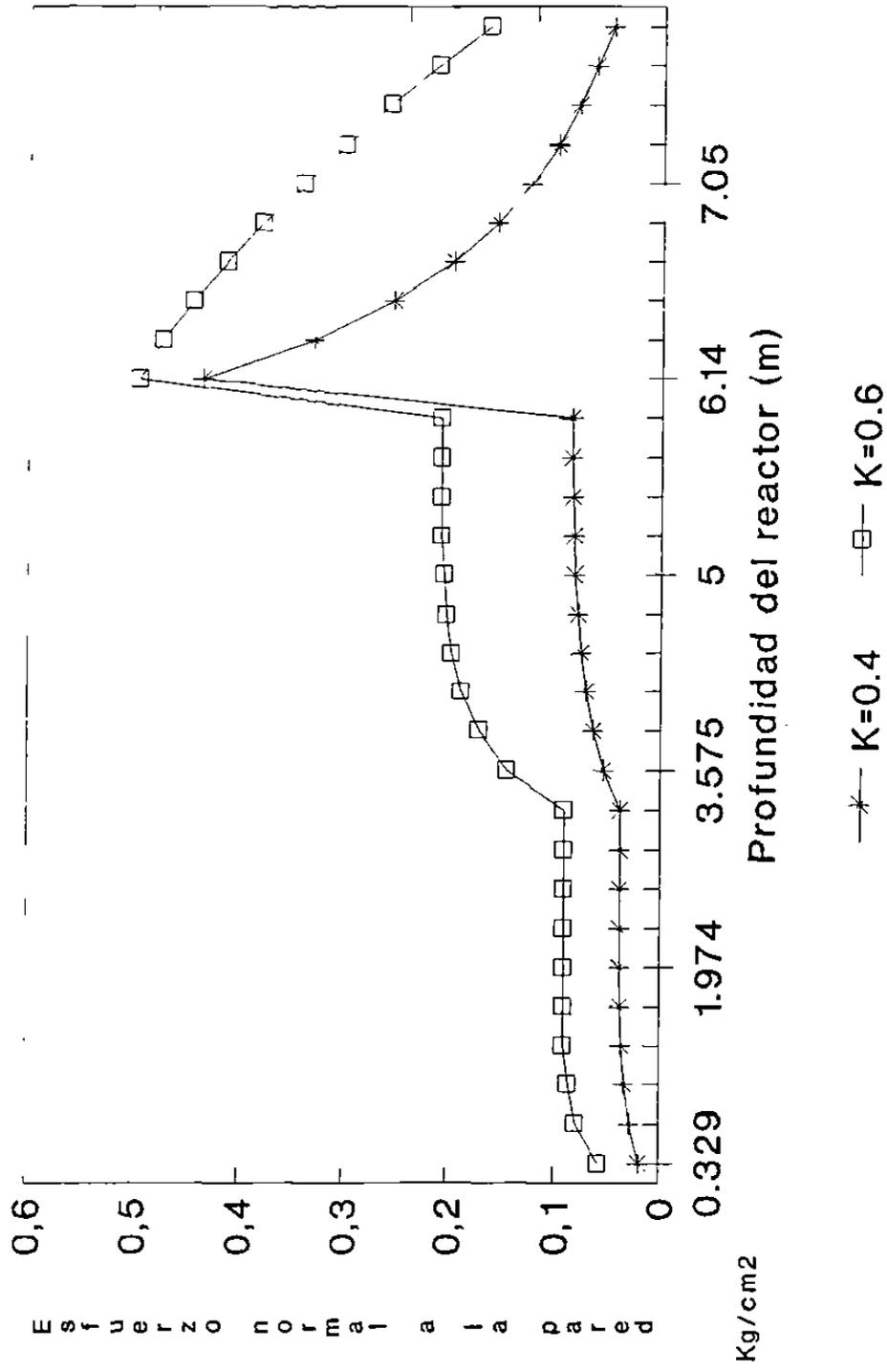
COMPARACION DE ESFUERZOS PHI DEL CILINDRO DE 350

Reactor Planta Piloto



COMPARACION DE ESFUERZOS PHI DEL CILINDRO DE 450

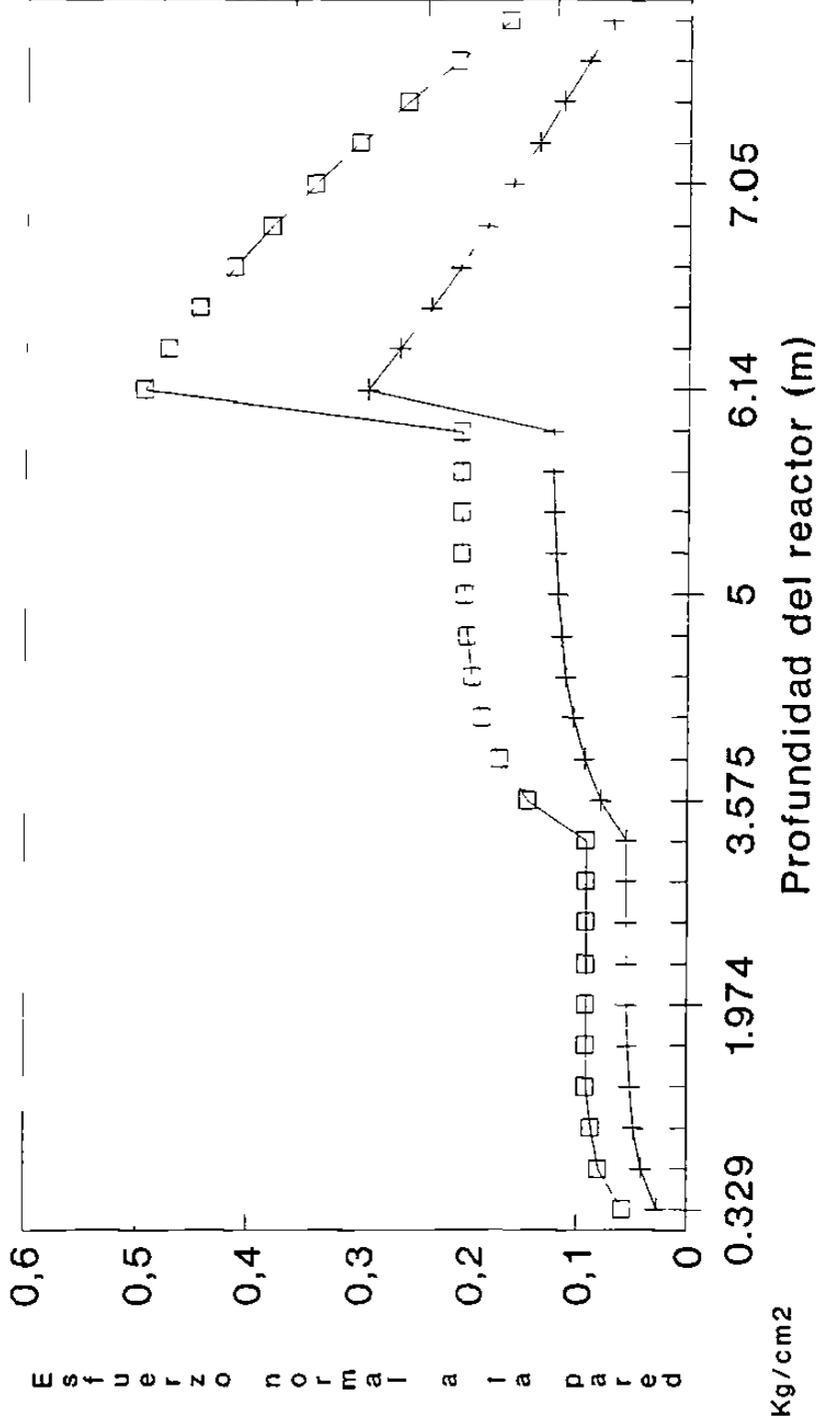
Reactor *Planta Piloto*



mcr9

VARIACION DE ESFUERZOS REFRACTARIO NUEVO VS USADO

K=0.6

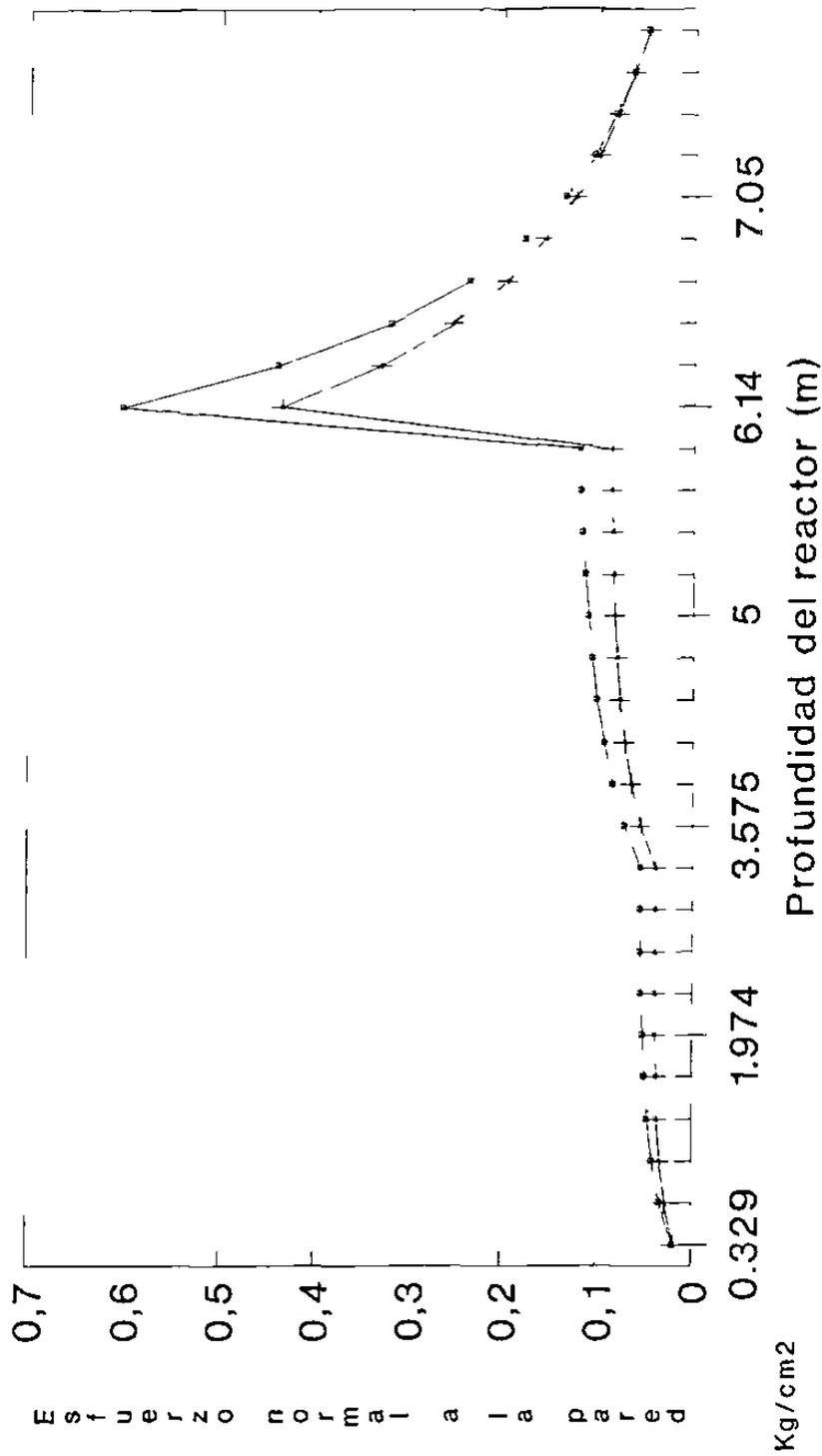


---+--- Phi de 35 (USADO) ---□--- Phi de 45 (NUEVO)

mcr9

VARIACION DE ESFUERZOS REFRACTARIO NUEVO VS USADO

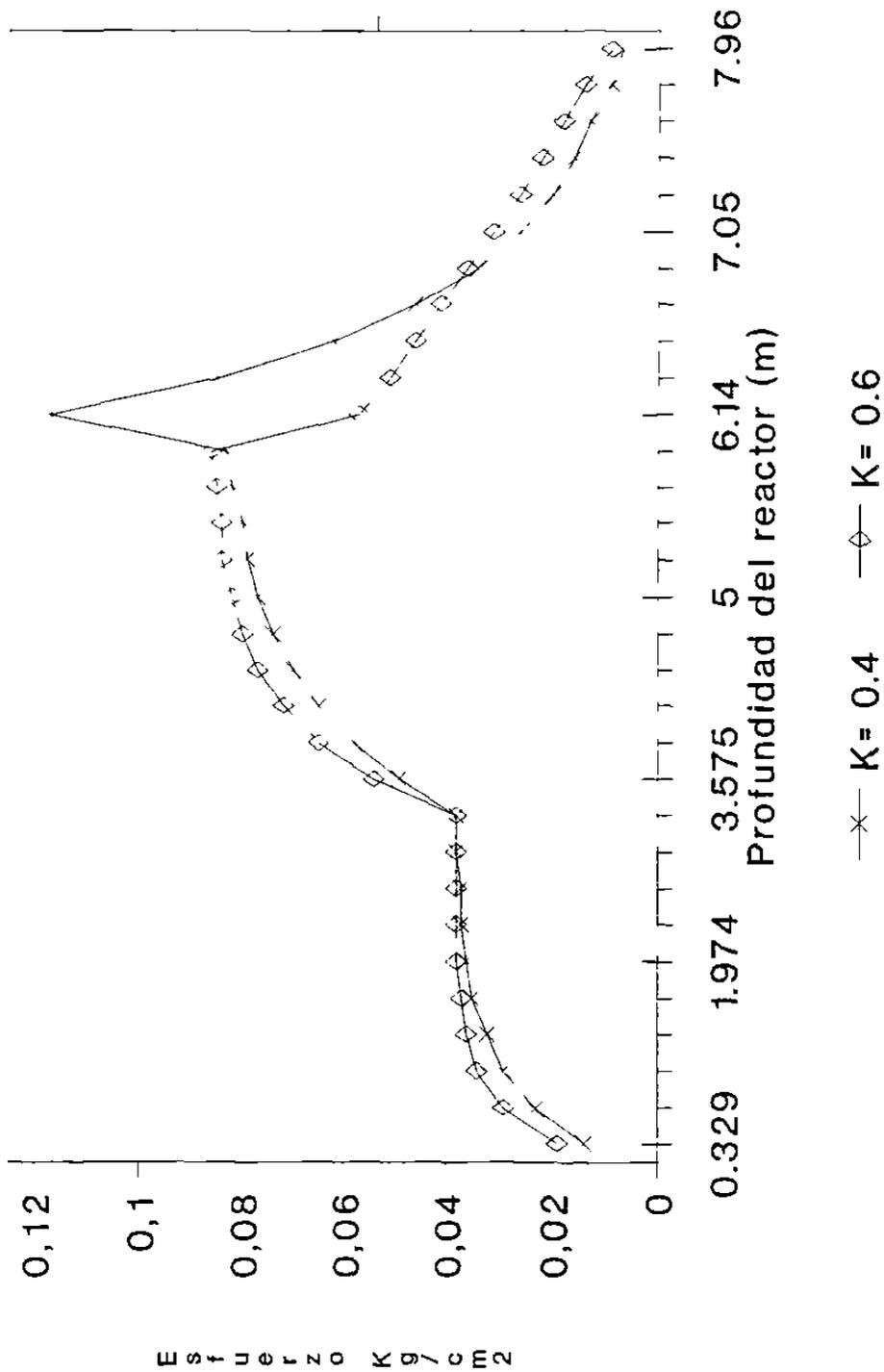
K=0.4



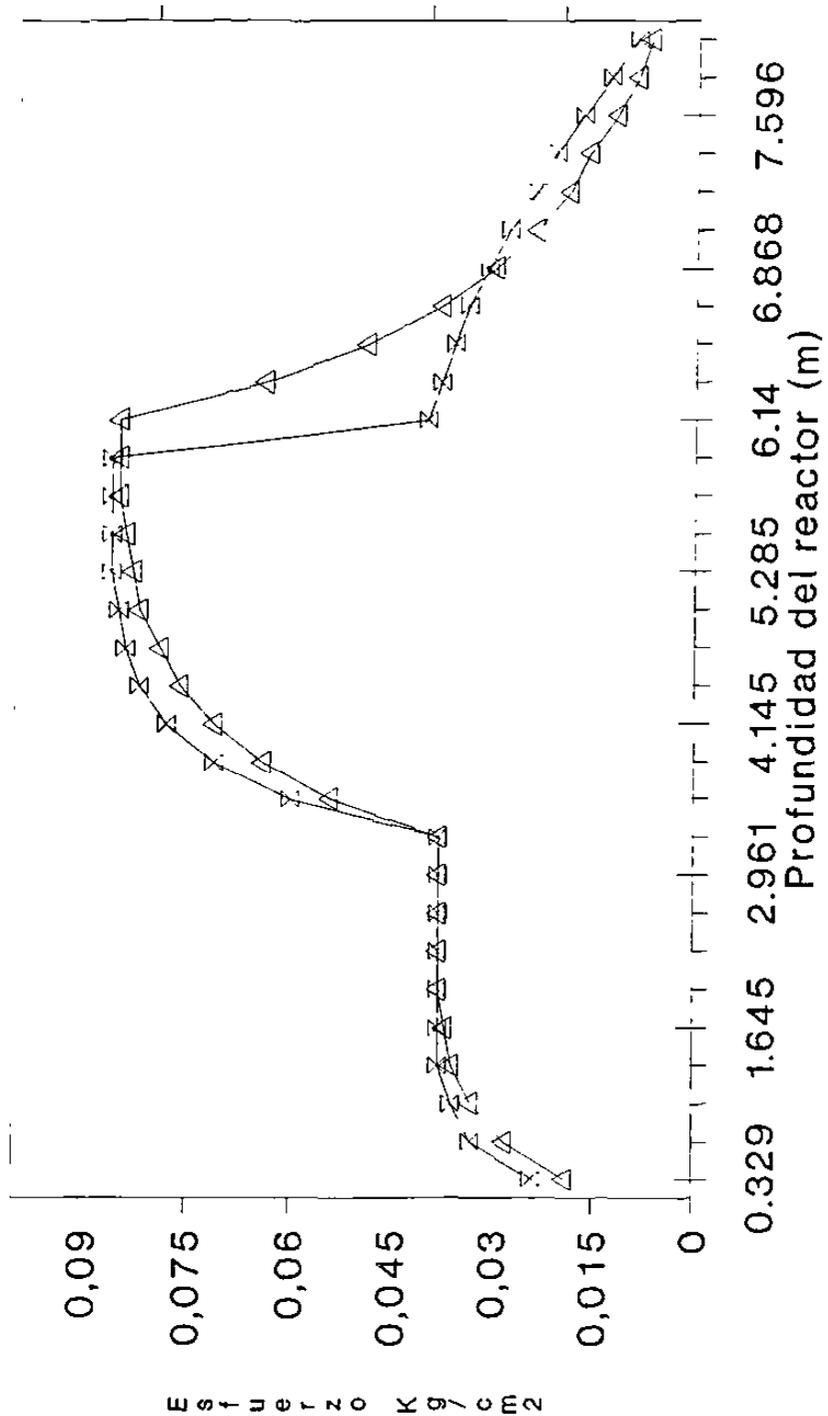
---+--- phi de 350 (USADO) —x— phi de 450 (NUEVO)

mcrg

ESFUERZO CORTANTE A LA PARED PHI DE 350



ESFUERZO CORTANTE A LA PARED PHI DE 450



—△— K=0.4 —×— K=0.6

mcr9

