

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



TESIS DOCTORAL

**Efectos producidos por las pantallas internas en el tipo de
flujo del gas en lechos fluidizados**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

José Manuel Aragón Romero

DIRECTOR:

José Corella

Madrid, 2015

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

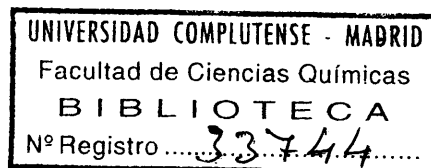
EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS PAN-
TALLAS INTERNAS EN EL TIPO DE FLUJO
DEL GAS EN LECHOS FLUIDIZADOS

MEMORIA

que para optar al Grado de Doctor en Ciencias Químicas

presenta

JOSE MANUEL ARAGON ROMERO



b 16368113
c 37509287

Madrid, Febrero de 1976

El presente trabajo ha sido realizado en los laboratorios de la Cátedra de Fisi-coquímica de los Procesos Industriales, de esta Facultad.

Quiero expresar mi más sincero agrade-cimiento al titular de dicha Cátedra, Pro-fesor Dr. D. Luis Gutiérrez Jodra, por la inestimable ayuda que, en todo momento, re-cibí de él, sin cuyo generoso apoyo no ha-bría sido posible desarrollar y hacer rea-lidad esta obra.

Asímismo agradezco profundamente al - Dr. D. José Corella Tudanca, director del presente trabajo, la constante dedicación e interés mostrados durante la realización de esta Tesis.

También deseo agradecer al Dr. D. Ar-turo Romero Salvador y a todos los compañe-ros de cátedra la ayuda y colaboración -- prestadas en muchos momentos.

J.M. Aragón

Madrid, Febrero de 1976

I N D I C E

1.	<u>RESUMEN</u>	1
2.	<u>INTRODUCCION</u>	6
2.1	PARAMETROS QUE DEFINEN AL ESTADO FLUIDIZADO ..	7
2.1.1	Tamaño de partícula	7
2.1.2	Velocidades características	8
2.1.3	Distribución de tamaños de burbuja	9
2.1.4	Expansión del lecho	10
2.1.5	Tipo de flujo del gas	11
2.2	CONTROL DEL TAMAÑO DE BURBUJA	12
2.2.1	Métodos generales	13
2.2.2	Pantallas internas	16
2.2.2.1	Tubos y placas horizontales	16
2.2.2.2	Tubos y placas verticales	17
2.2.2.3	Rellenos	18
2.3	DISEÑO DE PANTALLAS INTERNAS	18
2.4	MÉTODOS EXPERIMENTALES DE OBSERVACION Y ME- DIDA DE LAS BURBUJAS	19
2.4.1	Métodos simples	19
2.4.2	Sondas	20
2.4.3	Lechos bidimensionales	21
2.4.4	Rayos X	22
2.4.5	Métodos indirectos	23

2.4.6	Reactores	24
2.5	OBTENCION DE BUTIRONITRILO A PARTIR DE BUTA- NOL Y AMONIACO	24
2.6	OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	29
3.	<u>DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS</u> <u>EXPERIMENTALES</u>	31
3.1	EQUIPO PARA LOS EXPERIMENTOS SIN REACCION QUI MICA	31
3.2	EQUIPO PARA LOS EXPERIMENTOS CON REACCION QUI MICA	41
3.3	MATERIALES	53
3.3.1	Materiales empleados en las experiencias sin reacción química (lecho bidimensional)	53
3.3.2	Materiales empleados en los experimentos con reacción química (lechos fijos y fluidizados)... ..	53
3.4	PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES	55
3.4.1	Desarrollo de una experiencia en el lecho bi dimensional	55
3.4.2	Desarrollo de una experiencia con reacción quí mica en el reactor de lecho fluidizado	55
3.5	METODOS DE ANALISIS	56
3.5.1	Experimentos con el lecho bidimensional	56

3.5.2	Experimentos con reacción química	58
4.	<u>ESTUDIOS EN LECHO BIDIMENSIONAL SIN PANTALLAS Y SIN REACCION QUIMICA</u>	62
4.1	LECHOS UTILIZADOS	63
4.2	VELOCIDADES MINIMAS DE FLUIDIZACION Y DE COMPLETA FLUIDIZACION	64
4.3	CRECIMIENTO DE LAS BURBUJAS CON LA ALTURA (DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE BURBUJA EN EL LECHO) ..	65
4.4	EXPANSION DEL LECHO	71
5.	<u>ESTUDIOS EN LECHO BIDIMENSIONAL CON PANTALLAS Y SIN REACCION QUIMICA</u>	74
5.1	PARAMETROS REDUCIDOS	74
5.2	CRECIMIENTO DE LAS BURBUJAS CON LA ALTURA (DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE BURBUJA EN EL LECHO) ..	85
5.2.1	Ajuste de los puntos experimentales	86
5.2.2	Resultados experimentales	91
5.3	TAMAÑO DE BURBUJA MEDIO	104
5.4	EXPANSION DEL LECHO	109
5.5	EFICACIA DE LAS PANTALLAS	112
5.5.1	Definiciones	112

5.5.2	Resultados experimentales	119
5.6	CORRELACIONES OBTENIDAS	122
5.6.1	Variación de la eficacia de choque con el pa rámetro de choque. Cálculo de tamaños de bur- buja	122
5.6.2	Relación entre las eficacias globales y de expansión y el tamaño de burbuja medio	131
5.6.3	Influencias de la altura de colocación de una pantalla formada por una sola fila de cilindros	134
5.6.3.1	Tamaño de burbuja medio	134
5.6.3.2	Eficacias	136
5.6.4	Influencias del número de cilindros que cons tituyen una pantalla formada por una sola fi la de cilindros	136
5.6.4.1	Tamaño de burbuja medio	137
5.6.4.2	Eficacias	139
5.6.5	Influencias de la distancia vertical entre dos o tres filas de cilindros	140
5.7	CRITERIOS DE DISEÑO DE PANTALLAS INTERNAS	142
5.7.1	Criterios generales	142
5.7.1.1	Método experimental	142
5.7.1.2	Tipo de pantalla	143
5.7.1.3	Validez de las correlaciones obtenidas	143
5.7.2	Pantallas formadas por ordenaciones de cilin dros horizontales	145
5.7.2.1	Diámetro, separación y número de cilindros ...	145
5.7.2.2	Número de filas y colocación de las mismas ...	146

5.7.2.3	Distribuidor del gas	147
5.7.3	Ejemplo de aplicación de los anteriores cri- terios al diseño de una pantalla	147
6.	<u>ESTUDIOS PREVIOS CON REACCION QUIMICA</u>	153
6.1	CATALIZADOR DE MAGNETITA	154
6.1.1	Tratamiento previo del catalizador	154
6.1.2	Conversión de butanol en lecho fijo	158
6.1.3	Vida del catalizador	160
6.1.4	Conclusión	161
6.2	CATALIZADOR DE OXIDO DE CINC	161
6.2.1	Propiedades fluidodinámicas	162
6.2.2	Resistencia al desgaste	162
6.2.3	Tratamiento previo (calcinación)	165
6.2.4	Conversión de butanol en lecho fijo	167
6.2.5	Conversión de butanol en lecho fluidizado sin pantallas	170
6.2.6	Vida del catalizador	172
6.3	ELECCION DEL CATALIZADOR	176
7.	<u>ESTUDIOS EN EL REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO CON PANTALLAS</u>	177
7.1	CONDICIONES EXPERIMENTALES Y PANTALLAS EM- PLEADAS	177
7.1.1	Condiciones de trabajo	177
7.1.2	Pantallas	178

7.2	CONVERSIONES DE BUTANOL EN LECHO CON PANTALLAS.	184
7.2.1	Elaboración de datos	185
7.3	EFICACIA DE LAS PANTALLAS	187
7.3.1	Definiciones	187
7.3.2	Resultados experimentales	189
7.4	CORRELACIONES OBTENIDAS	189
7.4.1	Variación de la eficacia de conversión con el número de cilindros de una pantalla formada por una fila	191
7.4.2	Variación de la eficacia de conversión con la altura de colocación de una fila de cilindros.,	191
7.4.3	Variación de la eficacia de conversión con el número de filas de cilindros	193
7.4.4	Relación entre la eficacia de conversión y la eficacia global	193
8.	<u>METODOLOGIA DEL DISEÑO DE PANTALLAS FORMADAS POR ORDENACIONES DE TUBOS HORIZONTALES</u>	197
9.	<u>CONCLUSIONES</u>	199
10.	<u>NOMENCLATURA</u>	205
11.	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</u>	210
	<u>APENDICE I:</u> Fotografías del lecho bidimensional	215

1.- RESUMEN

Uno de los inconvenientes más graves que tiene el diseño y utilización del lecho fluidizado gas-sólido es la presencia de burbujas del gas. La introducción de pantallas internas en el lecho es uno de los métodos que mejores rendimientos produce cuando se pretende controlar el crecimiento de estas burbujas.

Los numerosos tipos de pantallas que existen y la escasez de datos cuantitativos publicados hacen difícil la elección y el diseño de tales elementos.

El presente trabajo intenta dar una respuesta a esta falta de información. Sus objetivos fundamentales han sido:

- 1.- Establecer las variables de diseño de las pantallas formadas por ordenaciones de tubos horizontales.
- 2.- Correlacionar estas variables con los efectos producidos en el lecho fluidizado.
- 3.- Obtener criterios de diseño y elaborar una metodología de la investigación sobre diseño de este tipo de pantallas.

El estudio se inició con un lecho bidimensional de corindón fluidizado con aire. Las medidas de este lecho eran: 90 cm de altura, 25 cm de anchura y 2 cm de "espesor". Se ensayaron

Para filas de tubos individuales: Eficacia de choque, E_{choq}

Para cualquier número de filas : Eficacia global, E_G

La eficacia de choque es una medida de la disminución relativa del tamaño de las burbujas que chocan contra una fila de tubos horizontales y la eficacia global lo es de la disminución relativa del tamaño de burbuja medio en todo el lecho respecto al mismo tamaño medio en el lecho sin pantallas.

En términos generales, las relaciones entre estas eficacias y los parámetros de construcción de las pantallas son:

- a) Las eficacias de choque y global de una pantalla formada por una sola fila de tubos aumentan al aumentar el diámetro o el número de tubos.
- b) Hay un valor máximo de la eficacia global cuando se sitúan dichas pantallas a una altura $H_f/2$ (siendo H_f la altura total del lecho fluidizado).
- c) La eficacia global aumenta al aumentar el número de filas que forman a las pantallas.
- d) Con pantallas de 2 ó 3 filas de tubos hay un valor óptimo de la separación vertical entre filas para el cual la eficacia global es máxima.

Las siguientes correlaciones, halladas en el curso de este trabajo:

$$E_{\text{choq}} = 6,66 \cdot 10^{-3} \frac{(d_b)_{\text{choq}} U_{mf}}{\rho_s d_p U_o \bar{S}_h}$$

$$E_{G_P} = 1 - \frac{(\bar{d}_b) \text{ con pantalla "P"}}{(\bar{d}_b) \text{ sin pantallas}}$$

proporcionan la forma de poder predecir la eficacia global de una pantalla a partir de las eficacias de choque de las filas individuales que la forman o bien diseñar una pantalla con la que se obtenga un tamaño de burbuja medio dado.

Para comprobar de una forma más realística los criterios de diseño obtenidos a partir de los ensayos en el lecho bidimensional sin reacción química se hizo un estudio de una reacción química en reactor de lecho fluidizado.

El reactor era de vidrio (5,28 cm de diámetro interno) y la reacción que se llevaba a cabo la de obtención de butironitrilo a partir de butanol y amoniaco, en fase gaseosa y catalizada por un catalizador sólido granular. Como catalizador se utilizó óxido de cinc, en forma de partículas pastilladas a 700 atm. y calcinado previamente a 450°C durante 5 horas. Otro catalizador ensayado fué magnetita, que se desechó por los gastos e inconvenientes que suponía la reducción previa necesaria. Trabajando a 350°C y con tiempos espaciales de 150 g ZnO. hr/mol de butanol alimentado se obtenían conversiones del 68% en lecho fijo y del 27% en lecho fluidizado sin pantallas. La mejor pantalla ensayada (8 filas de 4 tubos horizontales) consiguió elevar esta última con versión al 45%.

2.- INTRODUCCION

Desde que en 1922 se patentó el primer lecho fluidizado industrial no ha cesado la búsqueda de soluciones que permitieran dominar perfectamente la tecnología del sistema fluidizado. (1)

Uno de los más graves inconvenientes de los lechos fluidizados suele ser la presencia de burbujas de gas, que representan fundamentalmente un cortocircuito del mismo, con la consiguiente pérdida en el rendimiento.

El aprovechamiento óptimo de un lecho fluidizado se logra cuando, entre otras cosas, se consigue mantener el tamaño de las burbujas dentro de ciertos límites.

El empleo de pantallas internas permite controlar el tamaño de las burbujas con buenos rendimientos. Los métodos de diseño de estas pantallas no están muy claros todavía; de hecho, no se sabe aún cómo diseñar la pantalla óptima para un proceso dado. Esto es debido, por una gran parte, a la gran cantidad de tipos propuestos, y por otra, a la escasez de datos cuantitativos publicados, ya que las informaciones más útiles están protegidas por patentes.

Con el presente trabajo se pretende contribuir a la resolución del problema desarrollando una metodología del diseño de pantallas formadas por ordenaciones de tubos horizontales.

(1) En todo este trabajo, cuando se hable de lecho fluidizado se entenderá lecho fluidizado sólido-gas.

2.1.- PARAMETROS QUE DEFINEN AL ESTADO FLUIDIZADO

Aunque son sobradamente conocidas las variables fundamentales que definen a un lecho fluidizado, se ha creído necesario dar una somera exposición de las bases teóricas que se han tomado para el desarrollo del presente trabajo. Esta necesidad surge de la diversidad de criterios existentes en la consideración de algunas de ellas.

2.1.1.- Tamaño de partícula

El tamaño de partícula se mide generalmente por análisis de tamizado. En este caso, se define (1) el tamaño medio de una fracción como:

$$d_p = \sqrt{d_{p_n} \cdot d_{p_{n+1}}} \quad 1.$$

donde d_{p_n} y $d_{p_{n+1}}$ son las aberturas de malla de dos tamices sucesivos, y d_p el tamaño medio de la fracción que se recogió del tamiz inferior. Así, por ejemplo, el sólido que pasa por un tamiz de 0,2 mm y queda retenido en el siguiente, de 0,1 mm se denomina como sólido de intervalo de tamaños -0,2 + 0,1; ó, en micras, -200 + 100 micras. Su tamaño medio de partícula sería, según la ecuación 1, $d_p = \sqrt{200 \cdot 100} = 141$ micras.

El tamaño medio de mezclas se calcula (1) por:

$$d_p = \frac{100}{\sum \frac{w_i}{d_{p_i}}} \quad 2.$$

donde w_i es la fracción, en peso, de sólido con tamaño de partícula d_{p_i} .

2.1.2.- Velocidades características

La velocidad mínima de fluidización, U_{mf} , se obtiene a partir de diagramas experimentales de pérdida de carga frente a velocidad lineal del gas; corresponde al punto de intersección de la línea característica de la pérdida de carga en el lecho fijo aflojado con la paralela a la abcisa que pasa por el punto correspondiente a la pérdida de carga teórica del lecho plenamente fluidizado.

La velocidad mínima de fluidización puede calcularse por medio de ecuaciones teóricas, desarrolladas a partir de la ecuación de Ergun (2). En este trabajo se ha tomado la ecuación de Otero y Corella (3):

$$U_{mf} = 159 \cdot \rho_s^{0,87} d_p^{1,76} \text{ (unidades M.K.S.)}$$

3.

válida para cualquier tipo de sólido fluidizado con aire a temperatura ambiente.

La velocidad mínima de completa fluidización, U_{mcf} , se obtiene representando porcentaje de lecho fluidizado frente a velocidad lineal del gas. Al cociente entre velocidad mínima de completa fluidización y de fluidización se le denomina velocidad reducida, U'_R , y al cociente entre la velocidad lineal del gas (referida a tubo vacío) y la velocidad mínima de fluidización como velocidad reducida de trabajo, U_R .

2.1.3.- Distribución de tamaños de burbuja

Si bien algunos modelos de lecho fluidizado (2) suponen, bajo ciertas condiciones restringidas, que el tamaño de burbuja puede considerarse constante a lo largo del lecho, los modelos más recientes y más realísticos tienen en cuenta el crecimiento que experimentan las burbujas a medida que ascienden por el lecho. En este trabajo se ha tomado la correlación de Kobayashi (34,53) como representativa de dicho crecimiento:

$$d_b = 1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} H_D d_o \tag{4}$$

(unidades c.g.s.)

donde, para lecho bidimensional:

$$d_o = 2^{1/3} (4/\pi d_t)^{2/3} \frac{G^{2/3}}{g^{1/3}} \tag{5}$$

y para lecho cilíndrico:

$$d_o = (6G/\pi)^{0,4} / g^{0,2} \tag{6}$$

siendo

d_t = "espesor" del lecho bidimensional

$G = (\dot{U}_o - U_{mf})/n_o$

$n_o = n^{\circ}$ de orificios/cm² de la placa distribuidora

2.1.4.- Expansión del lecho

El aumento de altura que experimenta el lecho fluidizado respecto a la que tiene en condiciones de mínima fluidización (53) viene dada por lo que se denomina expansión del lecho:

$$\Delta H_L = \frac{H_f - H_{mf}}{H_f} \quad 7.$$

Así pues, la expansión puede calcularse a partir de medidas de alturas del lecho, en condiciones de mínima fluidización y en las condiciones de trabajo.

La fracción de burbujas en el lecho vale, según el modelo de Kunii - Levenspiel(2):

$$\delta = \frac{U_o - U_{mf}}{U_b} \quad 8.$$

Cuando se supone que todo el gas en exceso sobre el necesario para conseguir la mínima fluidización pasa a través del lecho en forma de burbujas, la expansión se debe exclusivamente al volumen de lecho ocupado por burbujas.

$$\Delta H_L = \delta ; \quad \frac{H_f - H_{mf}}{H_f} = \frac{U_o - U_{mf}}{U_b} \quad 9.$$

La velocidad de ascenso de las burbujas, U_b se define como:

$$U_b = U_o - U_{mf} + 0,711 \sqrt{\bar{d}_b \cdot g} \quad 10.$$

siendo \bar{d}_b el tamaño de burbuja medio en todo el lecho, definido (53) como el tamaño de burbuja correspondiente a una altura $H_D = 1/2 H_f$. Con ello, la velocidad de ascenso U_b se puede poner como:

$$U_b = U_o - U_{mf} + 0,711 \left(1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} \frac{H_f}{2} + d_o \right) g \quad 11.$$

sustituyendo este valor en las ecuaciones 8 y 9 se puede observar que la variación de la expansión no es lineal con la velocidad reducida, aunque para intervalos pequeños de velocidades reducidas de trabajo, pueden relacionarse ambas magnitudes por medio de una ecuación empírica lineal del tipo:

$$\Delta H_L = a' U_R + b' \quad 12.$$

2.1.5.- Tipo de flujo del gas

Uno de los mayores inconvenientes surgidos en la elaboración de modelos teóricos de lechos fluidizados ha sido la complejidad del tipo de flujo del gas, ya que, parte del gas atraviesa el lecho en flujo de pistón, algo en mezcla completa y el resto en forma de burbujas.

Los primeros modelos trataban al sistema fluidizado siguiendo los principios de la fluidodinámica clásica (4, 5, 6, 7, 8). Más tarde han surgido modelos que consideran al lecho dividido en "fases" (2, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 53)

constituídas por el sólido, el gas en forma de burbujas y el gas en flujo de pistón; unos consideran que hay intercambio de materia entre las fases y otros suponen que no hay intercambio entre las burbujas y el sólido. También hay modelos que se construyen a partir de las distribuciones de tiempos de residencia del gas o distribuciones de tiempos de contacto (16).

En general estos modelos suelen proporcionar ecuaciones de muy difícil aplicación práctica; por otro lado las simplificaciones y suposiciones que se hacen en el desarrollo de los modelos hacen a éstos muy limitados.

En términos generales, el tipo de flujo del gas en los lechos fluidizados es tal que las conversiones químicas que en ellos se obtienen suelen ser inferiores a las que podrían esperarse si el flujo fuera de pistón.

El aumento del rendimiento de un lecho fluidizado sólo es posible generalmente controlando el tamaño de burbuja, con lo que el flujo del gas se acerca al de pistón. Es en este sentido hacia donde va dirigida la investigación actual y donde, quizá, esté la solución adecuada que permitirá dominar perfectamente al lecho fluidizado.

2.2.- CONTROL DEL TAMAÑO DE BURBUJA

El burbujeo es lo más característico de los lechos fluidizados. Las burbujas ocasionan las diferencias básicas que existen entre un lecho fijo y un lecho fluidizado (17, 18, 51). Por una parte, modifican el flujo del gas, apartándolo del de tipo de pistón, y por otra, originan movimientos de las partículas del sólido.

La eliminación de las burbujas, técnicamente posible, no sería la solución perfecta, más bien haría desaparecer las ventajas del lecho fluidizado (mezcla perfecta del sólido, isothermicidad, etc.) y crearía nuevos inconvenientes. El aprovechamiento óptimo se obtiene cuando se consigue mantener el tamaño de las burbuja dentro de unos ciertos valores (19, 20, 21) tales que se minimice la disminución del área de contacto entre sólido y gas y se mantenga el movimiento del solido.

En resumen, los objetivos (22, 23) que se persiguen al controlar el tamaño de burbuja son los siguientes: acercar lo más posible el flujo del gas al ideal de tipo de pistón, mantener las características de isothermicidad y transmisión del calor, aminorar las pérdidas de sólido por arrastre, suavizar la operación disminuyendo las fluctuaciones y vibraciones del lecho y, en suma, mejorar la economía del proceso.

El burbujeo depende principalmente de:

- a) Características del sistema, condiciones de trabajo y diseño del equipo.
- b) Presencia de elementos internos en el lecho.

2.2.1.- Métodos generales

a) Influencias de las propiedades físicas del sólido y del gas.- La relación entre las densidades del sólido y del gas, $(\rho_s - \rho_g) / \rho_g$, determina (17, 19, 24) el tipo de fluidización; Harrison (6) indica que cuando dicha relación es mayor de 1000 la fluidización es heterogénea, es decir, con burbujas apreciables. El mismo autor afirma que con líquidos

puede esperarse dicho tipo de fluidización cuando las partículas del sólido son mayores de 1 mm.

En cuanto a la viscosidad del gas, puede decirse (6) que su influjo es más importante con tamaños de partícula muy pequeños y que en general, la fluidización es heterogénea cuando la viscosidad del gas es muy pequeña.

En términos generales, en sistemas sólido-líquido cabe esperar fluidización homogénea, mientras que en los sólido-gas casi siempre hay burbujas.

b) Influencias de las condiciones de trabajo.- La velocidad lineal del gas influye enormemente en la calidad de fluidización (17, 18, 19, 24, 25). En sistemas sólido-líquido las burbujas empiezan a formarse cuando la velocidad del líquido es varias veces mayor que la mínima de fluidización; en cambio, en sistemas sólido-gas, las burbujas aparecen generalmente cuando la velocidad del gas supera ligeramente el valor de la velocidad mínima de fluidización.

Como índices de calidad pueden tomarse números adimensionales que contienen las variables más significativas. Así, el número de Froude, $U_o^2 / d_p g$, indica (2,6) cuando es mayor de 1, que la fluidización es heterogénea. En el índice de Romero y Johanson (2) se reúnen cuatro números adimensionales:

$$(\text{Fr})_{mf} \cdot (\text{Re}_p)_{mf} \cdot (\rho_s - \rho_f / \rho_f) \cdot (H_{mf}/D)$$

Cuando este producto es mayor de 100, la fluidización es heterogénea.

La temperatura de trabajo (6, 17) influye sobre la densidad y viscosidad del gas, por lo que si se aplican los datos obtenidos en el laboratorio a temperatura ambiente a un proceso industrial a altas temperaturas, podría haber grandes diferencias de calidad de fluidización. En términos generales, la fluidización se suaviza al aumentar la temperatura de trabajo.

c) Influencias del tamaño y geometría del equipo.- Aunque se tengan en cuenta las variables citadas en los dos puntos anteriores, el dimensionado y geometría del recipiente o reactor y del distribuidor de gases pueden ser parámetros que modifiquen sustancialmente el comportamiento del sistema.

La forma de los recipientes que contienen al lecho suele ser cilíndrica, pero a veces se emplean otros perfiles, por ejemplo, cónicos (6, 17, 26).

El diámetro del lecho influye especialmente en el tamaño de las burbujas y sus velocidades de ascenso (17, 18, 21), habiéndose observado (28) que dichas velocidades aumentan, en igualdad de condiciones experimentales, al aumentar el diámetro del lecho. En general, los lechos de pequeño diámetro y gran altura son propensos al fraccionamiento y los de gran diámetro a la perforación (29), por lo que es importante llegar a soluciones de compromiso del valor de H_f / D (altura/diámetro) para conseguir flujos del gas cercanos al de tipo pistón (30).

La elección del distribuidor del gas es una de las fases más importantes del diseño (24, 31, 32, 33, 34, 35); los parámetros fundamentales que influyen en la calidad de fluidización son el tipo de distribuidor (placas, secciones tron

cocónicas, campanas, etc.) y su dimensionado (distribución y tamaño de las perforaciones, etc.). Por otra parte, no hay que olvidar parámetros tales como resistencia mecánica y pérdida de carga del gas a través del distribuidor, que influyen en la economía del proceso (materiales, compresores, etc.).

2.2.2.- Pantallas internas

Las pantallas son elementos colocados en el interior del lecho con el fin primordial de romper las burbujas. El empleo de pantallas parece ser el método que mejor soluciona el problema del control del tamaño de burbuja (29, 36).

Las pantallas utilizadas hasta 1971 se clasifican en tres clases principales (37):

- . Pantallas formadas por elementos horizontales
- . Pantallas formadas por elementos verticales
- . Rellenos

2.2.2.1.- Tubos y placas horizontales

En experimentos realizados con un tubo horizontal sumergido en el lecho fluidizado, Glass y Harrison (38) observaron que debajo del tubo se formaban burbujas de aire y encima quedaban partículas sin fluidizar, y que el aire acumulado en la parte inferior de dicho tubo originaba cadenas de burbujas. Posteriormente (35) al estudiar el efecto que producían 13 tubos de 1 cm de diámetro colocados en tres filas horizontales dentro de un lecho fluidizado con aire se observó que el fenómeno principal consistía en algunas roturas de burbujas por choque contra los tubos, y coalescencia posterior, semejante a la que ocurre en los lechos sin pantallas.

En otros trabajos (39, 40) se han realizado estudios teóricos sobre el flujo de un fluido a través de una ordenación de cilindros, comprobándose posteriormente por vía experimental que la pérdida de carga del fluido es directamente proporcional a la cantidad de cilindros y a la velocidad lineal del mismo.

Al estudiar la transmisión de calor entre un lecho fluidizado con gas y diversas ordenaciones de tubos colocados en su interior se ha encontrado (35) una variación radial del coeficiente de transmisión de calor, tanto más importante cuanto más cercanas se colocan las filas y más próximos están los tubos que forman cada fila.

Aunque se han descrito diversas desventajas de las pantallas formadas por tubos y varillas horizontales (35, 37), no pueden hacerse aún estimaciones exactas sobre sus posibilidades hasta que trabajos posteriores confirmen y amplíen las observaciones realizadas hasta la fecha.

El empleo de placas perforadas y tamices ha demostrado que se pueden conseguir aumentos importantes de la conversión (5, 22, 41, 42, 43). En general se suaviza la operación (27), disminuyendo apreciablemente las vibraciones del aparato y la expansión del lecho. Los reactores con pantallas de este tipo pueden considerarse (23) compartimentados, con flujos de mezcla completa para el gas y el sólido en cada compartimiento.

2.2.2.2.- Tubos y placas verticales

El empleo de superficies verticales suele estar encaminado a conseguir compartimentación del lecho (32) o diámetros "equivalentes". El primer objetivo ocasiona acercamiento del

flujo del gas al de pistón y el segundo permite el aumento de escala, de forma que lechos de 6 pies de diámetro (22) pueden comportarse como si tuvieran 6 pulgadas, limitándose el tamaño de burbuja y aumentando la conversión.

2.2.2.3.- Rellenos

Los rellenos utilizados como pantallas internas comprenden todos los tipos de anillos Raschig (22), monturas, sólidos inertes, etc.

Los consistentes en anillos Raschig contruídos con malla metálica (44) han demostrado ser aceptablemente buenos en cuanto a rotura de las burbujas y transmisión de calor (45), habiéndose estudiado también la influencia de la proporción de relleno en la expansión del lecho (46).

Algunos trabajos recientes (37) sugieren que los rellenos pueden ser más efectivos si "flotan" en el lecho en lugar de estar en posiciones fijas.

2.3.- DISEÑO DE PANTALLAS INTERNAS

La revisión bibliográfica realizada muestra que es imposible especificar un tipo de pantalla que sirva para todas las situaciones. Esto es debido a que, por una parte, cada aplicación particular de la fluidización utiliza determinadas características del lecho fluidizado y, por otra, a que cada tipo de pantalla tiene ventajas e inconvenientes que pueden empeorar un proceso y mejorar otro. Por ejemplo, aunque la segregación es un fenómeno adverso, si un lecho fluidizado se emplea como clasificador de sólidos es un fenómeno que conviene promover, en cuyo caso una pantalla de placas horizontales puede ser apropiada, pues tiende a segregar al lecho.

En otros casos puede ser importante una buena transmisión de calor, siendo entonces mejores las pantallas formadas por tubos que sirven de elementos transmisores además de controladores del tamaño de burbuja.

Hay aplicaciones en que sería conveniente combinar dos o más tipos de pantallas diferentes, complicándose aún más el diseño.

Finalmente cabe decir que, si bien en los últimos 15 años se ha avanzado bastante en el diseño de pantallas internas, quedan aún muchos problemas por resolver. Como ejemplos de los más destacables (37) están el aumento de escala y el diseño de pantallas formadas por ordenaciones de tubos horizontales.

2.4.- MÉTODOS EXPERIMENTALES DE OBSERVACION Y MEDIDA DE LAS BURBUJAS

La enorme importancia que tiene el conocimiento y comprensión de la naturaleza del fenómeno del burbujeo se ha traducido en el desarrollo de gran cantidad de métodos y técnicas que permitan observar y medir los parámetros principales de las burbujas: forma, tamaño, velocidad, frecuencia y situación.

2.4.1.- Métodos simples

La mayoría de los lechos industriales están formados por recipientes metálicos que impiden la observación directa del interior. Una forma de detectar las burbujas (35) en estas circunstancias es a partir de las vibraciones y fluc-

tuaciones que se producen al llegar las burbujas a la superficie del lecho. Si dicha superficie es accesible se pueden medir, visual o fotográficamente, el tamaño y la frecuencia de las burbujas que allí estallan.

Con recipientes transparentes se pueden observar las burbujas que ocasionalmente pasan cerca de la pared, pudiéndose forzar el paso por esa zona inclinando un poco el lecho.

Estos métodos, de gran sencillez, proporcionan informaciones muy someras, por lo que sus aplicaciones están muy limitadas.

2.4.2.- Sondas

Son elementos muy sofisticados, y por tanto con gran amplitud de aplicaciones y buenos márgenes de seguridad (19, 20, 35). Consisten básicamente de dos partes: un emisor de energía y un detector colocado muy cerca de él, lo cual hace que el conjunto sea de pequeñas dimensiones y pueda ser colocado en el interior del lecho sin ocasionar graves disturbios. El tipo de energía puede ser luz (visible, infrarroja, etc.), radiación gamma, etc. El funcionamiento del sistema se basa en que la señal que se transmite de emisor a detector es diferente si hay entre ellos partículas de sólido o burbujas de gas. Además de estos tipos hay sondas que constan de dos placas metálicas cercanas que forman parte de un condensador (variación de capacitancia), un filamento caliente y un termopar (variación de la transmisión de calor), etc. Las variaciones de energía transmitida pueden amplificarse y registrarse gráficamente. Utilizando dos sondas puede medirse la velocidad de una burbuja y colocando baterías de sondas se pueden medir las formas y tamaños.

2.4.3.- Lechos bidimensionales

El empleo de lechos bidimensionales (19, 33, 35, 38, 47, 48) permite obtener información de gran calidad sobre la verdadera naturaleza de las burbujas. El método consiste en mantener el lecho en un recipiente paralelepípedo, transparente, y de dimensiones tales que el espesor es de unos pocos centímetros, la anchura de unos 30 cm y la altura de unos cien centímetros. Las burbujas aparecen en estos lechos como si fueran cortes longitudinales, pudiéndose suponer que un lecho bidimensional representa aproximadamente una estrecha sección longitudinal de un lecho cilíndrico.

Con estos lechos se pueden hacer tres tipos de observaciones:

1) Iluminando el lecho por su parte posterior se ven las burbujas con toda claridad y se pueden medir sus parámetros característicos (generalmente con ayuda de fotografías).

2) Con el lecho iluminado por delante se pueden seguir los movimientos de las partículas adyacentes a la pared frontal. Algunas partículas se pueden seguir mejor si se tiñen de colores diferentes.

3) Se puede estudiar el movimiento del gas si se inyectan corrientes de gases trazadores (generalmente NO_2) (3, 21, 48, 49).

Para que el funcionamiento del lecho bidimensional y las observaciones que se hagan en él sean aceptables se deben tener en cuenta los factores siguientes:

a) Los fenómenos electrostáticos (43, 51, 52) se evitan mediante tratamientos antiestáticos del interior de las paredes (humidificación del gas, toma de tierra, etc.).

b) La fricción de las partículas con las paredes se reduce aplicando vibraciones (≈ 60 ciclos/seg.) al aparato.

c) El espesor del lecho depende del tamaño de partícula. Generalmente, cuanto mayor es el tamaño de partícula mayor es el espesor necesario, que no debe ser menor que 50 veces el tamaño de partícula.

d) Es muy importante tener una buena distribución del gas.

e) Las paredes del recipiente deben ser suficientemente finas para que no haya distorsiones de imágenes (suele preferirse el vidrio a los plásticos transparentes por ser más resistente al rayado y a los ataques químicos).

2.4.4.- Rayos X

La utilización de rayos X (35) se basa en poner una fuente de estas radiaciones a un lado del lecho y una pantalla receptora al otro. El método puede utilizarse, en principio, en lechos de cualquier tamaño y forma, aunque en la práctica hay limitaciones debidas a la potencia del equipo necesario. Se obtienen datos sobre la forma y el tamaño de las burbujas en cualquier instante y lugar del lecho por lo que supera a las sondas.

Tiene la desventaja de que sólo se pueden observar siluetas poco claras de las burbujas por lo que las burbujas próximas pueden ser difícilmente distinguibles. El método se limita en la práctica a lechos de pocos centímetros de anchura y con sólidos de pesos atómicos bajos. Las paredes del recipiente deben ser "transparentes" a los rayos X, y otras consideraciones prácticas limitan también el campo de visión a un círculo de 20 - 30 cm de diámetro.

2.4.5.- Métodos indirectos

Se basan en observar y medir algunos fenómenos secundarios producidos por las burbujas. Se pueden destacar tres formas indirectas de medir la intensidad del burbujeo: Por la expansión del lecho, por la distribución de tiempos de residencia del gas y por la conversión química (el último método se describe de manera destacada en el apartado 2.4.6).

La expansión del lecho a partir de la altura de mínima fluidización se debe a las burbujas. La mayoría de los autores define la expansión como la fracción de volumen del lecho ocupado por burbujas (24, 35, 41, 46, 51, 53). La medida de la expansión puede así dar información sobre la calidad de fluidización (41, 46), si bien no pueden obtenerse a partir de ellas datos de tamaño, frecuencia ni distribución de burbujas.

El empleo de trazadores (21, 23, 49, 53) permite obtener modelos teóricos del tipo del flujo del gas en los lechos fluidizados sólido-gas. La técnica se basa en inyectar en la corriente principal del gas fluidizante un gas trazador (NO_2 , gases radiactivos, etc.). Normalmente el flujo del

gas se representa en términos de parámetros tales como coeficientes de dispersión (modelos de dispersión) y coeficientes de intercambio entre fases (modelo de dos fases).

2.4.6.- Reactores

Los métodos que utilizan reactores de lecho fluidizado han sido descritos por algunos autores (13, 18, 53, 54, 55). Básicamente consisten en comparar las conversiones obtenidas en un reactor de lecho fluidizado con las obtenidas en uno de lecho fijo (flujo del gas tipo pistón) operando en las mismas condiciones.

Para confeccionar modelos consistentes hay que conocer perfectamente la cinética de la reacción que se lleva a cabo.

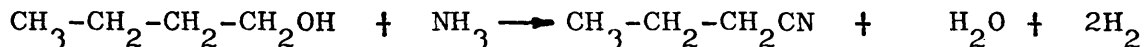
En el presente trabajo se empleó este método para obtener datos cuantitativos de los efectos producidos en un reactor de lecho fluidizado por la presencia de pantallas internas consistentes en ordenaciones de tubos horizontales.

2.5.- OBTENCION DE BUTIRONITRILO A PARTIR DE BUTANOL Y AMONIACO

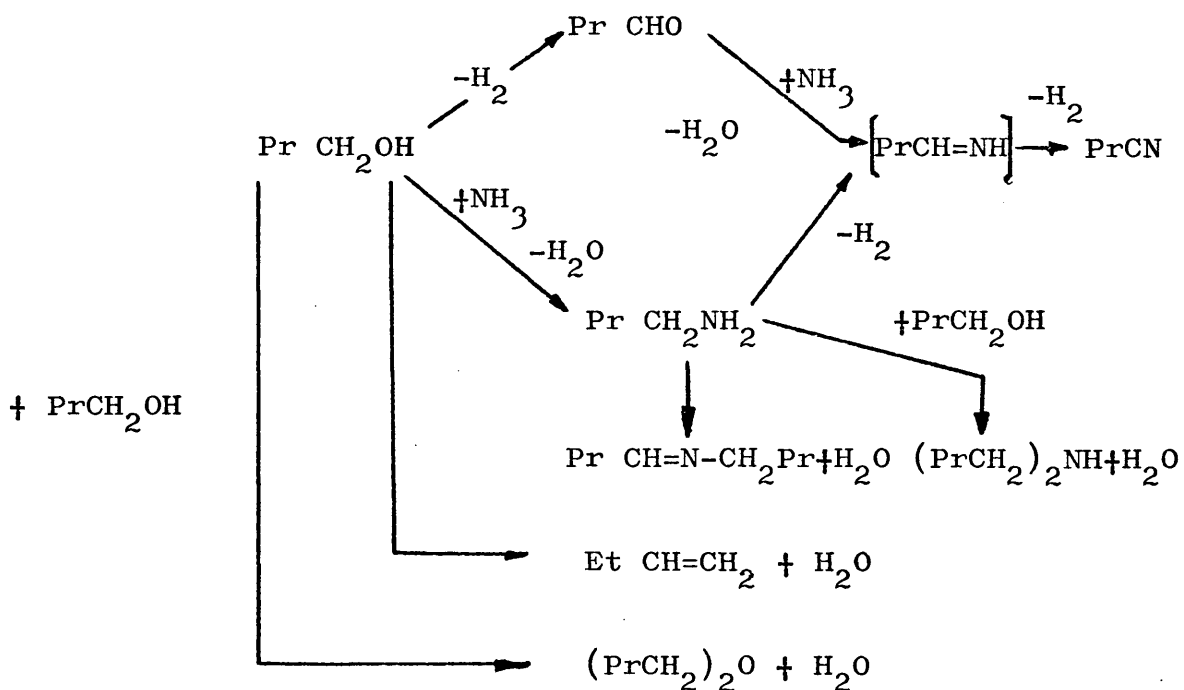
En la síntesis de nitrilos se utilizan como materias primas diversos compuestos orgánicos oxigenados, tales como ácidos, alcoholes, aldehídos. También se pueden emplear algunos hidrocarburos aromáticos, olefinas, aminas, etc. De todos éstos, los alcoholes y las olefinas parecen ser los más interesantes para dar el nitrilo correspondiente por reacción directa con amoniaco y con catalizadores sólidos (metales, o sus derivados, del grupo VIII de la tabla periódica, fundamentalmente).

La reacción elegida para ser llevada a cabo en el reactor de lecho fluidizado, según el método expuesto en el apartado anterior, 2.4.6, fué la de obtención de butironitrilo a partir de butanol y amoniaco en fase gaseosa y catalizada por óxido de cinc o magnetita.

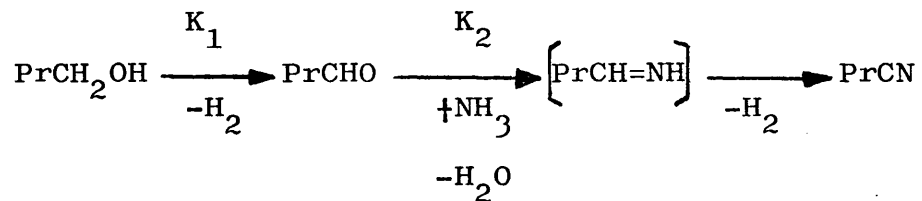
La ecuación estequiométrica es la siguiente:



Los resultados publicados (56, 57, 58) indican que suelen obtenerse productos secundarios en proporciones que dependen principalmente del catalizador utilizado. Así, con catalizadores de alúmina-metal (níquel, cobre, etc.) la reacción transcurre como sigue:



Sin embargo, con catalizadores de magnetita u óxido de cinc la reacción que fundamentalmente ocurre, con selectividades de butironitrilo del orden del 90 - 95% es, según Jodra y col. (57):



En la tabla I se resumen los principales datos cinéticos (con ZnO como catalizador) y termodinámicos de la reacción, según los trabajos previos de Jodra y col. (56, 57).

TABLA I.- Datos cinéticos y termodinámicos de la reacción de obtención de butironitrilo a partir de butanol y amoniaco.

<p><u>CONSTANTES DE VELOCIDAD</u> (Obtenidas en reactor integral, flujo pistón) (T en ° K)</p>	
$K_1 = 3,02 \cdot 10^{16} \exp(-51000/1,987 T)$	$\frac{\text{mol BuOH}}{\text{g catal.hr.atm.}}$
$K_2 = 1,16 \cdot 10^{11} \exp(-29500/1,987 T)$	$\frac{\text{mol BuOH}}{\text{g catal.hor.atm}^2}$
<p><u>CALOR STANDARD DE REACCION</u> (T en ° K)</p>	
$\Delta H_T^0 = 26590 + 14,1 T - 10,7 \cdot 10^{-3} T^2 + 2,25 \cdot 10^{-6} T^3 \text{ (cal/molg)}$	
$\Delta H_{623}^0 = 31,2 \text{ Kcal/molg}$	
<p><u>CONSTANTE DE EQUILIBRIO</u></p>	
$-\ln K_p = \frac{13430}{T} + 17,5 - 7,141 \ln T + 5,4 \cdot 10^{-3} T - 0,56 \cdot 10^{-6} T^2$	
$K_p \text{ 623}^\circ\text{K} = 42,05 \text{ atm}^2$	

En la tabla II se muestran las conversiones de equilibrio calculadas a partir de las constantes de equilibrio de la tabla I.

TABLA II.- Conversiones de equilibrio a varias temperaturas y relaciones de butanol y amoniaco.

T (°C)	Relación molar inicial BuOH/NH ₃		
	1:1	1:2	1:3
200	0,330	0,640	0,890
300	0,860	0,960	0,980
350	0,930	0,986	0,996
400	0,970	0,993	0,998
450	0,985	0,998	0,999

Con lo expuesto, se eligió esta reacción por las siguientes razones:

- . Los productos de partida son relativamente baratos y asequibles.
- . El producto principal que se obtiene, butironitrilo, tiene un cierto interés industrial y económico.
- . Pueden conseguirse altas conversiones a butironitrilo y pocos productos secundarios (alta selectividad) con catalizadores de óxido de cinc y de magnetita.

- . Su moderado calor de reacción, producirá sólo pequeños gradientes de temperatura en pequeños reactores de lecho fijo, con lo que se podrá comparar, con un amplio margen de confianza, los resultados obtenidos en lechos fijos y fluidizados.
- . Se dispone de datos sobre ella, así como de sus análisis químicos con lo que es una herramienta fácil de manejar.

2.6.- OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

La situación actual de la investigación sobre pantallas se puede resumir en dos puntos:

- 1) Se han ensayado múltiples tipos de pantallas
- 2) Hay una gran escasez de datos cuantitativos sobre métodos de diseño.

Por ello, el presente trabajo se orientó al estudio, en profundidad, de un sólo tipo de pantallas: las formadas por ordenaciones de cilindros horizontales, marcándose los siguientes objetivos:

- a) Encontrar las variables de diseño de este tipo de pantallas.
- b) Observar y correlacionar los efectos producidos en el sistema fluidizado con dichas variables.
- c) Obtener los criterios cualitativos y cuantitativos que sirvieran para crear una metodología del diseño de pantallas internas.

Para llegar a los fines propuestos se trazó el siguiente plan de trabajo:

1º.- Montar un lecho bidimensional (sin reacción química) para observar y medir los efectos producidos por diversas pantallas formadas por tubos horizontales en el tamaño de burbuja y la expansión del lecho. Los parámetros de diseño variables serían diámetro de los tubos, número de tubos por fila, número de filas y colocación relativa de filas. Previamente, y como base de comparación, se harían ensayos, en el mismo lecho sin pantallas, para obtener las velocidades características del sólido, datos de expansión del lecho y de distribución de tamaños de burbujas.

2º.- Poner a punto un método fotogramétrico. Dicho método consiste en tomar fotografías del lecho durante su funcionamiento y medir sobre las fotografías obtenidas los tamaños de las burbujas, alturas a que están situadas y altura del lecho.

3º.- Montar un reactor de lecho fluidizado (por condicionamientos económicos no podía ser mayor de 6 cm de diámetro) para estudiar los efectos producidos por diversas pantallas formadas por tubos horizontales en la conversión. Los parámetros de diseño variables serían los mismos que en los ensayos sin reacción (lecho bidimensional) para aplicar y comprobar los criterios obtenidos a partir de ellos. La reacción llevada a cabo sería la de obtención de butironitrilo a partir de amoníaco y butanol, en fase gaseosa y catalizada por un catalizador sólido. Previamente se harían ensayos para la elección del catalizador (magnetita u óxido de cinc) y para la obtención de curvas de conversión frente a tiempo espacial en lecho fijo (flujo de pistón) y en lecho fluidizado sin pantallas.

3.- DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

3.1.- EQUIPO PARA LOS EXPERIMENTOS SIN REACCION QUIMICA

En la figura 1 se muestra esquematicamente la instalación montada para llevar a cabo los experimentos en lecho bidimensional sin reacción química. El equipo constaba de las partes siguientes:

a) Sistema de alimentación; b) Difusor de gas; c) Distribuidor del gas; d) Lecho bidimensional; e) Pantallas y f) Equipo auxiliar.

a) Sistema de alimentación

El gas utilizado era aire; el caudal se regulaba mediante una válvula de aguja y se medía con un sistema de orificios medidores conectados a tubos en U. Los orificios se calibraron previamente, obteniéndose para cada uno la recta correspondiente a la representación, en escala doble logarítmica, del parámetro $q_0 \sqrt{p_0 M/T_0}$ frente a la pérdida de carga del orificio, ΔH_0 . El caudal q_0 estaba referido a las condiciones del orificio; para referirlo a las condiciones de la base del lecho (encima de la placa distribuidora) se multiplicaba por la relación entre las presiones absolutas en el orificio y en la base del lecho.

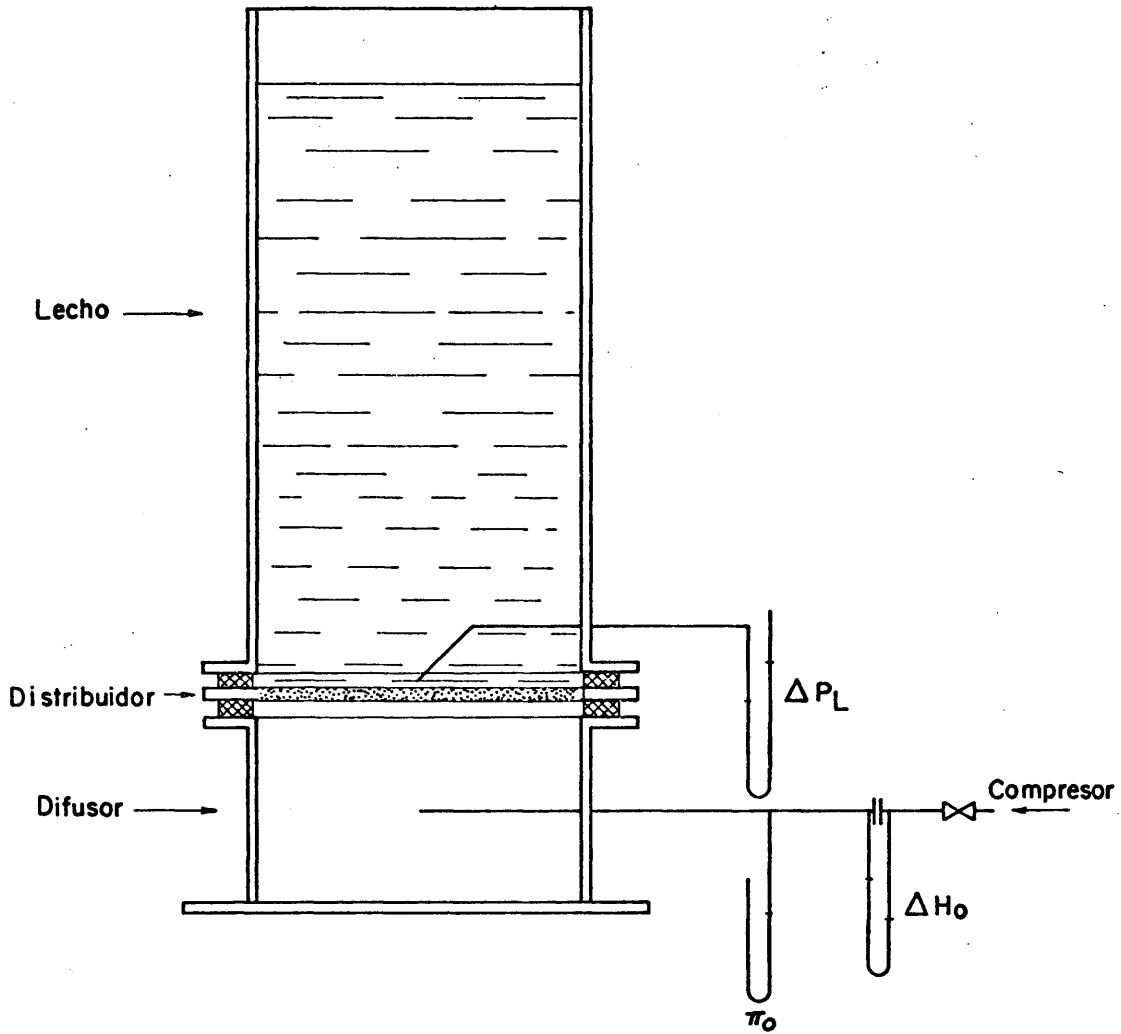


Fig. 1. — Esquema de la instalación general del lecho bidimensional.

b) Difusor del gas

Para que el aire se distribuyese uniformemente antes de entrar en el lecho, se dispuso un difusor de gases, figura 2, de idéntica sección que el lecho y 30 cm de altura; era de acero suave y tenía un tubo en T de 6 mm de diámetro interno con perforaciones de 1 mm de diámetro distribuidas de tal forma que la salida del aire era muy uniforme. El interior de la zona de difusión estaba llena de perdigones de plomo de 2 mm de diámetro para conseguir una uniformidad aún mayor. En el borde superior había una brida para atornillar el recipiente contenedor del lecho y la placa distribuidora del gas; en la base tenía tres tornillos de nivelación.

c) Distribuidor del gas

Se utilizaron tres tipos de distribuidor:

- . Tamiz.- Inicialmente se empleó un distribuidor consistente en un tamiz de acero inoxidable de 80 micras de malla; fué desechado por la pésima distribución del gas que proporcionaba.
- . Placa tipo "sandwich".- Estaba constituida por dos láminas metálicas perforadas entre las cuales había viruta de acero prensada, figura 3. Tenía buena resistencia mecánica y distribuía aceptablemente el aire.
- . Placa porosa.- Estaba formada por hilos de aluminio sinterizados que dejaban unos poros de 10 micras de tamaño medio. El espesor de la placa era de 2 mm y su tamaño superaba en 1 mm a cada lado de la base del lecho, para evitar la formación de burbujas en los bordes. La distribución que esta placa promovía era excelente.

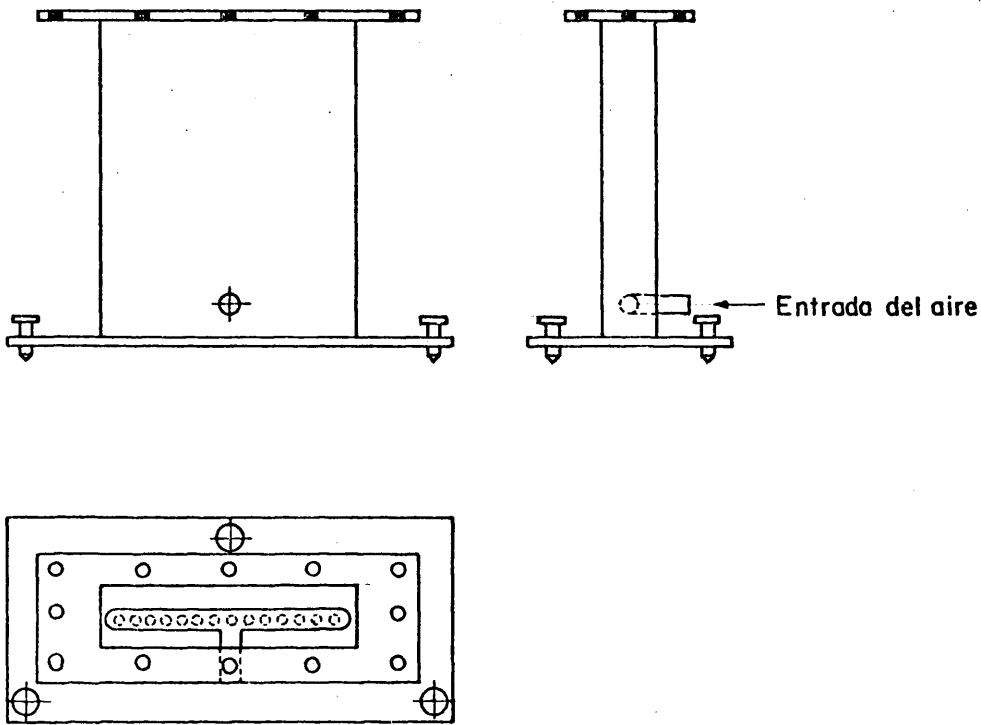


Fig. 2.— Difusor del aire

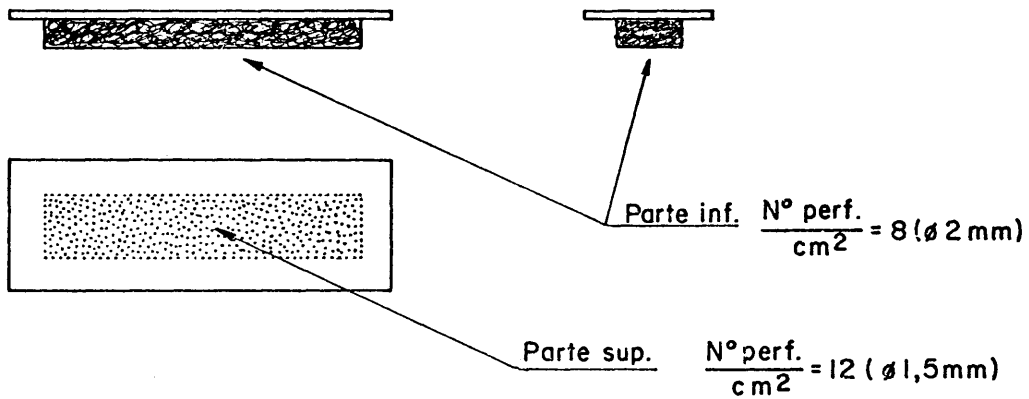


Fig. 3 — Placa tipo sandwich

d) Lecho

El lecho estaba contenido en un recipiente de metacrilato de metilo transparente, figura 4, de 25 cm de anchura por 2 cm de espesor por 120 cm de altura. El espesor de las paredes era de 6 mm, pese a lo cual, y para evitar el abombamiento de las mismas debido a la presión del sólido, se colocaron, a diferentes alturas, unos refuerzos metálicos exteriores a modo de bridas. La pared frontal estaba reticulada para facilitar la localización y medida de las burbujas. Para mantener las pantallas fijas en sus posiciones, el recipiente tenía en la pared trasera un acanalamiento tipo "cola de milano" en el que ajustaba un cursor que tenía ator-nilladas las filas de cilindros, figura 4, (detalle).

e) Pantallas

Aunque inicialmente se pensó ensayar pantallas formadas por barras horizontales de diversas formas geométricas (sección triangular, rómbica, etc.) se consideró más tarde que la forma cilíndrica sería la más realista y económica.

Las pantallas empleadas estaban formadas por cilindros de acero de 12 mm de diámetro colocados horizontalmente y en la dirección anteroposterior del lecho. Los cilindros se mantenían en las posiciones prefijadas por medio de varillas a las que iban atornillados; estas varillas estaban atornilladas a su vez a un cursor que se adaptaba a la ranura en cola de milano del recipiente contenedor del lecho. En la figura 5 se muestra esquemáticamente este sistema de sujeción.

Las pantallas se denominaban mediante una "clave", construída a partir de los parámetros de diseño de las mismas.

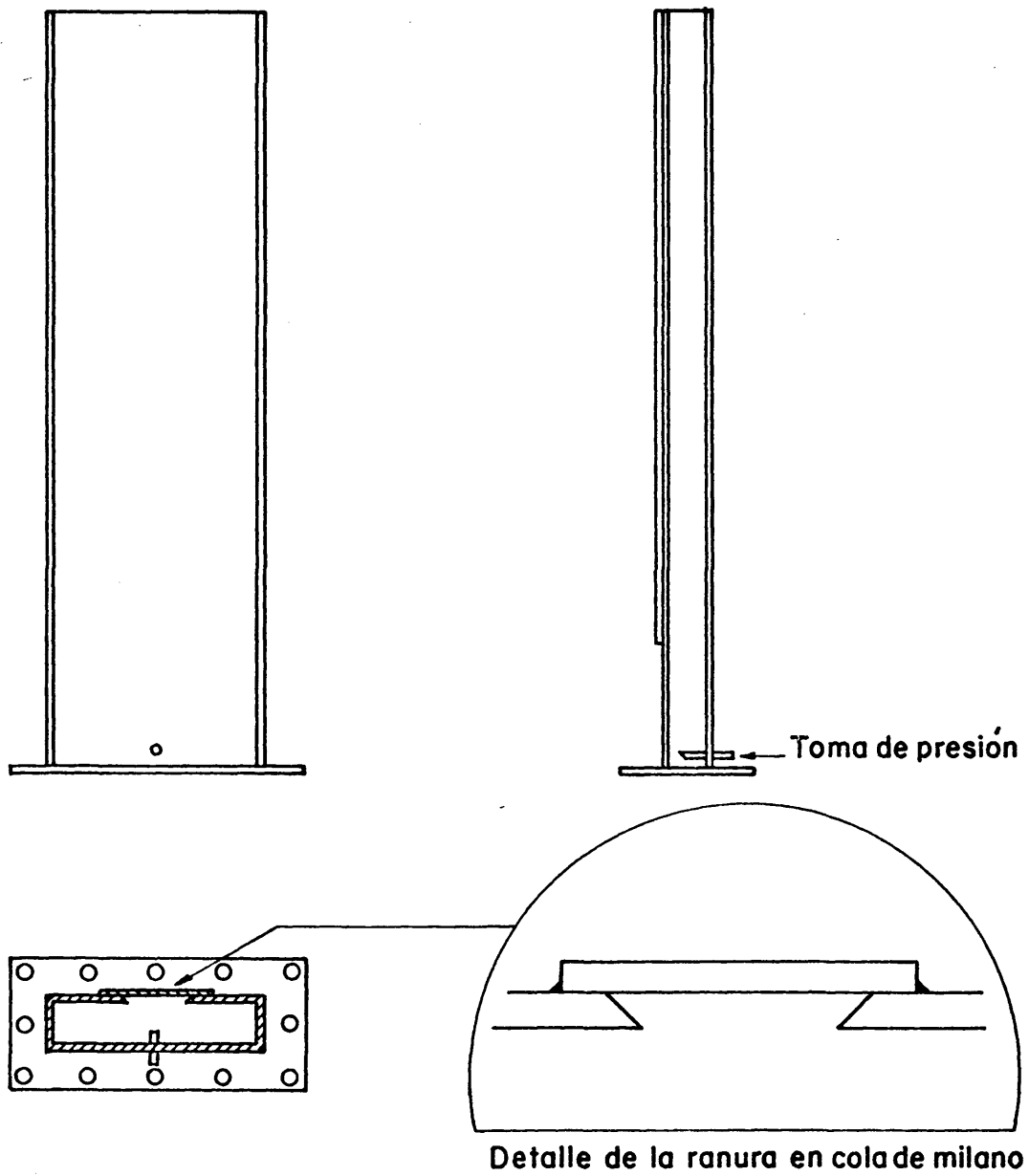


Fig. 4.— Vasija contenedora del lecho y detalle del sistema de sujeción de las pantallas

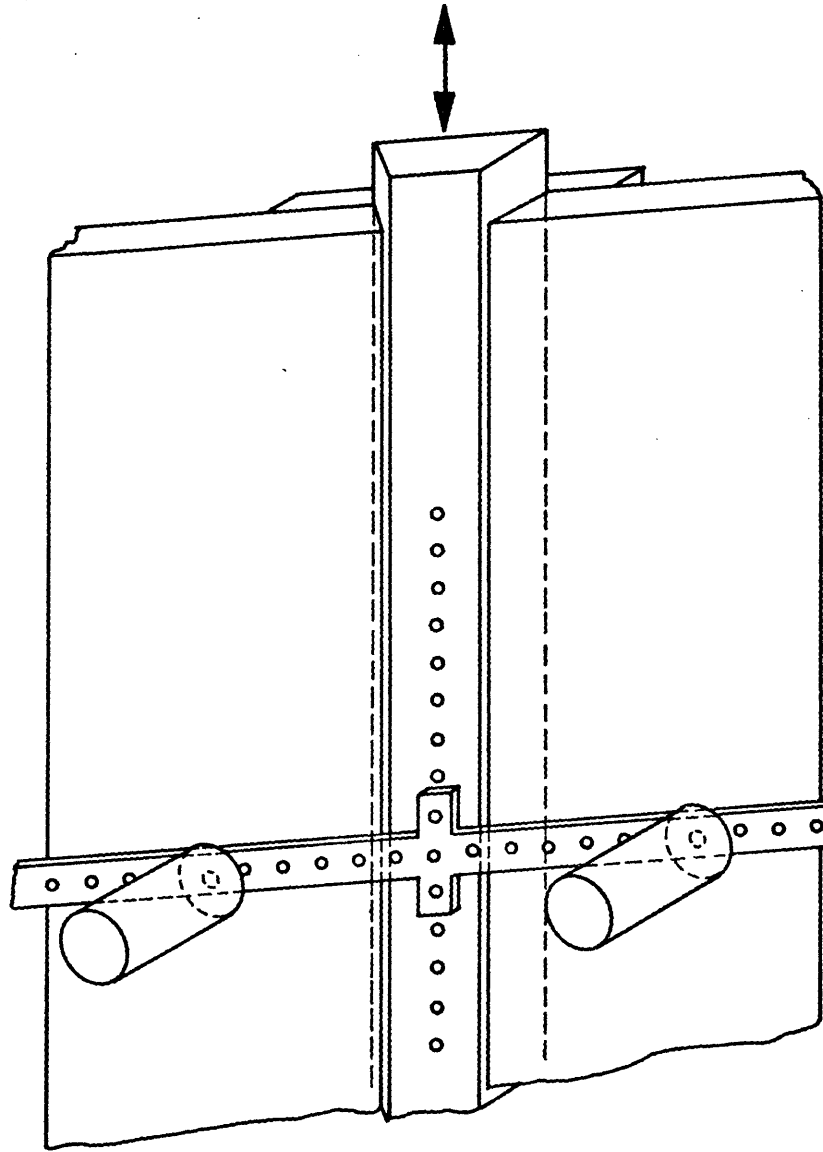


Fig. 5 — Sistema de sujeción de las pantallas

Estos parámetros, para pantallas formadas por tubos horizontales, son los siguientes:

- D_R : diámetro exterior del tubo, cm
 n_R : número de tubos en cada fila horizontal
 n : número de filas horizontales que forman la pantalla
 H'_D : distancia de la fila más baja al distribuidor, cm
 H''_D : id. de la siguiente fila, cm, etc.
 S_h : distancia horizontal entre dos tubos consecutivos, cm
 S_v : distancia vertical entre dos filas consecutivas, cm.
 T, F : ordenación al tresbolillo o en fila, respectivamente

En la figura 6 se muestra claramente el significado de estos parámetros. El valor de todos y cada uno de estos parámetros define una clave de identificación de las pantallas. Esta clave se construyó de la manera siguiente:

$$D_R - \text{tipo ordenación} - n - n_R - S_h - H'_D - H''_D - \dots - H_D^N$$

El parámetro S_v no necesita ponerse en la clave cuando se especifican todas las alturas de colocación de las filas; si todas las filas estuviesen equidistantes sólo habría que poner la altura de colocación de la primera y el valor de s_v . En la figura 7 se muestran dos ejemplos de aplicación de esta clave.

f) Equipo auxiliar

El gran contenido de sólidos (≈ 6 kg) y los continuos cambios de placas distribuidoras, tamaños de partícula y pan

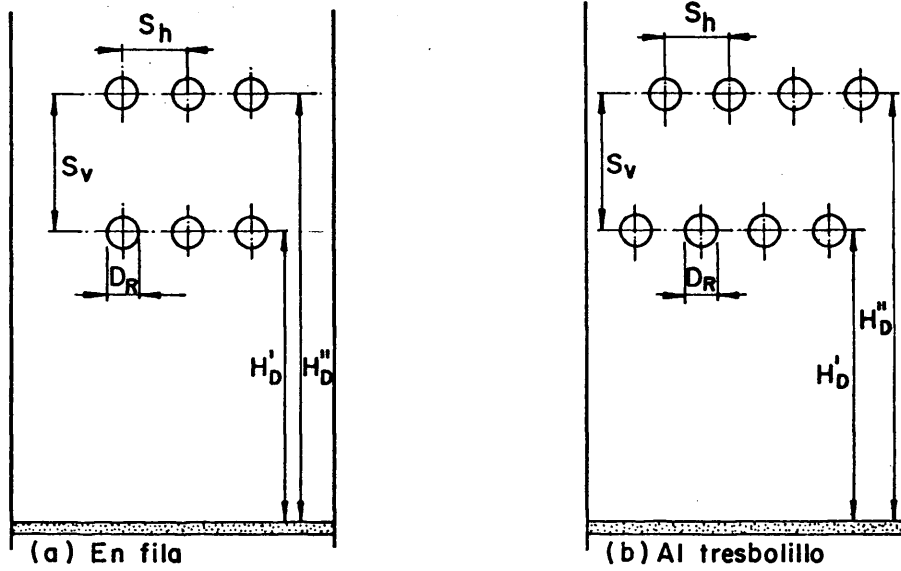


Fig. 6 — Parámetros de pantallas formadas por ordenaciones de cilindros horizontales.

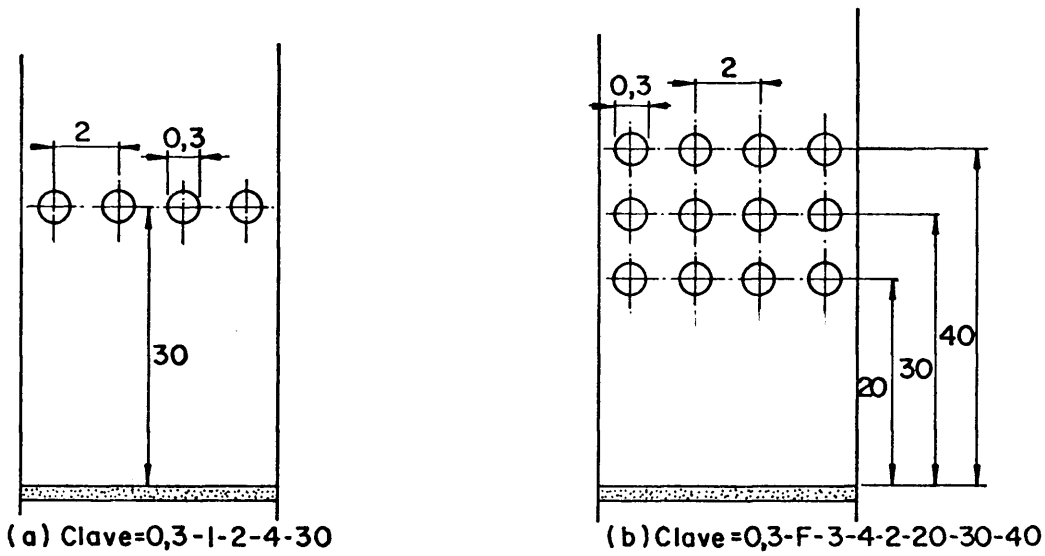


Fig.7 — Clave de denominación

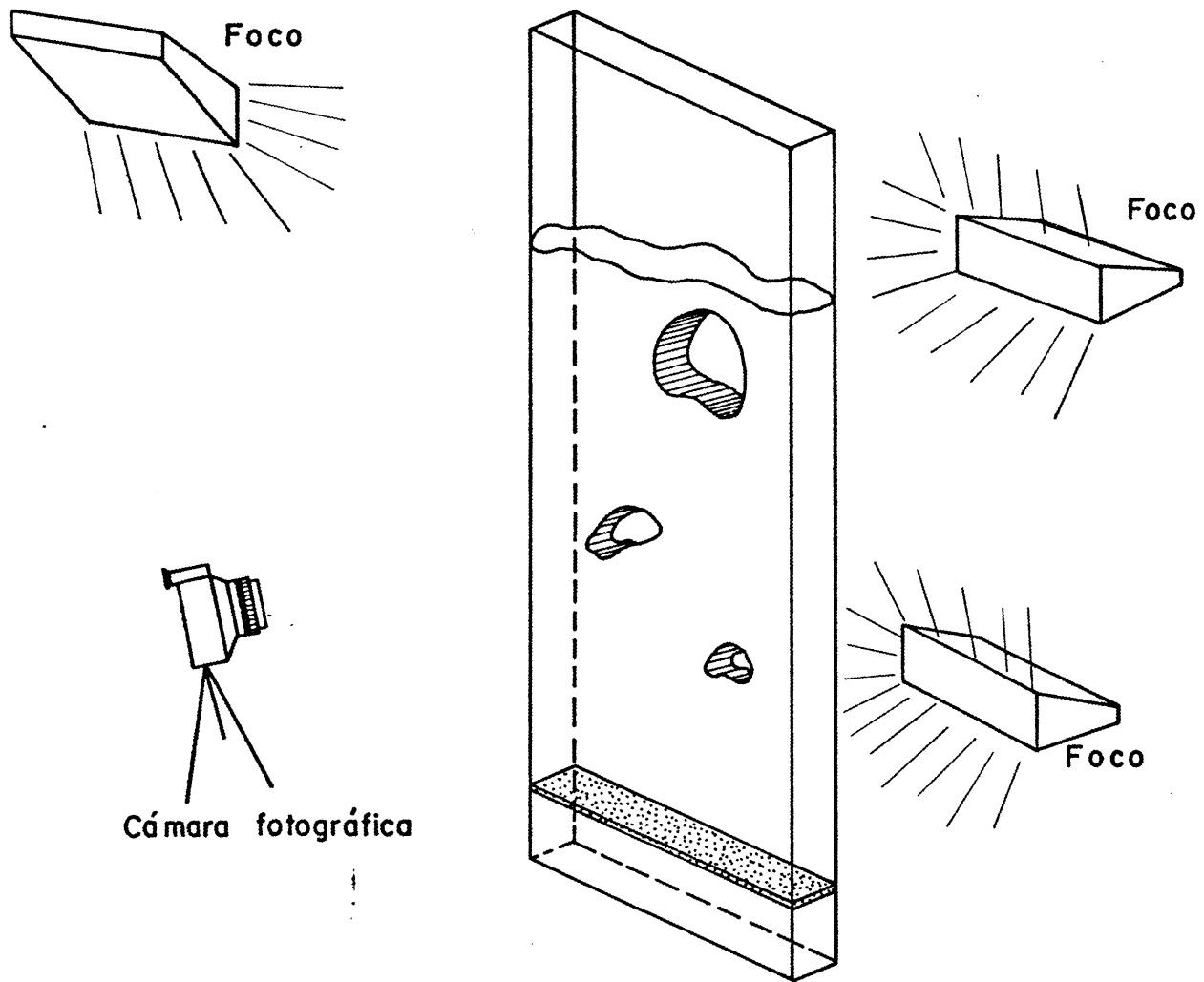


Fig. 8.— Disposición del sistema fotográfico.

tallas suponían que el vaciado completo del lecho fuese una operación engorrosa. Para simplificarla se utilizó un sistema de vaciado por succión y transporte neumático del sólido.

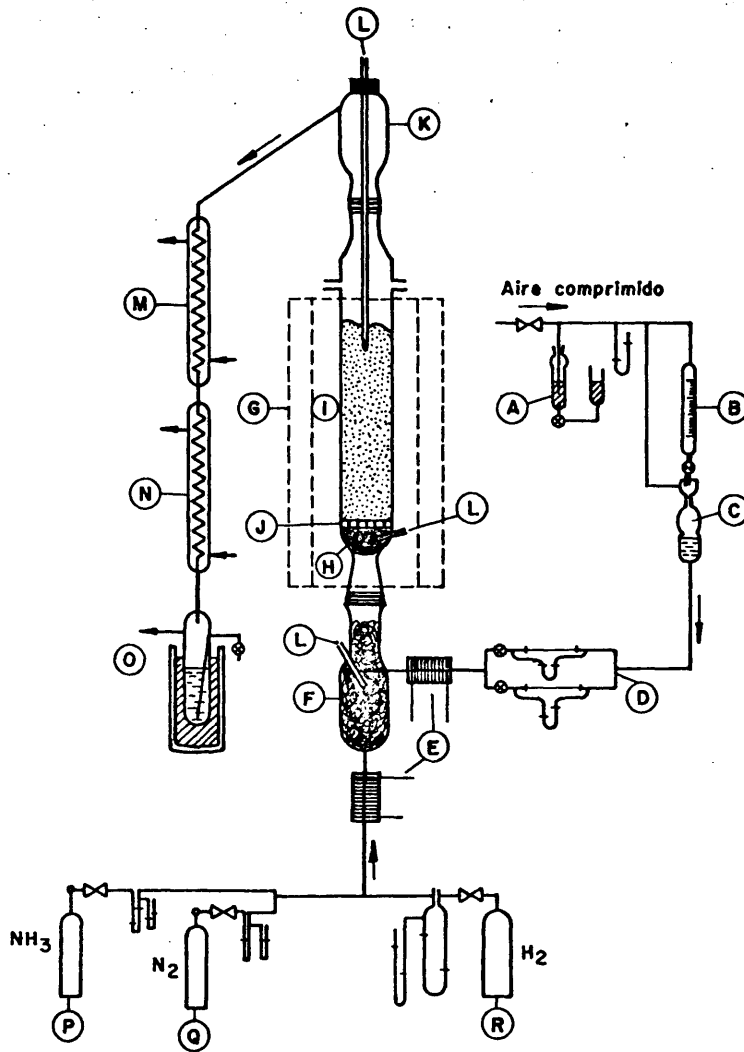
Para evitar la excesiva polución del ambiente de trabajo por arrastre de finos, se instaló un ciclón a la salida del aparato.

El estudio del lecho se hacía por medio de fotografías tomadas durante el funcionamiento. Se empleó una cámara de película de 36 mm, dotada de disparador a distancia y trípode para evitar vibraciones al disparar. La película era 22° DIN y las condiciones de toma 1/100 seg. y 5,6 f. Las medidas se hacían introduciendo el negativo en una máquina lectora de microfilm. La iluminación se efectuaba mediante tres focos de 200 watt situados según el esquema que se muestra en la figura 8.

3.2.- EQUIPO PARA LOS EXPERIMENTOS CON REACCION QUIMICA

En la figura 9 se muestra el esquema de la instalación montada para realizar los experimentos con la reacción de obtención de butironitrilo a partir de butanol y amoniaco en lechos catalíticos fijos y fluidizados. Se destacan las siguientes partes fundamentales:

- a) Sistemas de alimentación
- b) Precalentadores y evaporador
- c) Horno y sistema de control de temperatura
- d) Reactores
- e) Sistemas de condensación y recogida de productos
- f) Pantallas



- | | |
|---|--|
| A - Borboteador de mercurio | H - Precalentador |
| B - Depósito de butanol | I - Reactor |
| C - Depósito con rebosadero | J - Distribuidor de gases |
| D - Capilares, medidas de caudal de butanol | K - Cabeza del reactor |
| E - Precalentadores | L - Termómetros |
| F - Evaporador mezclador | M y N - Refrigerantes |
| G - Horno | O - Recoge-muestras |
| | P, Q, R - Depósitos y sistema de alimentación de gases |

Fig. 9 — Esquema de la instalación para los experimentos con reacción química.

a) Sistemas de alimentación

El butanol se alimentaba mediante un sistema, figura 9, que consistía en un depósito, B, y un recipiente, C, en el que se mantenía siempre el mismo nivel de líquido. De ahí pasaba el butanol por un sistema de capilares medidores, D, conectados a tubos en U. El caudal requerido se mantenía fijo mediante llaves de aguja situadas a la salida de cada capilar y con un sistema de sobrepresión constante, A, constituido por un borboteador de mercurio y aire comprimido. Los capilares se calibraron previamente, a temperatura ambiente, representando el caudal de butanol (líquido a 20°C) frente a pérdida de carga en el capilar. En la tabla III se relacionan algunas equivalencias de caudales de butanol en varias condiciones.

Los gases empleados fueron amoníaco (para la reacción), nitrógeno (para calcinación del ZnO y limpieza del aparato) e hidrógeno (para reducción de la magnetita). El caudal de cada gas se controlaba por un sistema de válvulas de aguja, orificios medidores y tubos en U. Los orificios se calibraron previamente con aire en condiciones ambientales, representándose las rectas de calibrado de $q_0 \sqrt{p_0 M/T_0}$ frente a ΔH_0 . Las medidas posteriores se referían al gas correspondiente en las condiciones de entrada al reactor.

TABLA III.- Equivalencias de caudales de butanol en diferentes condiciones ⁽¹⁾.

	mol/hr. ---	cm ³ /seg liq. 20°	cm ³ /seg gas, 20°	cm ³ /seg gas, 350°
mol/hr. ---	1	0,0254	6,67	14,19
cm ³ /seg liq. 20°	39,34	1	262,73	558,56
cm ³ /seg gas, 20°	0,15	0,0038	1	2,13
cm ³ /seg gas, 350°	0,0705	0,0018	0,47	1

- (1) 1 mol Butanol (liq. 20°C) = 74,12 gr = 91,5 cm³ líq. (20°C).
 1 cm³ líq. (20°C) = 262,73 cm³ gas (20°C) = 558,63 cm³ gas (350°C).

b) Pre calentadores y evaporador

Con el fin de conseguir la evaporación del butanol líquido y la mezcla de sus vapores con el amoníaco, se dispuso un evaporador, F, constituido por un tubo de vidrio de 6 cm de diámetro y 30 cm de altura relleno de anillos Raschig. La calefacción en este evaporador estaba proporcionada por una manta eléctrica graduada con un potenciómetro. El butanol lí

quido llegaba hasta el centro del evaporador por una tubuladura lateral. Los gases entraban por otra tubuladura situada en la base del evaporador. Los dos reactivos se calentaban antes de entrar en el evaporador mediante unos precalentadores, E, constituidos por tubos de vidrio, de 9 mm de diámetro y 15 cm de longitud, rodeados por una pequeña manta eléctrica.

El evaporador se mantenía a 150-200°C y los precalentadores a 60-80°C. Las temperaturas se medían con termopares de cromel-alumel. Cuando se empleaba nitrógeno o hidrógeno para los tratamientos previos de los catalizadores solamente se mantenía en funcionamiento el evaporador a una temperatura de unos 150°C. La unión del evaporador con la base del reactor se hacía con rótulas esmeriladas.

c) Horno calefactor

El reactor estaba introducido en un horno eléctrico, figura 10, provisto de ventanas planas de vidrio Pirex para observar el lecho durante la operación. El horno constaba de dos circuitos eléctricos independientes: el inferior servía para calentar la mezcla de reactivos antes de entrar en la zona de reacción. Las potencias máximas respectivas eran de dos y tres Kwatt y la regulación se hacía con dos potenciómetros. Las temperaturas se medían en el precalentador y en el lecho mediante dos termómetros de resistencia de Pt conectados a un teletermómetro. El horno tenía 43 cm de diámetro y 68 cm de altura (medidas exteriores); era de acero inoxidable refractario. Las resistencias eran de hilo Kantal de 1 mm de diámetro.

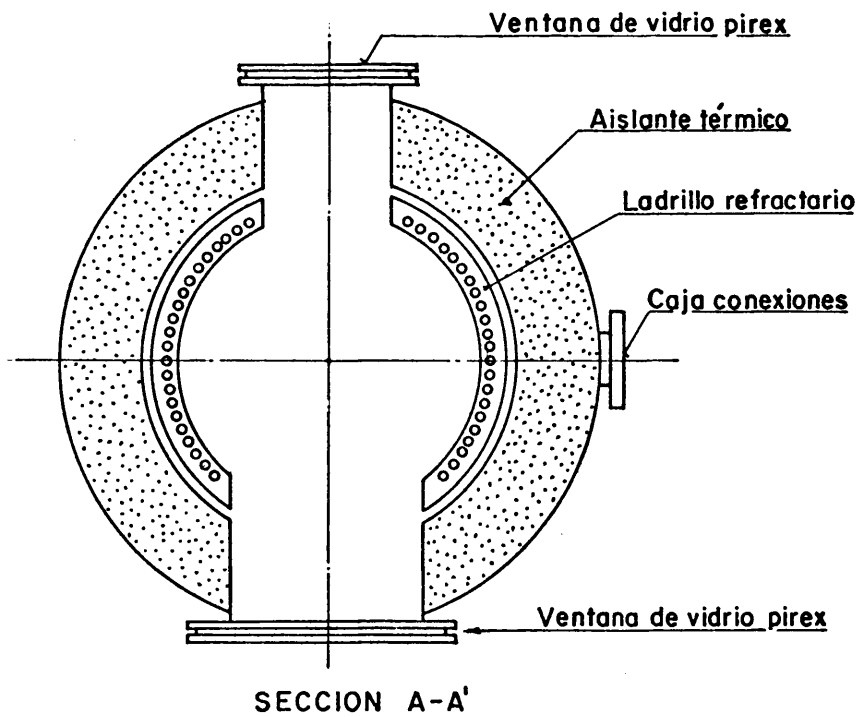
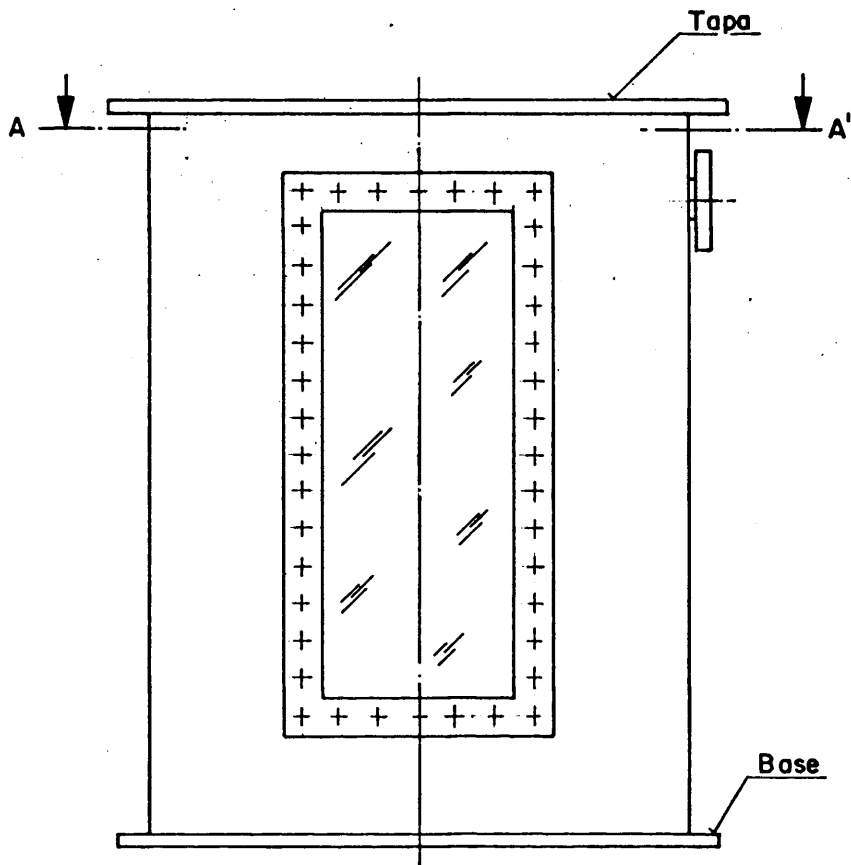


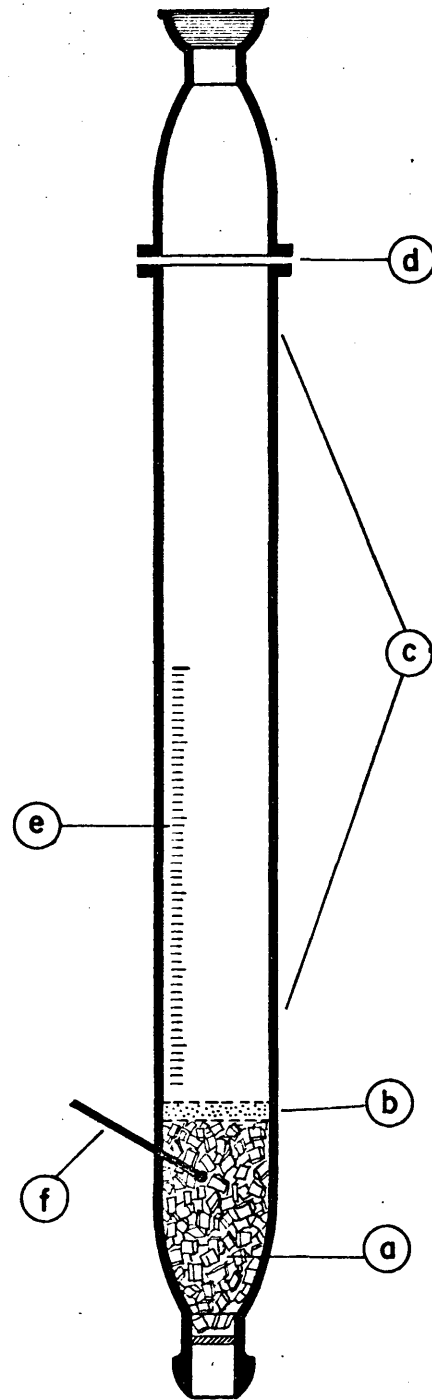
Fig. 10. — Horno

d) Reactores

Se emplearon dos reactores: uno de lecho fluidizado, figura 11, y otro de lecho fijo, figura 13.

El reactor de lecho fluidizado era un tubo de vidrio Pirex (inactivo para la reacción utilizada) de 52,8 mm de diámetro interno y 80 cm de altura. La placa distribuidora era de vidrio poroso de tamaño medio de poro igual a 100 micras. Por debajo había un relleno de anillos Raschig constituyendo una zona precalentadora de la mezcla reaccionante, de unos 20 cm de altura. El reactor propiamente dicho tenía grabada una escala milimetrada para medir alturas del lecho y, ocasionalmente, el tamaño de burbujas que pasaran cercanas a la pared. La parte superior del reactor tenía una brida plana de vidrio esmerilado, d, con el fin de poder introducir y extraer las pantallas. Esta última parte tenía además una tubuladura lateral de 20 mm de diámetro para la salida de los productos de reacción hacia el sistema de condensación y una boca esmerilada para conectar una sonda de vidrio que albergaba al termómetro de resistencia.

El reactor de lecho fijo era de vidrio Pirex. Constaba de tres partes fundamentales: precalentador, reactor y cabeza. El precalentador era de 20 cm de altura y 17 mm de diámetro interno. Iba relleno de anillos Raschig soportados por una placa de vidrio poroso. La zona de reacción tenía 17 mm de diámetro interno y 45 cm de altura; iba rodeada por una carcasa metálica para hacer mínimos los gradientes de temperatura. La cabeza del reactor era de 50 mm de diámetro y 8 cm de altura; tenía una tubuladura lateral que se unía al sistema de condensación. La temperatura se medía mediante dos termopares: uno introducido en el lecho y otro en el precalentador.



- a: Precalentador
- b: Placa distribuidora
- c: Zona de reacción
- d: Bridas de unión
- e: Escala graduada
- f: Termómetro

Fig. 11.— Reactor de lecho fluidizado

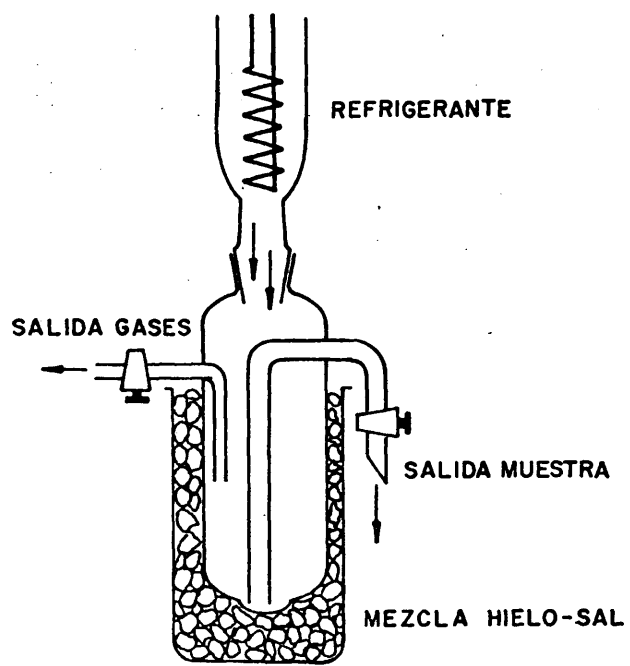


Fig. 12— Esquema del dispositivo para recoger muestras

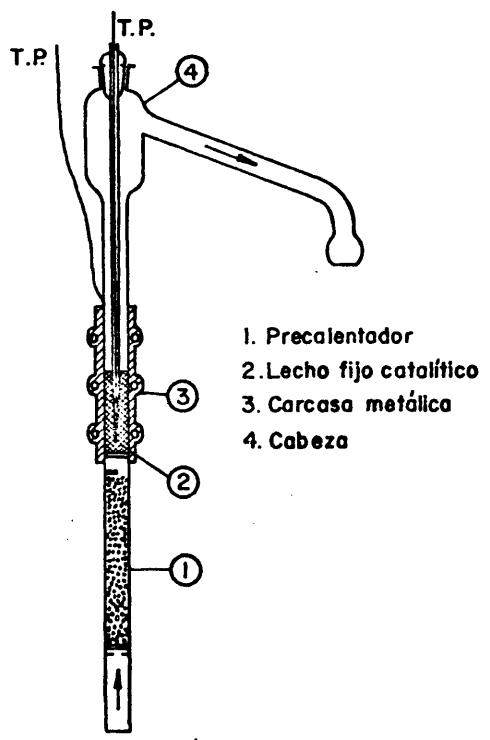


Fig. 13— Reactor de lecho fijo

e) Sistemas de condensación y recogida de productos

Los productos de reacción, después de salir del reactor eran condensados en serpentines refrigerados con agua. Los condensados pasaban a un recipiente, figuras 9 y 12, rodeado de un baño de hielo-sal para condensar los vapores que aún pudieran quedar sin licuar. De este recipiente se extraían muestras periódicamente. La salida de éstas venía dispuesta por la sobrepresión del interior del aparato. Para recoger todo el líquido condensado, el tubo de extracción llegaba hasta el fondo del recipiente, donde había además una pequeña depresión para facilitar aún más la recogida de la mayor cantidad posible.

f) Pantallas

Las pantallas estaban constituidas por filas de cilindros horizontales de 7 mm de diámetro, figura 14. Los cilindros iban soldados entre sí con varilla de 5 mm de diámetro. Las filas se mantenían por medio de dos varillas verticales y presillas atornilladas. En la figura 15 se muestra un esquema de este sistema de sujeción. El conjunto se mantenía inmóvil por medio de un tope que encajaba en la cabeza del reactor. Todo el material era de acero inoxidable 18/8. Previamente se ensayaron las posibles propiedades catalíticas de éste en la reacción de obtención de butironitrilo, resultando que la actividad catalítica del acero era nula.

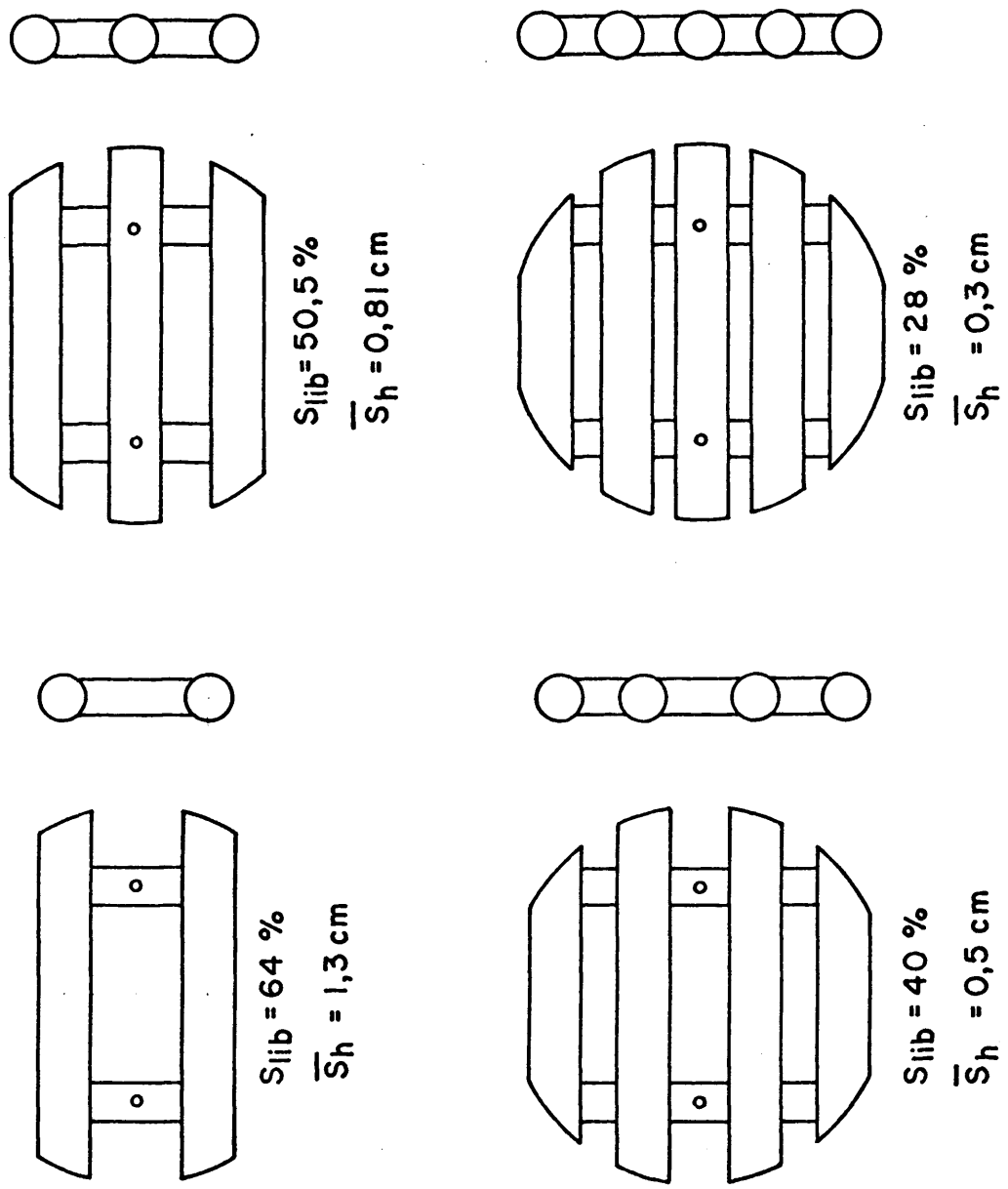


Fig. 14.— Elementos integrantes de las pantallas. Escala: 1:1

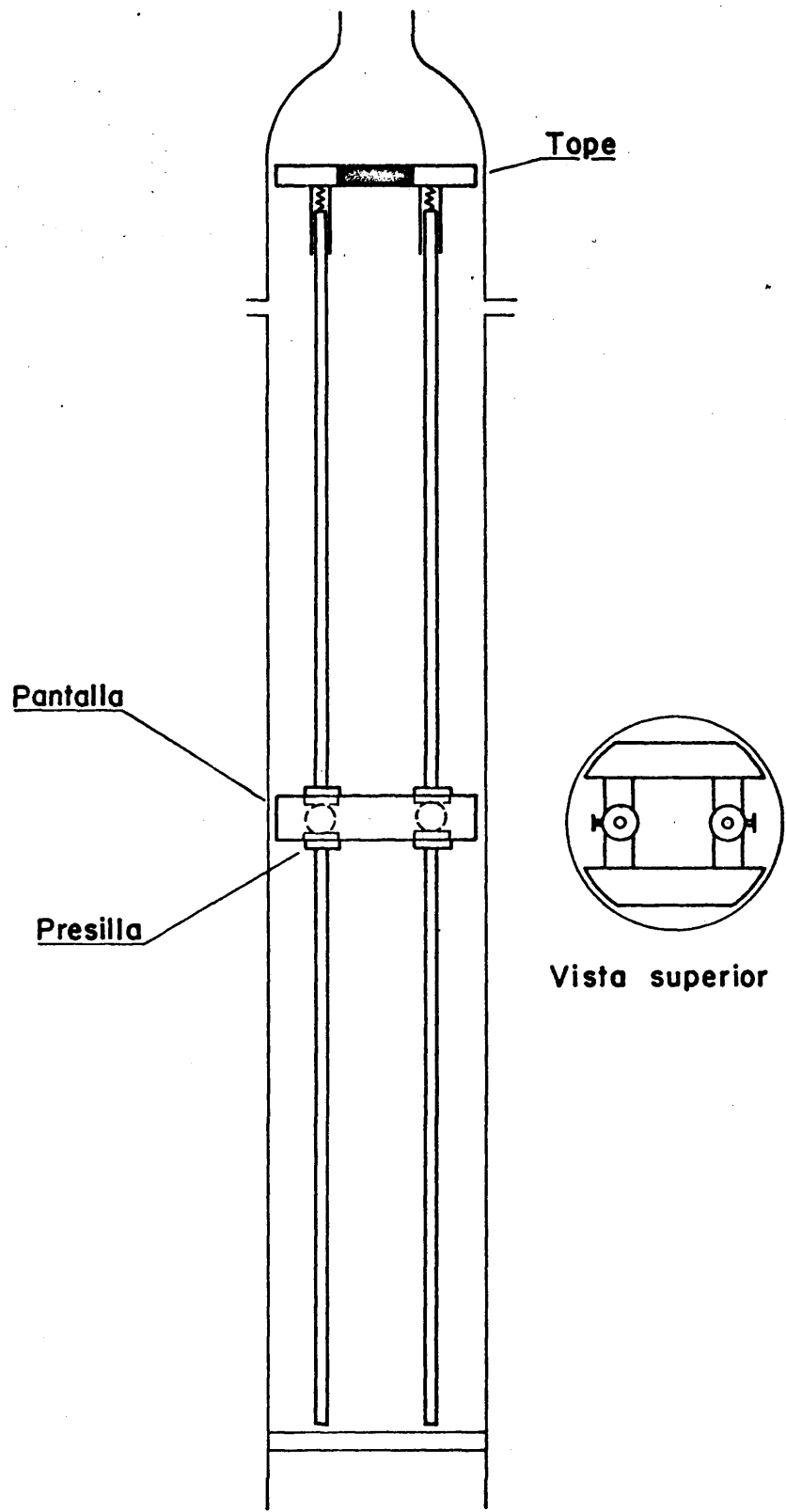


Fig: 15— Elementos de sujeción de las pantallas.

3.3.- MATERIALES

3.3.1.- Materiales empleados en las experiencias sin reacción química (lecho bidimensional)

El sólido empleado era corindón (α - Al_2O_3) de la calidad designada por "blanco nieve", de gran pureza (99,5%), y suministrado por la firma "El Corindón Español". Sus propiedades físicas más importantes son:

Densidad cristalina.....	4 g /cm ³
Densidad fluidodinámica.....	3,5 g /cm ³
Dureza (escala Mohr).....	9

Se emplearon las fracciones de -250 + 200 y -160 + 100 micras.

3.3.2.- Materiales empleados en los experimentos con reacción química (lechos fijo y fluidizado)

Reactivos.- Los productos químicos empleados fueron: Butanol, Amoniaco, Nitrógeno e Hidrógeno. El butanol era de la marca Probus, "quimicamente puro". Sus propiedades físicas más importantes son:

Densidad (20°C)	0,81 g /cm ³
P. Ebullición	117°C

El amoniaco empleado, licuado en balas de acero a 15 Atm., era de la casa Rubert Hnos, calidad "anhidro" . El nitrógeno e hidrógeno, envasados en balas a presión, eran de la Sociedad Española del Oxígeno. Las calidades respectivas eran N45 y N47.

Catalizadores.- Se emplearon dos catalizadores: Magnetita y Oxido de cinc. La magnetita fué proporcionada por la Empresa "Amoniaco Española, S.A.". Es un catalizador fabricado por la Imperial Chemical Industries que se emplea industrialmente en la síntesis del amoniaco y que consiste en Fe_3O_4 adicionado de pequeñas proporciones de algunos promotores (SiO_2 , 3%; Al_2O_3 , 1,5%; CaO , 1,5% y MgO , 3,5%). La denominación comercial es ICI 35-4. El material se presentaba en partículas de unos 10-30 mm. Se trituraban y separaban por tamizado las diferentes fracciones de tamaño resultantes. Algunas propiedades físicas de este catalizador son:

Densidad cristalina	5,12 g/cm ³
Punto de fusión	1538°C
Superficie específica	0,002 m ² /g
Presenta propiedades magnéticas	

El óxido de cinc empleado se adquirió a granel y en polvo. Este estado no permitía su utilización directa, por lo que el polvo se pastilló a 700 atm. en cilindros de unos tres centímetros de diámetro y seis cm de altura; luego se trituraron estos cilindros en mortero de porcelana y se separaron por tamizado las distintas fracciones de tamaños. Las partículas así obtenidas tenían suficiente consistencia para ser empleadas en el lecho fluidizado. Las propiedades físicas más importantes de este material son:

Densidad cristalina	5,47 g/cm ³
Densidad fluidodinámica ...	2,78 g/cm ³
Punto de fusión	1800 °C
Superficie específica	3,4 m ² /g
Volumen de poros	0,17 cm ³ /g

3.4- PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

3.4.1.- Desarrollo de una experiencia en el lecho bidimensional

Una vez montado el aparato, figura 1, con el tipo de distribuidor elegido y la pantalla a ensayar, se introducía la cantidad de corindón prefijada y se hacía fluidizar vigorosamente el lecho durante 10 minutos. Al cabo de este tiempo se empezaba a cortar paulatinamente la alimentación de aire con objeto de conseguir en todos los experimentos un mismo estado inicial de porosidad del lecho. Seguidamente se ponía un caudal de aire prefijado, se encendían los focos de iluminación y se sacaban unas 40 fotografías del lecho (una foto cada 5-10 segundos). Esta operación se repetía con 4-5 caudales diferentes de aire. Durante el experimento se tomaba nota de los valores de pérdida de carga del lecho, pérdida de carga del orificio medidor del caudal de aire y sobrepresión de éste en el orificio, para el cálculo posterior de la velocidad lineal real con que se había trabajado. Para distinguir cada serie de fotografías se disponía en un ángulo del lecho una pequeña pizarra con un número clave. Al finalizar la experiencia se cortaba el aire y se extraía el sólido para los pertinentes cambios de pantalla, distribuidor, etc.

3.4.2.- Desarrollo de una experiencia con reacción química en el reactor de lecho fluidizado

La experiencia comenzaba con la calcinación del óxido de cinc. Esta operación se llevaba a cabo de la manera siguiente: Una vez introducida la pantalla a ensayar y la cantidad de catalizador prefijada, se cerraba el reactor; revi

sadas las llaves y conexiones esmeriladas y comprobada la estanqueidad del sistema, se ponía el caudal de nitrógeno necesario y se regulaban los potenciómetros del horno y vaporizador para mantener la temperatura de calcinación prevista (normalmente 450°C). Transcurrido el tiempo de calcinación previsto, se cortaba la corriente de nitrógeno y se ponía la de amoniaco, se aumentaba la temperatura del evaporador, se conectaban los precalentadores y se disminuía la temperatura del reactor (350°C generalmente). Cuando se alcanzaba la temperatura prevista se empezaba a alimentar el butanol (tiempo cero) teniendo cuidado de que los refrigerantes estuvieran funcionando y que en el aparato para recoger muestras hubiera mezcla de hielo-sal. Durante el tiempo de reacción se controlaban las siguientes variables: temperatura (del evaporador, precalentador y lecho), caudal (de butanol y amoniaco), tiempo, sobrepresión del aire y nivel de butanol en el depósito. Se tomaban cuatro muestras, una cada 15 minutos; se medía la altura del lecho y se estimaba visualmente la calidad de fluidización. Una vez transcurrido el tiempo de experimentación se cerraba la alimentación de butanol y de amoniaco, se apagaban todos los elementos de calefacción y se conectaba la alimentación de nitrógeno, para barrer el aparato, durante media hora.

3.5.- METODOS DE ANALISIS

3.5.1.- Experimentos con el lecho bidimensional

El estudio realizado con el lecho bidimensional abarca dos aspectos principales:

a) Crecimiento de las burbujas con la altura en el lecho sin y con pantalla.

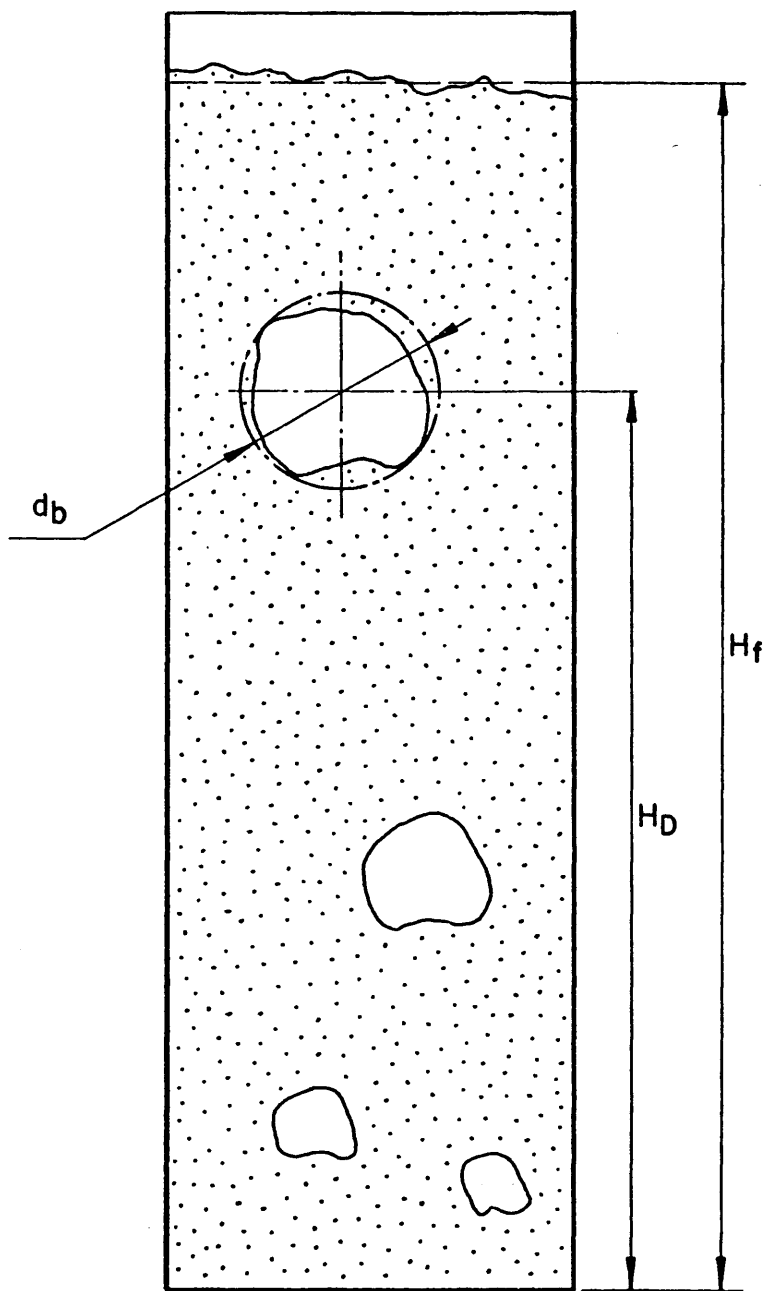


Fig. 16 — Sistema de medida de d_b , H_D y H_f

b) Expansión del lecho sin y con pantallas.

Las magnitudes que había que medir eran:

- . Tamaño de las burbujas, d_b
- . Situación de las burbujas en el lecho, H_D
- . Altura del lecho, H_f

El método de medida era el siguiente: en las fotografías del lecho obtenidas durante los experimentos (ver apartados 3.1-f y 3.4.1.), aparecían burbujas situadas a determinadas alturas. El diámetro o tamaño de una burbuja cualquiera se obtenía aproximando la silueta de la misma a una circunferencia. El diámetro de esta circunferencia daba el valor de d_b . La distancia desde el distribuidor al centro de la circunferencia era la altura de situación de burbuja, H_D . La altura del lecho (en el instante de tomar la fotografía), H_f , se hallaba aproximando la superficie del lecho a una horizontal media y midiendo la distancia entre esta línea y el distribuidor. En la figura 16 se muestra claramente como se realizaban estas medidas.

3.5.2.- Experimentos con reacción química

En la reacción de obtención de butironitrilo a partir de butanol y amoniaco en fase gaseosa y catalizada por magnetita u óxido de cinc se pueden producir principalmente los siguientes productos secundarios: Butilamina, Butiraldehido, Dibutilamina y la base de Schiff formada por condensación de los dos anteriores productos. En las muestras recogidas hay además parte de butanol no reaccionado. El mejor método de análisis de la mezcla de estos productos es la cromatografía de gases; se ha seguido el procedimiento empleado, con éxito, en trabajos anteriores realizados en la

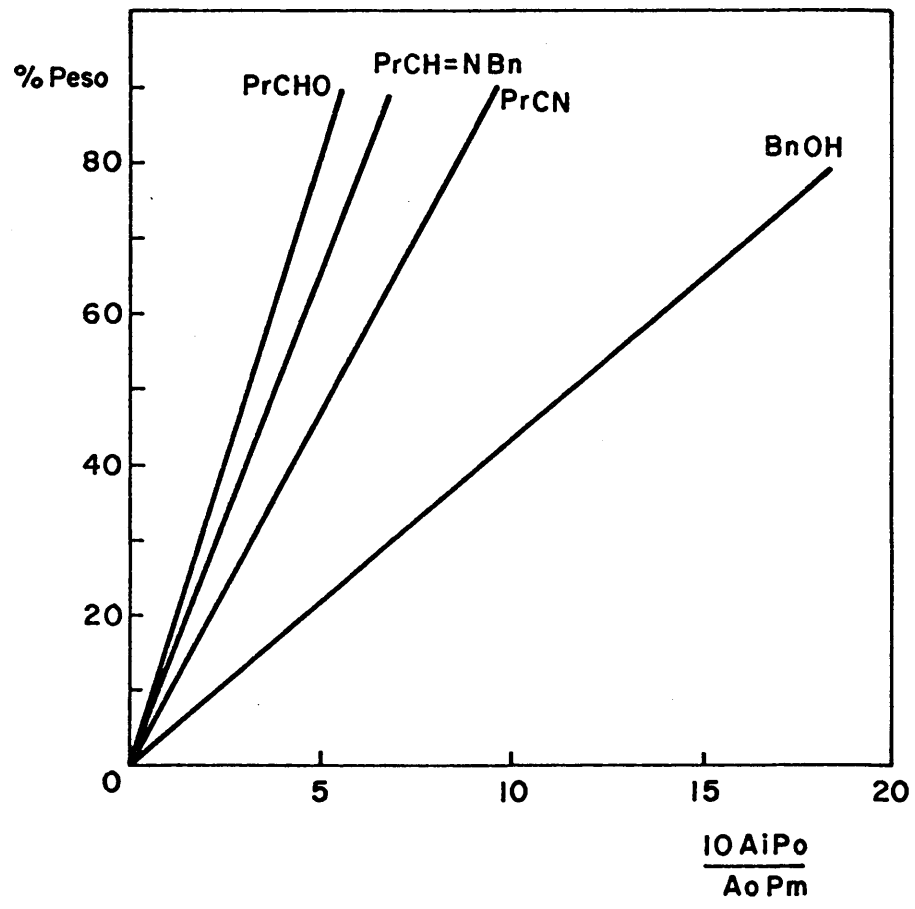


Fig. 17.— Ejemplo de un calibrado de la columna cromatográfica.

RESPUESTA DEL DETECTOR

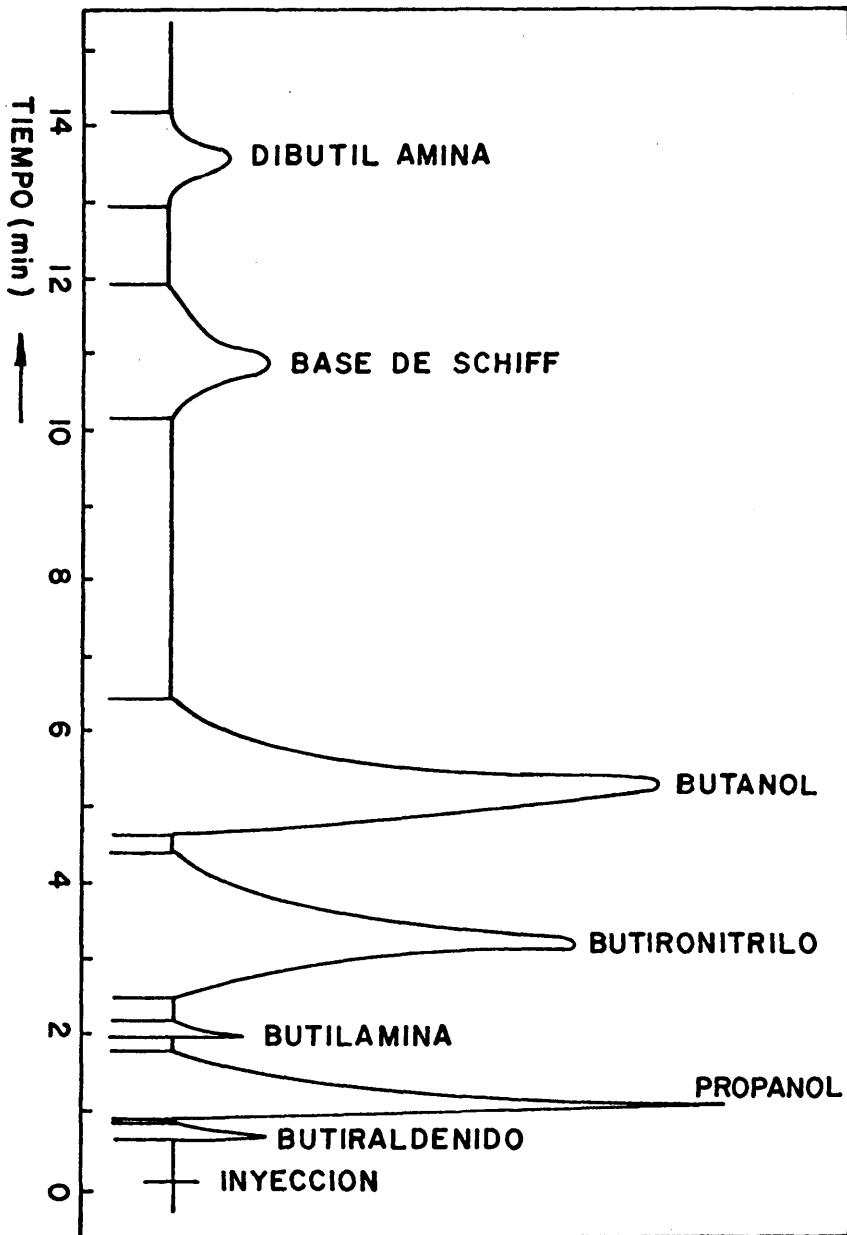


Fig. 18— Ejemplo de un cromatograma con todos los productos posibles.

Cátedra de Fisicoquímica de los Procesos Industriales (57).

Las condiciones de trabajo eran las siguientes:

Cromatógrafo	Perkin Elmer F-7
Columna	Acero Inox. 3m x 1/8 pulgada
Fase estacionaria	Igepal 630 al 10%
Soporte sólido	Cromosorb W(AW-DMCS) 80-100 mallas
Temperatura de trabajo ..	80°C(máxima permitida:225°C)
Caudal gas portador(N ₂)..	16 cm ³ /min

La columna se calibraba cada tres experimentos y para el análisis cuantitativo se empleaba el método del patrón in terno empleándose como tal el Propanol (marca Riser "cromatográfico"). En la figura 17 se muestra un ejemplo de calibrado de la columna y en la figura 18 el cromatograma de una mezcla de todos los compuestos principales que podrían haber en las muestras de reacción.

4.- ESTUDIOS EN LECHO BIDIMENSIONAL SIN PANTALLAS Y SIN
REACCION QUIMICA

Como método experimental de observación y medida de burbujas se escogió un lecho bidimensional por los siguientes motivos:

- . Los fenómenos típicos del lecho fluidizado sólido-gas: burbujeo, movimiento del sólido, etc. son claramente observables y medibles.
- . Está recomendado por numerosos autores (35, 38, 47, 48, 49) como método que proporciona informaciones muy interesantes.
- . El equipo necesario es bastante económico
- . Pueden introducirse fácilmente pantallas internas.

Para evaluar las influencias de las pantallas internas en el comportamiento del lecho se estudió en primer lugar el mismo lecho sin pantallas y en las mismas condiciones de trabajo que luego se emplearían en el lecho apantallado.

Los estudios que se realizaron en el lecho sin pantallas fueron los siguientes:

- . Determinación de las velocidades mínimas de fluidización y de completa fluidización.
- . Crecimiento de las burbujas con la altura y expansión del lecho, bajo diferentes condiciones de trabajo.

Con el lecho apantallado (Apartado 5) se estudió la influencia de los parámetros de diseño de las pantallas en la distribución de los tamaños de burbuja y en la expansión del lecho. Este estudio se divide en las partes siguientes:

- . Experimentos con pantallas formadas por una fila de cilindros (variables: número de cilindros y altura de colocación de la fila).
- . Experimentos con pantallas formadas por 2 y 3 filas de cilindros (variable: distancia vertical entre las filas).
- . Obtención de correlaciones para evaluar la eficacia de las pantallas en función de sus parámetros de diseño.

4.1.- LECHOS UTILIZADOS

Después de algunos ensayos previos, se fijaron las siguientes condiciones de trabajo:

- . Altura del lecho, H_f 85-90 cm
- . Velocidad reducida de trabajo .. $1 \leq U_R \leq 2,5$

Se estudiaron tres lechos, tabla IV, que se diferenciaban en el tamaño de partícula del sólido y/o en el tipo de distribuidor de aire.

TABLA IV.- Características de los lechos utilizados

Lecho	Distribuidor del gas	d_p (micras)	Intervalo (micras)
A	Sandwich	224	-250+200
B	Sandwich	126	-160+100
C	Poroso A1	126	-160+100

4.2.- VELOCIDADES MINIMAS DE FLUIDIZACION Y DE COMPLETA FLUIDIZACION

En el lecho bidimensional se determinaron las velocidades mínimas de fluidización y completa fluidización de los dos tamaños de partícula de corindón con los dos tipos de distribuidor de gas. En la tabla V se muestran los valores hallados junto con los determinados en un lecho cilíndrico de 7 cm de diámetro.

Se observa que estas características fluidodinámicas del sólido dependen en cierta medida de la geometría del aparato utilizado.

En lo que sigue, se tomaron como U_{mf} los valores subrayados de la tabla V.

TABLA V.- Propiedades fluidodinámicas del corindón en el lecho bidimensional y en uno cilíndrico

Lecho	Distribuidor	d _p (micras)	U _{mf} (cm/seg)		U _{mcf} (cm/seg)	
			Teór. (*)	Exper.	Teór. (*)	Exper.
Bidim.	Sandwich	126 (£)	---	<u>4,5</u>	---	6,5
Bidim.	Poroso Al	126 (£)	---	<u>6,6</u>	---	8,2
Bidim.	Poroso vidrio	126 (£)	3,8	4,4	6,2	6,0
Bidim.	Sandwich	224 (&)	---	<u>7,6</u>	---	13,8
Bidim.	Poroso Al	224 (&)	---	9,5	---	14,3
Bidim.	Poroso vidrio	224 (&)	9,6	9,2	15,0	14,8

(*) Según R. Otero y J. Corella (3)

(£) Intervalo de tamaños: -160+100 micras

(&) Intervalo de tamaños: -250+200 micras

Nota: El gas utilizado era aire (1 atm. y 20°C)

4.3.- CRECIMIENTO DE LAS BURBUJAS CON LA ALTURA (DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE BURBUJA EN EL LECHO)

Kobayashi propuso una correlación del crecimiento de las burbujas, (Apartado 2.1.3, ecuación 4) que puede transformarse en:

$$\frac{d_b U_{mf}}{\rho_s d_p U_o} = 1,4 H_D + \frac{d_o U_{mf}}{\rho_s d_p U_o}$$

De esta forma se pueden comparar los resultados obtenidos en diferentes condiciones de trabajo. Debe tenerse en cuenta que d_o representa el tamaño de burbuja a nivel de la placa distribuidora y vale cero cuando se emplean placas de material poroso o sinterizado.

En un trabajo reciente (18) se han indicado ciertas limitaciones para la correlación de Kobayashi. Así, la ecuación 4 sólo puede aplicarse en lechos de diámetro menor de 30 cm. Como el lecho bidimensional empleado en el presente trabajo podía asimilarse a un lecho cilíndrico de 25 cm de diámetro, se estimó que la utilización de la citada correlación era correcta.

Los puntos experimentales, obtenidos a partir de unas 500 fotografías del lecho y según el método descrito en el apartado 3.5.1., se ajustaron a rectas de ecuación general:

$$\frac{d_b U_{mf}}{\rho_s d_p U_o} = a H_D + b \quad 14.$$

En la figura 19 se muestran los resultados experimentales para cada uno de los tres lechos estudiados (ver sus características en la tabla IV). En la tabla VI se muestran los valores de las pendientes y ordenadas en el origen de la ecuación 14 para los tres lechos, así como el número de puntos experimentales y los respectivos coeficientes de correlación de los ajustes por mínimos cuadrados.

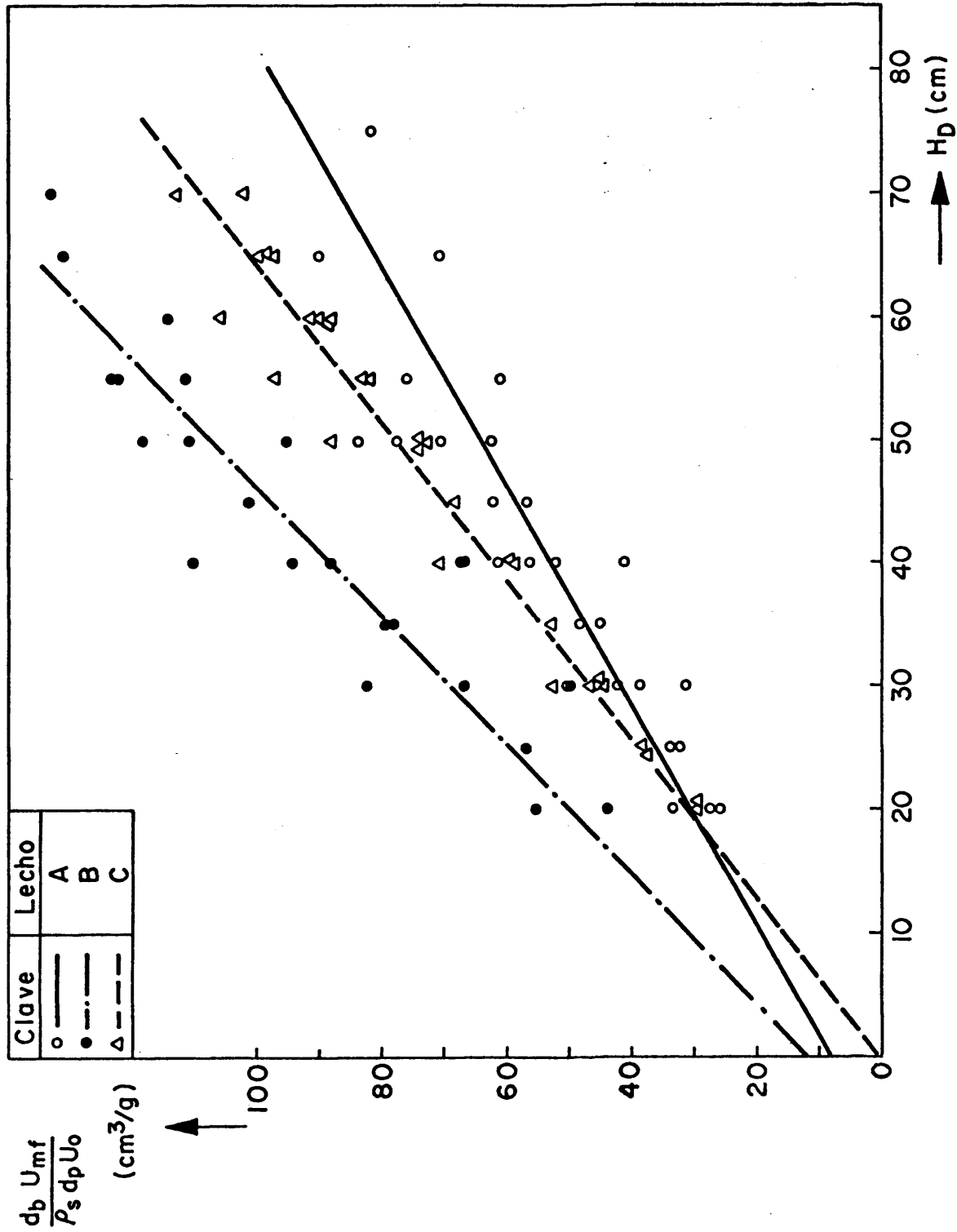


Fig. 19— Lechos sin pantallas. Variación del tamaño de burbuja con la altura.

TABLA VI.- Valores de los coeficientes de la ecuación 14 (rectas de la figura 19)

Lecho (Tabla IV)	a (cm ² /g)	b (cm ³ /g)	Nº de puntos	Coefic. de correlación
A	1,11	8,88	30	0,91
B	1,90	12,36	24	0,92
C	1,55	0,05	33	0,96

En la figura 20 se comparan los resultados experimentales con los teóricos, calculados utilizando las ecuaciones 4 y 5 (para calcular el tamaño de burbuja a nivel del distribuidor) y la ecuación 13 (para obtener el valor del parámetro $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$ teórico para cada altura H_D).

De los resultados obtenidos pueden deducirse las siguientes conclusiones:

a) Los elevados coeficientes de correlación, tabla VI, indican que los puntos experimentales se ajustan bastante bien a la ecuación 14. Las desviaciones respecto a la correlación de Kobayashi se consideran en los puntos siguientes.

b) La medida de tamaños de burbuja en lechos bidimensionales tiene errores por defecto debido a la imposibilidad de medir las burbujas menores que el espesor del lecho, en este caso 2 cm. Esto origina la obtención de valores de los coeficientes a y b de la ecuación 14 ligeramente mayores que los esperados según la ecuación teórica 13.

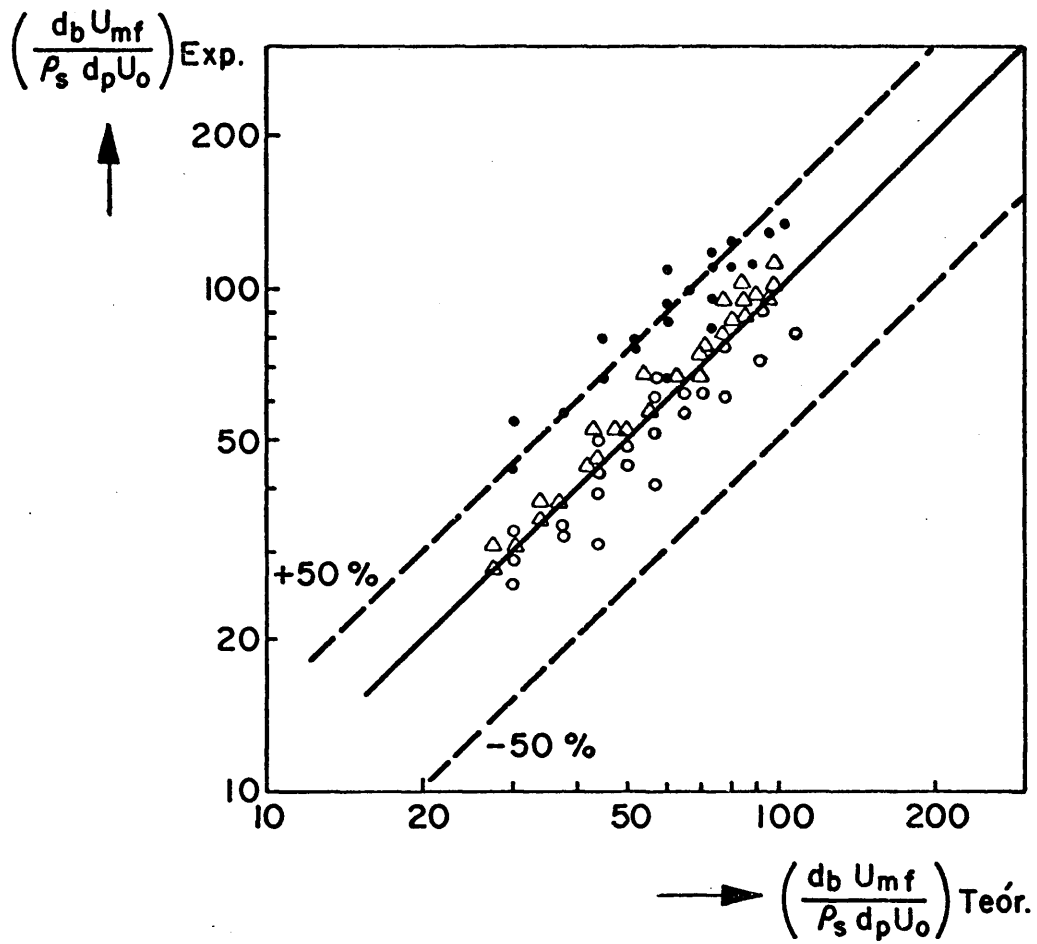


Fig. 20— Distribución de tamaños de burbuja. Comparación de los resultados experimentales con los teóricos
 Lechos: ○ A, ● B, △ C.

c) En los lechos B y C los dos coeficientes \underline{a} y \underline{b} son mayores que los de Kobayashi, además de por los errores comentados en el punto anterior, por tomar como base de cálculo las velocidades mínimas de fluidización experimental, 4,5 y 6,6 cm/seg, en vez del valor teórico de 3,8.

d) En el lecho A la velocidad de crecimiento de las burbujas (representada por el coeficiente \underline{a}) era algo menor que la teórica, $1,4 \text{ cm}^2/\text{g}$, y que la de los otros dos lechos. Esto puede deberse a que la velocidad mínima de fluidización empleada fué $7,6 \text{ cm/seg.}$, mientras que la teórica es $9,6$ (tabla V). Es decir, en la ecuación 6 se empleaban valores de U_{mf} menores que los verdaderos, por lo que el parámetro $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$ venía influido de este error y la pendiente, \underline{a} , era menor de la debida. Por último, las burbujas que se formaban en este lecho eran, a igualdad de otras condiciones, mucho mayores que las de los otros dos lechos, tomando mayor significado el rozamiento contra las paredes del recipiente y siendo menor la velocidad de ascenso y crecimiento.

e) Los valores experimentales del coeficiente \underline{b} con la placa de tipo "sandwich" eran mayores que los estimados a partir de las ecuaciones 4, 5 y 13. Esto es atribuible a que dicha placa no distribuía uniformemente al gas y producía burbujas mayores que las esperadas. Los valores de \underline{b} obtenidos con el distribuidor poroso coinciden prácticamente con los teóricos, en el sentido de que los tamaños de burbuja a nivel de la placa eran muy cercanos a cero.

f) Se pone de manifiesto que en el estudio de lechos con pantallas es necesario realizar antes el estudio del lecho sin ellas, ya que las correlaciones existentes no permiten predecir todavía el comportamiento exacto de los sistemas fluidizados.

4.4.- EXPANSION DEL LECHO

Los puntos experimentales, obtenidos de unas 500 fotografías según el método descrito en el apartado 3.5.1, se ajustaron a rectas de ecuación:

$$\frac{H_f - H_{mf}}{H_f} = a' U_R + b' \quad 12.$$

que, como se indica en el apartado 2.1.4, es una simplificación de las ecuaciones 8, 9 y 11 cuando el intervalo de valores de U_R es estrecho. En la figura 21 se muestran los resultados para cada lecho estudiado (ver sus características en la tabla IV).

En la tabla VII se muestran los valores de las pendientes y ordenadas en el origen de las rectas obtenidas, así como el número de puntos ajustados y los coeficientes de correlación de los ajustes por mínimos cuadrados. Téngase en cuenta que cada punto representado en la figura 21 está obtenido a partir de unas 10-15 medidas de expansión.

TABLA VII.- Expansión del lecho sin pantallas. Coeficientes empíricos de la ecuación 12.

LECHO	a'	b'	Nº Puntos	Coefic. de correlación
A	0,098	-0,090	14	0,98
B	0,078	-0,068	11	0,97
C	0,107	-0,099	8	0,98

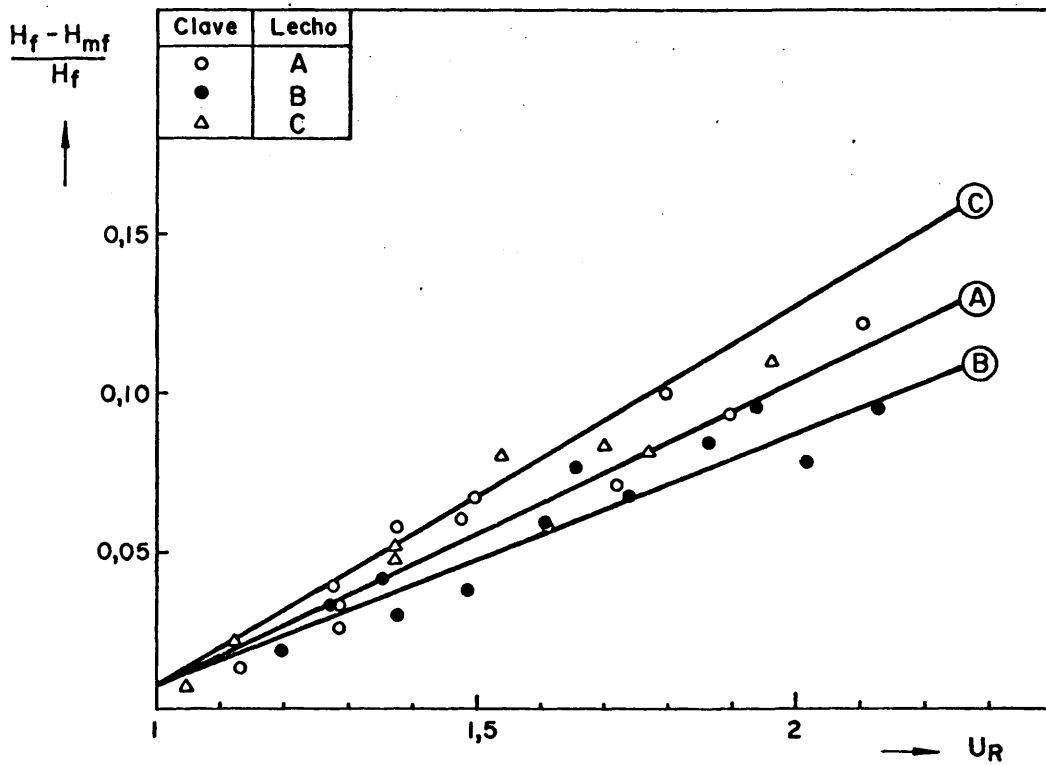


Fig. 21— Lechos sin pantallas. Expansión del lecho vs. Velocidad reducida

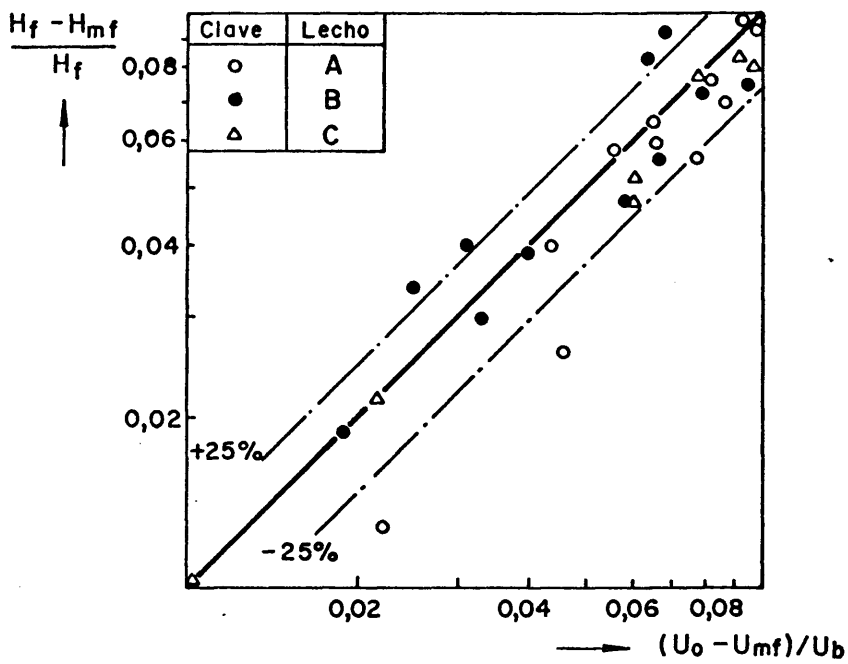


Fig. 22— Expansión y fracción de burbujas en el lecho. Comparación de las ecuaciones 7 y 8 .

En la figura 22 se muestra la representación gráfica de la ecuación 9. Los valores de las ordenadas están obtenidos a partir de las medidas directas de H_f y H_{mf} en las fotografías, ecuación 7, y los de las abscisas con las distribuciones de tamaños de burbuja en el lecho que proporcionaban un valor del tamaño de burbuja medio, que con la ecuación 11 -- permitía calcular la fracción de burbujas según el modelo de Kunii-Levenspiel, ecuación 8.

El tratamiento expuesto da lugar a las siguientes conclusiones:

a) Los elevados coeficientes de correlación, tabla VII, indican que es correcto suponer una relación lineal entre la expansión y la velocidad reducida de trabajo si se emplean intervalos estrechos de valores de ésta.

b) En condiciones de mínima fluidización ($U_R = 1$) el coeficiente b' debe ser igual a cero; cuando se obtiene un valor positivo debe sospecharse una distribución del gas defectuosa, con formación de burbujas apreciables a velocidades del gas inferiores a la mínima de fluidización.

c) La suposición representada por la ecuación 9 (todo el gas en exceso sobre el necesario para conseguir la mínima fluidización pasa en forma de burbujas) parece correcta en el intervalo de condiciones estudiado.

5.- ESTUDIOS EN LECHO BIDIMENSIONAL CON PANTALLAS Y SIN

REACCION QUIMICA

Se han empleado las siguientes condiciones de trabajo:

Altura del lecho 85-90 cm
Tamaño de partícula 126 micras
Intervalo de tamaños-160±100 micras
Velocidad reducida de trabajo.. $1,5 \leq U_R \leq 2,5$

Las demás condiciones generales y procedimiento experimental se describieron en el apartado 3.4.1. Asimismo, los valores de las velocidades mínimas de fluidización utilizadas fueron las correspondientes al lecho sin pantallas, tablas IV y V.

En la tabla VIII se indican las pantallas utilizadas; para su designación se ha empleado la clave definida en el apartado 3.1.e. Para mayor claridad, en las figuras 23, 24 y 25 se muestra el aspecto, en diagrama esquemático, de cada una de las ordenaciones de cilindros que se colocaron en el interior del lecho.

5.1.- PARAMETROS REDUCIDOS

El número de cilindros por fila y la altura de colocación son magnitudes que dan poca información a la hora de correlacionar los resultados experimentales y de aplicar los criterios de diseño en escalas mayores. Por estas razones - se han empleado magnitudes reducidas tales como: superficie

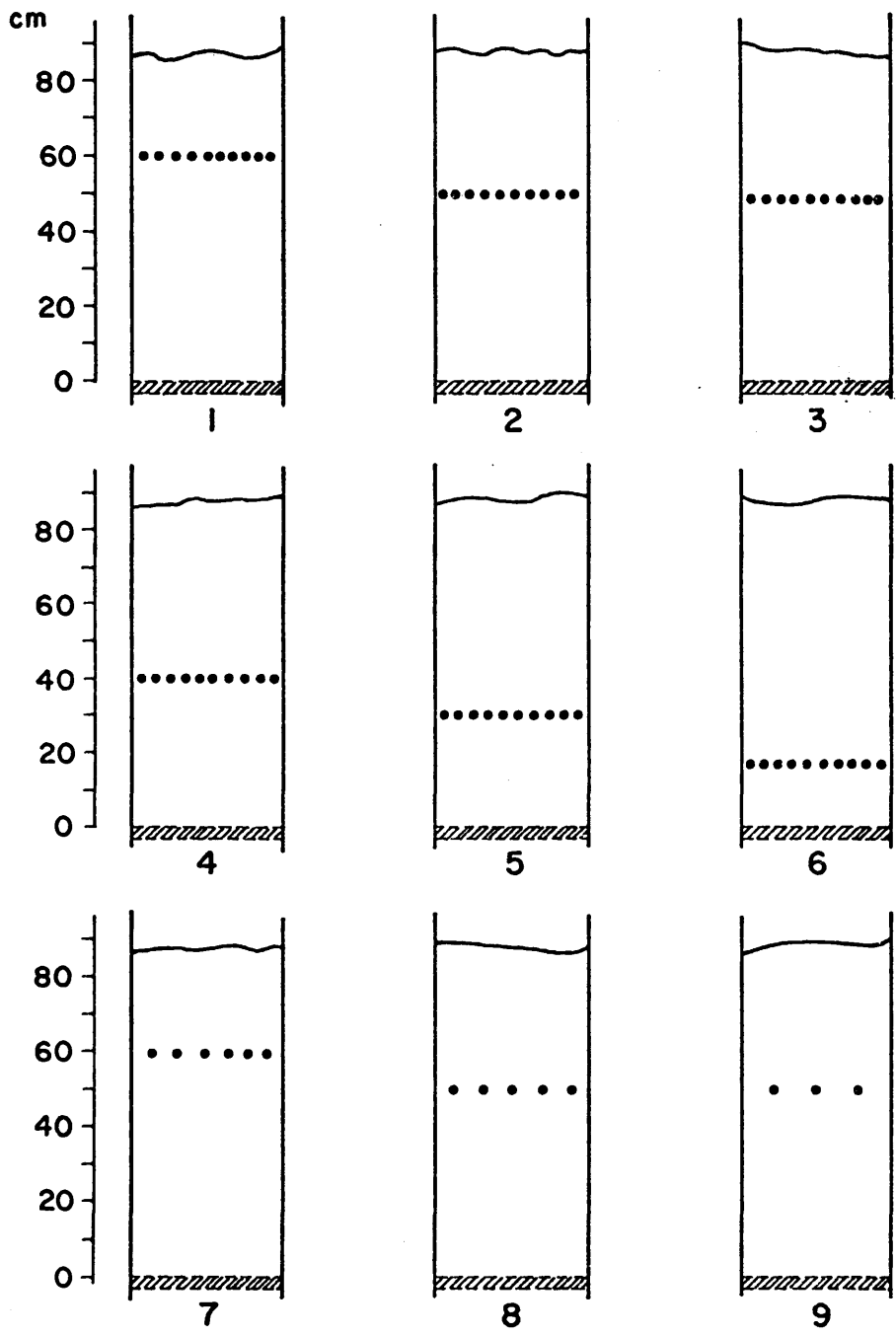


Fig. 23— Pantallas de una fila de cilindros

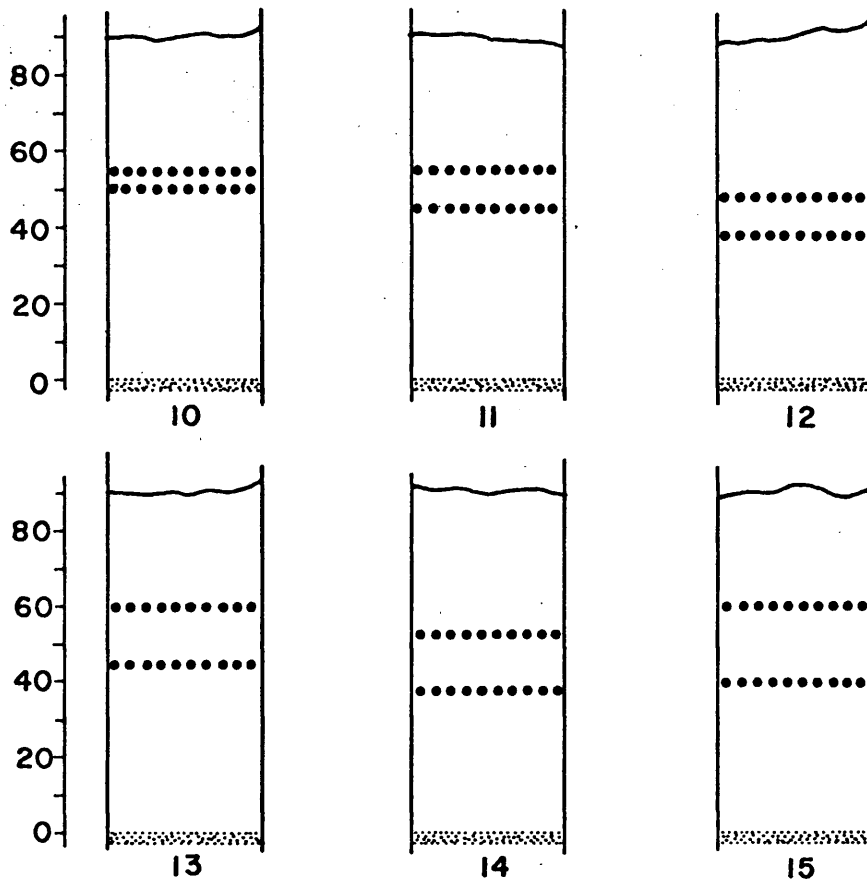


Fig. 24.—Pantallas con dos filas de cilindros

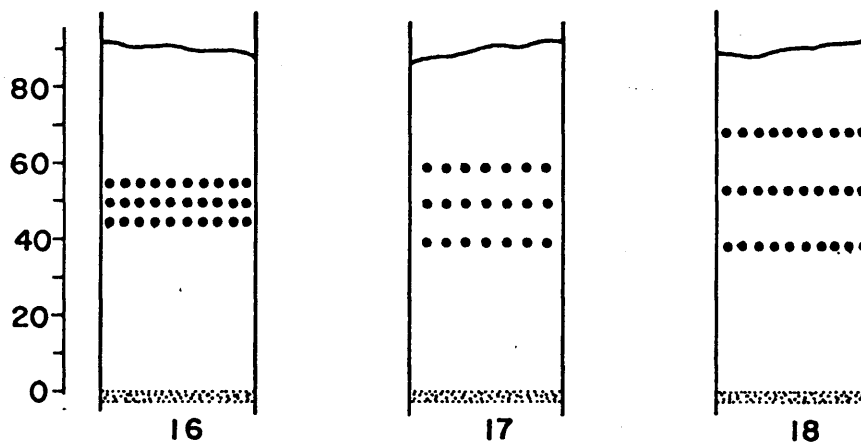


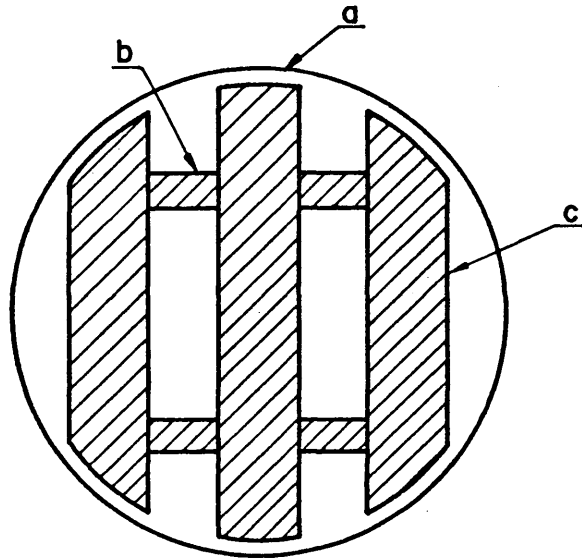
Fig. 25.—Pantallas con tres filas de cilindros.

libre relativa, altura relativa de colocación y parámetro de choque.

Superficie libre relativa, (S_{lib}), - Se define este parámetro como el porcentaje de superficie libre a la altura de colocación de una fila de cilindros. Se calcula dividiendo la superficie que deja libre la pantalla por la sección del lecho y multiplicando por 100. Hay que tener en cuenta, no sólo el área que ocupan los cilindros que forman la pantalla, sino también toda la ocupada por los soportes, soldaduras, varillas, etc. que sirven para mantener fijos los cilindros. En la figura 26 se ha representado el corte de un lecho a la altura a que está colocada una pantalla. Si el lecho tuviera un diámetro D, el valor de la superficie libre relativa, S_{lib} , sería:

$$S_{lib} = \frac{\pi D^2/4 - (\text{área rayada})}{\pi D^2/4} \cdot 100 \quad 15.$$

La superficie libre relativa varía entre cero, pantalla formada por una placa porosa, y 100, pantalla inexistente.



- a: Recipiente. $\emptyset = D$ (ecuación 15)
- b: Varilla de fijación.
- c: Cilindro.

Fig. 26.- Superficie libre relativa de una pantalla formada por cilindros horizontales.

TABLA VIII.- Relación de pantallas y placas distribuidoras empleadas.

Pantalla	Clave	Placa
1	12-F-1-10-2-60	Sandwich
2	12-F-1-10-2-50	"
3	12-F-1-10-2-48,5	"
4	12-F-1-10-2-40	"
5	12-F-1-10-2-30	"
6	12-F-1-10-2-17	"
7	12-F-1-6-4-60	Sandwich
8	12-F-1-5-4-50	"
9	12-F-1-3-6-50	"
10	12-F-2-10-2-50-55	Poroso Al
11	12-F-2-10-2-45-55	"
12	12-T-2-10-2-38-48	"
13	12-F-2-10-2-45-60	"
14	12-F-2-10-2-38-53	"
15	12-F-2-10-2-40-60	"
16	12-F-3-10-2-45-50-55	Poroso Al
17	12-F-3-7-3-40-50-60	"
18	12-F-3-10-2-39-54-69	"

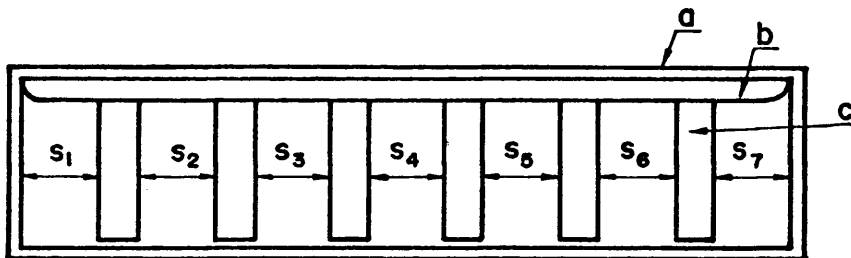
Altura relativa de colocación, (H').- Se obtiene dividiendo la distancia del distribuidor a la pantalla por la altura del lecho en las condiciones de trabajo, es decir:

$$H' = \frac{H'_D}{H_f}$$

16.

Este parámetro varía entre cero, fila situada sobre la placa distribuidora, y uno, pantalla situada en la superficie del lecho.

Amplitud de paso, (\bar{S}_h)..- Este parámetro representa la distancia media entre los bordes de los cilindros que forman la pantalla y entre los extremos y las paredes del recipiente. En la figura 27 se muestra un diagrama que permite dejar clara la definición de esta magnitud.



- a: Recipiente
- b: Soporte
- c: Cilindros

$$\bar{S}_h = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_7}{7} \quad (17.)$$

Fig. 27.- Ejemplo de cálculo de la amplitud de paso, \bar{S}_h .

Parámetro de choque.- Este parámetro representa la relación que existe entre el tamaño de una burbuja al llegar a una fila de cilindros y la amplitud de paso de ésta. Se obtiene dividiendo el valor del parámetro $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$ (correspondiente a una altura $H_D = H'_D$) por la amplitud de paso de la fila de cilindros considerada, \bar{S}_h . Para la perfecta comprensión de la definición de esta magnitud se muestra en la figura 28 un ejemplo gráfico de su cálculo.

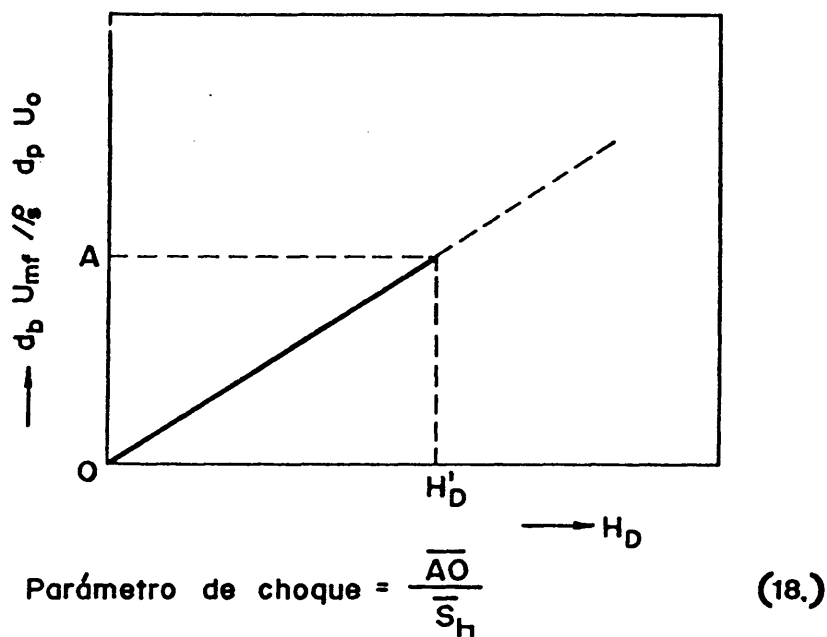


Fig. 28.- Ejemplo de cálculo del parámetro de choque.

En las tablas IX, X y XI se muestran los valores de los parámetros reducidos de construcción y colocación de las pantallas empleadas.

TABLA IX.- Pantallas de una fila de cilindros. Superficies libres relativas, alturas relativas de colocación y amplitudes de paso.

PANTALLA	S_{lib}	H'	\bar{S}_h
	(%)	(-)	(cm)
1	36,4	0,69	1,18
2	"	0,58	"
3	"	0,56	"
4	"	0,46	"
5	"	0,35	"
6	"	0,20	"
7	50,0	0,69	2,54
8	53,2	0,58	3,17
9	60,0	0,58	5,35

TABLA X.- Pantallas de dos filas de cilindros. Alturas relativas de colocación y separaciones verticales entre filas.

Para todas las pantallas:

$$S_{lib} = 36,4\% ; \bar{S}_h = 1,18 \text{ cm} ; \bar{H}' \approx 0,55 (\&)$$

Pantalla	H'	S _v
	(-)	(cm)
10	0,56	5
11	0,50	10
12	0,43	10
13	0,50	15
14	0,43	15
15	0,45	20

(&) \bar{H}' es la distancia desde el distribuidor al punto medio entre las dos filas, partida por la altura del lecho, es decir:

$$\bar{H}' = \bar{H}'_D / H_f ; \text{ siendo } \bar{H}'_D = H'_D + 1/2 S_v$$

TABLA XI.- Pantallas de tres filas de cilindros. Alturas relativas de colocación y separaciones verticales entre filas.

Para todas las pantallas: $H'' \approx 0,56^{(\text{£})}$

PANTALLA	S_{lib}	$H'(\&)$	$S_v(\text{ç})$	\bar{S}_h
	(%)	(-)	(cm)	(cm)
16	36,4	0,50	5	1,18
17	46,5	0,44	10	2,08
18	36,4	0,43	16	1,18

(£) $H'' = H''_D / H_f$ (altura relativa de colocación de la fila central)

(&) $H' = H'_D / H_f$ (altura relativa de colocación de la fila más baja)

(ç) Igual separación vertical entre las tres filas

5.2.- CRECIMIENTO DE LAS BURBUJAS CON LA ALTURA (DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE BURBUJA EN EL LECHO)

La presencia de pantallas en el interior de un lecho fluidizado modifica las líneas de flujo del gas, resultando una distribución de tamaños de burbuja completamente diferente de la del mismo lecho sin pantallas.

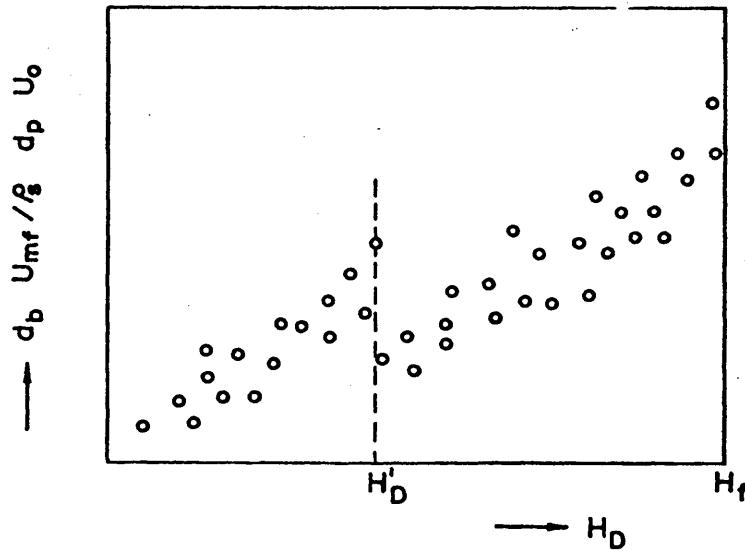


Fig. 29.- Ejemplo de distribución de tamaños de burbuja en un lecho con una fila de cilindros.

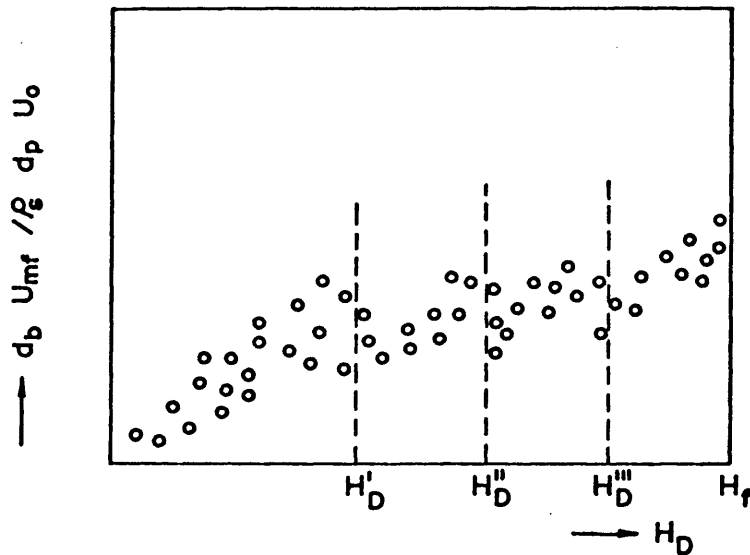


Fig. 30.- Ejemplo de distribución de tamaños de burbuja en un lecho con tres filas de cilindros.

La ecuación 4 deja de cumplirse en todo el intervalo de alturas del lecho de tal forma que, si se representan los valores del parámetro $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$ frente a la distancia de las burbujas al distribuidor, H'_D , el ajuste de los puntos experimentales a ecuaciones del tipo de la ecuación 14 da coeficientes a y b que no son constantes en todo el intervalo de valores de H_D . En la figura 29 se muestra un ejemplo de los resultados que se obtendrían en un lecho con una fila de cilindros situada a una altura H'_D . Como puede observarse, después de la altura H'_D la nube de puntos parece seguir una ley diferente. Si se colocan dos o más filas de cilindros, la situación se complica aún más, ya que aparece una dispersión mayor de puntos. En la figura 30 se muestra un ejemplo del caso hipotético de un lecho con tres filas de cilindros situadas a alturas respectivas H'_D , H''_D y H'''_D .

5.2.1.- Ajuste de los puntos experimentales

El ajuste de los puntos experimentales obtenidos puede realizarse según varios métodos que a continuación se describen con detalle.

- a) Ajuste suponiendo constante la velocidad de crecimiento de las burbujas.- Este método de ajuste se basa en suponer que la velocidad de crecimiento de las burbujas es constante en cada una de las zonas que se encuentran situadas entre el distribuidor y la primera fila, entre cada dos filas de cilindros y entre la última de éstas y la superficie del lecho.

En la figura 31 se muestra un ejemplo de como se ajustarían, según este método, los puntos experimentales obtenidos en un lecho con dos filas de cilindros. En base al ejemplo citado el procedimiento sería el siguiente:

1º) Trazar perpendiculares por los puntos correspondientes a las alturas de colocación de las pantallas, H'_D y H''_D , así como por el de la altura del lecho, H_f . Este último valor, si se emplean varias velocidades de trabajo, se puede tomar como altura del lecho a la velocidad media de trabajo.

2º) Trazar las rectas que mejor se ajusten a las nubes de puntos de cada tramo (rectas \overline{OA} , \overline{BD} y \overline{CE}), teniendo en cuenta que la pendiente de estos tramos puede suponerse:

- La dada por la ecuación de Kobayashi (ecuación 4), es decir $\text{pte.} = 1,4$
- La encontrada experimentalmente en ensayos previos con el mismo lecho sin pantallas, es decir el coeficiente \underline{a} de la ecuación 14.

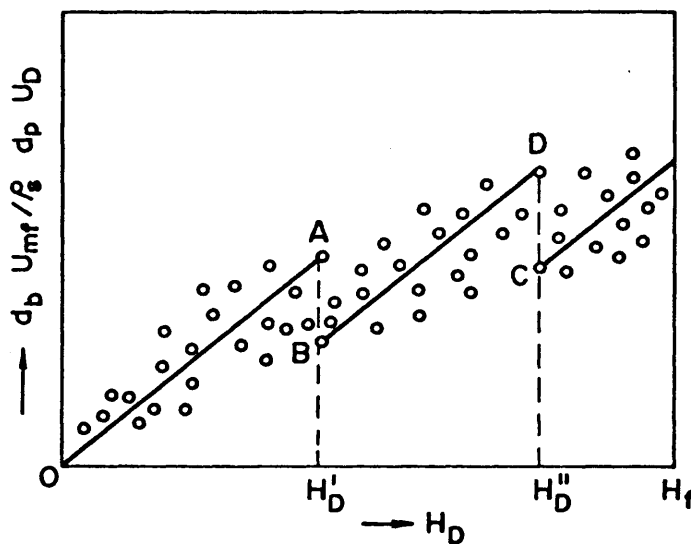


Fig. 31.- Ejemplo de ajuste suponiendo constante el crecimiento de las burbujas.

Hay que observar que el tramo \overline{OA} no tiene que pasar necesariamente por el origen de coordenadas (por ejemplo, si se emplean distribuidores de placa perforada).

En resumen, y referido al ejemplo utilizado, el método consiste en fijar unos puntos, O, B y C, tales que las rectas que pasen por ellos, de pendiente 1,4 o \underline{a} (ecuaciones 13 ó 14) se ajusten lo más posible a las nubes de puntos experimentales.

- b) Ajuste suponiendo el tamaño de burbuja después del choque igual a la amplitud de paso. -Este ajuste se basa en suponer que, en cualquier condición, el tamaño de las burbujas después de pasar a través de una fila de cilindros es igual a la amplitud de paso, \bar{S}_h . En la figura 32 se muestra como sería el fenómeno de choque y rotura en caso de cumplirse esta suposición. Estrictamente, el tamaño de burbuja sería igual a \bar{S}_h en la altura media de colocación de la pantalla, H'_D , comenzando a crecer a partir de ahí siguiendo una ley semejante a la de Kobayashi.

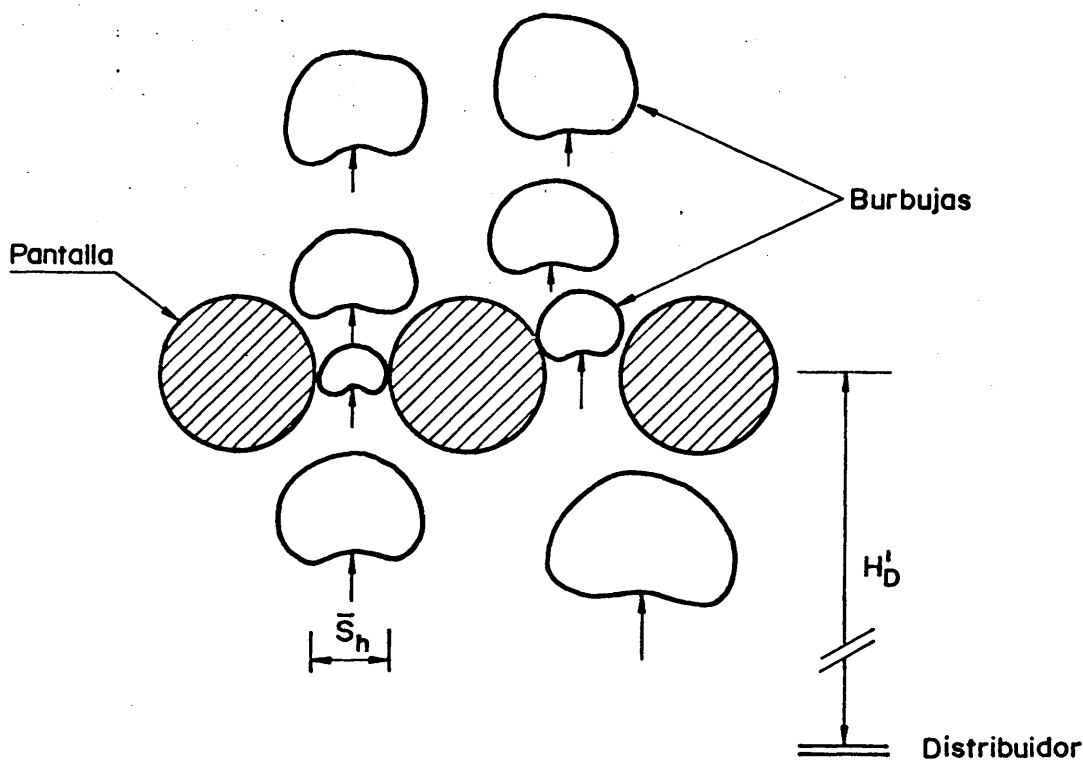


Fig. 32— Ratura de las burbujas suponiendo su tamaño igual a \bar{S}_h

Basándose en el ejemplo que se muestra en la figura 33, este ajuste se haría siguiendo los siguientes pasos:

1º) Trazar perpendiculares por los puntos correspondientes a las alturas de colocación de las filas de cilindros y por el que señala la altura del lecho.

2º) Ajustar el tramo \overline{OA} por la ecuación experimental 14 obtenida en el mismo lecho sin pantallas, o bien por la Ecuación de Kobayashi.

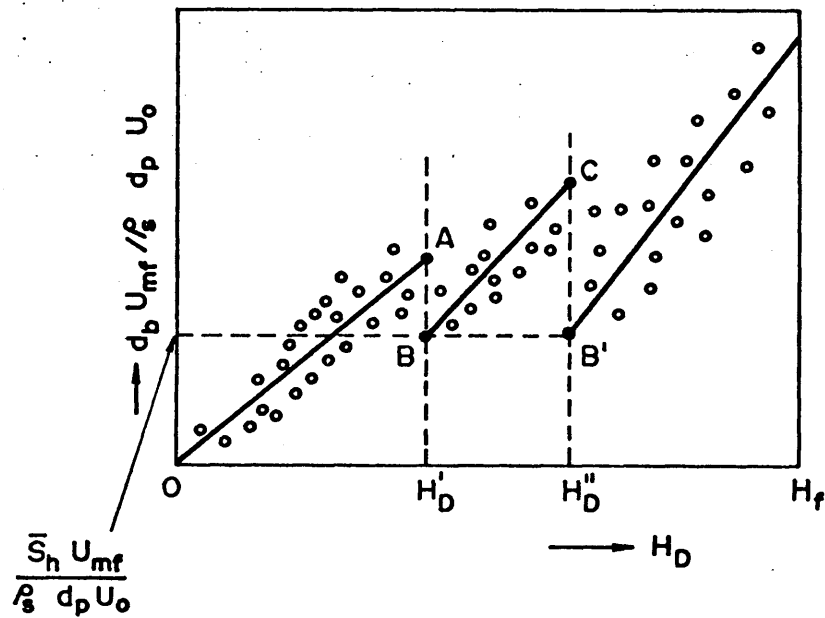


Fig. 33.- Ejemplo de ajuste suponiendo el tamaño de burbuja después del choque igual a la amplitud de paso de la pantalla.

3º) Fijar los puntos B y B'. Esto se realiza haciendo el tamaño de burbuja correspondiente a las alturas H'_D y H''_D igual a la amplitud de paso de las filas de cilindros, es decir:

$$\left(\frac{d_b U_{mf}}{\rho_s d_p U_o} \right)_{H'_D \text{ y } H''_D} = \left(\frac{\bar{S}_h U_{mf}}{\rho_s d_p U_o} \right) \quad 19.$$

Téngase en cuenta que este ajuste sólo serviría para experiencias realizadas con la misma velocidad lineal del gas, U_o , ya que en caso contrario las ordenadas de los puntos B y B' serían variables con la velocidad lineal.

4º) Fijar los puntos C y D de forma que las rectas \overline{BC} y $\overline{B'D}$ se ajusten lo mejor posible a las nubes de puntos experimentales.

- c) Ajuste por mínimos cuadrados.- Con este método no se hacen consideraciones sobre el tamaño de burbuja después de pasar por las pantallas ni sobre la velocidad de crecimiento de aquellas. Se trata simplemente de ajustar a rectas, por el método general de mínimos cuadrados, las nubes de puntos comprendidas en cada zona: distribuidor -1ª fila, fila-fila, y última fila-superficie del lecho.

Con este método se obtiene la distribución actual de tamaños de burbuja en las condiciones específicas de experimentación.

Cabe una variación del método que consiste en ajustar el primer tramo, correspondiente al espacio comprendido entre el distribuidor y la primera fila de cilindros según rectas de pendiente $1,4$ ó a (ecuaciones 13 ó 14), lo cual evita errores debidos a la escasez de datos precisos de tamaños de burbujas en esa zona del lecho, donde las burbujas son muy pequeñas y difícilmente medibles.

5.2.2.- Resultados experimentales

De acuerdo con el método descrito en el apartado 3.5.1, se midieron sobre cada fotografía los valores de tamaños de burbuja, altura de situación de las burbujas y altura del lecho.

La distribución de tamaños de burbuja en el lecho se obtuvo representando el parámetro $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$ frente a H_D . Téngase en cuenta que dicho parámetro se ha resumido, sustituyendo los valores de las magnitudes constantes, de la siguiente manera:

Pantallas 1 a 9:

$$\frac{d_b U_{mf}}{\rho_s d_p U_o} = \frac{d_b^{4,5}}{3,5 \cdot 0,0126 \cdot U_o} = 102 d_b / U_o \text{ cm}^3/g \quad 20.$$

Pantallas 10 a 18:

$$\frac{d_b U_{mf}}{\rho_s d_p U_o} = \frac{d_b^{7,6}}{3,5 \cdot 0,0126 \cdot U_o} = 150 d_b / U_o \text{ cm}^3/g \quad 21.$$

representándose dichos valores resumidos frente a H_D .

El método de ajuste de los puntos experimentales utilizado fué el tercero de los descritos en el apartado anterior (por mínimos cuadrados), debido a que la gran dispersión de puntos y el empleo de varias velocidades lineales del gas en cada experiencia hacían engorrosos y poco precisos los otros dos métodos.

Pantallas de una fila de cilindros.- En la serie de figuras que van de la 34 a la 42 se muestran las distribuciones de tamaños de burbuja en los lechos apantallados con las pantallas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

Se consideró una altura del lecho, H_f , igual a 87 cm que era la que tenía el lecho a una velocidad reducida de trabajo igual a 2, velocidad media de las empleadas.

La serie de ensayos tenía el objeto de estudiar las influencias de la variación del número de cilindros y de la altura de colocación de la fila de cilindros.

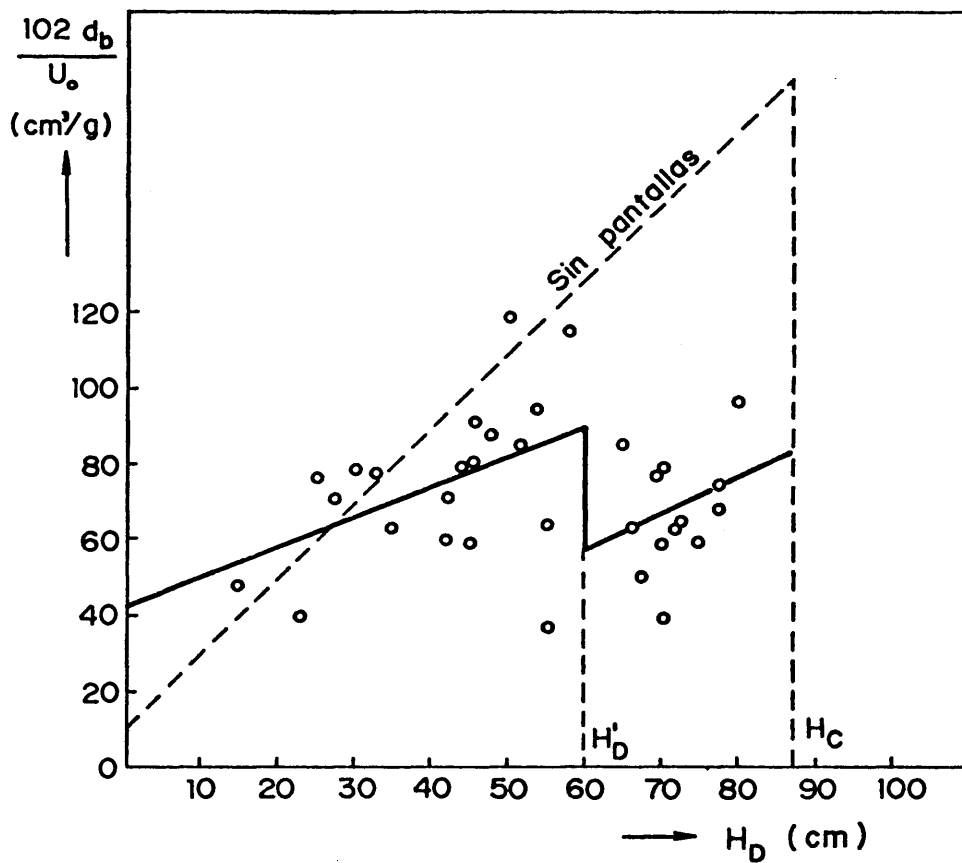


Fig. 34.- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 1.

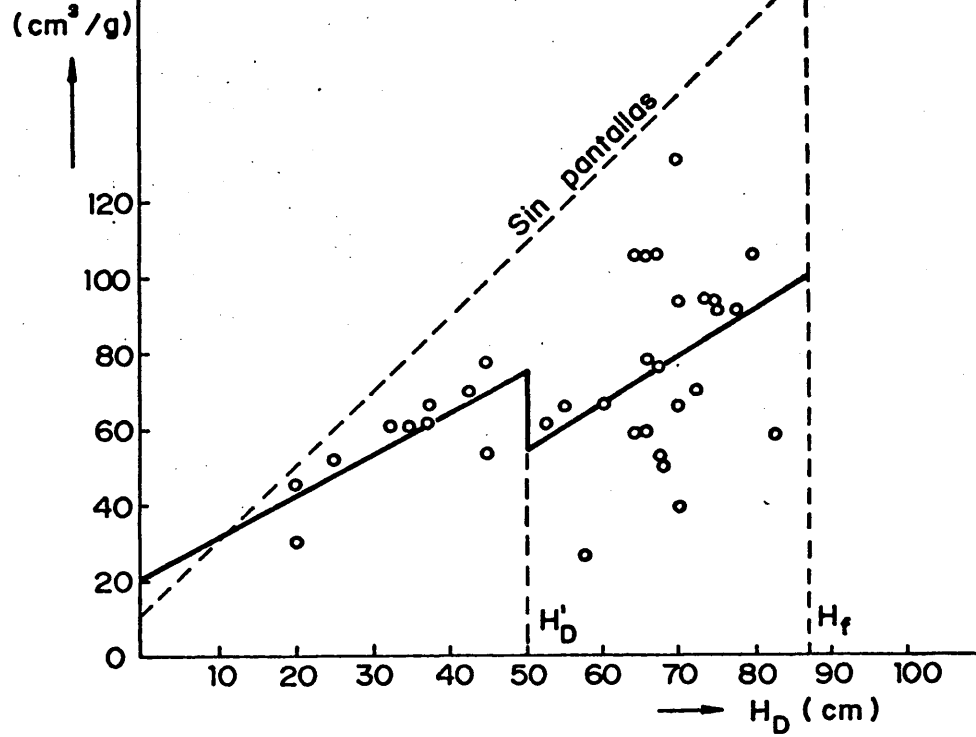


Fig. 35.- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 2.

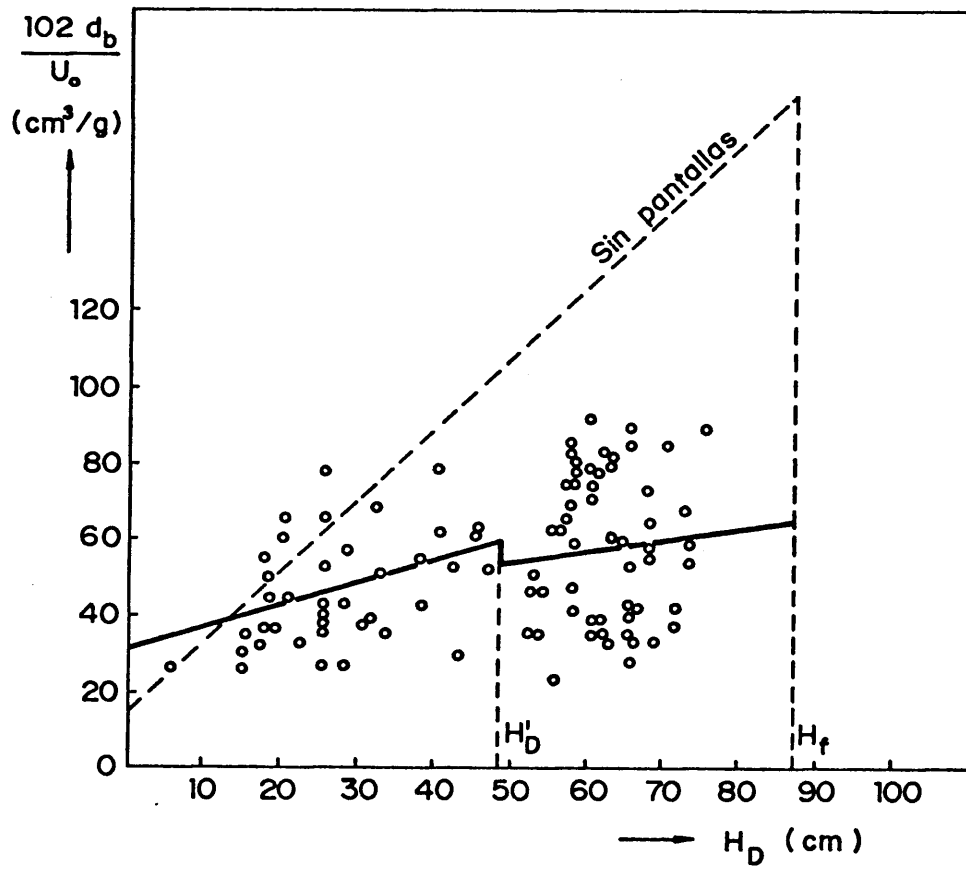


Fig. 36.- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 3.

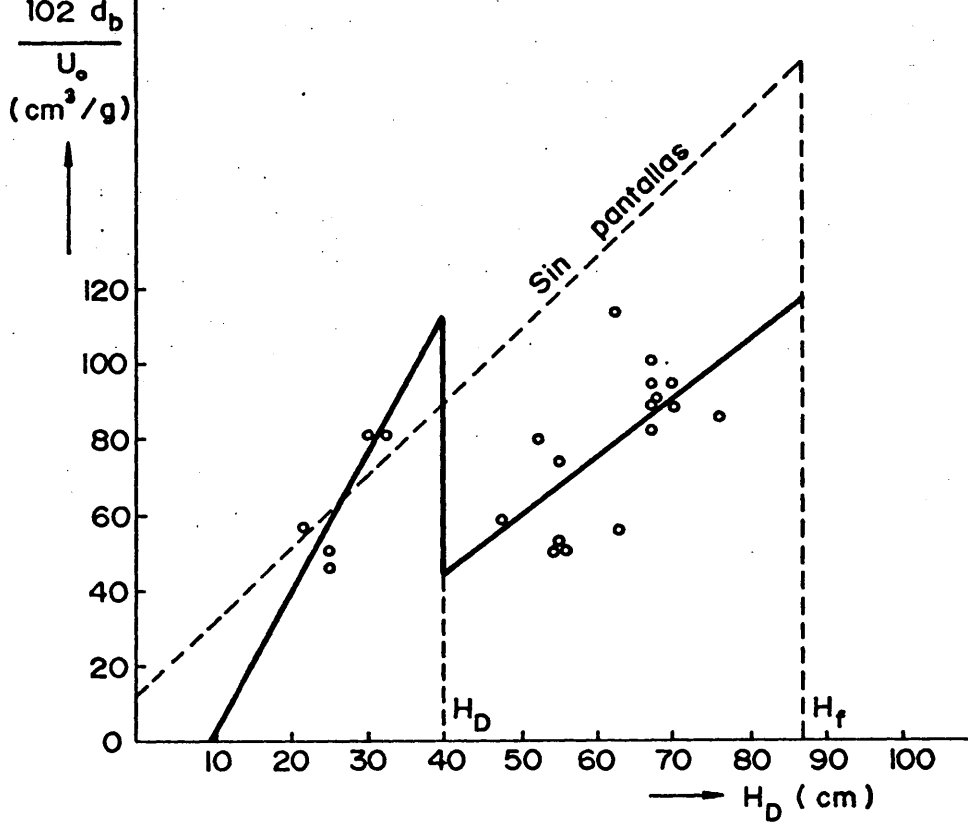


Fig. 37.- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 4.

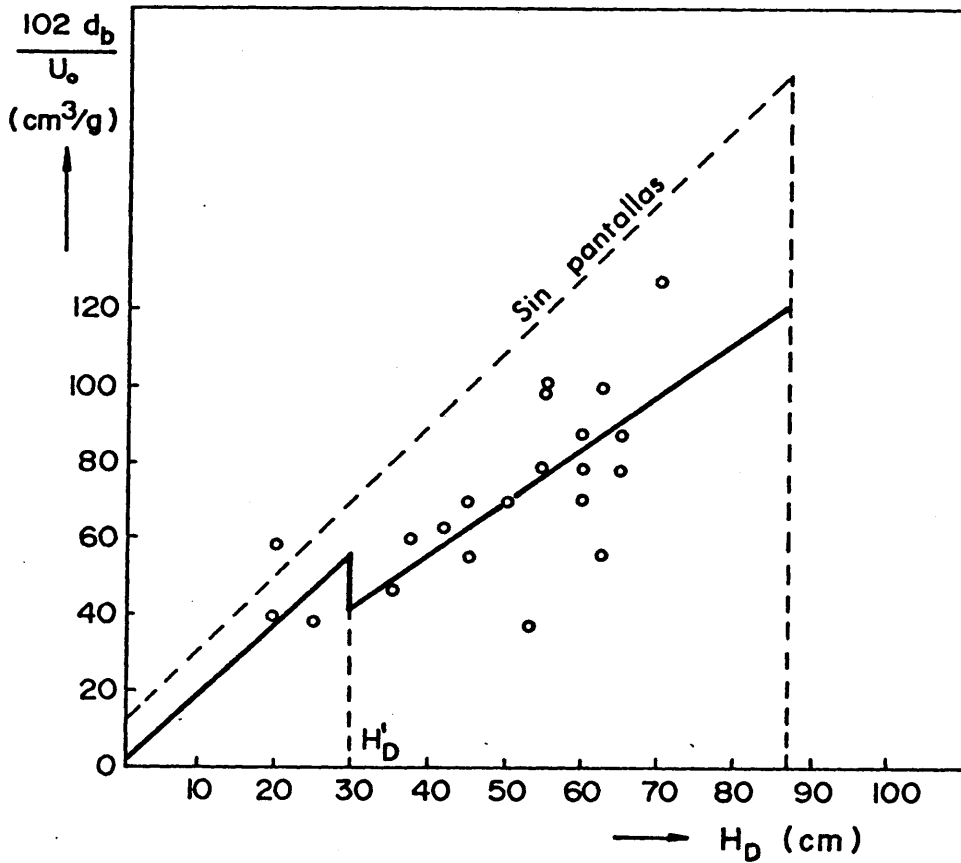


Fig. 38.- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 5.

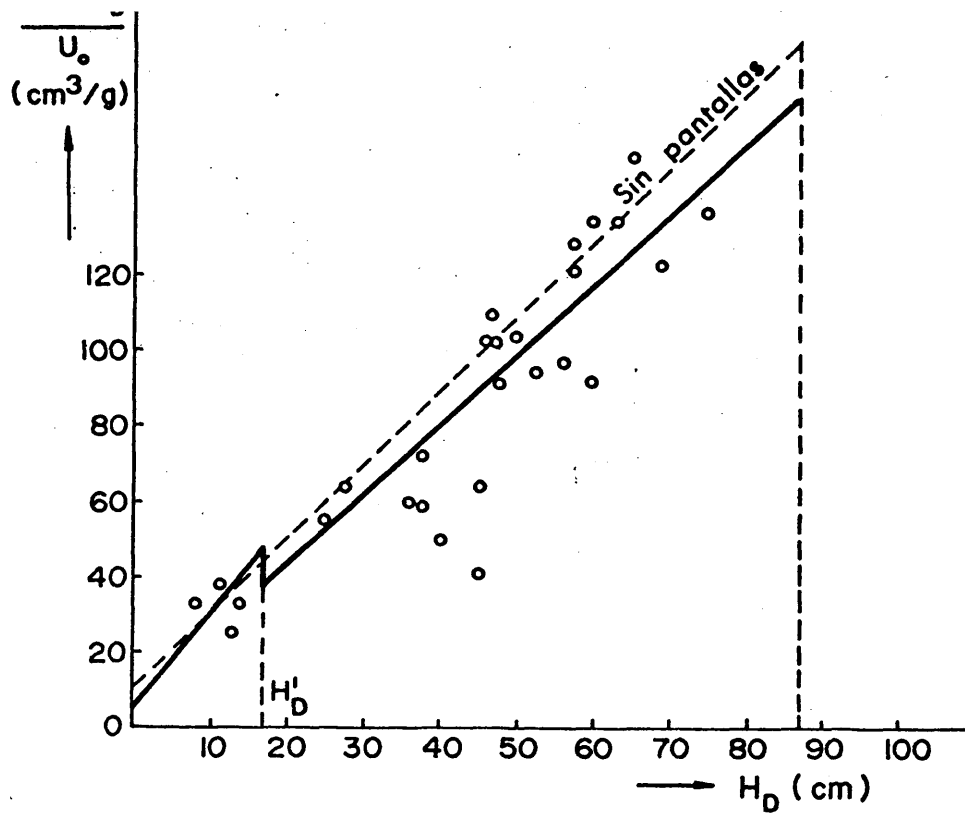


Fig. 39.- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 6.

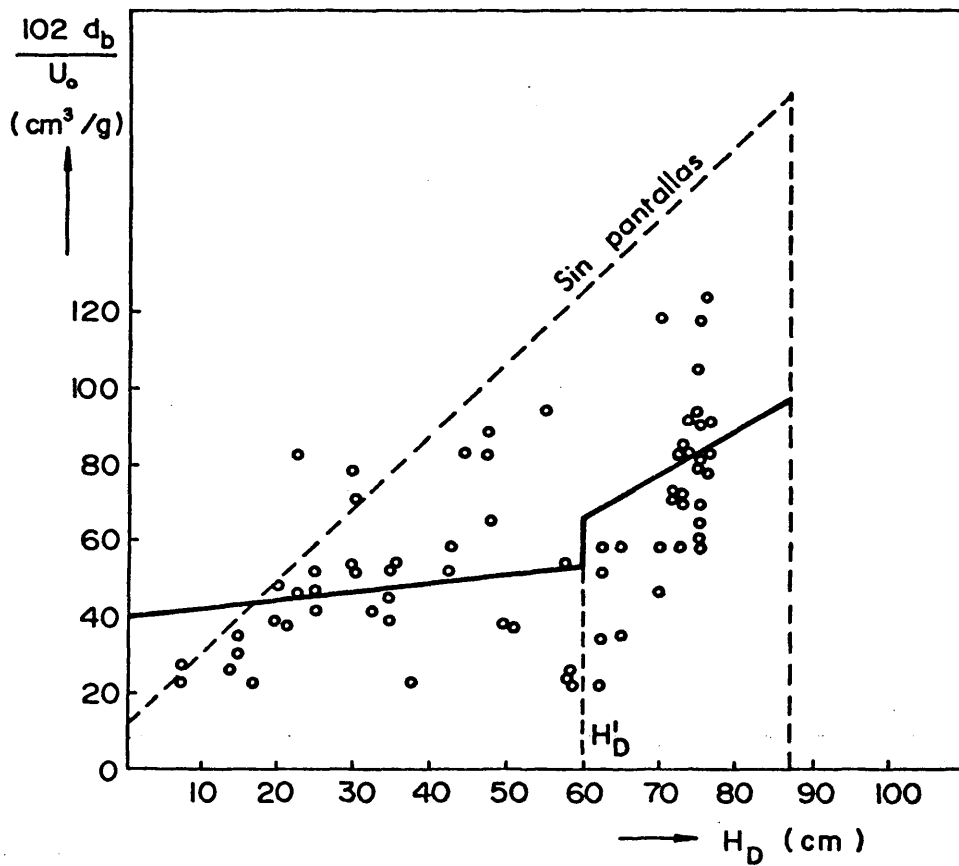


Fig. 40.- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 7.

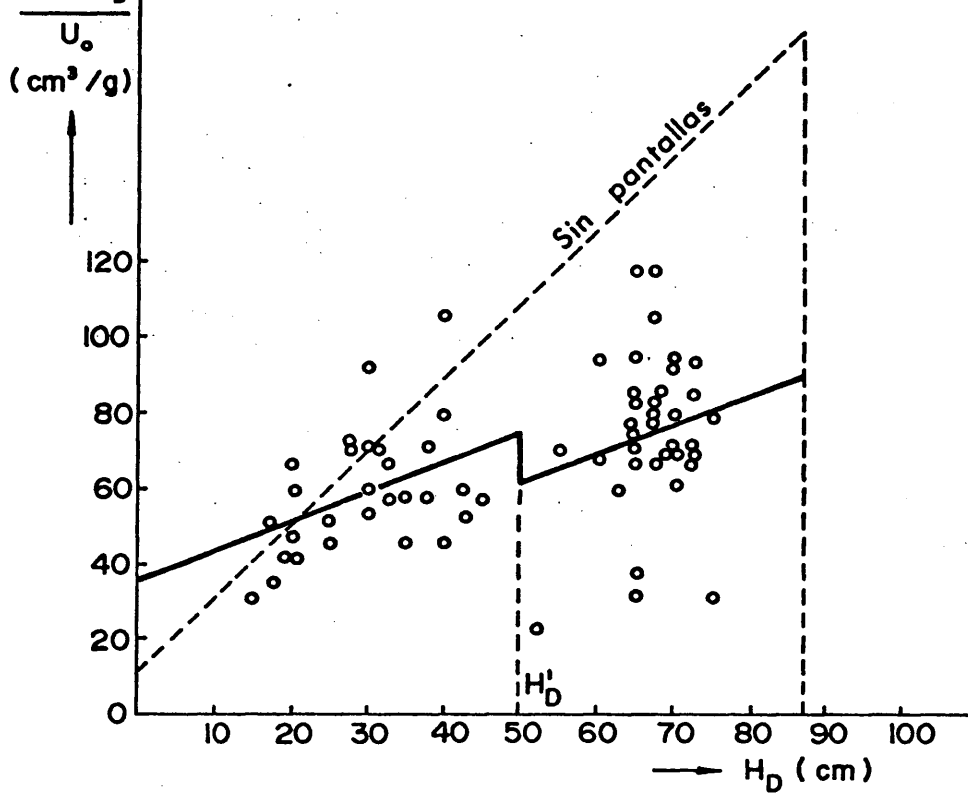


Fig. 41 .- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 8.

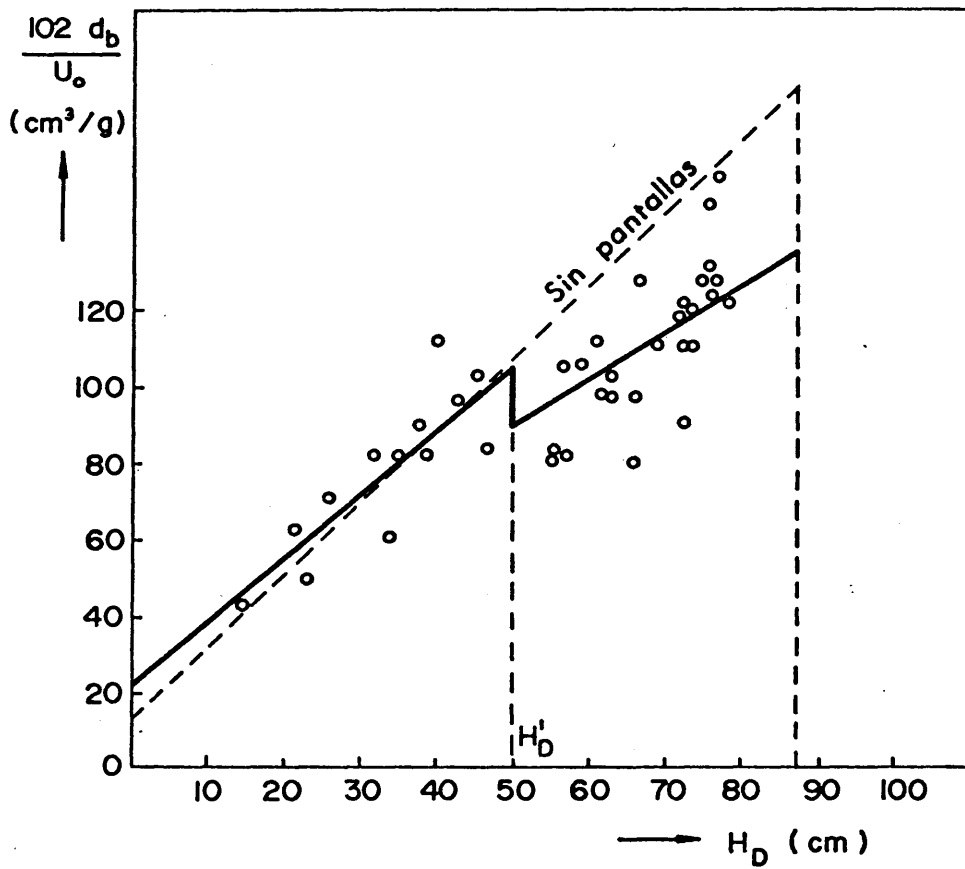


Fig. 42 .- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 9.

Pantallas de dos filas de cilindros.- En la serie de figuras que va de la 43 a la 48 se muestran las distribuciones de tamaños de burbuja en el lecho con las pantallas 10, 11, 12, 13 14 y 15.

Se tomó una altura media del lecho, H_f , de 90 cm, correspondiente a una velocidad reducida de trabajo igual a 2, valor medio de la serie de velocidades reducidas empleadas.

La serie de ensayos tenía por objeto estudiar la influencia de la separación vertical entre las dos filas de cilindros. El punto medio entre las dos filas se mantenía aproximadamente igual a $0,55 H_f$ de altura, es decir a unos 50 cm de distancia al distribuidor.

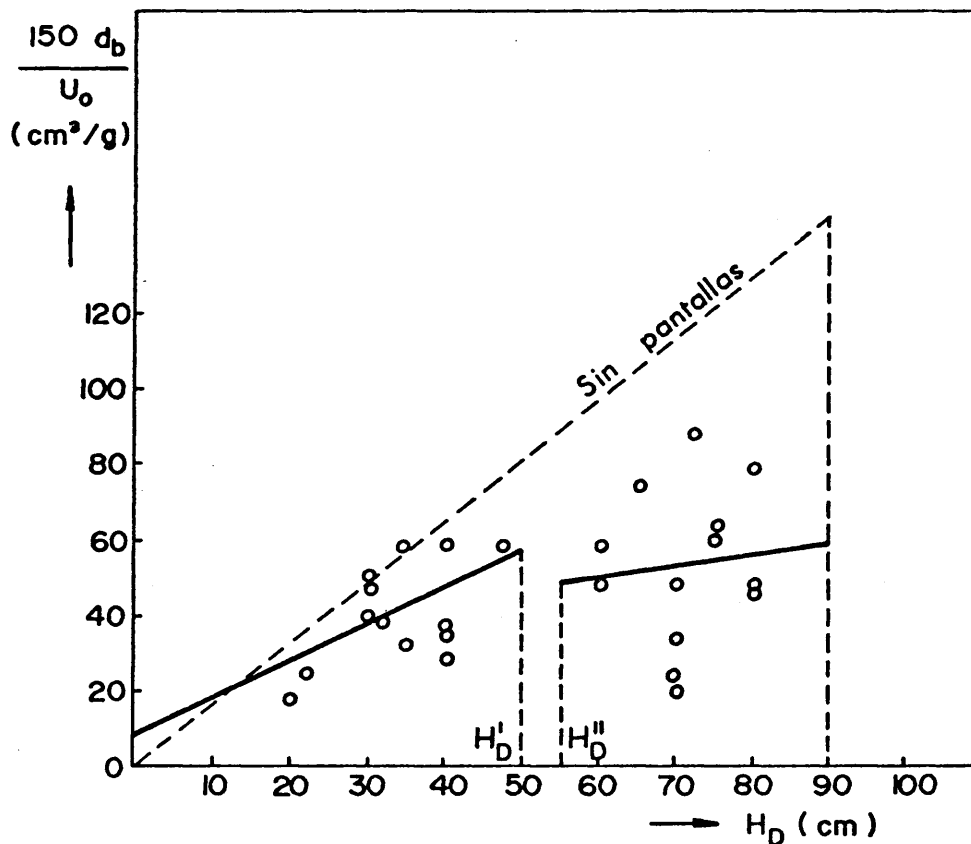


Fig. 43 .- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 10.

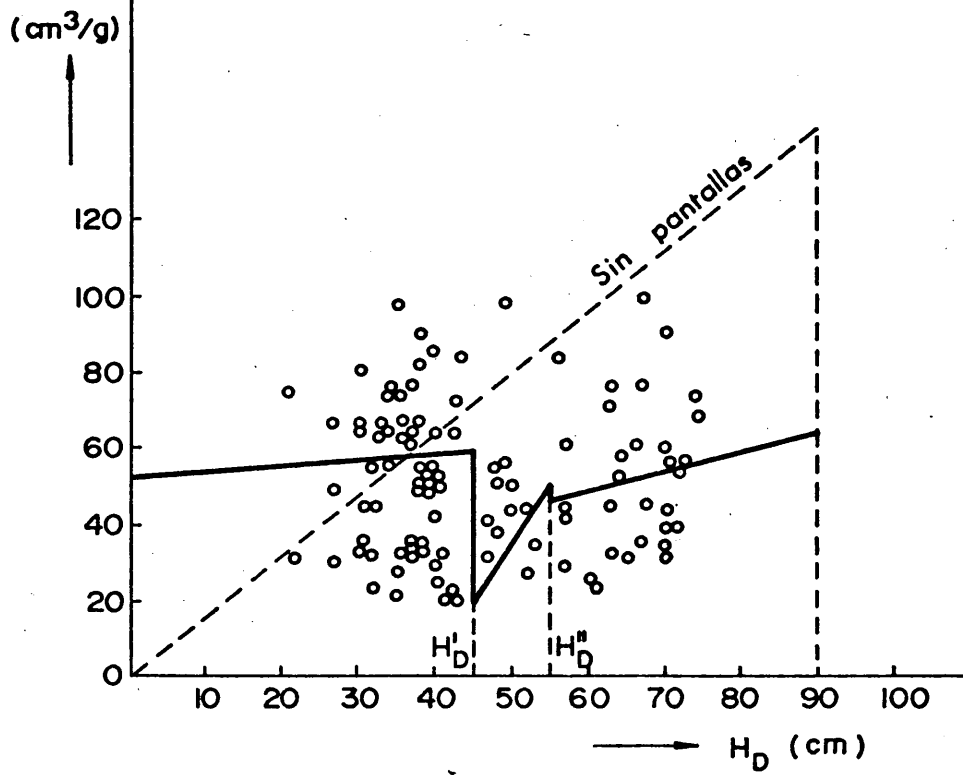


Fig. 44 .- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla II .

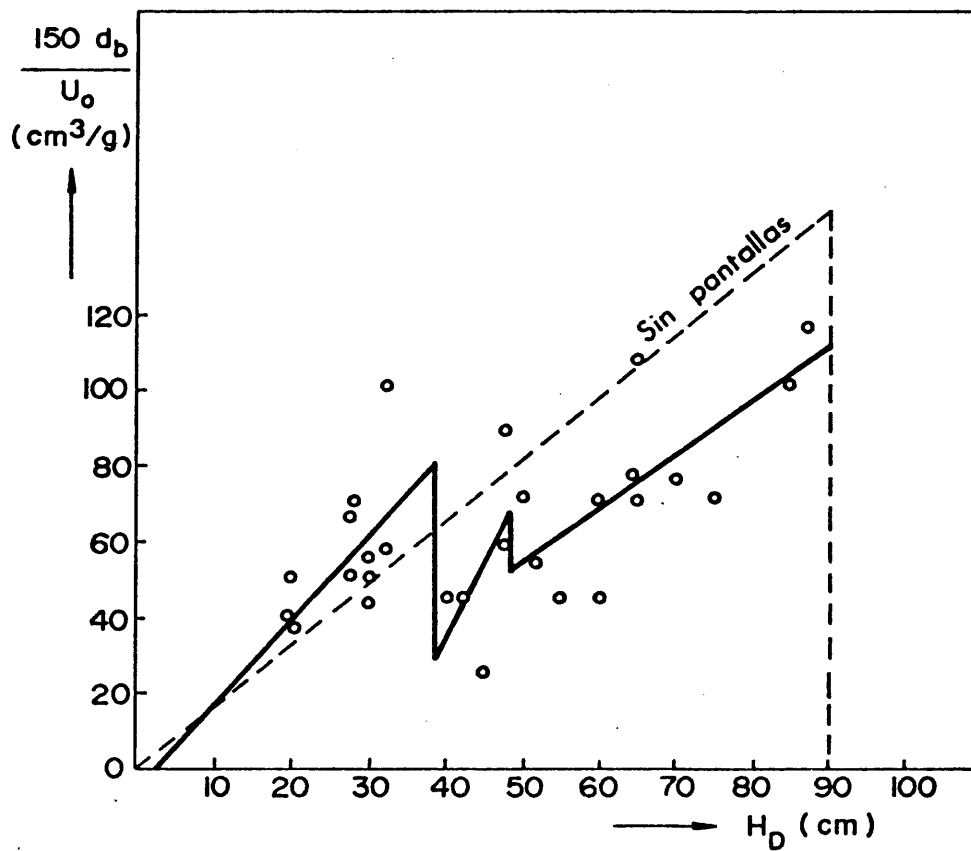


Fig. 45 .- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 12 .

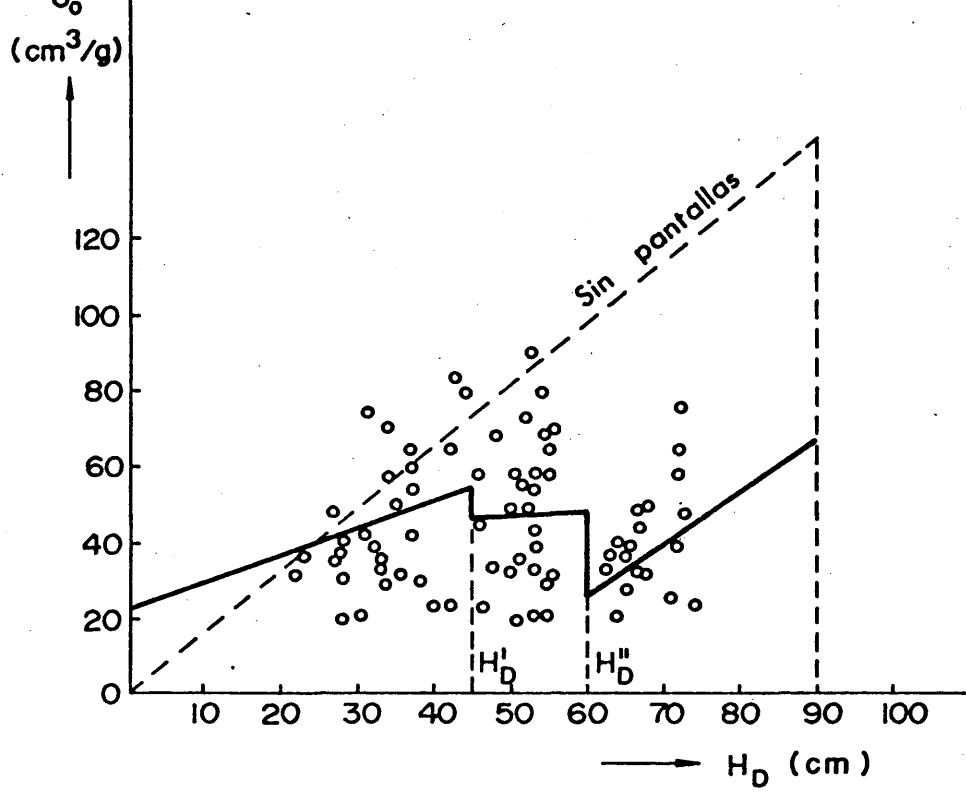


Fig. 46 .- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 13.

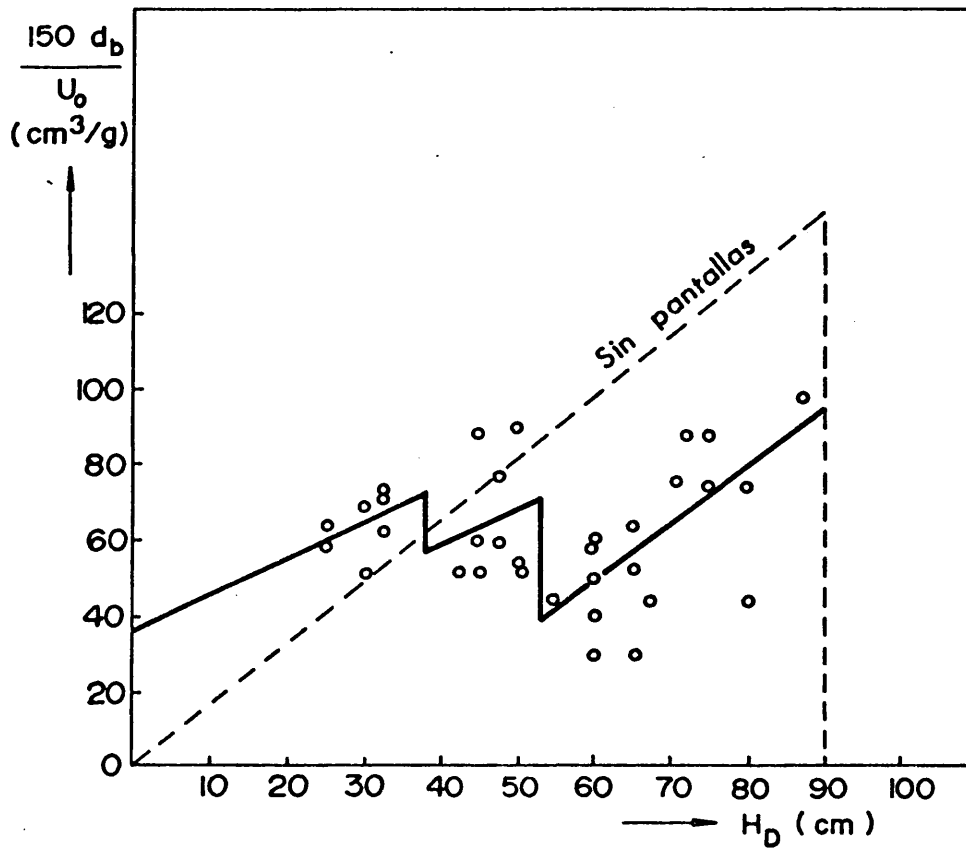


Fig. 47 .- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 14.

Pantallas de tres filas de cilindros..- En la serie de figuras que va de la 49 a la 51 se muestran las distribuciones de tamaños de burbuja en el lecho apantallado con las pantallas 16, 17 y 18.

La altura media del lecho se tomó igual a 90 cm, altura correspondiente a una velocidad reducida de trabajo igual a 2, valor medio de la serie de velocidades reducidas empleadas.

Esta serie de ensayos tenía por objeto estudiar la influencia de la separación vertical entre las dos filas.

Las tres pantallas tenían la fila central situada a unos 50 cm de altura, variándose la distancia vertical de las otras dos.

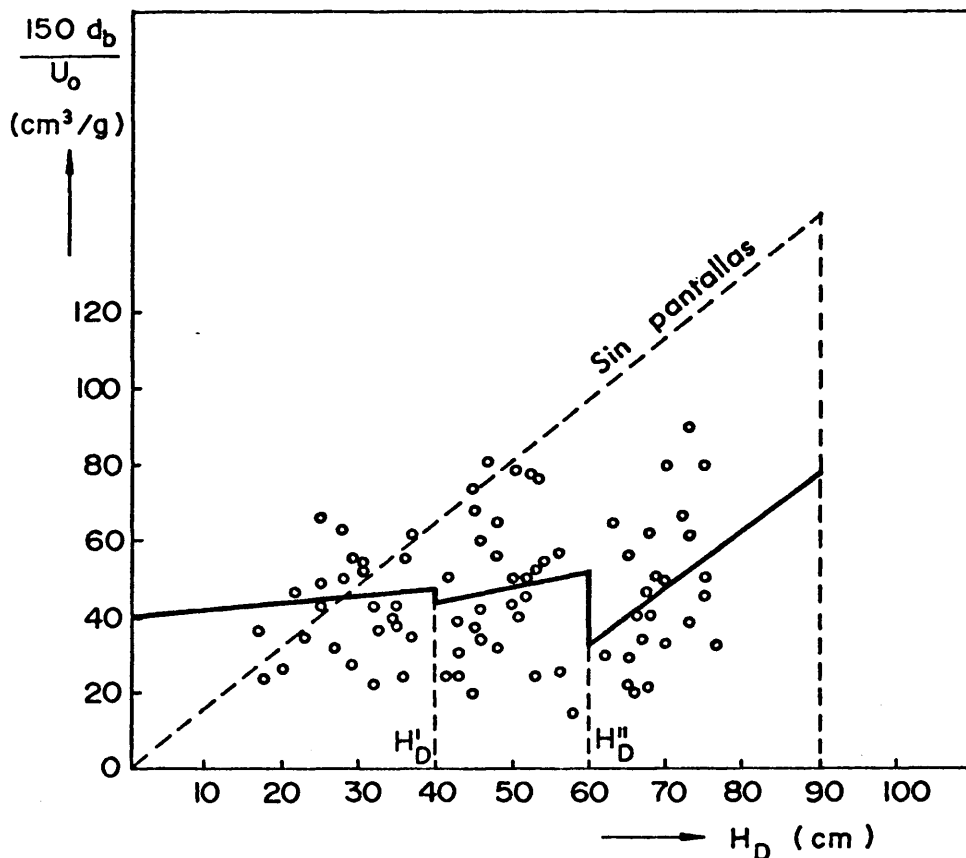


Fig. 48 .- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 15.

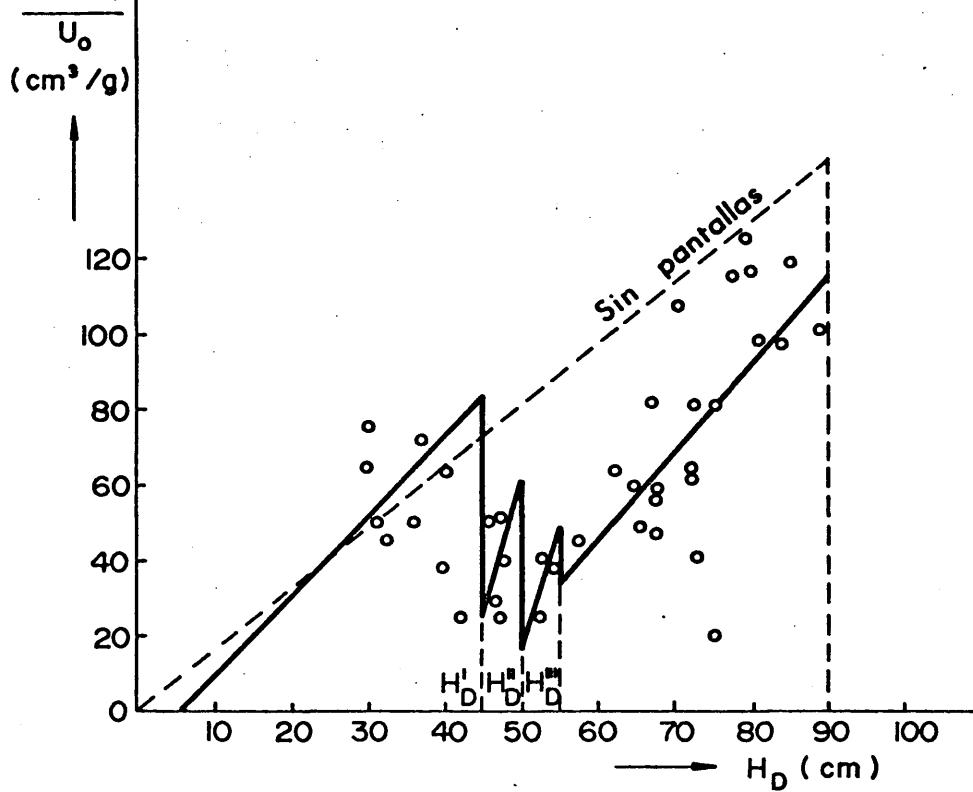


Fig. 49 .- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 16.

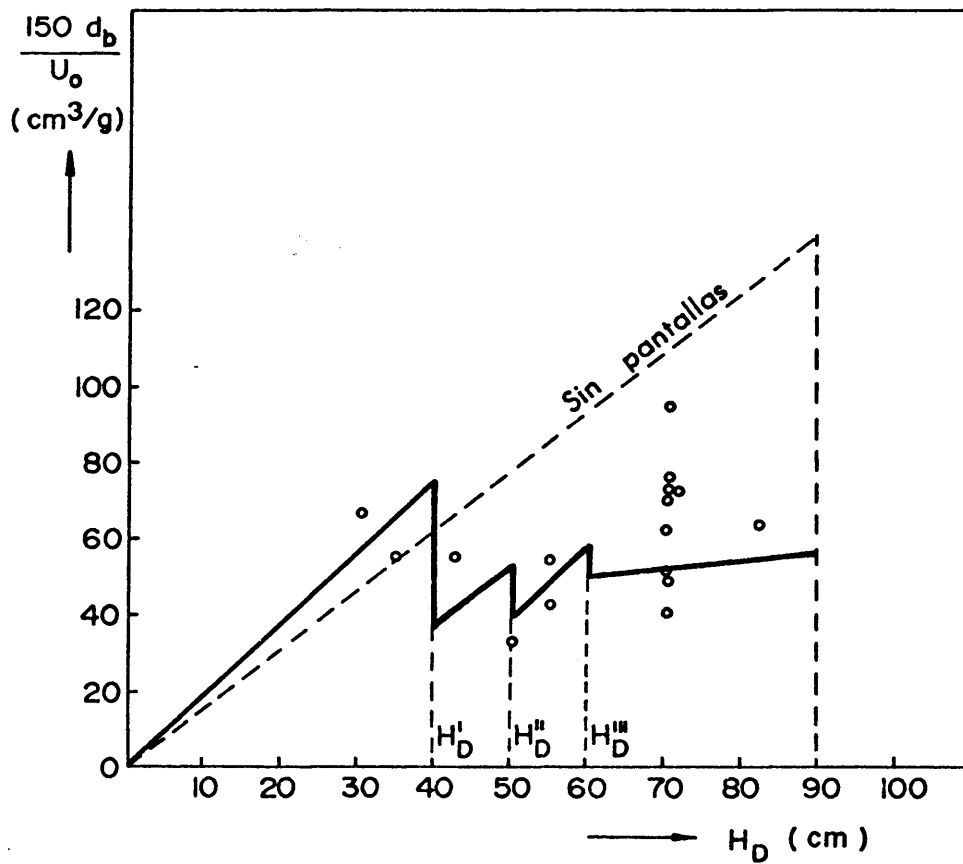


Fig. 50 .- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 17.

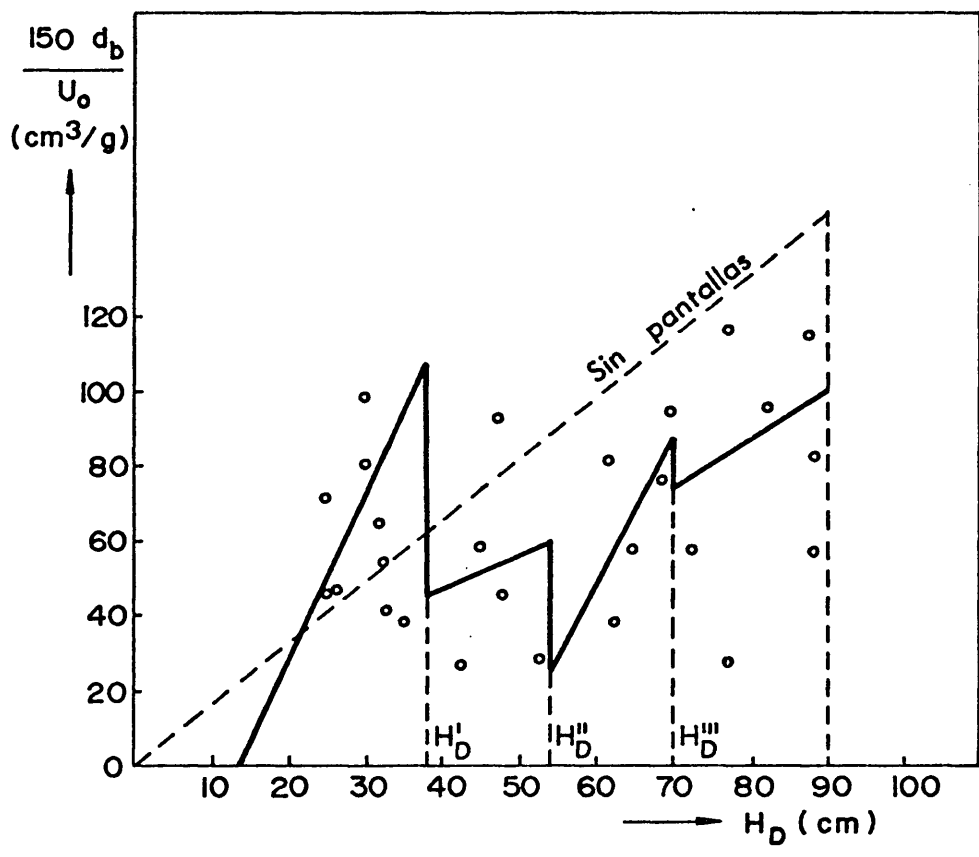


Fig. 51 .- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho con la pantalla 18.

5.3.- TAMAÑO DE BURBUJA MEDIO

Los modelos más realísticos de lecho fluidizado (53) sin pantallas deben tener en cuenta la distribución de tamaños de burbuja a lo largo del lecho. Sin embargo, (2) hay modelos que, considerando un tamaño de burbuja medio, constante a lo largo de todo el lecho, permiten predecir con gran aproximación muchas de las propiedades del lecho fluidizado. La suposición de un tamaño de burbuja medio puede hacerse, sobre todo, en lechos con pantallas que permitan controlar el tamaño de burbuja.

En este trabajo se ha calculado el tamaño de burbuja medio a partir de las representaciones del parámetro $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$ frente a H_D . El método de cálculo consiste en hallar el valor medio de dicho parámetro, con lo cual, y conociendo el tamaño de partícula, la densidad fluidodinámica del sólido y la velocidad reducida de trabajo, se obtiene el tamaño de burbuja medio según la ecuación:

$$\bar{d}_b = \left(d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o \right) \cdot \frac{\rho_s d_p U_o}{U_{mf}} \quad 22.$$

En el lecho sin pantallas se toma como valor medio del parámetro $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$ al correspondiente a una altura $H_D = 1/2 H_f$, figura 52-a.

En el lecho con una pantalla determinada se toman valores medios del parámetro $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$ en cada tramo (distribución)

buidor-primera fila, fila-fila, y última fila-superficie del lecho) y se halla luego el valor medio de éstos. En la figura 52-b se muestra un ejemplo que deja aclarado este cálculo. El valor del tamaño de burbuja medio se calcula a partir de ese valor medio y según la ecuación 22.

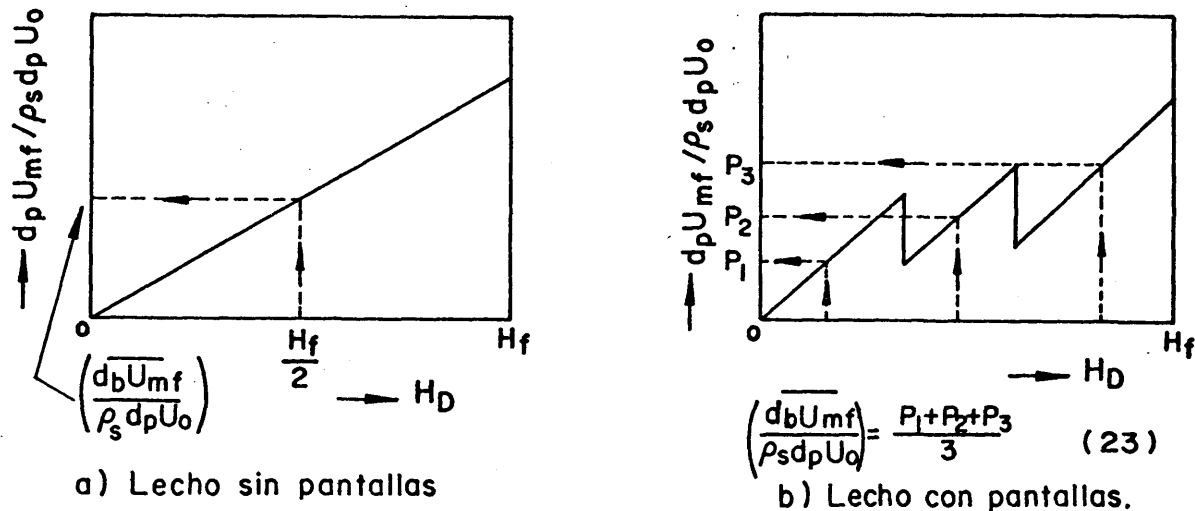
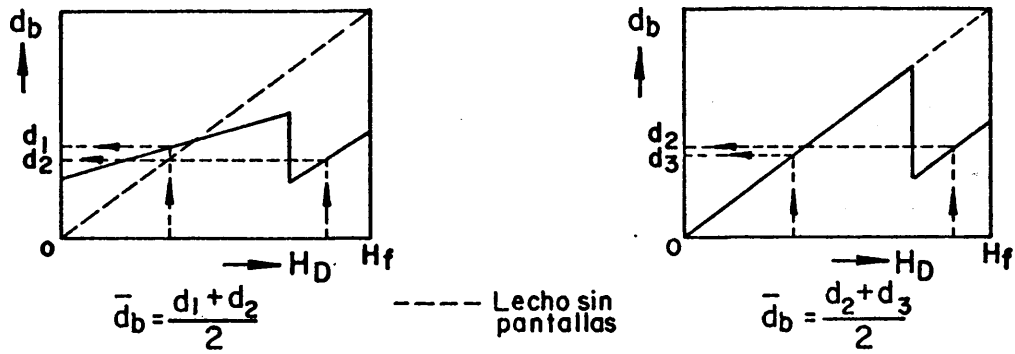


Fig. 52— Ejemplos de cálculo del tamaño de burbuja medio en lechos fluidizados

En la tabla XII se relacionan los valores medios experimentales del parámetro $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_0$ en el lecho y en la tabla XIII los valores de tamaños de burbuja medios obtenidos a partir de los anteriores según el método descrito más arriba. Para todos los cálculos se consideró una altura del lecho, H_f , correspondiente a la que éste tenía bajo una velocidad reducida de trabajo igual a 2, velocidad media de las empleadas ($1,5 \leq U_R \leq 2,5$).

Los valores señalados con m.c.2 y K.m.c. provienen del sistema de ajuste de los puntos experimentales. En el caso m.c.2 se ajustaron todos los tramos por mínimos cuadrados, fi

gura 53-a y en el caso K.m.c. se ajustó el primer tramo como si fuera idéntico al del lecho sin pantallas, figura 53-b.



a) Ajuste m.c. 2

b) Ajuste K.m.c.

Fig. 53 — Ejemplos de cálculo del tamaño de burbuja medio según el sistema de ajuste de la correlación

$$d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_0 \text{ vs. } H_D$$

TABLA XII.- Valores medios del parámetro $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$

LECHO (&)	PANTALLA	$d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$ (cm ³ /g)	
		m.c.2	K.m.c.
B	Sin pant.	96,0	96,0
C	Sin pant.	72,0	72,0
B	1	68,0	69,5
B	2	62,5	68,5
B	3	52,3	58,5
B	4	59,3	65,3
B	5	55,5	61,0
B	6	65,5	65,8
B	7	64,5	75,5
B	8	64,5	67,0
B	9	88,5	86,5
C	10	39,0	41,3
C	11	49,3	42,7
C	12	55,0	52,3
C	13	44,0	44,0
C	14	60,7	52,6
C	15	49,0	45,0
C	16	46,0	46,0
C	17	47,5	45,5
C	18	53,8	55,3

(&) Ver tabla IV

TABLA XIII.- Tamaños de burbuja medios

(Se han calculado para $U_R = U_o / U_{mf} = 2$)

PANTALLA	d_b (cm.)	
	m.c.2	K.m.c.
Sin pant. (†)	8,50	8,50
Sin pant. (£)	6,35	6,35
1	6,00	6,13
2	5,52	6,04
3	4,62	5,16
4	5,23	5,76
5	4,90	5,38
6	5,78	5,81
7	5,69	6,66
8	5,69	5,91
9	7,80	7,64
10	3,75	3,96
11	4,37	3,75
12	4,90	4,67
13	3,93	3,87
14	5,41	4,70
15	4,35	4,01
16	4,06	4,06
17	4,03	3,72
18	4,70	4,90

(†) Lecho B

(£) Lecho C

5.4.- EXPANSION DEL LECHO

De acuerdo con las conclusiones extraídas de los experimentos en el lecho sin pantallas, apartado 4.4, se representaron los puntos experimentales según las ecuaciones 7 y 12. En la serie de figuras que comprende de la 54 a la 57 se muestra la variación de la expansión del lecho con la velocidad reducida de trabajo con las pantallas 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 17 y 18. Las expansiones del lecho con las restantes pantallas no se pudieron medir por fallos ocurridos en las tomas fotográficas.

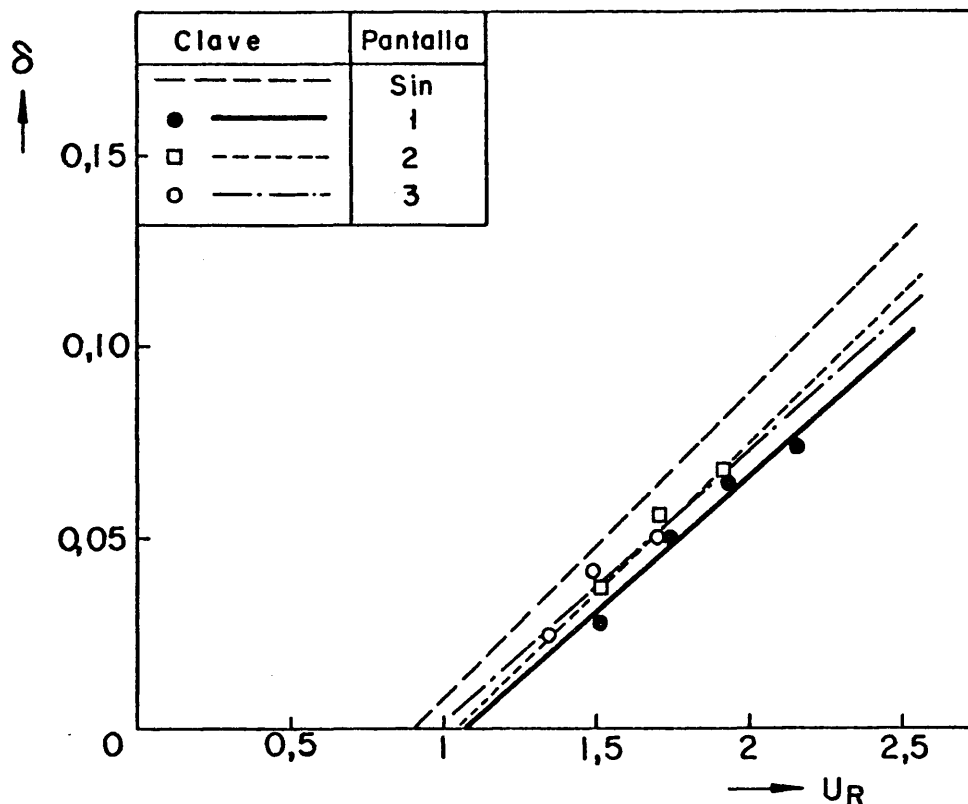


Fig. 54— Expansión del lecho con las pantallas 1, 2 y 3

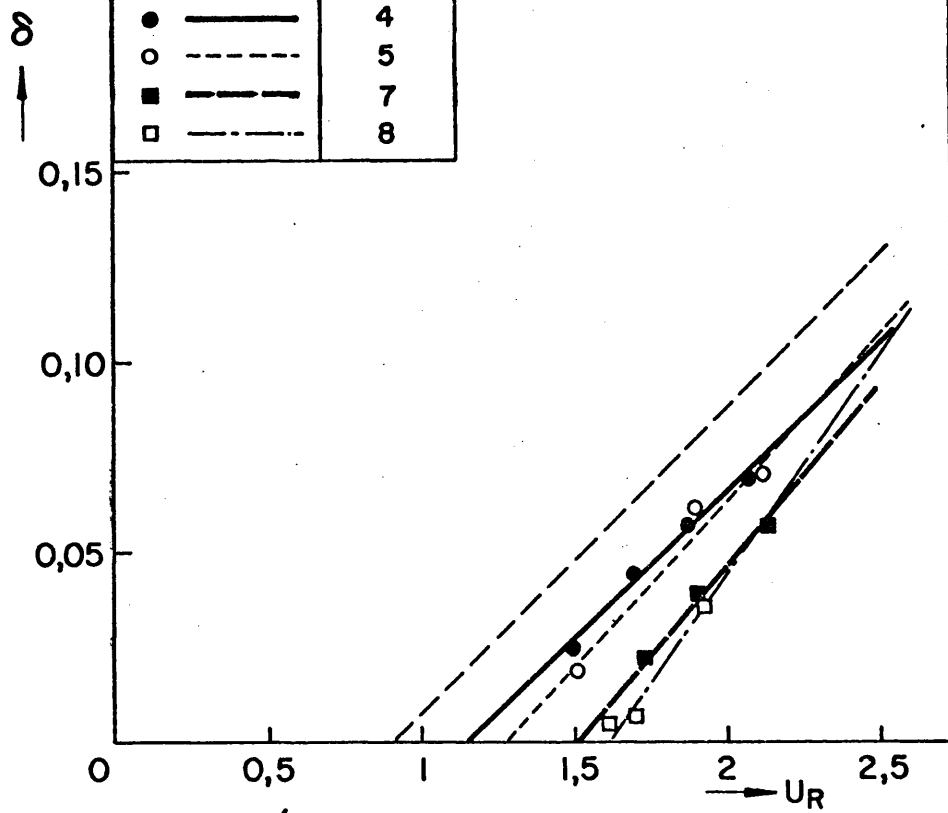


Fig. 55— Expansión del lecho con las pantallas 4, 5, 7, y 8

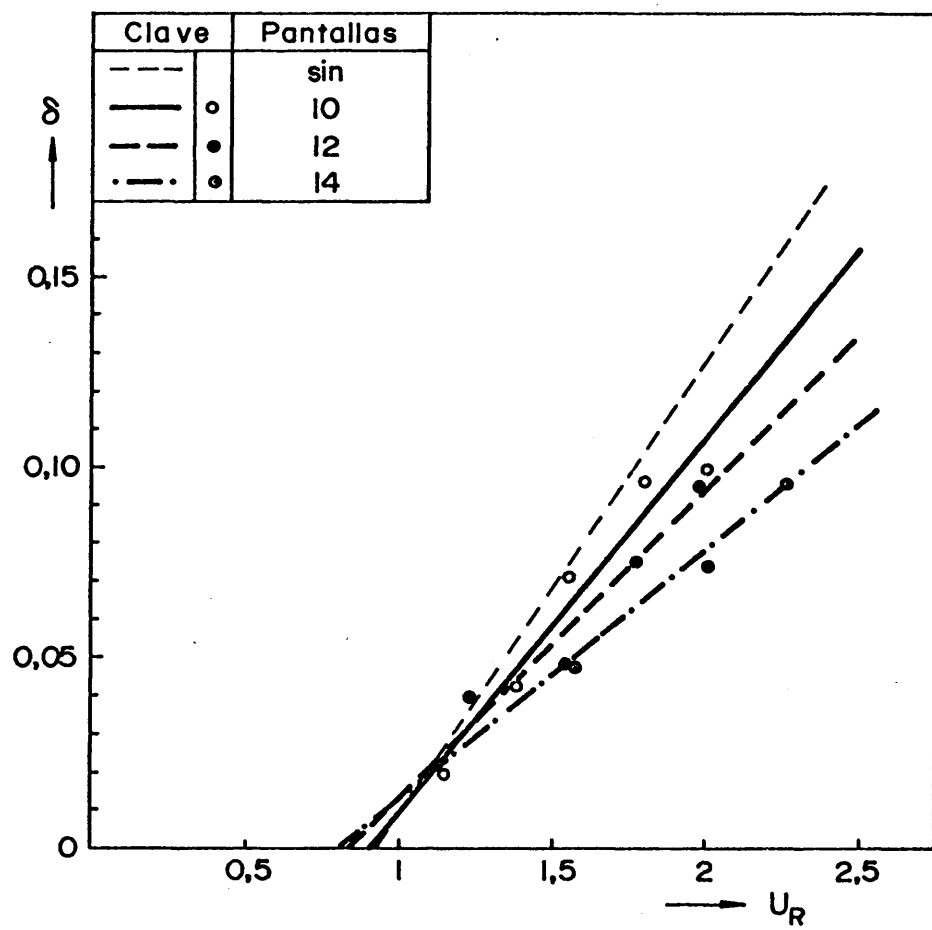


Fig. 56.— Expansión del lecho con las pantallas 10, 12 y 14.

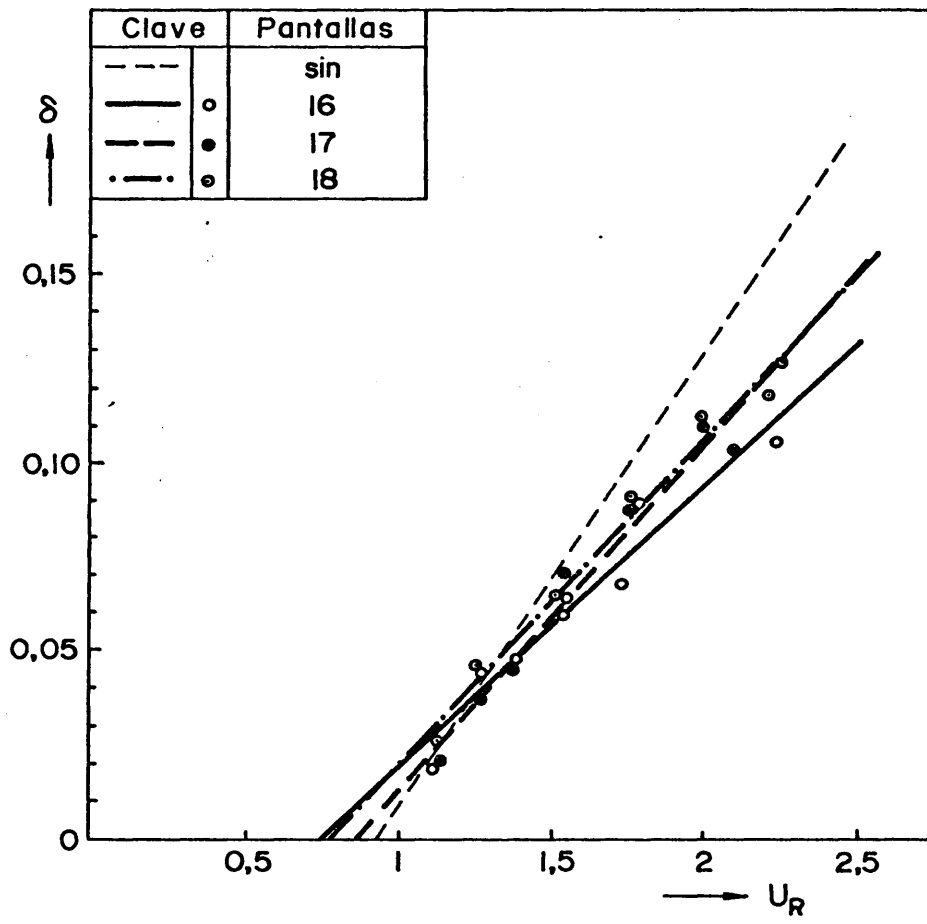


Fig. 57.- Expansión del lecho con las pantallas 16, 17 y 18.

5.5.- EFICACIA DE LAS PANTALLAS

Cualitativamente la eficacia de una pantalla se puede definir como su capacidad para variar el tamaño de las burbujas.

A lo largo del desarrollo del presente trabajo sugieron diversas formas de calcular y definir cuantitativamente la eficacia de una pantalla; el tratamiento final se hizo utilizando solamente eficacias de choque y eficacias globales, que eran las eficacias de utilización más sencilla y con mayores posibilidades de correlación con las magnitudes más importantes del sistema.

5.5.1.- Definiciones

a) Eficacia en un punto.- Considerando el ejemplo que se muestra en la figura 58, se define la eficacia de una pantalla en un punto del lecho situado por encima de ella (a una distancia H_{D1} del distribuidor) como:

$$E_{H_{D1}} = \frac{(d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o)_{\text{sin pant.}} - (d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o)_{\text{con pant.}}}{(d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o)_{\text{sin pant.}}} \quad 24.$$

es decir:

$$E_{H_{D1}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}}$$

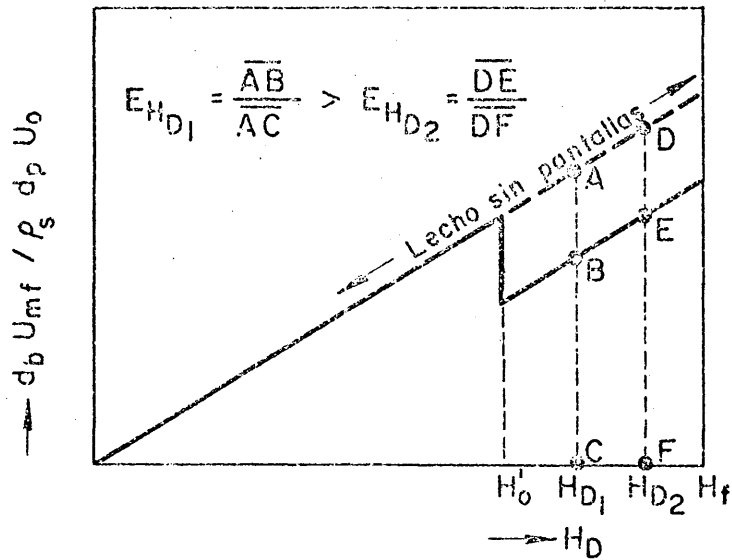


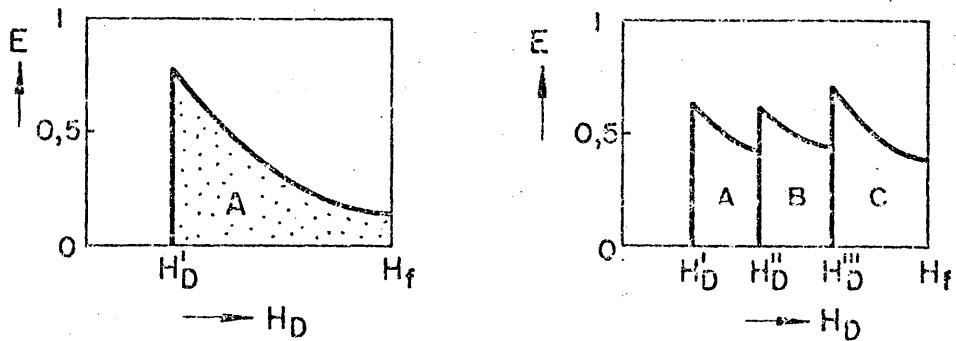
Fig. 58 — Ejemplo de cálculo de la eficacia en un punto.

Esta eficacia puntual tiene un valor máximo que es el correspondiente al centro mismo de la pantalla, es decir para una altura $H_D = H'_D$; por la importancia de esta eficacia en este lugar, se la denominó eficacia de choque. Más adelante se desarrolla más ampliamente este tipo de eficacia.

A medida que se toman puntos más lejanos a la pantalla, la eficacia puntual va disminuyendo de valor, hasta hacerse cero cuando se toma un punto hipotético en el infinito.

Para dar un sentido físico a esta eficacia se definió una nueva eficacia, la llamada eficacia integrada.

b) Eficacia integrada,— Si se representan los valores de la eficacia puntual en función de la altura, se obtienen curvas del tipo de las representadas en la figura 59.



A) Pantalla de una fila de cilindros

B) Pantalla de tres filas de cilindros

Fig. 59 -- Ejemplos de cálculo de la Eficacia Integrada.

A partir de estas representaciones se define la eficacia integrada como:

1 fila de cilindros:

$$E_T = \frac{\int_{H_D^i}^{H_f} E dH_D}{H_f} = \frac{\text{área "A"}}{H_f} \quad 25.$$

n filas de cilindros:

$$E_T = \frac{\int_{H_D^i}^{H_D^{ii}} E dH_D + \int_{H_D^{ii}}^{H_D^{iii}} E dH_D + \dots + \int_{H_D^{in}}^{H_f} E dH_D}{H_f} = \frac{\text{área "A+B+C"}}{H_f} \quad 26.$$

El intervalo de variación de la eficacia integrada es de cero a uno. El valor nulo sería el de una pantalla que no ejercer ninguna influencia sobre el tamaño de burbuja (en reali

dad sería la ausencia de pantalla u otro objeto cualquiera dentro del lecho). El valor 1 se obtendría con una pantalla hipotética que impidiera completamente la formación de burbujas.

c) Eficacia de choque.— En realidad, como se ha dicho antes, la eficacia de choque es la eficacia puntual en el punto de colocación de la pantalla, pero la importancia que tiene este punto preciso aconsejó la creación de una eficacia específica para él. En la figura 60 se muestra un ejemplo de cálculo de la eficacia de choque de una fila de cilindros situada a una altura H'_D .

Esta eficacia varía entre cero (pantalla inexistente) y uno (pantalla formada por una placa distribuidora de perforaciones muy pequeñas o de material poroso).

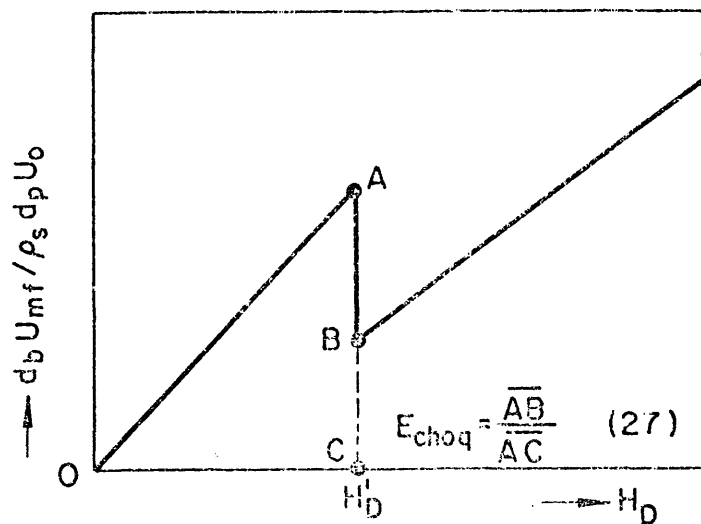


Fig. 60 — Ejemplo de cálculo de la eficacia de choque.

d) Eficacia global.- Esta eficacia se creó como solución al problema que presentaba la utilización de eficacias puntuales e integradas, ambas de cálculo muy engorroso.

Sea una representación de $d_b U_{mf} / \rho_s d U_o$ vs. H_D correspondiente a la distribución de tamaños de burbuja en un lecho fluidizado con pantallas; en la figura 61 se muestra un ejemplo consistente en dicha representación para un lecho con una pantalla formada por dos filas de cilindros horizontales situadas a H'_D y H''_D de altura. Se define la eficacia global como:

$$E_G = \frac{\int_0^{H_f} \left(\frac{d_b U_{mf}}{\rho_s d U_o} \right)_{\text{sin pant.}} dH_D - \int_0^{H_f} \left(\frac{d_b U_{mf}}{\rho_s d U_o} \right)_{\text{con pant.}} dH_D}{\int_0^{H_f} \left(\frac{d_b U_{mf}}{\rho_s d U_o} \right)_{\text{sin pant.}} dH_D} \quad 28.$$

que en el ejemplo de la figura 61 sería:

$$E_G = \frac{\text{área } A_1}{\text{área } (A_1 + A_2)} \quad 29.$$

Según esta definición la Eficacia Global puede variar entre los valores límites de cero y uno. Valdría cero para una pantalla inexistente y valdría uno para una pantalla que lograra eliminar por completo las burbujas.

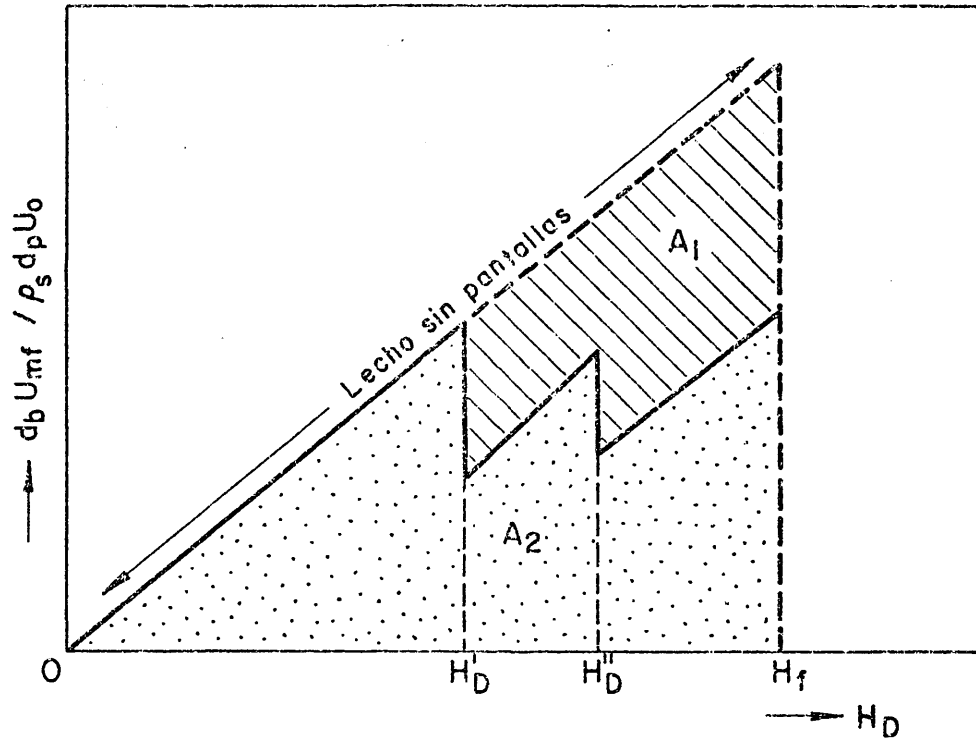


Fig. 61 — Ejemplo de cálculo de eficacia global.

e) Eficacia de expansión.- Esta eficacia representa la disminución de expansión que experimenta un lecho fluidizado por efecto de una pantalla introducida en su interior.

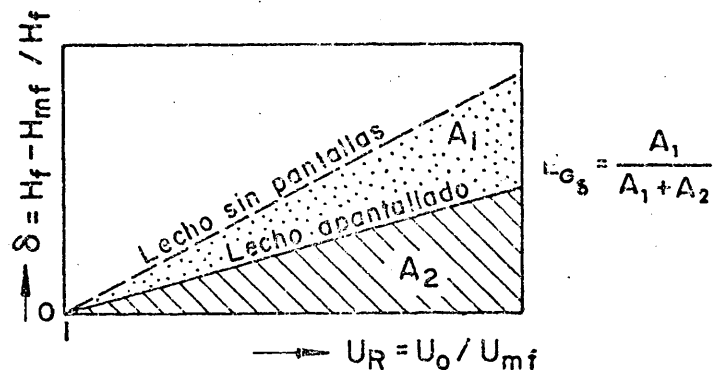


Fig. 62- Ejemplo de cálculo de eficacia de expansión.

Se calcula a partir de representaciones de la expansión del lecho en función de la velocidad reducida de trabajo. A partir del ejemplo de la figura 62, se define la eficacia de expansión como:

$$E_G = \frac{\left(\int_1^{U_R} \delta dU_R \right) \text{ sin pant.} - \left(\int_1^{U_R} \delta dU_R \right) \text{ con pant.}}{\left(\int_1^{U_R} \delta dU_R \right) \text{ sin pant.}} \quad 30.$$

que es lo mismo que:

$$E_G = \frac{\text{área } A_1}{\text{área } (A_1 + A_2)} \quad 31.$$

Esta eficacia puede variar entre cero (pantalla inexistente) y uno (pantalla que impidiera completamente la expansión sobre el valor de mínima fluidización).

5.5.2.- Resultados experimentales

En las tablas XIV, XV y XVI se relacionan las eficacias de choque, globales y de expansión de las pantallas ensayadas. Los valores señalados con m.c.2. y K.m.c provienen del sistema de ajuste empleado (ver apartado 5.2.1.). El sistema m.c.2 se basa en ajustar todos los puntos experimentales de $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$ vs. H_D a rectas por mínimos cuadrados, figura 63-a. El sistema K.m.c se basa en ajustar el primer tramo, desde el distribuidor a la primera fila de cilindros, según la recta correspondiente al lecho sin pantallas, figura 63-b.

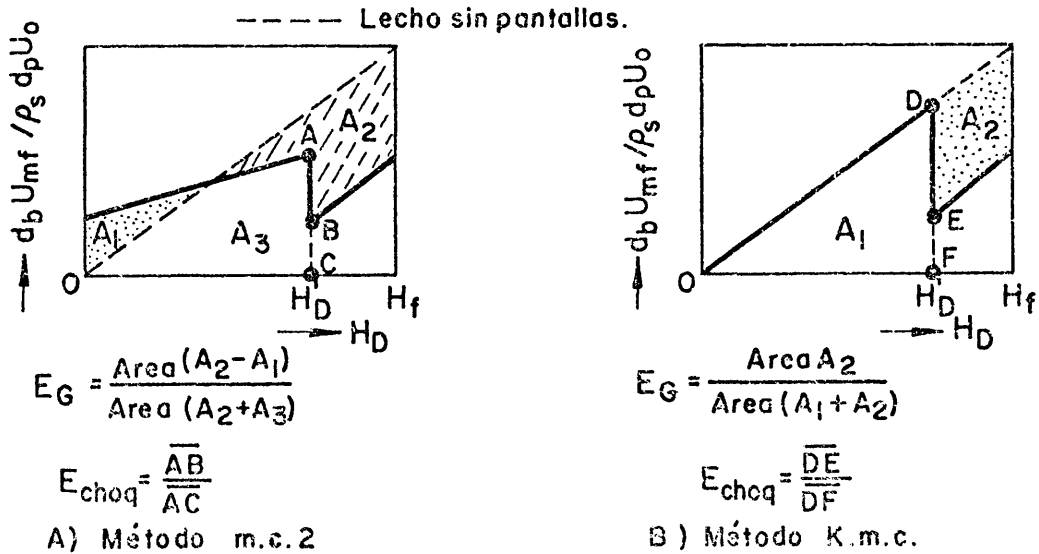


Fig. 63 — Ejemplos de cálculos prácticos de eficacias de choque y globales.

TABLA XIV..- Eficacia de las pantallas formadas por una fila de cilindros.

PANTALLA	E_G		E_G	E_{choq}	
	m.c.2.	K.m.c.		m.c.2.	K.m.c.
1	0,298	0,270	0,296	0,360	0,551
2	0,360	0,288	0,205	0,284	0,497
3	0,448	0,364	0,185	0,102	0,490
4	0,314	0,295	0,325	0,621	0,511
5	0,342	0,299	0,368	0,250	0,400
6	0,310	0,300	--	0,208	0,136
7	0,390	0,229	0,486	--	0,470
8	0,333	0,304	0,522	0,189	0,444
9	0,120	0,130	--	0,150	0,151

TABLA XV.- Eficacias de las pantallas formadas por dos filas de cilindros.

PANTALLA	E_G		E_G	E_{choq}		
	m.c.2	K.m.c.		1ª fila		2ª fila
				m.c.2	K.m.c.	m.c.2
10	0,439	0,385	0,145	0,456	--	--
11	0,254	0,400	--	0,667	0,722	0,077
12	0,191	0,236	0,238	0,650	0,560	0,239
13	0,420	0,436	--	0,148	0,354	0,449
14	0,159	0,298	0,367	0,222	0,081	0,429
15	0,329	0,401	--	0,063	0,308	0,385

TABLA XVI.- Eficacias de las pantallas formadas por tres filas de cilindros.

PANTALLA	E_G		E_G	E_{choq}			
	m.c.2	K.m.c.		1ª fila		2ª fila	3ª fila
				m.c.2	K.m.c.	m.c.2	m.c.2
16	0,294	0,295	0,221	0,707	0,666	0,767	0,277
17	0,362	0,405	0,173	0,732	0,274	0,286	0,267
18	0,280	0,303	0,129	0,593	0,258	0,600	0,167

5.6.- CORRELACIONES OBTENIDAS

5.6.1.- Variación de la eficacia de choque con el parámetro de choque. Cálculo de tamaños de burbuja

De las definiciones de eficacia de choque y parámetro de choque, apartados 5.1 y 5.5.1, se puede deducir que cuanto mayor sea una burbuja en el momento del choque contra una fila de cilindros, o menor sea la amplitud de paso de ésta, mayor debe ser la rotura que experimente aquélla. Esto se comprobó representando la eficacia de choque de cada fila de cilindros frente al parámetro de choque respectivo, figura 64.

Los valores de los parámetros de choque de las pantallas empleadas, tablas XVII, XVIII y XIX, fueron calculados siguiendo el método descrito en el apartado 5.2.1. Las eficacias de choque se relacionan en las tablas XIV, XV y XVI. Al representar graficamente se escogieron siempre pares de valores calculados por el mismo método de ajuste, m.c.2 ó K.m.c.

A pesar de la dispersión de los puntos experimentales, figura 64, se consideró aceptable el ajuste a una recta en el intervalo de valores estudiado (20 a 100 cm²/g) del parámetro de choque. La ecuación de la recta así obtenida es:

$$E_{\text{choq}} = 6,66 \cdot 10^{-3} \frac{(d_b)_{\text{choq}} U_{mf}}{\rho_s d_p U_o \bar{S}_h} \quad 32.$$

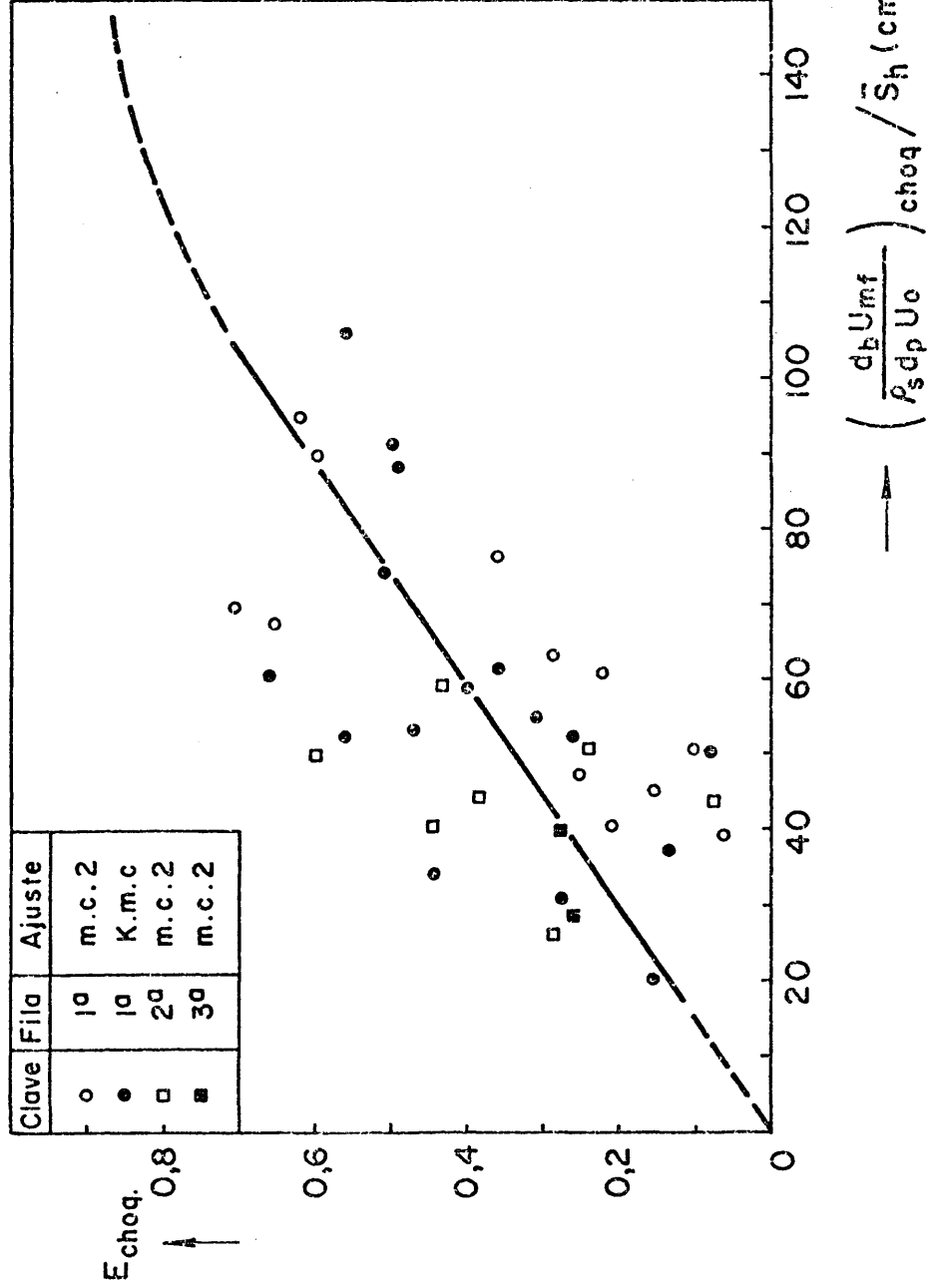


Fig. 64 — Relación entre la eficacia de choque y el parámetro de choque.

Aunque no hay valores experimentales que lo confirmen, se ha estimado que debe haber un aumento menos pronunciado de la eficacia de choque a partir de cierto valor del parámetro de choque ya que no resulta lógico que para un valor finito de este parámetro (en este caso $\approx 140 \text{ cm}^2/\text{g}$) la eficacia de choque sea la unidad. Por otro lado, se ha estimado que la recta de variación determinada debe pasar por el origen de coordenadas, ya que para valores muy pequeños del parámetro de choque (burbujas muy pequeñas en comparación con la amplitud de paso de la pantalla) la eficacia de choque debe ser también muy pequeña.

TABLA XVII.- Valores del parámetro de choque de las pantallas de una fila de cilindros.

$$\text{Parámetro de choque} = (d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o)_{\text{choq}} / \bar{S}_h \quad (\text{cm}^2/\text{g})$$

PANTALLA	Parámetro de choque	
	m.c.2	K.m.c.
1	76,2	106,6
2	63,5	91,6
3	50,8	88,1
4	95,0	74,5
5	47,5	59,3
6	40,7	37,3
7	21,2	53,5
8	23,4	34,1
9	19,8	20,2

TABLA XVIII.- Valores del parámetro de choque de las -
pantallas de dos filas de cilindros

$$\text{Parámetro de choque} = (d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o)_{\text{choq}} / \bar{S}_h \text{ (cm}^2/\text{g)}$$

PANTALLA	Parámetro de choque	
	m.c.2.	K.m.c.
(£)		
10-I	48,3	67,8
10-II	--	--
11-I	50,8	61,0
11-II	44,0	--
12-I	67,8	52,5
12-II	50,8	--
13-I	45,7	61,8
13-II	40,6	--
14-I	61,0	50,8
14-II	59,3	--
15-I	39,9	55,0
15-II	44,0	--

(£) I indica la fila más cercana al distribuidor, y II la otra.

Nota: Los valores K.m.c. para las segundas filas no son calculables.

TABLA XIX.- Valores del parámetro de choque de las pantallas de tres filas de cilindros.

$$\text{Parámetro de choque} = (d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o)_{\text{choq}} / \bar{S}_h (\text{cm}^2/\text{g})$$

PANTALLA	Parámetro de choque	
	m.c.2	K.m.c.
(&)		
16-I	69,5	61,0
16-II	50,8	--
16-III	39,9	--
17-I	37,0	30,8
17-II	26,0	--
17-III	28,4	--
18-I	90,0	52,5
18-II	50,0	--
18-III	71,2	--

(&) I indica la fila más cercana al distribuidor, II la central y III la más alta.

Nota: Los valores K.m.c. para las filas segunda y tercera no son calculables.

Calculo de tamaños de burbuja.- La relación existente entre eficacia de choque y parámetro de choque, ecuación 32, permite predecir qué tamaño de burbuja habrá, en ciertas condiciones de trabajo, después del choque contra una fila de cilindros.

Sea por ejemplo, un lecho con tres filas de cilindros. La primera, la más cercana al distribuidor, a una altura H'_D ,

y las otras dos a una distancia de S_v y $2S_v$ de ella, respectivamente, S_h es la amplitud de paso de las ordenaciones de cilindros que forman cada fila. Suponiendo un crecimiento de las burbujas tal como el dado por la correlación de Kobayashi, ecuación 4, el tamaño de las burbujas que chocan con tra la primera fila sería:

$$(d_b)_{\text{choq-1ª}} = 1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} H'_D \quad 33.$$

por otro lado, de la definición de la Eficacia de choque, - ecuación 27:

$$E_{\text{choq-1ª}} = \frac{(d_b)_{\text{choq-1ª}} - (d_b)_{\text{tras-1ª}}}{(d_b)_{\text{choq-1ª}}} \quad 34.$$

donde $(d_b)_{\text{choq-1ª}}$ es el tamaño de burbuja en el momento del choque, dado por la ecuación 33, y $(d_b)_{\text{tras-1ª}}$ es el tamaño de las burbujas inmediatamente después de traspasar la fila de cilindros, tamaño que se puede calcular igualando las ecuaciones 32 y 35 y sustituyendo el valor de $(d_b)_{\text{choq-1ª}}$ por el dado por la ecuación 33, es decir:

$$\frac{6,66 \cdot 10^{-3} (d_b)_{\text{choq-1ª}} U_{mf}}{\rho_s d_p U_o \bar{S}_h} = \frac{(d_b)_{\text{choq-1ª}} - (d_b)_{\text{tras-1ª}}}{(d_b)_{\text{choq-1ª}}};$$

$$; \frac{6,66 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} H'_D U_{mf}}{1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} H'_D} =$$

$$= \frac{1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} H'_D - (d_b)_{\text{tras-1}^a}}{1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} H'_D} ;$$

; simplificando,

$$9,33 \cdot 10^{-3} \frac{H'_D}{\bar{S}_h} = 1 - \frac{(d_b)_{\text{tras-1}^a}}{1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} H'_D} ;$$

; y,

$(d_b)_{\text{tras-1}^a} = 1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} H'_D \left(1 - 9,33 \cdot 10^{-3} \frac{H'_D}{\bar{S}_h} \right)$	35.
---	-----

Para calcular el tamaño de burbuja tras el choque con -- la segunda fila hay que tener en cuenta lo siguiente:

El tamaño de las burbujas al llegar éstas a la segunda fila sería el correspondiente a un crecimiento de las burbujas que salieron de la primera fila durante un trecho igual a la separación vertical de las dos filas, S_v . Habría que -- adicionar un segundo sumando, tamaño de las burbujas después de pasar a través de la 1ª fila, de la misma naturaleza que el término d_o de la ecuación 4. En símbolos:

$$(d_b)_{\text{choq-2a}} = 1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} S_v + (d_b)_{\text{tras-1a}} ; \text{ sustituyendo,}$$

$$(d_b)_{\text{choq-2a}} = 1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} S_v +$$

$$+ 1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} H'_D (1-9,33 \cdot 10^{-3} H'_D / \bar{S}_h)$$

simplificando,

36.

$$(d_b)_{\text{choq-2a}} = 1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} \left[S_v + H'_D (1-9,33 \cdot 10^{-3} H'_D / \bar{S}_h) \right]$$

La eficacia de choque de la segunda fila será ahora:

$$E_{\text{choq-2a}} = \frac{(d_b)_{\text{choq-2a}} - (d_b)_{\text{tras-2a}}}{(d_b)_{\text{choq-2a}}} =$$

$$= 6,66 \cdot 10^{-3} \frac{(d_b)_{\text{choq-2a}} U_{mf}}{\rho_s d_p U_o \bar{S}_h}$$

sustituyendo el valor de $(d_b)_{\text{choq-2a}}$ dado por la ecuación 36 y simplificando, se obtiene finalmente:

$$(d_b)_{\text{tras-2a}} = (d_b)_{\text{choq-2a}} \left[1 - 9,33 \cdot 10^{-3} \frac{H'_D}{\bar{S}_h} + \right. \\ \left. + (9,33 \cdot 10^{-3} \frac{H'_D}{\bar{S}_h})^2 - 9,33 \cdot 10^{-3} \frac{S_v}{\bar{S}_h} \right]$$

37.

Haciendo operaciones semejantes, y teniendo en cuenta que

$$(d_b)_{\text{choq-3a}} = 1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} S_v + (d_b)_{\text{tras-2a}}$$

se obtendría para la tercera fila:

38.

$$(d_b)_{\text{tras-3a}} = \left[1,4 \rho_s d_p \frac{U_o}{U_{mf}} S_v + (d_b)_{\text{tras-2a}} \right] \\ \left[1 - 9,33 \cdot 10^{-3} \frac{H'_D}{\bar{S}_h} + (9,33 \cdot 10^{-3} \frac{H'_D}{\bar{S}_h})^2 - 2 \cdot 9,33 \cdot 10^{-3} \frac{S_v}{\bar{S}_h} - \right. \\ \left. - (9,33 \cdot 10^{-3} \frac{H'_D}{\bar{S}_h})^3 + 9,33^2 \cdot 10^{-6} \frac{H'_D S_v}{(\bar{S}_h)^2} \right]$$

Según se desprende de las ecuaciones 35, 37 y 38, es posible calcular la distribución de tamaños de burbujas en un lecho apantallado si se conoce una relación entre la eficacia de choque de las pantallas y el parámetro de choque, las condiciones de trabajo y el dimensionado de las pantallas (altura de colocación, separación vertical entre filas, distancia entre cilindros).

Si bien el campo de aplicación de estas ecuaciones es reducido, en base a las condiciones particulares empleadas en este trabajo, se considera que el método es utilizable en otras situaciones, tales como lechos con pantallas formadas por placas perforadas y tamices horizontales.

5.6.2.- Relación entre las eficacias globales y de expansión y el tamaño de burbuja medio

De la definición de Eficacia Global, apartado 5.5.1, se puede deducir que este tipo de eficacia es una medida del tamaño de burbuja medio en todo el lecho. Para comprobarlo se representó la Eficacia Global de cada pantalla en función del valor medio del parámetro $d_b U_{mf} / \rho_s d_p U_o$, figura 65. Los valores representados se tomaron de los relacionados en las tablas XII, XIV, XV y XVI, escogiéndose siempre pares de valores que se hubieran obtenido por el mismo método de ajuste, m.c.2 ó K.m.c.

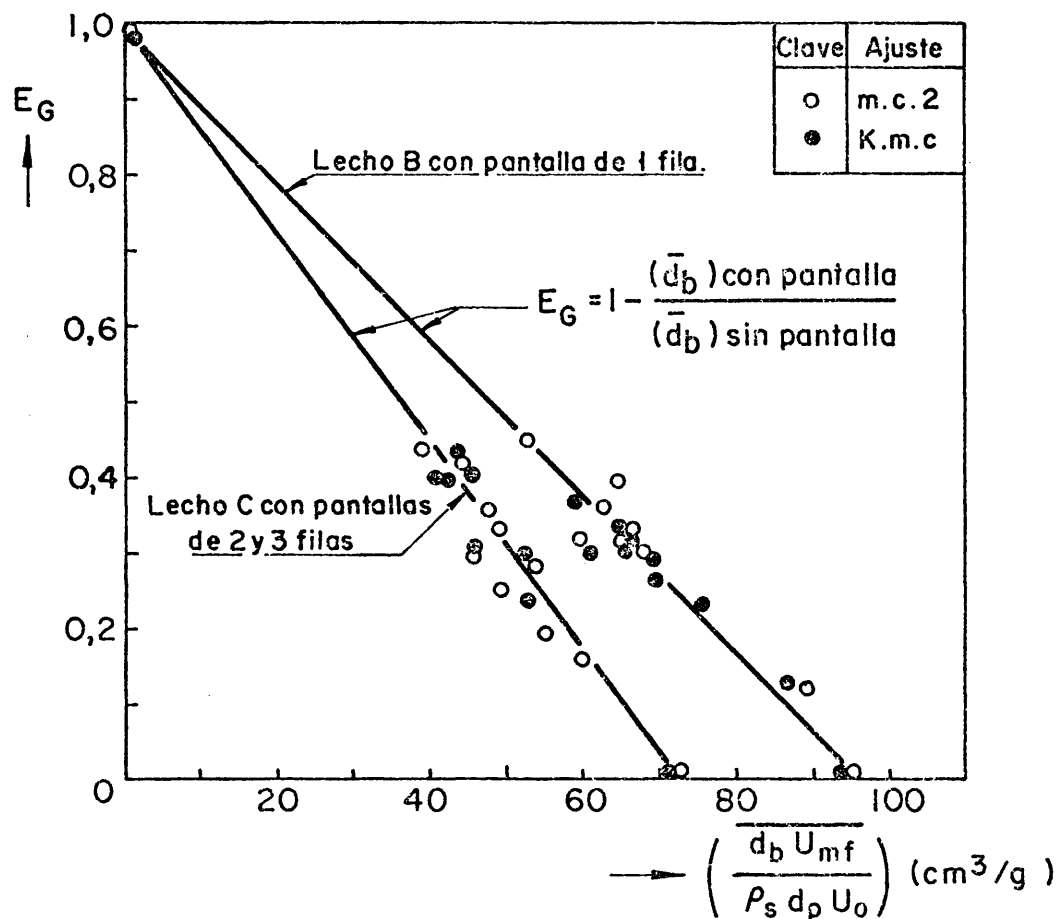


Fig. 65—Relación entre la eficacia global y el tamaño de burbuja medio

La ecuación general de las rectas obtenidas es:

$$(E_G)_{\text{pantalla "P"}} = 1 - \frac{\left(\frac{\overline{d_b U_{mf}}}{\rho_s d_p U_o} \right)_{\text{con pantalla "P"}}}{\left(\frac{\overline{d_b U_{mf}}}{\rho_s d_p U_o} \right)_{\text{sin pantallas}}} \quad 39.$$

Esta ecuación puede simplificarse si se comparan datos, con pantallas y sin pantallas, obtenidos en las mismas condiciones de trabajo (U_{mf} , ρ_s , d_p , U_o), quedando entonces:

$$(E_G)_{\text{pantalla "P"}} = 1 - \frac{(\overline{d_b})_{\text{con pantalla "P"}}}{(\overline{d_b})_{\text{sin pantallas}}} \quad 40.$$

De igual forma que con la eficacia global, la definición de la eficacia de expansión induce a sospechar una cierta relación entre esta magnitud y el tamaño de burbuja medio; sin embargo, los datos experimentales obtenidos no fueron suficientes para establecer qué tipo de función relaciona a ambas magnitudes.

5.6.3.- Influencias de la altura de colocación de una pantalla formada por una sola fila de cilindros

Se estudió el caso particular de una fila de 10 cilindros (serie de pantallas de la 1 a la 6), observándose las diversas modificaciones que se producían en el tamaño de burbuja medio y eficacias al variar su altura de colocación. En las correlaciones se utilizó el parámetro H' (altura relativa de colocación) por las razones citadas en el apartado 5.1.

5.6.3.1.- Tamaño de burbuja medio

En la figura 66 se muestra la representación del tamaño de burbuja medio en función de la altura relativa de colocación de la fila de 10 cilindros (ver los datos en las tablas XI y XIII).

Los puntos se han ajustado a una curva, teniendo en cuenta la suposición de que cuando se coloca la pantalla justo encima de la placa distribuidora, o en la superficie del lecho, el tamaño de burbuja medio debe ser practicamente igual al del lecho sin pantallas en las mismas condiciones de trabajo. Como puede observarse aparece un valor mínimo del tamaño de burbuja medio correspondiente a la colocación de la fila de cilindros a una altura:

$$H'_D = 1/2 H_f$$

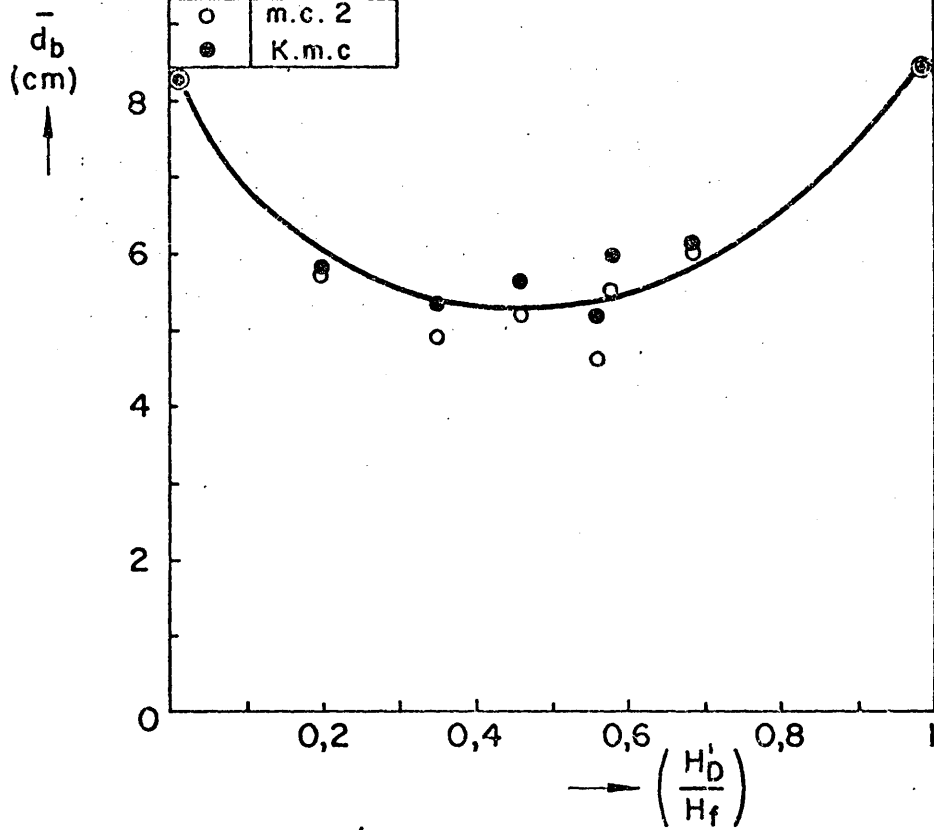


Fig. 66 — Variación del tamaño de burbuja medio con la altura relativa de colocación de una fila de cilindros. $S_{lib} = 36,4 \%$ $U_R = 2$

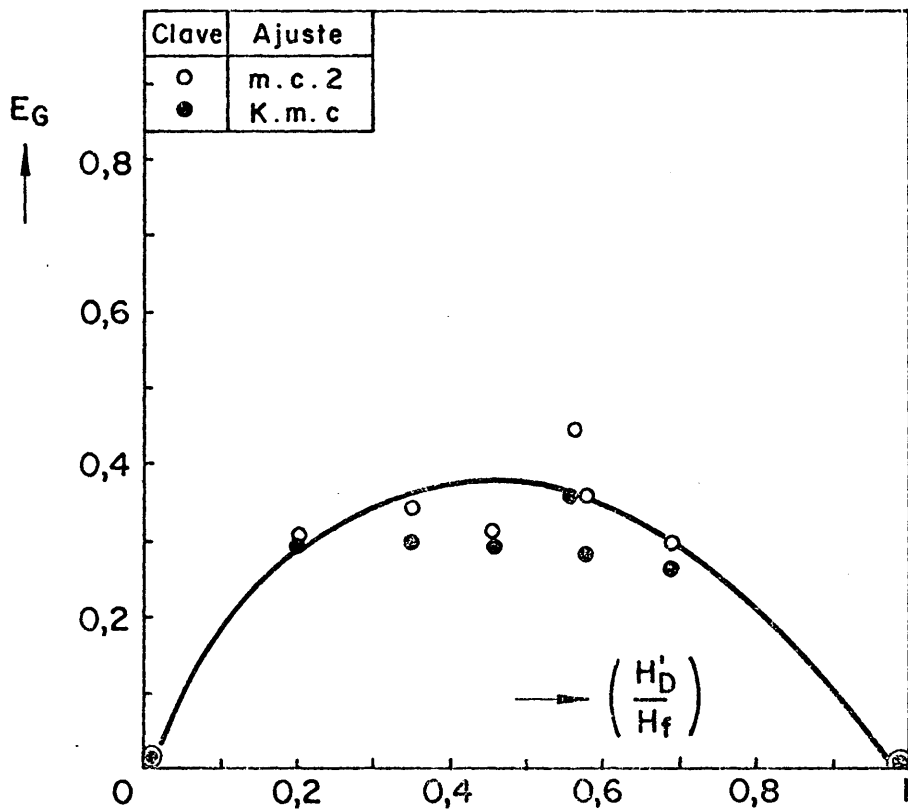


Fig. 67 — Variación de la eficacia global de una pantalla formada por una fila de cilindros con la altura relativa a que se coloca. $S_{lib} = 36,4 \%$

5.6.3.2.- Eficacias

En la figura 67 se muestra la representación de la eficacia global de las pantallas ensayadas frente a la altura relativa de colocación de las mismas. Los datos se relacionan en las tablas XI y XIV.

La curva representada se trazó a partir de la de variación del tamaño de burbuja medio con la altura relativa de colocación, figura 66, y teniendo en cuenta la relación entre eficacia global y tamaño de burbuja medio expresada por la ecuación 40. Con ello se llegó a dos conclusiones:

- a) La eficacia global es cero cuando se coloca la fila encima del distribuidor ($H'_D = 0$) o en la superficie del lecho ($H'_D = 1$).
- b) Se obtiene una eficacia global máxima cuando se coloca la fila de cilindros en el centro del lecho ($H'_D = 1/2 H_f$).

Por otra parte, y en cuanto a las eficacias de choque y de expansión, los resultados experimentales no permitieron extraer correlaciones cuantitativas entre estas eficacias y la altura relativa de colocación, ya que eran poco numerosos y con grandes dispersiones. No obstante, y en términos aproximados, puede decirse que la eficacia de choque aumenta al aumentar la altura de colocación de la pantalla y que la expansión se reduce al introducir pantallas.

5.6.4.- Influencias del número de cilindros que constituyen una pantalla formada por una sola fila de cilindros

Las influencias del número de cilindros sobre el tamaño de burbuja medio y las eficacias se estudiaron utilizando los resultados obtenidos en la serie de ensayos efectuados con

las pantallas 2, 3, 8 y 9 (ver dimensionado en las tablas VIII y IX). En las correlaciones se empleó el parámetro S_{lib} en lugar del número de cilindros (ver razones de su utilización en el apartado 5.1).

5.6.4.1.- Tamaño de burbuja medio

En la figura 68 se muestra la representación del tamaño de burbuja medio en todo el lecho en función de la superficie libre relativa de las pantallas. Los tamaños de burbuja medios se calcularon para velocidad reducida de trabajo igual a 2, tabla XIII.

Los puntos representados se ajustaron, por mínimos cuadrados a una recta, teniendo en cuenta los siguientes razonamientos:

a) En igualdad de las restantes condiciones, el tamaño de burbuja medio en el lecho disminuye al disminuir la superficie libre relativa, ya que dicha disminución produce mayor rotura de las burbujas.

b) El valor del tamaño de burbuja medio para una superficie libre relativa del 100% es el correspondiente al lecho sin pantallas.

c) El valor del tamaño de burbuja medio para una superficie libre relativa del 0% se ha estimado suponiendo una pantalla formada por cilindros prácticamente juntos, o lo que es lo mismo, como si se colocara a la altura correspondiente una placa de material poroso (eficacia de choque igual a uno).

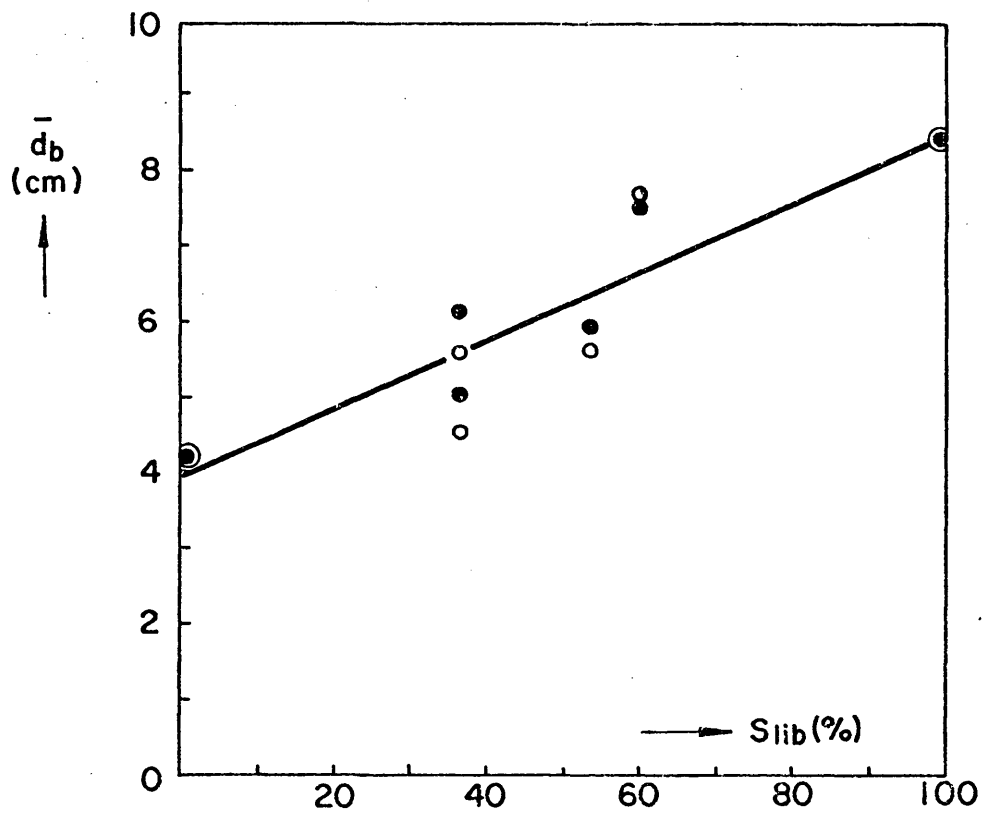


Fig. 68—Variación del tamaño de burbuja medio con la superficie libre relativa de una pantalla formada por una fila de cilindros. $U_R = 2$; $H_D' / H_f \cong 0,58$

Puede observarse, figura 68, que los puntos experimentales se ajustan moderadamente bien a una variación lineal. Con ello, se obtiene la relación (para una fila situada a una altura relativa de 0,58):

$$\begin{aligned} (\bar{a}_b)_{U_R = 2} &= 4,4 \cdot 10^{-2} S_{lib} + 3,95 & 41. \\ H' &\cong 0,58 \end{aligned}$$

5.6.4.2.- Eficacias

En la figura 69 se muestra la representación de la eficia global en función de la superficie libre relativa de las pantallas. Los datos de eficacias globales se tomaron de los relacionados en la tabla XIV.

El ajuste de los puntos experimentales se hizo en base a consideraciones similares a las tenidas en cuenta en el apartado anterior y teniendo en cuenta la relación existente entre eficacia global y tamaño de burbuja medio, ecuación 40. La función obtenida para una fila de cilindros situada a una altura relativa de 0,58 es:

$$(E_G)_{H' \cong 0,58} = 5,2 \cdot 10^{-3} S_{lib} - 0,52 \quad 42.$$

En cuanto a las eficacias de choque y de expansión, los resultados sólo permiten sacar conclusiones cualitativas, ya que era pocos y muy dispersos. En este sentido se observó un aumento de la eficacia de choque al disminuir la superficie libre relativa, es decir al aumentar el número de cilindros que formaban la pantalla.

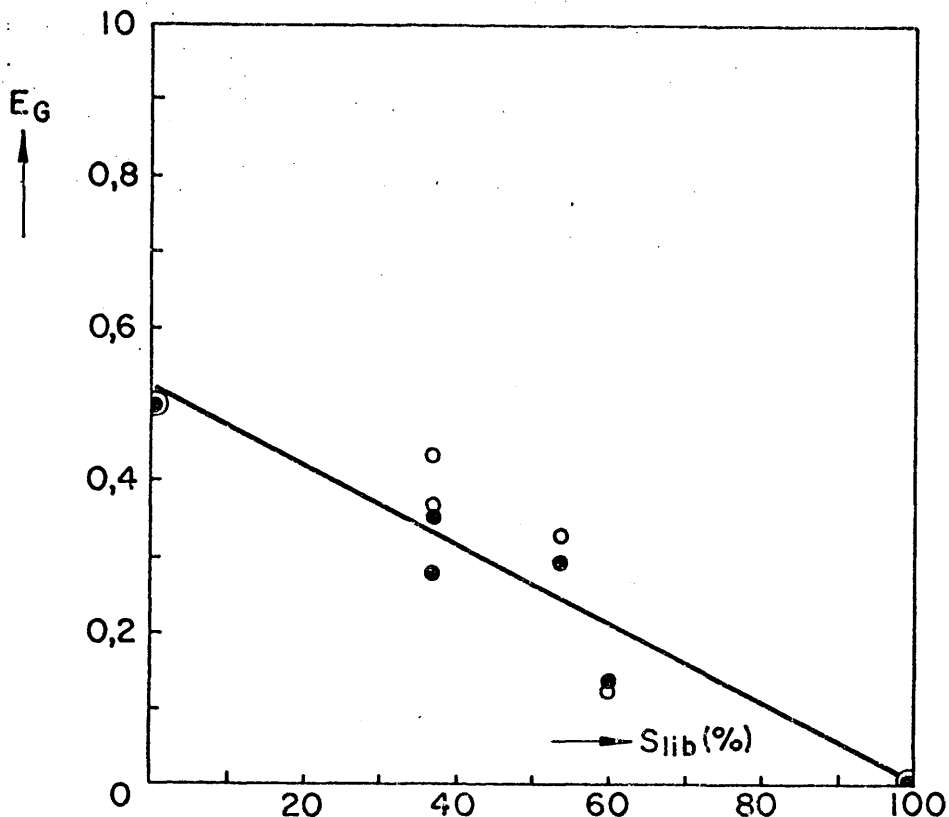


Fig. 69— Variación de la eficacia global de una pantalla de una fila de cilindros al variar el número de cilindros que la constituyen. $H_D^1/H_f = 0,58$

5.6.5.- Influencias de la distancia vertical entre dos o tres filas de cilindros

Los ensayos de pantallas formadas por dos o tres filas de cilindros (pantallas 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18) sirvieron para estudiar las influencias de la distancia entre filas sobre el tamaño de burbuja medio y sobre las eficacias.

Los datos de dimensionado de las pantallas se relacionan en la tablas VIII, X y XI. Los de tamaños de burbuja medios que se conseguían en el lecho sin pantallas y con pan-

tallas se relacionan en la tabla XIII. Debe observarse que se han hecho los cálculos de tamaños de burbuja medios para una velocidad reducida de trabajo igual a 2, valor medio de las velocidades empleadas. Por otra parte, las filas eran equidistantes y el punto medio entre las dos filas y las filas centrales de las pantallas de tres filas estaban siempre a una altura de aproximadamente $0,55-0,56 H_f$.

El tratamiento de los resultados se ha hecho en base a dos supuestos:

1. Cuando la distancia entre filas es muy pequeña se puede esperar que el tamaño de burbuja medio y las eficacias de choque, global y de expansión sean del mismo orden que los conseguidos con una sola fila de cilindros situada a la altura media del sistema (punto medio entre dos filas o la fila central de tres filas).

2. Cuando la distancia entre filas es muy grande (para dos filas $S_v \simeq H_f$ y para tres filas $S_v \simeq \frac{1}{2}H_f$) se puede esperar que el tamaño de burbuja medio y las eficacias de choque, global y de expansión sean del mismo orden que los del lecho sin pantallas, cuando se consideran dos filas, y que los obtenidos en el lecho con solamente la fila central, en el caso de tres filas.

Estos dos razonamientos implican que debe haber una separación entre filas que haga mínimo el tamaño de burbuja medio y máxima la eficacia global. Aunque no se pudo comprobar rigurosamente, se observó que con separaciones verticales del orden de $0,1 H_f$, es decir unos 8 cm, el tamaño de burbuja medio era de 4 cm, frente a los 6,3 cm en el lecho sin pantallas, disminución que podía considerarse óptima en las condiciones de trabajo utilizadas.

5.7.- CRITERIOS DE DISEÑO DE PANTALLAS INTERNAS

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos realizados con el lecho bidimensional se han confeccionado unos criterios, cualitativos algunos y cuantitativos otros, que, si bien no permiten por sí solos diseñar cualquier lecho con pantallas, contribuyen a la resolución del problema que ello continúa planteando.

5.7.1.- ===== Criterios generales =====

5.7.1.1.- Método experimental

El empleo de un lecho "bidimensional" ha dado lugar a una serie de criterios que permiten valorar las posibilidades de dicho método de observación y medida:

1. Pueden observarse y medirse todos los parámetros que definen a las burbujas: forma , tamaño, velocidad, distribución en el lecho).

2. Pueden observarse y medirse otras características del lecho fluidizado tales como: altura, tipo de fluidización, calidad de ésta.

3. Existen limitaciones de tamaño en las tres dimensiones (más de 3m x 50cm x 2cm es poco realizable).

4. No pueden hacerse reacciones a altas temperaturas, ya que los lechos suelen estar en recipientes de plástico o vidrio plano.

5. No pueden probarse algunos tipos de pantallas, tales como tubos verticales.

6. Los resultados obtenidos no pueden aplicarse a lechos cilíndricos sin ciertas reservas.

7. La obtención de datos experimentales tiene necesidad de emplear algún método fotográfico, lo que supone realizar numerosas medidas para obtener valores medios de confianza.

5.7.1.2.- Tipo de pantalla

La elección del tipo de pantalla de entre las múltiples posibilidades que existen suele hacerse por medio de soluciones de compromiso. En general, pueden tenerse los siguientes criterios:

1. La naturaleza del proceso puede indicar qué tipo de pantalla se debe emplear en su caso determinado.

2. Ninguna pantalla tiene características universales de utilización.

3. En principio, y según la literatura consultada, las pantallas formadas por tubos verticales son mejores que las formadas por tubos horizontales. Los datos existentes en la actualidad no permiten asegurar ésto categoricamente. De hecho, los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que las posibilidades de este tipo de pantalla son muy interesantes.

5.7.1.3.- Validez de las correlaciones obtenidas

Respecto a la validez de las correlaciones que se han obtenido cabe preguntarse sobre los siguientes puntos:

1º) ¿Qué grado de confianza merecen las correlaciones obtenidas?

2º) ¿A qué tipo de pantallas pueden aplicarse?

3º) ¿Qué límites de escala existen?

Las respuestas a estas preguntas constituyen una serie de criterios que se relacionan a continuación:

1. Algunas correlaciones podrían aplicarse a pantallas de parecida naturaleza que las empleadas, tales como placas perforadas y mallas horizontales.

2. La falta de datos publicados impide contrastar los resultados obtenidos en este trabajo y por tanto la validez de algunas de las correlaciones obtenidas no se puede discutir.

3. Respecto al crecimiento de las burbujas con la altura se ha comprobado una buena concordancia con los datos que cita la literatura.

4. El grado de confianza que puedan merecer las correlaciones obtenidas sólo puede obtenerse mediante aplicaciones de las mismas a otros sistemas. Para ello se realizaron ensayos en un reactor de lecho fluidizado, cuyos resultados y conclusiones se tratarán en los apartados 6, 7 y 8.

5. La definición de eficacia global y de expansión sirve para el tratamiento de cualquier otro tipo de pantalla. La de eficacia de choque es aplicable a todas las que se basen en elementos horizontales.

6. La aplicación de los parámetros reducidos y de las eficacias puede hacerse a lechos fluidizados de cualquier tamaño.

5.7.2.- Pantallas formadas por ordenaciones de cilindros horizontales

5.7.2.1.- Diámetro, separación y número de cilindros

Los valores de estos tres parámetros de diseño vendrán dados por los que tengan la superficie libre relativa y la amplitud de paso. Aunque la eficacia de choque aumenta al disminuir estos dos últimos parámetros adimensionales, no es conveniente la disposición de pantallas con valores de éstos muy pequeños, ya que se correría el riesgo de dificultar demasiado el movimiento del sólido, con las consecuencias que esto traería, y de aumentar excesivamente la pérdida de carga.

Algunos autores dan límites de 30 a 50 diámetros de partícula entre cualquier par de superficies cercanas. En este trabajo se empleaban amplitudes de paso del orden de 200 veces el tamaño de partícula.

Otra forma de estimar el orden del tamaño que deben tener los parámetros amplitud de paso y superficie libre relativa es a partir de la eficacia de choque y del tamaño de burbuja de choque. Por ejemplo, una burbuja que al chocar tenga un tamaño de unas 4-6 veces la amplitud de paso, se rompe en burbujas 50-70% menores. Por otra parte, los diámetros de los cilindros que formaban la pantalla eran 1/5 del tamaño de dicha burbuja. En cambio, una burbuja de tamaño semejante a la amplitud de paso sólo se rompería dando burbujas un 10% más pequeñas.

Otro criterio sobre diámetro de cilindro es considerar el tamaño medio de burbuja en el lecho sin pantallas. En este trabajo se conseguían buenas eficacias cuando el diámetro de los cilindros era de $1/3$ a $1/6$ del tamaño de burbuja medio en todo el lecho (a velocidad reducida de trabajo igual a 2).

El número de cilindros por fila vendría determinado conjuntamente por el tamaño del lecho (diámetro o anchura), diámetro de los cilindros, y separación horizontal entre ellos. Por otra parte, en cuanto a la disposición de las filas, la colocación de los cilindros debería ser lo más simétrica posible: igual separación entre todos los cilindros y entre los últimos y las paredes del recipiente y ocupación de todo el espacio disponible horizontalmente.

5.7.2.2.- Número de filas y colocación de las mismas

El número total de filas que formen una pantalla y su colocación en el interior del lecho están condicionados por el tamaño de burbuja medio que se desee obtener, por la amplitud de paso de las filas y por el tipo de función que relacione a la eficacia de choque de dichas filas con el parámetro de choque del sistema.

La eficacia global máxima se obtendría cuando se llenara todo el lecho de cilindros, pero ello originaría una gran pérdida de volumen útil, disminución de coeficientes de transmisión de calor, dificultades de vaciado y limpieza del equipo, etc. Por todo esto, para conseguir conversiones y producciones óptimas habría que llegar a soluciones de compromiso.

Los dos tipos básicos de ordenación en el espacio, en fila y al tresbolillo, se comportan de forma muy parecida en

las condiciones ensayadas. Quizá en ordenaciones de filas muy cercanas la ordenación al tresbolillo sería más eficaz que la de en fila, pero no hay datos cuantitativos suficientes para asegurarlo.

Referente a las pantallas de una, dos y tres filas ensayadas en el desarrollo del presente trabajo se obtuvieron los siguientes criterios:

1. Cuando una fila de cilindros se coloca en la mitad del lecho se obtiene una eficacia global máxima.

2. Hay una separación óptima entre dos y tres filas de cilindros que da una eficacia global máxima. Esta separación suele ser del orden de 1/10 de la altura del lecho.

5.7.2.3.- Distribuidor del gas

Sobre elección del tipo de distribuidor del gas se ha obtenido el criterio de que las placas formadas por materiales porosos, vidrio, metales sinterizados, etc. son las que mejor distribuyen el gas y las que producen menores tamaños de burbuja. Tienen las limitaciones impuestas por su relativamente poca resistencia mecánica, por la posibilidad de obturación de los poros del material y por la pérdida de carga que originan.

5.7.3.- Ejemplo de aplicación de los anteriores criterios al diseño de una pantalla

Con el fin de comprobar la consistencia de los criterios y correlaciones obtenidos se realizó el diseño teórico de una pantalla empleando dichos elementos de juicio.

El sistema fluidizado supuesto era un lecho de óxido de cinc en el que se deseaba tener un tamaño medio de burbuja constante en todo el lecho e igual a 1,5 cm. Los datos eran los siguientes:

Densidad del sólido : $\rho_s = 2,78 \text{ g/cm}^3$
 Tamaño de partícula : $d_p = 220 \text{ micras}$
 Velocidad mínima de Fluidización : $U_{mf} = 5 \text{ cm/seg}$
 Velocidad del gas : $U_o = 10 \text{ cm/seg}$
 Diámetro del reactor : $D = 6 \text{ cm}$
 Altura del lecho : $H_f = 25 \text{ cm}$
 Distribuidor del gas : material poroso
 Tamaño de burbuja deseado : $\bar{d}_b = 1,5 \text{ cm}$

a) Elección del tipo de pantalla.- Se escogió el tipo de pantallas formadas por cilindros horizontales por ser éstas el objeto de la presente investigación.

b) Diámetro de los cilindros.- El criterio de dimensionado de este parámetro es : $D_R = 1/3 \text{ á } 1/6 \bar{d}_b$ (apart.5.7.2.1)
 El tamaño de burbuja en el lecho sin pantallas sería:

$$\frac{d_b \cdot 5}{2,78 \cdot 0,022 \cdot 10} = 1,4 H_D \quad (\text{ver ecuación 13})$$

que queda en : $d_b = 0,17 H_D$, ecuación de distribución de tamaños de burbuja en el lecho sin pantallas. El tamaño de burbuja medio (ver ecuaciones 10 y 11) sería el tamaño de burbuja correspondiente a $H_D = H_f/2 = 25/5 = 12,5 \text{ cm}$, es decir:

$$\bar{d}_b = 0,17 \cdot 12,5 = 2,12 \text{ cm}$$

Con esto, el diámetro de los cilindros estaría comprendido entre los valores 0,7 y 0,35 cm.

c) Distancia horizontal entre los cilindros.- Suponiendo una separación entre los bordes de los cilindros igual a 40 veces el diámetro de partícula, apartado 5.7.2.1, la amplitud de paso, $\bar{S}_h \cong 1$ cm. Por otro lado, el criterio de que la amplitud de paso debe ser del orden de 1/5 del tamaño de burbuja medio, daría para aquella el valor de $\cong 0,5$ cm.

La distancia horizontal entre los cilindros se fijó a partir de la combinación de los intervalos de valores del diámetro de los cilindros y de la amplitud de paso, es decir:

\bar{S}_h	D_R	S_h	(unidades en cm.)
0,5	0,7	1,2	
0,5	0,35	0,85	
1	0,7	1,7	
1	0,35	1,35	

d) Número de cilindros por fila.- Los cuatro valores de distancia horizontal entre filas corresponden a las siguientes posibilidades:

S_h (cm)	n
1,2	4
0,85	6
1,7	3,5(?)
1,35	4,5(?)

Valores medios: 1,27 4,5

Por otro lado el valor medio de tamaños de cilindros sería de $D \approx 0,5$ cm.

e) Constitución de una fila.- A partir de los resultados obtenidos en los tres apartados anteriores, se estimó que cada fila podría estar constituida de la manera siguiente:

5 cilindros de 0,5 cm de diámetro separados entre centros 1 cm.

Estas filas tendrían una amplitud de paso, figura 27, de

$$\bar{S}_h = 0,58 \text{ cm}$$

f) Colocación de las filas.- Las alturas de colocación de las filas necesarias se calcularon por medio de sucesivos tanteos que consisten en la siguiente serie de operaciones:

- 1º. Representar gráficamente el tamaño de burbuja en el lecho sin pantallas en función de la altura.
- 2º. Suponer una altura de colocación de la primera fila.
- 3º. Calcular sobre la gráfica representada el tamaño de burbuja de choque, y con él y los datos necesarios calcular el parámetro de choque.
- 4º. Calcular la eficacia de choque según la ecuación 32 ó la figura 64.
- 5º. Con la eficacia de choque y el tamaño de burbuja de choque calcular el tamaño de burbuja después del choque.

6º. Estimar si es suficiente la disminución o si, por el contrario, es excesiva.

7º. Hacer semejantes operaciones con la siguiente fila de cilindros.

En la tabla XX se muestran los desarrollos de los sucesivos tanteos y en la figura 70 la disposición de las filas que se obtuvo, así como las distribuciones de tamaños de burbuja en el lecho sin pantallas y con la pantalla diseñada. El tamaño de burbuja medio que se obtenía con ésta era de 1,45 cm, frente a los 1,5 cm deseados.

TABLA XX.- Cálculo de las alturas de colocación de las filas

Tanteo	H'_D (cm)	$(d_b)_{\text{choq}}$ (cm)	Pará. Choq.	E_{choq}	$(d_b)_{\text{tras}}$
I	12,50	2,15	30,4	0,20	1,72(£)
II	7,50	1,50	21,0	0,13	1,30
III	11,25	1,70	24,0	0,15	1,44
IV	12,50	1,65	23,2	0,15	1,40
V	13,50	1,57	22,0	0,14	1,35
VI	15,25	1,65	23,2	0,15	1,40
VII	16,75	1,65	23,0	0,15	1,40
VIII	17,75	1,57	22,0	0,14	1,35
IX	19,25	1,57	22,0	0,14	1,35
X	21,00	1,65	23,2	0,15	1,40
XI	22,50	1,65	23,2	0,15	1,40
XII	23,75	1,57	22,0	0,14	1,35

(£) Se consideró no válido por insuficiente disminución en el tamaño de burbuja.

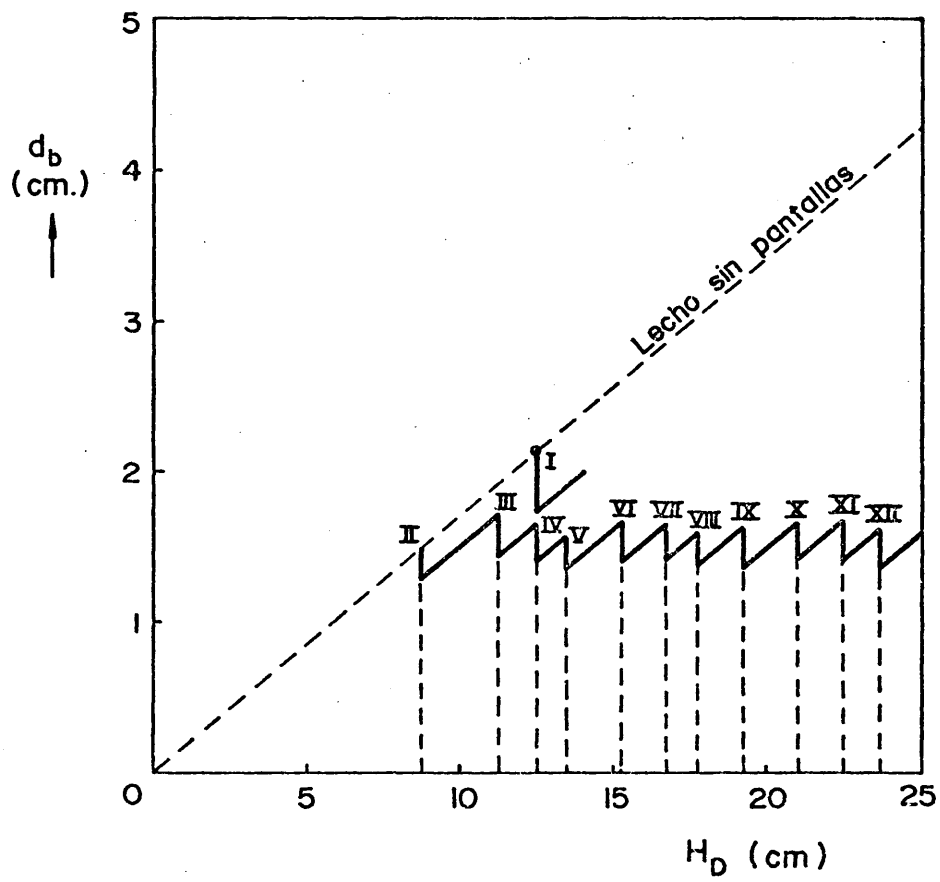


Fig. 70.- Diseño teórico de una pantalla.

6.- ESTUDIOS PREVIOS CON REACCION QUIMICA

Los estudios realizados en el lecho bidimensional sin reacción química se completaron con ensayos, más realísticos, en reactor de lecho fluidizado.

El objetivo final de estos ensayos era obtener medidas cuantitativas de las eficacias de las pantallas en función de los aumentos de conversión obtenidos al introducir las en el lecho.

El método utilizado (ver apartado 2.4.6), se basaba en comparar las conversiones obtenidas en el reactor de lecho fluidizado con pantallas con las que se habían obtenido, en las mismas condiciones de trabajo, en el mismo reactor sin pantallas y en un reactor de lecho fijo con flujo del gas muy próximo al de pistón.

La reacción que se llevaba a cabo era la de obtención de butironitrilo (ver apartado 2.5), catalizada por un catalizador sólido. El catalizador óptimo de esta reacción no está aún bien decidido (56, 57), por lo que hubo que hacer una serie de ensayos con objeto de establecer las condiciones de trabajo y el catalizador apropiados a las circunstancias que existirían en el reactor de lecho fluidizado con pantallas.

De entre los muchos catalizadores descritos en la bibliografía (57) se eligieron dos: óxido de cinc y magnética; el primero por su alta actividad y el segundo por su gran resistencia mecánica.

6.1.- CATALIZADOR DE MAGNETITA

Se han estudiado los siguientes aspectos:

- . Tratamiento previo del catalizador (reducción)
- . Conversión de butanol en lecho fijo (X_A vs. W/F_{A0})
- . Vida del catalizador

6.1.1 Tratamiento previo del catalizador

=====

En la bibliografía (58) se indica que la actividad catalítica de la magnetita se consigue mediante una reducción previa con hidrógeno u otras mezclas de gases reductores. Comoquiera que no se encontraron datos cuantitativos sobre las condiciones óptimas de operación con este catalizador en la reacción entre el butanol y amoniaco, se han realizado varios experimentos variando el caudal y tiempo de reducción para correlacionar dichas variables con la conversión obtenida.

En términos generales, la reducción de la magnetita depende de la temperatura, del caudal de hidrógeno y del tiempo.

La reacción de reducción de la magnetita es reversible y endotérmica, por lo que un aumento de la temperatura aumenta tanto la conversión de equilibrio como la velocidad de reacción; por ello, la reducción debe hacerse a la máxima temperatura permitida. Según Prangé y Ziegler (50), a 700°C y empleando 0,2 g. de hidrógeno por gramo de magnetita, se pueden conseguir reducciones de la magnetita del orden de un 95%. A temperaturas inferiores es necesario un gasto de hidrógeno mucho mayor.

En el presente trabajo, la temperatura máxima permitida era de 550°C (temperatura de reblandecimiento del vidrio del cual estaba construido el reactor). Por ello la temperatura de reducción fué de 450°C, dejando así un buen margen de seguridad en el trabajo.

Se realizaron diversos experimentos para conocer la actividad de la magnetita reducida bajo diferentes caudales de hidrógeno y tiempos de reducción. Ambos parámetros se han reducido a uno solo: gasto total de hidrógeno (g de H₂/g magnetita cargada). Si bien dicho parámetro tiene unos límites de validez, en el intervalo de tiempos y caudales empleados ha resultado ser una medida clara de la actividad catalítica de la magnetita. Los experimentos se llevaron a cabo en las siguientes condiciones de trabajo:

Temperatura de reacción = 330°C

Relación molar a la entrada butanol/amoníaco = 1/3

W/F_{Ao} = 100 g magnetita hr/mol butanol

W = 50 g

d_p = 0,40 mm. (-500+320 micras)

U_{mf} = 15 cm/seg

U_o = 11,8 cm/seg

H_L = 6,5 cm

Reactor: ver figura 13.

En la Tabla XXI se relacionan los datos y resultados de estos experimentos y en la figura 71 se muestra la variación de la actividad catalítica en función del "gasto de hidrógeno" utilizado. Dicha actividad está medida como conversión obtenida a tiempo cero en la reacción de obtención de butironitrilo.

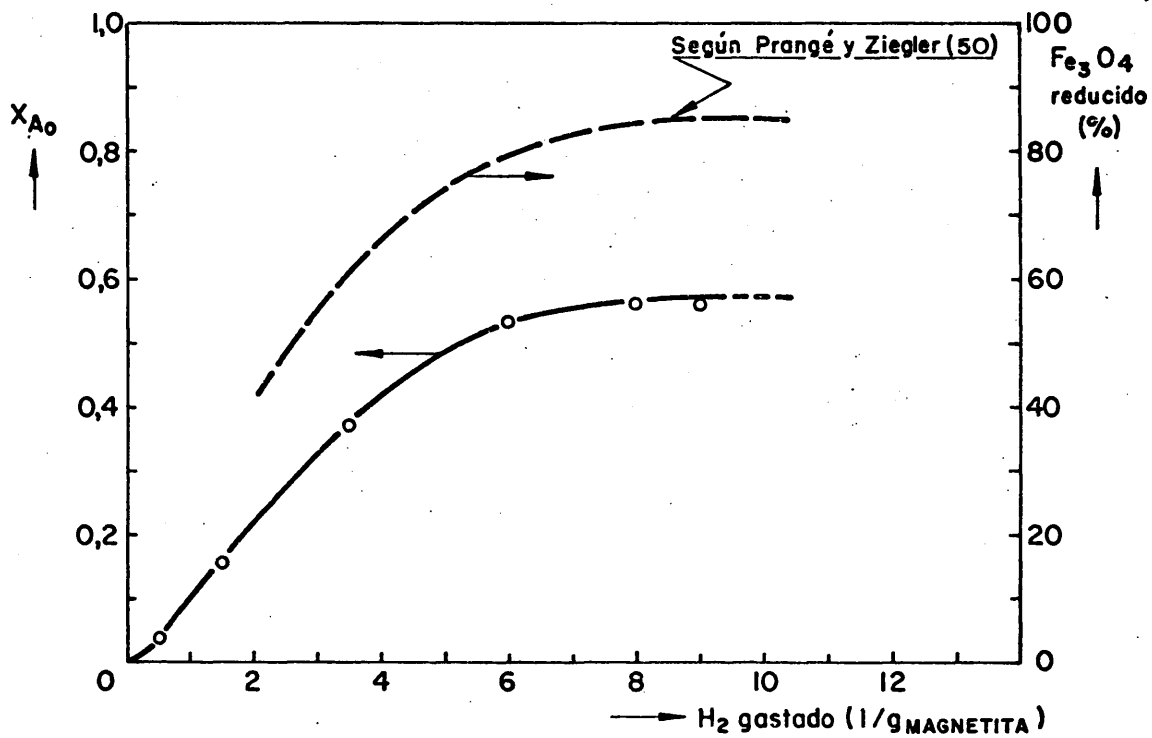


Fig. 71— Catalizador de magnetita (ICI-35-4). Influencia de la reducción en la actividad.

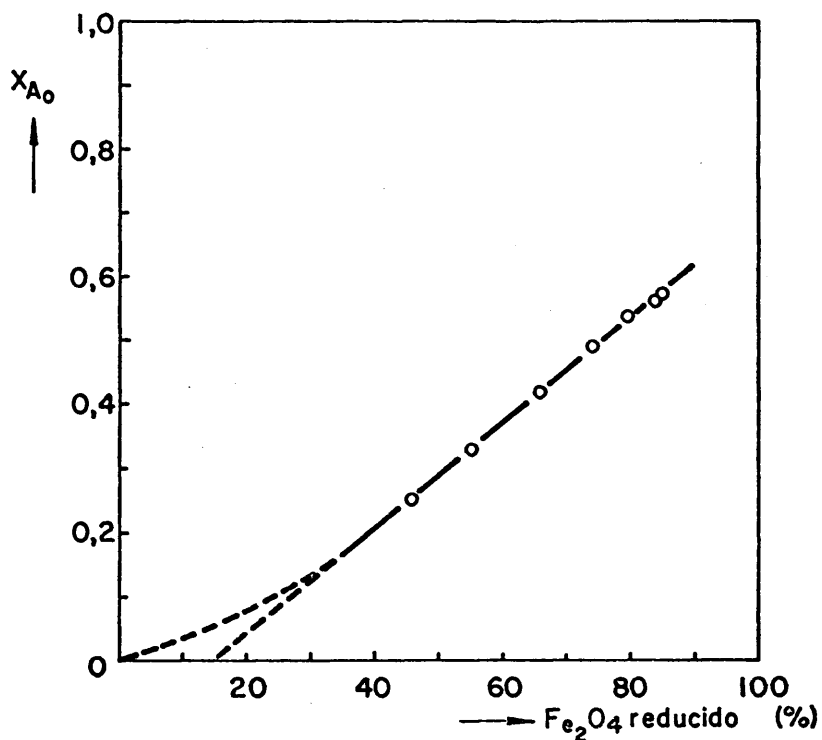


Fig. 72— Relación entre actividad y fracción de magnetita reducida.

En la misma figura 71 se muestran los datos de porcentaje de magnetita reducida según Prangé y Ziegler (50).

TABLA XXI.- Catalizador de magnetita. Estudio de las variables de la reducción previa.

Ensayo	T _{red.} (hr)	Q _{H₂} (1/hr)	Gasto Hidro- geno. V _{H₂} /W (1/g)	X _A				
				Tiempo reacción (min.)				
				0(*)	7,5	22,5	37,5	52,5
M1	0	0	0	0	0	0	0	0
M2	5,0	5,0	0,5	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03
M3	10,0	7,5	1,5	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14
M4	20,0	8,8	3,5	0,37	0,35	0,35	0,31	0,32
M5	10,0	30,0	6,0	0,53	0,52	0,47	0,45	0,41
M6	5,5	72,7	8,0	0,56	0,54	0,48	0,47	0,43
M7	5,5	81,8	9,0	0,56	0,54	0,49	0,47	0,44

(*) Obtenido por extrapolación.

La comparación entre ambas curvas permite relacionar la actividad de la magnetita con su grado de reducción, en el intervalo de condiciones de trabajo estudiadas. En la figura 72 se muestra esta relación, obtenida de la figura 71 al representar la conversión de butanol y el porcentaje de Fe₃O₄ reducido.

Por otra parte, a partir de la curva conversión vs. gasto de hidrógeno, figura 71, se deduce que, en las condiciones

de reducción y tiempo espacial empleados, la máxima conversión que se puede obtener es del 57%.

6.1.2.- Conversión de butanol en lecho fijo

En la figura 73 se muestra la variación de la actividad catalítica de la magnetita en función del tiempo espacial utilizado. El reactor usado (figura 13) era de lecho fijo en el que podía considerarse flujo tipo pistón para los gases.

Las condiciones mantenidas fijas en todos los ensayos eran las siguientes:

Reducción: Temperatura : 450° C
Tiempo : 10 horas
Gasto de Hidrógeno : 8 l/g magnetita

Reacción: Temperatura : 330° C
Relación molar Butanol/Amoníaco en la entrada del reactor : 1/3
Alimentación : $F_{A_0} = 0,435$ mol/hr de butanol
Velocidad lineal de los gases : 10,5 cm/seg

Sólido: Catalizador : Magnetita ICI 35-4
Tamaño medio de partícula : 400 micras
Intervalo : -500+320 micras
Velocidad mínima de fluidización : 15 cm/seg

En la Tabla XXII se relacionan los valores de tiempos espaciales y conversiones obtenidas a diferentes tiempos de reacción.

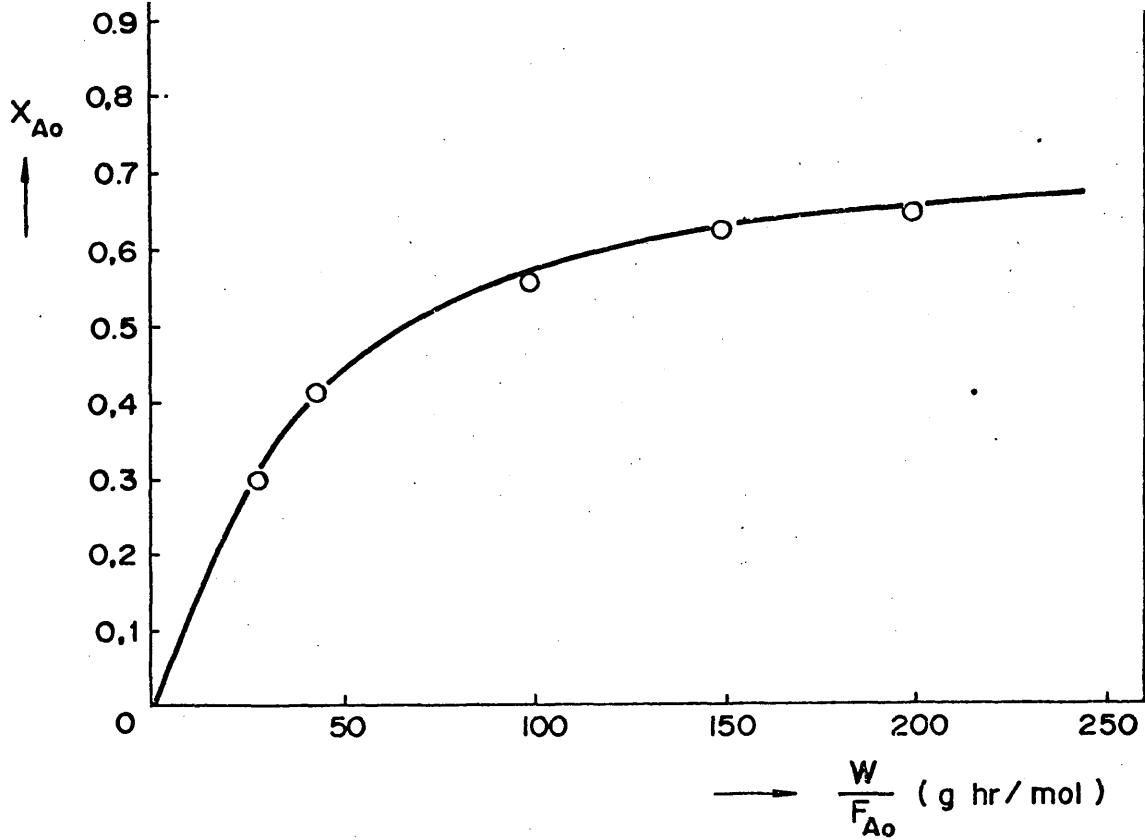


Fig. 73.- Catalizador de Magnetita. Conversión de Butanol en lecho fijo.

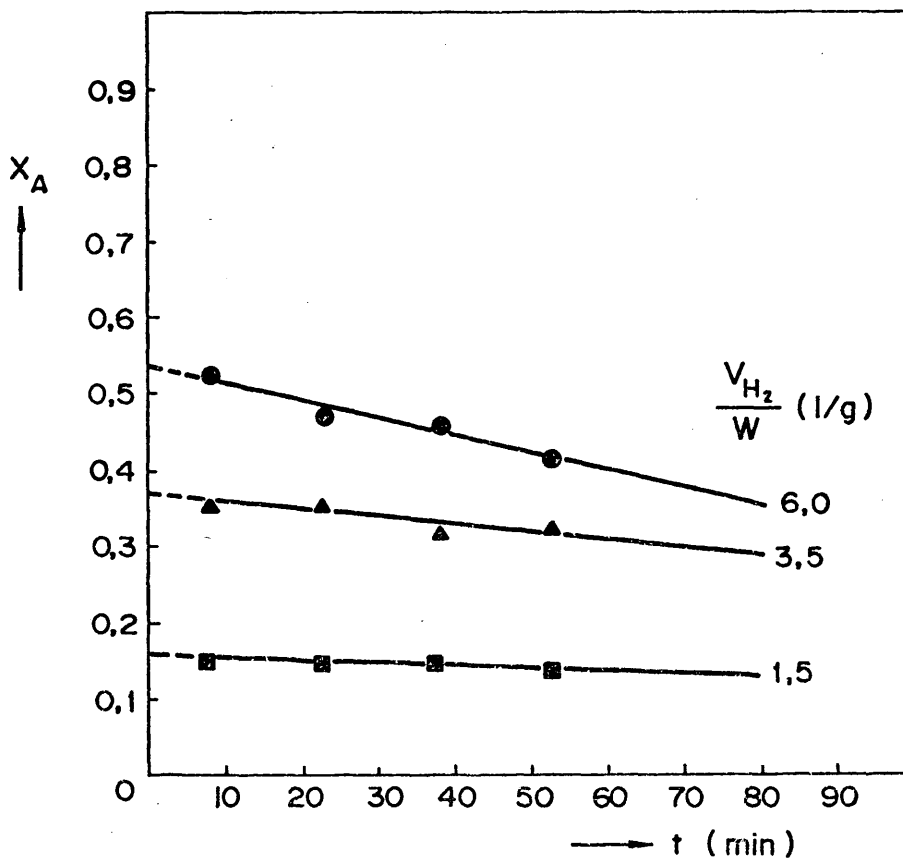


Fig. 74.- Desactivación de la magnetita.

TABLA XXII.- Catalizador de magnetita. Variación de la conversión de butanol con el tiempo espacial en lecho fijo.

ENSAYO	W/F _{Ao} (g hr/mol)	X _A				
		tiempo de reacción (minutos)				
		0 ^(£)	7,5	22,5	37,5	52,5
M13	28	0,30	0,30	0,26	0,28	0,27
M14	44	0,42	0,40	0,38	0,40	0,37
M15	100	0,56	0,57	0,50	0,54	0,53
M16	150	0,63	0,62	0,62	0,61	0,60
M17	200	0,65	0,65	0,64	0,63	0,65

(£) Obtenido por extrapolación.

6.1.3.- Vida del catalizador

En todos los ensayos se observó una rápida pérdida de actividad de la magnetita. En la figura 74 se muestra la representación de la conversión de butanol frente al tiempo transcurrido desde el comienzo de la reacción. Puede observarse que la pérdida de actividad es tanto más rápida cuanto mayor había sido la reducción previa del catalizador.

Por otro lado, se realizó un ensayo de resistencia mecánica consistente en mantener durante 5 horas una carga de 200 g. de magnetita fluidizada con aire a una velocidad lineal de 20 cm/seg. (velocidad mínima de fluidización = 15 cm/seg). Las pérdidas de finos y la disminución de tamaño de las partículas fueron despreciables.

6.1.4.- Conclusión

De los resultados obtenidos con estos ensayos previos, junto con las informaciones bibliográficas, se dedujeron las siguientes condiciones de trabajo, recomendables para el empleo de la magnetita como catalizador de la reacción de obtención de butironitrilo en lecho fluidizado:

Reducción: Temperatura mínima : 450°C
Temperatura óptima : mayor de 700°C
Gasto de Hidrógeno : 8 l/g (a 450°C)
2 l/g (a 700°C)

Reacción: Temperatura : 320-330°C
Relación molar Butanol/Amoniaco en la entrada del reactor : 1/3 a 1/9
W/F_{Ao} mínimo: 200-300 g hr/mol
Velocidad lineal de los gases: Superior a 3 cm/seg.
Tamaño de partícula : Inferior a 1 mm.

6.2.- CATALIZADOR DE OXIDO DE CINCO

Se estudiaron los siguientes aspectos:

- . Propiedades fluidodinámicas
- . Resistencia mecánica
- . Tratamiento previo (calcinación)
- . Conversión de Butanol en lecho fijo
- . Conversión de Butanol en lecho fluidizado
- . Vida del catalizador

6.2.1.- Propiedades Fluidodinámicas

Se han determinado experimentalmente las velocidades mínimas de fluidización y de completa fluidización de diversas fracciones de tamaño de ZnO. El gas de fluidización era aire a temperatura ambiente y el distribuidor de vidrio poroso. En la tabla XXIII se muestran los resultados obtenidos en dos recipientes diferentes y los cálculos a partir de la ecuación 3.

TABLA XXIII.- Propiedades fluidodinámicas del ZnO pastillado a 700 Atm.

Intervalo de tamaños (micras)	U _{mf} (cm/seg)		U _{mf} (teór.) cm/seg	U _{mcf} (cm/seg)	
	I	II		I	II
-300+250	12,1	---	9,0	30,0	---
-320+200	11,1	---	7,4	22,1	---
-250+200	7,3	6,6	5,9	24,0	26,6
-200+160	6,6	4,7	4,0	16,5	10,2
-320+160 (&)	---	6,5	6,3	--	26,0

I : Recipiente cilíndrico de 3 cm de diámetro

II: Id. de 5,30 cm. de diámetro

(&) Mezcla triple de -320+250, -250+200, -200+160 micras al 33%.

6.2.2.- Resistencia al desgaste

Se realizaron tres experimentos con el fin de determinar qué resistencia tenía el óxido de cinc frente a la abrasión producida al ser fluidizado.

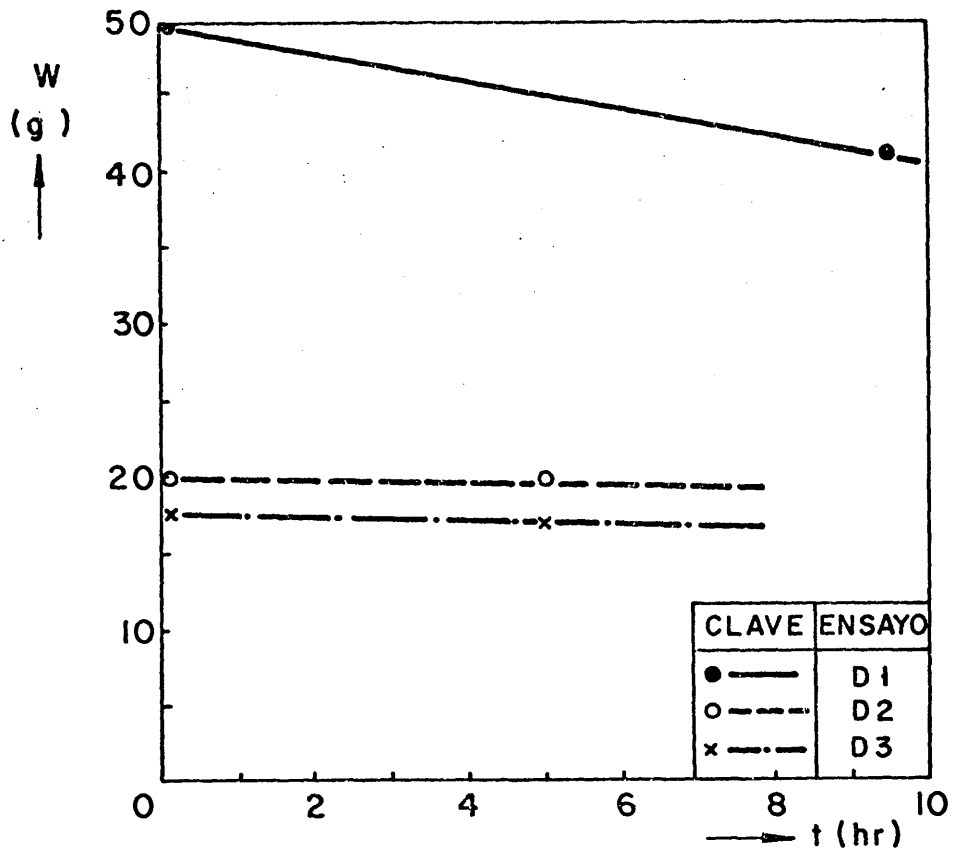


Fig. 75 — Pérdida de peso del lecho por arrastre de finos.

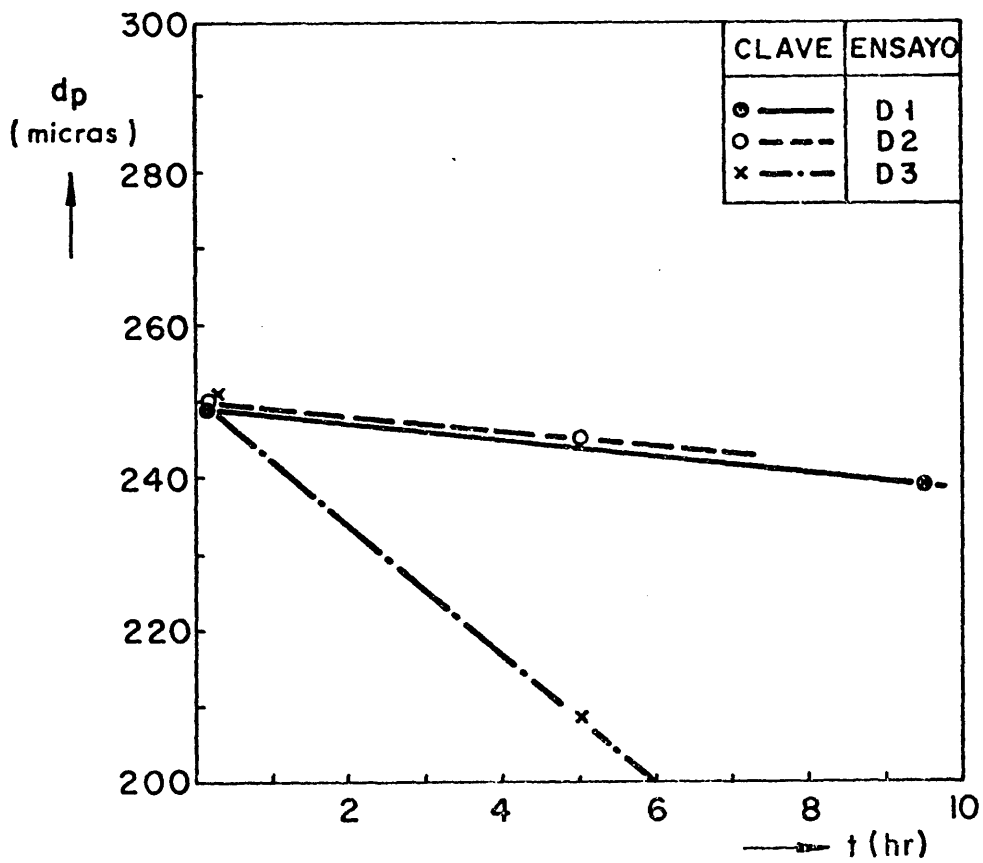


Fig. 76 — Disminución del tamaño de partícula por desgaste.

En todos los ensayos se utilizó aire como gas fluidizante. El recipiente contenedor del lecho era de vidrio (3cm de diámetro), con un distribuidor del gas de vidrio poroso. En la tabla XXIV se relacionan las restantes condiciones experimentales y los resultados obtenidos.

TABLA XXIV.- Ensayos de desgaste del catalizador de óxido de cinc.

Ensayo	d_p (micras)		W (g)		U_o (cm/seg)	t (hr)	T (hr)
	Inicial	Final	Inicial	Final			
	D 1	250	240	50			
D 2	250	245	20	19,5	30	5	20
D 3	250	209	17,4	17,1	10	5	360

En las figuras 75 y 76 se muestran las variaciones de peso y de tamaño de partícula a lo largo del tiempo de operación. De estas gráficas se puede deducir lo siguiente:

1.- La fluidización con velocidades del gas muy altas, ($U_o = 5 U_{mf}$), ensayo D1, ocasiona pérdidas del sólido por arrastre de las partículas más finas; estas partículas provienen de la mezcla inicial y de la rotura de otras más grandes durante la operación.

2.- A velocidades del gas fluidizante del orden de 1 a 3 veces la de mínima fluidización (ensayos D2 y D3) las pérdidas de peso del lecho son mucho menores, ya que los finos no son arrastrados en su totalidad.

3.- A temperatura ambiente la rotura de las partículas de óxido de cinc es mucho menor que a la temperatura de operación, = 350°C.

6.2.3.- Tratamiento previo (calcinación)

Se realizaron dos ensayos con el catalizador sin someter a ningún tratamiento previo (excepto el pastillado, triturado y tamizado), con objeto de comprobar los datos bibliográficos que se poseían (56, 57). La variable que se cambió fué la temperatura, en el ensayo F1 era de 350°C y en F2 de 250°C.

Los experimentos se llevaron a cabo en un reactor de lecho fijo (figura 13) en el que tenía lugar la reacción de obtención de butironitrilo a partir de butanol y amoniaco. Las condiciones experimentales fijas eran:

Tamaño de partícula : -200+160 micras

Tiempo espacial : $W/F_{A_0} = 37,4$ g hr/mol

Relación inicial butanol/amoniaco : 1/3

Las etapas físicas no controlaban al ser las velocidad del gas superior a 3 cm/seg y el tamaño de partícula inferior a 1 mm. (56).

En la figura 77 se muestra la variación de la conversión de butanol con el tiempo de reacción. El aumento de la conversión a 350°C indica que a medida que transcurría el tiempo iba activándose el óxido de cinc. Esto indujo a considerar la necesidad de una calcinación previa.

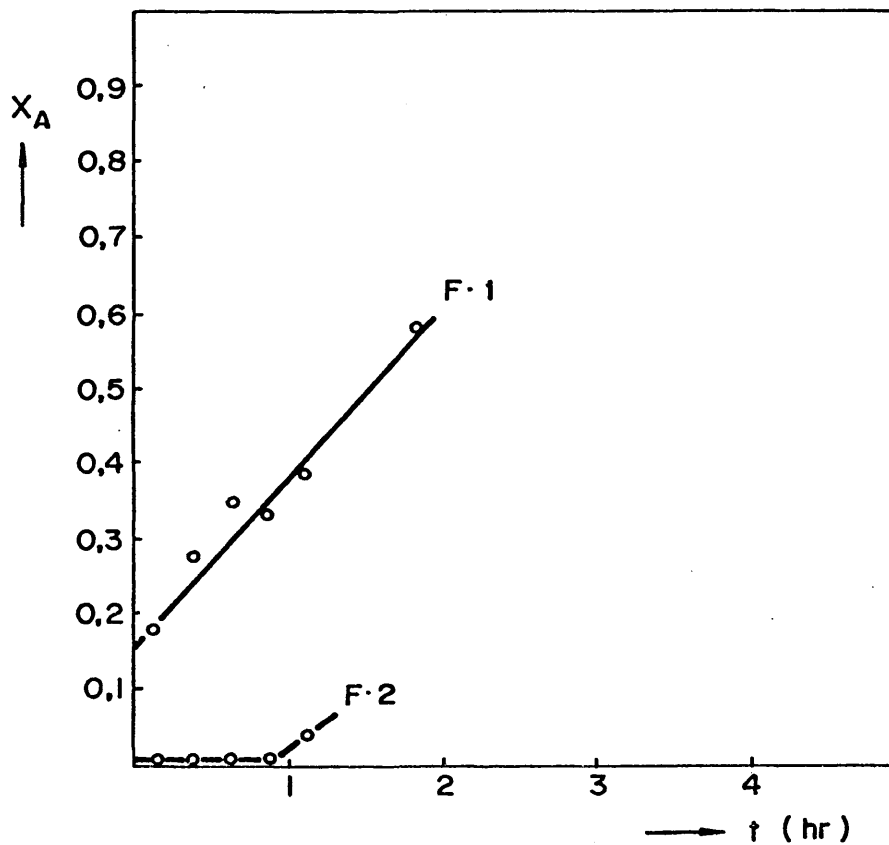


Fig. 77.- Variación de la actividad del catalizador de óxido de cinc sin calcinar.

Una revisión bibliográfica, (59, 60), y la realización de ensayos orientativos establecieron unas condiciones de calcinación que permitían una buena reproducibilidad de los resultados. Estas condiciones eran:

Temperatura : 450°C

Tiempo : horas

Velocidad espacial de nitrógeno : 100 hr⁻¹

6.2.4.- Conversión de butanol en lecho fijo

Los datos que se poseían sobre la actividad del catalizador de óxido de cinc en lecho fijo (56, 57) habían sido obtenidos en condiciones de trabajo que no eran aplicables a las deseadas para el desarrollo de los planes de este trabajo. Por ello se realizaron varios ensayos en un reactor de lecho fijo (figura 13) a diferentes temperaturas y en un amplio margen de valores del tiempo espacial.

Las condiciones de trabajo fueron las siguientes:

Calcinación: Temperatura : 450°C

Tiempo : 5 hr

Caudal N₂ : 15 cm³/seg

Reacción: Peso catalizador : W = 25 g

Tamaño de partícula : 180 micras

Intervalo de tamaños : -200+160 micras

Relación molar Butanol/Amoniaco en la entrada del reactor : 1/3

Reactor : (figura 13)

En la tabla XXV se relacionan las demás condiciones, así como las conversiones obtenidas a diferentes tiempos de reacción y las conversiones a tiempo cero, obtenidas por extrapolación. En la figura 78 se muestra la variación de la conversión inicial con el tiempo espacial a diferentes temperaturas. Se ha representado la conversión a tiempo cero debido a que se observó un decaimiento en la actividad del catalizador con el tiempo.

TABLA XXV.- Catalizador de Oxido de Cinc. Conversión de butanol a diferentes temperaturas y tiempos espaciales.

Ensayo	T _{reacc.}	F _{Ao} (mol/hr)	W/F _{Ao} g hr mol	X _A				
				tiempo de reacción(min.)				
				0	7,5	22,5	37,5	52,5
Z1	250	1,00	25	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01
Z2	"	0,63	40	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02
Z3	"	0,28	88	0,05	0,05	0,04	0,04	0,02
Z4	300	1,09	23	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05
Z5	"	0,46	55	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13
Z6	"	0,28	90	0,20	0,19	0,17	0,20	0,19
Z7	"	0,19	135	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23
Z8	350	1,00	25	0,35	0,35	0,34	0,34	0,33
Z9	"	0,63	40	0,50	0,60	0,40	0,40	0,30
Z10	"	0,33	75	0,60	0,59	0,58	0,56	0,55
Z11	"	0,26	95	0,63	0,62	0,60	0,58	0,57
Z12	"	0,18	140	0,66	0,65	0,63	0,67	0,59

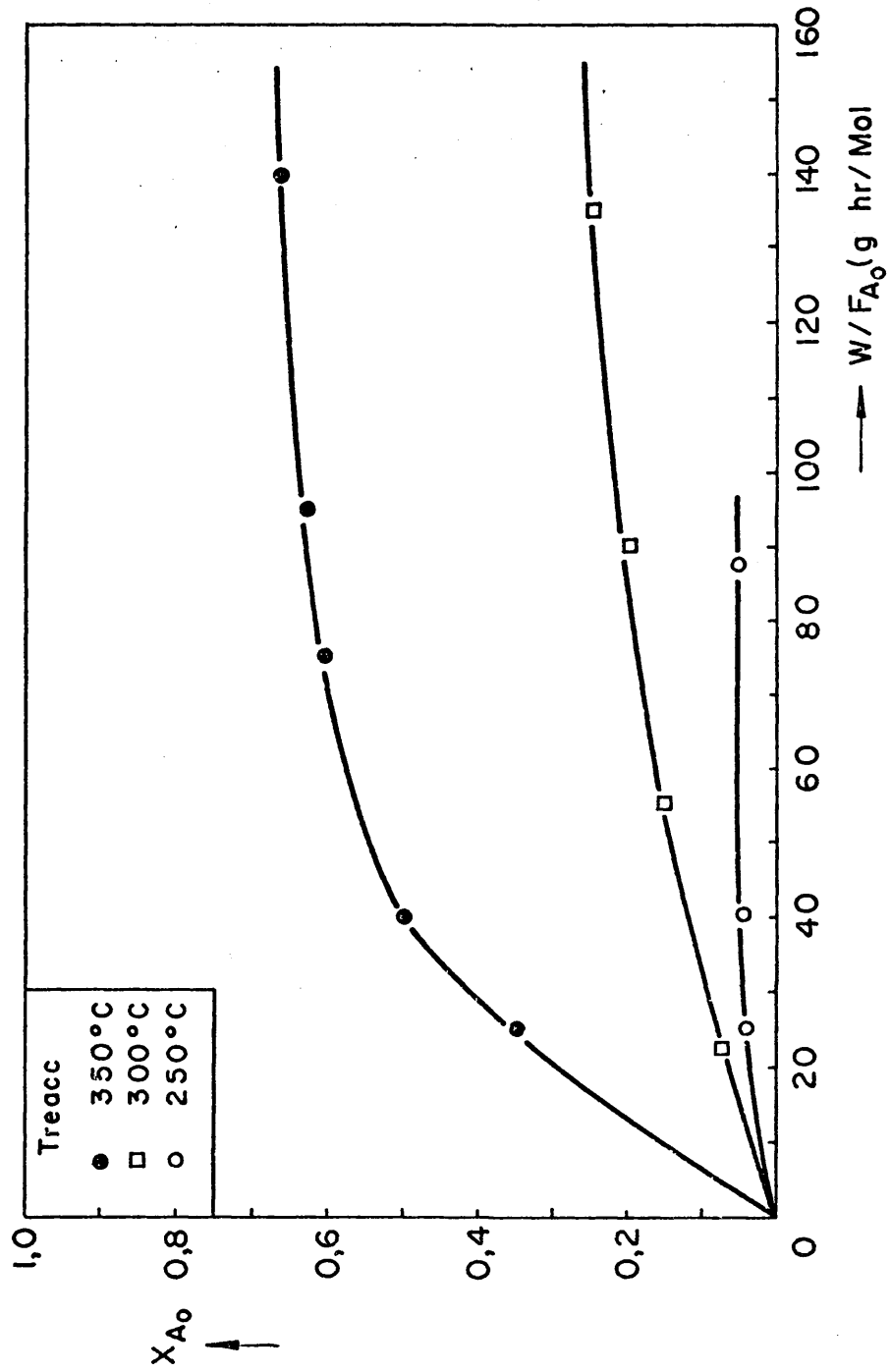


Fig. 78 — Catalizador de oxido de cinc. Conversión de butanol en lecho fijo.

6.2.5.- Conversión de butanol en lecho fluidizado sin pantallas.

Con objeto de evaluar la eficacia de las pantallas que serían probadas más tarde, se realizaron cuatro ensayos conducentes a determinar la conversión de butanol en lecho fluidizado sin pantallas para varios valores del tiempo espacial.

La reacción se llevaba a cabo en el reactor descrito en el apartado 3.2 (figura 11). El óxido de cinc se calcinaba "in situ" de acuerdo con las condiciones detalladas en el apartado 6.2.3. Las condiciones de reacción que se mantenían fijas eran:

$$T_{\text{reacción}} = 350^{\circ}\text{C}$$

Relación molar Butanol/Amoniaco en la entrada del reactor : 1/3

Tamaño de partícula : 220 micras (mezcla triple de las fracciones de -320+250, -250+200 y -200+160 micras)

Alimentación butanol : $F_{A_0} = 4,5 \text{ mol/hr}$

Velocidad de trabajo : $U_o = 2 U_{mf}$

En la tabla XXVI se relacionan las restantes condiciones de trabajo, así como las conversiones obtenidas a diferentes tiempos de reacción y otros parámetros medidos durante la operación.

En la figura 79 se muestran las de conversiones alcanzadas en función del tiempo espacial. Las conversiones a tiempo cero se obtuvieron por extrapolación de las curvas de conversiones vs. tiempo de reacción. De manera similar por interpolación, se obtuvieron algunos valores de conversiones a 37,5 minutos.

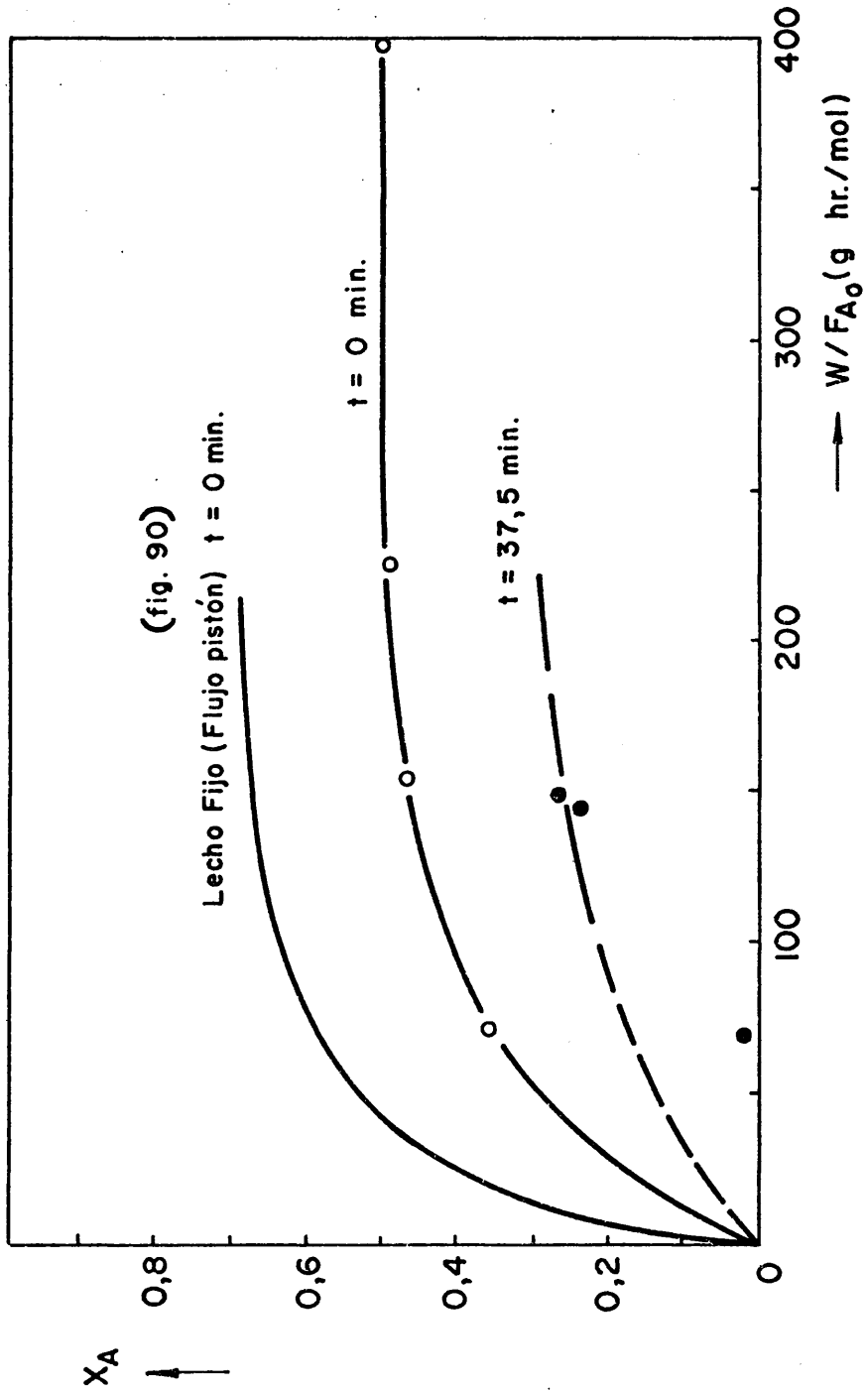


Fig. 79— Catalizador de Oxido de Zinc. Conversión de Butanol en lecho fluidizado sin pantallas.

TABLA XXVI.- Catalizador de Oxido de Cinc. Conversión de butanol en lecho fluidizado sin pantallas

Ensayo	$t_{\text{reacc.}}$ (min.)	W/F_{A_0} ($\frac{\text{g hr.}}{\text{mol}}$)	X_A
OB 1	10	69	0,27
"	25	69	0,09
"	32,5	64	0,06
OB 2	7,5	137	0,38
"	22,5	103	0,20(x)
OB 3	7,5	343	0,45
"	22,5	257	0,35
"	37,5	139	0,23
OB 4	7,5	223	0,48
"	22,5	167	0,31
"	37,5	133	0,25(£)
"	52,5	133	0,21

(x) Fuga por el evaporador

(£) Fuga por la junta plana

6.2.6.- Vida del catalizador

La pérdida de actividad del óxido de cinc observada en los ensayos descritos más arriba, indujo a realizar una serie de experimentos para determinar las posibilidades de reactivación del catalizador usado.

En los cinco experimentos realizados el catalizador era el mismo, que se calcinaba antes de comenzar cada reacción. En la tabla XXVII se relacionan los datos y resulta--

dos obtenidos. Las condiciones de trabajo fijadas eran las siguientes:

Calcinación : Temperatura : 450°C
Caudal ; $N_2 = 15 \text{ cm}^3/\text{seg}$
Tiempo : 5 horas

Reacción : Temperatura : 350°C
Relación molar Butanol/Amoniaco en la entrada del reactor : 1/3
Reactor empleado : Figura 11
Velocidad de los gases : $= 2U_{mf}$

Como el control de la alimentación era muy difícil, el valor de W/F_{A_0} no era exactamente el mismo en todos los experimentos, por lo que se representó la velocidad de reacción media en el lecho, obtenida dividiendo la conversión alcanzada por el tiempo espacial empleado en cada caso. En la figura 80 se ha representado dicha velocidad de reacción media frente al tiempo de uso del catalizador. Después de cada calcinado se observan aumentos de la velocidad de reacción o reactivación del catalizador, con una progresiva disminución posterior, con el tiempo de reacción. Se ha trazado la curva envolvente de los puntos correspondientes a las conversiones iniciales de cada ensayo, después de cada reactivación. Puede observarse que dichas conversiones van decreciendo a medida que prosigue el uso del catalizador.

De la forma de estas curvas, figura 80, se puede deducir que la pérdida de actividad se debe, al menos, a dos fenómenos en paralelo: uno de desactivación física que es reversible mediante la calcinación y otro de envenenamiento químico, irreversible.

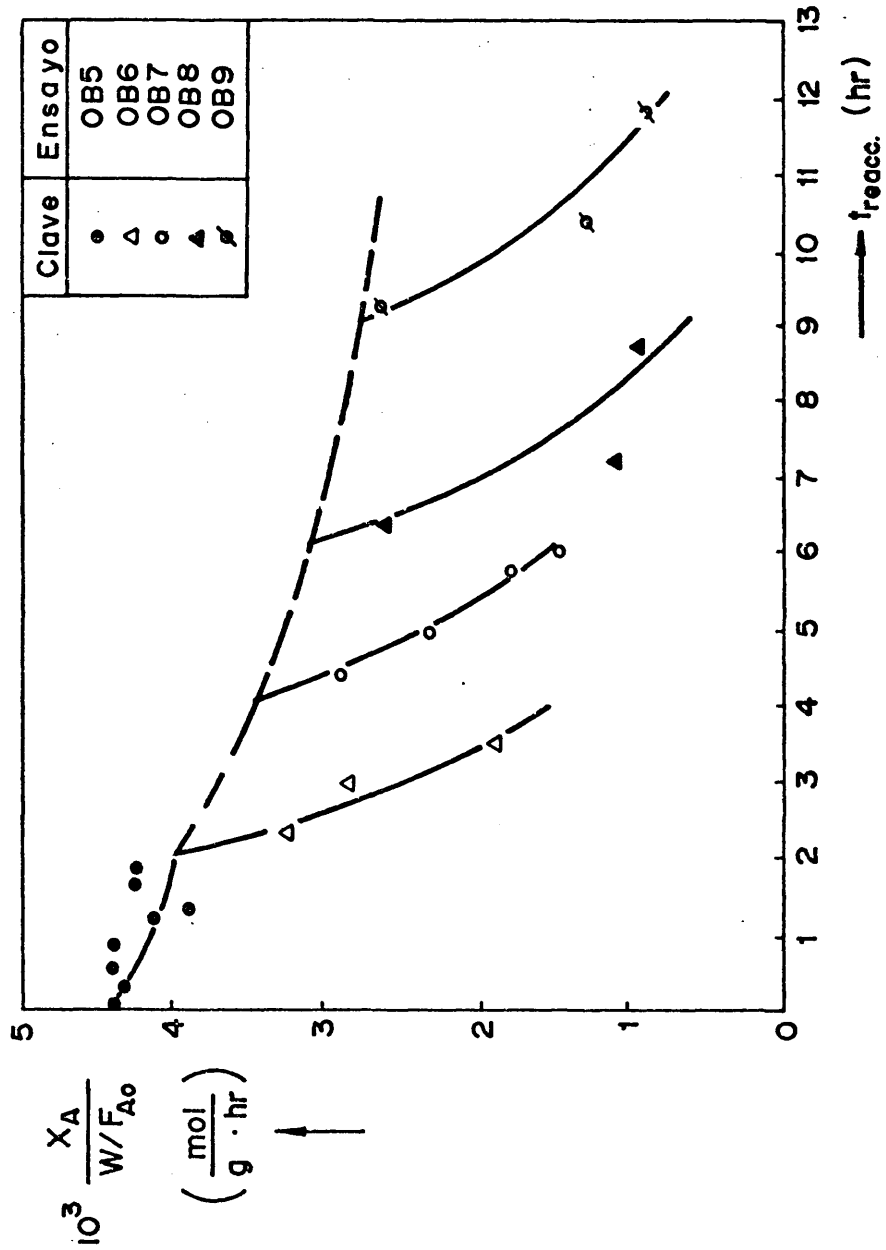


Fig. 80.- Catalizador de Oxido de Cinc. Variación de la actividad catalítica .

TABLA XXVII.- Catalizador de Oxido de Cinc. Envenenamiento y reactivación en lecho fluidizado

Ensayo	$t_{\text{reacc.}}$ (hr)	W/F_{A_0} ($\frac{\text{g hr}}{\text{mol}}$)	A	$A / (W/F_{A_0})$ ($\frac{\text{mol}}{\text{g hr}}$)
Calcinac.	-----	-----	-----	-----
OB 5	0,083	181	0,80	$4,43 \cdot 10^{-3}$
"	0,333	"	0,79	4,40 "
"	0,633	"	0,80	4,42 "
"	0,866	"	0,80	4,42 "
"	1,133	"	0,76	4,20 "
"	1,383	"	0,71	3,92 "
"	1,750	"	0,77	4,27 "
"	2,000	"	0,77	4,27 "
Calcinac.	-----	-----	-----	-----
OB 6	2,383	170	0,56	$3,32 \cdot 10^{-3}$
"	3,000	"	0,49	2,88 "
"	3,500	"	0,34	1,99 "
"	4,000	"	0,26	1,56 "
Calcinac.	-----	-----	-----	-----
OB 7	4,500	170	0,50	$2,94 \cdot 10^{-3}$
"	5,000	"	0,40	2,35 "
"	5,500	"	0,30	1,72 "
"	6,000	"	0,25	1,45 "
Calcinac.	-----	-----	-----	-----
OB 8	6,250	125	0,26	$2,67 \cdot 10^{-3}$
"	7,250	"	0,14	1,11 "
"	8,750	"	0,12	0,96 "
Calcinac.	-----	-----	-----	-----
OB 9	9,250	125	0,34	$2,65 \cdot 10^{-3}$
"	10,250	"	0,16	1,26 "
"	11,75	"	0,12	0,98 "

6.3.- ELECCION DEL CATALIZADOR

En la tabla XXVIII se relacionan las principales características observadas en los dos catalizadores ensayados. La elección se hizo en función de las ventajas y desventajas que tenía cada uno. Si bien la magnetita tenía la ventaja de su dureza y resistencia mecánica a la fluidización, tenía la enorme desventaja, en las circunstancias en que se realizaba el presente trabajo, de necesitar un enorme gasto de hidrógeno en su reducción. Este aspecto fué el que determinó la elección del catalizador de óxido de cinc para los ensayos en lecho fluidizado con pantallas.

TABLA XXVIII.- Ventajas y desventajas de los catalizadores de magnetita y de óxido de cinc.

	Magnetita	Oxido de Cinc
Pastillado	-----	500-700 atm.
Molienda	Difícil	Fácil
Tamizado	Normal	Normal
Gasto en tratamiento		
Previo	Alto	Bajo
Resistencia Mecánica	Alta	Media
Precio materia Prima	Medio	Bajo
Actividad	Alta	Alta
Selectividad en PrCN.....	Alta	Alta
Vida	Corta	Corta

7.- ESTUDIOS EN EL REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO CON PANTALLAS

El estudio en el reactor de lecho fluidizado con pantallas comprende las siguientes partes:

- a) Influencia del número de cilindros y de la altura de colocación de una sola fila de cilindros.
- b) Ensayos con pantallas de más de una fila

Posteriormente, apartado 8, se compararon los criterios obtenidos en el lecho bidimensional sin reacción química con los obtenidos en el lecho cilíndrico con reacción química.

7.1.- CONDICIONES EXPERIMENTALES Y PANTALLAS EMPLEADAS

7.1.1.- Condiciones de trabajo

Los ensayos se realizaron en el mismo reactor (ver figura 11) de lecho fluidizado con que se había estudiado la conversión del butanol con óxido de cinc y sin pantallas, apartado 6. Se mantenían constantes las siguientes condiciones:

Temperatura de reacción	350°C
Peso de catalizador, W	585 g
Tamaño medio de partícula	220 micras
Intervalo de tamaños	mezcla al 33% de las fracciones: -320+250; -250+200 y -200+160 micras.
Relación molar de entrada butanol:	
Amoniaco	1/3

La alimentación de butanol era de 4,5 mol/hr, si bien en la práctica era muy difícil controlarla y este valor es un valor medio.

La altura del lecho en estado fluidizado era de unos 20-23 cm, es decir, 4-5 veces el diámetro del reactor.

La velocidad reducida de trabajo era siempre aproximadamente igual a 2, consiguiéndose así un porcentaje de lecho fluidizado del 85-95%.

El catalizador empleado en todos los ensayos era calcinado previamente durante 5 horas a 450°C, y con un caudal de nitrógeno de unos 15 cm³/seg, en el mismo reactor.

Las muestras de los productos de reacción se extraían cada 15 minutos. Cada ensayo duraba normalmente una hora.

7.1.2.- Pantallas

En el apartado 3.2 se describen las características de los elementos que formaban a las pantallas utilizadas, cuyas claves de dimensionado se relacionan en la tabla XXIX. Para mayor claridad se ha representado, figura 81, un esquema de cada una de ellas.

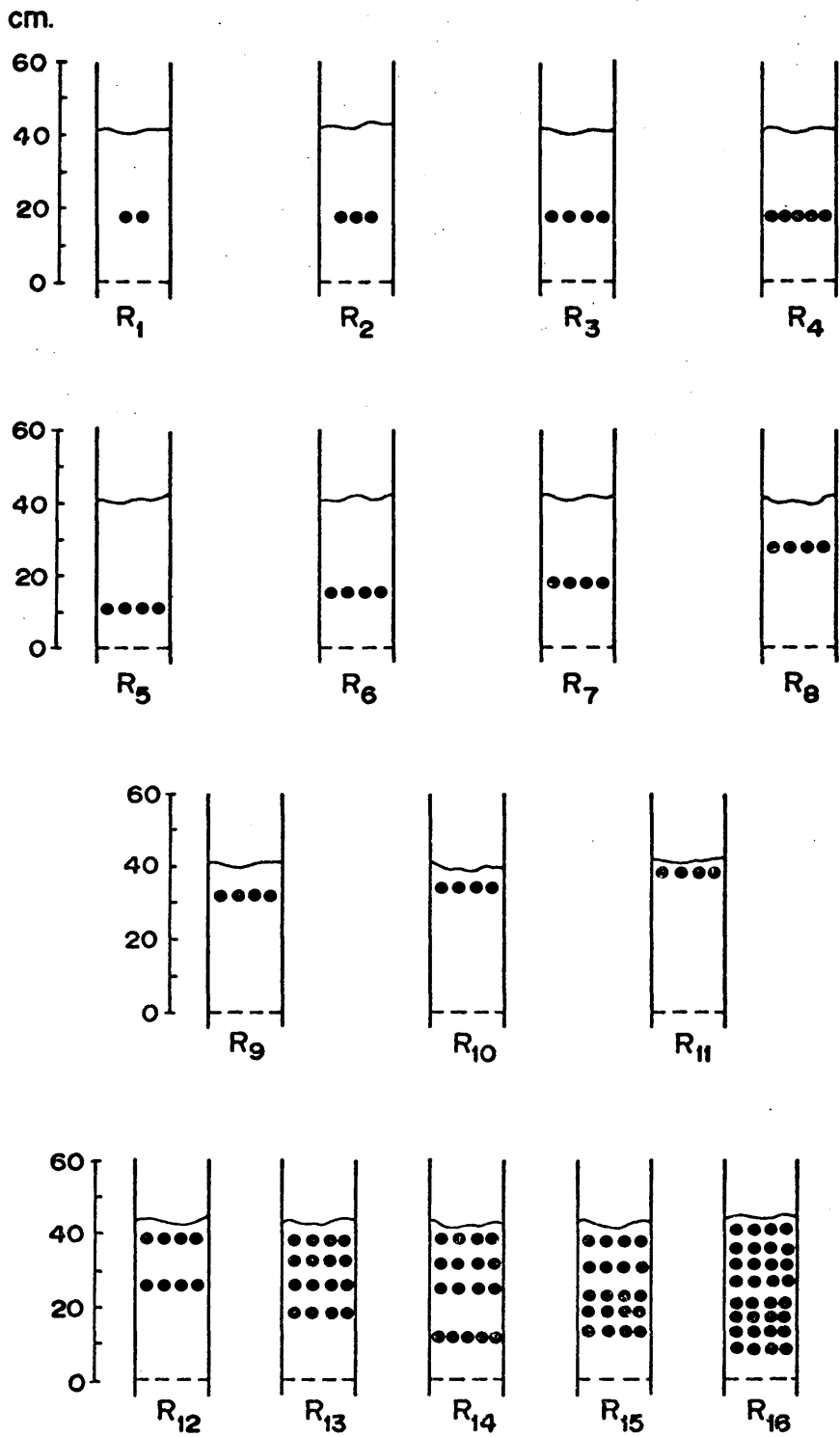


Fig. 81.- Esquema de las pantallas.

100

TABLA XXIX.- Clave de las pantallas

Nota: Ver definición de la clave en el apartado 3.1 y figura 7

PANTALLA	
R 1	7-F-1-2-1,9-9
R 2	7-F-1- 3-1,35-9
R 3	7-F-1-4-1,3-9
R 4	7-F-1-5-1-9
R 5	7-F-1-4-1,3-5,5
R 6	7-F-1-4-1,3-7,5
R 7	7-F-1-4-1, 3-9
R 8	7-F-1-4-1,3-13,5
R 9	7-F-1-4-1,3-16
R 10	7-F-1-4-1,3-17
R 11	7-F-1-4-1,3-19,5
R 12	7-F-2-4-1,3-13-19,5
R 13	7-F-2-4-1,3-9,5-13-16,5-19
R 14	7-F-4-4-1,3-6-12,5-16-19,5 (£)
R 15	7-F-5-4-1,3-6,5-9,5-11,5-15,5-19
R 16	7-F-8-4-1,3-4,5-7-9-10,5-13,5-16-18-20,5

(£) En la pantalla R 14 la fila situada a 6 cm de altura tenía 5 cilindros (separados 1 cm).

En la tabla XXX se indican los parámetros reducidos de las pantallas de una sola fila. Su definición se daba en el apartado 5.1.

TABLA XXX.- Pantallas de una fila de cilindros. Parámetros reducidos de diseño

Pantalla	S _{lib} (%)	H' _D / H _f	\bar{S}_h (cm)
R 1	64,0	0,42	1,30
R 2	50,5	0,42	0,81
R 3	40,0	0,42	0,50
R 4	28,0	0,42	0,30
R 5	40,0	0,26	0,50
R 6	40,0	0,38	0,50
R 7	40,0	0,42	0,50
R 8	40,0	0,62	0,50
R 9	40,0	0,74	0,50
R 10	40,0	0,83	0,50
R 11	40,0	0,87	0,50

TABLA XXXI.- Conversiones obtenidas con pantallas de una fila de cilindros (variación del número de cilindros).

Pantalla	W/F _{Ao} (g hr/mol)	X _A Tiempo de reacción(min.)				
		7,5	22,5	37,5	52,5	
R 1	206	0,43				(x)
"	152		0,38			
"	142			0,31		
"	114				0,28	
R 2	206	0,39				
"	206		0,39			
"	157			0,31		
"	141				0,26	
R 3	243	0,49				
"	205		0,42			
"	141			0,32		
"	149				0,27	
R 4	206	0,49				(£)
"	176		0,43			
"	149			0,42		
"	137				0,42	

(x) Se observó un aumento de peso del catalizador, así como un ennegrecimiento del mismo.

(£) Se obtuvo un 7% de butilamina

TABLA XXXII.- Conversiones obtenidas con pantallas de una fila de cilindros (variación de la altura de colocación)

Pantalla	W/F _{Ao} (g hr/mol)	X _A tiempo de reacción(min.)				
		7,5	22,5	37,5	52,5	
R 5 " "	335 243 141	0,41	0,44	0,29	0,19	(&)
R 6 " " "	191 131 122 120	0,32	0,35	0,34	0,31	(£)
R 7 " " "	243 205 141 149	0,49	0,42	0,32	0,27	
R 8 " "	334 149 141 134	0,55	0,52	0,43	0,38	(x)
R 9 " " "	206 191 134 146	0,38	0,32	0,33	0,32	
R 10 " " "	185 140 130 132	0,33	0,46	0,46	0,40	
R 11 " " "	268 158 122 124	0,41	0,42	0,36	0,33	(ç)

(&)(£) Se observó que había partículas segregadas (las de mayor tamaño en la parte inferior del lecho)

(x) Se dejó abierta en parte la alimentación de N₂

(ç) La última muestra se sacó cuando la temperatura era de unos 370°C, aumento debido a acabarse el amoniaco.

7.2.- CONVERSIONES DE BUTANOL EN EL LECHO CON PANTALLAS

En las tablas XXXI, XXXII y XXXIII se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados con las diferentes pantallas descritas en el apartado 7.1.2 y en las condiciones experimentales citadas en el apartado 7.1.1.

TABLA XXXIII.- Conversiones obtenidas con pantallas de dos o más filas de cilindros.

Pantalla	W/F _{Ao} (g hr/mol)	X _A			
		tiempo de reacción(min.)			
		7,5	22,5	37,5	52,5
R 12	178	0,35			
"	134		0,34		
"	149			0,34	
"	134				0,33
R 13	382	0,40			
"	134		0,38		
"	134			0,37	
"	116				0,35
R 14	219	0,38			
"	139		0,36		
"	128			0,43	
"	101				0,39
R 15	213	0,49			
"	139		0,46		
"	115			0,42	
"	111				0,37
R 16	178	0,49			
"	139		0,44		
"	149			0,43	
"	131				0,39

7.2.1.- Elaboración de datos

Para el estudio del efecto de las pantallas, y debido a que la conversión y el tiempo espacial variaban con el tiempo de reacción, se adoptó el criterio de utilizar las conversiones obtenidas en el minuto 37,5 y referidas a un tiempo espacial de 150 g hr/mol. Esto se hizo de la manera siguiente:

a) Cálculo de las conversiones y tiempos espaciales a 37,5 min. de reacción: Los datos experimentales de conversiones y tiempos espaciales, tablas XXXI, XXXII y XXXIII, se representan frente al tiempo de reacción según se esquematiza en la figura 82, se ajustan a rectas, por mínimos cuadrados, y se calculan gráficamente los valores de X_A y W/F_{A0} correspondientes a 37,5 minutos.

b) Cálculo de las conversiones a 37,5 min. de reacción y tiempo espacial de 150 g hr/mol: Las conversiones y tiempos espaciales obtenidos según el método descrito más arriba se representan en papel milimetrado junto con las curvas correspondientes al lecho fijo (flujo ideal de tipo de pistón) y al lecho fluidizado sin pantallas, figura 83. Trazando paralelas medias a dichas curvas en el tramo comprendido entre valores de tiempos espaciales de 120 y 170 g hr/mol; se obtienen los valores interpolados de conversiones correspondientes al tiempo espacial de 150 g hr/mol de la forma gráfica esquematizada en la figura 83. Los valores así calculados se muestran en la tabla XXXIV.

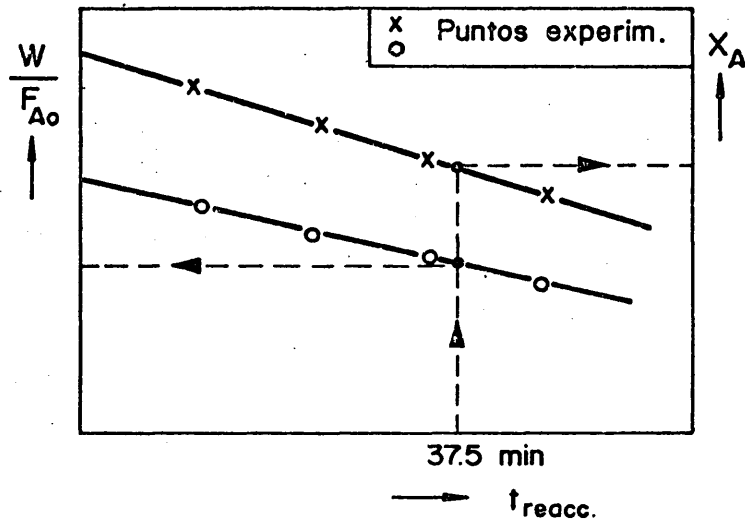


Fig. 82.- Ejemplo de cálculo de X_A y W/F_{A_0} a $t_{reacc.} = 37,5$ min.

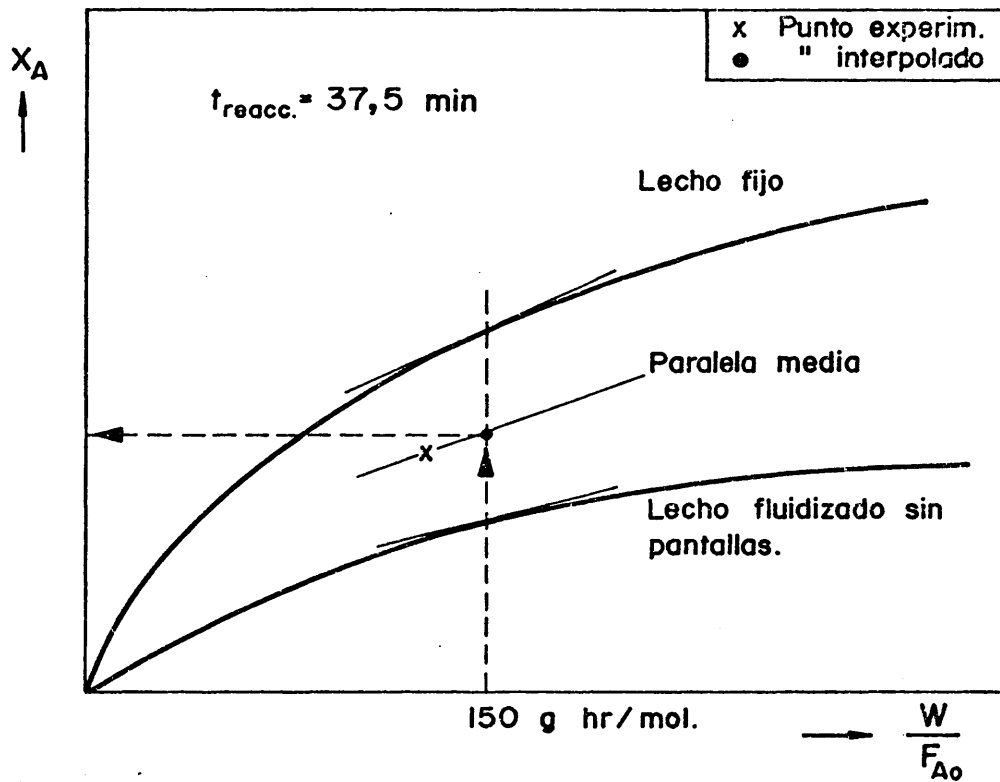


Fig. 83.- Ejemplo de cálculo de conversiones a 37,5 min. de reacción y $W/F_{A_0} = 150$ g hr/mol

TABLA XXXIV.- Conversiones y tiempos espaciales a 37,5 min. (obtenidos por interpolación)

Pantalla	W/F_{A_0} (g hr/mol)	X_A	X_A (a 37,5min. y $W/F_{A_0} = 150$)
R 1	139	0,32	0,33
R 2	165	0,31	0,30
R 3	167	0,34	0,32
R 4	155	0,43	0,42
R 5	173	0,29	0,27
R 6	130	0,33	0,35
R 7	167	0,34	0,32
R 8	159	0,44	0,43
R 9	157	0,33	0,32
R 10	138	0,42	0,43
R 11	145	0,37	0,38
R 12	145	0,34	0,34
R 13	152	0,37	0,38
R 14	129	0,40	0,42
R 15	128	0,42	0,44
R 16	133	0,43	0,45

7.3.- EFICACIA DE LAS PANTALLAS

7.3.1.- Definiciones

En el apartado 5.5.1 se definieron varios tipos de eficacia a partir de medida de tamaños de burbuja, expansión del lecho, etc. Por otro lado y según el método experimental descrito en el apartado 2.4.6, una forma de apreciar el acercamiento del flujo del gas al de tipo de pistón es comparar las conversiones del reactor de lecho fluidizado con las del reactor de lecho fijo. Suponiendo que dicho acercamiento es debido a la rotura de las burbujas, una pantalla será tanto más eficaz cuanto más acer-- que la conversión del lecho fluidizado a la ideal (flujo de pistón).

A partir de estos razonamientos se definió una "eficacia de conversión", E' , de la manera siguiente:

43.

$$(E')_{\text{pant. p}} = \frac{(X_A)_{\text{pant. p}} - (X_A)_{\text{lecho fluidizado sin pant.}}}{(X_A)_{\text{lecho fijo}} - (X_A)_{\text{lecho fluid. sin pant.}}}$$

donde todas las conversiones deben haber sido obtenidas en las mismas condiciones de actividad del catalizador (tiempo de reacción) y de tiempo espacial. Esta eficacia puede variar entre cero (efecto nulo) y uno (eficacia de una pantalla que consiguiera obtener un flujo del gas tipo pistón). En la figura 84 se muestra claramente como se calcula practicamente esta eficacia.

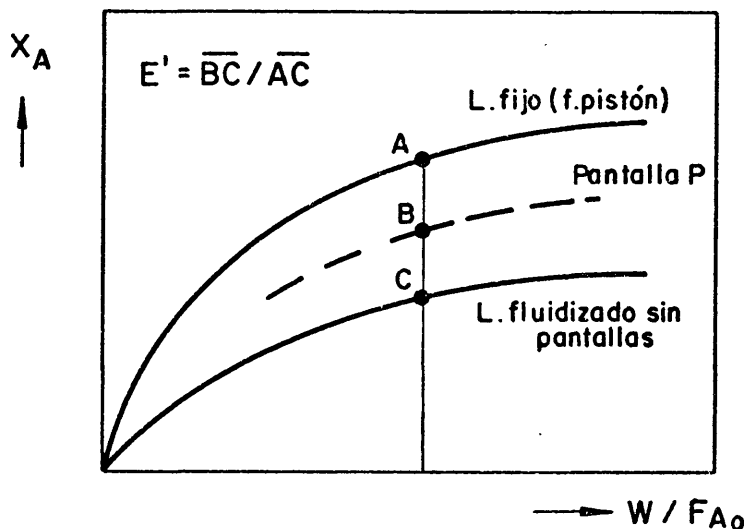


Fig. 84- Ejemplo de cálculo de la eficacia de conversión.

7.3.2.- Resultados experimentales

En la figura 85 se muestra la representación de las conversiones de butanol en lecho fijo, en lecho fluidizado sin pantalla y en lecho fluidizado con las pantallas ensayadas (ver tablas XXV, XXVI, XXXV y figura 79).

Con dicha representación, y según la ecuación 43 se calcularon las eficacias de conversión de las pantallas. Los valores obtenidos se muestran en la tabla XXXVI.

TABLA XXXVI.- Eficacias de conversión de las pantallas.

Pantalla	E'	Pantalla	E'
R 1	0,15	R 9	0,13
R 2	0,06	R 10	0,39
R 3	0,13	R 11	0,25
R 4	0,36	R 12	0,17
R 5	0,01	R 13	0,23
R 6	0,19	R 14	0,36
R 7	0,13	R 15	0,41
R 8	0,39	R 16	0,42

7.4.- CORRELACIONES OBTENIDAS

La eficacia de conversión está relacionada directamente con los parámetros de diseño de las pantallas, número de cilindros, altura de colocación y número de filas. Los parámetros reducidos utilizados se definen en el apartado 5.1. La escasez y dispersión de los puntos experimentales obligó a hacer algunas suposiciones para realizar los ajustes a determinadas líneas.

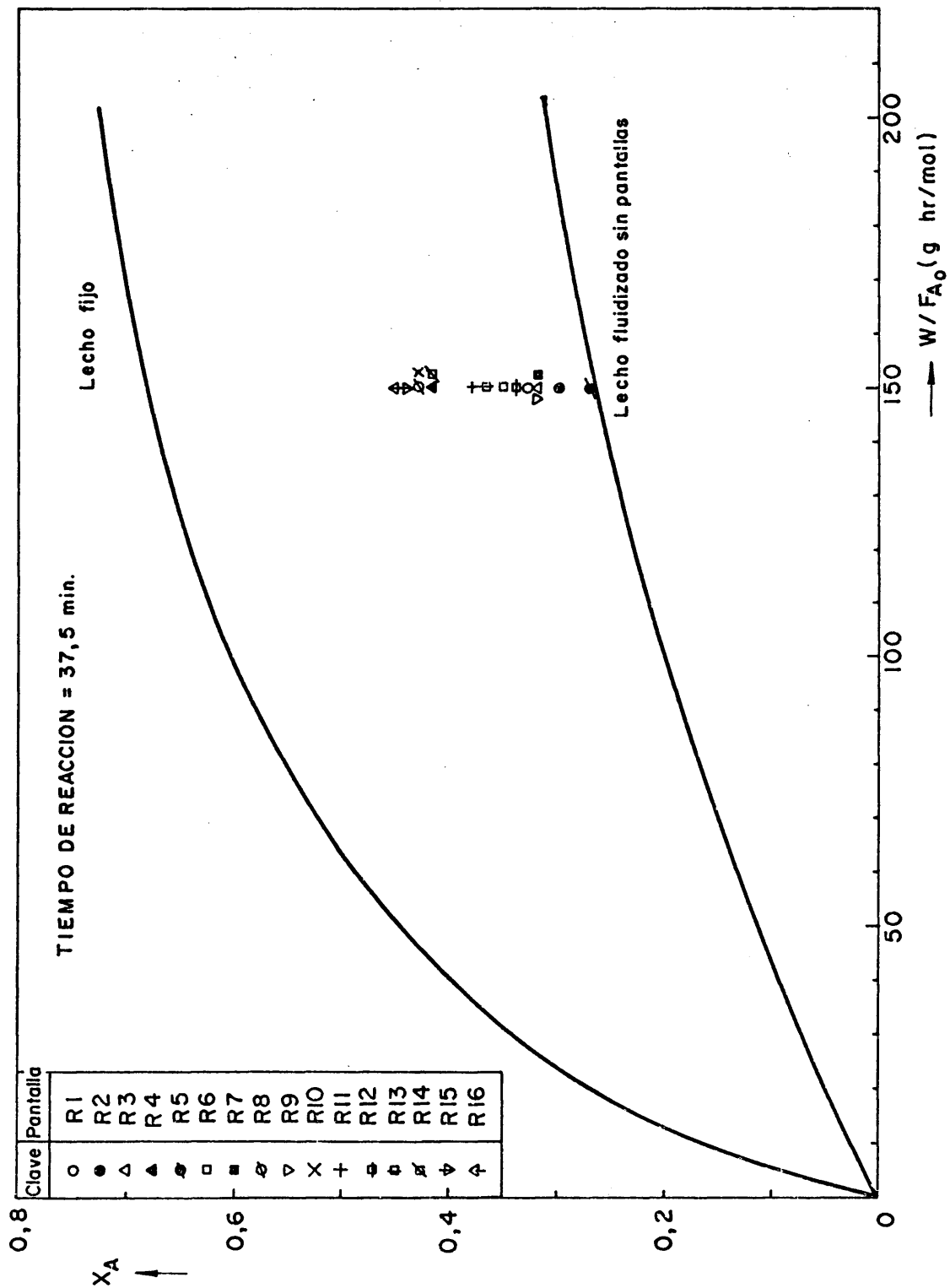


Fig. 85— Conversiones de butanol en lecho fijo, lecho fluidizado sin pantallas y lecho fluidizado con pantallas.

7.4.1.- Variación de la eficacia de conversión con el número de cilindros de una pantalla formada por una fila

En la figura 86 se muestra la variación de la eficacia de conversión con la superficie libre relativa de pantallas formadas por una sola fila de cilindros colocadas siempre a alturas relativas de 0,42.

El ajuste de los puntos se hizo considerando que para $S_{\text{libre}} = 100\%$ (pantalla inexistente), la eficacia de conversión debía ser nula.

A pesar de la dispersión puede observarse un aumento de la eficacia de conversión al disminuir la superficie libre relativa de la pantalla. Esto puede atribuirse a la rotura de las burbujas, tanto mayor cuanto menor superficie de paso exista.

7.4.2.- Variación de la eficacia de conversión con la altura de colocación de una fila de cilindros

En la figura 87 se muestra la variación de la eficacia de conversión de una pantalla formada por cuatro cilindros (superficie relativa = 40%) con la altura relativa de colocación.

Para ajustar los puntos experimentales se supuso que debía haber un máximo de eficacia cuando la fila estuviera hacia la mitad de la altura del lecho y que cuando la altura relativa de colocación fuera la unidad (querría decir que la fila estaría fuera del lecho) la eficacia sería nula. El hecho de que para alturas relativas de colocación del orden de 0,2 la eficacia de conversión sea nula se puede atribuir a que en --

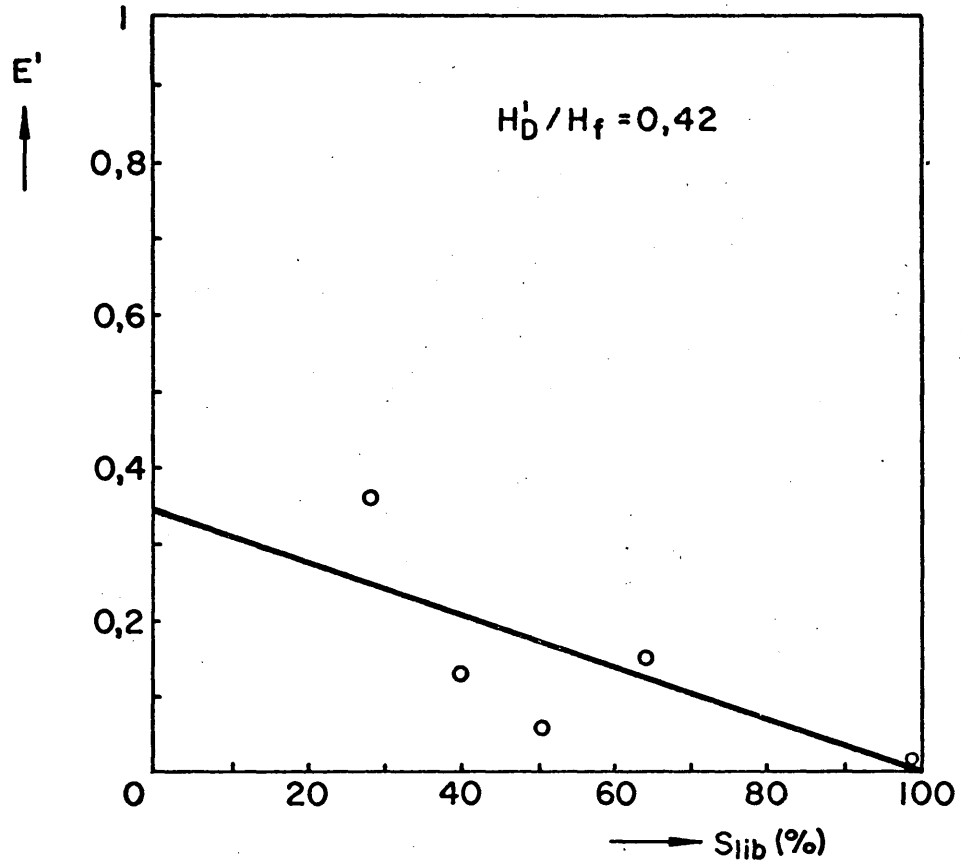


Fig. 86.- Variación de la eficacia de conversión con la superficie libre relativa.

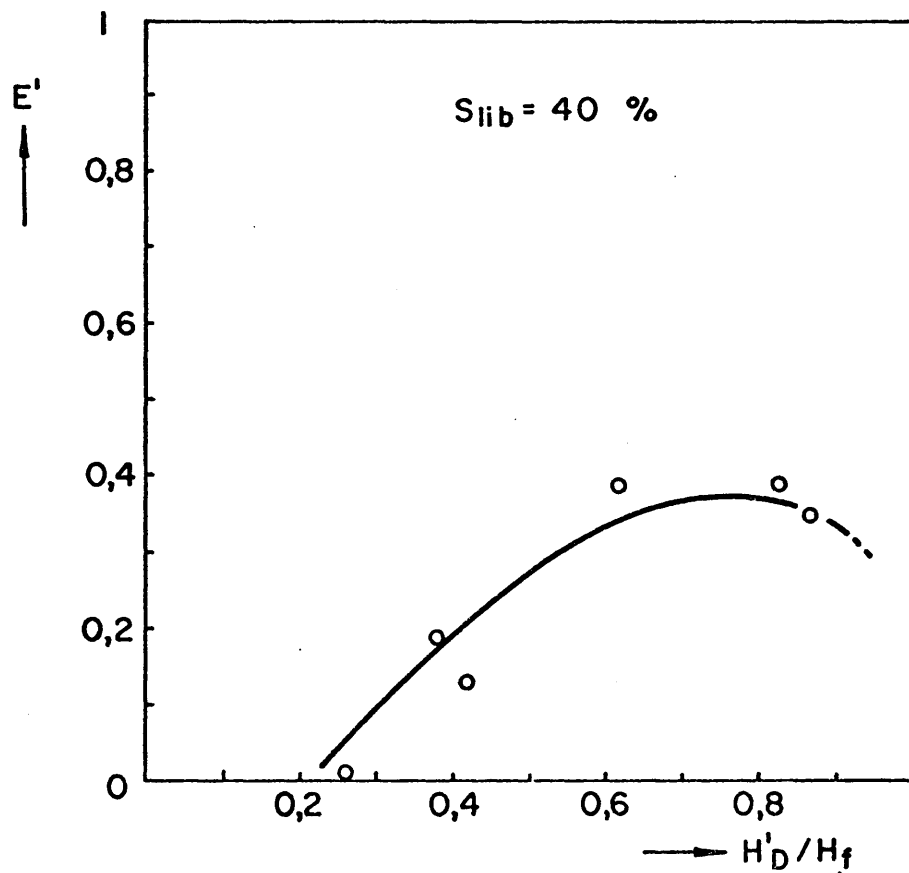


Fig. 87.- Variación de la eficacia de conversión con la altura relativa de colocación

esa zona el lecho solía estar casi siempre fijo o con muy poco movimiento, por lo que allí la influencia de las pantallas en cuanto a rotura de burbujas era despreciable.

7.4.3.- Variación de la eficacia de conversión con el número de filas de cilindros

En la figura 88 se muestra la variación de la conversión con el número de filas de cilindros que constituían la pantalla. El ajuste se ha realizado teniendo en cuenta que para cero filas (pantalla inexistente) la eficacia sería cero, y que el aumento de eficacia debe tender a un valor máximo correspondiente a llenar todo el lecho de filas de cuatro cilindros. Este valor máximo no sería la unidad, ya que estas filas de cilindros no podrían reducir el tamaño de burbuja a cero, es decir, no conseguirían un flujo de pistón.

7.4.4.- Relación entre la eficacia de conversión y la eficacia global

Las eficacias de conversión y globales definidas en este trabajo (apartados 5.5.1 y 7.3.1), son magnitudes relacionadas intimamente con el tamaño de burbuja medio en el lecho. Por ello era de esperar que entre ellas hubiera cierta relación. Para compararlo, se calcularon gráficamente las eficacias globales de las pantallas (ver apartado 5.5.2 y figura 63), a partir de las distribuciones de tamaños de burbuja calculadas según el método descrito en el apartado 5.6.1, y se representaron frente a las respectivas eficacias de conversión. En la tabla XXXVII se relacionan los valores de ambas eficacias y en la figura 90 se muestra la representación citada.

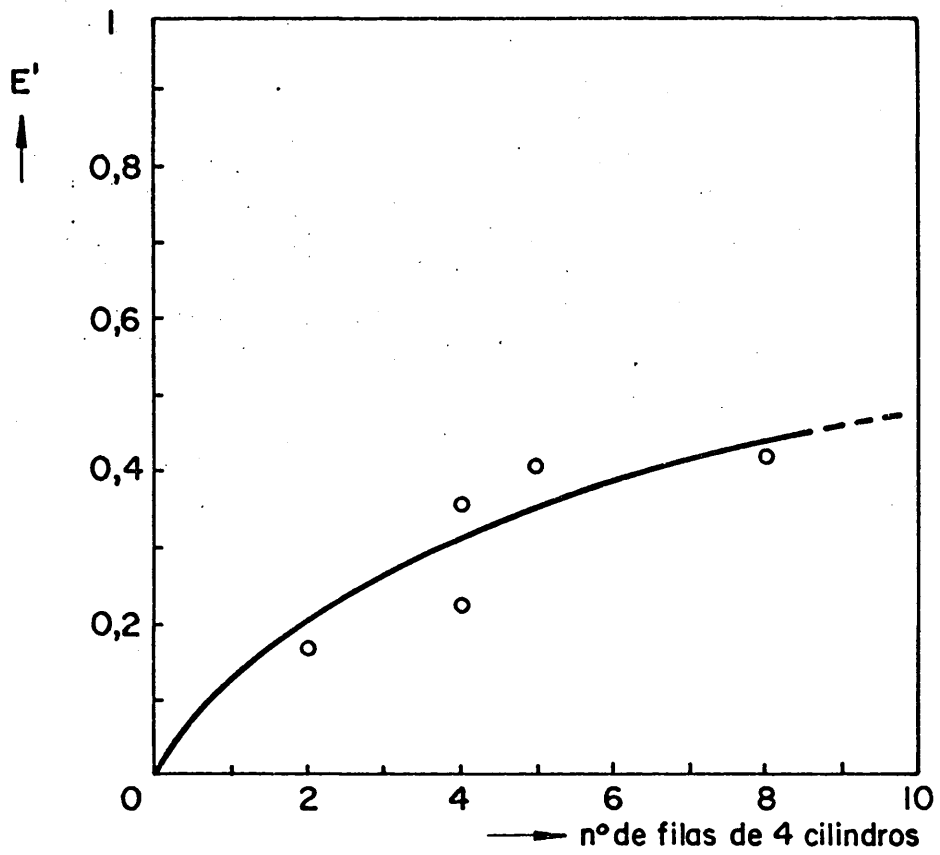


Fig. 88— Variación de la eficacia de conversión con el número de filas

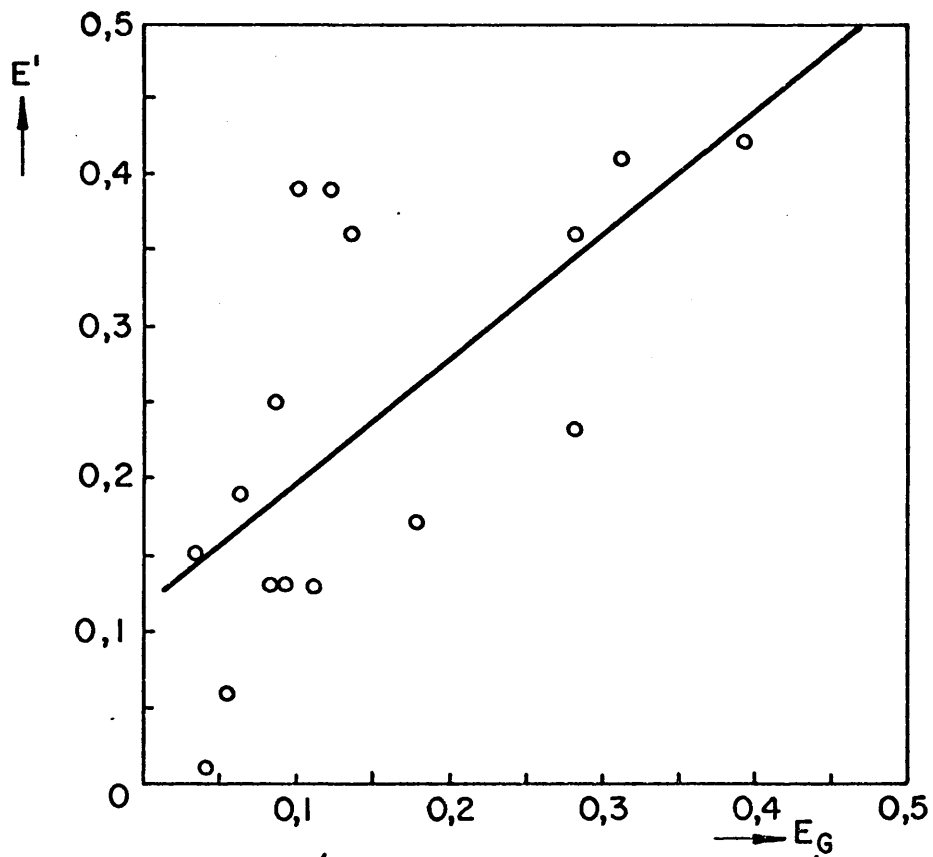


Fig. 89— Relación entre la eficacia de conversión y la eficacia global.

Los puntos se ajustaron, por mínimos cuadrados, a una recta; la ecuación de dicha recta era:

$$E' = 0,81 E_G + 0,12 \quad 44.$$

Esta ecuación tiene un enorme interés, ya que, dentro de las limitaciones del presente trabajo, permite predecir la conversión que se obtendrá al introducir una pantalla.

En efecto, sustituyendo en la ecuación 44 los valores de E' y de E_G dados por las ecuaciones 43 y 40 respectivamente, se obtiene:

$$\begin{aligned} & \frac{(X_A)_{\text{pant. "P"}} - (X_A)_{\text{lecho fluid. sin pantalla}}}{(X_A)_{\text{lecho fijo}} - (X_A)_{\text{lecho fluid. sin pant.}}} = \\ & = 0,81 \left(1 - \frac{(d_b)_{\text{pant. "P"}}}{(\bar{d}_b)_{\text{sin pant.}}} \right) + 0,12 \end{aligned}$$

llamando a:

$$(X_A)_{\text{lecho fluidizado sin pantallas}} = F$$

$$(X_A)_{\text{lecho fijo con flujo de pistón}} = f$$

$$(\bar{d}_b)_{\text{con la pantalla "P"}} = d$$

$$(\bar{d}_b)_{\text{sin pantallas}} = D'$$

y simplificando, se obtiene:

$$(X_A)_{\text{pant. "P"}} = d \frac{0,81}{D'} (F - f) + 0,93 f + 0,07 F \quad 45.$$

Con esta ecuación, y conociendo F , f , d y D' , puede estimarse qué conversión se obtendría en el reactor de lecho fluidizado con la pantalla "P". En el apartado 8 se describe de manera más detallada la utilización de esta ecuación en el diseño de pantallas formadas por cilindros horizontales.

TABLA XXXVII.- Eficacias de conversión y globales

Pantalla	E'	E_G
R 1	0,15	0,03
R 2	0,06	0,05
R 3	0,13	0,08
R 4	0,36	0,13
R 5	0,01	0,04
R 6	0,19	0,06
R 7	0,13	0,08
R 8	0,39	0,12
R 9	0,13	0,11
R 10	0,39	0,10
R 11	0,25	0,08
R 12	0,17	0,18
R 13	0,23	0,28
R 14	0,36	0,28
R 15	0,41	0,31
R 16	0,42	0,39

8.- METODOLOGIA DEL DISEÑO DE PANTALLAS FORMADAS POR ORDENACIONES DE TUBOS HORIZONTALES

Debe tenerse en cuenta que la metodología que se propone tiene importantes limitaciones en el sentido de que los datos cuantitativos que se manejan son, en parte, obtenidos en condiciones de trabajo restringidas a casos muy particulares. No ocurre lo mismo con las bases de la metodología, perfectamente aplicables y desarrollables en trabajos posteriores con diferentes sistemas, de distinta naturaleza o mayor escala.

El método consta de las siguientes etapas fundamentales:

- 1.- Estudios previos: Tienen por objeto obtener información sobre los siguientes aspectos del lecho fluidizado:
 - a) Velocidades características del sólido
 - b) Crecimiento de las burbujas con la altura en lecho fluidizado sin pantallas
 - c) Influencias de las condiciones generales de trabajo en la fluidodinámica del sistema
 - d) Conversión en lecho fijo y lecho fluidizado sin pantallas

- 2.- Eficacias de choque: Mediante ensayos con pantallas formadas por una sola fila de tubos y variando el diámetro y separación de los mismos se pueden encontrar relaciones entre la eficacia de choque y los parámetros de diseño de la pantalla, relaciones del tipo de la ecuación 32.

- 3.- Eficacias globales: A partir de las ecuaciones que relacionan a la eficacia de choque con los parámetros de choque y las condiciones de trabajo se calculan las eficacias globales

de las pantallas, prediseñadas teóricamente, según el método descrito en el apartado 5.6.1. A partir de la ecuación 40 se puede calcular el tamaño de burbuja medio con las diferentes pantallas.

4.- Eficacias de conversión: A través de algunos ensayos con pantallas prediseñadas (variando el número de filas que forman a las pantallas), encontrar la relación entre eficacia de conversión y global, ecuaciones del tipo de la 44.

5.- Conversiones: Finalmente, y con ecuaciones del tipo de la 65, ligar la conversión en lecho fluidizado con pantallas con los parámetros de diseño de las mismas.

En la práctica pueden surgir dos caminos diferentes de aplicar esta metodología:

- a) Dados los parámetros de diseño, predecir la conversión química que se obtendrá.
- b) Dada una conversión deseada, diseñar la pantalla -- apropiada

En el primer caso se procedería de la siguiente manera:

- 1.- Cálculo del tamaño de burbuja medio en el lecho con la pantalla siguiendo el método descrito en el apartado 5.6.1.
- 2.- Cálculo de la conversión a partir de la ecuación 45 (es necesario conocer datos de conversión en lecho fijo y fluidizado sin pantallas).

En el segundo caso el método a seguir sería:

- 1.- Cálculo del tamaño de burbuja medio necesario a partir de la ecuación 45 (hay que conocer el tamaño de burbuja medio en el lecho sin pantallas, ecuaciones 13 y 14, y datos de conversión en lecho fijo y en lecho fluidizado sin pantallas).
- 2.- Estimar los parámetros de diseño según el método dado en el apartado 5.7.3.

9.- CONCLUSIONES

El objetivo final de este trabajo era crear una metodología del diseño de pantallas internas.

Aunque el diseño de pantallas forma parte del diseño general del sistema fluidizado, este trabajo se orientó fundamentalmente al estudio de aquél, si bien, en algunas ocasiones se trataron otros aspectos tales como influencias de las placas distribuidoras, de las condiciones de trabajo, etc.

Para el estudio se eligió un sólo tipo de elemento de construcción de pantallas: tubos horizontales. El empleo de otros tipos no habría permitido profundizar lo deseado en la investigación.

Los datos obtenidos pueden tener ciertas limitaciones a la hora de aplicarlos a sistemas o escalas diferentes a los estudiados; sin embargo, la metodología que se propone sí tiene una aplicabilidad mucho más amplia.

La investigación desarrollada permite establecer las conclusiones siguientes:

1.- LECHOS FLUIDIZADOS SIN PANTALLAS

1.a) La distribución de tamaños de burbuja en lechos fluidizados bidimensionales sin pantallas puede representarse aceptablemente ($D < 30$ cm) por ecuaciones del tipo general:

$$d_b = p H_D + q$$

en las que p y q son coeficientes dependientes de las condiciones de trabajo y de la geometría del equipo.

1.b) La expansión del lecho sin pantallas varía con la velocidad reducida de trabajo según la expresión:

$$\Delta H_L = a' U_R + b' \quad \text{para } 1 \leq U_R \leq 3$$

Los coeficientes a' y b' son dependientes, fundamentalmente, del tipo de distribuidor y del tamaño de partícula -- del sólido.

2.- LECHOS FLUIDIZADOS CON PANTALLAS

2.a) La presencia de cualquier elemento en el interior del lecho modifica, en mayor o menor grado, la distribución de tamaños de burbuja y la conversión química.

2.b) Los diferentes efectos producidos por la presencia de pantallas pueden representarse cuantitativamente por medio de magnitudes llamadas genericamente "eficacias". Cada tipo de eficacia se define según la naturaleza del efecto correspondiente. Así, la eficacia de choque de una fila de tubos horizontales es una medida de la rotura que experimentan las burbujas que chocan contra dicha fila; la eficacia global de una pantalla mide la disminución del tamaño de burbuja medio en el lecho con respecto al del mismo sin pantallas; la eficacia de conversión se define en función del acerca-

miento de la conversión obtenida en un lecho con pantallas al valor máximo, dado por la conversión que se habría obtenido si todo el gas pasara en flujo de pistón.

2.c) Las pantallas formadas por una sola fila de tubos horizontales tienen dos parámetros fundamentales de diseño: superficie libre relativa (proporcional al diámetro y separación de los tubos) y altura relativa de colocación (proporcional a la distancia del distribuidor a la pantalla).

2.d) Al aumentar el número de tubos que forman una pantalla de una sola fila aumenta la conversión química y disminuyen el tamaño de burbuja medio y la expansión del lecho. La altura óptima de colocación de estas pantallas es $1/2 H_f$.

2.e) Los parámetros fundamentales de las pantallas formadas por dos o más filas de tubos horizontales son: número de filas y colocación de las mismas.

2.f) En general, hay un aumento de eficacia global y de conversión al aumentar el número de filas que constituyen la pantalla.

2.g) Para pantallas formadas por 2 ó 3 filas de tubos hay un valor óptimo de la distancia vertical de separación: $0, 1H_f$.

3.- DISEÑO DE PANTALLAS

3.a) La metodología del estudio de pantallas internas consta de tres etapas fundamentales:

1. Estudios previos en lechos sin pantallas, reactores de lecho fijo y reactores de lecho fluidizado sin pantallas.

2. Obtención de una función que ligue a la eficacia de choque con los parámetros de construcción de pantallas formadas por una fila de tubos.
3. Obtener una función que ligue a la eficacia global con la de conversión.

3.b) La eficacia de choque de una fila de tubos horizontales está relacionada con la amplitud de paso, \bar{S}_h , según la expresión:

$$E_{\text{choq}} = 6,66 \cdot 10^{-3} \frac{(d_b)_{\text{choq}} U_{mf}}{\rho_s d_p U_o \bar{S}_h}$$

según la cual la eficacia de choque aumenta, fundamentalmente, al aumentar la relación entre el tamaño de las burbujas que chocan contra la fila de tubos y la amplitud de paso entre los tubos.

3.c) La eficacia global puede expresarse por la ecuación:

$$E_G = 1 - \frac{(\bar{d}_b)_{\text{con pantallas}}}{(\bar{d}_b)_{\text{sin pantallas}}}$$

3.d) La eficacia global de una pantalla puede predecirse teóricamente a partir de la eficacia de choque de cada una de las filas que la forman y de correlaciones del tipo de la de Kobayashi.

3.e) La eficacia de conversión de una pantalla está relacionada con la eficacia global de la misma pantalla por la ecuación:

$$E' = 0,81 E_G + 0,12$$

e.f) A través de la eficacia global, obtenida a partir de eficacias de choque, se puede predecir la eficacia de -- conversión, y, con ello, la conversión química que se obtendrá en reactor de lecho fluidizado con pantallas.

4.- CATALIZADORES DE LA REACCION DE OBTENCION DE BUTIRONI-- TRILO

4.a) La utilización de la magnetita debe estar precedida de una reducción con hidrógeno a altas temperaturas.

4.b) En reactor de lecho fijo, a 330°C y W/F_{A_0} de 200g de magnetita.hr/mol de butanol alimentado, se obtiene con-- versiones de butanol del 65%, con selectividades del 95-98% en butironitrilo. Las condiciones de reducción eran: 450°C, 10 horas y 8 litros de hidrógeno/g de magnetita.

4.c) La vida de la magnetita es muy corta (la activi-- dad puede descender a la mitad en dos horas) y depende del grado de reducción previo. Por ello sería aconsejable utilizarla en reactor de lecho fluidizado con recirculación.

4.d) La actividad del óxido de cinc depende del calci-- nado previo.

4.e) Calcinando el óxido de cinc a 450°C durante 5 ho-- ras y en las condiciones de trabajo: 350°C, $W/F_{A_0} = 150$ g hr/mol, se obtienen conversiones del 68% en lecho fijo y del 27% en lecho fluidizado sin pantallas. Con pantallas, y

en las mismas condiciones de trabajo y calcinación se consiguen conversiones de hasta el 45%.

4.f) El catalizador de óxido de cinc se desactiva rápidamente (50% en 2 horas), pero puede regenerarse por calcinación y llegar a unas 10 horas de utilidad. Sin embargo hay un envenenamiento irreversible que hace que al cabo de este tiempo sea inútil todo tipo de regeneración física.

10.- NOMENCLATURA

- a : Coeficiente que representa la velocidad de crecimiento de las burbujas con la altura, cm^2/g ; ecuación 14
- a' : Pendiente de las rectas de variación de la expansión con la velocidad reducida, adim.; ecuación 2
- A_i : Area del pico cromatográfico de la sustancia i, cm^2 ; figura 17
- A_o : Idem de la sustancia patrón.
- b : Coeficiente que representa el tamaño de burbuja a nivel del distribuidor, cm^3/g ; ecuación 14
- b' : Ordenada en el origen de las rectas de variación de la expansión con la velocidad reducida, adim.; ecuación 12.
- d_b : Tamaño de burbuja, cm; figura 16
- d_o : Tamaño de burbuja a nivel del distribuidor, cm; ecuación 4.
- \bar{d}_b : Tamaño de burbuja medio en todo el lecho, cm; - ecuación 10
- d_p : Tamaño medio de partícula de sólido, cm o micras; ecuaciones 1 y 2.

- d_t : Espesor del lecho bidimensional, cm; ecuación 5
- D : Diámetro del lecho, cm.
- D_R : Diámetro de los tubos o cilindros que forman las pantallas, cm.
- E : Eficacia en un punto, adim.; ecuación 24 y figura 58.
- E_{choq} : Eficacia de choque de una fila de cilindros, adim.; ecuación 27 y figura 60.
- E_G : Eficacia de expansión, adim.; ecuaciones 30 y 31 y figura 62.
- E_T : Eficacia integrada, adim.; ecuaciones 25, 26 y figura 59.
- E' : Eficacia de conversión, adim.; ecuación 43 y figura 86.
- F_{Ao} : Alimentación de entrada referida al butanol, mol/hr.
- g : Aceleración de la gravedad, 980 cm/seg^2
- G : Caudal de gas por cada orificio de la placa distribuidora, cm^3/seg ; ecuación 5.
- H_D : Distancia desde el distribuidor a una burbuja determinada o a un punto del lecho, cm; ecuación 4.

- $H'_D ; H''_D$: Altura de colocación de la fila más cercana al distribuidor, de la siguiente, etc....., cm.
- $H' ; H''$: Altura relativa de colocación de la fila más cercana al distribuidor, de la siguiente, etc., cm; ecuación 16 y figura 6.
- H_f : Altura del lecho en condiciones de fluidización, cm; figura 16.
- H_{mf} : Idem de mínima fluidización, cm.
- ΔH_L : Expansión del lecho, adim.; ecuación 7.
- ΔH_o : Pérdida de carga en el orificio medidor, cm de agua.
- n : Número de filas de tubos que forman la pantalla.
- n_o : Densidad de orificios de la placa distribuidora, cm^{-2} ; ecuaciones 5 y 6.
- n_R : Número de tubos que forman una fila horizontal.
- P_L : Pérdida de carga a través del lecho, mm de Hg.
- P_m : Peso de muestra, g.; figura 17.
- P_o : Peso de patrón, g.; figura 17.
- P_o : Presión absoluta en el orificio medidor, mm de Hg
- Q_{H_2} : Caudal de hidrógeno en condiciones ambientales, l/hr.

- q_o : Caudal a través del orificio medidor en las condiciones del mismo, cm^3/seg .
- S_h : Distancia horizontal entre dos cilindros consecutivos, cm; figura 6.
- \bar{S}_h : Amplitud de paso, cm; ecuación 17
- S_{lib} : Superficie libre relativa, %; ecuación 15.
- S_v : Distancia vertical entre dos filas consecutivas, cm; figura 6.
- T : Temperatura, $^{\circ}\text{C}$ ó $^{\circ}\text{K}$
- T_o : Temperatura en el orificio medidor, $^{\circ}\text{K}$
- U_b : Velocidad de ascenso de las burbujas respecto a un observador exterior al lecho, cm/seg ; ecuación 10.
- U_{mf} ; U_{mcf} : Velocidad mínima de fluidización y mínima de completa fluidización, cm/seg ; ecuación 3.
- U_o : Velocidad del gas a través del lecho supuesta toda la sección del recipiente, cm/seg .
- U_R : Velocidad reducida de trabajo, U_o / U_{mf} , adim.
- U'_R : Velocidad reducida, U_{mcf} / U_{mf} , adim.
- X : Conversión, adim.

X_A : Conversión referida al butanol, adim. .

X_{A0} : idem a tiempo cero, adim.

Letras griegas

δ : Fracción de lecho consistente en burbujas de gas, adim.; ecuación 8.

μ_g : Viscosidad del gas, g/cm seg.

ρ_g : Densidad del gas, g/cm³

ρ_s : Densidad fluidodinámica del sólido, g/cm³

11.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) LEVA, M.: Fluidization. Mc Graw Hill Co. N.Y. (1959)
- (2) KUNII, D. y LEVENSPIEL, O.: Fluidization Engineering, John Wiley & Sons, Inc. (1969)
- (3) OTERO, A.R. y CORELLA, J.: Anales de la R.S.E. de F. y Q., 12, 1207 (1971)
- (4) COLLINS, R.: Chem. Eng. Sci., 24, 1291 (1969)
- (5) DAVIDSON, J.F. y HARRISON, D.: Fluidized Particles, Cambridge Univ. Press, New York (1963)
- (6) HARRISON, D. et al.: Trans. Instn. Chem. Engrs., 39, 202 (1961)
- (7) JACKSON, R.: Trans. Instn. Chem. Engrs., 41, 13 (1963)
- (8) MIWA, K., MUCHI, I. y KATO, K.: Intern. Chem. Eng., 12, (1), 187 (1972)
- (9) PARTRIDGE, B.A. y ROWE, P.N.: Trans. Instn. Chem. Engrs. 44, T349 (1966)
- (10) LEVENSPIEL, O.: Chemical Reaction Engineering, 2nd. ed., John Wiley & Sons, Inc. (1972)
- (11) PYLE, D.L. y ROSE, P.L.: Chem. Eng. Sci. 20, 25 (1965)

- (12) YOSHIDA, K. y WEN, C.Y.: Chem. Eng. Sci. 25, 1395(1970)
- (13) FURUSAKI, S.: AICHE Jour. 19 (5), 1009 (1973)
- (14) KUNII, D. y LEVENSPIEL, O: Ind. & Eng. Chem. Process De
sing and Dev. 7 (4), 481 (1968)
- (15) LEVENSPIEL, O.: Ind. Eng. Chem. Fundam., Aug. 446(1968)
- (16) ECHIGOYA, E., eta al.: Intern. Chem. Eng. 15 (2), 396
(1975)
- (17) FRYE, C.G. et al.: AICHE Jour. 4, 403 (1958)
- (18) MASSIMILLA, L. y JOHNSTONE, H.F.: Chem. Eng. Sci. 16,
105 (1961)
- (19) LANNEAU, K.P.: Trans. Instn. Chem. Engrs. 38, 125(1960)
- (20) MARKOVA, M.N. et al.: Intern. Chem. Eng. 12, 401 (1972)
- (21) MAY, W.G.: Chem. Eng. Prog. 55, 49 (1959)
- (22) VOLK, W. et al.: Chem. Eng. Prog. 58, 44 (1962)
- (23) OVERCASHIER, R.H., TODD, D.B. y OLNEY, R.B.: AICHE Jour.
5 (1), 54 (1959)
- (24) ROWE, P.N. y STAPLETON, W.M.: Trans. Instn. Chem. Engrs.
39, 181 (1961)
- (25) YASUI, G. y JOHANSON, L.N.: AICHE Jour. 4, 445 (1958)

- (26) SUTHERLAND, K.S.: Trans. Instn. Che. Engrs. 39, 188 (1961)
- (27) GEL'PERIN, N.I. et al.: Intern. Chem. Eng. 4, 198 (1964)
- (28) TASUGE, H. e HIBINO, S.: Intern. Chem. Eng. 15, (1), 186 (1975)
- (29) LEVA, M.: Chem. Eng., Oct., 289 (1957)
- (30) RODRIGO, A., FERNANDEZ, L. y CORELLA, J.: Rev. Metalurgia, 6 (4), 445 (1970)
- (31) BEHIE, L.A. y KEHOE, P.: AICHE Jour. 19, (5), 1070 (1973)
- (32) CHAPELA, E., RODRIGO, A. y SANCHO, J.: Symposium of fluidization. Univ. Press. Amsterdam (1967)
- (33) CHIBA, T., TERASHIMA, K. y KOBAYASHI, H.: Chem. Eng. - Sci. 27, 965 (1972)
- (34) MORI, S. y WEN, C.Y.: AICHE Jour. 21 (1), 109 (1975)
- (35) DAVIDSON, J.F. y HARRISON, D.: Fluidization. Academic Press. (1971)
- (36) LEVA, M.: Chem. Eng., Nov., 295 (1957)
- (37) GRACE, J.R. y HARRISON, D.: Chem. Process Eng., 127 (1970)
- (38) GLASS, D.H. y HARRISON, D.: Chem. Eng. Sci. 19, 1001 (1964)
- (39) HAPPEL, J.: AICHE Jour. 5 (2), 174 (1959)

- (40) SPARROW, E.M. y LOEFFLER, A.L. Jr.: AICHE Jour: 5 (3), 325 (1959)
- (41) BAILIE, R.C. et al.: Ind. Eng. Chem. (Fund.), 2, 245 (1963)
- (42) BECK, R.A.: Ind. Eng. Chem. 41, 1242 (1949)
- (43) BOLAND et al.: Chem. Eng. Sci. 24, 1389 (1969)
- (44) SUTHERLAND, J.P. et al.: AICHE Jour. 2, 437 (1963)
- (45) ZIEGLER, E.N. y BRAZELTON, W.T.: Ind. & Eng. Chem.(Proc. Des. & Dev.), 2 (4), 276 (1963)
- (46) GABOR, J.D. et al.: I.Chem. Eng. Prog. (Symp. Ser.) 60 (47), 96 (1964)
- (47) PARTRIDGE, B.A. y ROWE, P.N.: Trans. Instn. Chem. Engrs. 44, T335 (1966)
- (48) WACE, P.F. y BURNETT, S.J.: Trans. Instn. Chem. Engrs. 39, 168 (1961)
- (49) ROWE, P.N., PARTRIDGE, B.A. y LYALL, E.: Chem. Eng. Sci. 19, 973 (1964)
- (50) PRANGE, M. y ZIEGLER, A.: Mèmoires Présentès a la Socie té Chimique, n° 94 (1954)
- (51) DONSI, G. y MASSIMILLA, L.: AICHE Jour. 19 (6), 1104 (1973)

- (52) HECKELSBERG, L.F. et al.: Joint Symposium on Mechanims of Homogeneous and Heterogeneous Hydrocarbon Reactions, Kansas City (1954)
- (53) KATO, K. y WEN, C.Y.: Chem. Eng. Sci. 24, 1351 (1969)
- (54) LEWIS, W.K., GILLILAND, E.R. y GLASS, W.: AICHE Jour. 5 419 (1959)
- (55) ZEN'KOVICH, I.A. y TOPCHIEVA, K.V.: Intern. Chem. Eng. 12 (3), 469 (1972)
- (56) BAYON, A.: Tesis Doct. Fac. Cienc. Quim. Madrid, Jun. (1974)
- (57) JODRA, L.G., BAYON, A. y CORELLA, J.: Anales de la R. S.E. de F. y Q. 68, 1449 (1972)
- (58) NOVAK, F.I. et al.: Neftekhimiya, 2, 297 (1966)
- (59) SHEKHTER, A. B. y MOSHKOVKII, Y.S.: Chem. Abstrs. 49, 9732 (1954)
- (60) HECKELSBERG. L.F., CLARK, A. y BAILEY, G.C.: J. Phys. Chem. 60, 559 (1956)

A P E N D I C E
=====

FOTOGRAFIAS



FIGURA A.1.- Lecho bidimensional



FIGURA A.2.- Pantalla de 1 fila de 10 cilindros co
locada a 50 cm de altura

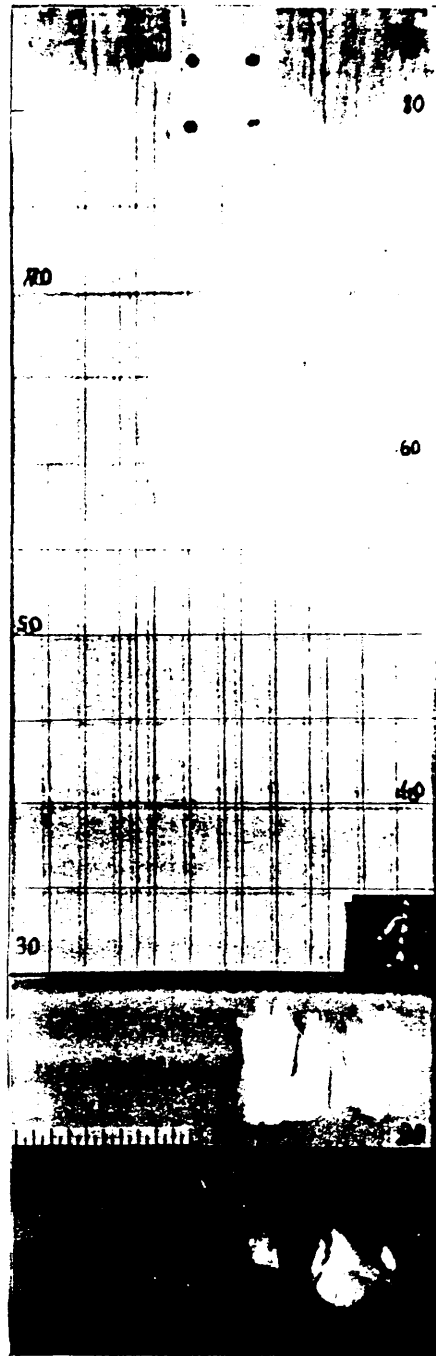
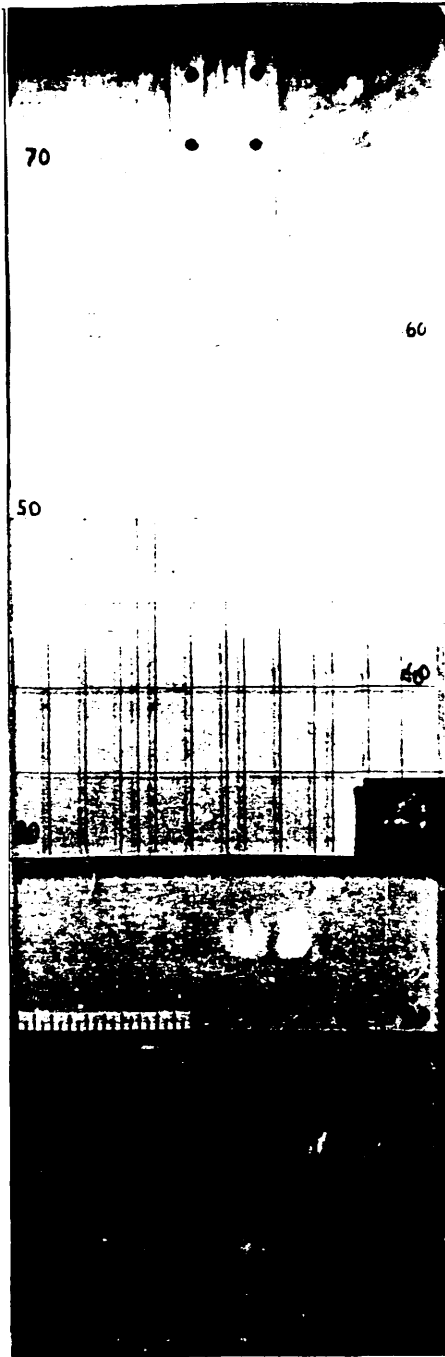
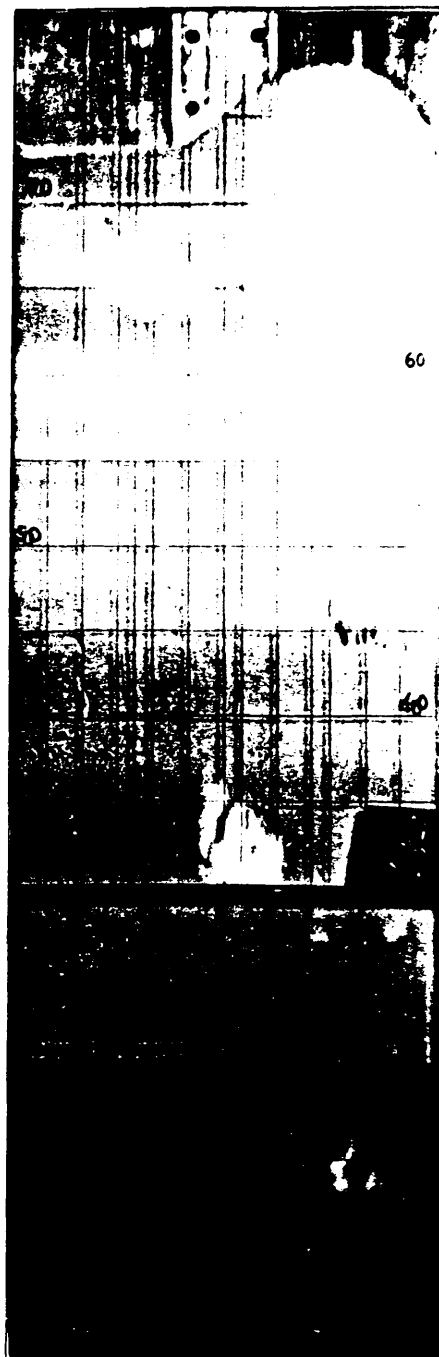


FIGURA A.3.- Distribución de tamaños de burbuja en el lecho.

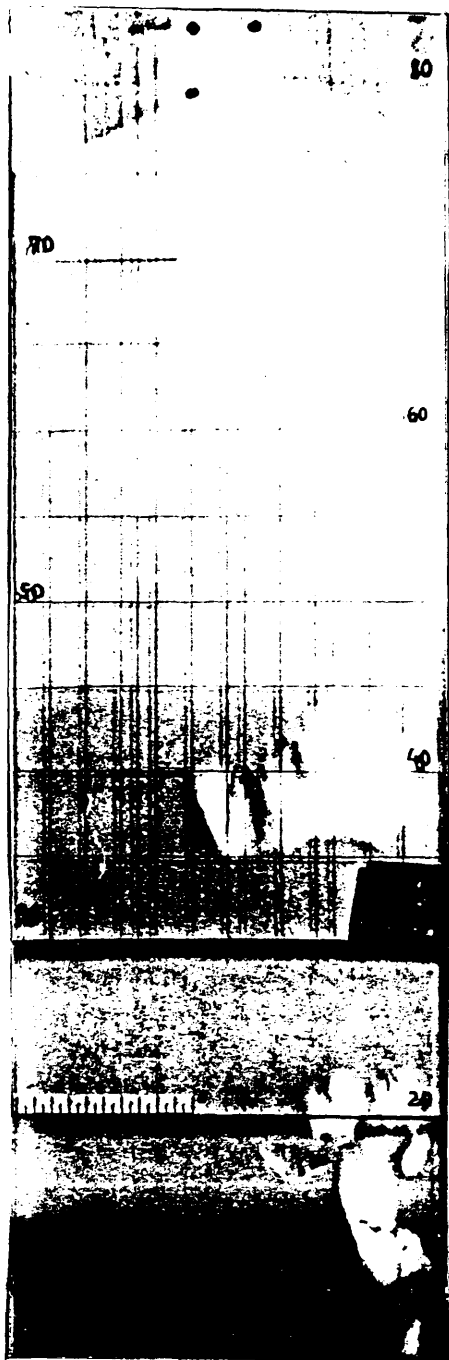


$U_R = 1,3$

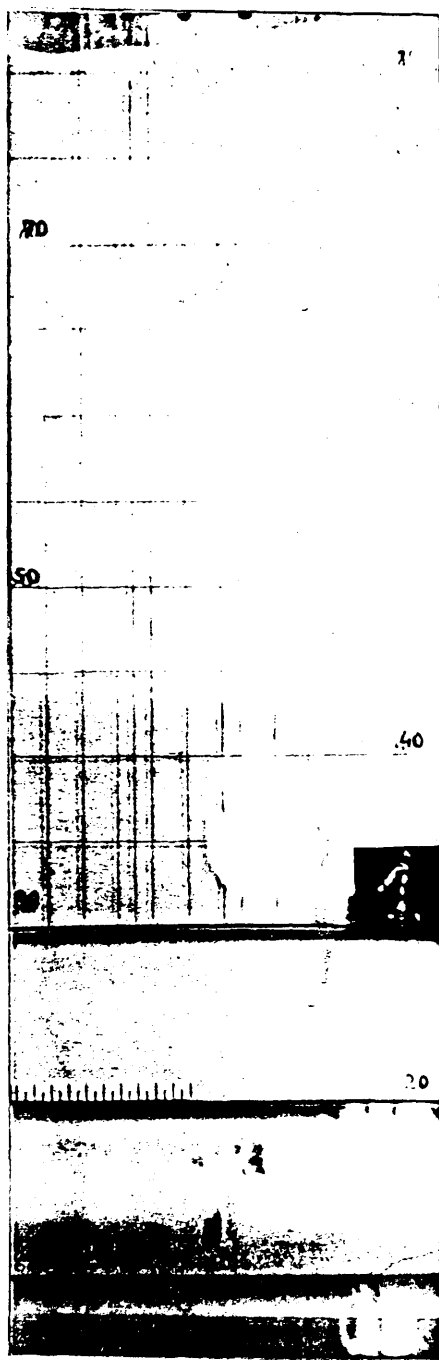


$U_R = 1,8$

FIGURA A.4.a.- Influencia de la velocidad reducida de trabajo en la distribución de tamaños de burbuja.

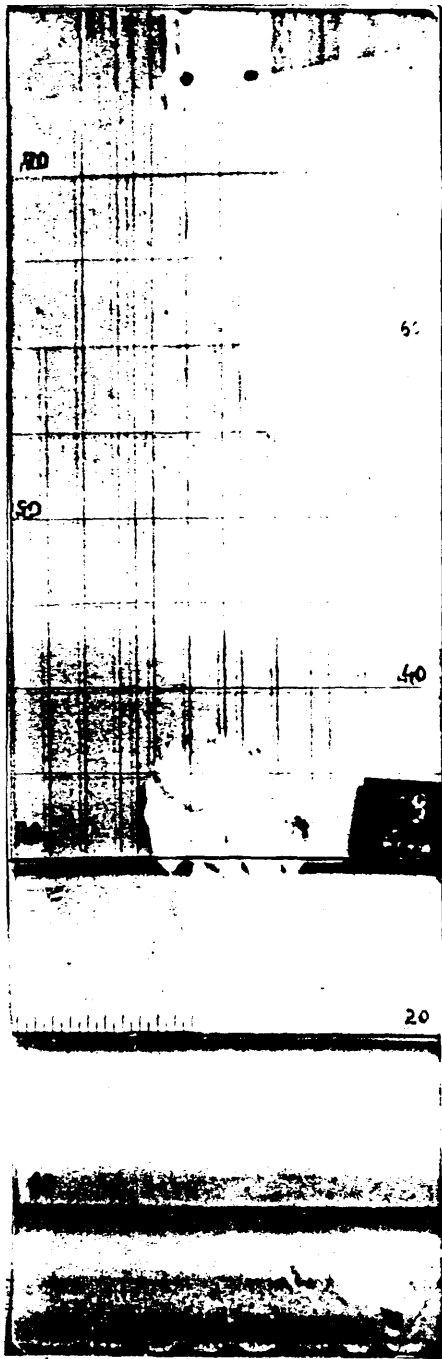


$U_R = 2,1$

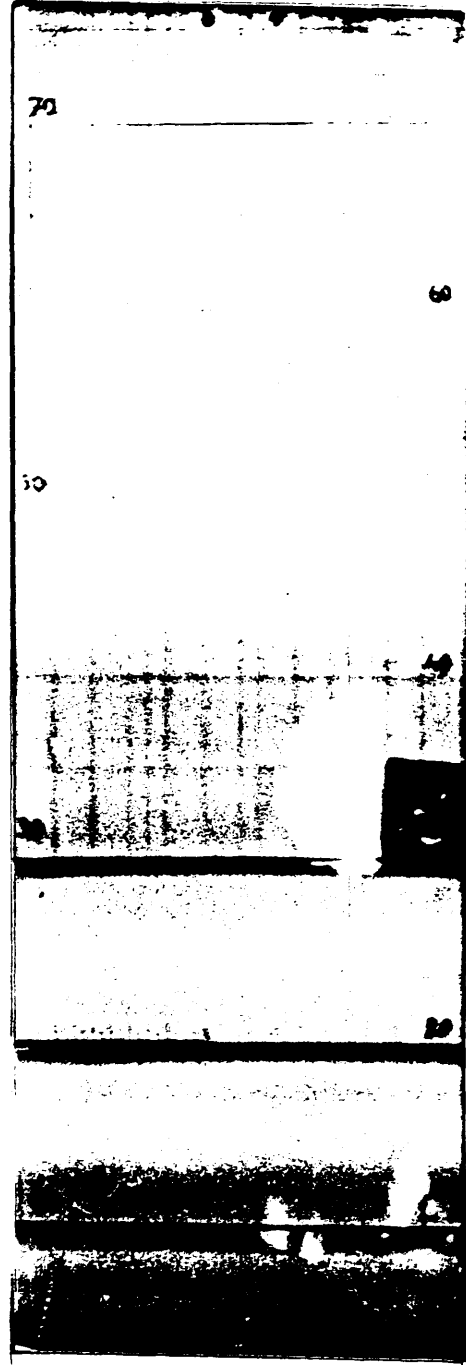


$U_R = 2,6$

FIGURA A.4,b.- Influencia de la velocidad reducida de trabajo en la distribución de tamaños de burbuja.

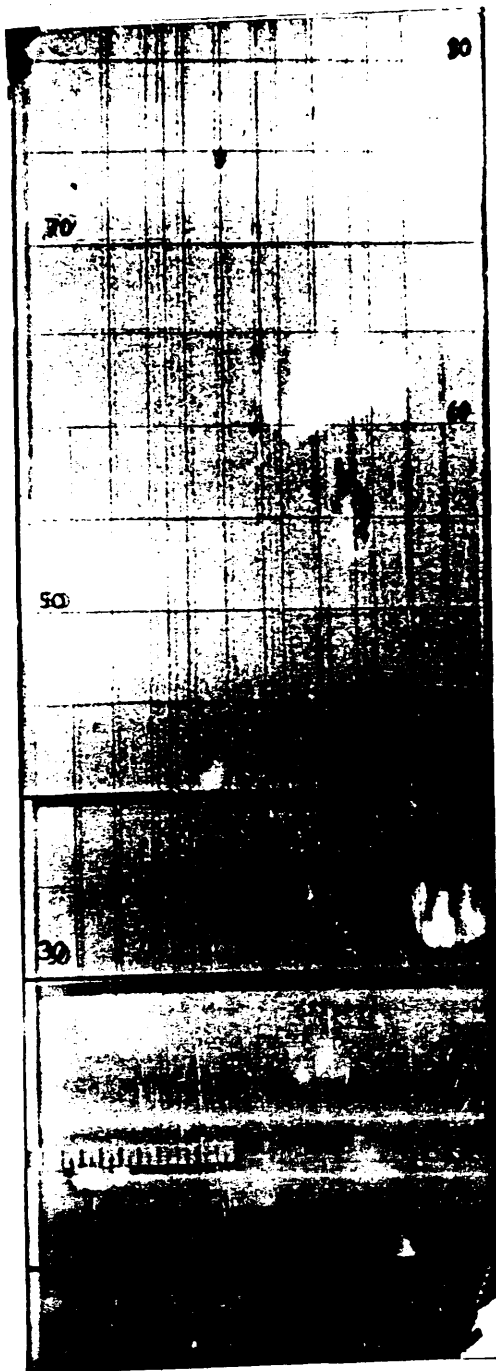


$d_p = 224$ micras

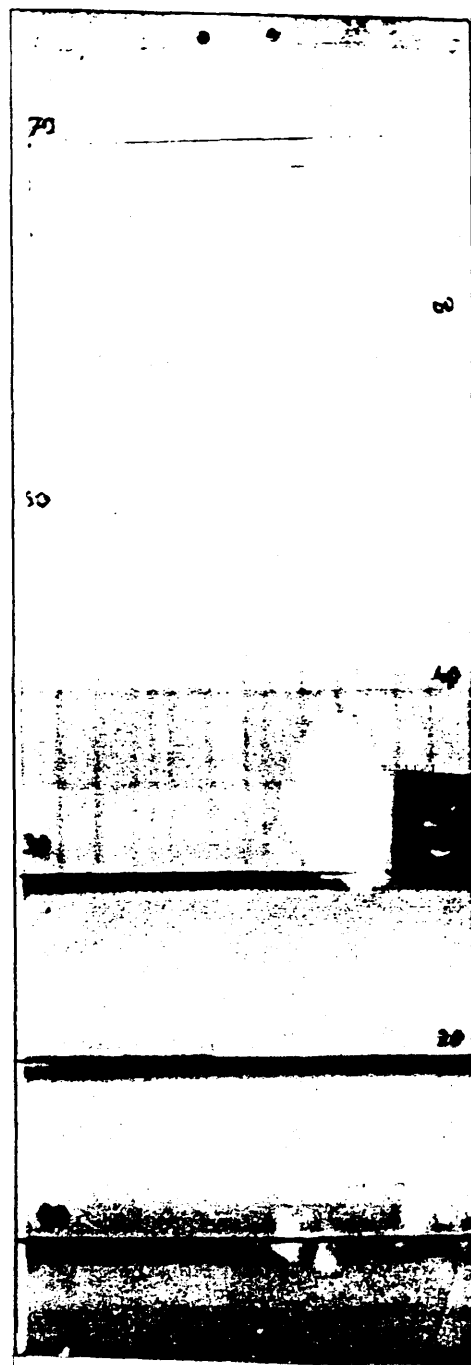


$d_p = 126$ micras

FIGURA A.5.- Influencia del tamaño de partícula

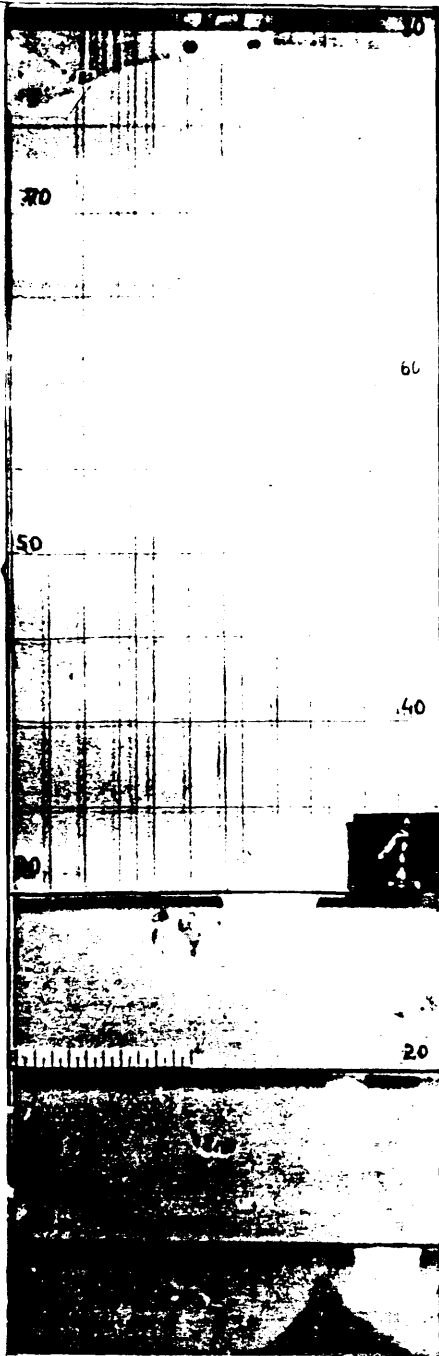


Placa porosa

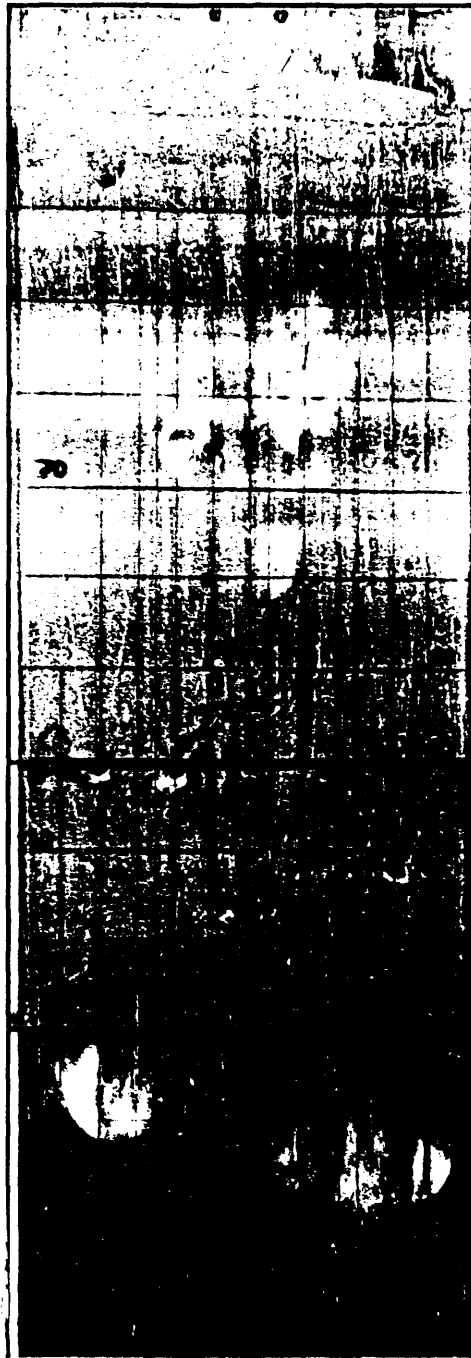


Placa "Sandwich"

FIGURA A.6.- Influencia del distribuidor del gas



Lecho sin pantallas



Lecho con pantallas

FIGURA A.7.- Influencia de las pantallas internas.

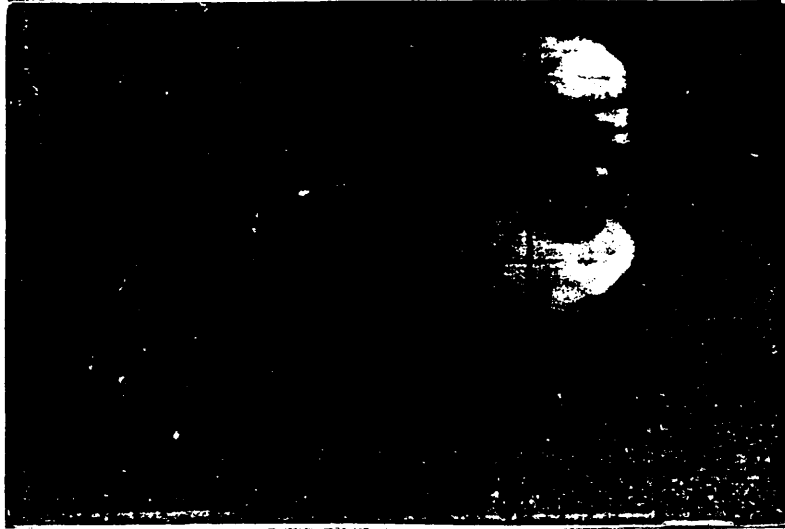
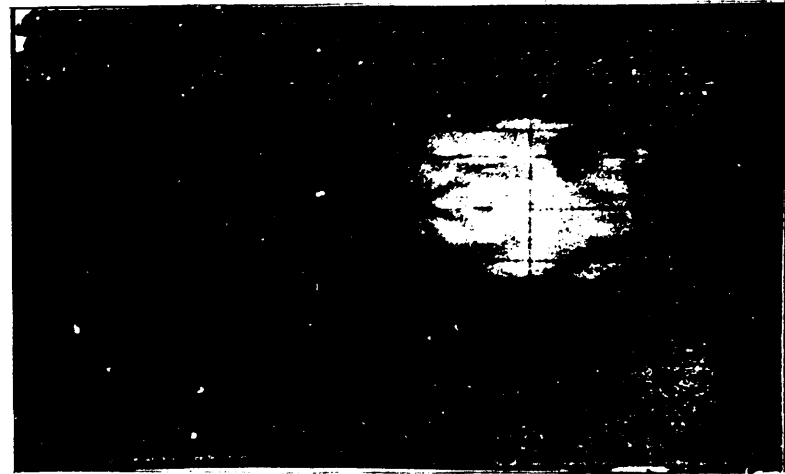
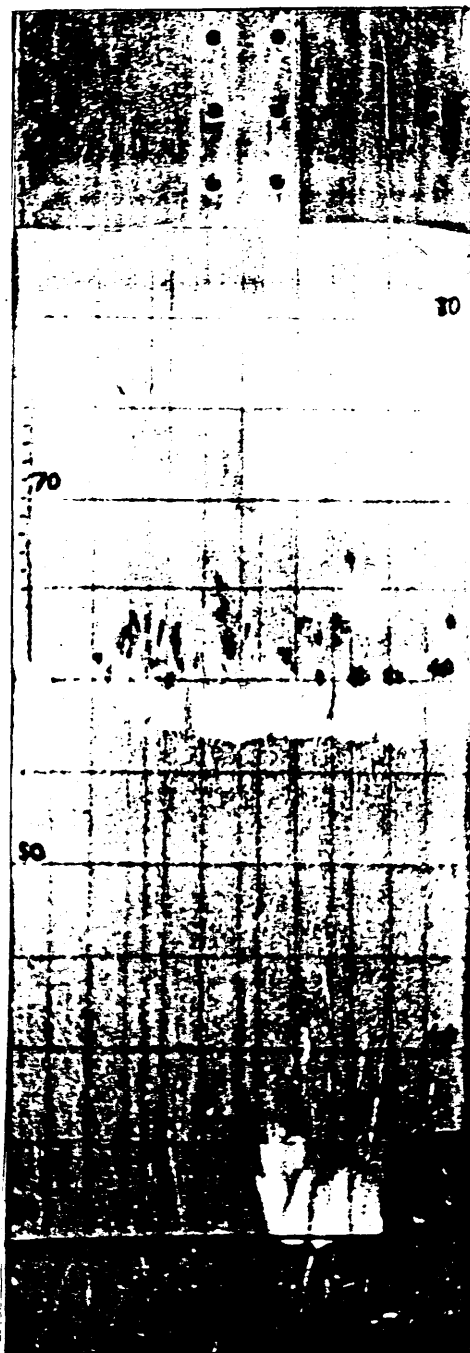
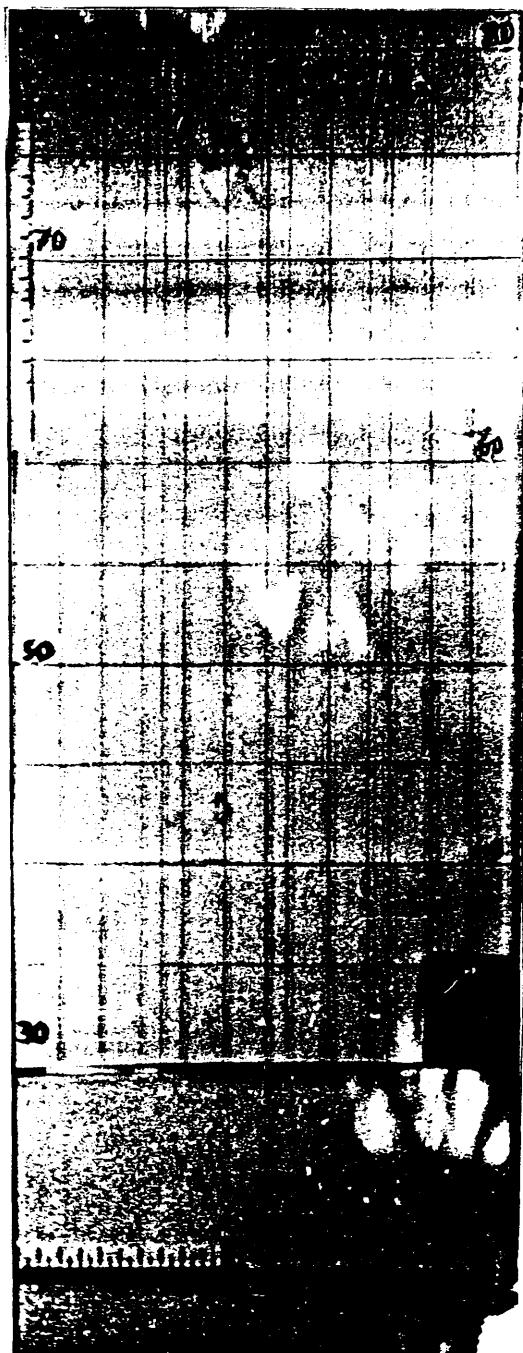


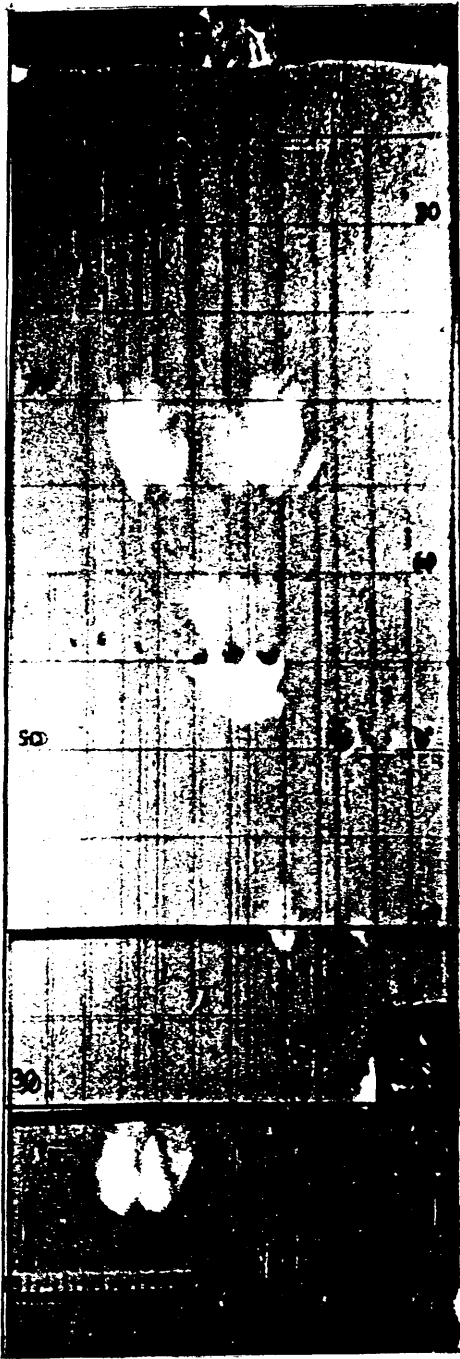
FIGURA A.8.- Rotura de una burbja al chocar contra un cilindro de 2,5 cm de diámetro colocado a 48,5 cm de altura.



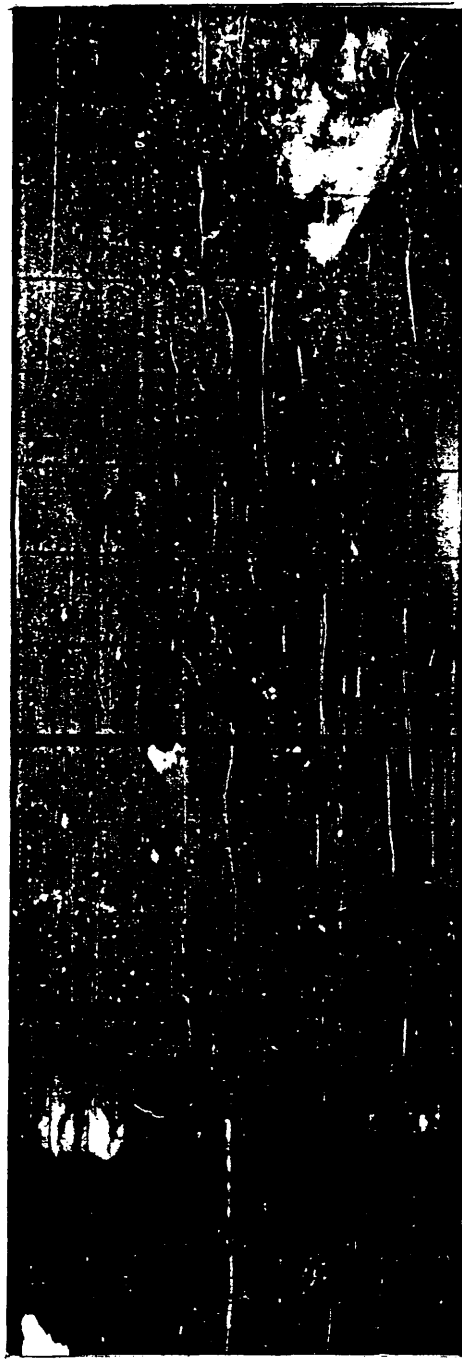
Altura de colocación: 48,5cm

60 cm

FIGURA A.9.- Pantallas de una fila de 10 cilindros.



2 filas



3 filas

FIGURA A.10.- Pantallas de dos y tres filas de cilindros
(distancia entre filas: 5 cm).

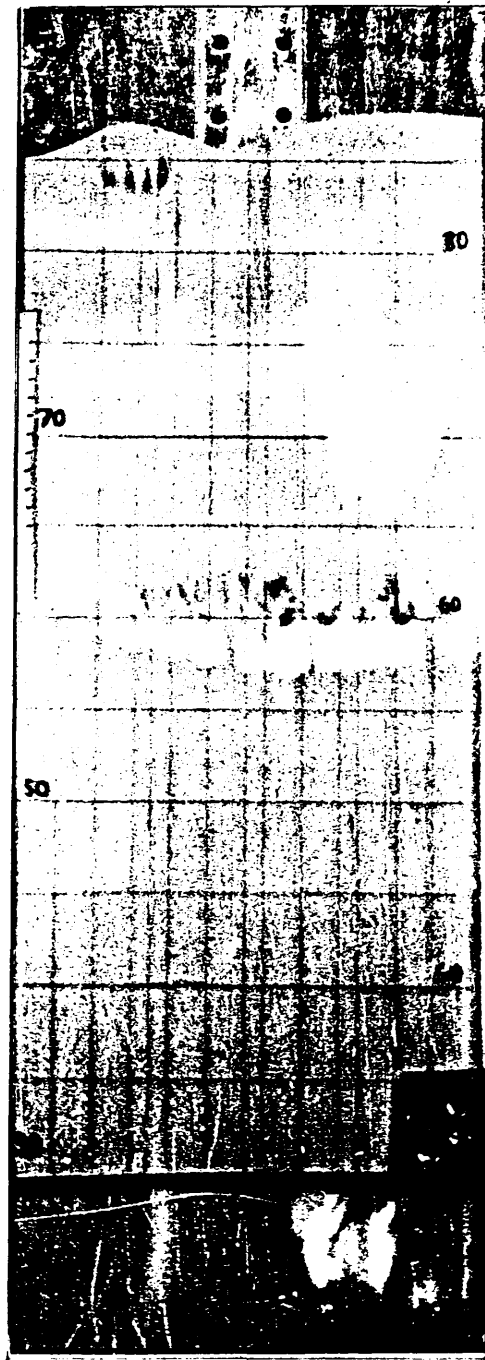
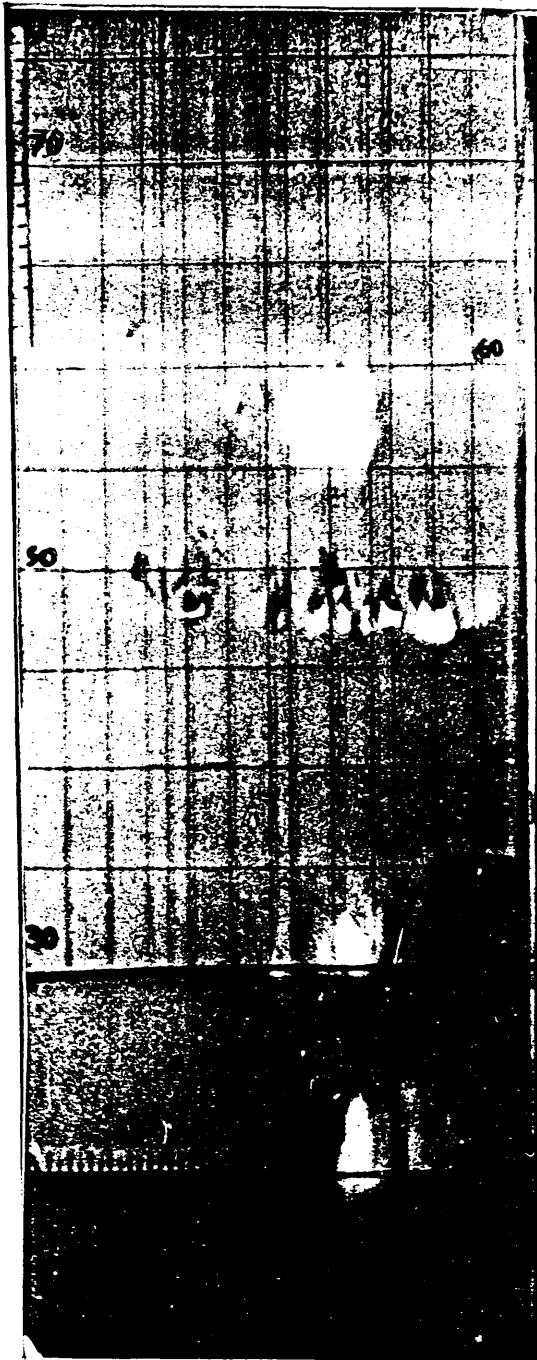


FIGURA A.11.- Formación de "estalactitas".

