

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS DOCTORAL

**Estudio tecnológico de los procesos de adsorción en lecho
fluidizado**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Ramón Anguita Delgado

DIRECTOR:

Ángel Vián Ortuño

Madrid, 2015



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE



5310318448

74
ANG

UNIVERSIDAD DE MADRID - FACULTAD DE CIENCIAS

Doctorado en Química Industrial

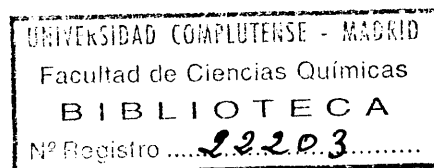
Estudio Tecnológico de los procesos de adsorción
en lecho fluidizado

MEMORIA

que para aspirar al grado de Doctor en Química Industrial

presenta

RAMON ANGUITA DELGADO



Madrid, Octubre 1961

INDICES

INDICE GENERAL

CAPITULO I.- INTRODUCCION

	<u>página</u>
Introducción	1
Objeto del trabajo	9

CAPITULO II.- BIBLIOGRAFIA

Bibliografía	10
------------------------	----

CAPITULO III.- PLAN EXPERIMENTAL

III- 1 Teorías	13
III-1-2 Medida del caudal gaseoso en el aparato de leche fluidizado	23
III-2 Descripción de aparatos	28
III-2-1 Aparatos de adsorción en leche estatico	28
III-2-2 Aparato de fluidización	29
III-3 Descripción de los experimentos	35

CAPITULO IV.- EXPERIMENTACION Y RESULTADOS

IV- 1 Experimentos en leche estatico	41
IV-1-1 Experimentos realizados en leche estatico manteniendo constante el diametro del leche y variando su altura	41
IV-1-2 Experimentos realizados en leche estatico manteniendo constante el volumen del leche y variando su forma	66
IV-1-2-1 Experimentos con carbon Coca	66
IV-1-2-2 Experimentos con Carbon Norit	74

	<u>página</u>
IV - 2 Experimentos en leche fluidizado	84
IV-2-1 Calibrados previos	84
IV-2-1-1 Calibrada del sistema de medida de aire en leche fluidizado	84
IV-2-1-1 Calibrado del sistema de medida de aire en leche fluidizado	84
IV-2-1-2 Calibrado de los magistrales utilizados en el aparato de fluidización	84
IV-2-2 Experimentos realizados en leche fluidizada sin renovación de sólidos-Carbon Norit	91
IV-2-3 Cálculo del coeficiente de transferencia de materia en leche fluidizado	116
IV-2-4 Experimentos en leche fluidizado con renova- ción de sólidos; estudio experimental de la influencia de los tiempos de residencia del gas y del sólido en la eficacia de recupera- ción del leche	126

CAPITULO V.- CONSECUENCIAS Y CONCLUSIONES

Consecuencias	150
Conclusiones	168

INDICE DE FIGURAS

	<u>página</u>
Fig. 1 - Esquema del proceso de separación de vapores per adsorción en leche fluidizado	3 bis
Fig. 2 - Esquema del aparato de adsorción en leche estático	27 "
Fig. 3 - Esquema general del aparato de fluidización	28 "
Fig. 4 - Esquema del sistema utilizado para medir el gasto de aire	32 "
Fig. 5 - Detalle del evaporador de benceno utilizado en el aparato de adsorción en leche fluidi- zado	33 "
Fig. 6 - Esquema para la explicación cinética de la falta de eficacia de adsorción en leche flu- idizado	112
Fig. 7 - Variación de la esbeltez del leche a diame- tre constante	152
Fig. 8 - Variación de la esbeltez del leche ^a volumen constante	153

INDICE DE LOS GRAFICOS

PAGINA

Gráfico- 1 .-	Ensayos en lecho estático(díametro del lecho constante).Curvas de velocidad de adsorción	53
Gráfico- 2.-	Ensayos en lecho estático(díametro del lecho constante. Curvas de eficacia de recuperación	54
Gráfico- 3 .-	Representación de la velocidad de adsorción frente a esbeltez en lecho estático .	55
Gráfico- 4 .-	Ensayos en lecho estático(volumen del lecho constante)Curva de velocidad de adsorción	76
Gráfico- 5 .-	Ensayos en lecho estático(volumen del lecho constante)Curva de eficacia de recuperación	70
Gráfico- 6.-	Experimentos en lecho estático con carbon Norit. Curvas de velocidad de adsorción .	78
Gráfico- 7 .-	Experimentos en lecho estático con carbon Norit. Curvas de eficacia de recuperación	79
Gráfico- 8 .-	Experimentos en lecho estatico. Curvas comparativas de las eficacias de recuperación	80
	Curve de calibrado del sistema medidor de flujo	87-88
	Curvas de calibrado de los magistrales .	89-90

Gráficos 9 a 16.- Experimentos en leche fluidizada sin renovación de sólidos. Curvas de velocidad de adsorción	100-101
	102-103
Gráfico - 17 .- Representación del coeficiente cinético de adsorción en función de la composición del gas que entra	105
Gráfico- 18.- Representación de la velocidad de adsorción en función de la concentración del gas de entrada	109
Gráfico- 19.- Curvas de eficacia de recuperación en leche estático y en leche fluidizado .	109 bis
Gráfico- 20.- Isoterma de adsorción del benceno en carbon Norit(T 20°C)	119
Gráfico- 21.- Constante de transferencia de materia en leche fluidizado en función de la composición del gas de entrada . . .	125
Gráfico- 22.- Constante de transferencia de materia en leche fluidizado en función de la composición de la fase adsorbente . .	125
Gráfico- 23.- Experimentos en leche fluidizado con renovación de sólidos. Representación de la eficacia de recuperación en función de la concentración del gas de entrada	147

Gráfico- 24.- Representación de los valores F/G neces-
rios para obtener 100% de eficacia de recu-
peración, en función de la concentración del
gas de entrada 149

CAPITULO I.- INTRODUCCION

INTRODUCCION

La recuperación de vapores de disolventes contenidos en gases, desde un punto de vista tecnológico, se suele efectuar por dos procedimientos: por absorción con un líquido, o con un sólido adsorbente.

Los procesos de licuación de gases no tienen demasiado interés para la recuperación de disolventes.

La absorción de una mezcla gaseosa compuesta de aire y vapores de varios disolventes, presenta como primera cuestión la elección de un agente absorbente adecuado que retenga total o selectivamente los vapores que se trata de recuperar; este problema que, en muchos casos particulares es bastante difícil, es en cierto modo más sencillo que el que puede presentarse al tratar de hacer la separación final de los distintos componentes, debido a que pueden formarse mezclas azeotrópicas, que hagan difícil o imposible dicha separación mediante un proceso de destilación, que sería el método caso obligado y más sencillo en principio para separar los componentes entre sí y del absorbente.

Las principales aplicaciones industriales de la adsor-

ción incluyen la separación de gases difícilmente licuables, la recuperación y concentración de vapores presentes en una mezcla de gases en pequeñas cantidades y la separación de vapores de líquidos de puntos de ebullición muy próximos. En la práctica industrial el empleo de adsorbentes sólidos en tales separaciones estaba limitado por la dificultad de conseguir un contacto continuo de la mezcla sólido-fluido. Dentro de los procesos de adsorción cabe considerar dos técnicas distintas: la adsorción en lecho estático y la adsorción en lecho fluidizado.

La recuperación y separación de vapores de disolventes empleando técnicas de adsorción tiene en ambos casos como parte final del proceso la desorción del adsorbato con un agente adecuado, que generalmente es el vapor del agua, y se obtienen después por condensación mezclas líquidas más o menos complejas que pueden presentar problemas idénticos a los que hemos aludido al tratar de los procesos de recuperación por absorción. Los procesos clásicos de adsorción en lecho estático se ajustan al esquema que acabamos de indicar y, además del problema de la separación final de los componentes, tienen como principales inconvenientes la dificultad de controlar ajustadamente la temperatura del lecho y conseguir que ésta sea lo más uniforme posible, y el peligro de que puedan adsorberse sustancias

-as de difícil desorción que terminen por dificultar o hacer imposible el proceso de regeneración del adsorbente, con el riesgo de hacer antieconómico el proceso de adsorción. Con el fin de salvar las anteriores dificultades se han desarrollado en los últimos años nuevas técnicas de adsorción basadas en el movimiento continuo del lecho adsorbente en contracorriente con la mezcla de gases a separar, - nos referimos concretamente al proceso de Hipersorción, bien conocido, utilizado para la separación de etileno, propileno y otros gases procedentes de otros procesos industriales. La técnica de adsorción en lecho fluidizado abre nuevos campos no estudiados aún definitivamente, para la recuperación de vapores o separación de mezclas gaseosas en un proceso continuo.

La adsorción en lecho fluidizado puede ser eficaz para las separaciones que se presentan en la industria; estas técnicas pueden adaptarse a la separación de gases por adsorción debido a la sencilla manera que ofrecen para manejar los sólidos adsorbentes de un modo continuo y por su notable facilidad para una eficiente transmisión de calor, lo que permite un cómodo y fácil control de la temperatura del lecho adsorbente.

Siguiendo este orden de ideas el plan general de trabajo que nos propusimos, fue el de estudiar un proceso técnico

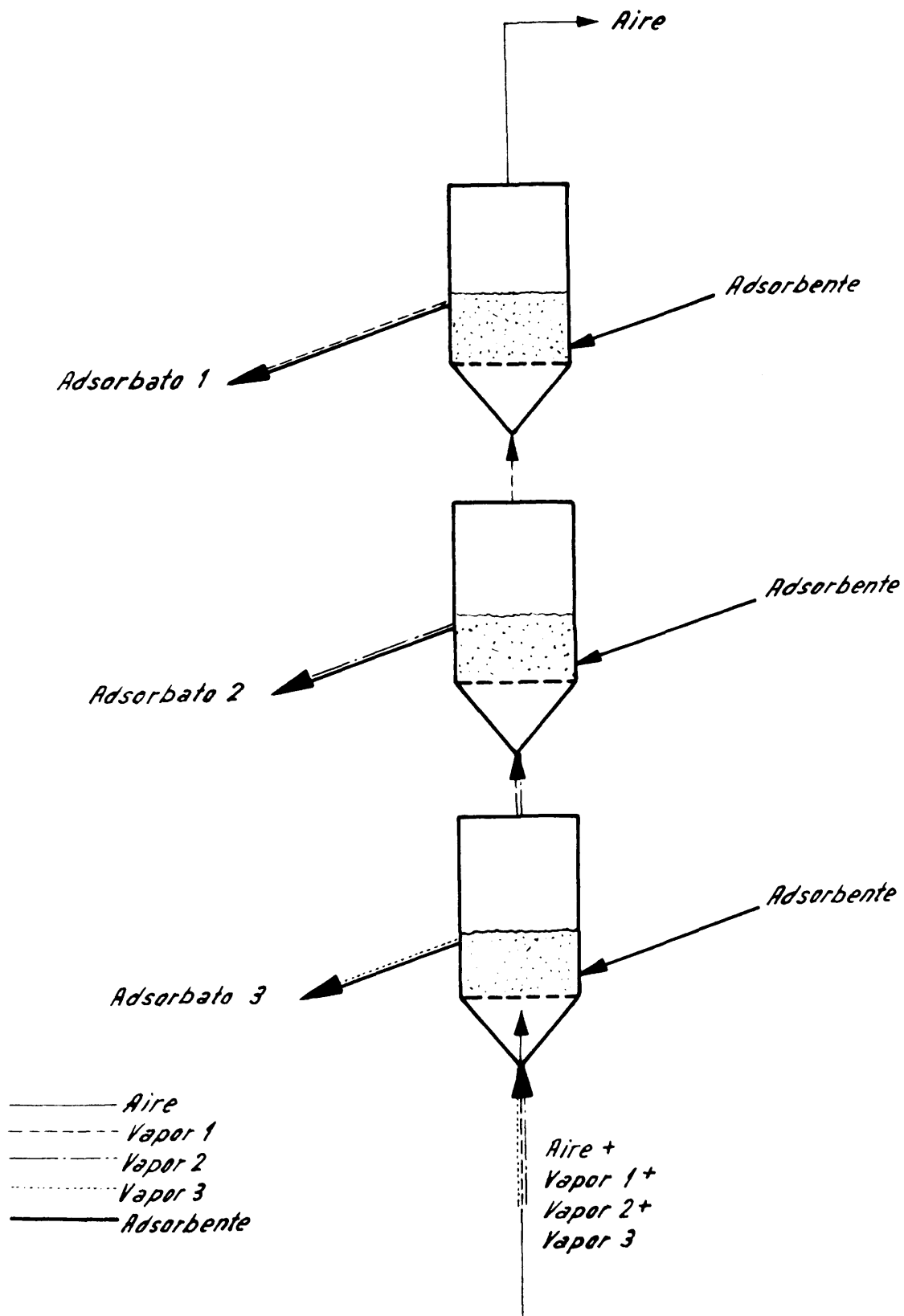


Fig. 1

de adsorción en lecho fluidizado, basado en la idea de adsorber cada componente de la mezcla gaseosa en un lecho fluidizado alimentado independientemente y situar varios de estos lechos fluidizados superpuestos de manera que, previo un detenido estudio de las condiciones cinéticas que se presentan en la adsorción en lecho fluidizado para cada sistema particular "adsorbente-vapor a recuperar", se consiguiera una separación cuantitativa de los componentes. En esquema el método de separación pensado es el que puede verse en la Fig. 1. En principio se admite que en cada lecho fluidizado es posible adsorber un sólo componente de la mezcla de vapores; cada lecho fluidizado podrá, por tanto, ser considerado como una "etapa de adsorción". Por otro lado, es necesario que cada lecho tenga una alimentación de adsorbente independiente para poder conseguir la separación deseada.

También cabe considerar que en una etapa o lecho de adsorción pueda adsorberse principalmente un sólo componente de la mezcla de vapores, pero que, simultáneamente, se adsorban también, en cantidades más o menos grandes, otro u otros componentes; solamente un cuidadoso estudio experimental de cada caso particular podrá aclararnos este punto.

El primer paso para un estudio de este tipo es hallar

las relaciones que rigen la adsorción de cada componente sobre el adsorbente elegido en lecho fluidizado y en lecho estático; la comparación entre ambos tipos de lecho es necesaria con el fin de determinar si ofrece algún interés económico la elección de uno u otro lecho para una determinada separación; como puede comprenderse una separación de este tipo no se puede realizar en un lecho estático, - en el concepto clásico de este tipo de lechos, ya que el proceso de Hipersorción es una técnica distinta. Una vez conocidos los comportamientos de los diversos componentes por separado, durante la adsorción en lecho fluidizado, podrán deducirse consecuencias para el proyecto y desarrollo de un sistema de adsorción como el que hemos descrito; en este punto es preciso recordar que la adsorción de mezclas gaseosas es muy distinta de la adsorción de un gas sólo, aunque si el adsorbente se expone ante una mezcla de vapores de la que sólo se adsorbe un componente las relaciones cualitativas halladas para la adsorción de dicho componente puro pueden admitirse como válidas si se sustituye por la presión total la concentración o presión parcial del componente adsorbido en la fase sin adsorber. Aspecto interesante del problema que nos ocupa es hallar alguna relación teórico-experimental que permita relacionar y comparar la efi

-cacia técnica y el rendimiento económico conseguidos emplean do lecho estático y lecho fluidizado.

El tema elegido, expuesto en los párrafos anteriores de un modo general, es como se vé muy amplio y puede ser objeto de una serie de trabajos, entre los cuales el que nos ocupa puede considerarse como un primer paso. Para desarrollar este trabajo hemos elegido el sistema "benceno-aire-carbon activo" con vistas a la recuperación con carbón activo del benceno con tenido en mezclas benceno-aire. Las técnicas industriales con que se lleva a cabo esta recuperación para la desbenzolitación del gas del alumbrado o del gas de cokerías hacen uso de la ab sorción del benceno con aceites de hulla o, en otros casos, de la adsorción con carbón activo. La absorción con aceites de hulla se considera más rentable cuando es preciso tratar gran des caudales de gases, como ocurre en el caso de los gases de cokerías sin embargo en otros tipos de industrias en las que los caudales a tratar son menores, como es el caso de la recu peración de disolventes en industrias tipográficas, se prefie re usar la adsorción con carbón activo.

Como dato de aplicación comparada indicaremos que la recuperación del benceno del gas del alumbrado cuando se tra tan menos de 1000 m³/día de gas se hace actualmente empleando

el proceso de adsorción con carbón activo en leche estática y, cuando se traten cantidades mayores de 1000 m³ /día se realiza la recuperación por absorción con aceites de hulla.

Otro motivo que aconseja la aplicación de la adsorción en leche fluidizada al problema que nos ocupa es el de la regeneración del adsorbente; la regeneración por los métodos usuales es muy deficiente, pues las espirales que se utilizan para la calefacción del leche calientan mal el leche estática o en descendente, ya que los sólidos adsorbentes son muy malos conductores del calor. En cambio, en el caso del leche fluidizado, que se caracteriza por la buena transmisión de calor leche-pared que presenta, es de prever que los procesos de regeneración han de ser muy satisfactorios.

La total reactivación y recuperación, puede no ser económica en la práctica.

Para el desarrollo de ^{la} técnica de adsorción en leche fluidizada tal y como la hemos descrito es preciso, en líneas generales, conocer dos puntos: primero el comportamiento cinético de cada sistema particular vapor-adsorbente; aquí debe incluirse la cuestión de si es posible la recuperación total de un vapor en un sólo leche fluidizado o si, al menos, dicha recuperación puede ser económica; y segundo, conocer el comportamiento

tamiento y la interacción mutua en mezclas de varios vapores que se adsorben en lecho fluidizado con un sólido determinado.

La segunda fase de estudio para desarrollar la aludida técnica de adsorción en lecho fluidizado deberá tratar con el mecanismo de regeneración del adsorbente y recuperación final del vapor así separado.

Una vez que se tengan suficientes conocimientos técnicos de cada sistema particular, la fase final de estudio será un cálculo económico que permita decidir las posibilidades industriales del proceso.

El objeto de este trabajo, como se ha dicho, es iniciar el estudio de esta técnica de adsorción y buscar algún parámetro o variable que permita relacionar el proceso de adsorción en lecho fluidizado con el de adsorción en lecho estático, con vistas a la comparación tecnológica de ambos lechos. Parece lógico iniciar tal estudio concretándose a la fase de adsorción en su forma más sencilla, es decir, empleando un sólido adsorbente y una mezcla de aire con un solo vapor y, estudiar así la posibilidad de recuperar el vapor en lecho fluidizado.

Planteando el problema según los párrafos anteriores se decidió estudiar la adsorción de benceno en lecho estático

y en lecho fluidizado, empleando carbón activo como adsorbente, con el fin de obtener conclusiones que permitieran conocer el comportamiento tecnológico del sistema elegido dentro del plan general de estudio de la recuperación y separación de vapores en varias etapas de adsorción en lecho fluidizado según lo anteriormente expuesto.

Los objetivos concretos de nuestro trabajo fueron:

Determinar la variación de la velocidad de adsorción con el tamaño y forma del lecho.

Determinar el valor del coeficiente de adsorción (definido en el capítulo III).

Estudiar la eficacia de recuperación de los vapores que atraviesan el lecho en diversas condiciones de concentración, gasto de aire etc., tanto en lecho estático como en fluidizado.

Determinar el coeficiente de transferencia de materia para el sistema elegido.

Determinar y analizar los tiempos de residencia del gas y del sólido en el lecho adsorbente.

CAPITULO II. - BIBLIOGRAFIA

Bibliografía General

- (1).- C.T. HSU y M.C. MOLSTAD
Rate of mass transfer from gas stream to porous solid
in fluidized beds.
Ind. Eng. Chem. 47 , 1550 - 1559, (1955)
- (2) LEONARD FARBAR
Flow characteristics of solid-gas mixtures in a horizontal
and vertical circular conduit.
Ind. Eng. Chem. 41 , 1184- 1191, (1949)
- (3).- E.R. GILLILAND y E.A. MASON
Gas and solid mixing in fluidized beds
Ind. Eng. Chem. 41 , 1191- 1197, (1949)
- (4).- BAR- ILAN y RESNICK. W.
Gas phase mass transfer in fixed beds at low Reynolds n
number.
Ind. Eng. Chem. 49, 313- 320 (1957)
- (5).- P.H.GARNER y otros
La separation des hydrocarbures á bas point d'ebullition
par adsorption en phase vapeur.
Genie Chimique 78 , 141-151 (1957)
- (6).- K.N. KETTERING, E.L. MANDERFIELD y J.M. SMITH.
Heat and mass transfer in fluidized systems.
Chem. Eng. Progress 46, 139-145 (1950)
- (7).- H.GUERIN
Traité de manipulation et analyse des gaz
Masson et Cie Paris 1952
- (8).- MICKLEY. H.S. y TRILLING. C.A.
Heat transfer characteristics of fluidized beds
Ind. Eng. Chem. 41 , 1135- 1147, (1949)
- (9).- CAMPBELL. D.L. , HZMARTIN, EVMURPREE y C.W. TYSON
U.S. Patent 2.446.076 (julio 1948)
Sep ration of gases
- (10).- A.VIAN y otros
Symposium de fluidización
Química e Industria 6, 284 -(1954)

- (11).- P. REBOUX
Phenomenes de fluidisation - Documentación general.
Asociación Francaise de fluidisation
Paris 1954
- (12).- L.D. ETHERINGTON, R.J. FRITZ y E.W. NICHOLSON
A new fluids-solids development for difficult gas separations: Fluid char adsorption process
Chem. Eng. Progress. 52, 274-280 (1956)
- (13).- GILLILAND, E.R. y MASON E.A.
Gas mixing in beds of fluidized solids
Ind. Eng. Chem. 44, 218 (1952)
- (14).- FREDERICK, A. ZENZ y DONALD OTHMER
"Fluidization and fluid-particle systems"
Reinhold Pub. Corp. New York (1960)
- (15).- CHU, J.C. "Fluidization"
Reinhold, Pub. Corp. New York (1956)
- (16).- M.H. RAY
Gas chromatography. I. The separation and estimation of volatile organic compounds by gas-liquid partition chromatography J. Applied. Chem. 4, 21-32 (1954)
- (17).- ASKINS, J.W., HINDS, G.P. y F. KUNREUTHER
Fluid catalyst-gas mixing in commercial equipment.
Chem. Eng. Prog. 47, 401-404 (1951)
- (18).- BARNEBEY, H.L. y W.L. DAVIS
Cat of solvent recovery systems
Chem. Eng., 12, 51-55 (1958)
- (19).- J.L. MARTINEZ CORDON y G. ZAZURCA LOPEZ
La separación de compuestos orgánicos volátiles por cromatografía en fase vapor
Combustibles 84, 65-75, (1956)
- (20).- CHARVAT, V. y HOUDEK, M.
Los principios de la técnica de leche fluidizado
Paliva, 33, 162-166 (1953)
- (21).- CHARVAT, V. y OLDRICH, H.
La técnica de las medidas del leche fluidizado
Paliva, 35, 253 - 258 (1953)
- (22).- LEVA, M. "Fluidization"
Mc. Graw Hill Book Company Inc- New York (1959)

- (23).- RESNICK. W y WHITE. R.R.
Mass transfer in systems of gas and fluidized solids.
Chem. Eng. Prog. 45 , 377- 390 (1949)
- (24).- B. F. DODGE
Chemical Engineering Thermodynamics
Mc. Graw- Hill Company Inc. New York (1944)
- (25).- RALPH. A. TROUPE
By- pass orifice extends range of rotameter
chem. Eng. 11 , 240 , 1957
- (26).- CHU. J.C., KALIL. J. y WETEROTH. W.A.
Mass transfer in a fluidized bed
Chem. Eng. Progress 49 , 141, (1953)
- (27).- TAECKER. R.G. HOUGEN. O.A.
Heat, mass transfer of gas film in flow of gases through
commercial tower packings
Chem. Eng. Progress 45 , 188 (1949)
- (28).- EVANS. G.C. y GERALD. C. F.
Mass transfer from Benzoic Acid Granules to water in fixed
and fluidized beds at low Reynolds Number
Chem. Eng. Progress 49 , 135 (1953)
- (29).- GAMSOM. B.W.
Heat and mass transfer fluid solid systems
Chem. Eng. Progress 47 , 19 (1951)
- (30).- GAMSOM. B.W. , THODOS. G. y HOUGEN. O.A.
Heat, mass and momentum transfer in the flow of gases through
granular solids.
Trans. Am. Inst. Chem. Engrs 39 , 1, (1943)
- (31).- HOBSON. M. y THODOS. G.
Mass transfer in the flow of liquids through granular solids
Chem. Eng. Progress 45 , 517 (1949)
- (32).- HOBSON. M. y THODOS. G
Mass transfer; laminar flow of gases through granular beds
Chem. Eng. Progress 47 , 570 , (1951)
- (33).- HURT. D.M.
Principles of reactor design gas- solid interface reactions.
Ind. Eng. Chem. 35 , 522 (1943)
- (34).- KLINKENBERG. A. y MOOY. H.H.
Dimensionless groups in fluid friction, heat and material
transfer
Chem. Eng. Progress 44 , 17 (1948)

- (35).- Mc. CUNE. L.K. y WILHELM. R.T.
Mass and momentum transfer in solid-liquid system. Fixed
and fluidized beds.
Ind. Eng. Chem. 41 , 1124 , (1949)
- (36).- WILKE. C.R. y HOUGEN. O.A.
Mass transfer in the flow of gases through granular solids
extended to low modified
Reynolds numbers
Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 41 445, (1945)
- (37).- SHERWOOD. T.K.
Discussion on "Heat, mass and momentum transfer in the
flow of gases through granular solids"
Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 39 , 583 ,(1943)
- (38).- RALPH. A. TROUPE y BERNARD. M. GOODWIN
Install the right size orifice
Chem. Eng. 4 , 199- 203 (1956)
- (39).- MAX LEVA
Equipment for fixed and moving beds
Chem. Eng. 3 , 258, 262 (1957)

CAPITULO III.- PLAN EXPERIMENTAL

CAPITULO III: PLAN EXPERIMENTAL

III- 1 Teorias

Al intentar una comparación entre lecho estático y lecho fluidizado teniendo en cuenta la forma en que estos lechos trabajan en la práctica industrial, el conocimiento de las isotermas de adsorción tiene un interés limitado debido al hecho de que el lecho estático no trabaja nunca en régimen isotérmico, ni puede admitirse éste régimen siquiera como una aproximación tecnológica, ya que los calores de adsorción, generalmente considerables, calientan el lecho, y aún más, en muchos casos puede observarse una zona de temperaturas más elevadas que las del resto del lecho que es en la que está ocurriendo la adsorción y cuya zona se desplaza paulatinamente a medida que funciona el lecho. Aunque se emplean espirales de refrigeración nunca se acerca el proceso industrial a las condiciones isotermas. Por otro lado, en el caso del lecho fluidizado sí que pueden admitirse las condiciones isotérmicas una vez que el aparato ha alcanzado su régimen de funcionamiento normal, cosa que tiene lugar en muy poco tiempo; incluso en reactores de lecho fluidizado en los que el calor de reacción es grande, las variaciones de temperatura en el lecho

son pequeñas como es bien sabido. Por lo dicho la comparación tecnológica basada en buscar las ecuaciones de transferencia de materia en ambos lechos es problemática, ya que una ecuación de este tipo no es fácil de determinar en lecho estático. De todos modos, como el lecho fluidizado no se calienta prácticamente durante el proceso de adsorción y puede trabajar a temperaturas mejor controladas, resulta que, en principio, la técnica de lecho fluidizado permitirá aprovechar mejor las características del adsorbente, puesto que al trabajar a menor temperatura retendrá mayor cantidad de adsorbato por unidad de peso de adsorbente que en ^{el} caso de lecho estático; esto significa que la eficacia de recuperación es posiblemente mayor en lecho fluidizado que en lecho estático.

En el caso de una mezcla de gases muy diluida respecto a los vapores que se trata de recuperar, como son las que hemos de estudiar, las propiedades de la mezcla tales como densidad, viscosidad peso molecular etc, pueden tomarse sin gran error iguales a las del aire.

En los párrafos que siguen estudiamos la adsorción considerando cada lecho particular como una unidad o etapa de reacción, es decir, como un reactor independiente con una velo-

-idad de adsorción propia y unas características determinadas.

La expresión general para la transferencia de materia en un sistema sólido-gas, fluidizado o no, puede escribirse como sigue

$$dw = K_g A \Delta dt \quad [III-1]$$

en donde

dw = gramos de adsorbato retenidos

K_g = coeficiente global de transferencia

dt = tiempo

A = area total del adsorbente

Δ = Potencial global de transferencia

En el caso de un sólido adsorbente con una granulometría determinada y que forma un lecho con un empaquetamiento dado, el área total disponible para la adsorción es proporcional al número de partículas y por tanto el peso de adsorbente en el lecho de que se trate. Si designamos por m el peso de adsorbente en el lecho podemos escribir

$$A = \text{constante} \cdot m$$

y finalmente escribir

$$dw = K_g' m \Delta dt$$

englobando la constante de proporcionalidad en K_g'

$$\frac{dw}{m} = K_g' \Delta dt \quad ; \quad \frac{w}{m} = K_g' \int \Delta dt$$

Si definimos la velocidad de adsorción como el peso de adsorbato retenido por unidad de tiempo y unidad de adsorbente en el lecho podemos escribir

$$v_a = \frac{dw}{dt} \frac{1}{m} = K_g' \Delta$$

donde v_a = velocidad de adsorción

Por otro lado, si llamamos θ_{r_2} al tiempo de residencia del gas en el lecho y con V y G el volumen del lecho y el gasto de gas a través del lecho respectivamente, tendremos

$$\theta_{r_2} = \frac{V}{G}$$

De las dos últimas ecuaciones podemos deducir la siguiente

$$v_a \theta_{r_2} = \frac{V}{m G} \frac{dw}{dt} \quad [III-3]$$

Si se adsorben W gramos de adsorbato en el tiempo dt que tarda en pasar el gas por el lecho, es decir si $\theta_{rg} = \frac{dt}{m}$ la última ecuación se puede escribir sencillamente

$$v_a \theta_{rg} = \frac{W}{m} \quad [III - 3]$$

por tanto cuanto mayor sea m tanto mayor será la cantidad de adsorbato retenida.

En lecho estático la ~~superficie~~ superficie disponible en las partículas del adsorbente para la transferencia de materia es menor que la suma de las superficies de todas las partículas, debido a que los contactos entre éstas restan superficie al contacto sólido-gas; no obstante, para un empaquetamiento determinado, pueden mantenerse las ecuaciones anteriores, teniendo en cuenta que en la constante v_a incluido un factor de proporcionalidad de valor menor que la unidad.

En lecho fluidizado se puede admitir que la mezcla de sólidos es muy rápida y prácticamente completa, mientras que la mezcla por retroceso o turbulencia del gas es pequeña, aunque tiende a aumentar al disminuir la esbeltez del lecho. Si la mezcla por retroceso de la corriente gaseosa debido a turbulencia, vértices, etc. es despreciable, puede admitirse

un gradiente lineal de las concentraciones del vapor en la corriente gaseosa; por otro lado, admitir que la mezcla de sólidos es completa equivale a suponer que el contenido en adsorbato de la unidad de peso del adsorbente es uniforme, es decir, que en cada instante hay una sola concentración de adsorbato en el adsorbente contenido en el lecho, cuya concentración representa el valor medio de las concentraciones realmente existentes en la superficie de todas y cada una de las partículas que componen el lecho. No ocurre así en el lecho estático donde el contenido en adsorbato del adsorbente varía a lo largo de la dirección del flujo gaseoso. Una vez que hemos admitido que la composición del sólido en el lecho fluidizado es constante y que el gradiente de la composición del gas es lineal y decreciente en la dirección del flujo podemos tomar para el valor del potencial global de transferencia, en lecho fluidizado, la media logarítmica de las composiciones del gas a la entrada y a la salida del lecho

$$\Delta = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1 - x^*}{x_2 - x^*}}$$

La determinación experimental de la velocidad de adsorción y de Δ empleando la ecuación anterior nos permiti

-rá el cálculo del coeficiente global de transferencia de materia en el lecho fluidizado. No ocurre lo mismo en el caso del lecho estático, donde no es posible fijar un método para determinar el valor del potencial global de transferencia.

Después de lo que acabamos de exponer, parece un camino más sencillo para la comparación de los lechos estático y fluidizado el uso de la ecuación (III-3) para establecer la cual no se ha hecho ninguna hipótesis singular y puede aplicarse tanto a un lecho estático como a un lecho fluidizado. El primer objeto de nuestra experimentación será, por tanto, hallar los valores de la velocidad de adsorción y del producto $v_a \cdot \rho_{r_2}$ para diferentes concentraciones y diferentes lechos, con el fin de comparar los resultados obtenidos en los dos tipos de lechos.

El producto $v_a \cdot \rho_{r_2}$ se expresa como gramos de adsorbato /gramos de adsorbente y resulta así ser un coeficiente cinético de adsorción característico de cada adsorbente, independiente de si trabaja en lecho estático o en lecho fluidizado, ya que no depende, en principio, del caudal ni de la composición de la corriente gaseosa. La comprobación experimental de este punto será también objeto de nuestros experimentos.

La "velocidad de adsorción" es una característica bien distinta del que hemos llamado coeficiente de adsorción, aunque éste la lleva implícita, y puede variar para cada lecho particular; el estudio experimental de la variación de la velocidad de adsorción con la forma y el tamaño del lecho será otro punto a desarrollar en este trabajo.

La expresión logarítmica que hemos admitido para la transferencia de materia puede utilizarse en el caso del lecho fluidizado, pero no es segura en el caso de lecho estático donde es difícil establecer cuál será el potencial de transferencia de materia.

La medida de los coeficientes de transferencia de materia en lecho fluidizado para el sistema que nos ocupa constituirá otro punto de nuestra experimentación.

Recordando lo expuesto en el capítulo I sobre la recuperación con carbón activo y con aceites de hulla y teniendo en cuenta que la adsorción de alquitranes supone la desorción de una cantidad equivalente de benceno, concluimos que el estudio del tiempo de residencia del adsorbente en lecho fluidizado deberá ser otro punto objeto de nuestro estudio y por tanto debemos disponer un aparato en el que el sólido pue

-da entrar en el lecho fluidizado con diferentes velocidades de alimentación con objeto de poder variar su tiempo de residencia en el lecho; del tiempo de residencia de las partículas en el lecho dependerá el mejor o peor aprovechamiento de la capacidad adsorbente del sólido, y por tanto, la cantidad total de adsorbente necesaria para un determinado proceso.

Si el tiempo de residencia del sólido determinara el "tiempo de contacto" para la transferencia de materia por adsorción en lecho fluidizado, cabe pensar en buscar experimentalmente un tiempo óptimo de residencia de las partículas sólidas en el lecho, para conseguir que sólo se adsorba un componente al tratar una mezcla de vapores con un adsorbente en lecho fluidizado; este tiempo de residencia del sólido equivaldría al concepto de plate o contacto teórico. En una mezcla de vapores que atraviesa un lecho, fluidizado o estático, todos ellos dispondrán del mismo tiempo de contacto y, por tanto, la posible separación de vapores por adsorción en lecho fluidizado, vendrá determinada por otros factores, como por ejemplo la concentración de cada uno de los componentes de la mezcla, etc. En este punto vuelve a tener interés el concepto de coeficiente cinético de adsorción pues no cabe du

-da de que a igualdad de tiempo de contacto de los vapores que se trata de separar se adsorberá primero y preferentemente el que tenga mayor velocidad de adsorción, e lo que es igual, el que tenga mayor coeficiente cinético de adsorción para la concentración de que se trate y el adsorbente que se utilice. Resulta por tanto necesario un estudio experimental cuidadoso de los tiempos de residencia del sólido en el lecho fluidizado, así como de los coeficientes cinéticos de adsorción de los distintos vapores, para poder disponer de datos que permitan predecir teóricamente las condiciones en que es posible hacer una determinada separación de vapores por adsorción en lecho fluidizado.

III- 1-2

Medida del caudal gaseoso en el aparato de lecho fluidizado.-

Debido a no disponer en nuestro laboratorio de elementos adecuados para poder medir el caudal gaseoso con un rotámetro colocado en serie en la corriente de gases,- ya que uno de los dos rotámetros que había en el laboratorio solo cubría una zona de caudales inferiores a los que necesitábamos en nuestro trabajo, y el otro daba en la zona de caudales requerida una pérdida de carga demasiado grande para las posibilidades del ventilador centrífugo que era preciso utilizar- se dispuso un rotámetro relativamente pequeño en derivación con la corriente principal para medir el caudal de aire, de acuerdo con la teoría que exponemos a continuación.

El sistema consiste en un rotámetro en derivación a los diafragmas de bordes afilados dispuestos según el esquema de la fig. 4 .

La fórmula que da el gasto de aire a través de diafragmas con bordes afilados suele escribirse como sigue

$$W = 0.525 C_m D_2^2 \sqrt{\frac{f_m \Delta P}{1 - \beta^4}}$$

$$w = 0.525 C_m D_2^2 \sqrt{\frac{\rho_m \Delta P}{1 - \beta^4}}$$

Siendo ΔP la caída de presión a través del diafragma que en nuestro caso puede considerarse como la caída de presión entre los puntos 1 y 2.

En el diafragma secundario hay una caída de presión ΔP_{ds} y en el rotámetro y codos otra ΔP_{rc} tales que $\Delta P_{ds} + \Delta P_{rc} = \Delta P_{1-2}$; además el gasto que medimos con el rotámetro w_R es el mismo caudal que pasa a través del diafragma secundario w_d , de modo que $w_R = w_d$; la magnitud β que es la relación entre el diámetro del orificio y el diámetro de la tubería en que dicho orificio se halla situado, era por construcción igual en los dos diafragmas. Si llamamos w_p el gasto que pasa a través del diafragma principal y w_T al gasto total tendremos

$$w_T = w_p + w_d = w_p + w_R$$

y por otro lado aplicando la fórmula anterior

$$w_p = 0.525 C_m D_{prin}^2 \sqrt{\frac{\rho_m \Delta P_{1-2}}{1 - \beta^4}}$$

y

$$W_d = 0.525 C_m D_{sec}^2 \sqrt{\frac{\rho_m \Delta P_{ds}}{1 - \beta^4}}$$

de donde

$$\frac{W_p}{W_d} = \left(\frac{D_{prin}}{D_{sec}} \right)^2 \sqrt{\frac{\Delta P_{1-2}}{\Delta P_{ds}}}$$

y por tanto

$$W_p = \left[\left(\frac{D_{prin}}{D_{sec}} \right)^2 \sqrt{\frac{\Delta P_{1-2}}{\Delta P_{ds}}} \right] W_d \quad ; \quad W_T = K W_R$$

siendo

$$K = \left[1 + \left(\frac{D_{prin}}{D_{sec}} \right)^2 \sqrt{\frac{\Delta P_{1-2}}{\Delta P_{ds}}} \right]$$

de modo que, conociendo los diámetros internos de la tubería principal y de la secundaria (D_{prin} y D_{sec} respectivamente) bastará medir las caídas de presión ΔP_{1-2} y ΔP_{ds} y el gasto en el rotámetro W_R para poder deducir el gasto total

W_T . En nuestro sistema particular tenemos las siguientes dimensiones:

Tubería principal:

Diámetro interno de la tubería = 40,0 mm.
Diámetro del orificio = 20,0 mm.

$$\beta = \frac{20}{40} = 0'5$$

Tubería secundaria:

Diámetro interno de la tubería = 25,75 mm.
Diámetro del orificio = 12,50 mm.

$$\beta = \frac{12'5}{25'75} = 0'5$$

$$\left(\frac{D_{prin}}{D_{sec}} \right)^2 = \left(\frac{40'0}{25'75} \right)^2 = 2'42$$

con lo que

$$K = \left[1 + 2'42 \sqrt{\frac{\Delta P_{r-2}}{\Delta P_{d_s}}} \right]$$

$$\omega_T = \left[1 + 2'42 \sqrt{\frac{\Delta P_{r-2}}{\Delta P_{d_s}}} \right] \omega_R$$

Según lo que acabamos de exponer, ω_T depende de las caídas de presión a través de ambos diafragmas, que a su vez dependen para distintos gastos de la distribución general de presiones en todo el sistema, - las consideraciones teóricas sobre este punto no son sencillas. Hemos de consignar aquí, co-

Como un hecho experimental observado en el curso de nuestro trabajo, que, las curvas experimentales de lectura en el rotámetro-frente a gasto total obtenidas para el mismo sistema de medida del flujo y empleando dos columnas de fluidización de distinto diámetro que fluidizaban dos carbones de distintas granulometría, eran distintas. Los datos experimentales obtenidos para el calibrado de nuestro sistema y las curvas dibujadas con ellos se exponen en el capítulo IV.

- 27 bis -

Exquema del aparato de adsorción en lecho Estático

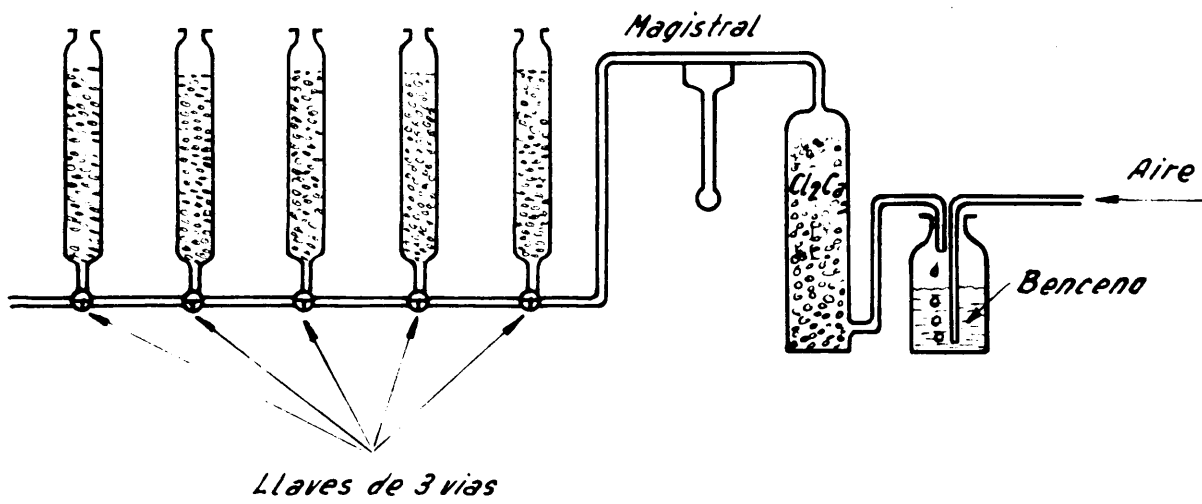


Fig. 2

III-2 Descripción de aparatos

III-2-1 Aparato de adsorción en lecho estático

Para realizar los ensayos en lecho estático se dispuso de una sencilla batería de embudos llenos con carbón activo que se pesaban antes y después de cada experimento; un pequeño compresor suministraba la corriente de aire que se hacía burbotear a través de un frasco lavador con benceno y se medía con un magistral; la altura de adsorbente en los embudos, el diámetro de estos y el tiempo de paso de la corriente se variaron a voluntad, para deducir la influencia de la esbeltez del lecho (definido como la relación altura/diámetro) en la velocidad de adsorción.

El aparato empleado para los ensayos de adsorción en lecho estático se representa esquemáticamente en la fig. 2, que no necesita explicación. Al pie de cada embudo de adsorción se dispusieron llaves de tres vías; cada experimento se comenzaba utilizando el embudo del extremo y con las llaves de los otros embudos colocadas de modo que dejaran pasar la mezcla de aire-benceno a lo largo del tubo de vidrio hasta llegar al último embudo en el que tenía lugar la adsorción; cuando la mezcla gaseosa había pasado a través de dicho embudo

Esquema general del aparato de fluidización

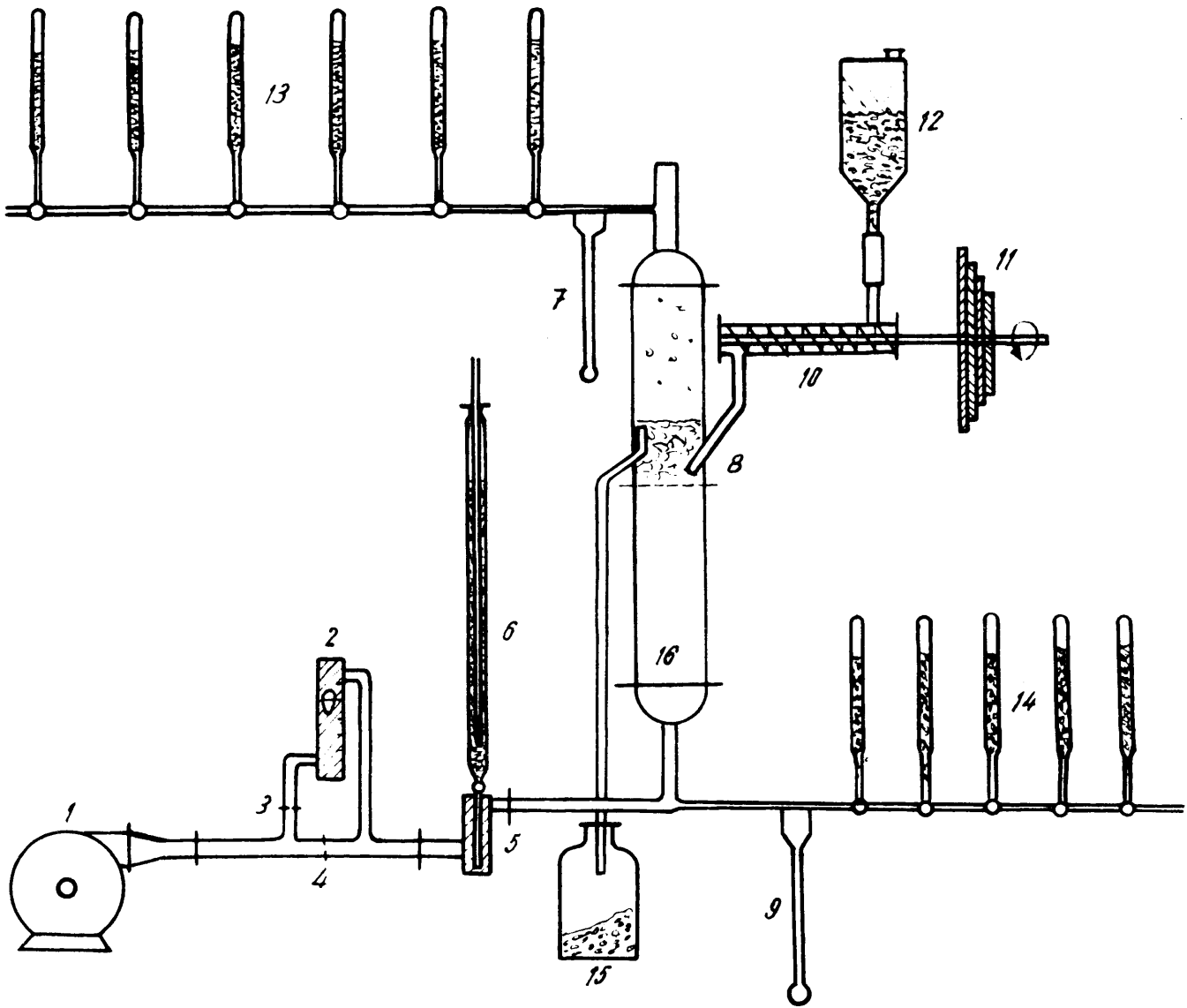


Fig. 3

Fig. 3 .-

ESQUEMA GENERAL DEL APARATO DE FLUIDIZACION.- Leyenda:

- 1 - Ventilador centrífugo**
- 2 - Rotámetro**
- 3 - Diafragma secundario**
- 4 - Diafragma principal**
- 5 - Evaporador de benceno**
- 6 - Depósito de benceno**
- 7 - Magistral del sistema de análisis de los gases de salida del lecho.**
- 8 - Lecho fluidizado**
- 9 - Magistral del sistema de análisis de los gases que entran al lecho.**
- 10 - Tornillo sinfín para la alimentación de sólidos**
- 11 - Juego de poleas para variar la velocidad de alimentación del sólido adsorbente.**
- 12 - Depósito de alimentación del adsorbente**
- 13 - Juego de embudos para el análisis de los gases de salida del lecho.**
- 14 - Juego de embudos para el análisis de los gases de entrada al lecho.**
- 15 - Depósito de recogida de adsorbente con adsorbato.**
- 16 - Columna de fluidización.**

durante el tiempo deseado bastaba girar la llave del embudo anterior para que comenzara la adsorción en éste y dejara de llegar el gas al último embudo; repitiendo esta operación con las restantes llaves se hacía pasar el gas por los restantes embudos durante intervalos de tiempo variable para cada uno, midiéndose en cada caso los tiempos de paso con un cronómetro.

III- 2-2 Aparato de fluidización

El aparato de fluidización utilizado se representa esquemáticamente en la fig. 3 y estaba constituido por los siguientes elementos:

- a) Ventilador centrífugo
- b) Sistema medidor del gasto, constituido por un rotámetro en derivación y dos diafragmas, uno de estos situado en la corriente principal y el otro situado en la corriente secundaria en serie con el rotámetro y situado delante de éste. Los diafragmas eran dos láminas de acetato de celulosa con un espesor del orden de 0.1 mm. taladradas con un orificio cuidadosamente centrado. En ambos diafragmas la relación entre el diámetro del orificio y el diámetro de la tubería en que está

-ba colocado era, por construcción, la misma con el fin de que los flujos a través de los dos diafragmas fueran análogos.

e) dosificador de benceno, que estaba constituido por un depósito cilíndrico de vidrio de unos 5.0 cm. de diámetro y algo más de un litro de capacidad; este depósito comunicaba a través de una llave con un evaporador de benceno de latón que era atravesado por la corriente gaseosa cuando funcionaba el aparato; este evaporador estaba rodeado por dos resistencias eléctricas para su calefacción, - las resistencias podían conectarse en serie o en paralelo a voluntad, según el grado de calefacción deseado, o bien conectarse solo una de ellas; el benceno procedente del depósito caía de un modo continuo y uniforme sobre el fondo caliente del evaporador a través de un tubo, también de latón, que llegaba muy cerca del fondo del evaporador para evitar que el benceno líquido fuera arrastrado por la corriente de aire; la llave permitía regular el paso del benceno; al mismo tiempo que caía el benceno la corriente de aire circulaba por el evaporador, esta corriente entraba lateralmente a un nivel unos dos centímetros por encima del extremo inferior del tubo de alimentación de ben-

ceno, y salía a un nivel más alto por un punto diametralmente situado respecto al de entrada. De este modo se conseguía una rápida evaporación del benceno en la corriente gaseosa y se dosificaba la concentración de vapores de benceno dentro de los límites deseados. La intensidad de la calefacción era tal que servía para suministrar el calor necesario para la evaporación del benceno, pero no para calentar el aire.

d) columna de fluidización, situada a continuación del evaporador de benceno se dispuso la columna de fluidización. Esta columna ^{constaba} de dos cuerpos de unos 50.0 cms. de alto cada uno; el primero, situado en la parte baja por donde entraba la mezcla gaseosa, servía para homogeneizar el flujo de gas antes de que este llegara al lecho y comunicaba directamente por su parte inferior con la tubería principal del aparato. Este cuerpo comunicaba con una pequeña tubería que servía para tomar una pequeña fracción de la mezcla gaseosa que entraba en el lecho y llevarla al sistema de análisis; el segundo cuerpo, situado encima del primero, estaba provisto de entrada y salida para la circulación del sólido, aunque en una serie de experimentos en los que no se necesitaba circular el sólido se utilizó un cilindro sin dichas entrada y salida. Entre ambos

cuerpos se colocó una tela metálica sobre la que se formaba el lecho fluidizado. En la parte superior de la columna se tomaba otra pequeña derivación de la corriente principal que se conducía al sistema de análisis de la mezcla de salida.

e) Sistema de análisis de las mezclas gaseosas; el análisis de las mezclas gaseosas de entrada y salida al lecho fluidizado se realizaba en cada caso midiendo con un magistral la corriente derivada y haciéndola pasar a través de un embudo lleno con el carbón activo utilizado en el experimento, durante un tiempo conocido (dos minutos), la diferencia de peso del embudo antes y después del paso de la mezcla nos daba el benceno adsorbido que era el mismo que contenía la mezcla pasada. Se instalaron dos series de seis embudos cada una, para analizar la composición del aire a la entrada y a la salida; un juego de llaves de tres vías, análogo al descrito para los ensayos en lecho estático, permitía llevar la mezcla a analizar de uno a otro embudo cada dos minutos, y conocer así la variación con el tiempo de las composiciones de la mezcla a la entrada y a la salida del lecho fluidizado, lo que permitía conocer la composición del sólido en el lecho con un sencillo balance de materia. Las mezclas a analizar se hacían pasar,

Esquema del sistema utilizado para medir el gasto de aire

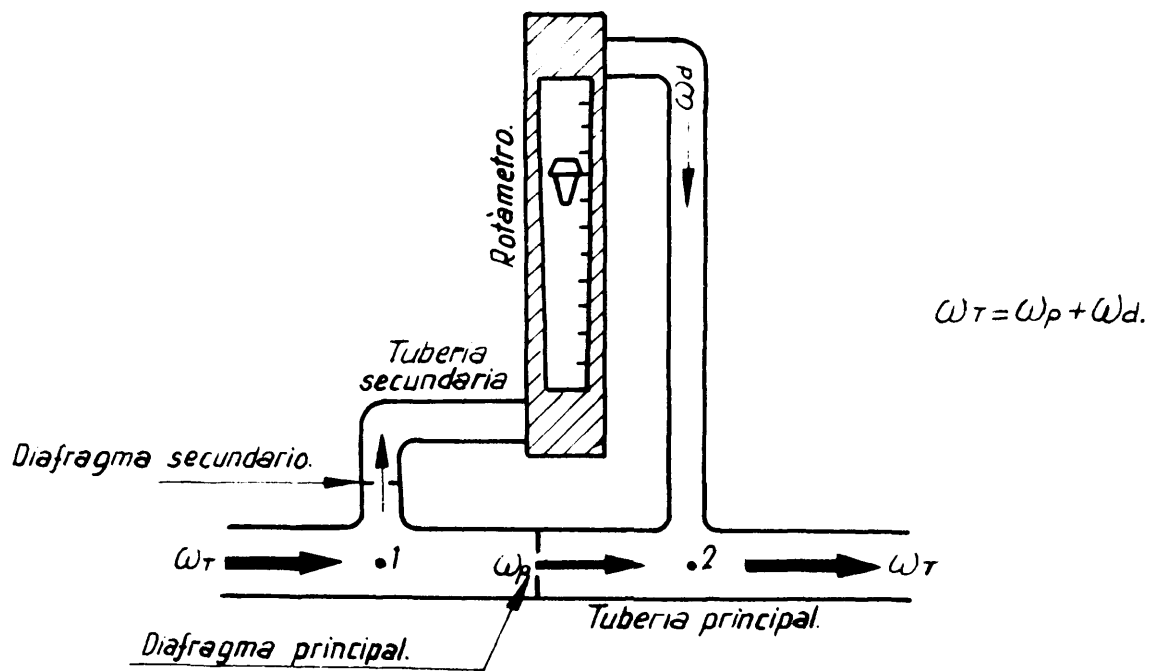


Fig. 4

después de ser medidas en el magistral y antes de ser adsorbidas en el embudo, a través de un tubo en U relleno con cloruro cálcico.

f) El sistema de alimentación de sólidos estaba constituido por un tornillo sin-fín que transportaba el sólido desde una tolva de alimentación situada encima del tornillo, directamente al lecho fluidizado; movida por un pequeño motor eléctrico a través de un mecanismo reductor de velocidad construido con un juego de poleas de diferentes diámetros que proporcionaban diferentes velocidades de alimentación del sólido.

Tanto el sistema para medir el caudal de aire como el sistema de alimentación de sólidos y los magistrales utilizados en el análisis de las mezclas aire-benceno fueron previamente calibrados.

Como se emplearon dos tipos diferentes de carbon activo con distinta granulometría se utilizaron dos columnas de fluidización de distinto diámetro, una para cada adsorbente, pero las dos columnas respondían a la descripción que acabamos de hacer.

En la fig. 3 se presenta un esquema general del aparo

- 33 bis -

Detalle del evaporador de benceno

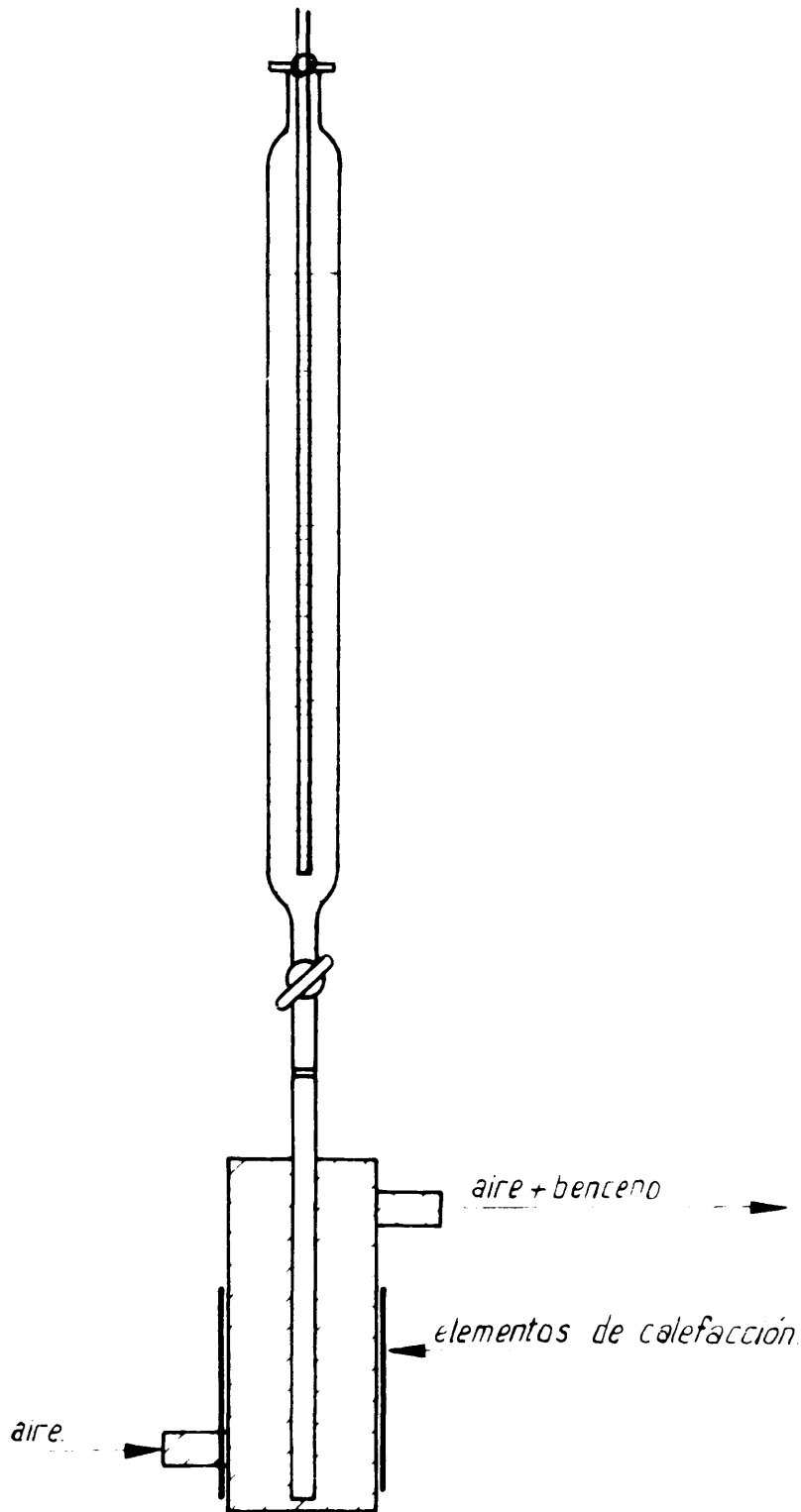


Fig. 5

-to ; en la fig. 4 se da un detalle del sistema medidor del caudal de aire empleado en los experimentos de fluidización.

En la fig. 5 se da el detalle del evaporador de benceno.

III- 3 Descripción de los experimentos.

Para conseguir los fines propuestos se realizaron experimentos con dos tipos diferentes de carbón activo y empleando mezclas de aire-vapores de benceno con diferentes concentraciones de benceno. Los experimentos se realizaron midiendo las concentraciones del benceno en la mezcla gaseosa antes y después de su paso por el lecho a intervalos definidos de tiempo, calculando los tiempos de residencia de los gases en el lecho, buscando las curvas de velocidad de adsorción y, en el caso de lecho fluidizado, calculando las constantes de transferencia de materia y su variación en función de distintas variables del proceso. Se estudió asimismo la influencia de la esbeltez del lecho (definida como la relación de la altura al diámetro del lecho) en la velocidad de adsorción.

Las dos características más importantes de un adsorbente desde un punto de vista técnico son la "capacidad de adsorción" y la "velocidad de adsorción"; en la técnica industrial de adsorción en lecho estático interesa que ambas características tengan el máximo valor posible. La representación más cómoda y útil en la práctica, para expresar las referidas ca-

-racterísticas, es poner en ordenadas la cantidad de adsorbato retenida por el adsorbente, expresada generalmente como gramos de adsorbato retenidos por gramo de adsorbente, y , en abcisas el tiempo de adsorción. Otras veces las ordenadas expresan porcentajes de saturación. En este trabajo se encontró más conveniente sustituir en el eje de abcisas el tiempo de adsorción por la cantidad de adsorbato pasada a través del lecho, - puesto que ésta cantidad solo depende de la concentración de adsorbato en la corriente gaseosa y de la velocidad de pase de esta, ambas representaciones son equivalentes y tienen significado análogo.

La representación de gramos de adsorbato retenidos frente a gramos de adsorbato pasados a través del lecho ofrece la ventaja de que permite comparar las curvas obtenidas en lecho estático y en fluidizado y deducir la eficacia de recuperación en cada caso. Las curvas dibujadas tomando el tiempo como abcisas permiten deducir los valores de la velocidad de adsorción, definida ésta como los gramos de adsorbato retenidos por gramo de adsorbente y unidad de tiempo para una concentración determinada del vapor en la mezcla gaseosa. La velocidad de adsorción así definida, es una característica propia de cada lecho particular.

Para el estudio del lecho estático se realizaron dos series de experimentos. La primera se llevó a cabo para estudiar el efecto de la altura del lecho sobre la adsorción, en un lecho de diámetro constante para todos los ensayos. Esto equivalía a estudiar el efecto de la cantidad de adsorbente en el lecho sobre la velocidad de adsorción, y a variar el tiempo de contacto para un caudal gaseoso constante. El experimento consistía en pasar a través de una altura constante de lecho una corriente de aire con benceno y determinar la cantidad de benceno adsorbido a intervalos medidos de tiempo. Para ello se hacía borbotear una corriente de aire, medida con un magistral, en un frasco conteniendo benceno, y la mezcla aire-benceno se hacía pasar a través de una capa de carbón de altura conocida, durante un tiempo determinado. Un juego de llaves permitía usar sucesivamente todos los embudos. El aparato muy sencillo se esquematiza en la fig. 2. El caudal de aire se mantuvo constante en todos los experimentos, así como la altura inicial del benceno en el frasco; la temperatura del laboratorio no varió en más de 3^o. durante los días que duraron los experimentos, de modo que las concentraciones de

benceno en el aire que pasaba a través de los diferentes lechos eran del mismo orden y muy parecidas, y puede considerarse que no afectaban al trazado de las curvas obtenidas.

La segunda serie experimental se realizó de un modo análogo a la primera, pero en este caso se mantuvo constante la cantidad de adsorbente en el lecho lo que equivalía a mantener el volumen del lecho constante; en este caso se emplearon embudos de diferentes diámetro con el fin de variar la espesura del lecho a volumen constante. Para cada uno de los experimentos de esta segunda serie se utilizaron 10 grs. de carbón adsorbente.

Para el estudio del lecho fluidizado se realizaron tres series de experimentos; la primera de ellas se realizó colocando en cada caso 50.0 gramos de adsorbente en el lecho, pasando a continuación la mezcla aire-benceno que se utilizaba para obtener el estado fluidizado y midiendo la concentración en benceno de dicha mezcla simultáneamente a la entrada y a la salida del lecho fluidizado, repitiendo esta medida a intervalos de dos minutos; de este modo podían obtenerse las correspondientes curvas de velocidad de adsorción y los coeficientes globales de transferencia de materia en lecho fluidi-

-zado. La siguiente serie de experimentos se realizó haciendo circular el adsorbente en el lecho alimentándole de modo continuo por medio de un sistema mecánico de helice transportadora; en la mezcla gaseosa de aire-benceno se medía la concentración del gas a la entrada y a la salida del lecho,- estos ensayos se realizaron colocando 500.0 gramos de carbon en el lecho y comenzando a pasar la corriente de aire con benceno; al cabo de unos dos minutos, estimados necesarios para obtener la homogeneización del lecho, se comenzaba a pasar carbon; en todos los experimentos se circularon 500.0 gramos de carbon por el lecho, para lo que se necesitaba un tiempo de unos 10 minutos. Naturalmente en todos estos experimentos se medían el caudal de aire, la temperatura media y la velocidad de circulación del sólido cuando era necesario. La manera de medir la concentración del benceno en la mezcla era tomando una pequeña derivación de la corriente gaseosa principal, midiendo el caudal de la derivación con un magistral, y haciendola pasar a traves de un embudo de adsorción lleno de adsorbente y previamente pasado, durante un tiempo conocido, que por lo general era de dos minutos; por diferencia de pesadas se conocía el benceno adsorbido y podía calcularse la composición de la

mezcla aire-benceno; la única suposición que se hacía en esta medida era que todo el benceno de la corriente derivada quedaba adsorbido en el adsorbente contenido en el embudo, suposición razonable teniendo en cuenta las proporciones de adsorbente y adsorbato que entraba en juego, - por otro lado los métodos de adsorción han sido muy utilizados para el análisis de gases.

Finalmente, en la tercera serie de experimentos se renovaba el adsorbente del lecho haciéndole circular con diferentes velocidades de alimentación obtenidas haciendo girar a distintas velocidades; en estos experimentos se analizaban simultáneamente la composición de las mezclas gaseosas a la entrada y a la salida del lecho, a intervalos de 2 en 2 minutos; estos análisis se hacían por adsorción de corrientes derivadas en una serie de embudos previamente pesados y dispuestos de modo análogo al descrito en la figura 2 para los experimentos en lecho estático.

En estos experimentos se utilizaron dos tipos de carbón activo: carbón activo CBOA suministrado por la Compañía Española de Carbones Activos S.A. y carbón activo NORIT de N.V. NORIT VERENIGING de Amsterdam.

CAPITULO IV.- EXPERIMENTACION Y RESULTADOS

CAPITULO IV: EXPERIMENTACION Y RESULTADOS

IV- 1 Experimentos en lecho estático

IV- 1-1 Experimentos realizados en lecho estático manteniendo constante el diámetro del lecho y variando su altura.

El primer paso de nuestra experimentación fué estudiar la variación de la velocidad de adsorción (según la definimos en el capítulo anterior pg. 16) con la altura. Con este objeto se realizaron los experimentos cuyos resultados se tabulan a continuación; las curvas obtenidas a partir de estos resultados se representan en las graficas 1, y 2.

LECHO ESTÁTICO

CARBÓN LIGRO

L = altura del lecho = 2 cms.

D = diametro del lecho = 2'74 cms.

e = esbeltez $L/D = 0'73$

t = tiempo (minutos)

P_0 = peso del embudo vacío (grs)

P_1 = Peso del embudo con carbon (grs)

P_2 = Peso del embudo + carbon + benceno adsorbido (grs)

$P_1 - P_0$ = gramos de carbon

$P_2 - P_1$ = gramos de benceno adsorbidos

P_0	P_1	P_2	tiempo (min)	grs. carbon $P_1 - P_0$	grs. benceno $P_2 - P_1$	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{grs. carbon}}$
68'0394	74'0404	74'9008	2	6'0010	0'8604	0'1434
61'2540	66'5146	67'7526	4	5'2606	1'2380	0'236
66'2702	71'2677	72'8512	6	4'9975	1'5835	0'317
66'1542	71'5934	73'4638	8	5'4392	1'8704	0'344
66'7338	72'6172	74'5860	10	5'8834	1'9688	0'335
67'7940	73'5725	75'5730	12	5'7785	2'0005	0'346
67'8514	72'8592	74'7158	12	5'0078	1'8566	0'371
57'6540	62'8967	64'8825	16	5'2427	1'9858	0'379
68'2926	73'9471	76'0669	14	5'6545	2'1198	0'375
62'7887	68'2033	70'2256	18	5'4146	2'0223	0'375
59'4942	65'6822	67'9442	20	6'1880	2'2620	0'368
58'7790	64'4695	66'6399	22	5'6905	2'1704	0'381

La composición de la mezcla aire-benceno se calculó a partir de los dos primeros experimentos como sigue:

grs. benceno adsorbidos	grs. aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{grs. aire}}$	valor medio
0'8604	7'52	0'114	0'098
1'2380	15'04	0'082	

LECHO ESTÁTICO

CARBÓN CECA

- L = altura del lecho = 2 cms.
- D = diametro del lecho = 2.74 cms.
- e = esbeltez $L/D = 0.73$
- P_0 = Peso del embudo vacío (grs)
- P_1 = Peso del embudo con carbón (grs.)
- P_2 = Peso del embudo + carbón + benceno adsorbido (grs)
- $P_1 - P_0$ = gramos de carbón
- $P_2 - P_1$ = gramos de benceno adsorbidos

P_0	P_1	P_2	tiempo (min)	grs. carbón $P_1 - P_0$	grs. benceno $P_2 - P_1$	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{grs. carbón}}$
68.0346	74.3918	76.6798	30	6.3572	2.2880	0.361
66.2608	73.3820	75.9619	35	7.1212	2.5799	0.364
61.2474	69.0132	71.7709	25	7.7658	2.7577	0.356
66.1476	72.8125	75.1524	40	6.6649	2.3399	0.352
66.7390	73.0214	75.2661	45	6.2824	2.2447	0.358
67.7991	74.4690	76.7108	10	6.6699	2.2418	0.337
68.03	73.66	75.36	5	5.63	1.70	0.302
61.25	67.25	69.31	10	5.98	2.08	0.314
66.26	71.78	73.66	15	5.52	1.88	0.341
66.15	72.47	74.62	20	6.32	2.15	0.340
66.73	73.09	75.31	30	6.36	2.22	0.340

La composición de la mezcla aire-benceno se calculó con los datos del experimento correspondiente a cinco minutos, como sigue:

grs. benceno adsorbidos	grs. aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{grs. aire}}$
1.70	18.80	0.091

L = altura del lecho = 5'0 cms.

D = diámetro del lecho = 2'74 cms.

e = esbeltez $L/D = 1'83$

Las letras t , P_0 , P_1 , P_2 representan lo mismo que en las tablas anteriores.

P_0	P_1	P_2	tiempo (min)	grs. carbon $P_1 - P_0$	grs. benceno $P_2 - P_1$	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{grs. carbon}}$
67'7692	79'7640	81'6876	5	11'9948	1'9236	0'160
57'5880	70'2240	73'8584	10	12'6360	3'6144	0'285
68'2556	79'9210	84'0706	15	11'6654	4'1496	0'355
62'7426	74'5700	78'8691	20	11'8274	4'2991	0'364
59'4572	71'4910	76'0526	25	12'0358	4'5616	0'379
68'0170	81'7406	86'1748	14	13'7236	4'4342	0'324
61'2292	73'8040	78'0410	16	12'5748	4'2370	0'336
66'2416	77'6210	81'6300	18	11'3794	4'009	0'352
66'1252	78'1834	82'4388	20	12'0582	4'2554	0'351
67'7754	81'3020	82'1444	2	13'5266	0'8424	0'061
57'6256	70'1230	71'6712	4	12'4974	1'5482	0'124
68'2568	81'0425	83'7918	6	12'7857	2'7493	0'215
62'7506	74'8475	78'0300	8	12'0969	3'1825	0'263
59'4742	71'9590	75'6092	10	12'4848	3'6502	0'292
58'7400	70'3238	74'1334	12	11'5838	3'8096	0'329
68'0486	80'8902	85'5876	40	12'8416	4'6974	0'366
61'2566	73'6510	78'1725	35	12'3944	4'5215	0'365
66'2757	77'7784	82'0425	30	11'5030	4'2638	0'371
66'1570	77'1578	81'3080	30	11'0008	4'1442	0'376
66'7337	78'6325	85'0972	35	11'8988	4'4647	0'375
67'7826	80'9910	85'6892	40	13'2084	4'6982	0'356

La composición de la mezcla aire-benceno se calculó con los datos de los experimentos correspondientes a 2, 4, 5 y 8 minutos, según la tabla que sigue.

grs. benceno adsorbidos	grs. aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{grs. aire}}$	valor medio
0'8424	7'52	0'112	
1'5482	15'04	0'103	
1'9236	18'80	0'102	0'106
3'1825	30'08	0'106	

LECHO ESTÁTICO

CARBÓN CECA

L = altura del lecho = 7'0 cms.

D = diámetro del lecho = 2'74 cms.

e = esbeltez L/D = 2'56

Las letras t, P₀, P₁, P₂, representan lo mismo que en las tablas anteriores.

P ₀	P ₁	P ₂	tiempo (min.)	grs. carbon P ₁ -P ₀	grs. benceno P ₂ -P ₁	<u>grs. benceno</u> <u>grs. carbon</u>
68'0291	86'8242	87'6814	2	18'7951	0'8572	0'0456
61'2428	80'2228	82'0308	4	18'9800	1'8080	0'0957
66'2614	84'5606	86'8956	6	18'2992	2'3350	0'127
66'7248	84'9008	88'9187	10	18'1760	4'0179	0'222
67'7816	86'6866	91'4702	12	18'9050	4'7836	0'253
67'8559	88'6614	94'6281	14	20'8055	5'9667	0'286
57'6530	76'9068	83'1926	16	19'2538	6'2858	0'327
68'2939	88'7910	95'4755	18	20'4971	6'6845	0'327
62'7772	82'1590	88'6278	20	19'3818	6'4688	0'334
59'5065	79'1395	86'0120	22	19'6330	6'8725	0'351

La composición de la mezcla aire-benceno se calculó con los datos de los experimentos correspondientes a 2, 4, 6, 10 y 12 minutos, según la tabla que sigue:

grs. benceno adsorbidos	grs. aire pasados	<u>grs. benceno</u> <u>grs. aire</u>	valor medio
0'8572	7'52	0'114	
1'8080	15'04	0'120	
2'3350	22'56	0'103	0'110
4'0179	37'6	0'106	
4'7836	45'12	0'106	

LECHO ESTÁTICO

CARBÓN CRUA

L = altura del lecho = 9'0 cms.

D = diámetro del lecho = 2'74 cms.

e = esbeltez L/D = 3'28

Las letras t, P₀, P₁, P₂ representan lo mismo que en las tablas anteriores

P ₀	P ₁	P ₂	tiempo (min.)	grs.carbon P ₁ -P ₀	grs.benceno P ₂ -P ₁	<u>grs.benceno</u> <u>grs.carbon</u>
68'03	93'76	94'74	2	25'73	0'98	0'038
61'25	87'24	89'19	4	26'01	1'95	0'075
66'265	91'365	94'395	6	25'10	3'03	0'121
66'15	91'14	94'97	8	24'99	3'83	0'153
66'73	90'90	95'29	10	24'17	4'39	0'182
67'79	93'26	98'75	12	25'47	5'49	0'216
67'85	93'36	98'81	14	25'51	5'45	0'214
62'79	88'80	97'59	20	26'01	8'79	0'338
59'51	85'70	94'11	22	26'19	8'41	0'322
68'03	92'62	98'96	14	24'59	6'34	0'257
61'25	86'00	92'88	16	24'75	6'88	0'278
66'26	89'75	96'95	18	23'49	7'20	0'307
66'73	90'39	98'61	30	23'66	8'22	0'348
68'03	94'41	102'71	20	26'38	8'30	0'314
61'25	85'83	93'92	22	24'58	8'09	0'329
66'26	89'52	97'39	24	23'26	7'87	0'338
66'15	89'66	97'86	30	23'51	8'20	0'348
66'73	90'43	98'61	35	24'30	8'18	0'339
67'79	90'93	99'05	40	23'14	8'12	0'353

La composición de la mezcla aire-benceno se calculó con los datos de los experimentos correspondientes a 2, 4, 8, 10 y 12 minutos, según la tabla que sigue:

grs.benceno adsorbidos	grs.aire pasados	<u>grs.benceno</u> <u>grs. aire</u>	valor medio
0'98	7'52	0'130	
1'95	15'04	0'130	
3'83	30'08	0'127	0'125
4'39	37'60	0'117	
5'49	45'12	0'121	

LECHO ESTATICO

CARBON CECA

L = altura del lecho = 11 cms.

D = diametro del lecho = 2'74 cms.

e = esbeltez $L/D = 4'01$

Las letras t, P₀, P₁, P₂, representan lo mismo que en las tablas anteriores.

P ₀	P ₁	P ₂	tiempo (min.)	grs. carbon P ₁ -P ₀	grs. benceno P ₂ -P ₁	<u>grs. benceno</u> <u>grs. carbon</u>
68'03	96'98	98'30	3	28'95	1'32	0'045
61'25	90'82	93'56	6	29'57	2'74	0'093
66'26	94'90	98'84	9	28'64	3'94	0'137
66'16	96'29	101'59	12	30'14	5'30	0'175
66'73	98'14	105'17	15	31'41	7'03	0'224
67'79	101'25	108'83	18	33'46	7'58	0'226
67'85	100'07	108'95	21	32'22	8'68	0'276
57'66	89'48	99'35	24	51'82	9'85	0'310
68'30	99'71	109'84	27	31'41	10'13	0'323
62'79	92'11	102'85	30	29'32	10'74	0'367
59'51	91'09	102'57	30	31'58	11'28	0'358
68'03	97'86	106'04	30	29'33	10'68	0'364
61'25	91'01	101'92	40	29'76	10'91	0'367
66'26	94'59	102'12	18	28'33	7'53	0'264

La composición de la mezcla aire benceno se calcula con los datos de los experimentos correspondientes a 3, 6, 9 y 12 minutos según la tabla que sigue:

grs. benceno adsorbidos	grs. aire pasados	<u>grs. benceno</u> <u>grs. aire</u>	Valor medio
1'32	11'28	0'117	
2'74	22'56	0'121	
3'94	33'84	0'117	0'118
5'30	45'12	0'118	
7'03	56'40	0'124	
7'53	67'68	0'112	

LECHO ESTATICO

CARBON CECA

Gasto de aire = 2'85 litros/min = 3'76 grs/min.

EFICACIA DE RECUPERACION

Altura de leche = L = 2'0 cms.

Tiempo minutos	Aire total pasado por el leche grs.	gramos de benceno pasados	gramos de benceno adsorbidos
2	7'52	0'752	0'752
4	15'0	1'50	1'238
6	22'56	2'25	1'583
8	30'08	3'00	1'870
10	37'6	3'76	1'9688
12	45'12	4'51	2'0005
12	45'12	4'51	1'8566
16	60'16	6'01	1'9858
14	52'64	5'26	2'1198
18	67'68	6'77	2'0223
20	75'2	7'52	2'2620
22	82'72	8'27	2'1704
30	112'8	11'28	2'2880
25	94'00	9'40	2'7577
35	131'60	13'16	2'5799
40	150'4	15'04	2'3399
45	169'20	16'92	2'2447
10	37'6	3'76	2'2418
5	18'80	1'88	1'70
10	37'6	3'76	2'08
15	56'40	5'64	1'88
20	75'2	7'52	2'15
30	112'8	11'28	2'22

LECHO ESTÁTICO

CARBÓN CECA

Gasto de aire = 2'85 litros/min. = 3'76 grs/min.

EFICACIA DE RECUPERACION

Altura de lecho = L = 5 cms.

Tiempo minutos	Aire total pasado por el lecho grs.	grs. de benceno pasados	grs. de benceno adsorbidos
6	18'80	1'88	1'9236
10	37'6	3'76	3'6144
15	56'40	5'64	4'1496
20	75'2	7'52	4'2991
25	94'00	9'40	4'5616
14	52'64	5'26	4'4342
16	60'16	6'01	4'2370
18	67'68	6'77	4'009
20	75'2	7'52	4'2554
2	7'52	0'75	0'8424
4	15'04	1'50	1'5482
6	22'56	2'25	2'7493
8	30'08	3'00	3'1825
10	37'6	3'76	3'6502
12	45'12	4'51	3'8096
40	150'4	15'04	4'6974
35	131'60	13'16	4'5215
30	112'8	11'28	4'2638
30	112'8	11'28	4'1442
35	131'60	13'16	4'4647
40	150'4	15'04	4'6982

LECHO ESTÁTICO

CARBÓN CECA

Gasto de aire = 2'85 litros/min. = 3'76 grs./min

EFICACIA DE RECUPERACION

Altura de lecho = L = 7 cms.

Tiempo minutos	Aire total pasado por el lecho grs.	grs. de benceno pasados	grs. de benceno adsorbidos
2	7'52	0'752	0'0456
4	15'04	1'50	1'8080
6	22'56	2'25	2'3350
10	37'6	3'76	4'0179
12	45'12	4'51	4'7836
14	52'64	5'26	5'9667
16	60'16	6'01	6'2858
18	67'68	6'77	6'6845
20	75'2	7'52	6'4688
22	82'72	8'27	6'8725

LECHO ESTATICO

CARBON CECA

Gasto de aire = 2'85 litros/ min = 3'76 gra/min.

EFICACIA DE RECUPERACION

Altura de lecho = L = 9 cms.

Tiempo minutos	Aire total pasado por el lecho	grs. de benceno pasados	grs. de benceno adsorbidos
2	7'52	0'902	0'98
4	16'04	1'800	1'95
6	22'56	2'71	3'03
8	30'08	3'61	3'83
10	37'16	4'51	4'59
12	45'12	5'41	5'49
14	52'64	6'31	5'45
20	75'2	9'05	8'79
22	82'72	9'92	8'41
14	52'64	6'31	6'34
16	60'16	7'21	6'88
18	67'68	8'11	7'20
30	112'8	13'55	8'22
20	75'2	9'05	8'30
22	82'72	9'92	8'09
24	90'24	10'85	7'87
30	112'8	13'55	8'20
35	131'60	15'80	8'18
40	150'4	18'00	8'12

LECHO ESTÁTICO

CARBÓN CRUA

Gasto de aire = 2'85 litros/min = 3'76 grs./ min

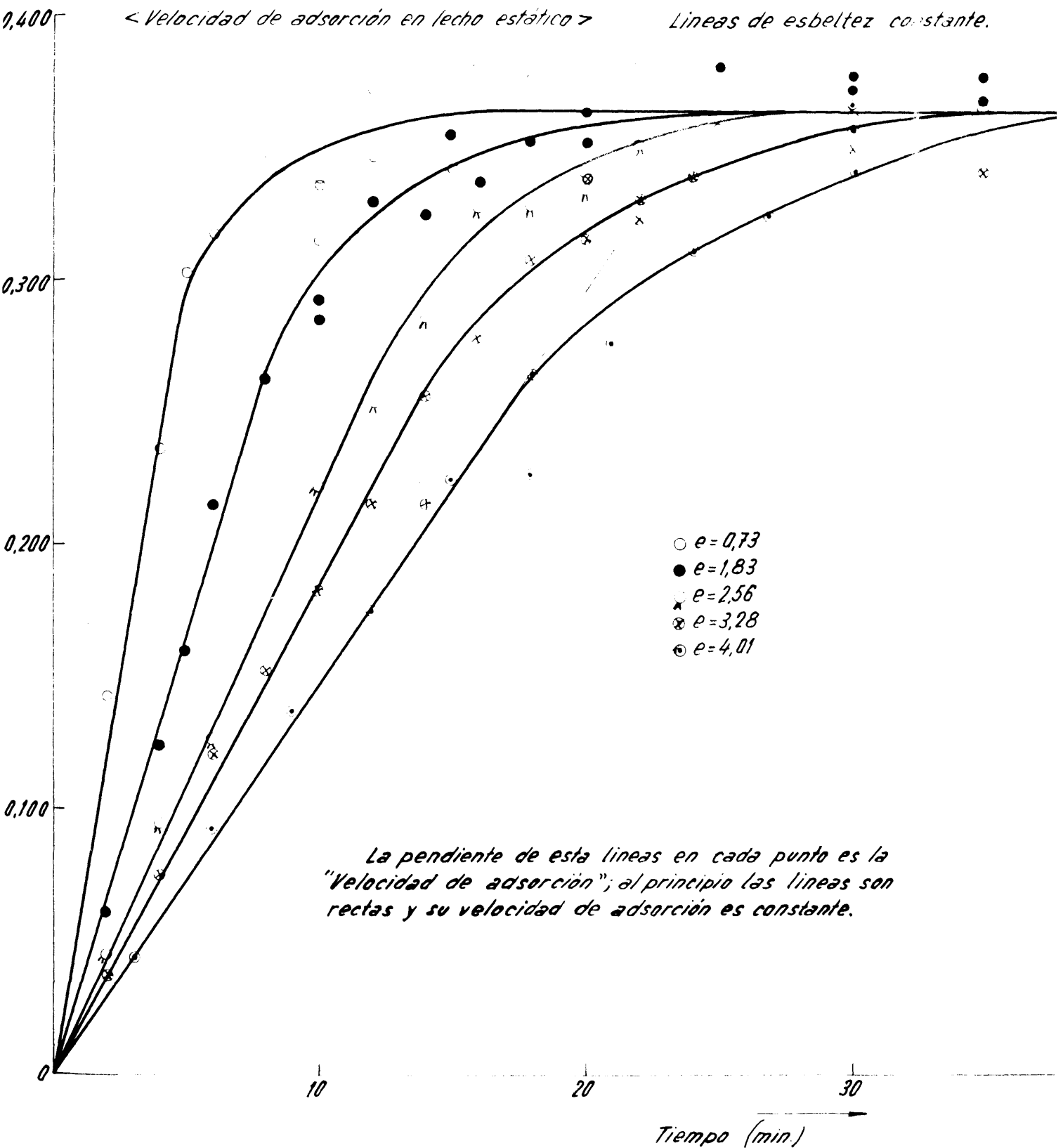
EFICACIA DE RECUPERACION

Altura de lecho = L = 11 cms.

Tiempo minutos	Aire total pasado por el lecho	grs. de benceno pasados	grs. de benceno adsorbidos
3	11'28	1'35	1'32
6	22'56	2'71	2'74
9	33'84	4'07	3'94
12	45'12	5'41	5'30
15	56'40	6'77	7'03
18	67'68	8'11	7'58
21	79'0	9'49	8'88
24	90'24	10'85	9'85
27	101'52	12'20	10'13
30	112'8	13'55	10'74
30	112'8	13'55	11'28
30	112'8	13'55	10'68
40	150'4	18'0	10'91
18	67'68	8'11	7'53

Ensayos en lecho Estático
Carbón CECA
Diámetro del lecho = 2,74 cm. (constante)

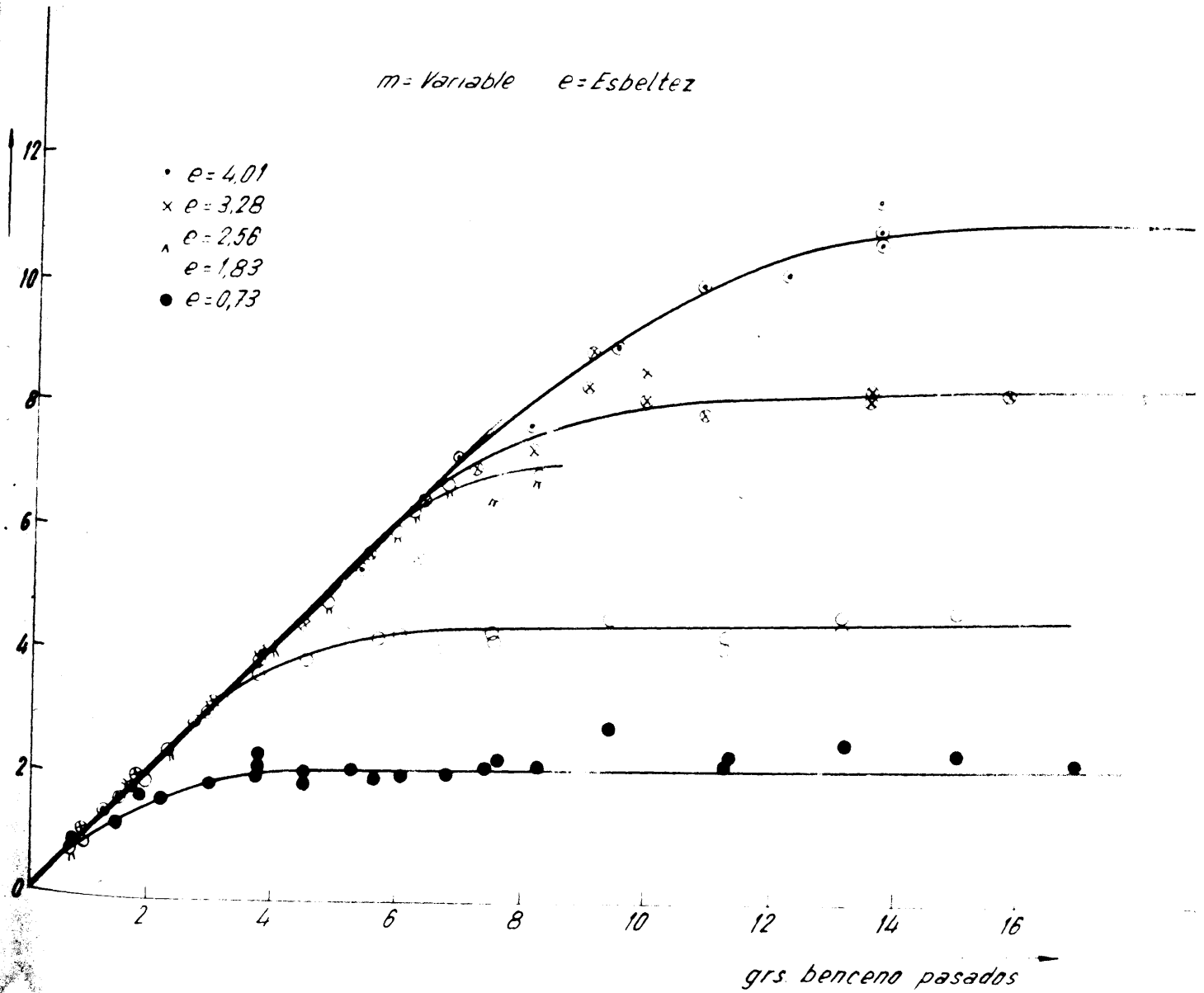
Gráfico 1



Ensayos en lecho Estático
Carbón CECA
Diámetro del lecho constante

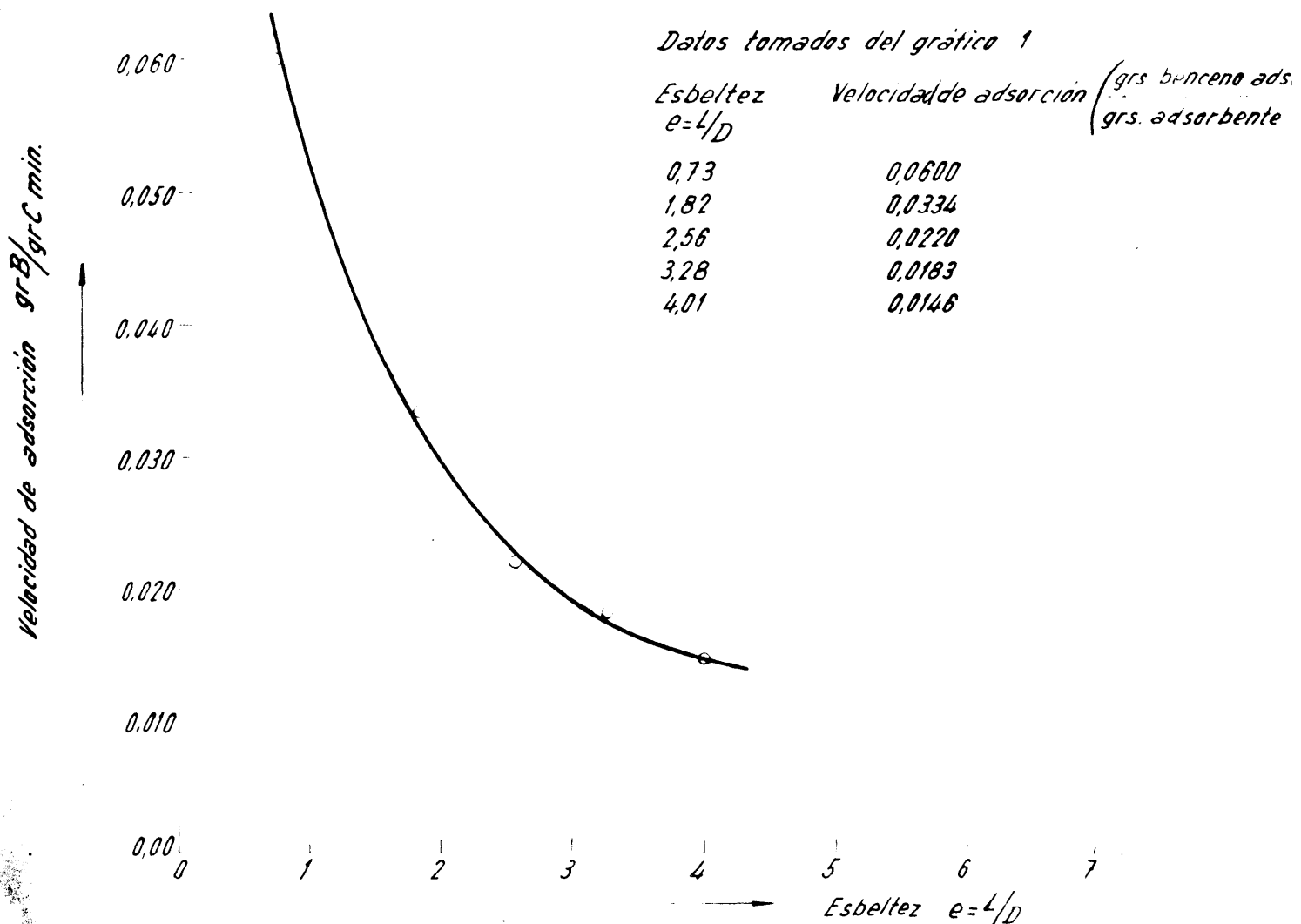
Gráfico 2

m = Variable e = Esbeltez



Representación de la velocidad de adsorción frente a esbeltez en lecho Estático

Gráfico 3



De los resultados anteriores se deduce claramente que la velocidad de adsorción, para una composición determinada de la mezcla gaseosa que entra en el lecho, debe expresarse indicando la cantidad de adsorbente que había en el lecho utilizado al hacer la determinación. Del gráfico 3 resulta que al aumentar la esbeltez del lecho, o lo que es lo mismo, al aumentar la cantidad de adsorbente en el lecho (diámetro constante), el número que expresa la velocidad de adsorción disminuye, lo que se debe a la mayor cantidad de carbón que en un instante dado queda sin saturar en el lecho. Por otro lado, cuanto mayor es la esbeltez tanto mayor es el tiempo de residencia del gas en el lecho; aunque este tiempo de residencia sea muy pequeño puede tener interés calcularle debido a que la adsorción es un fenómeno casi instantáneo.

Evidentemente el tiempo de residencia del benceno es el mismo que el de la mezcla gaseosa utilizada y para calcularle bastará dividir el volumen del lecho ocupado por los huecos o "porosidad" por el gasto de la mezcla; para el gasto de la mezcla deberá tomarse la suma del gasto de aire (2.85 litros/minuto en todos estos experimentos) y el volumen parcial del benceno.

Para el cálculo de los tiempos de residencia del gas en el lecho fué preciso determinar previamente la porosidad del lecho. Esta determinación y la de la densidad del carbon adsorbente utilizado dieron los resultados que se indican en la página siguiente.

El volumen parcial teórico de 1 gramo de benceno al estado gaseoso a 20° C. y 760 mm Hg. será

$$\frac{22.4}{78} \frac{293}{273} = 0.308 \text{ litros}$$

Determinación de la densidad del carbon.-Metodo del picnometro.

Resultados:

Peso del picnometro vacio	29'5404	grs.
Peso del picnometro lleno de agua (20° C)	56'9676	"
Volumen del picnometro.	27'4272	cm ³
Peso del picnometro con el adsorbente	38'7146	grs.
Peso del carbon adsorbente	9'1742	"
Peso del picnometro lleno con el carbon adsorbente y benceno	56'4142	"
Peso del picnometro lleno de benceno	53'5708	"
Densidad del benceno = $\frac{53'5708 - 29'5404}{27'4272}$ =	0'877	
Volumen ocupado por el benceno en el picnometro lleno de benceno y carbon $\frac{56'4142 - 38'7146}{0'877}$ =	20'20	cm ³
Volumen ocupado por el carbon en el picnometro lleno de benceno y carbon . 27'42 + 20'20	7'22	cm ³
Densidad del carbon activo CECA . . . $\frac{9'1742}{7'22}$ =	1'27	gr/cm ³

Cálculo de la porosidad del lecho estático.-

gramos de carbon en el lecho 10'00
³
 volumen del lecho en cm 21'00
 volumen ocupado por el carbón activo . . . $10'00/1'27 = 7'87 \text{ cm}^3$
 volumen ocupado por los huecos $21'00 - 7'87 = 13'13 \text{ cm}^3$
 Porosidad o fracción de huecos del lecho estático $13'13/21 = 0'62$

Cálculo de los tiempos de residencia del gas en lecho estático.

Con los datos anteriores se pueden calcular los tiempos de residencia del benceno (gas a adsorber) en el lecho y construir la siguiente tabla:

Porosidad del lecho 0'62
 Diámetro del lecho 2'74 cm.
²
 Sección del lecho $5'9 \text{ cm} = 0'059 \text{ dm}^2$

altura del lecho (dm)	velumen del lecho (litro)	grs. benceno minute	litros benceno minute	Tiempo de residencia del benceno (min)
0'2	0'0118	0'34	0'105	0'0025
0'5	0'0295	0'40	0'123	0'0056
0'7	0'0413	0'415	0'128	0'0086
0'9	0'0531	0'47	0'145	0'0111
1'1	0'0650	0'445	0'137	0'0134

donde los tiempos de residencia se han calculado con la formula

$$\text{tiempo de residencia del benceno} = \frac{\text{Porosidad} \times \text{velumen del lecho}}{\text{gasto de aire} + \text{gasto de benceno}}$$

Podemos ahora tabular velocidades de adsorción y tiempos de residencia y calcular su producto en cada caso, haciendo una tabla como la que sigue:

esbeltez $L/D = e$	velocidad de adsorción V_a grs. B/ gr.C x min.	Tiempo de residencia del benceno (min)	$\theta_{rg} \cdot V_a$
0'73	0'0600	0'0025	$1'50 \times 10^{-4}$
1'82	0'0334	0'0056	$1'86 \times 10^{-4}$
2'56	0'0220	0'0086	$1'89 \times 10^{-4}$
3'28	0'0183	0'0111	$2'03 \times 10^{-4}$
4'01	0'0146	0'0134	$1'96 \times 10^{-4}$

Resulta de la tabla anterior que la velocidad de adsorción disminuye al aumentar el tiempo de residencia, es decir el tiempo de contacto; esto es un aparente contrasentido que nace de comparar lechos con diferentes cantidades de adsorbente, es decir de distinto tamaño. Por tanto la velocidad de adsorción como aquí la hemos definido, es una característica propia de cada lecho particular. Por otro lado el producto "tiempo de residencia \times velocidad de adsorción" resulta según la tabla anterior constante y con un valor medio de 1.85×10^{-4} ; parece pues más lógico expresar las características de un lecho estático por este producto mejor que por la velocidad de adsorción. Las dimensiones de este producto son (grs. de benceno/ grs. de carbon) pero su sentido es diferente de la capacidad de saturación o poder retentivo del adsorbente; al llegar a éste punto de la experimentación pensamos que éste producto podría ser el parámetro que ligara el estudio del lecho estático con el del fluidizado.

Parémonos a considerar el significado de éste producto constante $v_a \cdot \theta$ es igual a la cantidad de adsorbato retenida durante el tiempo de contacto o de residencia de la mezcla gaseosa en el lecho. Tecnológicamente, la adsorción depen-

-de fundamentalmente de dos cosas; de las características de la corriente gaseosa que se necesita tratar, y de las características del lecho adsorbente que, a su vez, se relacionan con el volumen de este y con las características del propio adsorbente. Con las características de la corriente gaseosa se relacionan la concentración del vapor que se adsorbe y el gasto horario. Todas estas variables tienen una sencilla y estrecha relación entre sí y con el tiempo de residencia del vapor a recuperar θ_{ry} . Según hemos comprobado experimentalmente la velocidad aparente de adsorción de un lecho determinado varía con el volumen de este en el sentido de que la velocidad de adsorción disminuye al aumentar el volumen del lecho. Si tratamos una mezcla gaseosa de concentración determinada x y gasto G también determinado tendremos:

$$\text{tiempo de residencia del benceno} = \theta_{ry} = \frac{V}{G}$$

donde V es el volumen del lecho

si $v_a \theta_{ry}$ es constante

como G es también constante

$$v_a = \frac{\text{constante}}{\theta_{ry}} = \text{constante} / V$$

de modo que al tratar una corriente de gasto determinado G en un volumen dado de lecho estático V , sea cual fuere la forma del lecho, es decir, su esbeltez, la velocidad de adsorción del lecho ha de ser constante, - o en otras palabras, la representación de gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados (que equivale a la representación de gramos de benceno adsorbidos frente a tiempo) debe dar una sola línea para todos los valores de la esbeltez del lecho. El volumen del lecho a igualdad de empaquetamiento de las partículas sólo depende de la masa de adsorbente que coloquemos, luego si ésta masa de carbón es constante el volumen del lecho puede ser considerado constante, y la representación gramos de benceno adsorbidos frente a tiempo ha de dar una sola curva, cuyo primer tramo recto ha de cumplir en el sistema que nos ocupa $v_a \cdot \partial r_y = 1.85 \times 10^{-4}$ siendo v_a la pendiente del tramo recto inicial de la curva. Si esto fuera así, la existencia de una sola curva nos confirmará el interés de determinar el producto $v_a \cdot \partial r_y$ para los lechos estáticos. En los experimentos que siguen se comprobó la existencia de una sola curva en una representación de este tipo, y por tanto que el parámetro $v_a \cdot \partial r_y$ es de gran interés para estudiar el proceso tecnológico de la adsorción.

En lo que sigue denominamos a este parámetro "coeficiente cinético de adsorción" y lo definimos con la ecuación.

$$C_{ca} = v_a \theta_{1/2} = \text{coeficiente cinético de adsorción.}$$

En la representación "gramos adsorbidos frente a gramos pasados por el lecho" del gráfico 2, en la que en las abscisas el tiempo ha sido sustituido por los gramos de benceno pasados a través del lecho, la pendiente de la curva obtenida viene a significar lo que podríamos llamar "eficacia de recuperación" o "porcentaje de recuperación" del lecho considerado. En este caso se pueden aplicar análogas consideraciones a las ya expuestas al referirnos a la velocidad de adsorción, pero en este caso la curva de mayor esbeltez está por encima de las de menor esbeltez, al contrario de lo que ocurre con el otro tipo de representación. La eficacia de recuperación es en todos los casos del 100% al comenzar a trabajar el lecho, la pendiente de la curva es por tanto igual a uno, hasta que el lecho "rompe" y la eficacia de recuperación comienza a disminuir hasta llegar finalmente a un valor cero en cuyo momento la curva se hace horizontal y el lecho alcanza el punto de saturación.

A la vista de estos resultados hicimos experimentos en

lecho estático empleando el mismo adsorbente y manteniendo constante el volumen del lecho pero variando la esbeltez de éste; el objeto de estos experimentos era comprobar la constancia de la "velocidad de adsorción" y del "coeficiente cinético de adsorción" cuando el volumen del lecho es constante. Los resultados obtenidos, expuestos a continuación confirmaron nuestra suposición.

IV- 1-2 Experimentos realizados en lecho estático manteniendo constante el volumen del lecho y variando su forma.

IV- 1-2-1 Experimentos con carbon Ocea.

La segunda serie de experiencias se realizó de modo análogo a la primera, pero manteniendo constante la cantidad de adsorbente en el lecho (volumen de lecho constante) y variando el diámetro de los embudos utilizados con el fin de variar la esbeltez del lecho a volumen constante. Para cada uno de los experimentos de esta serie se utilizaron 10 gramos de carbon. Los embudos empleados tenían los siguientes diámetros interiores

$$D_1 = 37.6 \text{ mm.}$$

$$D_2 = 28.0 \text{ mm.}$$

$$D_3 = 22.5 \text{ mm.}$$

A continuación se expone en forma de tablas los resultados obtenidos. Asimismo se han dibujado las gráficas de velocidad de adsorción y de eficacia de recuperación. En ambos tipos de gráficas sale una curva única independiente de la forma del lecho, como habíamos previsto.

LECHO ESTATICO

CARBON CECA

m = grs. de adsorbente en el lecho = 10

L = altura del lecho = 19 mm.

D = diametro del lecho = $D_1 = 37.6$

e = esbeltez = $\frac{L}{D} = 0.51$

V = volumen del lecho = $\frac{3.14}{4} \times 37.6^2 \times 1.9 = 21.2 \text{ cms}^3 = 0.0212 \text{ dm}^3$

A = sección del lecho = 11.15 cm^2

P_0 = peso del embudo vacío (grs.)

P_0	$P_0 + 10$ + grs. benceno adsorbidos	Tiempo (min)	grs benceno adsorbidos	aire l/min	Gasto total aire	grs benceno no pasados
89.1432	100.4545	2	1.5113	3.6	7.2	1.31
81.6430	95.9680	4	2.3250	3.6	14.4	2.62
94.1464	105.9370	6	2.7906	3.6	21.6	3.93
95.9171	109.0602	8	3.1431	3.6	28.8	5.24

del primer experimento se deduce la composición de la mezcla aire benceno como sigue:

$$\text{composición del aire} = \frac{1.5113}{7.2} = 0.182 \quad \frac{\text{grs benceno}}{\text{lit aire}} ; \frac{0.182}{1.3} = 0.140 \quad \frac{\text{gr benc.}}{\text{gr aire}}$$

LECHO ESTÁTICO

CARBÓN CECA

$m =$ gramos de adsorbente en el lecho = 10

$L =$ altura del lecho = 38 mm.

$D =$ diámetro del lecho = $D_2 = 27.4$ mm.

$e =$ esbeltez = $\frac{L}{D} = 1.36$

$V =$ volumen del lecho = $\frac{3.14}{4} \times 27.4^2 \times 3.89 = 22.4$ cms

$A =$ sección del lecho = 5.89 cm²

$P_0 =$ peso del embudo vacío (grs.)

P_0	$P_0 + 10 +$ grs benceno ad- sorbidos	Tiempo (min)	gr benceno adsorbidos	aire l/min	Gasto to- tal l. aire	gr benceno pasados
66.0072	78.7256	1	0.7184	3.6	3.6	0.718
66.2269	72.6180	2	1.3911	3.6	7.2	1.43
66.2403	78.3706	3	2.1303	3.6	10.8	2.15
66.1312	78.8438	5	2.7126	3.6	18.0	3.57
66.7012	80.0158	10	3.3146	3.6	36.0	7.18
67.7590	81.2081	12	3.449	3.6	43.2	8.60

La composición de la mezcla aire benceno se deduce de los dos primeros ensayos y resulta:

composición del aire = $\frac{0.7184}{3.6} = 0.199$ $\frac{\text{grs. benceno}}{\text{lit. aire}}$

e bien

composición del aire = $\frac{1.3911}{7.2} = 0.194$ $\frac{\text{grs. benceno}}{\text{lit. aire}}$

Para el cálculo de la última columna se ha tomado el valor $0.199 \frac{\text{gr benc.}}{\text{lit. aire}}$

$\frac{0.199}{1.3} = 0.153$ $\frac{\text{grs. benceno}}{\text{grs. aire}}$

LECHO ESTÁTICO

CARBÓN VEGA

m=gramos de adsorbente en el lecho = 10

L=altura del lecho = 54 mm.

D=diámetro del lecho $D_3 = 22.5$ mm.

e=esbeltez = $\frac{L}{D} = 2.4$

V=volumen del lecho = $\frac{3.14 \times 2.25^2}{4} \times 5.4 = 21.4 \text{ cm}^3 = 0.0214 \text{ dm}^3$

A=sección del lecho = 3.97 cm^2

r_0 = peso del embudo vacío (grs.)

r_0	$r_0 + 10$ grs. benceno adsorbidos	Tiempo (min)	gr benceno adsorbidos	aire l/min	Gasto tal l. aire	t_0 grs benceno pasados
50.5276	61.7138	2	1.3862	3.6	7.2	1.62
48.7840	61.2526	4	2.4686	3.6	14.4	3.24
46.5062	59.4366	6	2.9304	3.6	21.6	4.86
46.7106	59.9618	8	3.2512	3.6	28.8	6.48
51.3656	61.6586	1/3	0.2930	3.9	1.3	0.293

del último experimento se deduce la composición de la mezcla aire benceno como sigue: $\frac{0.293}{1.3} = 0.225 \frac{\text{gr. benc.}}{\text{l. aire}}$; $\frac{0.225}{1.3} = 0.173 \frac{\text{grs. benceno}}{\text{grs. aire}}$

r_0	$r_0 + 10$ grs. benceno adsorbidos	Tiempo (min)	gr benceno adsorbidos	aire l/min	Gasto tal l. aire	grs. benceno pasados
51.2833	64.6860	12	3.4027	3.6	43.2	6.14
47.7186	61.0604	16	3.3418	3.6	57.6	8.18
50.0836	63.3340	14	3.2504	3.6	50.4	7.16
49.0700	59.1502	1/6	0.0802	3.4	0.566	0.086

del último experimento se deduce la composición de la mezcla aire benceno como sigue: $\frac{0.0802}{0.566} = 0.142 \frac{\text{gr. benceno}}{\text{l. aire}}$; $\frac{0.142}{1.3} = 0.109 \frac{\text{grs. benceno}}{\text{grs. aire}}$

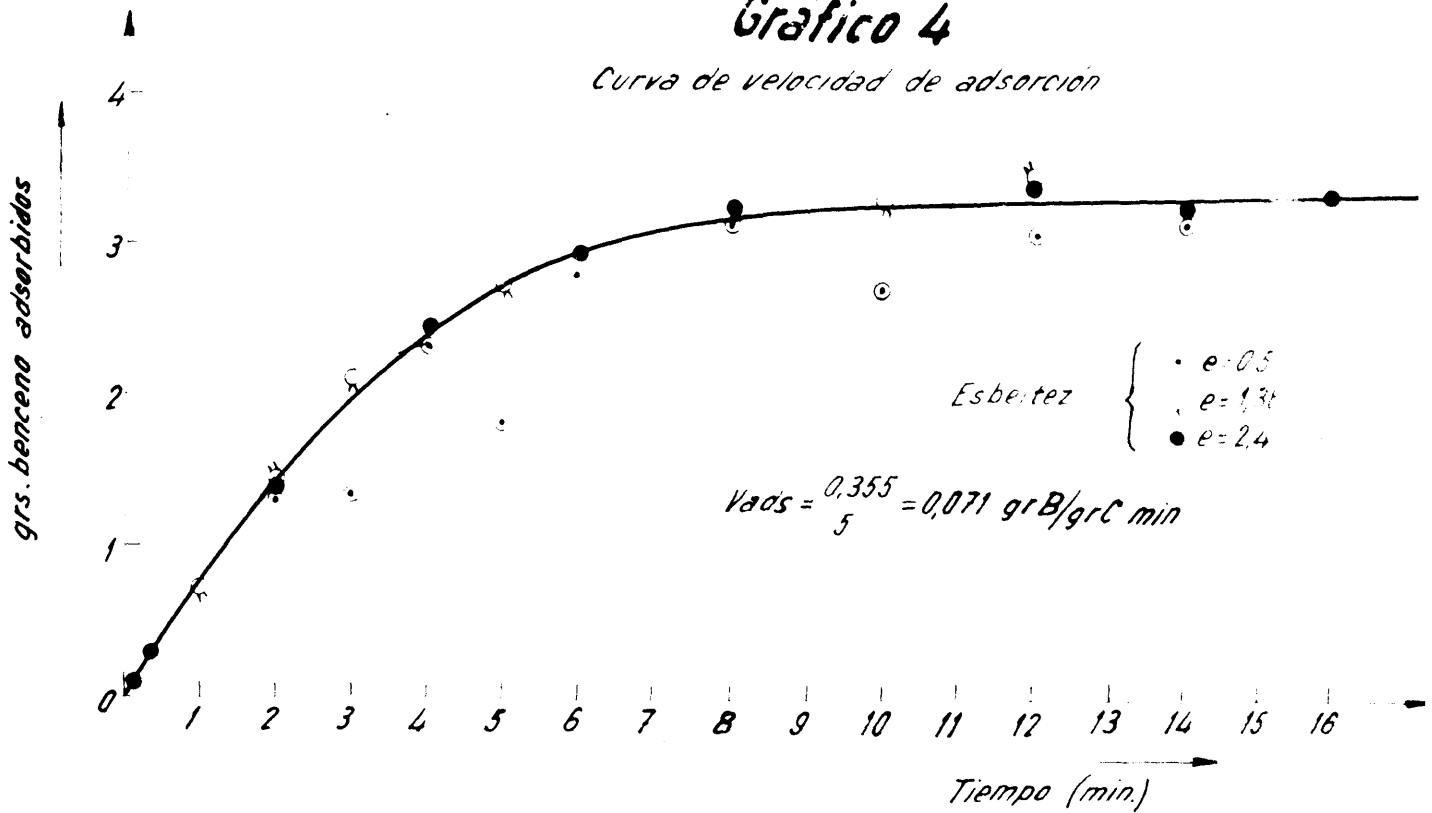
CARBÓN CELM

m=10grs.

- 70 -

Gráfico 4

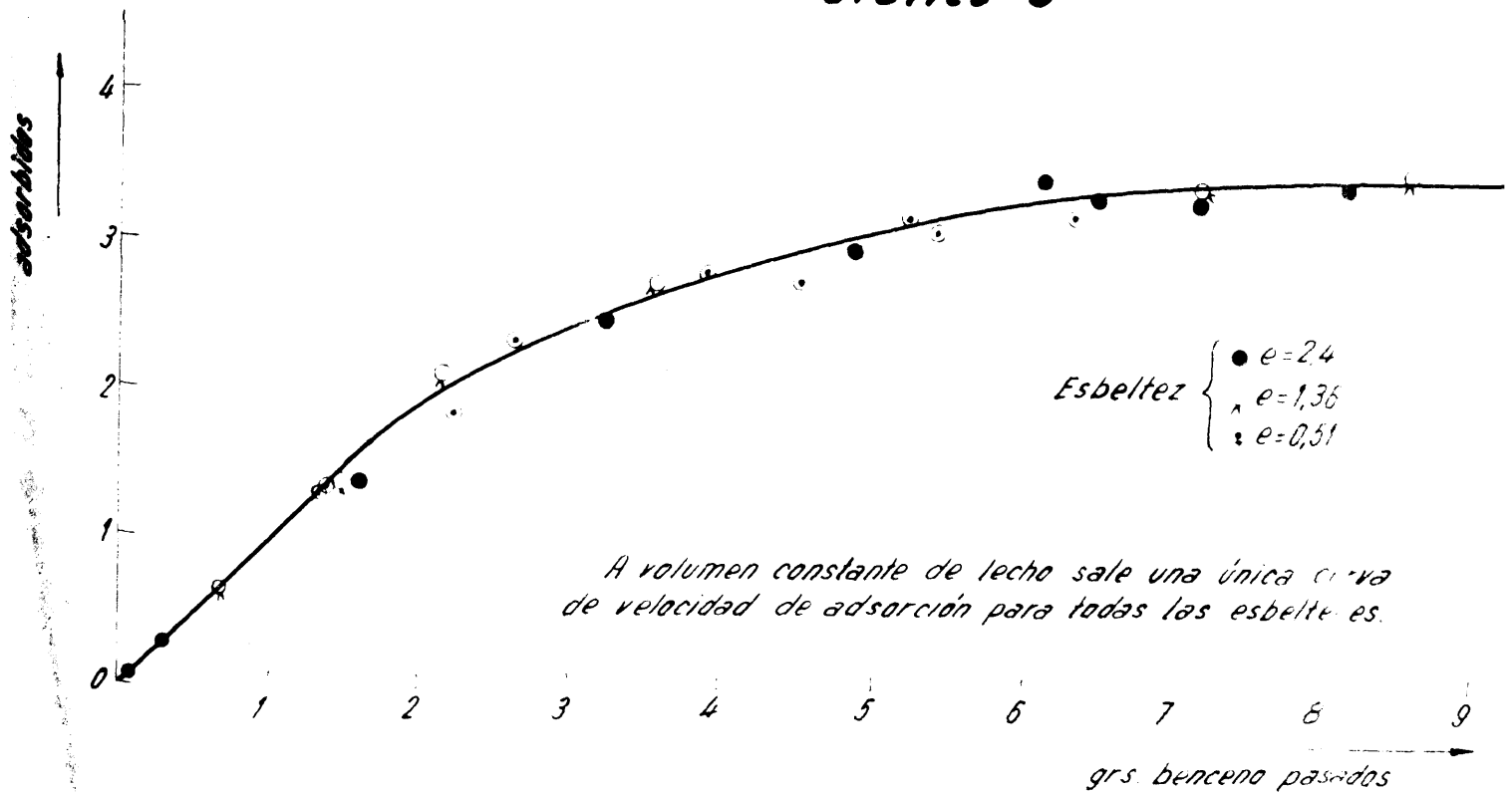
Curva de velocidad de adsorción



Ensayos en lecho Estático

Carbón CECA m=10grs.

Gráfico 5



En los experimentos anteriores, realizados manteniendo constante el volumen del leche estático, se puede calcular el tiempo de residencia del gas como sigue

$$\begin{aligned} \text{volumen del leche (valor medio)} &= 0.021 \text{ dm}^3 \\ \text{velocidad de adsorción (deducida del gráfico 4)} &= \frac{0.071 \text{ gr B}}{\text{gr.C-min}} \\ \text{gasto de aire (idéntico en todos los experimentos)} &= 3.6 \text{ l/min} \end{aligned}$$

Con estos datos se puede calcular el tiempo de residencia del gas igual que se hizo en las pags. 59 y 60.

resultando para cada esbeltez los valores que se indican a continuación.

L/D <u>esbeltez</u>	δ_{r_3} <u>tiempo de residencia del gas (min)</u>	
2.4	0.00343	
0.51	0.00345	Valor medio
1.36	0.00340	= 0.0034

De manera que tenemos los siguientes valores para la velocidad de adsorción y el tiempo de residencia

$$\begin{aligned} \theta_{12} &= 3.4 \times 10^{-3} \text{ min} \\ v_a &= 7.1 \times 10^{-2} \frac{\text{grs. de benceno}}{\text{grs. de carbon x minuto}} \end{aligned}$$

de donde resulta

$$v_a \theta_{12} = 3.4 \times 7.1 \times 10^{-5} = 2.4 \times 10^{-4}$$

en buen acuerdo con el valor obtenido anteriormente de 1.86×10^{-4} pudiendo atribuirse la discrepancia a que en la teoría dicho parámetro es constante para una determinada mezcla gaseosa de composición y gasto constante, circunstancias ambas que solo se mantienen aproximadamente en las dos series de experiencias con las que hemos obtenidos los dos valores anteriores del coeficiente de adsorción.

Repetimos los experimentos en lechos estático con carbón Coca, manteniendo constante el volumen del lecho, pero colocando esta vez 20 grs. de carbón en el lecho. Los resultados obtenidos se tabulan a continuación y se presentan en el gráfico 8. Igual que en el caso anterior todos los puntos caen sobre una línea única, independientemente de la forma del le-

lecho utilizado es decir de su esbeltez.

A la vista de los resultados aquí expuestos nos confirmamos en la idea de la importancia que puede tener el estudio del coeficiente de adsorción en el estudio de los lechos de adsorción. El interés técnico de este nuevo coeficiente estriba en que tiene un valor constante y puede usarse para comparar lechos estáticos de diferente volumen, lo que permitirá enjuiciar y calcular lechos industriales a partir de sencillos ensayos de laboratorio, de un modo más eficaz que los empleados hasta ahora. Se trata ^{ahora} de estudiar si el referido coeficiente puede servir para relacionar el estudio del lecho estático con el del lecho fluidizado cuando estos dos tipos de lecho se utilizan para procesos de adsorción.

Antes de realizar los experimentos en lecho fluidizado, realizamos otra serie de experiencias con lecho estático, manteniendo constante el volumen del lecho y empleando otro carbon adsorbente (carbon Norit)

IV- 1-2-2 Experimentos en lecho estático con carbon NORIT.

Esta otra serie de experiencias se realizó con un tipo diferente de carbón que el empleado para las anteriores, utilizándose un volumen de lecho constante correspondiente a $m = 20.0$ gramos de carbón Norit. Se realizaron experiencias para determinar la curva de velocidad de adsorción de este otro adsorbente, de modo análogo a lo expuesto en las anteriores experiencias.

Los resultados y curvas obtenidas para el carbon Norit se tabulan a continuación.

LECHO ESTÁTICO

CARBÓN NORIT

m = gramos de adsorbente en el lecho = 20

L = altura del lecho = 4.5 cms.

D = diámetro del lecho 3.76 cms.

e = esbeltez = $\frac{L}{D} = 1.20$

V = volumen del lecho = $\frac{3.14}{4} \times 3.76^2 \times 4.5 = 50 \text{ cm}^3 = 0.050 \text{ dm}^3$

P₀ = peso del embudo vacío

P ₀	P ₀ + 20 + grs benceno adsor- bidos.	Tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	aire l/min	Gasto de tal l. aire	gr. benceno pasados
92.5836	113.5718	1.25	0.6834	3.6	4.5	0.6834
89.1914	109.6732	0.5	0.4582	3.6	1.8	0.4582
81.1444	102.6700	2.0	1.4292	3.6	7.2	1.4292
93.3320	116.9078	8	3.5768	3.6	28.8	3.63
86.5930	108.8916	5	2.6016	3.6	18.0	2.27
97.2528	118.1616	2	0.9078	3.6	7.2	0.9078
92.7500	113.7380	3	0.9862	3.6	10.8	1.5617
89.3723	114.0624	11	4.6901	3.6	39.6	4.99
81.3288	107.3176	15	5.9998	3.6	54	6.81

La composición de las mezclas aire-benceno para los seis últimos embudos fue

$$\frac{0.9078}{7.2} = 0.126$$

$$\frac{\text{gr. B}}{\text{I A}} = 0.097 \quad \text{gr B/gr A}$$

ta: algunas pequeñas discrepancias que puedan observarse en esta tabla se deben a que el peso de carbon no era siempre exactamente 20.0000 grs.

$m =$ gramos de adsorbente en el lecho = 20

$L =$ altura del lecho = 7.5 cms

$D =$ diametro del lecho = 2.74 cms.

$e =$ esbeltez = $\frac{L}{D} = 2.74$

$V =$ volumen del lecho = $\frac{3.14}{4} \times 2.74^2 \times 7.5 = 44 \text{ cm}^3 = 0.044 \text{ dm}^3$

$P_0 =$ peso del embudo vacio

P_0	$P_0 + 20$ + grs. benceno adsorbidos	Tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	aire l/min	Gasto tal l. aire	grs. benceno pasados
68'03	88'8282	1	0'800	3'6	3'6	0'800
61'25	84'3196	4	3'070	3'6	14'4	3'20
66'27	91'1028	7	4'833	3'6	25'2	5'60
66'15	92'3982	10	6'248	3'6	36	8'00
66'75	93'2930	15	7'563	3'6	54	12'00
67'79	94'9430	20	7'150	3'6	72	13'60
67'853	89'2090	2	1'560	3'6	7'2	1'36

la composición de las mezclas aire benceno para los cinco primeros embudos es: $\frac{0'800}{3'6} = 0'222$ $\frac{\text{grs. benceno}}{\text{l. aire}}$

la composición de las mezclas aire-benceno para los dos últimos embudos es $\frac{1'560}{7'2} = 0'189$ $\frac{\text{grs. benceno}}{\text{lit. aire}}$

P_0	$P_0 + 20$ + grs. benceno adsorbidos	Tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	aire l/min	Gasto tal l. aire	grs. benceno pasados
57'66	84'5500	25	6'69	3'6	90	17'80
68'30	95'2114	20	6'91	3'6	72	14'24
67'853	88'5652	1	0'712	3'6	3'6	0'712

la composición de las mezclas aire-benceno en este caso es $\frac{0'712}{3'6} = 0'197$ $\frac{\text{grs. benceno}}{\text{lit. aire}} < 0.151$ $\frac{\text{grs. benceno}}{\text{grs. aire}}$

P_0	$P_0 + 20$ + grs. benceno adsorbidos	Tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	aire l/min	Gasto tal l. aire	grs. benceno pasados
68'03	88'7810	1	0'751	3'6	3'6	0'751
67'787	95'2985	30	7'511	3'6	108'0	22'53

la composición de la mezcla aire-benceno en este caso es

$$\frac{0'751}{3'6} = 0'208 \text{ gr benceno/lit aire} = 0'161 \frac{\text{grs. B}}{\text{grs. A}}$$

LECHO ESTÁTICO

CARBÓN NORIT

m = gramos de adsorbente en el lecho = 20

L = altura del lecho = 12'0 cms.

D = diametro del lecho = 2'25 cms.

e = esbeltez = $\frac{L}{D} = 5'33$

V = volumen del lecho = $\frac{3'14}{4} \times 2'25^2 \times 12 = 47'5 \text{ cm}^3 = 0'0475 \text{ dm}^3$

P₀ = peso del embudo vacio

P ₀	P ₀ + 20 + benceno ad- sorbidos	grs. benceno adsorbidos	tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	aire l/min	Gasto to tal l. aire	grs. benceno pasados
50'175	71'8066	1'6366	2	1'6366	3'6	7'2	1'6366
48'4526	72'4340	3'981	5	3'981	3'6	18'0	4'0915
46'4573	71'8584	5'5928	8	5'5928	3'6	28'8	6'5464
46'5410	73'5038	6'9608	12	6'9608	3'6	43'2	9'8196
51'0685	75'4586	4'3920	6	4'3920	3'6	21'6	4'9098
47'5784	74'4654	6'8890	20	6'8890	3'6	72	13'552
49'8986	76'5360	7'0340	15	7'0340	3'6	54	10'164
48'7577	69'4406	0'6776	1	0'6776	3'6	3'6	0'6776

la composición de las mezclas aire-benceno para los cinco primeros

embudos es $\frac{1'6366}{7'2} = 0'227$ grs. benceno/litros de aire

la composición de las mezclas aire-benceno para los tres últimos embu-

dos es $\frac{0'6776}{3'6} = 0'188$ grs. benceno/ litro aire

Carbón NORIT

Gráfico 6

Carbón NORIT - m = 20 grs.

$$V_{ads} = \frac{10}{12 \times 20} = 0,041 \text{ gr B / gr C min.}$$

$$V_{ad} \theta_{rg} = 5,4 \times 10^{-4}$$

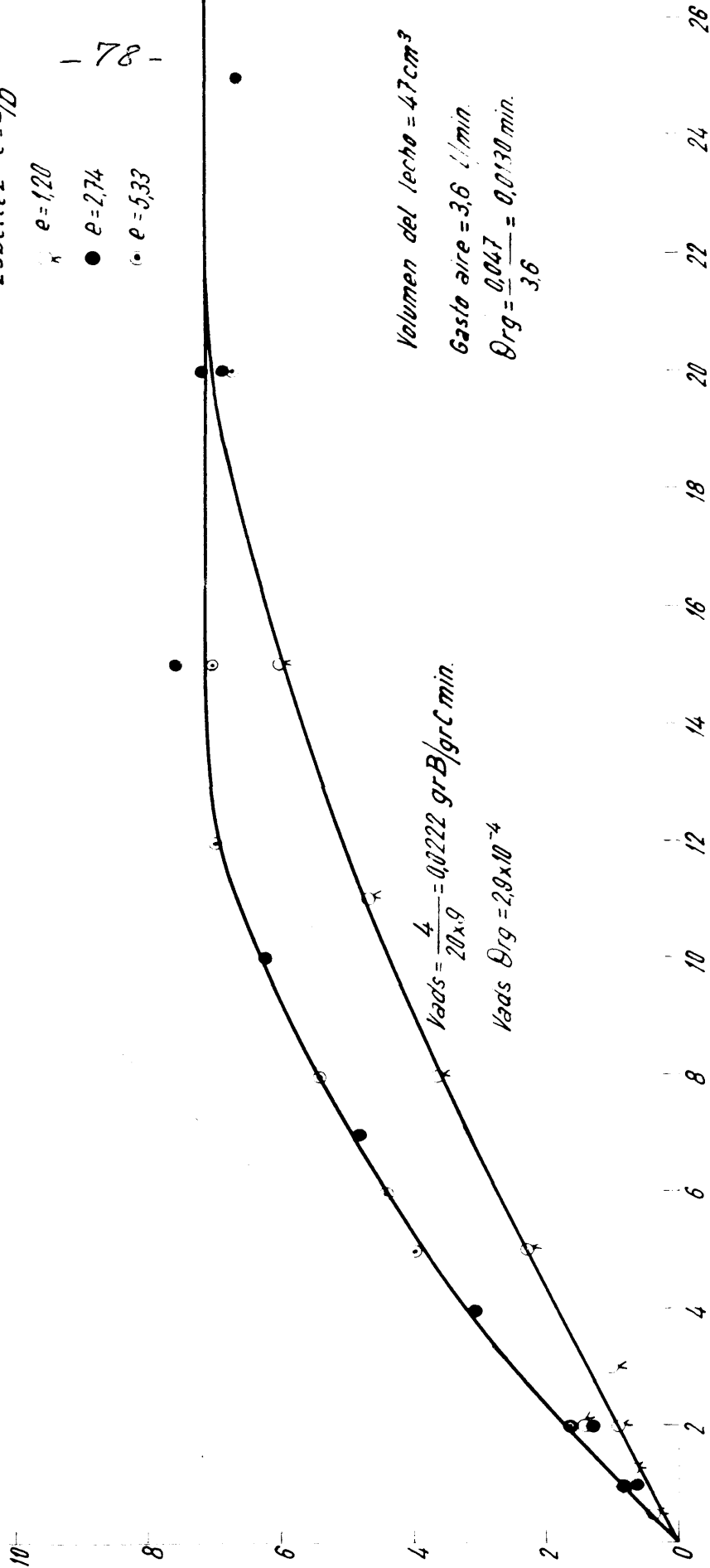
Esbeltez $e = L/D$

x $e = 1,20$

● $e = 2,74$

○ $e = 5,33$

grs. de benceno adsorbidos



Volumen del lecho = 47 cm³
 Gasto aire = 3,6 l/min.
 $\theta_{rg} = \frac{0,047}{3,6} = 0,0130 \text{ min.}$

$V_{ads} = \frac{4}{20 \times 9} = 0,0222 \text{ gr B / gr C min.}$
 $V_{ads} \theta_{rg} = 2,9 \times 10^{-4}$

Curva de velocidad de adsorción

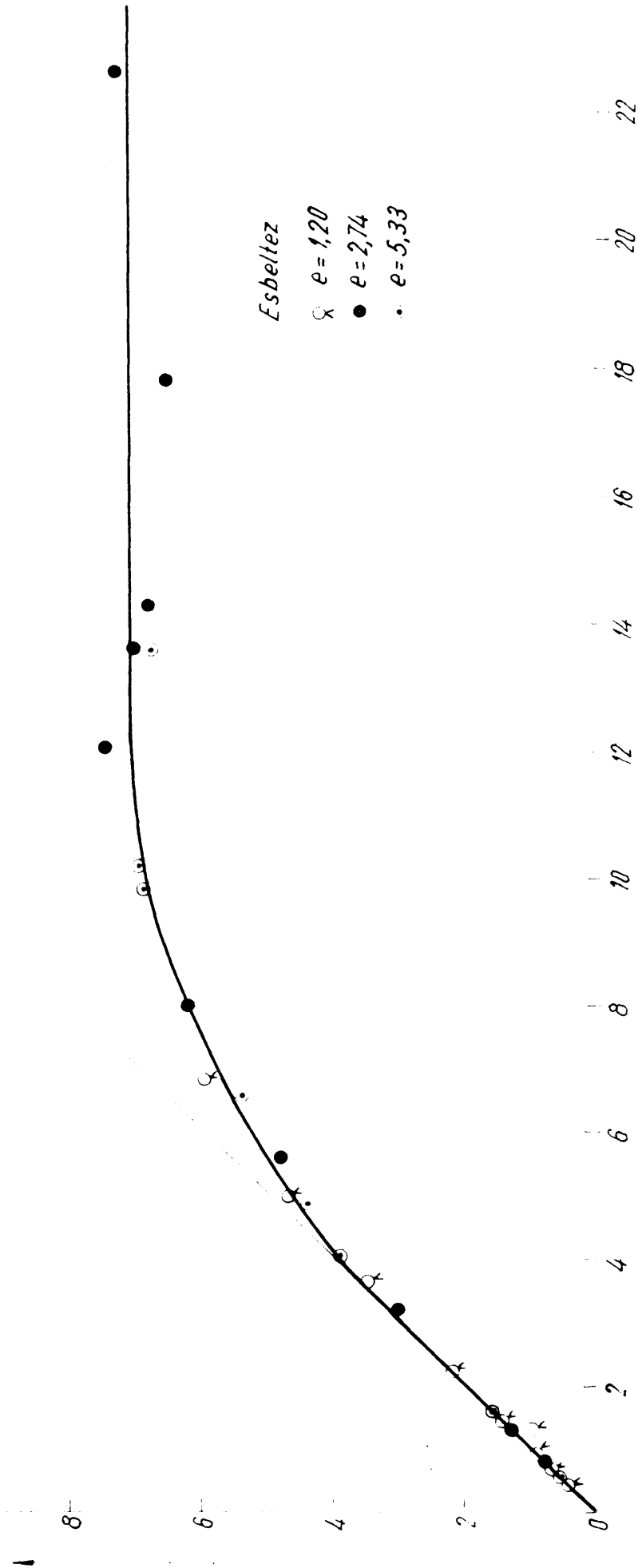
Experimentos en lecho Estático

Carbón NORIT

Gráfico 7

Carbón NORIT - $m = 20$ grs.

grs. benceno adsorbidos



grs. benceno pasados

Esbellez
 \circ $e = 1,20$
 \bullet $e = 2,74$
 \cdot $e = 5,33$

EXPERIMENTOS REALIZADOS EN LECHO ESTÁTICO

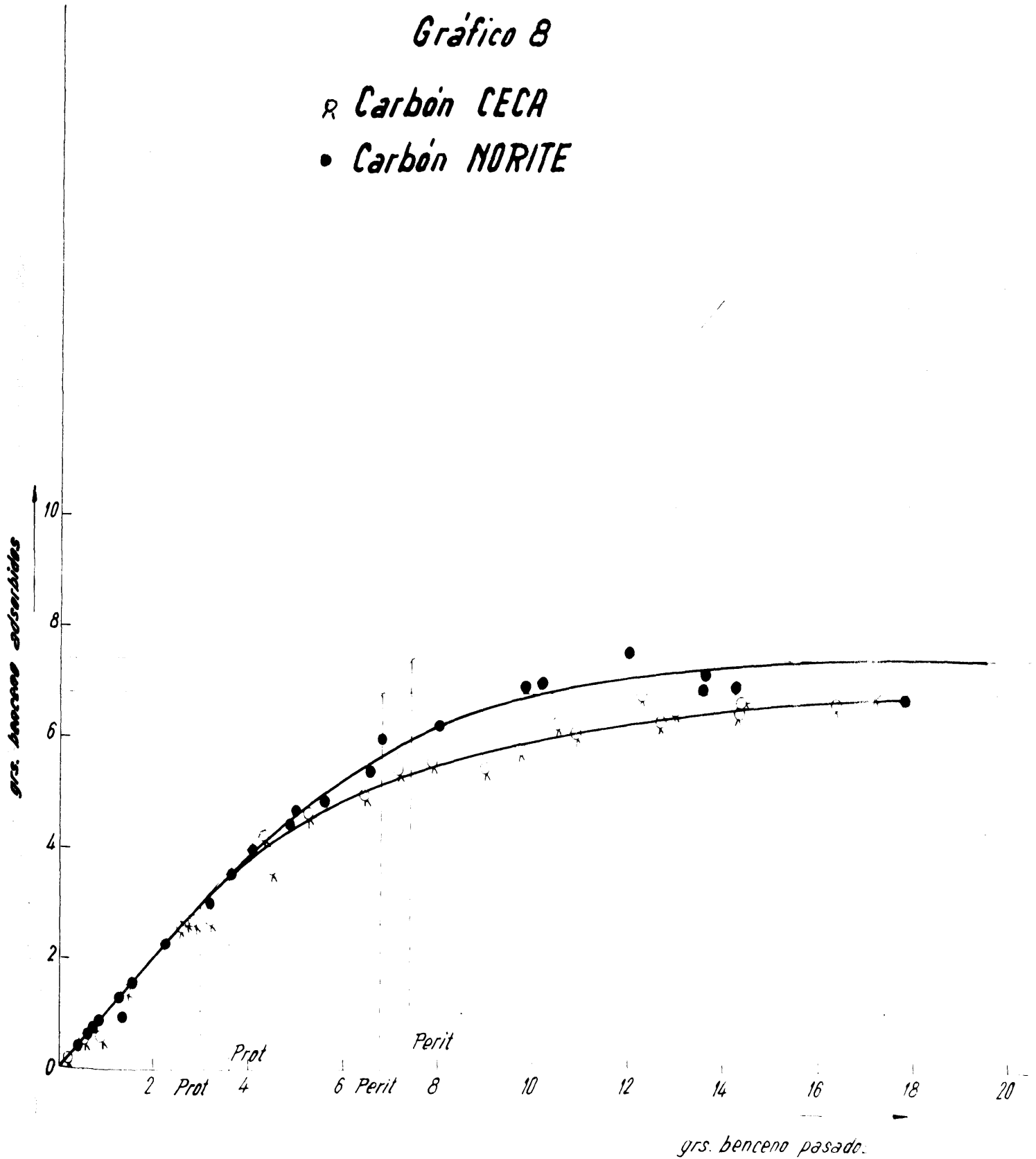
CARBON VECA

Cantidad de adsorbente en el lecho m = 20 gra.

grs. B pasados Ba	grs. benceno adsorbidos Bp
3'24	2'772
6'48	4'957
9'72	5'861
12'96	6'502
0'586	0'586
16'36	6'685
14'32	6'501
0'16	0'160
12'28	6'605
2'62	2'622
5'24	4'650
7'86	5'580
10'48	6'286
0'90	0'611
9'02	5'408
10'64	6'146
12'68	6'296
2'71	2'709
4'52	5'645
1'45	1'456
2'66	2'762
4'50	4'260
7'14	5'424
14'56	6'629
17'20	6'898

Ensayos en lecho estático
m=20 grs. C en el lecho
Gráfico 8

- ⊗ Carbón CECA*
- Carbón NORITE*



Refiriendonos a la curva de velocidad de adsorción del carbón Norit observamos que en el gráfico 6 aparecendos curvas distintas que parecen contradecir lo que venimos exponiendo. Fijandonos en la gráfica gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados vemos que el punto de rotura corresponde al valor de las ordenadas correspondiente a 4'0 gramos de benceno adsorbidos lo que corresponde en el gráfico de velocidad de adsorción a 5'5 y 9'0 minutos en cada una de las curvas obtenidas; puesto que las concentraciones utilizadas en los experimentos que nos proporcionan cada una de éstas dos curvas se hallan en la relación $0'158/0'097 = 1,63$ y por otro lado la relación entre los tiempos de rotura correspondientes es $5'5/9'0 = 1'0/1'63$ inversa de la relación de las concentraciones, no cabe duda de que el desdoblamiento de la curva se debe simplemente a esta variación de las concentraciones. En cambio la curva del gráfico correspondiente a la eficacia de recuperación del carbon no varia sensiblemente en esta zona de concentraciones, o en otras palabras, dicha eficacia de recuperación es indepenaiante de la concentración del gas entrante y el punto de rotura solo depende de las caracteristi- cas del propio adsorbente. En cuanto al valor del coeficiente de

adsorción en este caso resulta que tiene una magnitud distinta para cada curva, a saber 2.9×10^{-4} y 5.0×10^{-4} ; de nuevo es ta discrepancia de valores la atribuimos a la diferencia de concentraciones en cada caso.

IV- 2 Experimentos en lecho fluidizado

IV- 2-1 Calibrados previos

IV- 2-1-1 Calibrado del sistema de medida de aire en lecho fluidizado.

El sistema de medida del caudal de aire fue descrito en el capítulo III; aplicando la fórmula obtenida en dicho capítulo se calibró el sistema con el fin de obtener directamente los gastos a partir de lecturas en el rotámetro; los resultados obtenidos y las gráficas deducidas de ellos se indican en las páginas siguientes.

IV- 2-1-2 Calibrado de los magistrales utilizados en el aparato de fluidización.

En el aparato de fluidización se utilizaron dos magistrales para la medida de las corrientes derivadas que se llevaban a analizar; las curvas de calibrado obtenidas experimentalmente para cada uno de estos magistrales se acompañan en las páginas que siguen.

CALIBRADO DEL SISTEMA DE MEDIDA DEL GASTO
EN LECHO FLUIDIZADO

Diametro de la columna de fluidización $\phi = 5.3$ cms.

l_r = lectura en el rotámetro

ΔP_{ds} = perdida de carga en el diafragma secundario (mm H₂O)

ΔP_T = perdida de carga total (mm. H₂O)

w_d = gasto de aire por la derivación (medido con el rotámetro)

w_T = gasto de aire por la columna (l/min)

l_r	ΔP_{ds}	ΔP_T	$\frac{\Delta P_T}{\Delta P_{ds}} = A$	$2.42\sqrt{A} = B$	$B+1 = K$	w_d	$w_T = Kw_d$
4.5	1	55	55	17.9	18.9	15	246
7	1	55	55	17.9	18.9	18	340
8	1	55	55	17.9	18.9	20	378
9	1	55	55	18.1	19.1	22	420
10	1	55	55	18.1	19.1	24	477
11	1.25	55	45	16.2	17.2	26	447
10	1.25	55	45	16.2	17.2	25	430
9.5	1	55	55	18.1	19.1	23	440
8.5	1	55	55	18.1	19.1	21	402
7	1	55	55	18.1	19.1	18	344
6	1	55	55	18.1	19.1	16	306
4	1	55	55	18.1	19.1	12	229
5	1	55	55	18.1	19.1	14	267
3	1	55	55	18.1	19.1	10	191
2	1	55	55	18.1	19.1	8	152.8
5	1.5	55	36.6	14.52	15.5	14	218
20	5	67	13.4	8.9	9.9	44.5	440
10	1.5	60	40	15.30	16.30	24	392
10	1.5	59	39.4	15.25	16.25	24	390
10	1.5	59	39.4	15.25	16.25	24	390
10	1	59	59	18.65	19.65	24	470
16	1	59	59	18.65	19.65	36	708
18	1	60	60	18.80	19.80	40	792
16	1.5	63	42	15.7	16.7	36	600
16	1.5	63	42	15.7	16.7	36	600
15	1	61	61	18.90	19.90	30	597
13	1	59	59	18.65	19.65	30	590
20	1.5	66	44	16.1	17.1	44.5	762

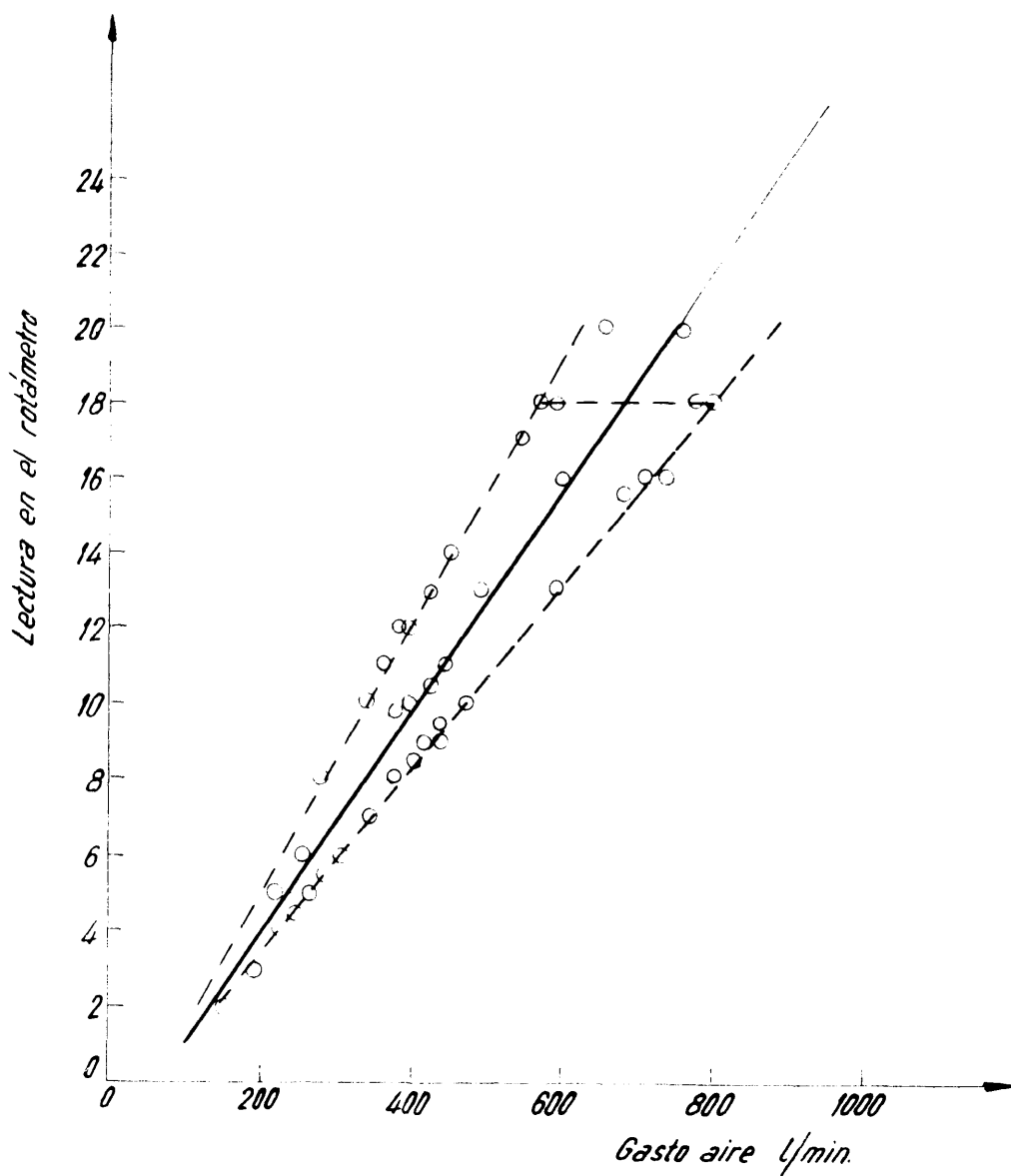
continua ...

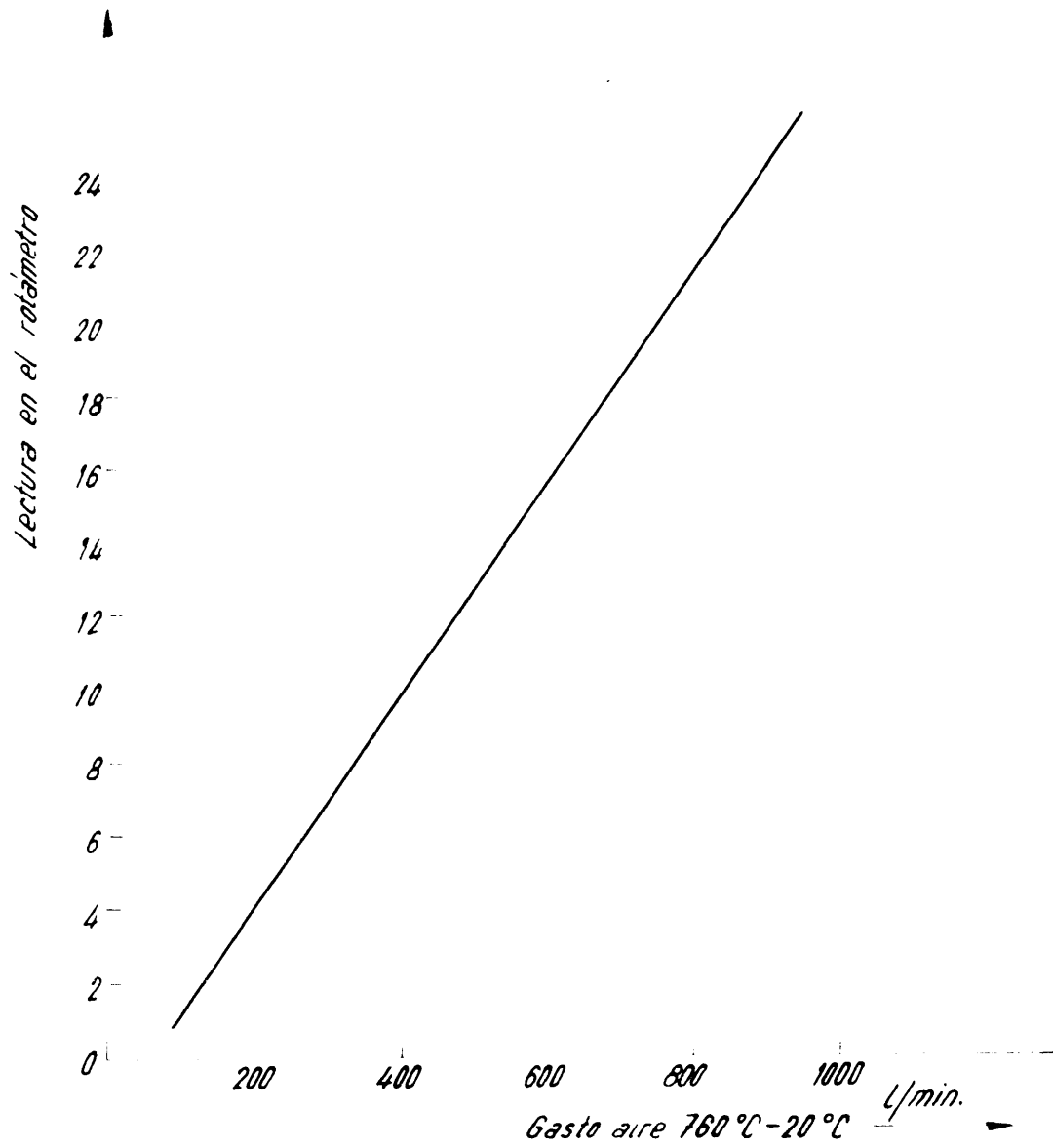
l_r	ΔP_{ds}	ΔP_T	$\frac{\Delta P_T}{\Delta P_{ds}} = A$	$2.42\sqrt{A} = B$	$B+1 = K$	w_d	$w_T = Kw_d$
20	1.5	65	43.14	16.10	17.10	44.15	758
18	2	65	32.5	13.80	14.80	40	592
6	1.5	57	38	14.9	15.9	16	255
13	1	61	61	18.95	19.95	30	598
5.5	1	56	56	18.1	19.1	15	286
15.5	1	58	58	18.45	19.45	35	680
18	2	64	32	13.70	14.70	40	588
20	2	65	32.5	13.80	14.86	44.15	658
15	1	62	62	19.05	20.05	36	738
9	1	61	61	18.60	19.60	22.15	441
24	2.5	68	26.2	12.5	13.5	53.15	712
13	1.5	60	40	15.30	16.30	30	489
10	1	60	60	18.74	19.75	24	474
18	1	62	62	19.05	20.05	40	802
16	1	65	65	19.20	20.20	40	808
8	2	57	28.5	12.9	13.9	20	276
15	2	59	29.5	13.1	14.1	30	423
11	2	59	29.5	13.1	14.1	26	366
18	3	61	30.5	13.3	14.3	40	672
12	2	55	27.5	12.7	13.7	28	384
17	2	61	30.5	13.3	14.3	38	542
12	2	58	29	13.1	14.1	28	395
14	2	59	29.5	13.1	14.1	32	450
10	2	57	28.5	12.9	13.9	24	334
11	1.5	56	28	12.8	13.8	26	359
11	2	56	28	12.8	13.8	26	359
11	2	56	28	12.8	13.8	26	359
11	2	58	29	13.1	14.1	26	366
12	2	57	28.5	12.9	13.9	28	390
12	2	58	29	13.1	14.1	28	395

Calibrado del sistema medidor de flujo

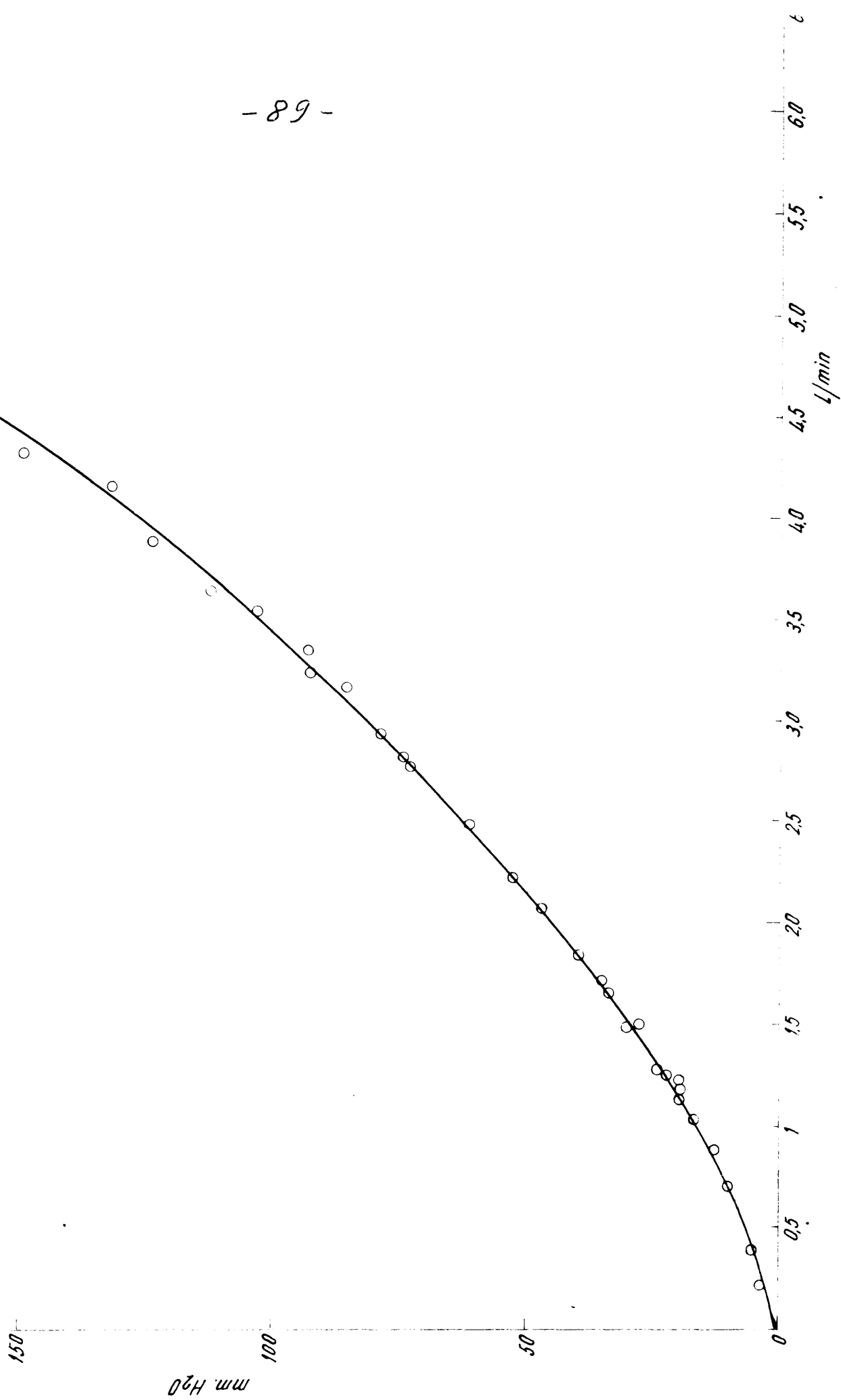
NORITE FLUIDIZADO

Columna 5.0 cm ϕ





Magistral n°1



250-

- 90 -

mm. H₂O

200-

Magistral n°2

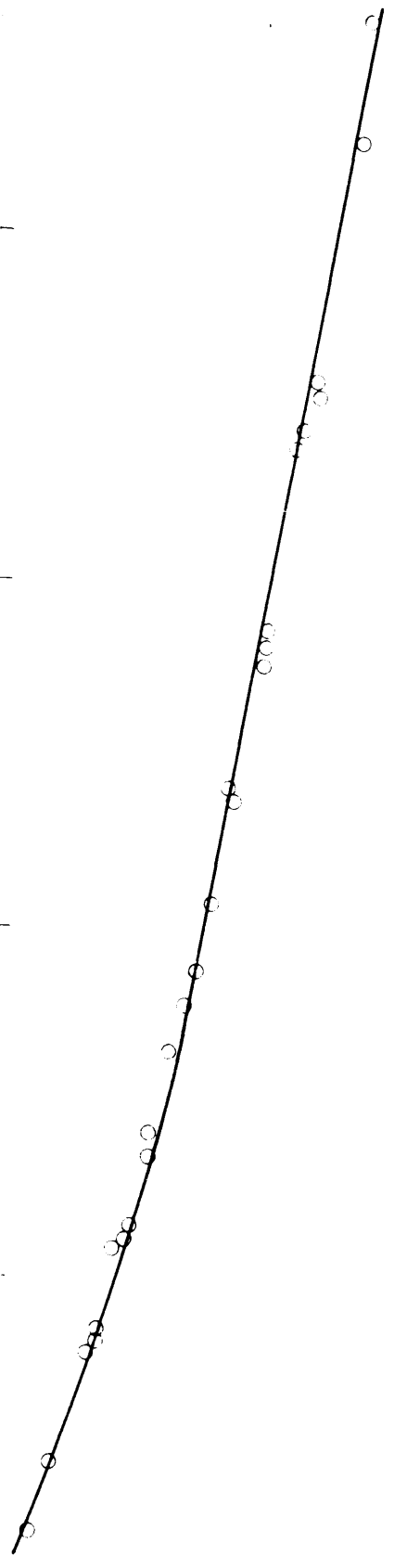
150-

100-

50-

0 0.5 1 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0

l/min.



IV- 2-2 Experimentos realizados en lecho fluidizado sin renovación de sólidos - Carbon Norit -

Con el fin de obtener las curvas de velocidad de adsorción y eficacia de recuperación, así como para estudiar el valor del coeficiente cinético de adsorción en lecho fluidizado, realizamos una serie de experimentos en lecho fluidizado sin renovación de sólidos al lecho, empleando como adsorbente Carbon Norit. Los resultados de estos experimentos se tabulan a continuación, y los gráficos 9 a 16 representan las líneas de velocidad de adsorción correspondientes a cada experimento. A partir de estos gráficos se han calculado las velocidades de adsorción que se indican en cada uno de ellos.

El tiempo de residencia del gas en el lecho se ha estimado en todos estos experimentos igual a 10^{-3} minutos, de acuerdo con el cálculo siguiente:

diámetro de la columna de fluidización = 5.3 cms

sección de la columna de fluidización = 22.0 cm^2

gasto de aire (valor medio) = 460 l/min

altura estimada del lecho fluidizado = 21 cm

volumen del lecho fluidizado = 0.462 litros

tiempo de residencia del gas $\frac{0.462}{460}$

$$t_r \approx 10^{-3} \text{ min.}$$

LECHE FLUIDIZADO SIN RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 1

resultados obtenidos

gramos de carbon en el leche = m = 50

Composición del gas de entrada = x_1 :

<u>litros aire</u> min	tiempo min	litros aire	gr. benceno adsorbidos	<u>gr. B</u> lit. A	<u>gr. B</u> gr. A = x_1
0'60	2	1'20	0'0116	0'0097	0'0075
1'03	2	2'06	0'0124	0'0050	0'0046
1'08	2	2'16	0'0175	0'0081	0'0062
1'25	2	2'50	0'0149	0'0060	0'0046

Composición del gas de salida = x_2 :

<u>litros aire</u> minuto	tiempo min	litros aire	gr. benceno adsorbidos	<u>gr. benceno</u> litro aire	<u>gr. benceno</u> grs. aire = x_2
0'64	2	1'28	0'0071	0'0055	0'00424
0'68	2	1'36	0'0068	0'0050	0'00385
0'69	2	1'36	0'0072	0'0053	0'00408
0'70	2	1'40	0'0081	0'0058	0'00447
0'69	2	1'38	0'0079	0'0057	0'00439

Cálculo de los gramos de benceno adsorbidos frente a los gramos de benceno pasados:

Gasto de aire = $G = 510$ l/min

tiempo min	gas entrada	gas salida	gr. B pasados		gr. B adsorbidos	
	gr. B/gr. A x_1	gr. B/gr. A x_2	$x_1 - x_2$	$GT \cdot x_1$ parcial. total.	$GT(x_1 - x_2)$ parcial. total.	
2	0'0075	0'0042	0'0033	7'65	7'65	3'36
4	0'0046	0'0039	0'0007	4'70	12'35	4'07
6	0'0062	0'0041	0'0021	6'52	18'67	6'21
8	0'0053	0'0045	0'0008	5'41	24'08	7'03
10	0'0046	0'0044	0'0002	4'70	28'78	7'23

LECHO FLUIDIZADO SIN RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 2

Resultados obtenidos.

gramos de carbon en el lecho = m=50

Composición del gas de entrada X₁ :

<u>litros aire</u> min	tiempo min	litros aire	gr. benceno adsorbidos	<u>gr. benceno</u> <u>litros aire</u>	<u>gr. benceno</u> <u>grs. aire</u> X ₁
0'80	2	1'60	0'0308	0'0192	0'0270
0'80	2	1'60	0'0558	0'0350	0'0270
0'35	2	1'70	0'0516	0'0302	0'0230
0'95	2	1'90	0'0582	0'0306	0'0235
1'37	2	2'74	0'0688	0'0250	0'0192

Composición del gas de salida X₂ :

<u>litros aire</u> min	tiempo min	litros aire	gr. benceno adsorbidos	<u>gr. benceno</u> <u>litros aire</u>	<u>gr. benceno</u> <u>gr. aire</u> X ₂
0'73	2	1'46	0'0375	0'0256	0'0197
0'75	2	1'50	0'0454	0'0303	0'0230
0'74	80 (seg)	0'99	0'0285	0'0287	0'0220
0'75	2	1'50	0'0423	0'0282	0'0216
0'67	2	1'34	0'0307	0'0229	0'0176

Calculo de los gramos de benceno adsorbidos frente a los gramos de benceno pasados:

$$\text{Gaste de aire} = G = 475 \text{ l/min}$$

tiempo min	gas entrada gr. B/gr. A X ₁	gas salida gr. B/gr. A X ₂	X ₁ - X ₂	gr. benceno GT - X ₁ parciales	gr. benceno pasados totales	gr. benc. adsor GT (X ₁ - X ₂) parcial. total
2	0'0270	0'0197	0'0073	25'7	25'7	6'9 6'9
4	0'0270	0'0230	0'0040	25'7	51'4	3'80 10'70
6	0'0230	0'0220	0'0010	21'8	73'2	0'95 11'65
8	0'0235	0'0216	0'0019	22'4	95'6	1'80 13'45
10	0'0192	0'0176	0'0016	18'2	113'8	1'52 14'97

LECHO FLUIDIZADO SIN RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 3

Resultados obtenidos

grs. de carbon en el leche = $m = 50$

Composición del gas de entrada = X_1 :

<u>litros aire</u> min	tiempo min	litros aire	grs. benceno adsorbidos	<u>gr. benceno</u> litros aire	<u>gr. benceno</u> grs. aire = X_1
0'40	2	0'80	0'0381	0'0476	0'0366
0'98	2	1'96	0'0843	0'0430	0'0331
1'03	2	2'06	0'0880	0'0428	0'0330
1'30	2	2'60	0'1244	0'0480	0'0368
1'35	2	2'66	0'1280	0'0481	0'0370

Composición del gas de salida = X_2 :

<u>litros aire</u> min	tiempo min	litros aire	grs. benceno adsorbidos	<u>gr. benceno</u> litros aire	<u>gr. benceno</u> grs. aire = X_2
0'54	2	1'08	0'0428	0'0396	0'0305
0'80	2	1'60	0'0631	0'0395	0'0304
0'78	2	1'56	0'0636	0'0408	0'0314
0'82	2	1'64	0'0710	0'0434	0'0334
0'66	2	1'32	0'0569	0'0426	0'0328

Calculo de los gramos de benceno adsorbidos frente a los gramos de benceno pasados:

Gasto de aire = $G = 545$ l/min

tiempo min	gas entrada gr. B/gr. A X_1	gas salida gr. B/gr. A X_2	gr. benceno pasados GT · X_1	gr. benceno adsorb. GT ($X_1 - X_2$)
			$X_1 - X_2$ parciales	totales
2	0'0366	0'0305	0'0061	40'00
4	0'0331	0'0304	0'0027	36'20
6	0'0330	0'0314	0'0016	36'00
8	0'0368	0'0334	0'0034	40'20
10	0'0370	0'0328	0'0042	40'40
				192'80
				6'66
				2'95
				1'78
				3'72
				19'66

LECHO FLUIDIZADO SIN RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 4

Resultados obtenidos.

grs. de carbon en el lecho = m = 50

Composición del gas de entrada = X_1 :

<u>litros aire</u> min	<u>tiempo</u> min	<u>litros</u> aire	<u>gr. benceno</u> adsorbidos	<u>grs. benceno</u> <u>litros aire</u>	<u>gr. benceno</u> <u>gr. aire</u> = X_1
0'35	2	0'70	0'0188	0'0268	0'0206
1'10	2	2'20	0'0978	0'0445	0'0342
1'07	2	2'14	0'0968	0'0452	0'0348
1'50	2	3'00	0'2088	0'0699	0'0538
1'25	2	2'50	0'1939	0'0775	0'0595

Composición del gas de salida = X_2 :

<u>litros aire</u> min	<u>tiempo</u> min	<u>litros</u> aire	<u>gr. benceno</u> adsorbidos	<u>gr. benceno</u> <u>lit. aire</u>	<u>gr. benceno</u> <u>gr. aire</u> = X_2
0'800	2	1'600	0'0299	0'0187	0'0144
0'825	2	1'650	0'0600	0'0364	0'0280
0'805	2	1'610	0'0639	0'0396	0'0305
0'830	2	1'660	0'0984	0'0592	0'0456
0'725	2	1'450	0'0899	0'0620	0'0477

Calcule de los gramos de benceno adsorbidos frente a los gramos de benceno pasados:

Gaste de aire = $G = 410$ l/min

<u>tiempo</u> min	<u>gas entrada</u> gr. B/gr. A X_1	<u>gas salida</u> gr. B/gr. A X_2	$X_1 - X_2$	<u>gr. benceno</u> GT - X_1 parciales	<u>gr. benceno</u> pasados totales	<u>gr. benceno</u> adsorb. GT ($X_1 - X_2$) parciales	<u>gr. benceno</u> adsorb. totales
2	0'0206	0'0144	0'0062	16'8	16'8	5'08	5'08
4	0'0342	0'0280	0'0062	28	44'8	5'08	10'16
6	0'0348	0'0305	0'0043	28'5	73'3	3'52	13'68
8	0'0538	0'0456	0'0082	44	117'3	6'46	20'14
10	0'0595	0'0477	0'0118	49	166'3	9'7	29'84

LECHO FLUIDIZADO SIN RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 5

Resultados obtenidos.

grs. de carbon en el lecho = m = 50

Composición del gas de entrada = X_1 :

<u>litros aire</u> min	tiempo min	litros aire	gr. benceno adsorbidos	<u>gr. benceno</u> litros aire	<u>gr. benceno</u> gr. aire X_1
0'4	2	0'80	0'0300	0'0375	0'0288
1'15	2	2'30	0'0752	0'0318	0'0245
1'18	2	2'56	0'1438	0'0610	0'0469
1'40	2	2'80	0'1069	0'0383	0'0295
1'57	2	2'74	0'1440	0'0526	0'0405

Composición del gas de salida = X_2 :

<u>litros aire</u> min	tiempo min	litros aire	gr. benceno adsorbidos	<u>gr. benceno</u> litros aire	<u>gr. benceno</u> gr. aire X_2
0'8	2	1'60	0'0510	0'0318	0'0245
0'8	2	1'60	0'0394	0'0246	0'0189
0'78	2	1'56	0'0767	0'0492	0'0377
0'85	2	1'70	0'0579	0'0341	0'0263
0'70	2	1'40	0'0548	0'0392	0'0302

Calcule de los gramos de benceno adsorbidos frente a los gramos de benceno pasados:

$$\text{Gasto de aire} = G = 440 \text{ l/min}$$

tiempo min	gas entrada gr B/gr A X_1	gas salida gr B/gr A X_2	$X_1 - X_2$	gr. benceno pasados GT $\cdot X_1$ parciales	gr. benceno pasados GT $\cdot X_1$ totales	gr. benceno adsorb. GT $(X_1 - X_2)$ parciales	gr. benceno adsorb. GT $(X_1 - X_2)$ totales
2	0'0288	0'0245	0'0043	25'5	25'5	3'78	3'78
4	0'0245	0'0189	0'0056	21'5	46'8	4'93	8'71
6	0'0469	0'0377	0'0092	41'5	88'1	8'10	16'81
8	0'0295	0'0263	0'0032	26'0	114'1	2'82	18'63
10	0'0405	0'0302	0'0103	35'6	149'7	9'07	27'70

LECHE FLUIDIZADO SIN RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 6

Resultados obtenidos.

grs. de carbon en el leche = m = 50

Composición del gas de entrada = X_1 :

litros aire min	tiempo min	litros aire	grs. benceno adsorbidos	grs. benceno litros aire	grs. benceno grs. aire	X_1
0'25	2	0'60	0'0022	0'0044	0'020	
1'07	2	2'14	0'0550	0'0257	0'0197	
1'15	2	2'30	0'0902	0'0394	0'030	
1'66	2	3'50	1'1053	0'0319	0'0245	
1'12 6	2	2'36	0'0672	0'0370	0'0285	

Composición del gas salida = X_2 :

litros aire min	tiempo min	litros aire	grs. benceno adsorbidos	grs. benceno litros aire	grs. benceno grs. aire	X_2
0'73	2	1'46	0'0214	0'0146	0'011	
0'77	2	1'54	0'0313	0'0203	0'0156	
0'72	2	1'44	0'0460	0'0319	0'0245	
0'78	2	1'56	0'0532	0'0341	0'026	
0'67	2	1'34	0'0438	0'0327	0'025	

Cálculo de los gramos de benceno adsorbidos frente a los gramos de benceno pasados:

Gasto de aire = $G = 440 \text{ l/min}$

tiempo min	gas entrada gr. B/gr. A X_1	gas salida gr. B/gr. A X_2	gr. benceno pasados gr. X_1 parciales	gr. benceno adsorbid. gr. $(X_1 - X_2)$ parciales	gr. benceno pasados gr. X_1 totales	gr. benceno adsorbid. gr. $(X_1 - X_2)$ totales
2	0'020	0'011	8'8	8'8	3'96	3'96
4	0'020	0'016	8'8	17'60	1'76	6'72
6	0'030	0'024	11'88	29'48	1'32	7'04
8	0'027	0'025	11'88	41'36	0'88	7'92
10	0'028	0'025	11'88	53'24	0'88	8'80

LECHE FLUIDIZADO SIN RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 7

Resultados obtenidos.

grs. de carbon en el leche = m = 50

Composición del gas de entrada = X_1 :

<u>litros aire</u> min	tiempo min	litros aire	gr. benceno adsorbidos	grs. benceno litros aire	<u>grs. benceno</u> grs. aire X_1
0'40	2	0'80	0'0335	0'0419	0'032
0'80	2	1'60	0'0939	0'0587	0'045
1'17	2	2'34	0'1449	0'0619	0'047
1'51	2	3'02	0'1832	0'0607	0'047
1'17	2	2'34	0'1334	0'0570	0'044

Composición del gas de salida = X_2 :

<u>litros aire</u> min	tiempo min	litros aire	gr. benceno adsorbidos	gr. benceno litros aire	<u>gr. benceno</u> gr. aire X_2
0'62	2	1'24	0'0296	0'0239	0'018
0'63	2	1'26	0'0540	0'0429	0'033
0'65	2	1'26	0'0665	0'0528	0'0406
0'65	2	1'30	0'0669	0'0515	0'0396

Calculo de los gramos de benceno adsorbidos frente a los gramos de benceno pasados.

Gaste de aire = $G = 440 \text{ l/min}$

tiempo min	gas entrada gr. B/gr. A X_1	gas salida gr. B/gr. A X_2	$X_1 - X_2$	gr. benceno Gt' parciales	gr. benceno pasados X_1 totales	gr. benceno adsorb Gt' ($X_1 - X_2$) parciales	gr. benceno adsorb totales
2	0'032	0'018	0'014	14'1	14'1	5'16	6'16
4	0'046	0'033	0'013	20'24	34'34	5'72	11'28
6	0'046	0'040	0'006	20'24	54'58	2'64	14'52
8	0'046	0'040	0'006	20'24	74'82	2'64	17'16
10	0'046	0'040	0'006	20'24	95'06	2'64	19'80

LECHO FLUIDIZADO SIN RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 8

Resultados obtenidos.

grs. de carbon en el lecho = m = 50

Composición del gas de entrada X_1 :

litros aire min	tiempo min	litros aire	gr. benceno adsorbidos	gr. benceno lit. aire	gr. benceno gr. aire	X_1
0'40	2	0'80	0'0169	0'021	0'016	
0'90	2	1'80	0'0326	0'018	0'014	
1'02	2	2'04	0'0489	0'024	0'0185	
1'32	2	2'64	0'0613	0'0235	0'018	
0'66	2	1'32	0'0220	0'0166	0'013	

Composición del gas de salida = X_2 :

litros aire min	tiempo min	litros aire	gr. benceno adsorbidos	gr. benceno litros aire	gr. benceno gr. aire	X_2
0'65	2	1'30	0'0174	0'0134	0'010	
0'65	2	1'30	0'0225	0'0173	0'013	
0'65	2	1'30	0'0248	0'0191	0'0147	
0'65	2	1'30	0'0293	0'0225	0'017	
0'65	2	1'10	0'0200	0'0182	0'0144	

Calcule de los gramos de benceno adsorbidos frente a los gramos de benceno pasados.

Gasto de aire = $Q = 480$ l/min

tiempo min	gas entrada gr. B/gr. A X_1	gas salida gr. B/gr. A X_2	gr. benceno GT $X_1 - X_2$	gr. benceno pasados GT X_1	gr. benceno adsorbidos GT $(X_1 - X_2)$	gr. benceno pasados GT X_1	gr. benceno adsorbidos GT $(X_1 - X_2)$
2	0'016	0'010	0'006	7'7	7'7	2'9	2'9
4	0'014	0'013	0'001	6'7	14'4	0'5	3'4
6	0'018	0'014	0'004	8'6	23'0	1'9	5'3
8	0'018	0'017	0'001	8'6	31'6	0'5	5'8
10	0'013	0'014	0'000	6'3	37'9	0	5'8

Experimentos en lecho fluidizado sin renovación de sólidos

- 100 -

Gráfico 9

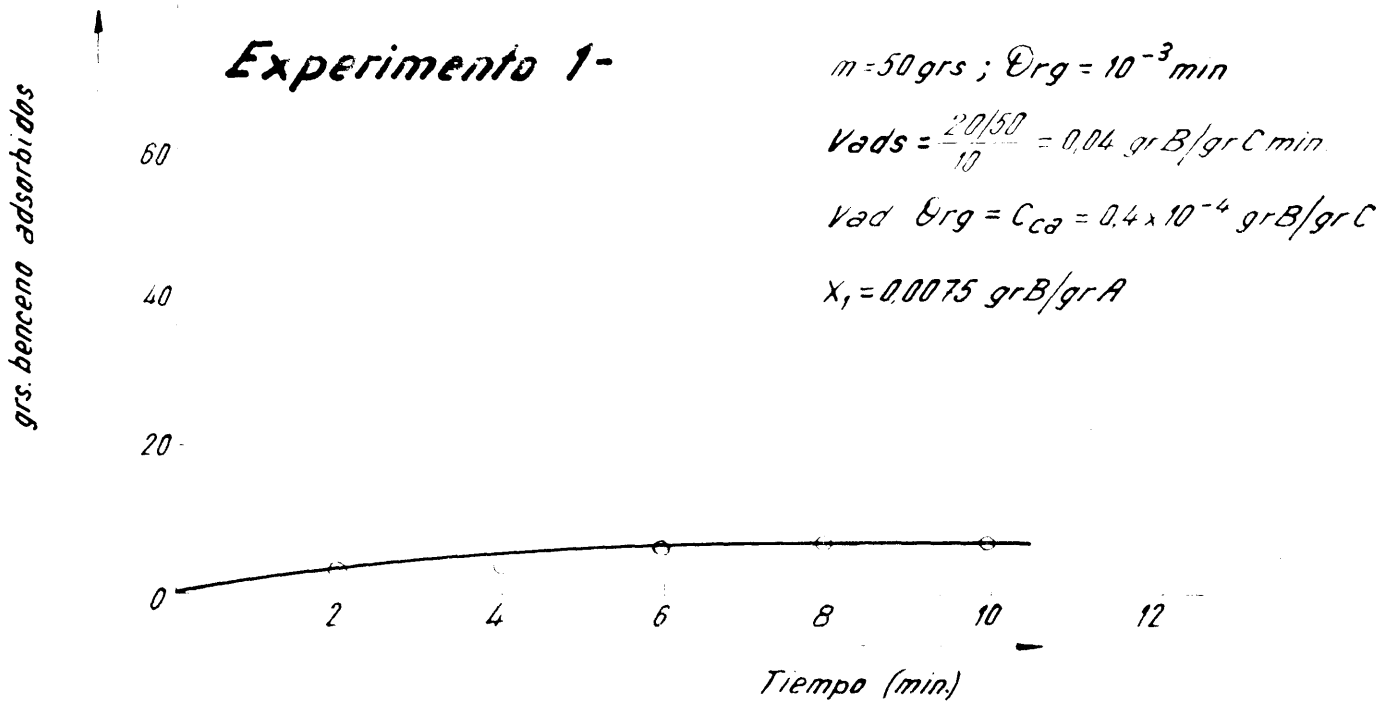
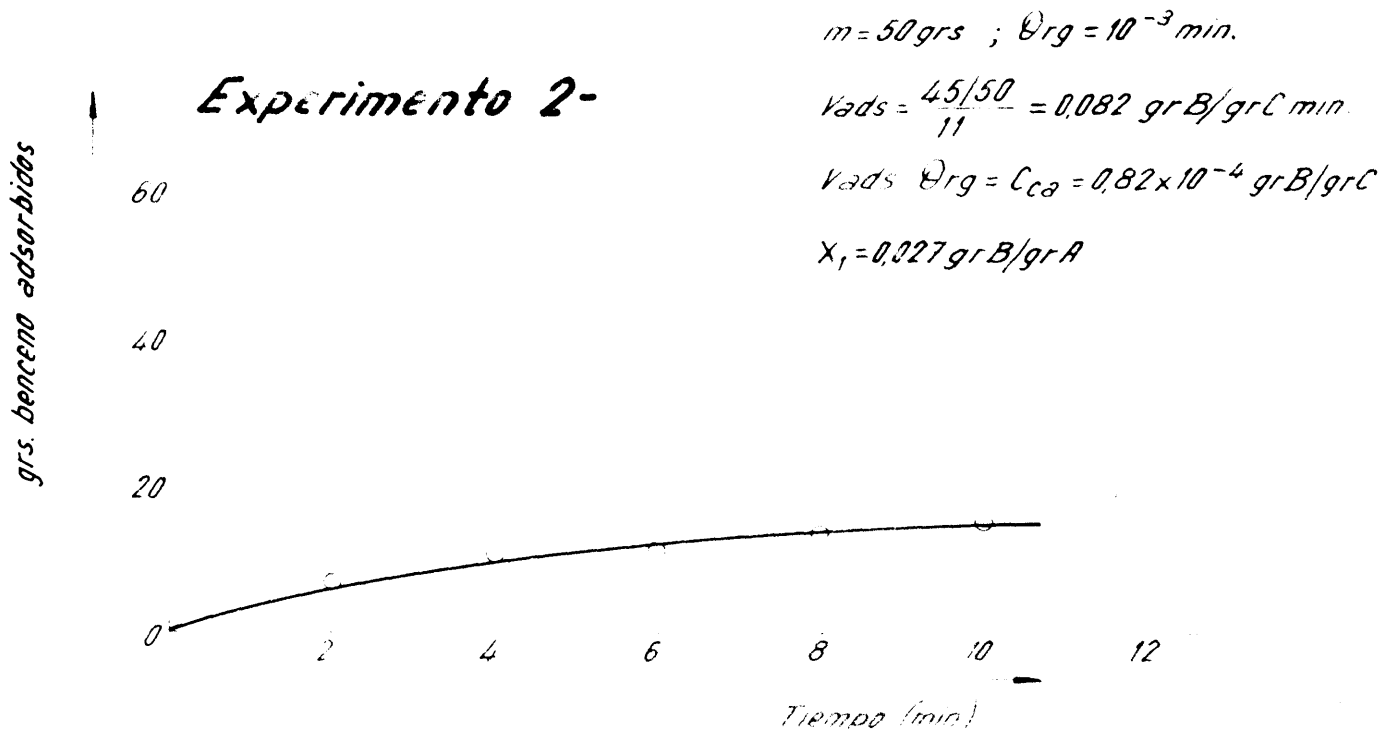


Gráfico 10



Experimentos en lecho fluidizado sin renovación de sólidos

- 101 -

Gráfico 11

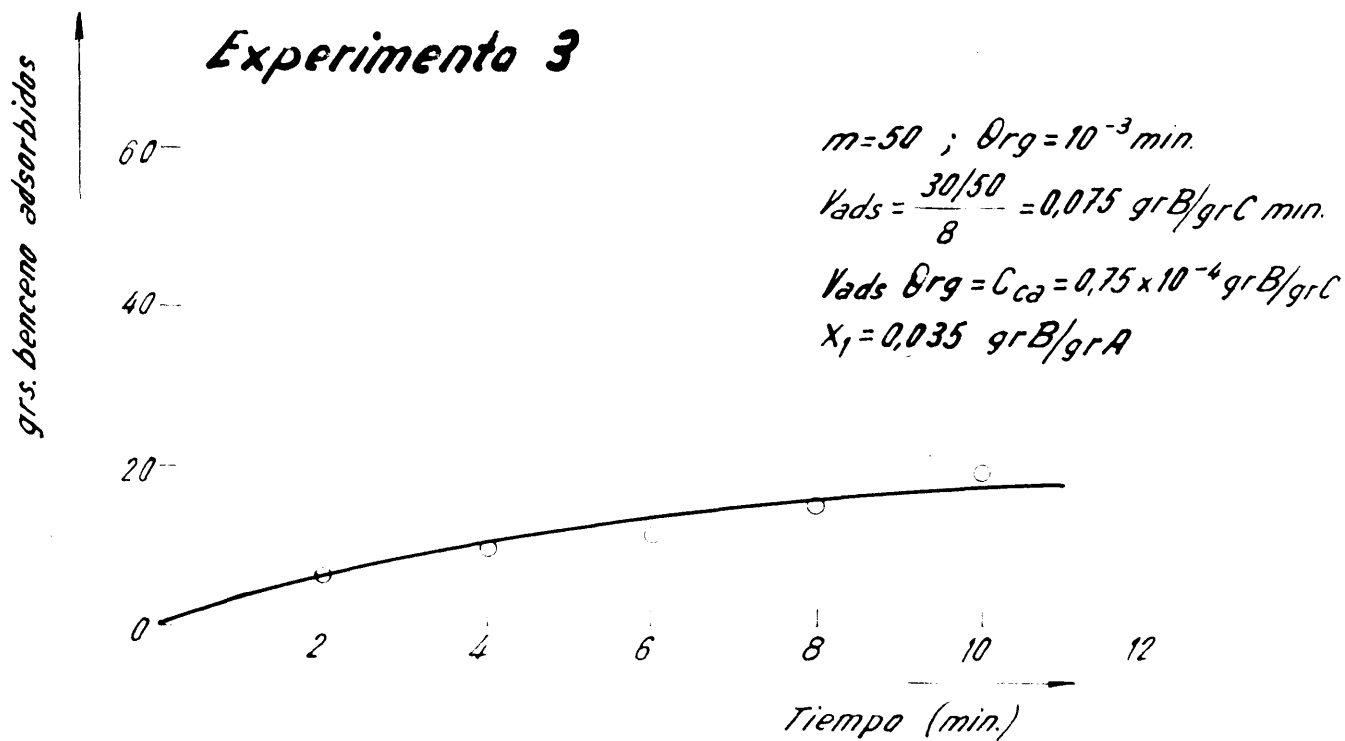
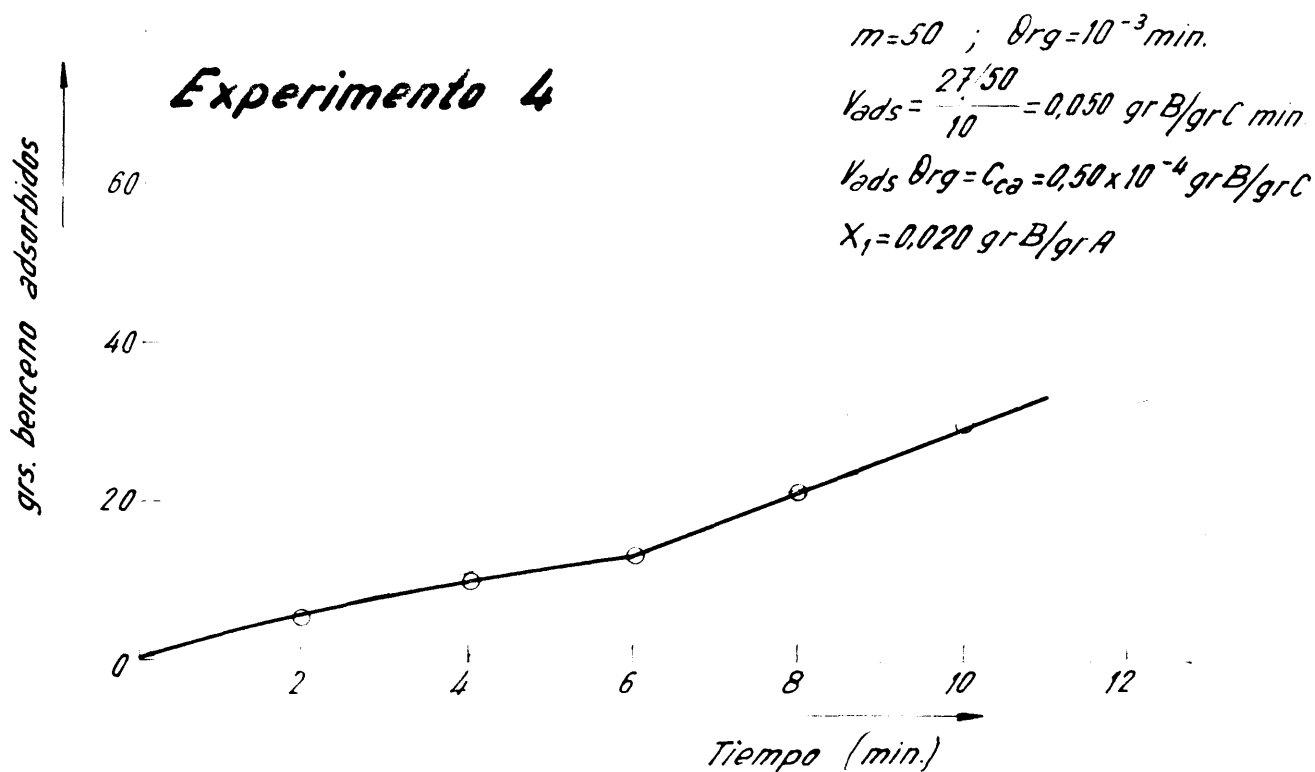


Gráfico 12

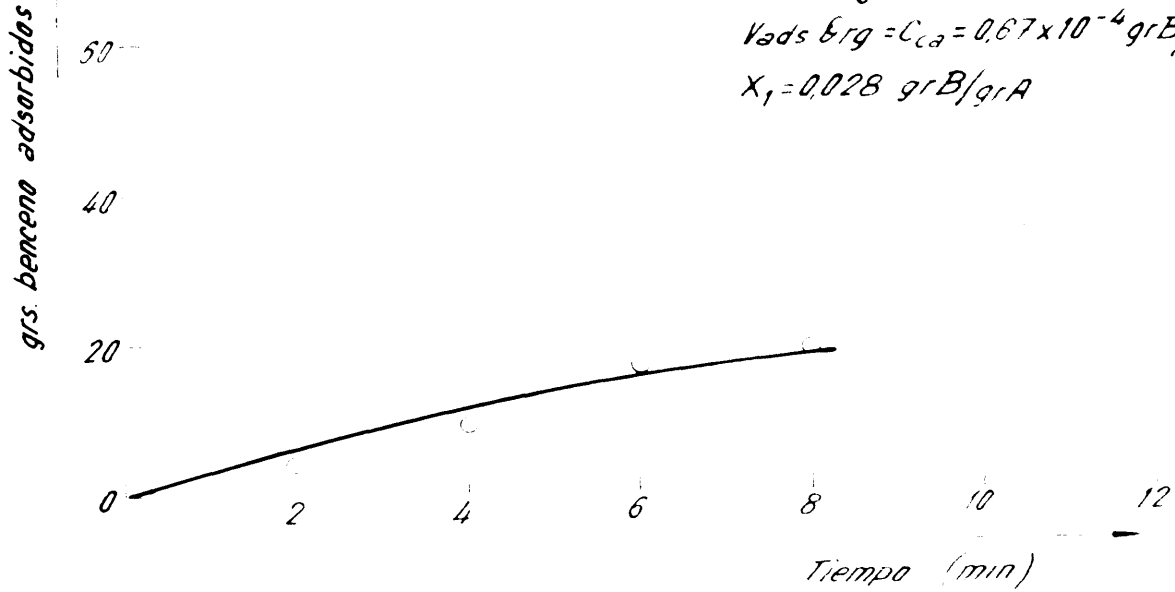


Experimentos en lecho fluidizado sin renovación de sólidos

-102-

Gráfico 13

Experimento 5



$$m=50 ; \theta_{rg} = 10^{-3} \text{ min.}$$

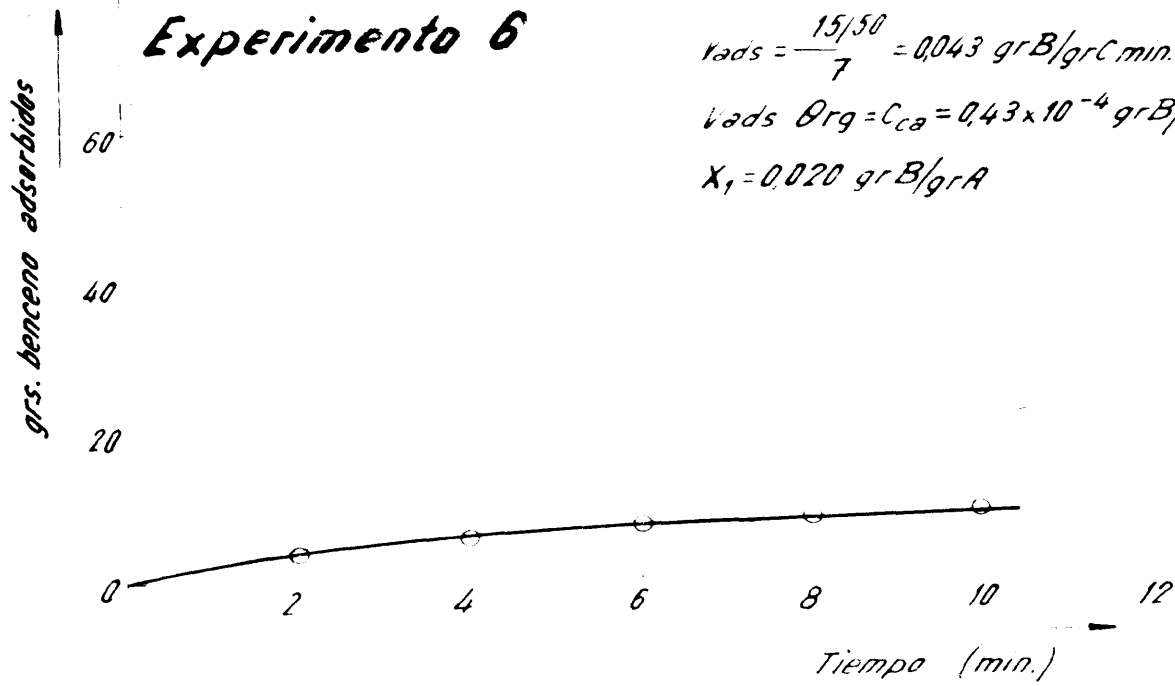
$$V_{ads} = \frac{20}{50} = 0,067 \text{ grB/grC min.}$$

$$V_{ads} \theta_{rg} = C_{ca} = 0,67 \times 10^{-4} \text{ grB/grC}$$

$$X_1 = 0,028 \text{ grB/grA}$$

Gráfico 14

Experimento 6



$$m=50 ; \theta_{rg} = 10^{-3} \text{ min.}$$

$$V_{ads} = \frac{15}{50} = 0,043 \text{ grB/grC min.}$$

$$V_{ads} \theta_{rg} = C_{ca} = 0,43 \times 10^{-4} \text{ grB/grC}$$

$$X_1 = 0,020 \text{ grB/grA}$$

Experimentos en lecho fluidizado sin renovación de sólidos

- 103 -

Gráfico 15

Experimento 7

grs. benceno adsorbidos

60
40
20
0

2 4 6 8 10 12
Tiempo (min.)

$$m = 50 ; \theta_{rg} = 10^{-3} \text{ min.}$$

$$V_{ads} = \frac{40}{50} = 0,086 \text{ gr B/gr C min.}$$

$$V_{ads} \theta_{rg} = C_{ca} = 0,86 \times 10^{-4} \text{ gr B/gr C}$$

$$X_1 = 0,032 \text{ gr B/gr A}$$

Gráfico 16

Experimento 8

grs. benceno adsorbidos

60
40
20
0

2 4 6 8 10 12
Tiempo (min.)

$$m = 50 ; \theta_{rg} = 10^{-3} \text{ min.}$$

$$V_{ads} = \frac{20}{50} = 0,036 \text{ gr B/gr C min.}$$

$$V_{ads} \theta_{rg} = C_{ca} = 0,36 \times 10^{-4} \text{ gr B/gr C}$$

$$X_1 = 0,016 \text{ gr B/gr A}$$

EXPERIMENTOS EN LECHO FLUIDIZADO SIN
RENOVACION DE SOLIDOS.

"CARBON NORIT"

Experimento n°		Composición gas que entra X_1 grB/gr A
1	0.14×10^{-4}	0.0075
2	0.82×10^{-4}	0.027
3	0.75×10^{-4}	0.033
4	0.59×10^{-4}	0.020
5	0.67×10^{-4}	0.028
6	0.43×10^{-4}	0.020
7	0.88×10^{-4}	0.032
8	0.33×10^{-4}	0.016

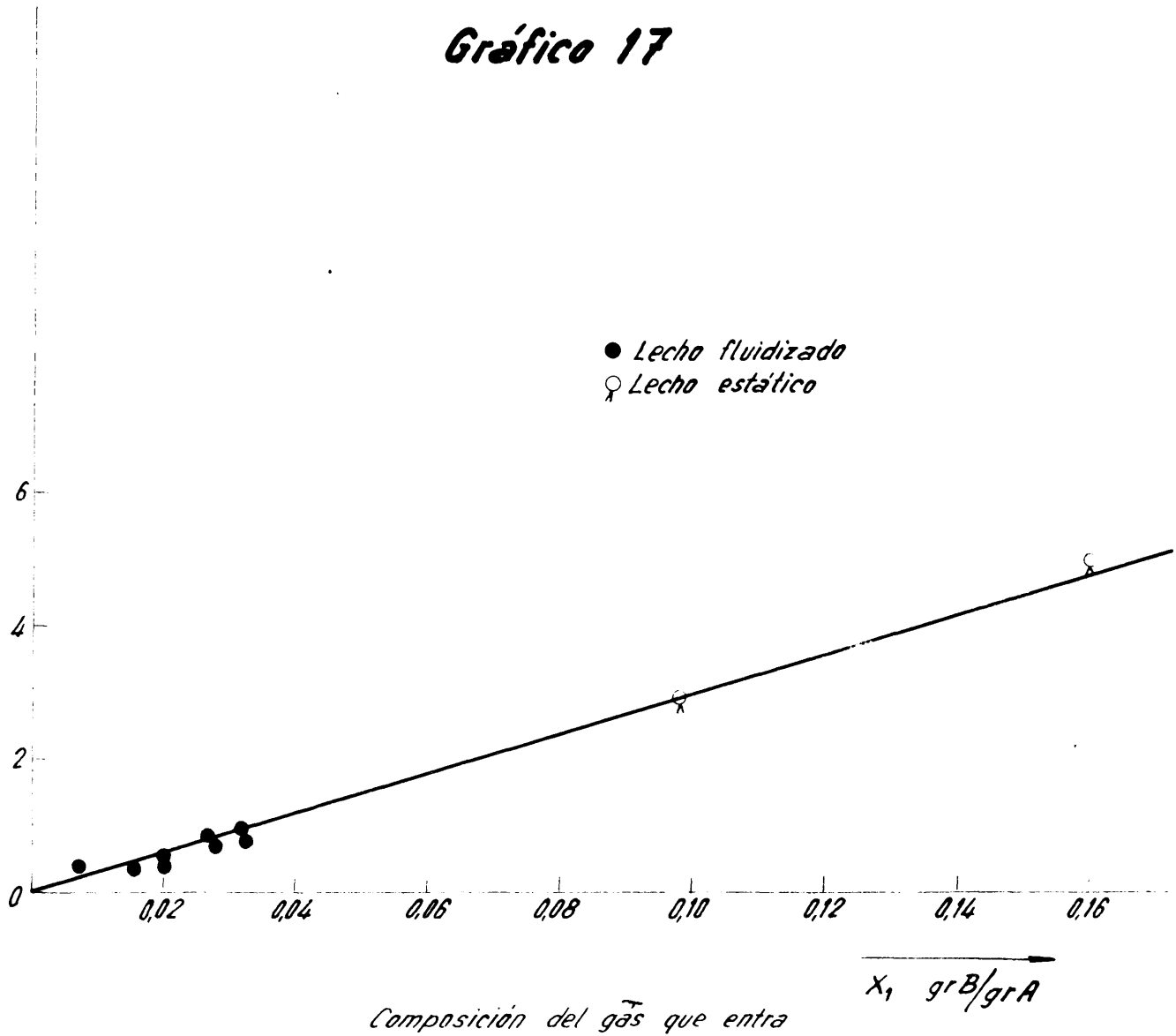
RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LECHO ESTÁTICO

0	2.9×10^{-4}	0.097
00	5.03×10^{-4}	0.160

*Coeficiente cinético de adsorción en función de
la composición del gas que entra*

Carbón NORIT

Gráfico 17



En el gráfico 17 se representa el coeficiente cinético de adsorción en función de la concentración del gas que entra en el lecho, que es la concentración para la que se calculó en cada caso la velocidad de adsorción. Tanto los puntos correspondientes a experimentos en lecho estático como los correspondientes a experimentos en lecho fluidizado caen sobre la misma recta; esto quiere decir que el coeficiente cinético de adsorción es una característica propia del sistema adsorbente-vapor que varía linealmente con la concentración del vapor y es independiente de otras variables del proceso tales como gasto del gas etc; cuando no hay vapor que recuperar este coeficiente no existe, por tanto es lógico que la línea recta pase por el origen de coordenadas. A partir del gráfico 17 podemos escribir para nuestro sistema :

$$v_{ad} \theta_{g_1} = \frac{5 \times 10^{-4}}{0.17} X_1 = 2.94 \times 10^{-3} X_1$$

$$C_{ca} = v_{ad} \theta_{g_1} = 2.94 \times 10^{-3} X_1$$

que es la ecuación que nos relaciona el coeficiente cinético de adsorción con la concentración del vapor a recuperar; por tanto su valor es independiente de si el lecho es estático o fluidizado, de modo que el proceso cinético de adsorción es

idéntico en lecho estático y en lecho fluidizado, lo que se comprende fácilmente admitiendo que prácticamente la adsorción es instantánea.

En el gráfico 18 se representa la velocidad de adsorción frente a la composición del gas de entrada para el caso de ambos lechos; estático y fluidizado. Como era de esperar la velocidad de adsorción en los dos tipos de lecho aumenta cuando lo hacen las composiciones del gas de entrada. En lecho estático como se ha trazado la curva sólo con dos puntos parece que el referido aumento es menor, aunque posiblemente la verdadera curva asciende más rápidamente que la que hemos trazado. En cuanto al rápido ascenso de la línea correspondiente al lecho fluidizado se explica por hallarse en la región de concentraciones muy bajas, posiblemente esta curva tiene menor pendiente en la zona de las concentraciones más altas. En todo caso queda fuera de dudas que la velocidad de adsorción es más elevada en lecho fluidizado que en estático, cuando la concentración de vapor a recuperar es la misma.

RORE FLUIDIZADO SIN CIRCULACION DE CARBON

Expt ^a	n ^o	comp. gas entra X ₁ gr.B/gr.A
1	0'040	0'0075
2	0'062	0'027
3	0'075	0'033
4	0'050	0'020
5	0'067	0'028
6	0'043	0'020
7	0'088	0'032
8	0'086	0'016

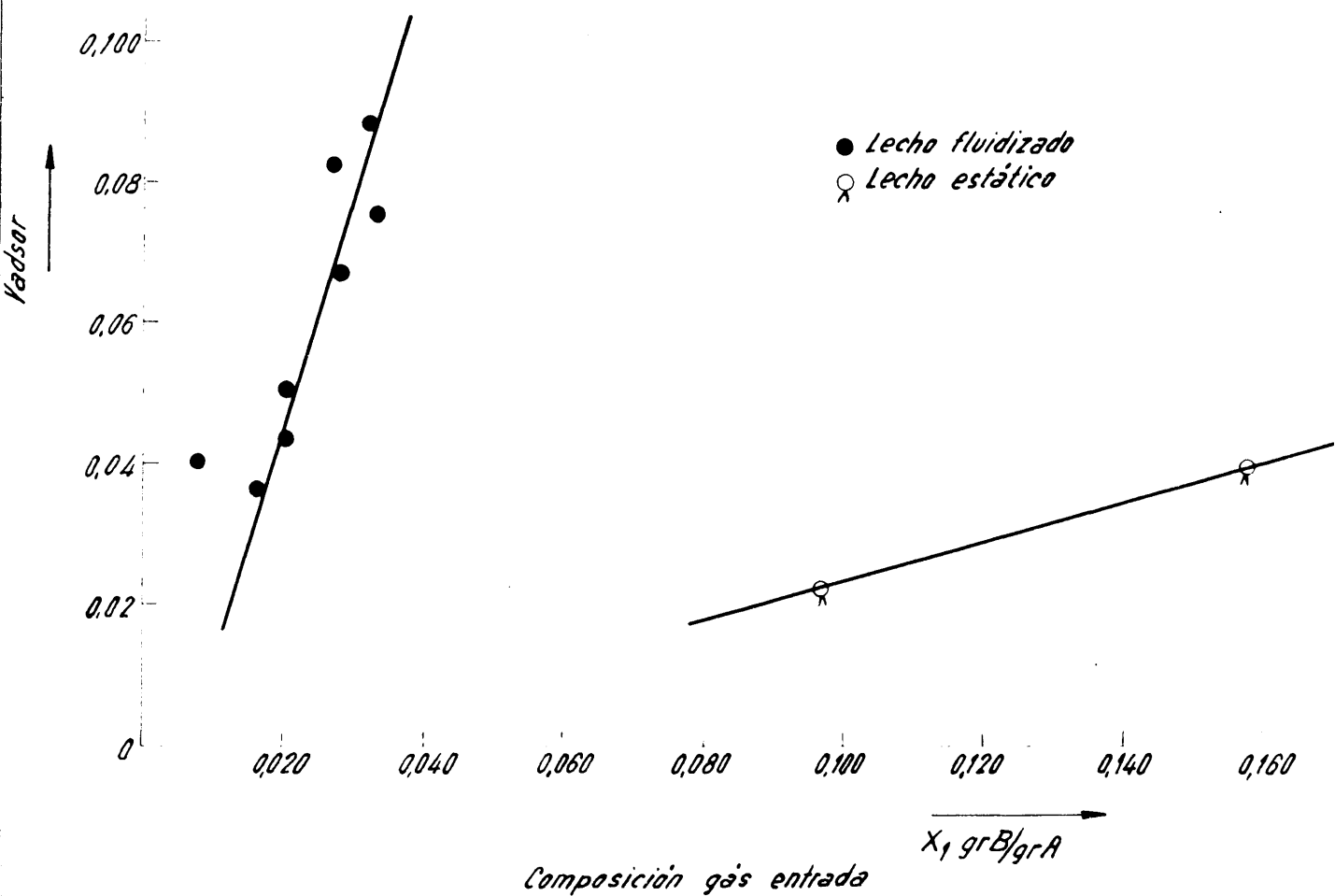
RESULTADOS OBTENIDOS EN LECHO ESTATICO

0'039	0'0158
0'022	0'097

Velocidad de adsorción (grB/grC min) en función de la concentración del gas de entrada.

Carbón NORIT

Gráfico 18

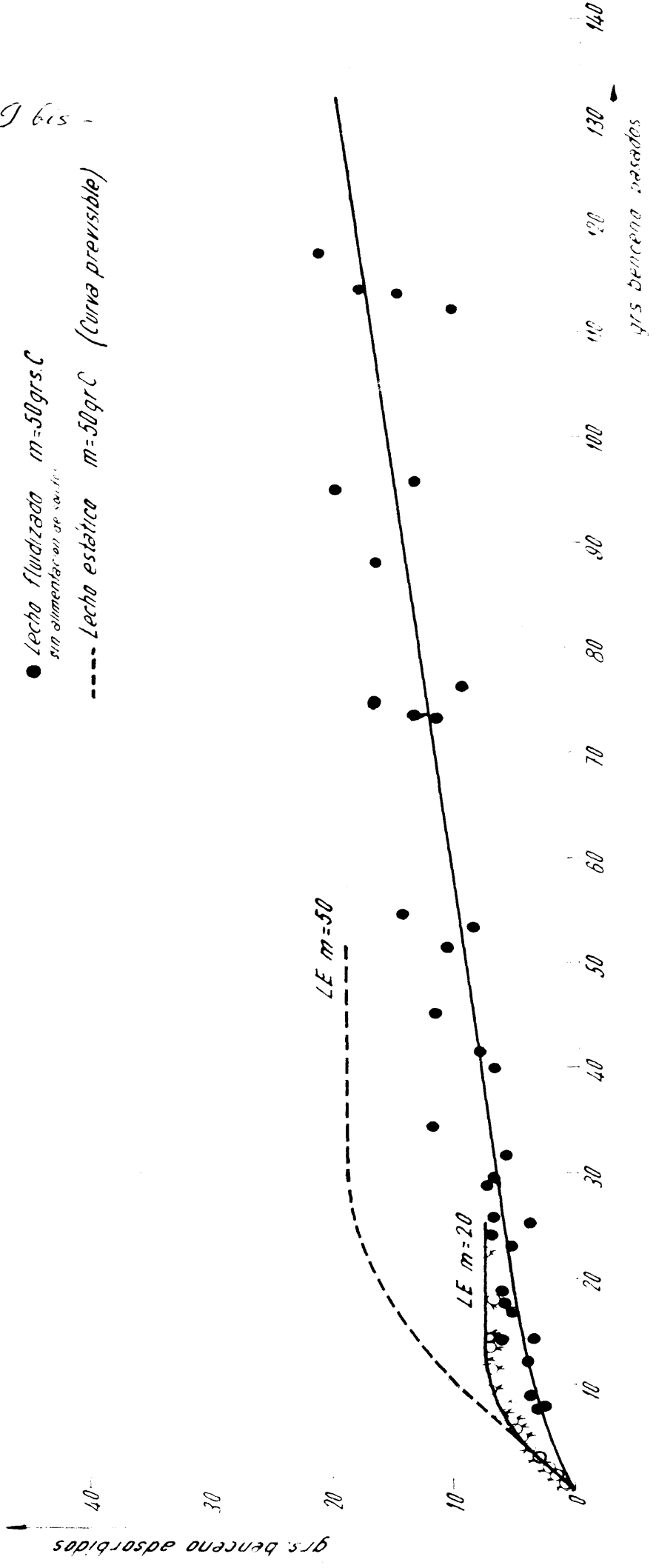


Experimentos con carbón NORIT. Curva de eficacia de recuperación

Gráfico 19

- 109 bis -

- Lecho estático $m=20$ grs. C
- Lecho fluidizado $m=50$ grs. C
sin alimentación de vapor
- Lecho estático $m=50$ grs. C (Curva previsible)



Si tenemos en cuenta que la V_{ad} en leche fluidizado se ha hallado para 50 gramos de carbón en el leche y que para leche estático se ha hallado con 20 gramos de adsorbente en el leche, resulta que V_{ad} en leche fluidizado es aún más alta respecto a la V_{ad} en leche estático que lo que indica el gráfico 18 (recordar gráfico 1). Por otro lado el que la V_{ad} sea mayor en leche fluidizado es una lógica consecuencia que va implícita en la constancia del coeficiente cinético de adsorción para ambos tipos de lechos.

En el gráfico 19 hemos representado las curvas de eficacia de recuperación para carbón Norit en leche fluidizado sin renovación y en leche estático, con fines comparativos. En dicho gráfico hemos dibujado una curva ficticia no obtenida experimentalmente, pero que está justificada admitir que equivale a la curva de un leche estático que tuviera 50 gramos de carbón en el lche, si recordamos los resultados experimentales representados en el gráfico 2. Aún teniendo en cuenta que para obtener la curva correspondiente a leche estático trabajamos con concentraciones de benceno más pequeñas que las empleadas para leche fluidizado no parece esto ser suficiente razón, que justifique la menor eficacia de recuperación del

lecho fluidizado, como aparece en el gráfico 18; hemos de notar aquí que el "punto de rotura" aparece desde el primer momento en el lecho fluidizado y por tanto que de un lecho fluidizado escapará siempre vapor adsorbible en la corriente gaseosa de salida, en cantidades más o menos grandes, que dependerán de la concentración del vapor en el gas de entrada al lecho y posiblemente de otras variables.

Una explicación cinética sencilla de esta "falta de eficacia del lecho fluidizado puede ser la siguiente, basada en que tanto la adsorción como la desorción sobre la superficie del sólido son prácticamente instantáneas:

Consideremos el lecho fluidizado de la fig. 6 ; cuando la partícula está en el nivel 1 se encuentra con vapores cargados de adsorbato y retiene a éste, posiblemente saturándose.- Hemos de recordar aquí que el tamaño del grano influye notablemente en la capacidad de adsorción del sólido; en este trabajo no hemos tenido en cuenta el tamaño de grano, ya que en la práctica industrial se utiliza un tamaño de grano normalizado del tipo llamado para "adsorción de gases" y es el que hemos utilizado nosotros. Al pasar al nivel 2, la partícula está en contacto con menores concentraciones de adsorbato y en parte tiene lugar una desorción del adsorbato; al

Esquema para la explicación cinética de la falta de eficacia de adsorción en lecho fluidizado

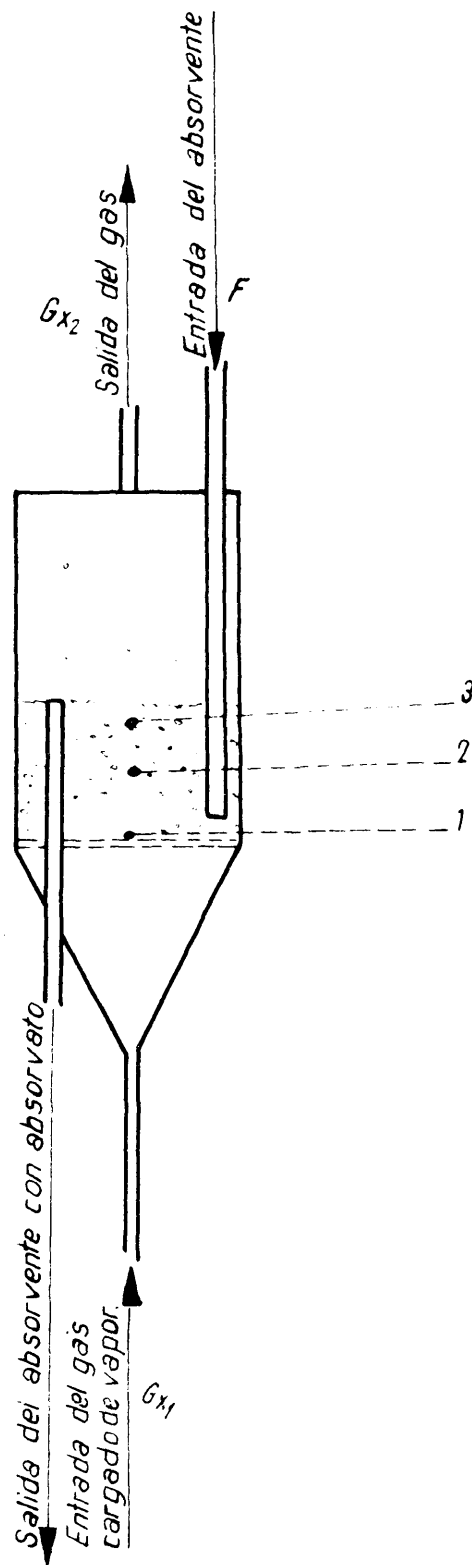


Fig. 6

llegar al nivel 3 la partícula de adsorbente se encuentra con un gas libre prácticamente de vapores adsorbibles y la desorción tiene lugar en mayor grado; el vapor liberado por la partícula en el nivel 3 no vuelve a tener ocasión de adsorberse y escapa sin ser retenido en el lecho. La consecuencia macroscópica y estadística, a que da lugar este fenómeno es la menor capacidad aparente de adsorción del lecho fluidizado, que se refleja en las curvas obtenidas con nuestros experimentos.

Esta explicación no está refutada con el hecho experimental, encontrado por otros autores en sistemas muy parecidos, (1) de que la composición global del sólido sea prácticamente uniforme en todo el volumen del lecho fluidizado.

Otra explicación parcial de la menor eficacia de recuperación de un lecho fluidizado puede encontrarse en el hecho de que el gas puede atravesar el lecho fluidizado formando burbujas que presentan menor superficie de contacto con el sólido que los canales y poros a través de los que circula el gas en el caso del lecho estático.

Según esto, parece conveniente estudiar la influencia del tiempo de residencia del sólido en el lecho y hacer experimentos variando la velocidad de alimentación de sólido al

lecho. Por un lado si la partícula está demasiado tiempo en el lecho se presenta el fenómeno de la menor capacidad aparente de adsorción; por otro lado para que esté poco tiempo es preciso circular mucho carbón lo que supone una complicación y un gasto adicional. Para estudiar la influencia que puede tener el tiempo de residencia del sólido en la eficacia de adsorción del lecho fluidizado realizamos otra serie de experimentos en lecho fluidizado con renovación de sólidos, cuyos resultados exponemos más adelante.

IV- 2-3 Cálculo del coeficiente de transferencia de materia en lecho fluidizado.

La constante del coeficiente cinético de adsorción para cada concentración del gas que entra nos permite calcular el coeficiente de transferencia de materia en lecho fluidizado K_g , a partir de los anteriores experimentos. En efecto, la ecuación general de transferencia de materia se escribe

$$w = K_g' \Delta t A$$

donde, en nuestro caso, son

w = gramos de benceno adsorbidos

K_g = coeficiente de transferencia de la película gaseosa

Δ = potencial de transferencia

t = tiempo

A = superficie disponible para la transmisión de materia

Si admitimos que la composición del sólido en el lecho fluidizado es uniforme y que el potencial de transferencia viene determinado por la película gaseosa, podemos tomar Δ como la media logarítmica de la composición del gas a la entrada y a la salida del lecho:

$$\Delta = \frac{(x_1 - x') - (x_2 - x')}{\ln \frac{(x_1 - x')}{(x_2 - x')}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1 - x'}{x_2 - x'}}$$

El tiempo \underline{t} no es sino el tiempo de contacto gas-sólido, que corresponde en nuestros experimentos el tiempo de residencia del gas en el lecho fluidizado, que podemos tomarle igual a V/G siendo V el volumen del lecho fluidizado y G el gasto de aire a través del lecho fluidizado. En cuanto a la superficie A es válido considerarla proporcional a la masa de sólido presente en el lecho fluidizado y englobar el correspondiente coeficiente de proporcionalidad en la constante K_g . Con ello se puede escribir

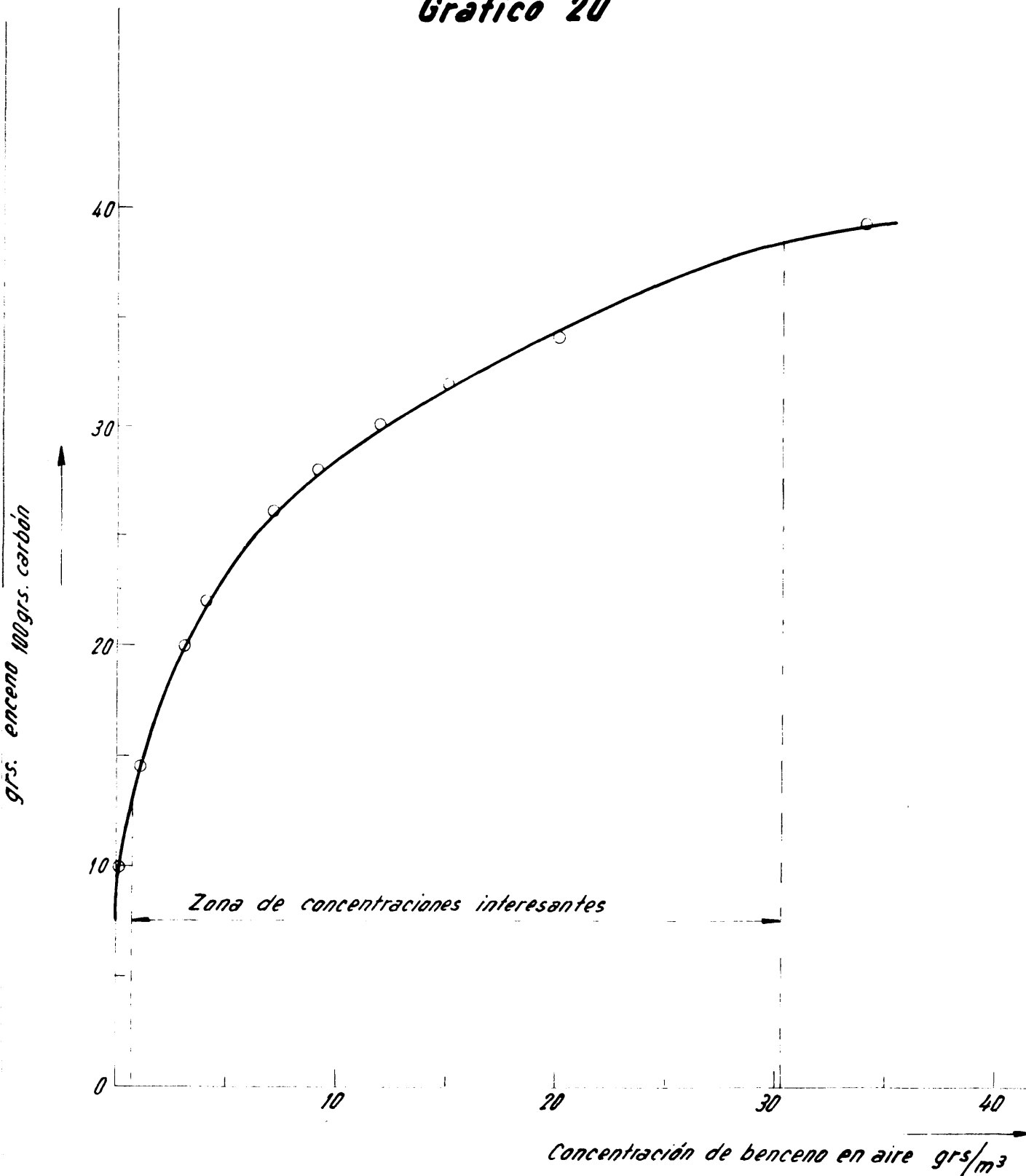
$$K_g = \frac{w/m}{\Delta V/G} = \frac{v_{ads} \cdot Q_{r_2}}{\Delta V/G}$$

siendo \underline{m} la cantidad de sólido en el lecho. A continuación se exponen tabulados los resultados obtenidos al calcular el coeficiente K_g con los datos obtenidos en los experimentos 1 a 8 en lecho fluidizado. Los valores de equilibrio x' se han tomado del gráfico 20 proporcionado por la casa sumi-

-nistradora del adsorbente. Se han dibujado los gráficos 21 y 22 que representan la relación del coeficiente de transferencia K_g con la composición del gas que entra y con la composición del adsorbato. Estos cálculos se han hecho tomando todos los datos a intervalos definidos de tiempo, de 2 en 2 minutos, para poder tener en cuenta la variación en composición de la fase sólida con el tiempo.

Carbón NORIT
Isoterma de adsorción $T=20^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 20



CALCULO DE LA CONSTANTE DE TRANSMISIBILIDAD DE MATERIA EN LECHO FLUIDIZADO

Sistema carbon NORIT-benceno

Experimento nº	Intervalo de 0 a 2 minutos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Composición del gas de entrada x_1 (grB/grA)	0'0075	0'0270	0'0366	0'0206	0'0288	0'0200	0'0320	0'0160
Composición del gas de salida x_2 (grB/grA)	0'0042	0'0197	0'0305	0'0144	0'0245	0'0110	0'0180	0'0100
<u>Gr. benceno adsorbidos</u> grs. de carbon	0'067	0'138	0'133	0'102	0'075	0'079	0'123	0'058
Composición equilibrio del aire x^* (grB/grA)	2×10^{-4}	7×10^{-4}	6×10^{-4}	4×10^{-4}	2×10^{-4}	3×10^{-4}	6×10^{-4}	1×10^{-4}
Potencial de transferencia	0'0129	0'0522	0'0763	0'0388	0'0598	0'0340	0'0546	0'0292
Coefficiente cinético de adsorción (grB/grC)	$0'25 \times 10^{-4}$	$0'85 \times 10^{-4}$	$1'10 \times 10^{-4}$	$0'65 \times 10^{-4}$	$0'90 \times 10^{-4}$	$0'62 \times 10^{-4}$	$1'10 \times 10^{-4}$	$0'5 \times 10^{-4}$
Gasto de aire (l/min)	510	475	545	410	440	440	440	480
Volumen del lecho (litros)	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440
Coefficiente de transferencia	2'26	1'75	1'79	1'56	1'51	1'82	1'83	1'86

CALCULO DE LA CONSTANTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN LECHO FLUIDIZADO

Sistema carbón NORIT-benceno

Intervalo de 2 a 4 minutos

Experimento nº	1	2	3	4	5	6	7	8
Composición del gas de entrada x_1 (grB/grA)	0'0046	0'0270	0'0331	0'0342	0'0245	0'0200	0'0460	0'0140
Composición del gas de salida x_2 (grB/grA)	0'0038	0'0230	0'0304	0'0280	0'0189	0'0160	0'0330	0'0130
<u>Gr. benceno adsorbidos</u> <u>grs. de carbón</u>	0'081	0'214	0'192	0'202	0'174	0'114	0'237	0'068
Composición equilibrio del aire x^* (grB/grA)	0'0003	0'0027	0'0020	0'0024	0'0014	0'0004	0'0038	0'0002
Potencial de Transferencia	0'009	0'0505	0'0722	0'0664	0'0466	0'0408	0'0821	0'0312
Coefficiente cinético de adsorción (grB/grC)	$0'17 \times 10^{-4}$	$0'85 \times 10^{-4}$	$1'02 \times 10^{-4}$	$1'08 \times 10^{-4}$	$0'78 \times 10^{-4}$	$0'64 \times 10^{-4}$	$1'42 \times 10^{-4}$	$0'45 \times 10^{-4}$
Gasto de aire l/min)	510	475	545	410	440	440	440	480
Volumen del lecho (litros)	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440
Coefficiente de transferencia	2'18	1'81	1'74	1'52	1'68	1'57	1'73	1'57

CALCULO DE LA CONSTANTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA AL LECHO FLUIDIZADO

Sistema carbón NORIT-benceno

Intervalo de 4 a 6 minutos

Experimento nº	1	2	3	4	5	6	7	8
Composición del gas de entrada x_1 (grB/grA)	0'0062	0'0230	0'0330	0'0348	0'0469	0'0270	0'0460	0'0180
Composición del gas de salida x_2 (grB/grA)	0'0041	0'0220	0'0314	0'0305	0'0377	0'0240	0'0400	0'0140
<u>GrB. benceno adsorbidos</u> grs. de carbon	0'124	0'233	0'227	0'274	0'336	0'141	0'290	0'106
Composición equilibrio del aire x^* (grB/grA)	0'0006	0'0036	0'0033	0'0064	0'0146	0'0007	0'0080	0'0004
Potencial de transferencia	0'0103	0'0011	0'129	0'0634	0'0644	0'0567	0'0800	0'0364
Coefficiente cinético de adsorción (grB/grC)	$0'2 \times 10^{-4}$	$0'7 \times 10^{-4}$	$1'02 \times 10^{-4}$	$1'10 \times 10^{-4}$	$1'45 \times 10^{-4}$	$0'85 \times 10^{-4}$	$1'42 \times 10^{-4}$	$0'56 \times 10^{-4}$
Gasto de aire (l minuto)	510	475	545	410	440	440	440	480
Volumen del lecho (litros)	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440
Coefficiente de transferencia	2'24	77'8	0'98	1'62	2'25	1'50	1'77	1'67

CALCULO DE LA CONSTANTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN LECHO FLUIDIZADO

Sistema carbón NORIT-benceno

Intervalo de 6 a 8 minutos

Experimento nº	1	2	3	4	5	6	7	8
Composición del gas de entrada x_1 (grB/grA)	0'0053	0'0235	0'0368	0'0538	0'0295	0'0270	0'0460	0'0180
Composición del gas de salida x_2 (grB/grA)	0'0045	0'0216	0'0334	0'0456	0'0263	0'0250	0'0400	0'0170
<u>Grs. benceno adsorbidos</u> <u>grs. de carbón</u>	0'140	0'270	0'302	0'402	0'373	0'158	0'344	0'116
Composición equilibrio del aire x' (grB/grA)	0'0007	0'0006	0'0093	---	---	0'0009	0'0165	0'0005
Potencial de transferencia	0'0096	0'0508	0'0597	---	---	0'0600	0'0618	0'0396
Coefficiente cinético de adsorción (grB/grC)	$0'19 \times 10^{-4}$	$0'73 \times 10^{-4}$	$1'12 \times 10^{-4}$	$1'65 \times 10^{-4}$	$0'92 \times 10^{-4}$	$0'85 \times 10^{-4}$	$1'42 \times 10^{-4}$	$0'57 \times 10^{-4}$
Gasto de aire (l/minuto)	510	475	545	410	440	440	440	480
Volumen del lecho (litros)	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440	0'440
Coefficiente de transferencia	2,47	1'55	2'32	---	---	1'41	2'29	1'56

CALCULO DE LA CONSTANTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN LECHO FLUIDIZADO

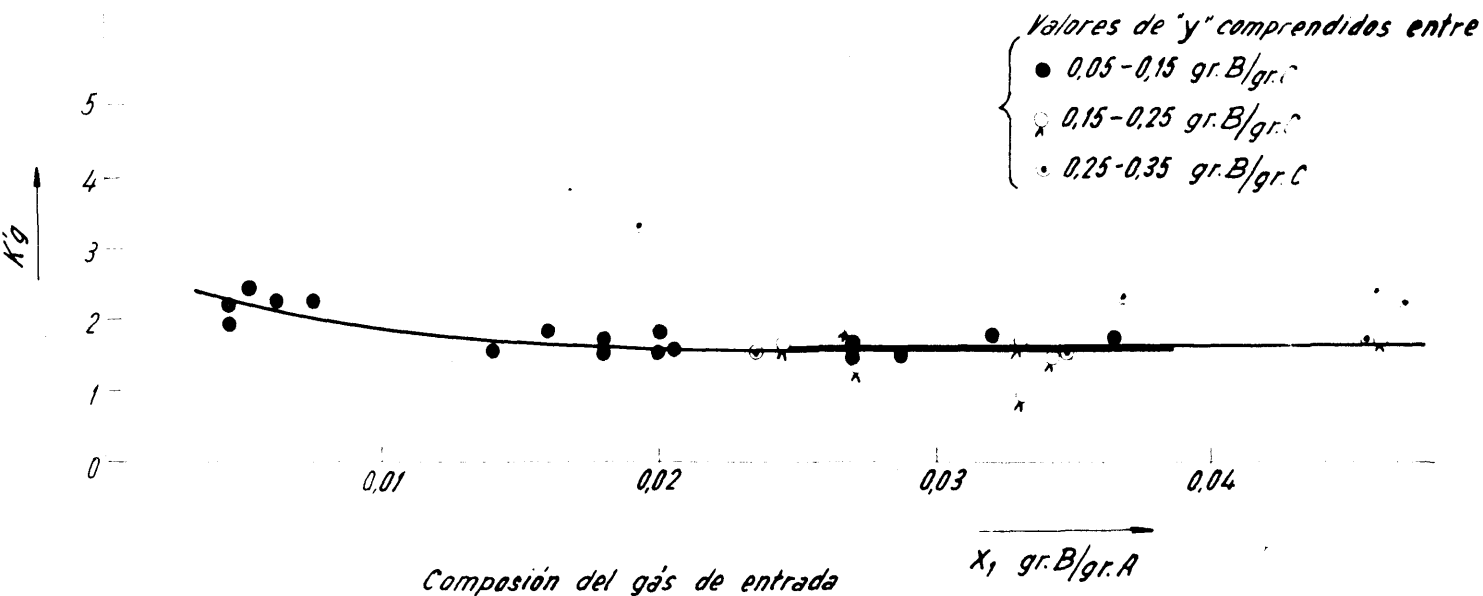
Sistema carbón NORIT-benceno

Intervalo de 8 a 10 minutos

Experimento nº	1	2	3	4	5	6	7	8
Composición del gas de entrada x_1 (grB/grA)	0'0046	0'0192	0'0370	0'0595	0'0405	0'0270	0'0460	---
Composición del gas de salida x_2 (grB/grA)	0'0044	0'0176	0'0328	0'0477	0'0302	0'0250	0'0400	---
<u>grs. benceno adsorbidos</u> grs. de carbón	0'145	0'300	0'393	0'598	0'555	0'176	0'396	---
Composición equilibrio del aire x_2' (grB/grA)	0'0007	0'0092	---	---	---	0'0014	---	---
Potencial de transferencia	0'0091	0'021	---	---	---	0'0267	---	---
Coefficiente cinético de adsorción (grB/grC)	$0'15 \times 10^{-4}$	$0'66 \times 10^{-4}$	---	---	---	$0'82 \times 10^{-4}$	---	---
Gasto de aire (l/minuto)	510	475	---	---	---	440	---	---
Volumen del lecho (litros)	0'440	0'440	---	---	---	0'440	---	---
Coefficiente de transferencia	1'95	3'36	---	---	---	3'07	---	---

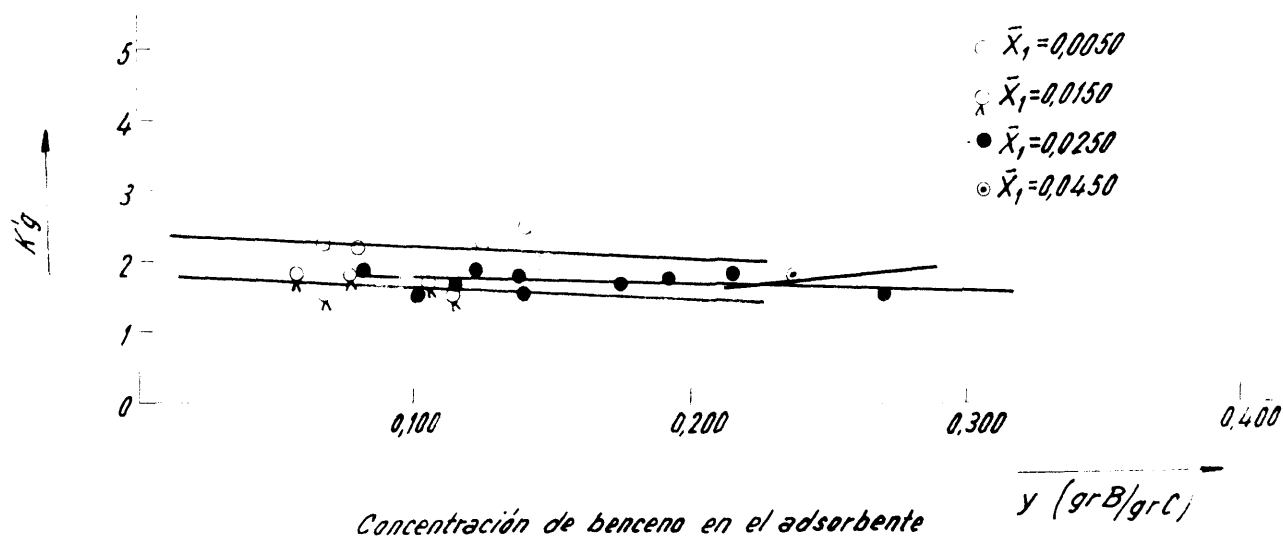
Variación de la constante de transferencia de materia K'_g en lecho fluidizado con la composición del gas de entrada X_1

Grafico 21



Variación de la constante de transferencia de materia K'_g en lecho fluidizado con la concentración de benceno en el adsorbente

Gráfico 22



IV- 2-4 Experimentos en lecho fluidizado con renovación de sólidos estudio experimental de la influencia de los tiempos de residencia del gas y del sólido en la eficacia de recuperación del lecho.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, estos experimentos se llevaron a cabo para estudiar la influencia del tiempo de residencia del sólido en el lecho sobre la eficacia de recuperación. Los experimentos se hicieron de acuerdo con la descripción hecha en la pagina 38-39.

Con los datos obtenidos se calcularon los gramos de benceno pasados por el lecho y los gramos de benceno que fueron adsorbidos por éste para representarlos en la forma acostumbrada. Asimismo se estudió la influencia del gasto de gas que atraviesa el lecho sobre la eficacia de recuperación. Los resultados se han representado en el gráfico 22 en el que se representan las líneas cuya relación "velocidad de renovación del sólido" a "gasto de aire" (V/G) es constante.

Con los valores extrapolados para 100% de eficacia de recuperación, en el gráfico 23, se ha construido la tabla de la pagina 148 y se ha dibujado el gráfico 24. En este gráfi-

-co hemos dibujado una línea teórica o correspondiente a los mínimos valores de F/G necesarios para obtener una eficacia de recuperación del 100% para cada correspondiente valor de la concentración X_1 del gas de entrada.

Esta línea teórica ha sido calculada del siguiente modo: sean, Y_{sat} la máxima cantidad de adsorbato que puede retener el adsorbato a la temperatura de trabajo del lecho, X_1 la composición del gas que entra al lecho y G el caudal a través del lecho; en nuestro caso, tendremos

$$y_{sat} = 0.40 \text{ gr. B / gr. C} \quad (\text{a } 16^\circ \text{ C})$$

$$\left[\frac{x_1}{F/G} \right] = \frac{\text{gr. B / lit. A}}{\text{gr. C / lit. A}} \ll 0.40 \frac{\text{gr. B}}{\text{gr. C}}$$

pues el adsorbente no podrá retener más de esta cantidad de adsorbato, luego será

$$\frac{X_1}{0.40} \ll \frac{F}{G} \quad \text{con lo que hemos}$$

construido la siguiente tabla de valores que nos ha servido para dibujar la línea teórica aludida

$$X_1 \qquad \frac{X_1}{0.40} \leq \frac{F}{G}$$

0.01	0.025
0.02	0.050
0.03	0.075
0.04	0.100

Evidentemente, en el gráfico 24 la línea correspondiente a una eficacia de recuperación de 100 % habrá de estar siempre por encima o en el mismo sitio que ésta línea teórica que acabamos de deducir.

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

Experimento n°	9	10	11	12	13
Alimentación de car- ben F gr C/min	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
lectura en el rota- metro	15.5	18	16	9	18
gasto de aire l/min	660	720	675	450	720
tiempo que dure el expt ^o min	12.4	11.9	11.1	12.8	11.4
Aire total(litros)	8300	8600	7500	5700	8250

Composición del gas de entrada:

gasto l/min	1'40	1'22	1'26	1'44	1'18
tiempo(min)	2	2	2	2	2
aire total (lit)	2'80	2'44	2'52	2'88	2'36
benceno adsorbidos (grs.)	0'0269	0'0592	0'0639	0'0540	0'0536
grs. B/lit A x_1	0'0097	0'0242	0'0254	0'0188	0'0226

Composición gas salida

gasto l/min	1'26	1'02	1'14	1'24	1'14
tiempo (min)	2	2	2	3	2
aire total (lit)	2'52	2'04	2'28	3'72	2'28
benceno adsorbidos(gr)	0'0012	0'0340	0'0453	0'0490	0'0295
grs. B/lit A x_2	0'0005	0'0167	0'0198	0'0131	0'0129

$x_1 - x_2$	0'0092	0'0075	0'0056	0'0057	0'0097
grs. benceno pasados	77	248	190	108	186
grs. benceno adsorbi- dos	76.5	77	42	52.8	80
Eficacia de recupera- ción	1.00	0'31	0.22	0.50	0.43

LECHE FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

Experimento n°	14	15	16	17	18	19
Alimentacion de carbon F (grs.C/min)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
lectura en el rotametro.	10	10	10	16	16	16
gasto de aire l/min.	465	465	465	675	675	675
tiempo que duró el experimento(min.)	11'3	10'7	11'5	11'9	11'5	11'9
Aire total(litros)	5250	5000	5350	8050	7750	6050
Composicion del gas de entrada:						
gasto l/min.	1'20	1'22	1'12	1'36	1'38	1'40
tiempo (min.)	2	2	2	2	2	2
aire total (litros)	2'40	2'44	2'24	2'72	2'76	2'80
grs.benceno adsorbido	0'0418	0'0548	0'0477	0'0658	0'0705	0'0713
grs.benceno/lit.aire X_1	0'0174	0'0224	0'0216	0'0240	0'0255	0'0255
Composicion del gas de salida:						
gasto l/min.	1'04	1'04	1'10	1'20	1'18	1'22
tiempo (min.)	2	2	2	2	2	2
aire total (litros)	2'08	2'08	2'20	2'40	2'36	2'44
grs.benceno adsorbido	0'0237	0'0366	0'0360	0'0364	0'0438	0'0463
grs.benceno/lit.aire X_2	0'0114	0'0176	0'0164	0'0151	0'0185	0'0190
$X_1 - X_2$	0'0060	0'0048	0'0049	0'0089	0'0070	0'0065
grs.benceno pasados	91'5	112	114	193	197	204
grs.benceno adsorbidos	31'5	24	26'2	71'5	54'2	52'2
eficacia de recuperacion.	0'345	0'21	0'23	0'37	0'276	0'257

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N°20

m = 50 gra. C F = 34'4 gra.C/min G = 425 l/min

Composición gas entrada:

tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. B}}{\text{lit. A}} = X_1$
0'2	0'0815	1'50	3'00	0'0272
2'4	0'1148	1'50	3'00	0'0382
4'6	0'1426	1'70	3'40	0'0419
6'8	0'1541	2'00	4'00	0'0385
8'10	0'1867	2'30	4'60	0'0406

Composición gas salida:

tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. B}}{\text{lit. A}} = X_2$
0'2	0'0000	0'25	0'50	0'00
2'4	0'0048	0'30	0'60	0'0080
4'6	0'0083	0'30	0'60	0'0138
6'8	0'0253	0'55	1'10	0'0230
8'10	0'0359	0'65	1'30	0'0276

Gra. de benceno adsorbidos frente a gra. benceno pasados:

tiempo min	$(X_1 - X_2) \frac{\text{gr. b}}{\text{lit. A}}$	grs. benceno pasados		grs. benceno adsorbidos	
		G T x1 parciales	totales	GT (x1 - x2) parciales	totales
0'2	0'0272	23'1	23'1	23'1	23'1
2'4	0'0302	32'0	33'0	25'7	48'8
4'6	0'0291	35'6	91'2	24'7	73'5
6'8	0'0155	32'7	123'9	13'4	86'9
8'10	0'0130	34'5	158'4	11'1	98'0

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 21

m = 50 grs.C

F = 34'4 grs.C/min

G = 425 l/min

Composición gas entrada:

Tiempo min	grs. B adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. B}}{\text{lit. A}} = X_1$
0'2	0'0594	1'00	2'00	0'0297
2'4	0'0542	0'90	1'80	0'0301
4'6	0'0678	1'05	2'10	0'0323
6'8	0'1144	1'65	3'30	0'0347
8'10	0'1240	1'75	3'50	0'0354

Composición gas salida:

tiempo (min)	grs. B adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. B}}{\text{lit. A}} = X_2$
0'2	0'0002	0'30	0'60	0'0003
2'4	0'0000	0'25	0'50	0'0000
4'6	0'0018	0'35	0'70	0'0025
6'8	0'0052	0'40	0'80	0'0065
8'10	0'0062	0'45	0'90	0'0069

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados:

tiempo (min)	$(X_1 - X_2) \frac{\text{gr. B}}{\text{lit. A}}$	gr. benceno GT · x ₁ parciales	grs. benceno pasados totales	grs. benceno adsorbidos GT (x ₁ - x ₂) parciales	grs. benceno adsorbidos totales
0'2	0'0294	25'3	25'3	25'0	25'0
2'4	0'0301	25'6	50'9	25'6	50'6
4'6	0'0298	27'6	78'4	25'2	75'8
6'8	0'0282	29'8	107'9	24'0	99'8
8'10	0'0285	30'1	138'0	24'2	124'0

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 22

m = 50 grs.C

F = 34'4 grs.C/min

G = 42b l/min

Composición gas entrada:

tiempo (min)	grs.B adsorbidos	gasto l/min	litro aire pasados	$\frac{\text{grs.B}}{\text{lit.A}} = X_1$
0'2	0'1386	1'70	3'40	0'0407
2'4	0'1266	1'60	3'20	0'0396
4'6	0'1548	2'30	4'60	0'0337
6'8	0'2062	2'85	5'70	0'0362
8'10	0'3204	2'80	5'60	0'0572

Composición gas salida:

tiempo (min)	grs.B adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{gr.B}}{\text{lit.A}} = X_2$
0'2	0'0168	0'40	0'80	0'0210
2'4	0'0210	0'40	0'80	0'0262
4'6	0'0258	0'50	1'00	0'0258
6'8	0'0354	0'60	1'20	0'0295
8'10	0'0646	0'80	1'60	0'0404

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados

tiempo (min)	$(X_1 - X_2)$	grs. benceno pasados		grs. benceno adsorbidos	
		$\frac{\text{grsB}}{\text{lit.A}}$	$\frac{G T - X_1}{\text{parciales totales}}$	$\frac{G T (X_1 - X_2)}{\text{parciales totales}}$	$(X_1 - X_2)$
0'2	0'0197	34'6	34'6	16'8	16'8
2'4	0'0134	33'7	68'3	11'4	28'2
4'6	0'0079	28'7	97'0	6'7	34'9
6'8	0'0067	30'8	127'8	5'7	40'6
8'10	0'0168	48'6	176'4	14'3	54'9

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SCLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 23

m = 50 grs.C

F = 34'4 grs.C/min.

G = 425 l/min.

Composicion gas entrada:

tiempo (min.)	grs. Benceno adsorbidos	Gasto l/min.	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}} = X_1$
0 - 3	0'1938	1'75	5'25	0'0369
3 - 5	0'1080	1'50	3'00	0'0361
5 - 7	0'1396	1'95	3'90	0'0358
7 - 9	0'1484	2'3	4'60	0'0323
9 - 11	0'1752	2'6	5'20	0'0332

Composicion gas salida:

tiempo (min.)	grs. benceno adsorbidos.	Gasto l/min.	litros aire pasados.	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litros aire}} = X_2$
0 - 3	0'0290	0'40	1'20	0'0242
3 - 5	0'0194	0'40	0'80	0'0243
5 - 7	0'0232	0'45	0'90	0'0258
7 - 9	0'0250	0'50	1'00	0'0250
9 - 11	0'0360	0'70	1'40	0'0257

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados:

tiempo	$(X_1 - X_2) \frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}}$	gramos benceno pasados		gramos benceno ad- sorbidos $GT(X_1 - X_2)$	
		$GT X_1$ parciales	totales	parciales	totales
0 - 3	0'0127	92'2	92'2	31'9	31'9
3 - 5	0'0118	60'4	152'6	19'7	51'6
5 - 7	0'0100	59'8	212'4	16'7	68'3
7 - 9	0'0073	54'0	266'4	12'2	80'5
9 - 11	0'0065	55'4	321'8	10'9	91'4

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 24

$m = 50 \text{ grs C}$

$F = 34\frac{1}{4} \frac{\text{grs C}}{\text{min}}$

$G = 835 \text{ l/min}$

Composicion del gas de entrada:

tiempo (min.)	grs. benceno adsorbidos	Gasto l/min.	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}} = x_1$
0 - 2	0'0688	1'25	2'50	0'0275
2 - 4	0'0854	1'15	2'30	0'0371
4 - 6	0'1442	2'05	4'10	0'0351
6 - 8	0'1782	2'60	5'00	0'0356
8 - 10	0'1602	2'25	4'50	0'0356

Composicion del gas de salida:

tiempo (min.)	gramos benceno no adsorbidos	Gasto l/min.	litros aire pasados.	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}} = x_2$
0 - 2	0'0100	0'35	0'70	0'0143
2 - 4	0'0164	0'35	0'70	0'0234
4 - 6	0'0270	0'50	1'00	0'0270
6 - 8	0'0319	0'60	1'20	0'0266
8 - 10	0'0362	0'65	1'30	0'0302

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados:

tiempo	$(x_1 - x_2) \frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}}$	grs. benceno pasados $GT x_1$ parciales	grs. benceno pasados totales	grs. benceno adsorbidos $GT(x_1 - x_2)$ parciales	grs. benceno adsorbidos totales
0 - 2	0.0132	45'9	45'9	22'0	22'0
2 - 4	0'0157	62'0	107'9	22'9	44'9
4 - 6	0'0081	58'6	166'5	13'5	58'4
6 - 8	0'0090	59'4	225'9	15'0	73'4
8 - 10	0'0054	59'4	285'3	9'0	82'4

LECHO MULDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

" CARBON NORIT "

EXPERIMENTO N° 25

$m = 50 \text{ grs C}$

$F = 68'4 \frac{\text{grs C}}{\text{min}}$

$G = 650 \text{ l/min}$

Composicion del gas de entrada :

tiempo (min.)	grs. benceno adsorbidos	Gasto l/min.	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}} = X_1$
0 - 2	0'0456	1'9	3'60	0'0120
2 - 4	0'0586	1'8	3'20	0'0120
4 - 6	0'0376	1'85	3'70	0'0102
6 - 8	0'0344	2'2	4'40	0'0078

composicion del gas de salida:

tiempo (min.)	grs. benceno adsorbidos	Gasto l/min.	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}} = X_2$
0 - 2	0'0020	0'45	0'90	0'0022
2 - 4	0'0010	0'40	0'80	0'0012
4 - 6	0'0028	0'45	0'90	0'0031
6 - 8	0'0000	0'45	0'90	0'0000

ramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados:

tiempo	$(X_1 - X_2) \frac{\text{grs. benceno}}{\text{litros aire}}$	grs. benceno pasados		grs. benceno adsorbidos	
		$\frac{GT X_1}{\text{parciales}}$	totales	$\frac{GT(X_1 - X_2)}{\text{parciales}}$	totales
0 - 2	0.0098	15.6	15.6	12.7	12.7
2 - 4	0.0108	15.6	31.2	14.1	26.8
4 - 6	0.0071	15.3	44.5	9.2	36.0
6 - 8	0.0078	10.1	54.6	10.1	46.1

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

EXPERIMENTO N° 26

"CARBON NORIT"

m = 50 grs. C

F = 68.4 $\frac{\text{grs. C}}{\text{min}}$

G = 650 l/min

Composicion del gas de entrada:

tiempo (min.)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min.	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}} = x_1$
0 - 2	0.0630	1.75	3.50	0.0180
2 - 4	0.0461	1.80	3.60	0.0128
4 - 6	0.0370	2.25	4.50	0.0127
6 - 8	0.0690	2.6	5.20	0.0133
8 - 10	0.0569	3.1	6.20	0.0092

Composición gas salida:

tiempo (min.)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litros aire}} = x_2$
0 - 2	0.0147	0.45	0.90	0.0163
2 - 4	0.0030	0.40	0.80	0.0038
4 - 6	0.0059	0.50	1.00	0.0059
6 - 8	0.0041	0.50	1.00	0.0041
8 - 10	0.0058	0.70	1.40	0.0041

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados:

tiempo (min.)	$(x_1 - x_2) \text{ grB/lita}$	grs. benceno pasados GF x_1 parciales	grs. benceno pasados totales	grs. benceno adsorbidos GF $(x_1 - x_2)$ parciales	grs. benceno adsorbidos totales
0 - 2	0.0017	23.4	23.4	2.2	2.2
2 - 4	0.0090	16.6	40.0	11.7	13.9
4 - 6	0.0068	16.6	56.6	8.8	22.7
6 - 8	0.0092	17.5	74.1	12.0	34.7
8 - 10	0.0061	12.0	86.1	6.0	40.7

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

EXPERIMENTO N° 27

"CARBON NORIT"

m = 50 grs.

F = 68.4 grs.C/min

G = 650 l/min

Composición del gas de entrada:

tiempo (min.)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}} x_1$
0 - 2	0.1161	2.10	4.20	0.0276
2 - 4	0.0559	1.55	2.70	0.0207
4 - 6	0.0703	2.00	4.00	0.0176
6 - 8	0.0985	2.70	5.40	0.0182
8 - 10	0.0950	3.00	6.00	0.0158

Composición gas salida:

tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}} x_2$
0 - 2	0.0164	0.50	1.00	0.0164
2 - 4	0.0103	0.45	0.90	0.0115
4 - 6	0.0124	0.50	1.00	0.0124
6 - 8	0.0160	0.60	1.20	0.0135
8 - 10	0.0161	0.70	1.40	0.0115

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados:

tiempo (min)	$(x_1 - x_2) \frac{\text{grs. B}}{\text{lit. A}}$	grs. benceno pasados G T · x ₁	grs. benceno pasados G T · x ₁	grs. benceno adsorbidos G T (x ₁ - x ₂)	grs. benceno adsorbidos G T (x ₁ - x ₂)
		parciales	totales	parciales	totales
0 - 2	0.0112	35.8	35.8	14.6	14.6
2 - 4	0.0092	26.9	62.7	12.0	26.6
4 - 6	0.0082	22.9	85.6	6.8	33.4
6 - 8	0.0047	23.6	109.2	6.1	39.5
8 - 10	0.0043	20.5	129.7	5.6	45.1

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 28

m = 50 grs.C F = 68.4 $\frac{\text{grs.C}}{\text{min}}$ G = 835 l/min

Composición gas entrada:

tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}} X_1$
0 - 2	0.0131	2.25	4.50	0.0029
2 - 4	0.0069	1.45	2.90	0.0020
4 - 6	0.0814	2.80	5.60	0.0145

Composición gas salida:

tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litro aire}} X_2$
0 - 2	0.0000	---	---	0.0000
2 - 4	0.0000	---	---	0.0000
4 - 6	0.0000	---	---	0.0000

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados:

tiempo (min)	$(X_1 - X_2)$	$\frac{\text{grs. B}}{\text{grs. A}}$	grs. benceno pasados $G \cdot T \cdot X_1$ parciales	grs. benceno pasados totales	grs. benceno adsorbidos $G \cdot T \cdot (X_1 - X_2)$ parciales	grs. benceno adsorbidos totales
0 - 2	0.0029		4.8	4.8	4.8	4.8
2 - 4	0.0020		5.3	8.1	5.3	8.1
4 - 6	0.0145		24.2	32.3	24.2	32.3

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 29

m = 50 grs. C

F = 68'4 $\frac{\text{grs. C}}{\text{min}}$

G = 855 l/min

Composición gas entrada:

tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litros aire}} x_1$
0 - 2	0'0800	2'30	4'60	0'0174
2 - 4	0'0955	1'70	3'40	0'0281
4 - 6	0'2052	2'70	5'40	0'0380

Composición gas salida:

tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{litros aire}} x_2$
0 - 2	0'0000	---	---	
2 - 4	0'0000	---	---	
4 - 6	0'0049	0'5	1'000	0'0049

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados:

tiempo (min)	$(x_1 - x_2) \frac{\text{grs. B}}{\text{lit. A}}$	grs. benceno pasados GT $\cdot x_1$ parciales	grs. benceno pasados totales	grs. benceno adsorbidos GT $(x_1 - x_2)$ parciales	grs. benceno adsorbidos totales
0 - 2	0'0174	29'0	29'0	29'0	29'0
2 - 4	0'0281	47'0	76'0	47'0	76'0
4 - 6	0'0381	63'4	139'4	55'2	131'2

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 30

m = 50 grs.C

F = 68'4 $\frac{\text{grs.C}}{\text{min}}$

G = 835 l/min

Composición gas entrada:

Tiempo (min)	grs.B adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs.B enceno}}{\text{litro aire}} x_1$
0 - 2	0'1688	2'15	4'30	0'0392
2 - 4	0'1099	1'40	2'80	0'0392
4 - 6'25	0'2407	2'80	6'30	0'0392
6'25-8'00	0'2207	3'25	5'70	0'0398
8 -10	0'2547	3'40	6'80	0'0375

Composición gas salida:

tiempo (min)	grs.benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs.benceno}}{\text{litro aire}} x_2$
0 - 2	0'0084	0'25	0'50	0'0168
2 - 4	0'0174	0'40	0'80	0'0217
4-6'25	0'0222	0'40	0'90	0'0248
6'25-8	0'0287	0'70	1'22	0'0236
8 -10	0'0496	0'85	1'70	0'0292

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados:

tiempo (min)	$(x_1 - x_2) \frac{\text{grs.B}}{\text{lit.A}}$	grs.benceno pasados GT · x ₁ parciales	grs.benceno pasados totales	grs.benceno adsorbidos GT (x ₁ - x ₂) parciales	grs.benceno adsorbidos totales
0 - 2	0'0224	65'4	65'4	37'4	37'4
2 - 4	0'0175	65'4	130'8	29'2	66'6
4-6'25	0'0144	75'6	204'4	27'1	93'7
6'25-8'00	0'0163	56'1	262'5	23'6	117'6
8 -10	0'0083	62'6	325'1	13'9	131'4

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 31

m = 50 grs. C F = 18'5 $\frac{\text{grs. C}}{\text{min}}$ G = 425 l/min

Composición gas entrada:

tiempo (min)	grs. B adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{lit. A}}$ x ₁
0 - 2	0'0229	1'36	2'70	0'0085
2 - 4	0'0439	2'08	4'16	0'0105
4 - 6	0'0241	2'00	4'00	0'0060
6 - 8	0'0262	2'85	5'70	0'0046
8 - 10	0'0082	2'42	4'84	0'0017

Composición gas salida:

tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{lit. A}}$ x ₂
0 - 2	0	0'45	0'90	0
2 - 4	0	0'52	1'04	0
4 - 6	0	0'58	1'16	0
6 - 8	0	0'50	1'00	0
8 - 10	0	0'72	1'44	0

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados

tiempo (min)	(x ₁ -x ₂) $\frac{\text{grs. B}}{\text{lit. A}}$	grs. benceno pasados	grs. benceno adsorbidos
		GT · x ₁	GT (x ₁ - x ₂)
		parciales	parciales
		totales	totales
0 - 2	0'0085	7'25	7'25
2 - 4	0'0105	8'95	16'20
4 - 6	0'0060	5'10	21'30
6 - 8	0'0046	3'9	25'20
8 - 10	0'0017	1'45	26'65

LECHE FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 32

m = 50 grs.C F = 18'5 $\frac{\text{grs.C}}{\text{min}}$ G = 425 l/min

Composición gas entrada:

tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. Benceno}}{\text{lit. aire}} \cdot x_1$
0 - 2	0'1461	2'16	4'36	0'0535
2 - 4	0'1555	2'28	4'56	0'0340
4 - 6	0'1551	2'38	4'76	0'0328
6 - 8	0'1888	3'02	6'04	0'0512
8 - 10	0'1451	2'62	5'24	0'0274

Composición gas salida:

tiempo (min)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{lit. aire}} \cdot x_2$
0 - 2	0'0240	0'48	0'96	0'0250
2 - 4	0'0285	0'60	1'20	0'0238
4 - 6	0'0308	0'62	1'24	0'0248
6 - 8	0'0351	0'70	1'40	0'0250
8 - 10	0'0335	0'78	1'50	0'0224

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados.

tiempo (min)	$(x_1 - x_2) \frac{\text{grs. B}}{\text{lit. A}}$	grs. benceno pasados GT $\cdot x_1$ parciales	grs. benceno pasados totales	grs. benceno adsorbidos GT $(x_1 - x_2)$ parciales	grs. benceno adsorbidos totales
0 - 2	0'0085	28'4	28'4	7'25	7'25
2 - 4	0'0102	29'0	57'4	8'65	15'90
4 - 6	0'0080	27'9	85'3	6'6	22'70
6 - 8	0'0062	26'5	111'8	5'27	27'97
8 - 10	0'0050	23'3	135'1	4'25	32'22

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

EXPERIMENTO N° 33

m = 50 grs.C

F = 18'5 grs.C/min.

G = 425 l/min

Composicion del gas de entrada:

tiempo (min.)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min.	litros de aire pasados	$\frac{\text{grs. Benceno}}{\text{lit. aire}}$ X ₁
0 - 2	0'0996	1'85	3'70	0'0268
2 - 4	0'1042	1'95	3'90	0'0268
4 - 6	0'1250	2'20	4'40	0'0284
6 - 8	0'1520	2'62	5'24	0'0290
8 -10	0'1308	2'35	4'70	0'0278

Composicion del gas de salida:

tiempo (min.)	grs. benceno adsorbidos	gasto l/min.	litros de aire pasados	$\frac{\text{grs. benceno}}{\text{lit. aire}}$ X ₂
0 - 2	0'0	0'38	0'76	0'0
2 - 4	0'0012	0'52	1'04	0'00115
4 - 6	0'0054	0'50	1'00	0'0054
6 - 8	0'0110	0'62	1'24	0'0089
8 -10	0'0112	0'63	1'26	0'0089

gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados:

tiempo (min.)	$(X_1 - X_2) \frac{\text{grs. B}}{\text{grs. A}}$	grs. benceno pasados $GT X_1$ parciales	grs. benceno pasados totales	grs. benceno adsorbidos $GT(X_1 - X_2)$ parciales	grs. benceno adsorbidos totales
0 - 2	0'0268	22'8	22'8	22'8	22'8
2 - 4	0'0257	22'8	45'6	21'8	44'6
4 - 6	0'0230	24'1	69'7	19'5	64'1
6 - 8	0'0201	24'6	94'3	17'1	81'2
8 -10	0'0189	23'6	117'9	16'1	97'3

LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NEGRO"

EXPERIMENTO N° 34

m = 50 grs.C

F = 18'5 $\frac{\text{grs.C}}{\text{min}}$

G = 425 lit/min

Composición gas entrada:

tiempo (min)	grs.B adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs.benceno}}{\text{lit. aire}} \times 1$
0 - 2	0'0758	1'38	2'76	0'0211
2 - 4	0'0784	1'08	2'16	0'0362
4 - 6	0'0822	1'60	3'20	0'0258
6 - 8	0'1034	1'98	3'96	0'0262
8 - 10	0'0900	1'85	3'70	0'0244

Composición gas salida.

tiempo (min)	grs.benceno adsorbidos	gasto l/min	litros aire pasados	$\frac{\text{grs.benceno}}{\text{lit. aire}} \times 2$
0 - 2	0'0028	0'25	0'5	0'0056
2 - 4	0'0038	0'25	0'5	0'0076
4 - 6	0'0062	0'35	0'70	0'0089
6 - 8	0'0094	0'42	0'84	0'0112
8 - 10	0'0094	0'45	0'90	0'0104

Gramos de benceno adsorbidos frente a gramos de benceno pasados.

tiempo (min)	$(x_1 - x_2) \frac{\text{grs.B}}{\text{lit.A}}$	grs.benceno pasados $\frac{\text{GT} \cdot x_1}{\text{parciales}}$	grs.benceno pasados totales	grs.benceno adsorbid. $\frac{\text{GT} \cdot (x_1 - x_2)}{\text{parciales}}$	grs.benceno adsorbid. totales
0 - 2	0'0218	23'3	23'3	18'5	18'5
2 - 4	0'0286	30'8	54'1	24'5	42'8
4 - 6	0'0169	21'9	76'0	14'4	57'2
6 - 8	0'0150	22'2	98'2	12'8	70'0
8 - 10	0'0140	20'6	119'0	11'9	81'9

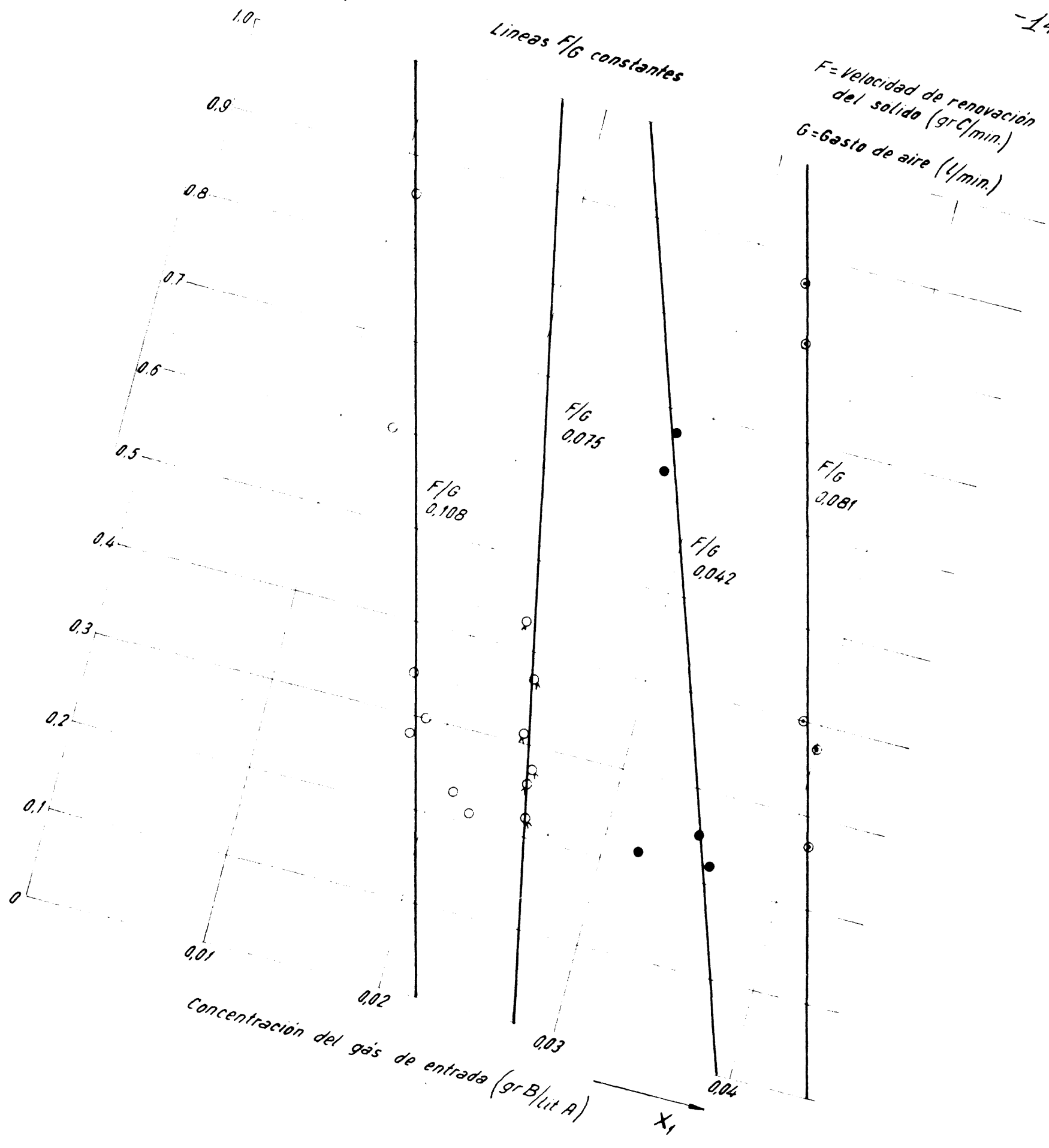
LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

"CARBON NORIT"

Expt ⁿ	n ^o	F	gr.C min	G	LA min	F/G grC lit A	valor medio	x ₁ grs.B lit.A	Eficacia recu- peración %
24			34'4		835	0'041		0'036	0'22
23			34'4		835	0'041		0'035	0'25
32			18'5		425	0'043		0'032	0'215
33			18'5		425	0'043	0'42	0'0284	0'675
34			18'5		425	0'043		0'0281	0'63
31			18'5		425	0'043		0'0074	1'00
10			52'0		720	0'072		0'0242	0'31
13			52'0		720	0'072		0'0227	0'43
11			52'0		675	0'078		0'0256	0'22
18			52'0		675	0'078	0'075	0'0253	0'276
19			52'0		675	0'078		0'0253	0'257
17			52'0		675	0'078		0'0240	0'37
9			52'0		675	0'078		0'0097	1'00
22			34'4		425	0'081		0'041	0'267
20			34'4		425	0'081		0'040	0'375
21			34'4		425	0'081	0'081	0'034	0'805
30			68'4		835	0'082		0'039	0'40
29			68'4		835	0'082		0'033	0'87
28			68'4		835	0'082		0'0065	1'00
25			68'4		650	0'105		0'0110	0'86
26			68'4		650	0'105		0'0130	0'60
27			68'4		650	0'105		0'0160	0'28
15			52'0		465	0'112	0'108	0'0224	0'21
16			52'0		465	0'112		0'0212	0'23
12			52'0		465	0'112		0'0187	0'30
14			52'0		465	0'112		0'0174	0'545

Experimentos en lecho fluidizado con renovación de sólidos

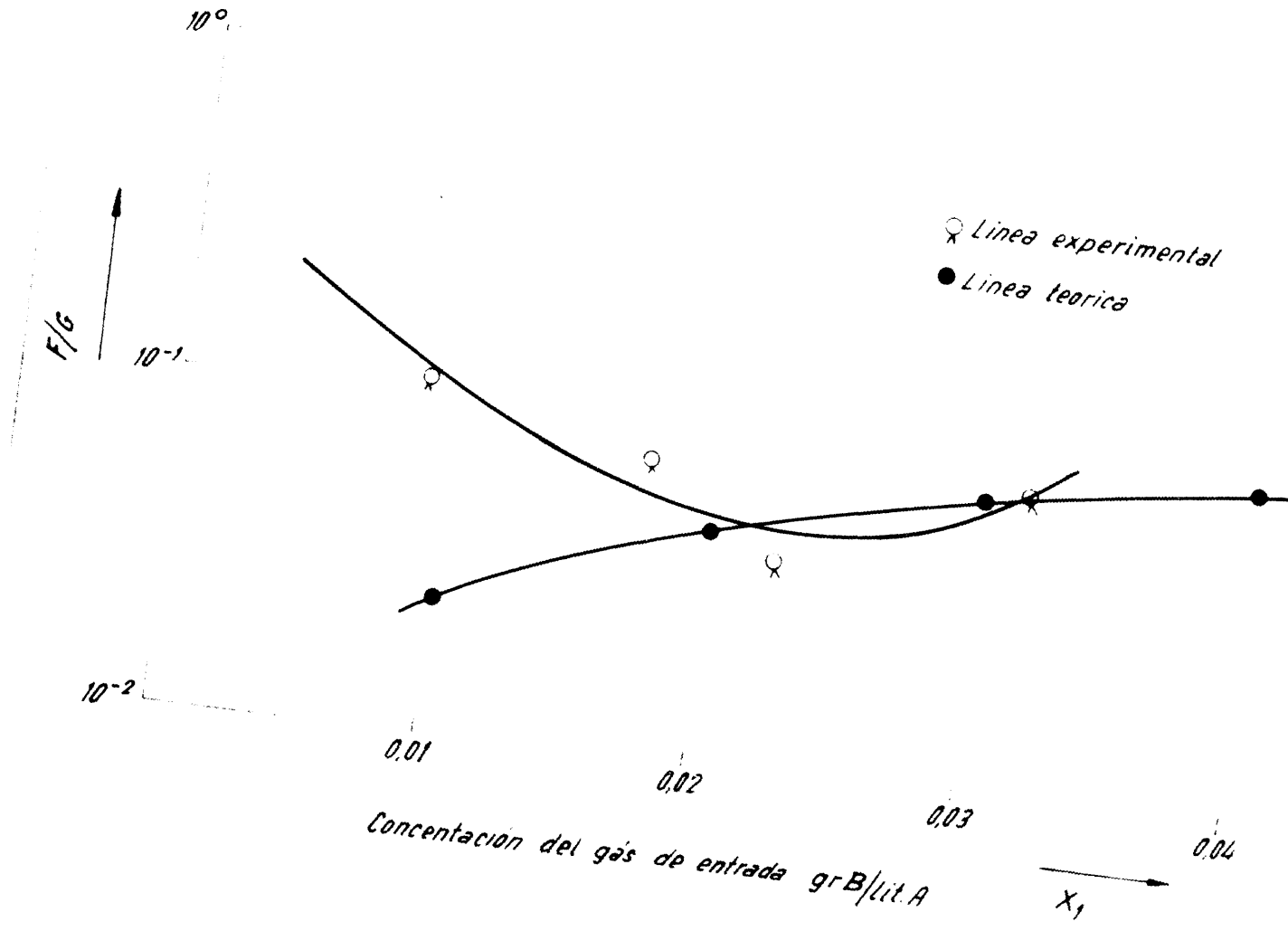
Gráfico 23



EXPERIMENTOS EN LECHO FLUIDIZADO CON RENOVACION DE SOLIDOS

Eficacia	F/G	X ₁ (valores extrapolados para eficacia 100 %)
100 %	0,108	0'0090
	0'081	0'0315
	0'078	0'0175
	0'042	0'0225

Gráfico 24



CAPITULO V.- CONSECUENCIAS Y CONCLUSIONES

CAPITULO V: CONSECUENCIAS Y CONCLUSIONES

De los resultados experimentales expuestos en el capítulo anterior es posible obtener algunas consecuencias que permiten una valoración comparativa de las ventajas y desventajas que presentan las técnicas de lecho fluidizado y lecho estático aplicadas a los procesos de recuperación de vapores por adsorción con un sólido, así como obtener un método sencillo para el cálculo tecnológico de un lecho fluidizado que haya de utilizarse en un proceso de adsorción.

En los párrafos que siguen no entraremos a exponer ni discutir las ventajas propias del lecho fluidizado sobre el lecho estático, expuestas de un modo general por otros autores, limitándonos a consignar las consecuencias que puedan deducirse de nuestros experimentos y comentando los resultados que hemos obtenido.

El primer punto que es posible comentar es el "tiempo de contacto" durante el cual puede tener lugar la transferencia de materia; evidentemente este "tiempo de contacto" sólido-gas corresponde al tiempo de residencia del gas en el lecho ya que éste es mucho menor que el tiempo de residencia del sólido; por tanto, el tiempo de residencia del gas es el que

determina el tiempo de contacto para la adsorción. A primera vista podría suponerse que la menor eficacia de recuperación del lecho fluidizado (sin renovación de sólidos) que aparece en el gráfico 19, se debe a ésta disminución del tiempo de contacto y, considerar precavidamente el concepto de adsorción instantánea. Sin embargo la explicación cinética dada en la página **XII** nos parece mucho más razonable y descansa en admitir que tanto la adsorción como la desorción son prácticamente instantáneas. Esta explicación queda confirmada con los resultados obtenidos en los experimentos en lecho fluidizado con renovación de sólidos, en los que como puede verse en el gráfico 23 es posible, en determinadas condiciones, obtener una eficacia de recuperación de 100%. Nos limitaremos, de momento, a admitir la explicación cinética a que nos venimos refiriendo, para justificar el comportamiento del lecho fluidizado sin renovación de sólidos y a destacar el hecho de que el tiempo de contacto para el proceso de adsorción queda fijado por el tiempo de residencia del gas en el lecho fluidizado.

Para seguir un orden lógico empezaremos por considerar los resultados obtenidos en lecho estático. La primera serie de experiencia en lecho estático fué realizada para ver

Variación de la esbeltez del lecho a diámetro constante

L = altura del lecho.

D = diámetro del lecho.

$L/D = e$ = esbeltez.

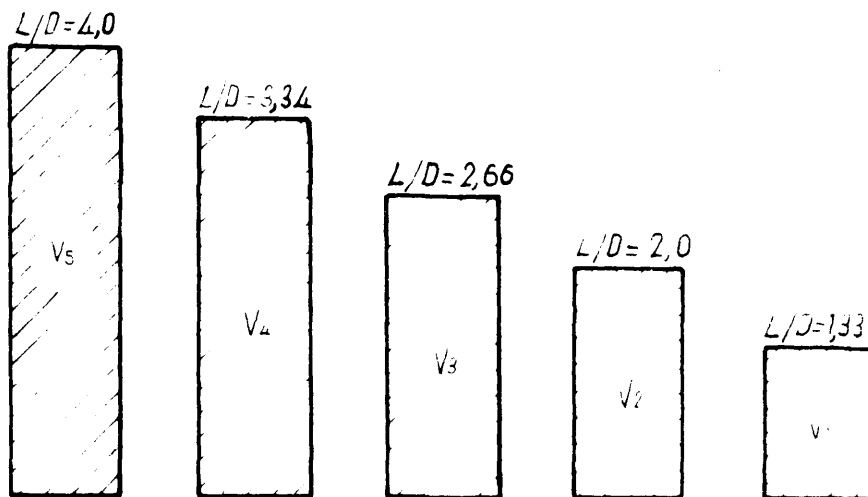


Fig. 7

Variación de la esbeltez del lecho a volumen constante

L = altura del lecho

D = diámetro del lecho

$L/D = e$ = esbeltez

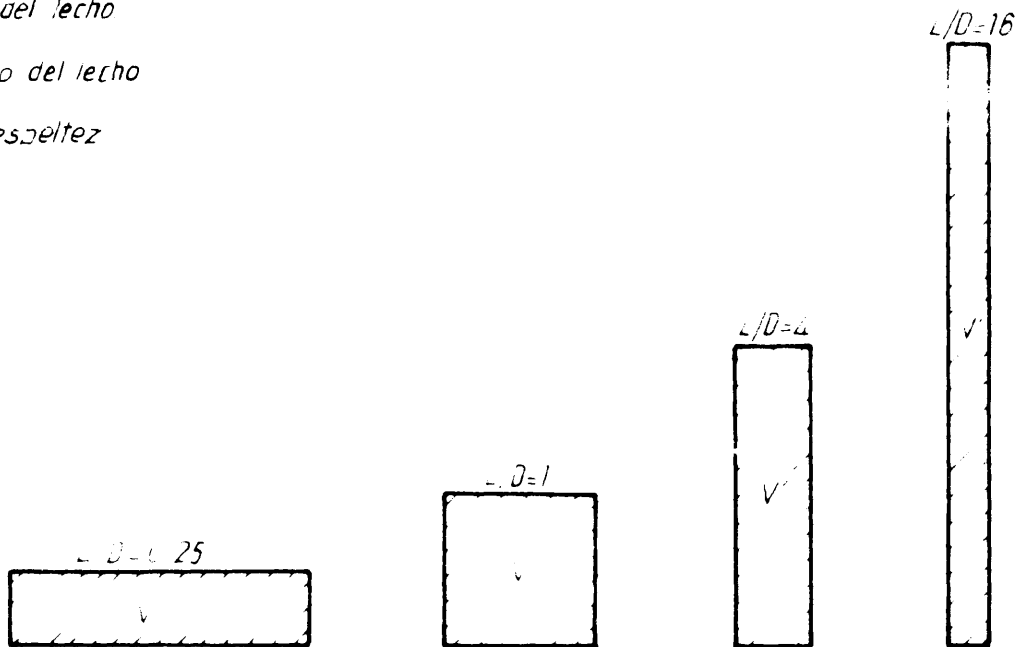


Fig. 8

qué influencia tenía el tamaño del lecho en la velocidad de adsorción, definiendo a esta velocidad como el peso de adsorbato retenido por unidad de tiempo y unidad de adsorbente.

La variación del tamaño del lecho se hizo manteniendo el diámetro constante y variando su altura, según ilustra la fig. 7; se obtuvieron así los gráficos 1 y 2 para la velocidad de adsorción y la eficacia de recuperación del lecho, respectivamente. El haz de curvas del gráfico 1 pone bien de manifiesto que la velocidad de adsorción así definida es una característica propia de cada lecho particular, es decir, cada lecho estático tiene su propia curva de velocidad de adsorción; no es preciso repetir aquí los comentarios de las páginas 61 a 65 en los que expusimos los conceptos de "coeficiente cinético de adsorción" y de "eficacia de recuperación". La segunda serie de experimentos en lecho estático se realizó manteniendo constante el tamaño del lecho, pero variando la relación altura/diámetro para ver la influencia de la esbeltez del lecho (fig. 8) sobre la velocidad de adsorción y la eficacia de recuperación del lecho; se obtuvieron así los gráficos 6 y 7 en los que aparece una sola curva, pues el desdoblamiento

-blamiento en dos curvas del gráfico 6 se debe a la diferencia de concentraciones del benceno en el aire, según explicamos en la página 81. Después de estas consideraciones queda claro que la velocidad de adsorción, tal y como la hemos definido, es una característica de cada lecho, dependiente de la concentración del gas de entrada, pero independiente de la forma o esbeltez que tenga el lecho, e idéntica para lechos de igual tamaño. Por otro lado, el "coeficiente cinético de adsorción" es una característica del sistema "adsorbente-vapor a recuperar" independiente de la forma o del tamaño del lecho considerado pero que varía con la concentración del gas de entrada. Parece lógico, por tanto, emplear este "coeficiente cinético de adsorción" como característica, más conveniente que la velocidad de adsorción, para estudiar los lechos de adsorción, para lo cual sería preciso estudiar la variación de este coeficiente con la concentración del gas de entrada, lo que proporciona un camino racional para estudiar el comportamiento del lecho estático, cuyo estudio se completaría con el de las isotermas de adsorción.

La primera serie de experiencias en lecho fluidizado

se hizo sin renovar el sólido en el lecho, tomando las composiciones de la corriente gaseosa a la entrada y a la salida del lecho a intervalos de dos minutos; de este modo obtuvimos datos con los que pudimos calcular el "coeficiente cinético de adsorción", la "velocidad de adsorción" y la "constante de transferencia de materia" en lecho fluidizado para diversas concentraciones del gas de entrada. Con estos resultados dibujamos los gráficos 17, 18 y 19. En el gráfico 17 se representa el coeficiente cinético de adsorción frente a la composición del gas de entrada, habiéndose representado en él los resultados obtenidos en lecho estático y en fluidizado. En este gráfico los puntos correspondientes a ambos tipos de lecho caen sensiblemente sobre una línea recta que pasa por el origen de coordenadas. Si admitimos que el coeficiente cinético de adsorción es una característica del sistema adsorbente-vapor no es extraño que estos puntos caigan en una línea recta puesto que formalmente no hay diferencia alguna entre la adsorción en uno u otro tipo de lecho y, aunque puedan variar las velocidades de adsorción o los coeficientes de transferencia de materia, el proceso de adsorción propiamente di-

cho es el mismo en los dos lechos. Por otro lado, resulta que el coeficiente cinético de adsorción es función lineal de la composición del gas de entrada, y esta función es la misma tanto si el lecho trabaja como lecho estático o como fluidizado. Este gráfico 17, por tanto, nos proporciona un enlace entre ambos tipos de lechos; bastará conocer la composición del gas que se desea tratar para leer en el gráfico 17 el valor correspondiente del coeficiente cinético de adsorción.

De este gráfico hemos deducido la siguiente relación

$$C_{ca} = v_{ads} \cdot \theta_{r_2} = 2'94 \times 10^{-3} X_1$$

válida para lecho estático y para el fluidizado.

En el gráfico 18 se han representado los valores de la velocidad de adsorción para diferentes concentraciones del gas de entrada; como era de esperar la velocidad de adsorción es mucho mayor en el lecho fluidizado que en el estático.

En el gráfico 19 se han representado la línea de "eficacia de recuperación"; de dicho gráfico se desprende que la eficacia de recuperación de un lecho fluidizado sin renovación de sólidos es bastante menor que en el caso del lecho estático; la explicación cinética dada en la página III puede

servir para comprender la falta de eficacia de recuperación en este tipo de lechos. La "constante de transferencia de materia" ha podido calcularse a partir de los datos obtenidos en lechos fluidizados sin renovación de sólidos y ^{se ha} representado en función de la composición del gas de entrada en el gráfico 21 y en función de la composición del lecho en el gráfico 22.

La parte final de nuestra experimentación la hicimos renovando el sólido en el lecho fluidizado a varias velocidades, y variando sistemáticamente el caudal y la composición de la corriente gaseosa de entrada.

Tomando a intervalos definidos de tiempo la composición de las corrientes gaseosas de entrada y de salida del lecho, obtuvimos datos para poder calcular los valores de la eficacia de recuperación del lecho fluidizado con renovación de sólidos, tratando de ver si era posible hallar unas condiciones en las que la eficacia de recuperación fuera del 100%. Con los resultados hallados calculamos y dibujamos los gráficos 23 y 24 que merecen un comentario detenido.

En el gráfico 23 se han representado las líneas cuya relación P/G es constante en un diagrama cartesiano cuyas

ordenadas son las eficacias de recuperación en lecho fluidizado y las abscisas las composiciones del gas que entra al lecho. Parece lógico que estas líneas se dispusieran en el diagrama según valores crecientes de F/G en uno u otro sentido, pero no ocurre así, y las líneas se distribuyen en el gráfico sin orden aparente.

Puesto que, desde un punto de vista económico, el ideal de todo proceso de adsorción es recuperar el 100% del vapor que se considera interesante y, al mismo tiempo, aprovechar al máximo la capacidad retentiva del adsorbente, juzgamos conveniente extrapolar las líneas de F/G constante del gráfico 23 para buscar los puntos correspondientes al 100% de eficacia de recuperación e , lo que es igual, para valor de la eficacia de recuperación igual a la unidad; con estos valores se ha dibujado en el gráfico 24 la línea experimental correspondiente a 100% de eficacia de recuperación. Al mismo tiempo y de acuerdo con lo expuesto en la página 126 se ha dibujado la línea teórica correspondiente a la mínima cantidad de adsorbente necesaria para recuperar todo el vapor que arrastra la corriente gaseosa; evidentemente cualquiera que sea el valor de G , a cada valor de la composición x_1 del gas de entrada la corrección

-ponderará una mínima relación F/G para que todo el vapor pueda quedar retenido en el lecho. Llegados a este punto queda perfectamente claro que en la zona donde estas dos líneas vayan próximas se cumplirán las dos condiciones que hacen económicamente interesante el proceso de adsorción en lecho fluidizado, es decir, en la zona donde la eficacia de recuperación es del 100% y la utilización del poder retentivo del adsorbente es también del 100% a la temperatura de trabajo. En el gráfico 24 las dos líneas se unen para valores de la concentración de benceno superiores a 0.024 grs.B/lit . A la izquierda de este valor las líneas se separan, lo que significa que para conseguir una recuperación del vapor de 100% es preciso utilizar a mucho más carbon que el mínimo necesario teóricamente. Puesto que las concentraciones de benceno en aire que se presentan en la industria no suelen exceder de 0.03 gr B/lit parece que dar bastante limitada la zona práctica de aplicación de la técnica de recuperación por adsorción en lecho fluidizado; no obstante es posible pensar en la posibilidad de obtener el 100% de eficacia de recuperación colocando varios lechos fluidizados superpuestos.

A partir de los gráficos 24 y 17 es posible hacer el cálculo teórico de un lecho fluidizado para la recuperación por adsorción de una corriente gaseosa cuyo caudal sea G l/hora y cuya concentración en vapor a recuperar sea

$$X_1 \frac{\text{gramos de vapor}}{\text{litro aire}}$$

Evidentemente, cuando en la prág

tica industrial se presente un problema de esta naturaleza los datos conocidos serán G y X_1 . Para el cálculo de las características principales del lecho fluidizado se puede pro
ceder de la siguiente manera:

En el gráfico 17 y a partir del valor X_1 hallamos el correspondiente valor del coeficiente cinético de adsorción. En el gráfico 24 hallamos la relación F/G necesaria para obtener 100% de eficacia de recuperación a la concentración X_1 del gas de entrada.

La sección del lecho fluidizado vendrá determinada por G y por las características de fluidización del adsorbente que se vaya a emplear.

Conocidos G y F/G se deduce F , velocidad de renovación del sólido en el lecho fluidizado. Conocido F , puesto que no hay acumulación de materia en el lecho y se supone que

la recuperación es del 100%, es posible calcular la velocidad de adsorción del lecho que será igual a $\frac{X_1}{F}$; con V_{vel} y el coeficiente cinético C_{ca} es posible deducir el tiempo de residencia del gas en el lecho ya que $\theta_{rg} = \frac{C_{ca}}{V_{vel}}$; finalmente a partir de θ_{rg} y de G es posible hallar el volumen del lecho fluidizado, pues $V = G \theta_{rg}$. Asimismo a partir del volumen del lecho y estimado el valor de la porosidad del lecho fluidizado se puede calcular la cantidad m de adsorbente en el lecho. Con ello quedan calculados los datos principales del lecho fluidizado y es posible hacer una estimación anticipada del coste del aparato y con ello de las posibilidades económicas del proceso. El ejemplo que exponemos a continuación servirá para aclarar el método que proponemos para el cálculo de un lecho fluidizado destinado a recuperar vapores por adsorción. Ejemplo de cálculo de un lecho fluidizado según el método expuesto.

Los datos que se conocieran serán solamente, por regla general, caudal de gas a tratar G , su contenido en vapor a recuperar X_1 (benceno nuestro ejemplo) y las características del adsorbente. Supongamos que se trata de recuperar benceno en lecho fluidizado empleando carbon Norit como adsorbente sean:

$$G = 10^3 \text{ l/min} < > 1.44 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$X_1 = 0.0230 \text{ gr B/gr A} = 0.030 \text{ grB/lit A}$$

Puesto que con los datos de la página 91 resulta

$$\text{sección de la columna de fluidización} = 22.0 \text{ cm}^2$$

$$\text{gasto de aire} = 460 \text{ l/min}$$

$$\text{velocidad de fluidización} = \frac{460 \times 10^3}{22}$$

$$\text{velocidad de fluidización} = \frac{460 \times 10^3}{22 \times 60} = 3.5 \times 10^2 \text{ cm/seg}$$

podemos aceptar esta velocidad de paso del gas, con lo que la sección de la columna proyectada deberá ser

$$S = \frac{10^3 \times 10^3}{350 \times 60} \frac{10^6}{21000} \text{ cm}^2$$

$$S = 47.8 \text{ cm}^2 \quad \text{lo que supone un diámetro}$$
$$D = 7.8 \text{ cm} \quad \text{de columna}$$

Del gráfico 24, y en la línea de 100% de eficacia de recuperación obtenemos $P/G = 0.070 \frac{\text{grs. C}}{\text{lit. A}}$

de manera que la renovación del sólido en el lecho deberá hacerse a la velocidad de

$$F = 0.070 \times 10^3 = 70 \frac{\text{gr C}}{\text{min}}$$

Por otro lado del gráfico 17 obtenemos

$$v_a \theta_{rg} = 0.75 \times 10^{-4}$$

valor del coeficiente cinético de adsorción para la concentración en benceno de la mezcla que deseamos tratar.

Si la eficacia de recuperación es del 100% como no hay acumulación de materia en el lecho fluidizado, los 70 gr C/min que entran han de salir del lecho llevándose todo el benceno que entre en el minuto, luego podremos escribir: gramos de benceno que entra en el lecho $0.030 \times 10^3 \frac{\text{gr. B}}{\text{min}}$ con lo que la velocidad de adsorción deberá ser.

$$v_{ads} = \frac{30}{70} = 0.43 \frac{\text{gr. B}}{\text{gr C min}}$$

por tanto el tiempo de residencia del gas en el lecho deberá ser

$$\theta_{rg} = \frac{v_{ads}}{v_a} \cdot \theta_{rg} = \frac{0.75 \times 10^{-4}}{0.43} \text{ min}$$

$$\theta_{rg} = \underline{1.75 \times 10^{-4} \text{ min}}$$

por tanto el volumen del lecho habrá de ser

$$V = \theta_{rg} \cdot G = 1'75 \times 10^{-4} \times 10^3 = 0.175 \text{ litros}$$

como la sección del lecho es de $47'8 \text{ cm}^2$ la altura del lecho fluidizado será

$$L_f = \frac{175}{47'8} = 3.6 \text{ cm}$$

Conocido la porosidad del lecho fluidizado para el adsorbente elegido, a la velocidad de paso del gas de 350 cm/seg. y la densidad del adsorbente es fácil calcular la cantidad de adsorbente en gramos que se precisa poner en el lecho fluidizado. Admitamos que en este caso la porosidad del lecho fluidizado es 0'75 tendremos:

$$\text{volumen de adsorbente en el lecho} = 0'25 \times 0'175 = 0'0436 \text{ litros}$$

y por tanto si la densidad del carbon NORIT es de $1'27 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$ los gramos de carbon que ^{habrá que} poner en el lecho serán:

$$m = \frac{44}{1.27} = 35 \text{ gra.}$$

Resumiendo los valores obtenidos tendremos:

Datos:

$$G = 1000 \text{ l/min}$$

$$X_1 = 0.030 \text{ gr B/lit A}$$

Resultados obtenidos:

Diámetro de la columna $D = 7.8 \text{ cms.}$

Velocidad de renovación del sólido $F = 70 \frac{\text{gr C}}{\text{min}}$

Cantidad de adsorbente en el lecho $m = 35 \text{ grs.}$

Eficiencia de recuperación: 100%

Altura del lecho fluidizado: 3.6 cms.

Estos datos son en si suficientemente elevados y no necesitan ningún comentario sobre las posibilidades económicas del proceso de adsorción en lecho fluidizado.

Podemos resumir los puntos más importantes de este trabajo de la siguiente manera:

Se ha definido el coeficiente cinético de adsorción y se ha medido para diversos valores de la concentración en vapor del gas de entrada; estas medidas se han realizado en lecho estático y en fluidizado.

Se ha estudiado la eficacia de recuperación del lecho fluidizado con y sin renovación de sólidos y se ha medido dicha eficacia en diversas condiciones de funcionamiento del lecho fluidizado.

Se ha medido la constante de transferencia de materia en lecho fluidizado para el sistema utilizado (benceno-carbon Norit)

Se propone un método para el cálculo teórico de lechos fluidizados, utilizable en procesos de adsorción.

Como nota final podemos sentar las siguientes

CONCLUSIONES:

- 1- La magnitud que hemos introducido, y a la que llamamos coeficiente cinético de adsorción de un lecho, es la característica más adecuada para comparar entre sí lechos diferentes de un determinado sistema vapor-adsorbente.
- 2- El referido coeficiente cinético de adsorción varía linealmente con la concentración de vapor en el gas ^{que} atraviesa el lecho, tanto en régimen estático como en fluidizado.
- 3- El dicho coeficiente es constante- igual para ambos regimenes de lechos- si es fija la concentración del vapor.
- 4- La eficacia de recuperación del lecho fluidizado con renovación de sólidos puede llegar a ser del 100% para concentraciones del vapor en el gas de entrada suficientemente grandes, cuando se emplea la cantidad mínima teórica de adsorbente necesaria para la total recuperación del vapor.

5- Para pequeñas concentraciones de vapor, la obtención del 100% de eficacia de recuperación en lecho fluidizado es posible, pero exige cantidades de adsorbente varias veces más grandes que la mínima teórica necesaria.

6- Determinados previamente los gráficos como los 17 y 24 de este trabajo para cada sistema vapor-adsorbente, es posible y sencillo, por el método que se describe, hacer el cálculo previo que fija las características funcionales de una adsorción en lecho fluidizado.

Ciudad Universitaria , Madrid
Laboratorio de Química Industrial
Junio 1961