

FLUIDIZACION DE MEZCLAS DE SÓLIDOS DE DISTINTAS
CARACTERÍSTICAS

por A.R. OTERO y J. CORELLA

Vol. 67 N° 12 de ANALES DE QUÍMICA.

Pág. 1207 a 1233

Diciembre, 1971

FLUIDIZACION DE MEZCLAS DE SOLIDOS DE DISTINTAS CARACTERISTICAS

I. Velocidades de fluidización

POR

A. R. OTERO y J. CORELLA J^{*1}

*Junta de Energía Nuclear. División de Materiales. Madrid
Recibido el 22 de diciembre de 1970*

SUMMARY

The properties of corundum, calcium fluoride, the calcium fluoride-magnesium fluoride eutectic and uranium trioxide concerning their use in a fluidized bed are studied. Expressions for the minimum fluidization and complete fluidization velocities of a solid have been derived from grain size distribution and the so called "fluidodynamic" density. Expressions have been also obtained for mixtures of solids from grain size distributions. "fluidodynamic" densities and weight fraction.

INTRODUCCIÓN

Cuando las reacciones sólido-gas no catalíticas en las que los productos de reacción son gaseosos son llevadas a cabo en reactores de lecho fluidizado, tal como la fluoruración de UF_4 o UO_2 a UF_6 , es conveniente y, a veces, totalmente necesario mezclar el sólido reactivo con otro sólido inerte al gas reaccionante (1-5), con objeto de mantener las condiciones fluidodinámicas del lecho, facilitar la transmisión de calor, etc.

La fluidización de estas mezclas de sólidos de características físicas diferentes (densidad, tamaño, factor de forma), en las que uno de los constituyentes disminuye constantemente de tamaño hasta su total desaparición, presenta dificultades, ya que puede haber segregación de unas partículas, desconociéndose hasta la fecha la forma óptima de realizar dichas mezclas y de predecir sus propiedades fluidodinámicas.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento fluidodinámico del UO_2 y de diferentes inertes: fluoruro cálcico, corindón ($Al_2O_3-\alpha$) y el eutéctico de fluoruro cálcico y fluoruro magnésico (6). A continuación se consideran las mezclas de trióxido de uranio con cada uno de los dos últimos inertes, ya que fueron los que mejores propiedades mostraron, debido a su mayor pureza, resis-

(*) Dirección actual: Facultad de Ciencias, Departamento de Química Técnica, Universidad de Madrid, España.

(1) MATZ, G.: *Chem. Ing. Techn.*, **30**, 319 (1958).

(2) VOGEL, G. J. and MECHAN, W. J.: USAEC Report ANL-6054, Oct. 1959.

(3) JARRY, R. L., HARIHARAN, A. V. and MANEY, G.: USAEC Report ANL-6763, Oct. 1963.

(4) ANASTASIA, L. J. and MECHAN, W. J.: *Ind. Eng. Chem. Process Design Develop.*, **4**, 338-344 (1965).

(5) ANASTASIA, L. J., GABOR, J. D. and MECHAN, W. J.: USAEC Report ANL-6898, agosto 1965.

(6) PEDREGAL, J. D. y AFARICIO, E.: *Science of Ceramics*, Academic Press-London, **1**, 305 (1961).

tencia a la abrasión, etc. El corindón, además, aventaja al eutéctico en su mayor facilidad de obtención y menor costo.

A partir de este estudio se obtiene el criterio necesario para poder realizar las mezclas sólido reactivo-inerte, de forma que el conjunto resulte homogéneo y fluidice a velocidades superficiales lo más bajas posibles. Asimismo, se podrán predecir las propiedades fluidodinámicas de las mezclas, principalmente las velocidades mínimas de fluidización y de completa fluidización, con sólo conocer la granulometría y las densidades de cada uno de los sólidos.

A pesar de aplicarse los datos obtenidos a un reactor de conversión de UF_4 a UF_6 , el primero se ha sustituido por UO_3 , puesto que las propiedades fluidodinámicas de ambos compuestos son muy parecidas y la manipulación del trióxido es más sencilla.

MÉTODO OPERATORIO

Materiales

El trióxido de uranio empleado se preparó en un calcinador de lecho fluidizado (7) por descomposición del nitrato de uranilo. Las partículas eran muy compactas, de forma redondeada, y presentaban una gran fluidez (ángulo de fractura: 30-35°).

El corindón, suministrado por una firma comercial, fue obtenido por fusión a 2.000 °C, lográndose así la calidad conocida por "blanco nieve", de gran pureza (99,5 %).

El eutéctico de fluoruro cálcico (48 %) y magnésico (52 %) se preparó fundiendo a 948 °C en un crisol de acero refractario y en atmósfera inerte, una mezcla íntima de los dos fluoruros finamente divididos. El sólido obtenido se rompía en una trituradora de muelas y después se reducía de tamaño en un molino oscilante de discos, hasta obtener los tamaños de grano deseados.

La fluorita (CaF_2) fue preparada en los laboratorios de la División de Metalurgia de la Junta de Energía Nuclear, a partir de un producto comercial inerte, mediante molienda y flotación para eliminar la sílice, ya que estaba cristalizada conjuntamente con cuarzo, seguida de una separación magnética para separar el hierro, quedando ambas impurezas reducidas al 1,0 y 0,02 %, respectivamente.

Las partículas de corindón eran irregulares, mientras que las de eutéctico tenían forma redondeada, presentando la fluorita un aspecto intermedio entre ambas.

De los cuatro sólidos estudiados se prepararon, mediante tamizado manual, fracciones con un intervalo muy estrecho de tamaños, las cuales se estudiaron individualmente, así como mezclas binarias, ternarias, etc., de dichas fracciones (en micras): A(— 1.000 + 600), B(— 833 + 600), C(— 770 + 600), D(— 600 + 500), E(— 500 + 380), F(— 380 + 300), G(— 300 + 250), H(— 250 + 200), I(— 200 + 160), J(— 160 + 114), K(— 114 + 85), L(— 85 + 60) y M(— 60 + 40).

A todos los productos ensayados se les sometió, previamente, por elutriación con aire, a una eliminación de los tamaños más finos (inferiores a 40 micras), ya que su presencia interfería las determinaciones.

Equipo

Las propiedades fluidodinámicas se determinaron en una columna de vidrio de 64 mm de diámetro interior y 60 cm de altura (figura 1), equipada con una placa de polvo de vidrio sinterizado, y de una porosidad tal que a 10 y 30 cm/seg de velocidad superficial del aire (a 20 °C y 705 mm de presión), referida a la sección libre de la columna, determinaba una pérdida de carga de 15 y 50 cm de columna de agua, respectivamente. Adosada al lecho había una escala milimétrica.

Como gas fluidizante se empleó aire en las condiciones citadas, el cual se medía en un orificio previamente calibrado y se regulaba con ayuda de una válvula de aguja.

Las pérdidas de carga en el lecho de sólidos se controlaban mediante dos tomas de presión conectadas a un tubo en U, empleándose agua como líquido manométrico. Otros dos manómetros semejantes a este permitían anotar las sobrepresiones, con respecto a la atmósfera, de la columna de fluidización y del orificio medidor.

(7) OTERO, A. R., SANCHEZ, R. J. and CHAPALA, E.; "Proceedings of the International Symposium on Fluidization". June 1967, pág. 769, Eindhoven (Netherlands). Netherlands

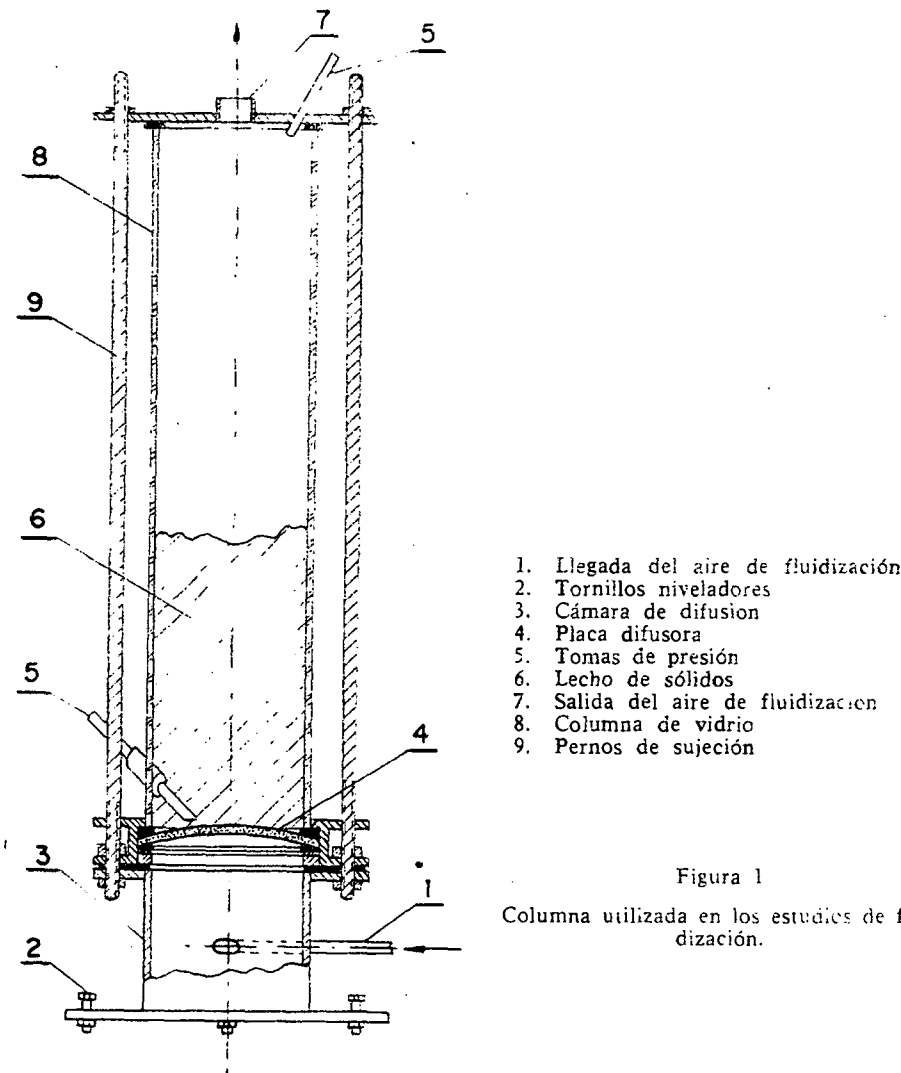


Figura 1
Columna utilizada en los estudios de fluidización.

Procedimiento experimental

La columna de fluidización se cargaba con una cantidad pesada del sólido a estudiar, sometiéndose a éste a una violenta fluidización para conseguir una buena mezcla; a continuación se interrumpía el flujo de gas lentamente, quedando, de esta forma, el sólido completamente "aflojado". Acto seguido se comenzaba a pasar aire, anotándose pérdidas de carga, caudales, alturas de lecho, etc.

Una vez realizadas estas determinaciones se compactaba el lecho por vibración hasta no obtener una posterior reducción del volumen aparente (lecho "empaquetado"), volviéndose a repetir las anteriores medidas.

Principales conceptos utilizados

Velocidad mínima de fluidización (V_{mf}).—Se obtiene a partir del diagrama pérdida de carga-velocidad superficial. Corresponde al punto de intersección de la línea característica de la pérdida de carga en lecho fijo "aflojado", o su prolongación, con la paralela a la abscisa que pasa por el punto correspondiente a la pérdida de carga teórica del lecho

Velocidad mínima de completa fluidización (V_{mcf}).—Es la mínima necesaria para tener a todo el sólido fluidizado sin que existan partículas inmóviles junto a la placa distribuidora.

Velocidad reducida (V_R).—Es la relación entre las dos anteriores:

$$V_R = \frac{V_{mcf}}{V_{mf}} \quad [1]$$

Para el cálculo de la densidad fluidodinámica de las partículas del sólido es preciso conocer la porosidad ϵ_1 del lecho que se determina realizando dos medidas de pérdida de carga del gas cuando atraviesa el lecho de sólidos con distinto grado de empaquetamiento, esto es, aflojado y empaquetado, a la misma velocidad superficial. En estas condiciones, y a partir de la correlación para el flujo de fluidos en régimen laminar ($Re_p \leq 10$) a través de lechos de sólidos (8), se deduce:

$$\epsilon_1 = \frac{1 - \frac{L_1}{L_2}}{\sqrt{\frac{\Delta P_1 \cdot L_1}{\Delta P_2 \cdot L_2} - \frac{L_1}{L_2}}} \quad [2]$$

Los subíndices 1 y 2 se refieren a las condiciones empaquetada y aflojada, respectivamente.

PROPIEDADES FLUIDODINÁMICAS DE LOS COMPUESTOS INDIVIDUALES

Los datos que se exponen a continuación son el resultado de los ensayos realizados, habiéndose estudiado para el UO_3 45 muestras, y para el corindón, el eutéctico y la fluorita, 16, 13 y 8, respectivamente.

Los tamaños medios de las partículas se variaron ampliamente (desde 775 a 40 micras), así como el número de fracciones con un intervalo estrecho de tamaños (— 250 + 200, — 200 + 160, etc.) constituyentes de cada muestra, ya que se efectuaron ensayos con un solo intervalo de tamaños, con dos, tres y múltiples. Su descripción granulométrica detallada ocuparía demasiado espacio, no creyéndose oportuno, excepto en algunos casos concretos, su inserción en este trabajo.

De los cuatro productos citados, el UO_3 tiene propiedades bastante diferentes a las de los restantes, habiéndose, por tanto, realizado con él un mayor número de determinaciones.

TABLA I
Densidades de partícula y de lechos

Producto	Densidades de partícula gr/cm ³		Densidades aparentes de los lechos ($\sigma = 0$) gr/cm ³	
	Fluidodinámica	Cristalina	Aflojado	Empaquetado
Trióxido de uranio	6,9	7,3-8,0 (9)	3,8	4,2
Eutéctico (CaF_2 - MgF_2)	3,0	3,1 (6)	1,4	1,7
Fluorita (CaF_2)	3,1	3,2 (10)	1,6	1,9
Corindón (α - Al_2O_3)	3,5	4,0 (10)	1,6	1,9

(8) LEVA, M.: "Fluidization". Mc Graw-Hill Book Co., New York (1959).

(9) DELL, R. M. y WHEELER, W. J.; *Trans. Far. Soc.*, núm. 476, 58, 1591 (1962).

(10) PERRY, J. H.: "Chemical Engineers Handbook". Mc Graw-Hill Book Co., New York (1953), págs. 110 y 114.

DESCRIPCION GRANULOMETRICA

Fracciones que integran la mezcla y % en peso de cada una de ellas	Tamaño medio D_p (micras)	Desviación típica σ (mm)	TRIOXIDO DE URANIO			EUTECTICO			FLUORITA			CORINDON		
			Mínimas	cm-seg	Reducidas V_R	Mínimas	cm/seg	Reducidas V_R	Mínimas	cm/seg	Reducidas V_R	Mínimas	cm/seg	Reducidas V_R
			Fluidiz. V_{mf}	Completa fluidiz. V_{mcf}		Fluidiz. V_{mf}	Completa fluidiz. V_{mcf}		Fluidiz. V_{mf}	Completa fluidiz. V_{mcf}		Fluidiz. V_{mf}	Completa fluidiz. V_{mcf}	
A(100)	775	0	73,0	90,0	1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B(100)	706	0	—	—	—	49,4	70,0	1,4	—	—	—	—	—	—
C(100)	680	0	—	—	—	—	—	—	51,0	73,0	1,4	65,5	86,5	1,3
D(100)	548	0	49,0	62,0	1,3	38,2	55,5	1,4	—	—	—	34,5	64,0	1,8
E(100)	435	0	41,5	44,0	1,1	24,0	45,0	1,9	22,7	35,0	1,6	33,4	47,0	1,4
A — J	388	0,098	36,0	51,5	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A — K	356	0,058	40,5	56,5	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A — K	353	0,072	36,7	50,0	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F(100)	338	0	27,9	33,0	1,2	15,3	20,3	1,4	11,9	24,5	2,1	23,1	31,5	1,4
E(50), G(50)	336	0,083	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20,1	38,0	1,9
D — K	313	0,049	31,5	47,0	1,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A — J	288	0,131	16,3	32,0	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F — L	288	0,048	12,9	19,6	1,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A — K	287	0,051	23,9	43,7	1,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A — M	285	0,116	22,0	35,0	1,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
G(100)	274	0	18,0	24,0	1,3	10,0	16,5	1,6	8,2	19,0	2,3	15,6	21,5	1,4
A — L	273	0,053	17,5	22,3	1,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F(25), G(50), H(25)	272	0,041	—	—	—	9,7	18,5	1,9	—	—	—	—	—	—
A — J	259	0,130	14,7	35,0	2,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
E(50), I(50)	254	0,139	—	—	—	6,5	32,5	5,0	—	—	—	—	—	—
G — J	241	0,036	14,4	18,9	1,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F(50), I(50)	234	0,084	—	—	—	6,6	20,0	3,0	—	—	—	—	—	—
A — K	234	0,110	12,5	19,5	1,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
G — L	228	0,039	13,6	18,4	1,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H(100)	224	0	12,9	22,5	1,7	7,2	11,5	1,6	5,4	12,0	2,2	7,6	15,0	2,0
G — K	221	0,041	10,8	16,8	1,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
G(33), H(33), I(33)	219	0,040	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,6	18,5	1,9
A — K	216	0,127	10,8	21,0	1,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A(20), I(80)	211	0,254	7,2	47,0	6,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
G — L	208	0,053	10,1	17,4	1,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
E(50), J(50)	206	0,170	—	—	—	3,8	27,0	7,1	—	—	—	5,7	36,0	6,4
A — L	205	0,170	8,4	32,0	3,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A(16), I(84)	204	0,229	6,7	44,0	6,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F(33), H(33), J(33)	202	0,089	—	—	—	4,4	19,0	4,2	—	—	—	—	—	—
F(50), J(50)	193	0,111	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6,1	25,6	4,2
D(33), H(33), K(33)	182	0,214	5,5	40,0	7,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D — M	182	0,107	10,1	18,0	1,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
I(100)	179	0	8,1	12,4	1,5	4,6	8,6	1,9	3,9	8,5	2,2	5,0	11,0	2,2
D — M	173	0,114	6,6	17,7	2,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D — M	170	0,094	7,2	19,5	2,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D — M	157	0,097	5,5	16,6	3,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
I(50), J(50)	154	0,022	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,3	10,3	2,4
A — L	145	0,202	4,2	26,5	6,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D — M	143	0,078	4,8	11,3	2,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A — M	141	0,190	4,2	25,5	6,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D — M	139	0,075	4,8	11,5	2,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
J(100)	135	0	5,1	7,1	1,4	—	—	—	—	—	—	3,9	6,4	1,7
A — M	132	0,150	3,4	13,4	4,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D(25), K(75)	123	0,214	4,3	23,0	5,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F(25), K(75)	119	0,111	4,2	8,6	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
I(25), K(75)	111	0,036	4,4	8,8	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H — M	100	0,026	3,4	8,6	2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K(100)	98	0	3,4	4,9	1,4	—	—	—	—	—	—	1,6	5,1	3,1
L(100)	71,5	0	1,9	3,5	1,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M(100)	49	0	0,83	1,44	1,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Densidades

En la tabla I se dan los valores medios de las densidades de partícula y las densidades cristalinas. Asimismo se indican las densidades aparentes de los lechos fijos, tanto en estado aflojado como empaquetado, de los sólidos con un intervalo estrecho de tamaños, esto es: desviación típica nula.

Velocidades de fluidización

En la tabla II se recogen los valores correspondientes a las velocidades mínimas de fluidización y de completa fluidización, así como las velocidades reducidas para los cuatro productos estudiados. En ella se muestra, también, los principales datos granulométricos de las distintas fracciones.

Velocidades mínimas de fluidización

En la figura 2 se han representado las líneas de ajuste medio para los valores experimentales de V_{mf} frente a D_p obtenidos para el trióxido de uranio, eutéctico, corindón y fluorita. Con objeto de tener mayor claridad no se han representado los diferentes puntos de la tabla II. De esta forma, se deduce que la correlación existente entre ambas variables para los diferentes sólidos es:

$$\text{Trióxido de uranio} \quad V_{mf} = 166 \cdot D_p^{1.75} \quad [3]$$

$$\text{Eutéctico} \quad V_{mf} = 92,4 \cdot D_p^{1.77} \quad [4]$$

$$\text{Fluorita} \quad V_{mf} = 87,5 \cdot D_p^{1.82} \quad [5]$$

$$\text{Corindón} \quad V_{mf} = 114 \cdot D_p^{1.69} \quad [6]$$

Las expresiones [3], [4], [5] y [6] pueden reunirse en una más general, aceptando un valor medio para el exponente del diámetro medio de partícula:

$$V_{mf} = K_1 \cdot D_p^{1.76} \quad [7]$$

en la que K_1 es una constante que depende de las propiedades del gas y de la densidad del sólido, válida para cálculos fluidodinámicos (segunda columna de la tabla I). En efecto, una representación de los valores numéricos de las constantes de las expresiones [3] a [6], frente a las densidades del sólido, permite deducir:

$$K_1 = 34 \cdot \rho_s^{0.87} \quad [8]$$

Sustituyendo [8] en [7], y expresando las variables en el sistema Giorgi, se obtiene:

$$V'_{mf} = 159 \cdot \rho_s^{0.87} \cdot D_p^{1.76} \quad [9]$$

Velocidades reducidas

Alcanzada la velocidad mínima de fluidización, el lecho de sólidos no se pone en total movimiento. A cada aumento de la velocidad superficial, el lecho responde con una elevación de la porosidad hasta que llega un momento en el que las partículas comienzan a vibrar en las posiciones que ocupan y, posteriormente, a desplazarse de estos lugares. Sin embargo, esto no ocurre en todo el lecho simultáneamente, sino que, preferentemente, comienza por la parte superior, la cual fluidiza antes que la inferior, aumentando la zona fluidizada de

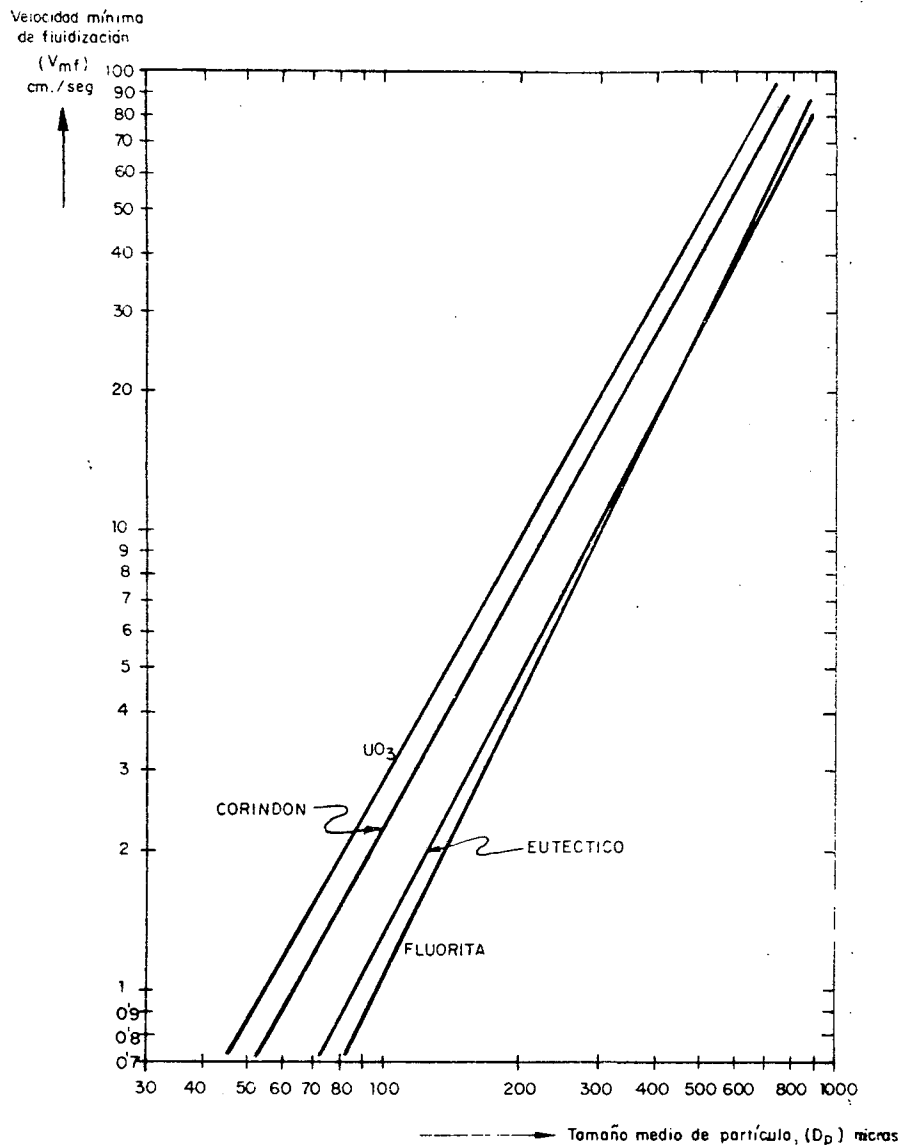


Figura 2

Velocidades mínimas de fluidización en función del tamaño medio de partícula.

arriba a abajo al incrementar la velocidad. De esta forma, la fluidización es cada vez mayor hasta que alcanza al producto que reposa sobre la placa, definiéndose a la velocidad correspondiente como velocidad mínima de completa fluidización (V_{mcf}).

Imagínese, a continuación, dos lechos de sólidos del mismo material y tamaño medio, pero en uno, el A, todas las partículas son iguales, mientras que en el otro, el B, las hay de dos tipos: grandes y pequeñas. Las velocidades mí-

nimas de fluidización (V_{mf}) serán iguales en ambos lechos, ya que esta variable depende del tamaño medio, a igualdad de otras propiedades y estado del lecho ("aflojado" o "empaquetado").

No ocurrirá lo mismo con las velocidades mínimas de completa fluidización (V_{mcf}). En efecto, a pesar de que las partículas pequeñas y grandes estén íntimamente mezcladas, aquéllas, por ser más ligeras, tenderán a ponerse en movimiento antes que éstas, las cuales experimentarán algo parecido a una incipiente estratificación, enriqueciéndose la parte inferior del lecho en partículas gruesas inmóviles. Como resultado, será preciso una velocidad superficial mayor en el lecho B que en el A para conseguir el completo movimiento o fluidización de todas las partículas que lo constituyen, ya que, lógicamente, las partículas del A son menores que las más grandes del B.

De acuerdo con las ideas anteriores, se puede establecer que la separación relativa entre V_{mcf} y V_{mf} aumentará con la heterogeneidad de la mezcla granulométrica. Dicha separación relativa puede expresarse en función de la velocidad reducida, V_R (expresión [1]).

En un anterior trabajo (7) se había señalado la relación existente, para el UO₃, entre V_R y una medida de la heterogeneidad de tamaños del sólido: la desviación típica (σ) de la granulometría. Con los datos hallados en este trabajo, dados en la tabla II para los cuatro productos ensayados con valores de $\sigma > 0$ y representados en la figura 3, se puede concluir que la correlación existente entre V_R y σ , se ajusta por la ecuación:

$$V_R = V_{R0} \cdot \exp 18 \sigma^a \quad [10]$$

en la que a tiene los siguientes valores:

Eutéctico y corindón	$a = 1,4$
Trióxido de uranio	$a = 1,7$

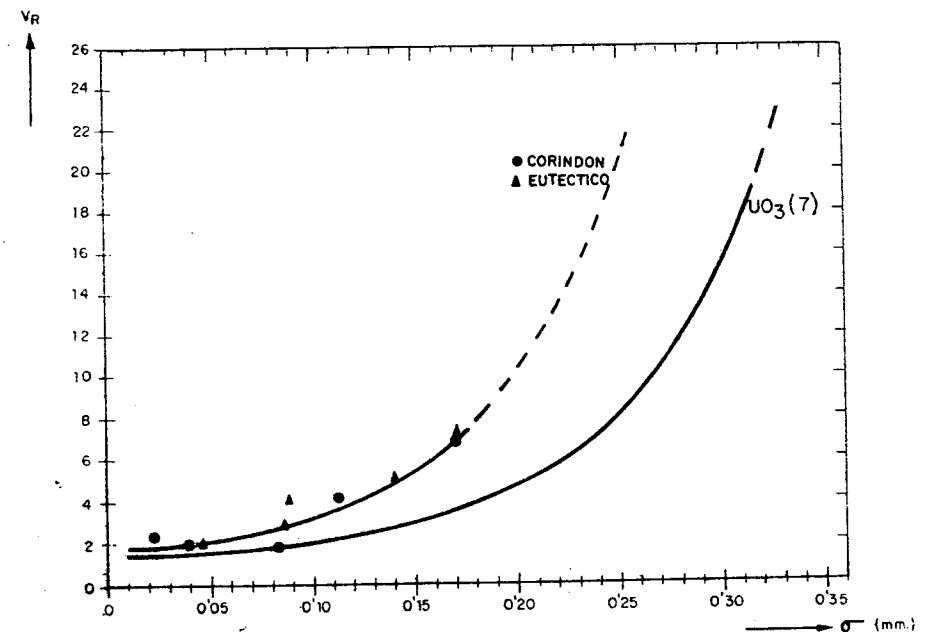


Figura 3

Velocidades reducidas vs. Desviaciones típicas.

Posiblemente el valor numérico de este exponente depende de ciertas propiedades del sólido, tal como la densidad de las partículas. Para comprobar este extremo sería necesario estudiar otros sólidos de características diferentes, lo cual no entra en los objetivos de este trabajo.

V_{Ro} es la velocidad reducida correspondiente a un intervalo muy estrecho de tamaños ($\sigma = 0$). Leva (8) anota que en estos casos V_{Ro} es función del diámetro de la partícula. En la figura 4 se muestran los datos obtenidos para el corindón, el eutéctico, la fluorita y el trióxido de uranio. Para una mayor claridad no se han representado los puntos experimentales (tabla II), los cuales, por otra parte, presentan cierta dispersión. En dicha figura se observa que al disminuir el tamaño de partícula aumenta la velocidad reducida, pudiéndose apreciar ciertas desviaciones con respecto a los datos del citado autor, imputables, tal vez, a la técnica operatoria o a la forma de definir las velocidades de fluidización.

El aumento de V_{Ro} al disminuir D_p seguramente es debido a que cuanto menor es el tamaño de las partículas, mayor es su tendencia a aglomerarse por aumentar las fuerzas superficiales.

La forma de realizar las determinaciones también afecta a los valores numéricos deducidos. Si se parte de lechos "empaquetados", las V_{mf} son inferiores a las obtenidas cuando el lecho está aflojado, ya que la porosidad en el primero es menor. Sin embargo, las V_{mf} siempre es la misma, independientemente del estado inicial del lecho. En la figura 5 se han representado las V_R para ambos tipos de lechos de UO_3 , apreciándose en ella el sensible aumento de dicha variable en el caso de lechos "empaquetados" con respecto a los "aflojados".

PROPIEDADES FLUIDODINÁMICAS DE LAS MEZCLAS DE SÓLIDOS

De los tres productos inertes al flúor ensayados (corindón, eutéctico y fluorita), el que mejores propiedades mostró para su posterior aplicación en los reactores de obtención de UF_6 , tanto desde el punto de vista de costes como el de facilidad de obtención, resistencia al desgaste, etc., fue el corindón. Por esta razón, los estudios fluidodinámicos de mezclas se concretaron al sistema corindón-trióxido de uranio.

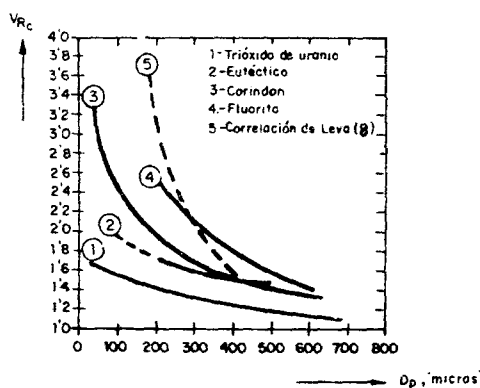


Figura 4

Velocidades reducidas vs. Tamaños, para fracciones con $\sigma = 0$. (Lecho inicial "aflojado".)

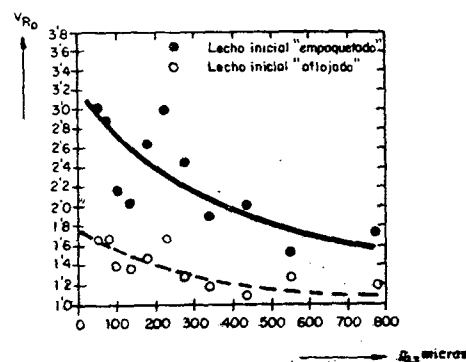


Figura 5

Trióxido de uranio. Velocidades reducidas en función del tamaño de partícula y del estado del lecho fijo. ($\sigma = 0$.)

TABLA III
Mezclas corindón o eutéctico- UO_3 . Composiciones y características fluidodinámicas

Ensayo	COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA		CARACTERÍSTICAS FLUIDODINÁMICAS				
	Compuesto	Intervalos de tamaños (micras)	Diámetro medio de las partículas (micras)	% en peso UO_3	De los compuestos individuales (tabla II)		
					V_{mf} (1)	V_{mf} (1)	V_R
1	Al_2O_3 UO_3	— 380 + 300 — 200 + 160	338 179	50	23,1 8,1	11,9	1,6
2	Al_2O_3 UO_3	— 380 + 300 — 114 + 85	338 98	50	23,1 3,4	9,7	1,9
3	Al_2O_3 UO_3	— 380 + 300 — 85 + 60	338 71	50	23,1 1,9	7,9	2,3
4	Al_2O_3 UO_3	— 300 + 250 — 200 + 160	274 179	50	15,6 8,1	12,3	1,3
5	Al_2O_3 UO_3	— 250 + 200 — 200 + 160	224 179	15	7,6 8,1	9,5	1,5
6	Al_2O_3 UO_3	— 250 + 200 — 200 + 160	224 179	25	7,6 8,1	10,8	1,5
7	Al_2O_3 UO_3	— 250 + 200 — 200 + 160	224 179	50	7,6 8,1	9,5	1,4
8	Al_2O_3 UO_3	— 250 + 200 — 200 + 160	224 179	70	7,6 8,1	9,0	1,5
9	Al_2O_3 UO_3	— 250 + 200 — 160 + 114	224 135	30	7,6 5,1	9,5	1,3
10	Al_2O_3 UO_3	— 250 + 200 — 114 + 85	224 98	14	7,6 3,4	10,5	1,3
11	Al_2O_3 UO_3	— 250 + 200 — 85 + 60	224 71	6	7,6 1,9	10,8	1,4
12	Al_2O_3 UO_3	— 200 + 160 — 200 + 160	179 179	50	5,0 8,1	7,3	1,6
13	Al_2O_3 UO_3	— 300 + 250 — 250 + 200 ⁽²⁾ — 200 + 160	219 179	50	9,6 8,1	9,0	1,5
14	Eutéctico UO_3	— 250 + 200 — 200 + 160	224 179	50	7,2 8,1	8,5	1,5

(1) cm/seg.—(2) 33 % de cada una de las fracciones.

Densidades aparentes de los lechos fijos

En la figura 6 se muestra el resultado para mezclas de UO_3 (— 114 + 85 micras) y corindón (— 200 + 160 micras), con lechos "aflojados" y "empaquetados". En ella se observa que prácticamente existe linealidad para composiciones intermedias al 100 % de ambos productos.

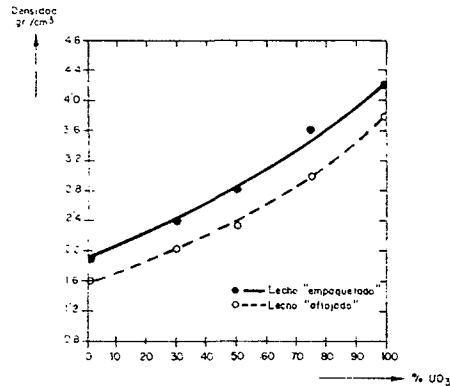


Figura 6

Mezclas de UO_3 -corindón. Densidades aparentes de lechos fijos en función de la composición. UO_3 : — 114 + 85 micras. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$: — 200 + 160 micras.

Velocidades de fluidización

Se prepararon 13 mezclas de UO_3 con corindón, a distintos porcentajes, con fracciones de intervalo estrecho de tamaño, de granulometría bien definida (tabla III). El ensayo número 14 se realizó con eutéctico, con el fin de comprobar el efecto de un material de densidad y forma diferentes.

En la citada tabla se muestran los resultados de la fluidización de estas mezclas. En ella se ha tomado como velocidad mínima de completa fluidización a aquella a la cual todo el lecho se pone en movimiento, independientemente que se aprecie en la parte inferior un enriquecimiento en uno de los sólidos. Esta segregación fue observada al realizar las determinaciones, comprobándose que, a pesar de estar todo el lecho plenamente fluidizado, existía una tendencia en las partículas de uno de los componentes de la mezcla, generalmente el más pesado, a mantenerse en movimiento en la zona del lecho más próxima a la placa. El estudio de este tipo de segregación en los sólidos ensayados será objeto de un posterior artículo.

Los valores experimentales muestran que las velocidades mínimas de fluidización de las mezclas se hallan comprendidas entre las de cada uno de sus componentes individuales. Además, dichas velocidades son proporcionales, aproximadamente, al contenido de cada componente, pudiéndose escribir:

$$(V_{mf})_{mezcla} = V_{mf_A} \cdot x + V_{mf_B} \cdot (1 - x) \quad [11]$$

en la que el subíndice A se aplica al inerte y el B al UO_3 .

Con las expresiones [3], [4], [5], [6] y [11], el cálculo teórico de las velocidades mínimas de fluidización de una mezcla es inmediato. Comparando los valores experimentales y los teóricos para cada ensayo, obtenidos con las ecuaciones anteriores, se tiene que el error relativo medio, con un límite de confianza del 95 %, es entre el 5 y el 17 %, referido al valor teórico.

Para las velocidades mínimas de completa fluidización se puede aplicar una expresión análoga a la [11]:

$$(V_{mcf})_{mezcla} = V_{mcf_A} \cdot x + V_{mcf_B} \cdot (1 - x) \quad [12]$$

De esta forma, se puede calcular la V_{mcf} de una mezcla de dos productos distintos, con solo un análisis de tamizado, que permite deducir D_p y σ . En efecto, con los tamaños medios de partícula (D_p) se calculan, con ayuda de las correspondientes ecuaciones [3], [4], [5] y [6] o la general [9], las velocidades mínimas de fluidización de cada componente. A continuación se calculan las velocidades reducidas de cada producto aplicando a la expresión [10] las desviaciones típicas (σ) de la correspondiente distribución granulométrica de cada sólido. Para ello, se aplica, en la ecuación [10], el valor del exponente α respectivo, así como el coeficiente V_{Ro} adecuado a cada tamaño medio de partícula (figura 4). Mediante la expresión [1], el cálculo de las velocidades mínimas de completa fluidización (V_{mcf_A} y V_{mcf_B}) es inmediato. La sustitución de estos valores en [12], junto con el porcentaje de cada componente, permite establecer V_{mcf} para la mezcla.

La aplicación del método descrito es satisfactoria, ya que al comparar los resultados experimentales con los calculados por dicho método el error medio de la determinación, con un límite de confianza del 95 %, es del 8 %.

NOTACIONES

- D_p = Tamaño medio de las partículas definido por un análisis de tamizado, $D_p = 100 / \sum (x_i / d_{pi})$, mm.
- D'_p = Idem, m.
- d_{pi} = Media geométrica de la luz de malla de dos tamices consecutivos, mm.
- K_1 = Constante de proporcionalidad (ec. 7) en las unidades correspondientes.
- L = Altura de un lecho fijo de sólidos, cm.
- Δp = Pérdida de carga que experimenta un gas al atravesar un lecho fijo de sólidos, gr/cm².
- S = Sección transversal del lecho de sólidos, cm².
- V_R = Velocidad reducida de fluidización (ec. 1), adimensional.
- V_{Ro} = Idem, correspondiente a un intervalo muy estrecho de tamaños ($\sigma = 0$).
- V_{mf} = Velocidad superficial del gas en el punto mínimo de fluidización, cm/seg.
- V'_{mf} = Idem, m/seg.
- V_{mcf} = Velocidad superficial del gas en el punto en el que comienza a fluidizar todo el lecho de sólido, cm/seg.
- W = Peso de sólidos de un lecho, gr.
- x = Fracción, en peso, del inerte en la mezcla de sólidos, adimensional.
- x_i = Porcentaje, en peso, de producto retenido entre dos tamices consecutivos, adimensional.

Letras griegas

- ϵ = Porosidad de un lecho fijo de sólidos, adimensional.
- ρ_s = Densidad fluidodinámica de las partículas del sólido, $\rho_s = W / [SL_1(1 - \epsilon)]$, gr/cm³.
- ρ'_s = Idem, kg/m³.
- σ = Desviación típica de una distribución granulométrica, $\sigma = \sqrt{[\sum x_i (d_{pi} - D_p)^2] / 99}$, mm.

Subíndices

- 1 = Lecho "empaquetado".
- 2 = Lecho "aflojado".
- A = Sólido inerte.
- B = Trióxido de uranio.

FLUIDIZACION DE MEZCLAS DE SOLIDOS DE DISTINTAS CARACTERISTICAS

II. Segregación en lechos totalmente fluidizados

POR

J. CORELLA (*) y A. R. OTERO

Junta de Energía Nuclear. División de Materiales. Madrid
Recibido el 22 de diciembre de 1970

SUMMARY

When a mixture of two solids of different densities is fluidized, in a bed with a porous plate distributor, a partial segregation of the heavier solid appears in the bed bottom. The segregated volume per mass unit of solids in the bed is a function of the gas velocity and reaches a maximum at velocities between the minimum fluidization velocity and the complete fluidization velocity. The segregation depends upon the density, grain size and weight fraction of the solids. A correlation of the degree of segregation with these variables is presented. The criteria for achieving homogeneity are discussed and applied to several practical cases.

INTRODUCCIÓN

En algunas reacciones sólido-gas en lecho fluidizado es necesaria la adición de un segundo sólido, inerte, que debe reunir ciertas propiedades para llevar a cabo satisfactoriamente la reacción.

Cuando se fluidizan mezclas de sólidos de distinta densidad, como la compuesta por UO_3 y $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (6,9 y 3,5 grs/cc, respectivamente), se observa que las partículas más pesadas tienden a acumularse en la parte inferior de la columna, apareciendo dos zonas claramente diferenciables.

Este estudio determina las variables que influyen en la segregación y la forma en que se deben realizar las mezclas (granulometría, porcentaje, etc.) para conseguir que el lecho fluidizado sea totalmente homogéneo.

Algunos autores (1-9) han encontrado este fenómeno al estudiar fluidodinámicamente mezclas de sólidos de distinta densidad. Así, Leva (2-4) lo observa en mezclas de arena y magnetita de densidades cristalinas 2,6 y 5,0 gr/cc, respectivamente, y encuentra que la segregación es máxima a velocidades intermedias entre las de completa fluidización de cada uno de los componentes. Considera como segregación la altura de la zona de producto separada en la

(*) Dirección actual: Facultad de Ciencias, Departamento de Química Técnica, Universidad de Madrid, España.

(1) HEREMANS, R. y SCHMETS; Report BLG-287, diciembre 1961.

(2) LEVA, M., WEINTRAUB, M. y GRUMMER, M.; *U. S. Bur. Mines Bull.*, **504**, 78-79 (1951).

(3) LEVA, M.; "Fluidization", Cap. 4, pág. 103, Mc Graw Hill Co., New York, 1959.

(4) LEVA, M.; *Symposium on interaction between fluids and particles*. London, 1962. páginas 143-151.

(5) THOMAS y GREY; *Brit. Chem. Eng.*, **6** (3), 177 (1961).

(6) NICHOLSON; *Chem. Eng. Progr. Symp. Ser.*, **62** (62), 83 (1966).

(7) CAMPBELL, H. y BAUER, W. C.; *Chem. Eng.*, **73** (septiembre 16), 179 (1966).

(8) CAPES, C. E. y SUTHERLAND, J. P.; *Ind. Eng. Chem. Process Desing and Develop.*, **5**, 330 (1966).

(9) OIGENBLIKA y col.; *Khim. Prom. (URSS)*, **44**, 615 (1968).

parte inferior del lecho y supone que la cuantía de tal fenómeno depende de la composición de la mezcla.

Es importante la comprensión y resolución del fenómeno de la segregación, ya que si el sólido reactivo se separa en la parte inferior del lecho se tendrá una zona en que la generación de calor por unidad de volumen (en reacciones muy exotérmicas) será muy fuerte, con peligro de sinterización, obstrucción de la placa, etc. Además, cuando el reactor de lecho fluidizado se utiliza para la obtención de datos cinéticos extrayendo muestras del sólido periódicamente (10), si el reactor no es totalmente homogéneo, se falsearán los resultados.

DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE LA SEGREGACIÓN

Al fluidizar con aire en un lecho con placa porosa mezclas de UO_3 y $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ previamente homogeneizadas, se pudo comprobar que al aumentar progresivamente el caudal de aire y comenzar la fluidización (V_{mf}), las partículas tendían a separarse, yéndose las más densas (UO_3) hacia el fondo, quedando parte de ellas inmóviles y parte en movimiento. Al elevar la velocidad lineal, la agitación de las partículas aumentaba a la vez que la zona en la que se producía la segregación crecía en altura y así se llegaba hasta una altura máxima, disminuyendo con posteriores aumentos de velocidad lineal. La velocidad mínima de completa fluidización (V_{mcf}) se alcanzaba aún con zonas apreciables de sólidos segregados, si bien ya en total movimiento (figura 1).

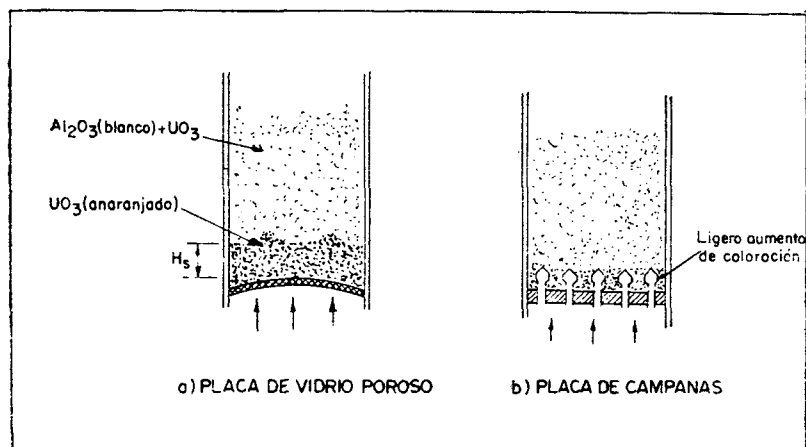


Figura 1
Segregación en lechos fluidizados.

En la figura 2 se muestra la variación de la altura de UO_3 segregado en función de la velocidad de paso de gas para algunos de los ensayos realizados. En línea de trazos se ha representado el intervalo comprendido entre la V_{mf} y V_{mcf} para cada mezcla. Todos los puntos experimentales de línea continua corresponden a lechos totalmente fluidizados.

La segregación podía seguirse gracias a la diferentes coloración del UO_3 (anarillo anaranjado) y del inerte (blanco). La altura de segregación se estableció

(10) CORELLA, J.; Tesis Doctoral. Universidad de Madrid. Julio 1969.

como la distancia existente entre la placa difusora y la interfase que separaba a ambas zonas de colores.

La segregación ocupaba toda la sección transversal del lecho, lo que se pudo comprobar interrumpiendo bruscamente el aire de fluidización y separando, por succión, la parte superior de la inferior. Esta última estaba constituida en casi su totalidad por partículas de UO_3 .

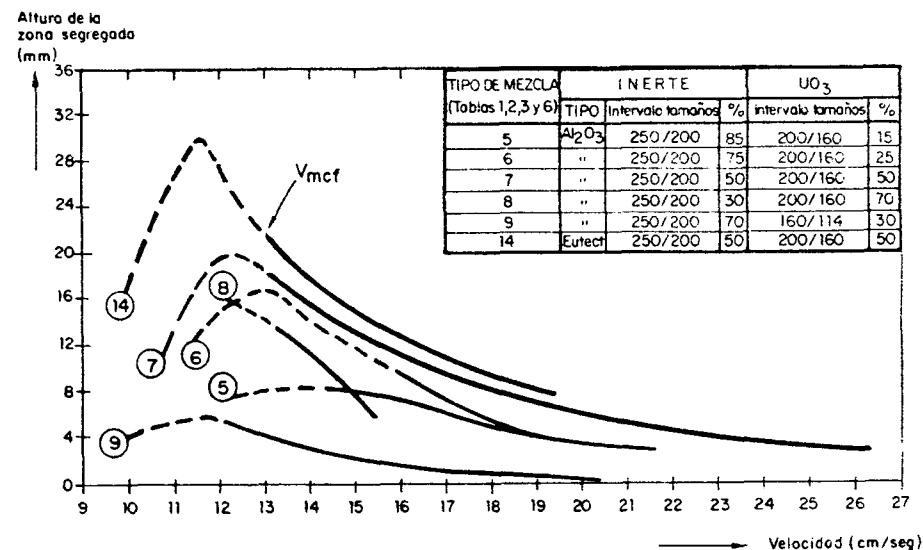


Figura 2
Mezclas de UO_3 -inerte. Alturas de trióxido segregado vs. Velocidad del gas fluidizante (placa porosa).

ESTUDIO DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN A LA SEGREGACIÓN

Considerando que se trata de lechos totalmente fluidizados, se escogió como variable dependiente la altura (H_s) de la zona de producto segregado a la velocidad mínima de completa fluidización, parámetro de fácil referencia y de gran interés práctico por ser la mínima velocidad a la cual todo el sólido está en movimiento.

Para comparar los ensayos realizados con lechos de distinta sección es necesario tener en cuenta los volúmenes aparentes de zona segregada (SH_s). Como la cuantía de la segregación es proporcional al peso del lecho, para la misma composición de éste, el parámetro de comparación debe ser el volumen segregado por unidad de peso de sólido cargado al lecho (SH_s/Q).

Es evidente que la segregación puede depender de las propiedades del sólido (forma, densidad y tamaño de las partículas y porcentaje de cada uno de los componentes) y de las características del lecho [placa difusora y forma del reactor (4,9)]. En este trabajo se consideran estos factores, excepto la forma del lecho, ya que los conocimientos obtenidos iban a ser aplicados directamente a un reactor cilíndrico.

TIPO DE PLACA DIFUSORA

La forma en que el gas entra en el lecho puede afectar al movimiento de las partículas en la base y, por tanto, a la segregación. Para comprobarlo se

ensayaron dos placas de características muy diferentes (figura 1): placa porosa de vidrio sinterizado y placa distribuidora del tipo de campanas de barboso, con las siguientes características:

Diámetro de la columna, cm	6,9
Diámetro exterior de la campana, mm	8
Taladros por campana	8
Diámetro del taladro, mm	0,8
Area ocupada por las campanas, %	40,4

En la tabla I se resumen los resultados experimentales. De ellos se deduce que con una placa de campanas no hay segregación definida. Sólo se nota únicamente un ligero aumento de la tonalidad amarillenta que desaparece rápidamente al aumentar la velocidad lineal.

La inexistencia de segregación en placa de campanas a velocidades del gas correspondientes a las V_{mcf} puede deberse a dos causas diferentes:

1. La sección libre para el paso del gas, al nivel de la placa, es 1,65 veces menor en la placa de campanas que en el caso de la placa porosa, por lo que la velocidad lineal, en esa región, aumentará por el mismo factor. Así, en el ensayo 7, cuando la velocidad en el lecho es de 17,3 cm/seg, en la base de las campanas se tiene 28,6 cm/seg, velocidad a la cual la segregación es muy pequeña cuando se utiliza placa porosa (figura 2).
2. En la placa de campanas la salida del aire es horizontal. Además, en cada orificio se alcanzan velocidades muy altas, creándose una gran turbulencia y agitación que facilita la mezcla del sólido, dificultándose su segregación.

El estudio de la segregación se continuó con las placas porosas por ser en estas donde era más manifiesta y claramente medible.

FORMA DEL COMPUESTO INERTE

Para estudiar si la segregación aparecida en las mezclas $UO_3-\alpha-Al_2O_3$ era debida a la forma del compuesto inerte, se realizó un ensayo con UO_3 y eutéctico de CaF_2-MgF_2 (11). Este eutéctico tiene una densidad semejante a la del corindón (3,0 y 3,5 grs/cc, respectivamente), pero la forma de sus partículas es muy diferente. Las partículas de Al_2O_3 son filiformes e irregulares, y las del eutéctico, debido a su preparación por molienda en un molino oscilante de discos, son redondeadas.

Para que fueran comparables los resultados de estas mezclas se prepararon con la misma granulometría del UO_3 (— 200 + 160 micras) y del inerte (— 250 + 200 micras).

En la tabla II se resumen los datos de las dos mezclas comparadas, y en la figura 2 (ensayos 7 y 14) se muestran gráficamente los valores de las alturas segregadas en función de la velocidad lineal; a partir de ellos se puede deducir que el factor de forma apenas afecta a la segregación. En efecto, si la mezcla UO_3 -eutéctico tiene algo más de segregación, se puede deber a que éste tiene una densidad algo menor que el corindón. En cambio, si el factor de forma interviniera en grado apreciable, la mezcla con Al_2O_3 determinaría una mayor segregación por ser éste más fácilmente arrastrable por el gas al tener sus partículas mayor relación superficie/volumen.

(11) PEDREGAL, J. D. y APARICIO, A. E.; *Science of ceramics. Academic Press-Londres*, 1, 305 (1961).

TABLA I
Efecto del tipo de placa en la segregación en mezclas $\alpha-Al_2O_3$ y UO_3

Tipo de mezcla	Intervalo de tamaños (micras)	Diámetro medio (micras)	TRIÓXIDO DE URANIO		PLACA POROSA			PLACA DE CAMPANAS		
			Granulometría	% peso	Velocidades mínimas (cm/seg)		Altura segregada H_s (cm)	Velocidades mínimas (cm/seg)		Altura segregada H_s (cm)
					Fluidización (Vmf)	Completa fluidización (V _{mcf})		Fluidización (Vmf)	Completa fluidización (V _{mcf})	
6	250/200	224	Intervalo de tamaños (micras)	25	10,8	15,8	1,0	8,9	17,9	0
7	250/200	224	200/160	50	9,5	13,0	1,8	8,6	17,3	0
8	250/200	224	200/160	70	9,0	13,2	1,4	7,4	14,0	0
13	300/160 (1)	219	200/160	50	9,0	13,5	1,8	8,1	14,5	0
17	250/200	224	200/160	60	—	—	—	8,6	17,3	0
18	250/200	179	160/114	50	—	—	—	4,9	13,5	0
19	200/160	179	60/40	50	—	—	—	5,5	11,0	0

(1) Mezcla triple {
--- 300 + 250 (33 %)
--- 250 + 200 (33 %)
--- 200 + 160 (33 %)}

TABLA II

Segregación de mezclas de inerte y UO_3 . Efecto de la forma del inerte

UO_3 : — 200 + 160 micras
Inerte : — 250 + 200 micras
% UO_3 : 50

Tipo de mezcla	Inerte	Peso total cargado Q (kg)	Sección del lecho S (cm ²)	Altura de segregación H _s (cm)
7	α - Al_2O_3	1,500	42,9	1,8
14	Eutéctico	1,500	42,9	2,1

Ante estos resultados, y debido a las más adecuadas propiedades del corindón para su empleo en la producción de UF_6 , los estudios de segregación se continuaron con mezclas de UO_3 y corindón, únicamente.

PORCENTAJE DEL SÓLIDO MÁS DENSO

Se estudió la influencia de esta variable manteniendo constantes los tamaños de partícula de ambos componentes: UO_3 (— 200 + 160 micras) y Al_2O_3 (— 250 + 200 micras). En la tabla III y en figura 3 se muestra la dependencia

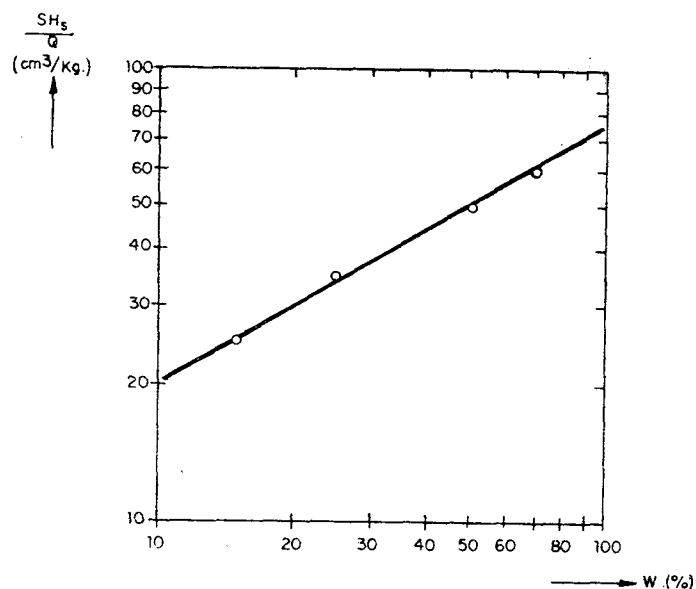


Figura 3

Influencia del porcentaje de UO_3 en la segregación.

de la segregación con el porcentaje de UO_3 . Ambas variables pueden ser ligadas mediante la expresión:

$$\frac{SH_s}{Q} = 5,9 \cdot W^{0,55}$$

II

Esta expresión indica que la segregación aumenta con el porcentaje de UO_3 , pero no en forma lineal. Con dicha expresión, al referir la cantidad segregada por unidad de peso de UO_3 cargado, dividiendo ambos miembros por $W/100$, se obtiene que la cantidad "relativa" de UO_3 segregado disminuye al aumentar el contenido inicial de las partículas más pesadas ($QW/100$) en la mezcla. Una posible explicación de este comportamiento podría encontrarse al considerar las densidades aparentes de los lechos fluidizados; en el caso de una mezcla inicialmente homogénea y rica en UO_3 , la densidad del lecho es más parecida a la del componente más denso (UO_3), por lo que la segregación de éste no es tan fácil.

TABLA III

Segregación de mezclas de inerte y UO_3 . Efecto del contenido de UO_3

UO_3 : — 200 + 160 micras
 α - Al_2O_3 : — 250 + 200 micras
placa : Porosa

Tipo de mezcla	Contenido en UO_3 W (%)	Peso total cargado Q (kg)	Sección del lecho S (cm ²)	Altura segregada H _s (cm)	SH_s/Q (cm ³ /kg)
5	15	1.000	32,2	0,8	25,8
6	25	1.200	42,9	1,0	35,7
7	50	1.500	42,9	1,8	51,4
8	70	1.000	42,9	1,4	60,0

TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS

Ensayos realizados con el mismo porcentaje de UO_3 (50 %) y diversos tamaños de éste y del Al_2O_3 permiten estudiar el efecto de esta variable. En la tabla IV y en la figura 4 se muestran los resultados experimentales.

TABLA IV

Segregación de mezclas de inerte y UO_3 . Efecto del tamaño de partícula

Placa : Porosa
Porcentaje de UO_3 : 50 %

Tipo de mezcla	Tamaño medio de partícula (micras)		Q (kg)	S (cm ²)	H _s (cm)	SH_s/Q (cm ³ /kg)	$\frac{m_i}{m_{UO_3}}$
	UO_3	Al_2O_3					
1	179	338	1.200	32,2	0,5	13,5	3,4
2	98	338	1.140	32,2	0	0,0	20,6
3	71	338	1.200	32,2	0	0,0	54,7
15	224	179	1.200	32,2	3,1	83,2	0,26
12	179	179	1.500	42,9	2,7	77,2	0,51
16	98	179	1.160	32,2	0,1	2,8	3,1
4	179	274	1.500	42,9	1,2	34,3	1,8
7	179	224	1.500	42,9	1,8	51,4	1,0
13	179	219	1.500	42,9	1,8	51,4	0,92

CORRELACIÓN PROPUESTA

La ecuación [1] se obtuvo con mezclas de UO_3 y Al_2O_3 en las que no se varió el tamaño de la partícula. A partir de ella, y en forma general, se puede escribir:

$$\frac{\text{SH}_s}{\text{QW}^{0.55}} = J \quad [5]$$

en la que J es una constante que depende de la densidad y tamaño de los sólidos o, según el criterio adoptado, de la relación de los pesos de las partículas.

La dependencia de J con la relación m_1/m_{UO_3} se puede deducir de la expresión [2], teniendo en cuenta que en aquel caso W era el 50 %; de esta forma, se obtiene:

$$\frac{\text{SH}_s}{\text{QW}^{0.55}} = 5,8 - 8,4 \log \frac{m_1}{m_{\text{UO}_3}} \quad \text{para } W = 50 \% \quad [6]$$

De la representación de $\text{SH}_s/\text{QW}^{0.55}$ frente a m_1/m_{UO_3} en escala semilogarítmica, para todos los ensayos realizados se obtiene la figura 5, comprobándose que la ecuación [6] es general para cualquier porcentaje de UO_3 .

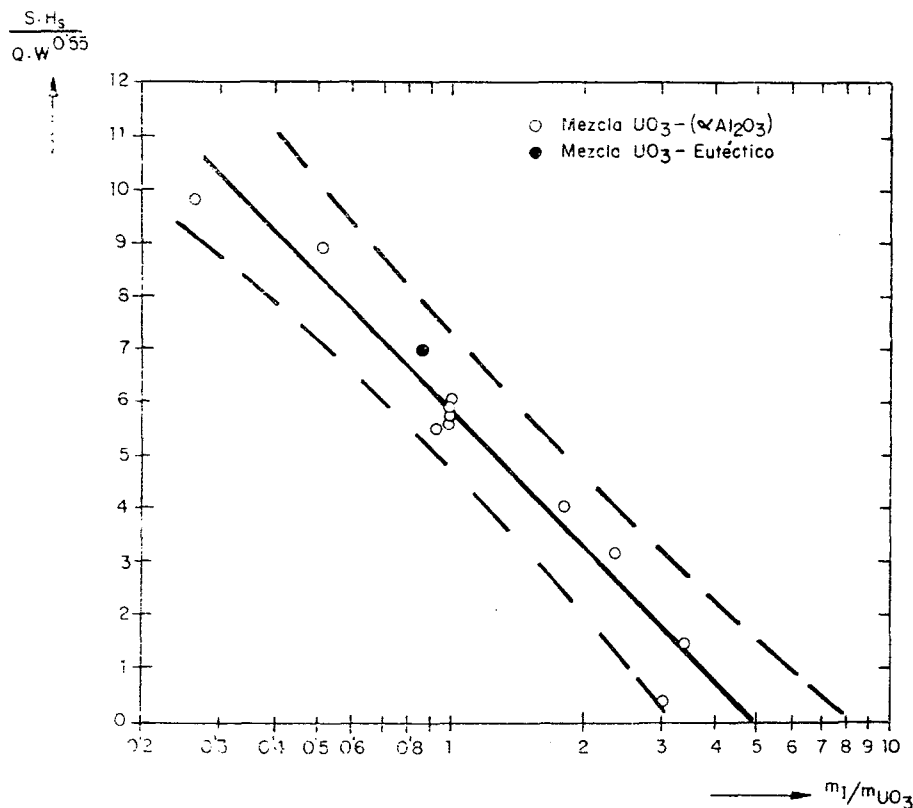


Figura 5

Factor de segregación en función de la relación de pesos de las partículas individuales

El coeficiente de correlación es 0,975, superior a 0,576, que es el tabulado para 12 ensayos (otros cuatro de ellos no mostraron segregación), con un nivel de seguridad del 95 %.

De [6] se deduce que para valores de m_1/m_{UO_3} superiores a 4,9 no hay segregación, lo que se confirma con el resultado de los ensayos 2, 3, 10 y 11. En el caso concreto de las mezclas de UO_3 y corindón ello equivale a establecer que la segregación desaparece cuando la relación de diámetros inerte/trióxido es igual o mayor de 2,1.

En la figura 5 se observa que en una mezcla de dos sólidos con partículas de igual peso ($m_1/m_{\text{UO}_3} = 1$) se segregan las más densas (UO_3) e incluso cuando la relación de pesos es superior a la unidad. Esto se debe a que para igualdad de pesos, las menos densas presentan mayor diámetro y superficie externa y, por tanto, mayor rozamiento al gas, por lo que son arrastradas más fácilmente a la parte superior del lecho.

La máxima segregación posible será cuando todo el producto más pesado haya segregado. Si en los anteriores ensayos la zona segregada estaba constituida únicamente por UO_3 , lo cual en primera aproximación puede admitirse, se tendrá que, en cada caso, la segregación máxima será:

$$(\text{SH}_s)_{\text{max}} = \frac{Q \cdot W}{100 \cdot \rho'_{\text{UO}_3}} \quad [7]$$

Sustituyendo [7] en [6] y tomando para la densidad aparente del UO_3 en lechos fluidizados el valor medio de $0,0035 \text{ kg/cm}^3$ (12), se obtiene:

$$\log \frac{m_1}{m_{\text{UO}_3}} = 0,69 - 0,34 W^{0.45} \quad [8]$$

Esta ecuación liga la relación de pesos de las partículas con los porcentajes de UO_3 en una mezcla para que todo este último componente se encuentre segregado en el punto de velocidad mínima de completa fluidización (V_{mcf}). En la figura 6 se ha trazado gráficamente la anterior expresión; en ella, puntos experimentales por debajo de la curva indican segregación total.

De la ecuación [6] se deduce que la segregación es nula en V_{mcf} , para cualquier porcentaje de UO_3 , cuando $m_1/m_{\text{UO}_3} = 4,9$ (línea horizontal de la figura 6, con lo que dicha figura se puede dividir en tres zonas: segregación total, parcial y nula del UO_3).

En la zona intermedia se pueden trazar líneas de igual porcentaje de UO_3 segregado referido al UO_3 total cargado:

$$Y = \frac{\text{peso de } \text{UO}_3 \text{ segregado}}{\text{peso de } \text{UO}_3 \text{ cargado}} \cdot 100 = \frac{\text{SH}_s \cdot \rho'_{\text{UO}_3}}{Q \cdot W} \cdot 10 \quad [9]$$

sustituyendo [9] en [6] se obtiene:

$$Y = \frac{100}{W^{0.45}} \left(2,04 - 2,93 \log \frac{m_1}{m_{\text{UO}_3}} \right) \quad [10]$$

De esta forma, la aplicación práctica es inmediata: por ejemplo, si se mezcla un 50 % de corindón de $-200 + 160$ micras con trióxido de $-160 + 114$

micras, la relación de pesos de ambas partículas es de 2,9, deduciéndose de la figura 6 que, en el punto de velocidad mínima de completa fluidización, aproximadamente el 12 % del UO_3 estará segregado en la parte inferior del lecho.

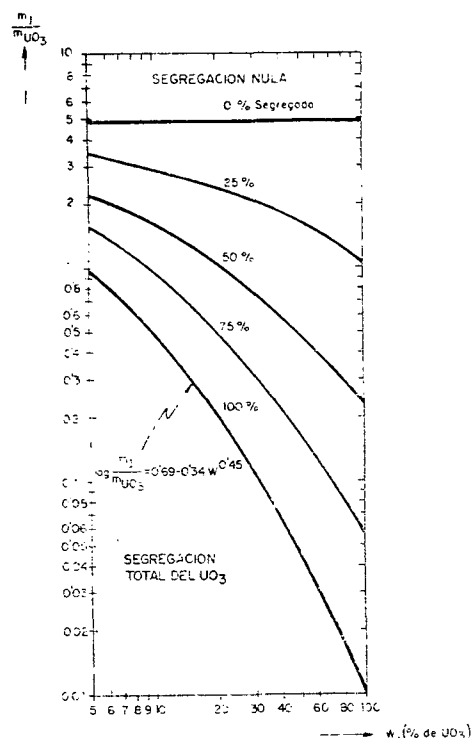


Figura 6
Mezclas UO_3 -corindón. Segregación relativa del UO_3 en función de su contenido y de la relación de pesos de las partículas individuales.

APLICACIONES

La ecuación [6] ha mostrado su validez para su aplicación a mezclas de productos heterogéneos fluidizados con placa porosa y en las que el contenido de partículas más pesadas varía entre el 5 y el 95 % en peso.

Los resultados anteriores dan los criterios necesarios para realizar las mezclas UF_4 - Al_2O_3 de forma que el lecho fluidizado sea totalmente homogéneo, evitándose los principales problemas para abordar el estudio en lecho fluidizado de la cinética de la reacción del F_2 con UF_4 (10). Pero, además, este estudio ha encontrado una posterior y total aplicación en dos situaciones que a continuación se reseñan: a) en la separación o desmezclado de sólidos, y b) en la compartimentación del lecho fluidizado.

a) La piedra pómez se utiliza como soporte de catalizadores. Este sólido (densidad fluidodinámica 1,0 grs/cc) sólo se ha encontrado en el mercado impurificado con sílice de mayor densidad. Necesitando eliminar esta impureza, el mejor método ha sido fluidizar dicha mezcla, con un intervalo muy estrecho de tamaños, a velocidades ligeramente inferiores a la V_{mcf} . A tales velocidades, según la figura 2, la segregación es máxima. Alimentando continuamente

la piedra pómez con impurezas a un lecho fluidizado con dos rebosaderos (uno, el inferior, cerca de la placa difusora del gas), por el superior se obtenía el material de menor densidad (piedra pómez) totalmente puro, y por el inferior, las impurezas de sílice.

b) Cuando se quiere igualar el tiempo de residencia de las partículas del sólido en un lecho fluidizado se puede compartimentar éste mediante tabiques con taladros para permitir el paso del sólido de un lecho a otro. Si en la reacción el sólido cambia de densidad, se producirá una deshomogeneización, verticalmente, en el lecho. Por tanto, la altura a que se realice el orificio de paso del sólido será crítica.

Esto se ha comprobado determinando las curvas $F(\theta)$ de distribución de edades a la salida de un reactor con 4 compartimentos (13). Para ello se utilizaban dos sólidos, corindón (blanco) y magnetita (negra) de trazador, de densidades fluidodinámicas 3,5 y 4,7 grs/cc, respectivamente. La forma de las curvas $F(\theta)$ estaba grandemente influenciada por la posición del taladro de paso de sólido de un lecho a otro.

NOMENCLATURA

D_p	Tamaño medio de las partículas definido por un análisis de tamizado, mm.
D_i, D_{UO_3}	Idem, de inerte y de trióxido de uranio, mm.
D_o, D_t	Idem, de tetrafluoruro de uranio, inicial y al cabo de un tiempo t , mm.
H_s	Altura segregada en el punto de velocidad mínima de completa fluidización, cm.
J	Factor dependiente del peso de las partículas de inerte y trióxido de uranio en la segregación de estas últimas.
m	Peso de una partícula, grs.
m_i, m_{UO_3}	Idem de inerte y de trióxido de uranio, grs.
m_o, m_t	Idem, de tetrafluoruro de uranio, inicial y al cabo de un tiempo t , grs.
Q	Peso de una mezcla de dos productos cargada en el lecho, kg.
S	Sección transversal del lecho, cm^2 .
V_{mf}	Velocidad del gas en el punto de velocidad mínima de fluidización, cm seg.
V_{mcf}	Velocidad del gas en el punto de velocidad mínima de completa fluidización, cm/seg.
W	Porcentaje de UO_3 en la mezcla, %.
Y	Porcentaje de UO_3 segregado referido al UO_3 cargado, %.
$\rho_i, \rho_{\text{UO}_3}$	Densidad "fluidodinámica" de las partículas del inerte y del trióxido de uranio, grs/ cm^3 .
ρ'_{UO_3}	Densidad aparente de un lecho fluidizado de UO_3 en el punto de velocidad mínima de completa fluidización, kg/cm^3 .
ρ''_{UO_3}	Idem, grs/ cm^3 .