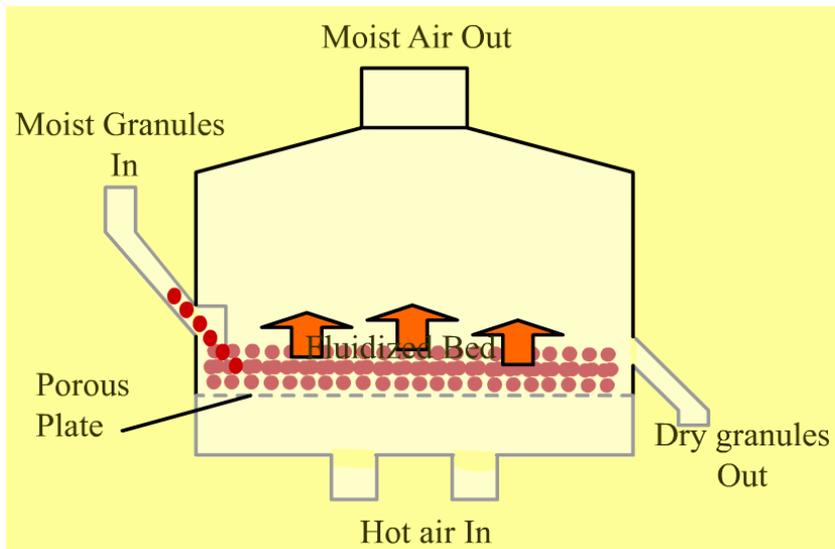


# Operaciones Unitarias 1

## Tecnología de los sistemas particulados

### ❖ Operaciones en Lechos

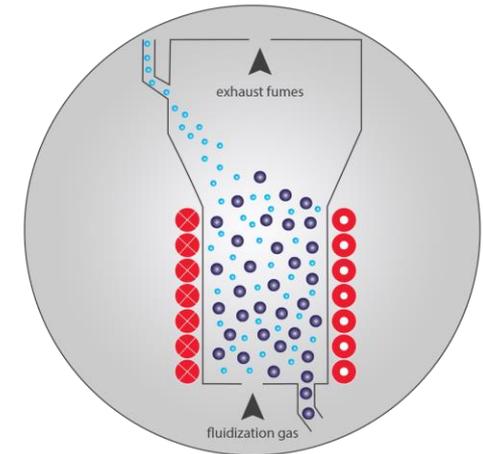
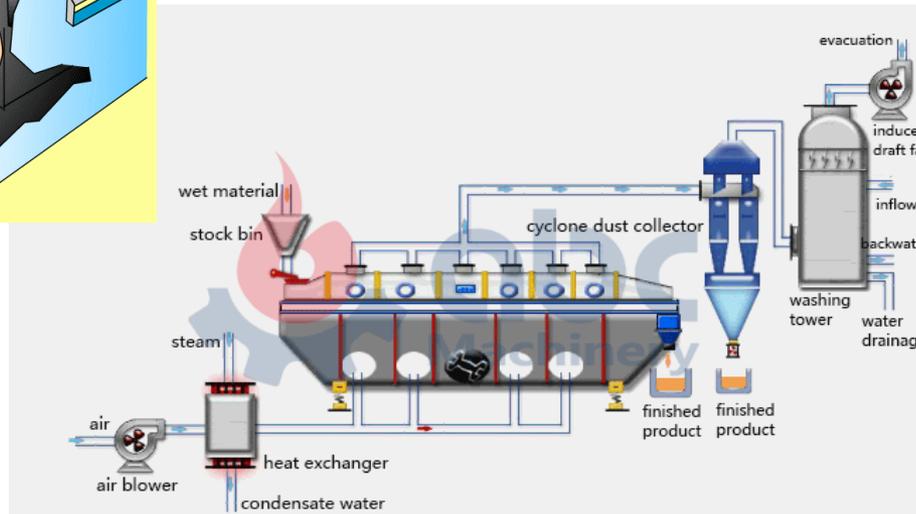
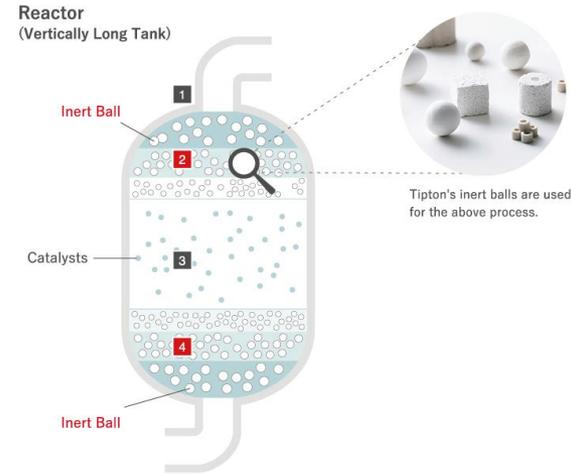
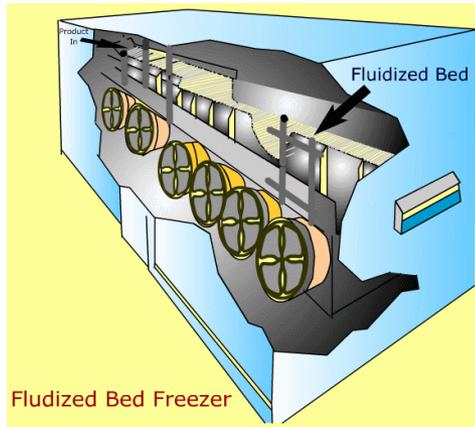
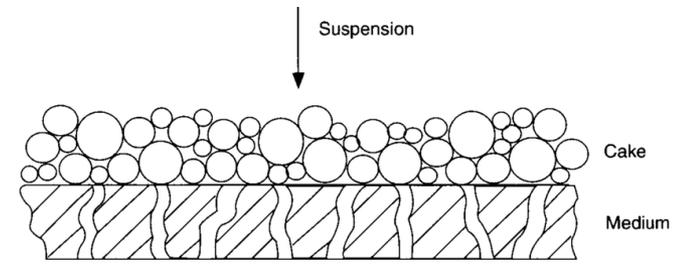
FLUJO A TRAVÉS DE SISTEMAS PARTICULADOS



# FLUJO A TRAVÉS DE SISTEMAS PARTICULADOS

Matriz de partículas sólidas a través de la cual escurre un fluido

Un medio poroso rígido consta de poros (o canales) ubicados entre una fase sólida particulada, contenida dentro de un recipiente, o volumen de control. El fluido (liquido, gas) fluye a través de este sistema.

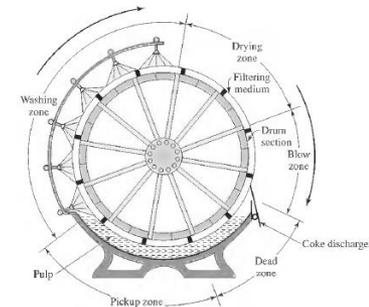
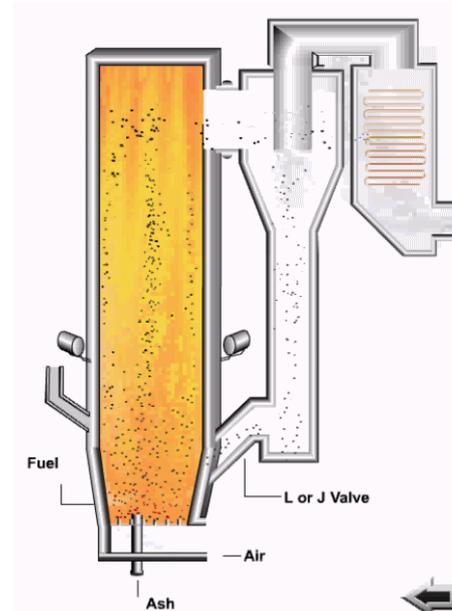
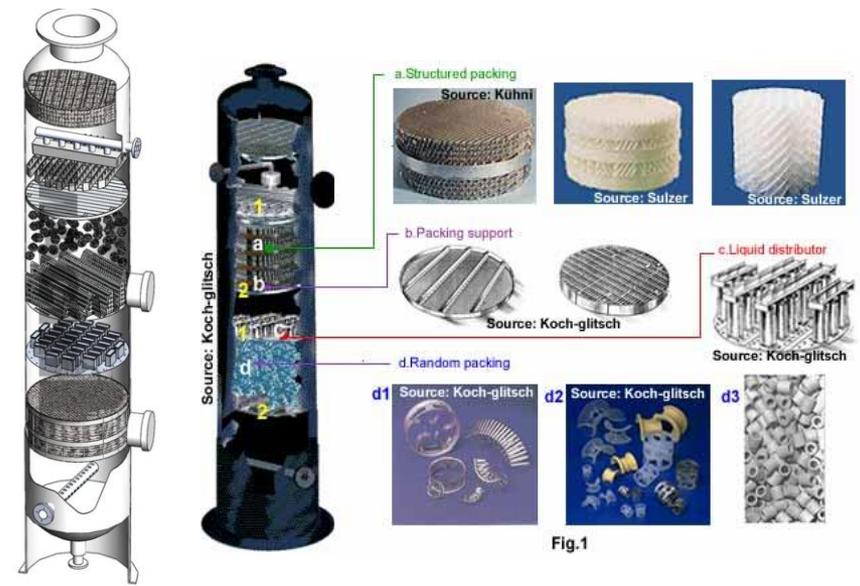


# FLUJO A TRAVÉS DE SISTEMAS PARTICULADOS

El flujo a través de lechos de partículas sólidas aparece en numerosos procesos industriales. Ejemplos importantes son:

➤ **Filtración *dead-end***, las partículas sólidas se depositan en un medio filtrante, y el fluido pasa a través de la masa filtrante depositada. El lecho de sólidos está formado por partículas que se separan del líquido mediante una tela filtrante o tamiz fino.

➤ **Lechos fijos y fluidizados** aplicados en los procesos de adsorción, absorción, intercambio iónico, micro destilación, humidificación, reactores heterogéneos, intercambiadores de calor regenerativo. El empacamiento provee un buen contacto para la transferencia entre las fases. El material particulado puede ser natural o de diseño, tener forma irregular o regular, configurar empaquetamientos al azar o estructurados.

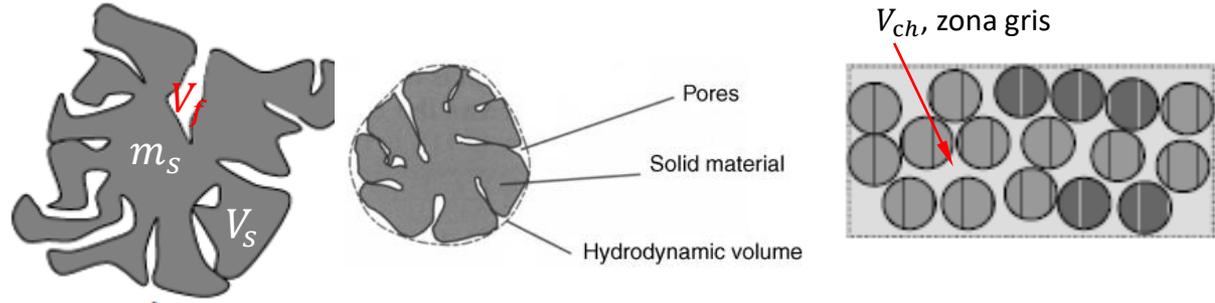


# FLUJO A TRAVÉS DE SISTEMAS PARTICULADOS densidad, porosidad

- Densidad de fluido  $\rho = \frac{m_f}{V_f}$ ;  $V_f$  volumen ocupado por el fluido .
- Densidad del sólido (densidad absoluta)  $\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$ ;  $V_s$  volumen ocupado por el sólido (excluido el volumen ocupado por poros y canales)
- Densidad de las partículas (densidad aparente o *envelope density*)  $\rho_p = \frac{m_s}{V_p}$   $V_p = V_s + V_f$  volumen ocupado por las partículas (incluye el volumen ocupado por los poros internos; volumen hidrodinámico)

Volumen del lecho

$$V_B = V_s + V_f + V_{ch} = V_s + V_{tf}$$



Densidad del lecho (bulk density)  $\rho_B = \frac{m_s + m_{tf}}{V_B}$  (masa del sólido+ masa total de fluido, por unidad de volumen del lecho)

Porosidad (*voidage*) del lecho  $\varepsilon_B = \frac{V_{tf}}{V_B}$  Concentración volumétrica de sólido  $(1 - \varepsilon_B) = C_B = \frac{V_s}{V_B}$   $\varepsilon_B + C_B = 1$

$$\rho_B = (1 - \varepsilon_B)\rho_s + \rho\varepsilon_B \quad \text{Si } \rho_p \gg \rho \rightarrow \rho_B = (1 - \varepsilon_B)\rho_p$$

Concentración másica  $C_W$  vs volumétrica  $C_B$  del lecho  $C_W = \frac{m_s}{m_{Tf} + m_s} \rightarrow C_B = \frac{1}{1 + \frac{(1 - C_W)\rho_s}{C_W \rho}}$

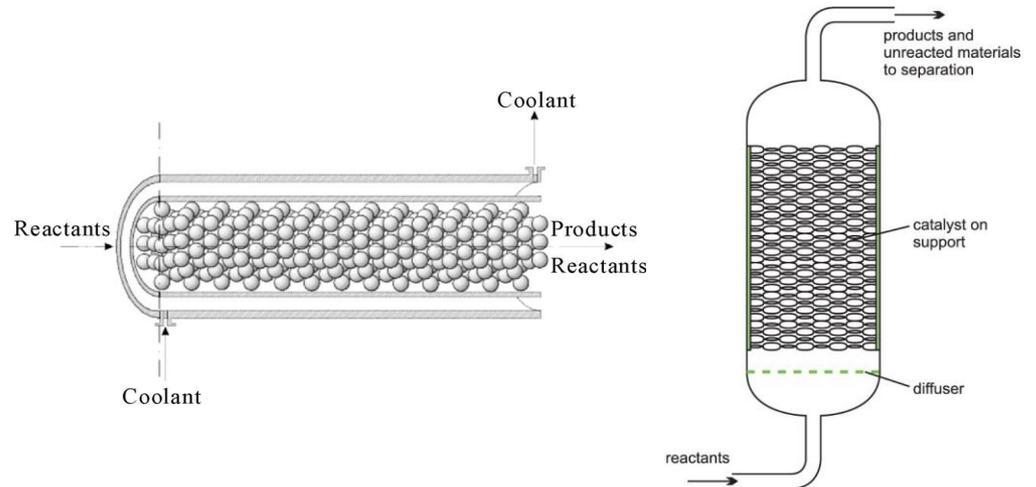
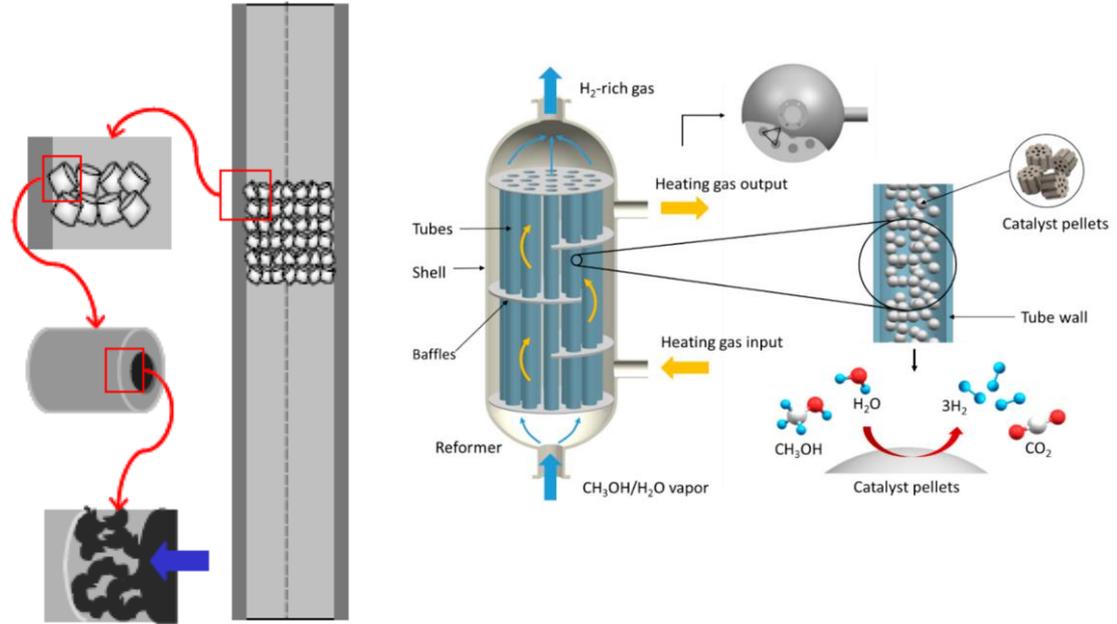
Holdich p26 para deducción

# FLUJO A TRAVÉS DE SISTEMAS PARTICULADOS lechos fijos o empacados

Un lecho de partículas se considera fijo, empacado o estacionario cuando todas sus características no varían durante el proceso.

En un modelo de **matriz rígida** considera que:

- 1) Está conformado por partículas pequeñas de idéntica densidad, tamaño y forma.
- 2) Las partículas y el fluido son incompresibles.
- 3) No existe transferencia de masa entre ambas fases
- 4) Se encuentran sometidos sólo a un campo gravitatorio.
- 5) No existen irreversibilidades entre las fronteras del volumen de control y el sistema particulado – fluido
- 6) La estructura es rígida e inmóvil.



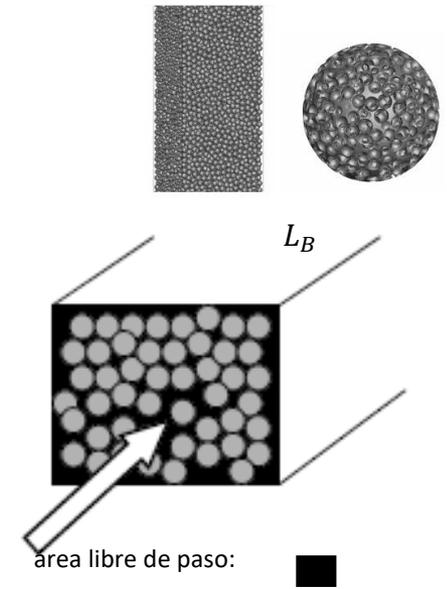
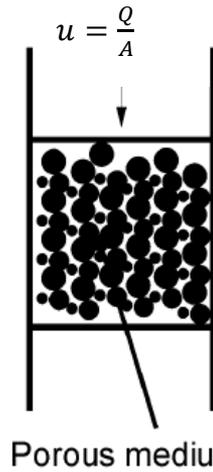
## Lechos fijos o empacados, velocidad superficial

Considerar caudal de fluido a través del lecho,  $Q \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , y área de la sección transversal del lecho  $A \text{ m}^2$ .

Se define la velocidad superficial (o de recipiente vacío)  $u = Q/A \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Las partículas dentro del lecho reducirán el área disponible para el flujo. Para preservar la continuidad con el flujo superficial entrante, el fluido tendrá que pasar a través de un área más pequeña; por tanto, la velocidad intersticial ( $u_p$ ) será mayor que la superficial ( $u$ ).

Superficial velocity

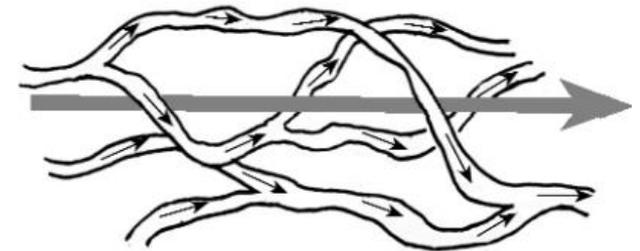


El caudal que pasa por el área transversal del volumen de control debe ser igual al caudal que pasa por los espacios libres entre las partículas

$$Q_{\text{seccion vacía}} = Q_{\text{área libre de paso de flujo}}$$

$$uA_B = u_p A_f \rightarrow uA_B L_B = u_p A_f L_B \rightarrow uV_B = u_p V_f \rightarrow u = u_p \frac{V_f}{V_B} \rightarrow u = u_p \varepsilon_B$$

$$u < u_p$$



La porosidad se considera una propiedad isotrópica (es decir, la misma en todas las direcciones)

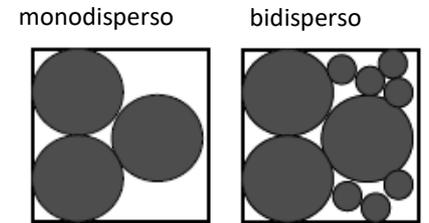
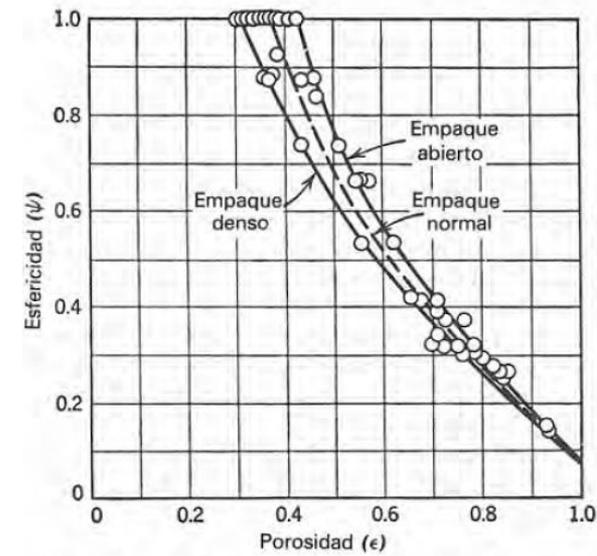
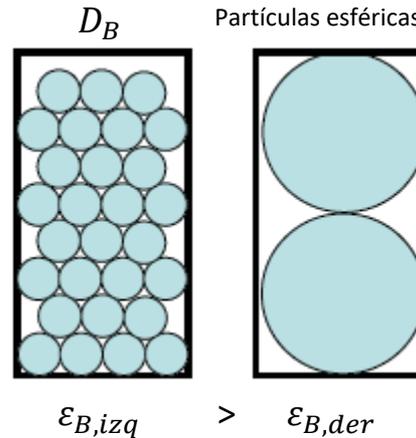
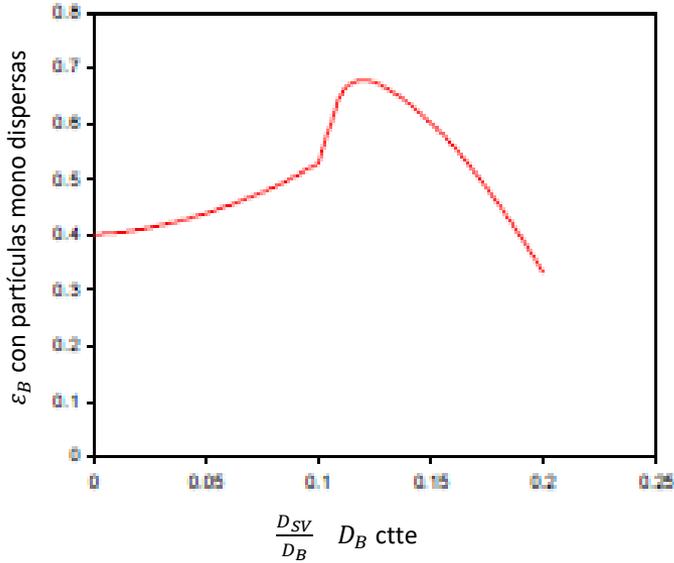
# Lechos fijos o empacados, tipo de partícula y porosidad

Sistema monodisperso (único tamaño): correlación de  $\epsilon_B$  con  $D_{SV}$  y  $D_B$  ( $D_B$ : diámetro del lecho)

$$\epsilon_B = 0,4 + 0,05 \left(\frac{D_{SV}}{D_B}\right) + 0,412 \left(\frac{D_{SV}}{D_B}\right)^2 \frac{D_{SV}}{D_B} \leq 0,5$$

$$\epsilon_B = 0,528 + 2,464 \left(\frac{D_{SV}}{D_B} - 0,5\right) \quad 0,5 \leq \frac{D_{SV}}{D_B} \leq 0,536$$

$$\epsilon_B = 1 - 0,667 \left(\frac{D_{SV}}{D_B}\right)^3 \left[2 \left(\frac{D_{SV}}{D_B}\right) - 1\right]^{0,5} \quad \frac{D_{SV}}{D_B} > 0,536$$



La porosidad del lecho es mayor cuando se utilizan partículas de igual tamaño.

Lecho relleno con partículas mono dispersas y esféricas: a partir de un óptimo, a mayor  $\frac{D_{SV}}{D_B}$ , la porosidad es menor.

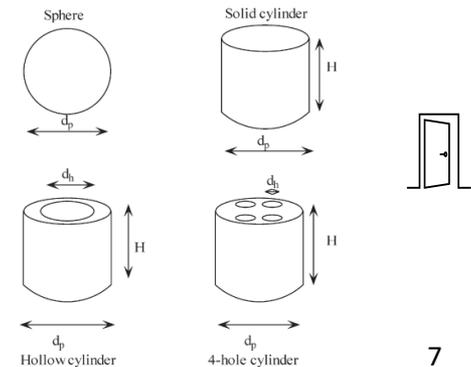
Particulate Science and Technology, 23: 169-177, 2005  
Copyright © Taylor & Francis Inc.  
ISSN: 0272-6351 print/1548-0046 online  
DOI: 10.1080/0272635050022242



## Enhanced Voidage Correlations for Packed Beds of Various Particle Shapes and Sizes

F. BENYAHIA

Dr. Ing. José Luis Zacur



## Lechos fijos o empacados, modelos de comportamiento

### Modelo de partículas discretas

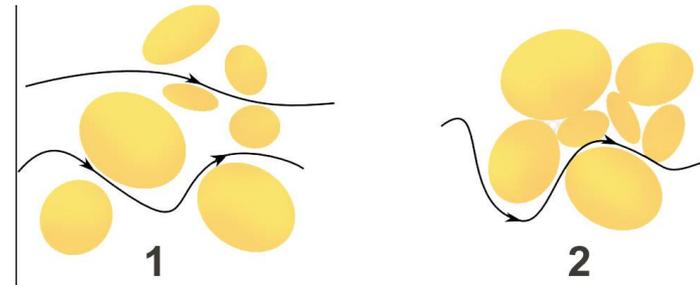
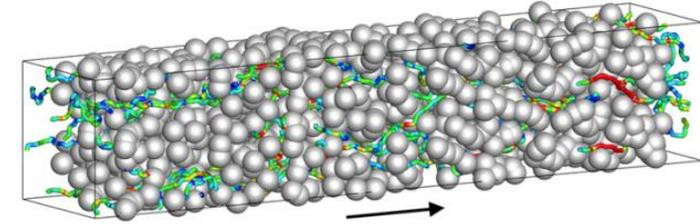
Asume que el lecho empacado consiste en un conjunto de partículas discretas que poseen su propia capa límite durante el flujo. Conceptualmente, este modelo está más cerca de la descripción física del flujo a través del lecho empacado

### Modelo del flujo restringido modelo de tubo capilar o modelo de canal

Considera que el escurrimiento es a través de canales o capilares. La resistencia al flujo a través del medio poroso está relacionada con el número de partículas presentes, (relacionado al término  $1 - \varepsilon_B$  o  $C_B$ ). Cuando el lecho es sólo sólido ( $\varepsilon_B = 0$ ), la resistencia es infinita. Cuando no hay sólidos presentes ( $\varepsilon_B = 1$ ), y la velocidad intersticial  $u_p$  será la misma que la velocidad superficial  $u$ .

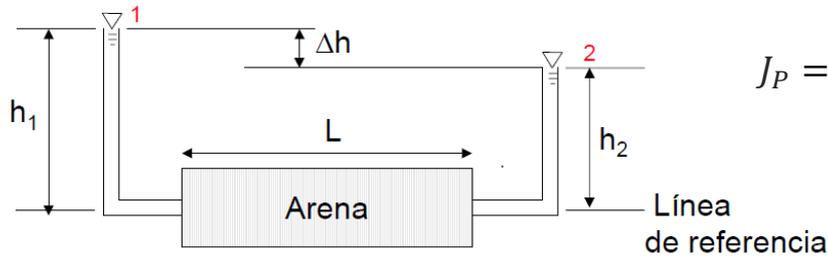
La resistencia al flujo de fluido da lugar a una caída de presión en el fluido,  $\Delta P$ . Si se considera el gradiente ( $-\Delta P/L_B$ ), la presión disminuye en la dirección de la velocidad del fluido.

Esta gradiente de presión está asociada a la irreversibilidad de flujo (arrastre de fricción y de forma); es la resultante de la disipación provocada por la interacción de todas las partículas del lecho con el fluido. Según el número de Reynolds, el flujo será laminar o turbulento y habrá rozamiento de forma, separación y formación de estela.



El flujo a través de dos medios porosos: En 1 ese mueve con mayor rapidez que en 2; la rapidez depende del tamaño de los intersticios y la facilidad de comunicación entre ellos.

# Lechos fijos o empacados, Ecuación de Darcy (1852) modelo empírico



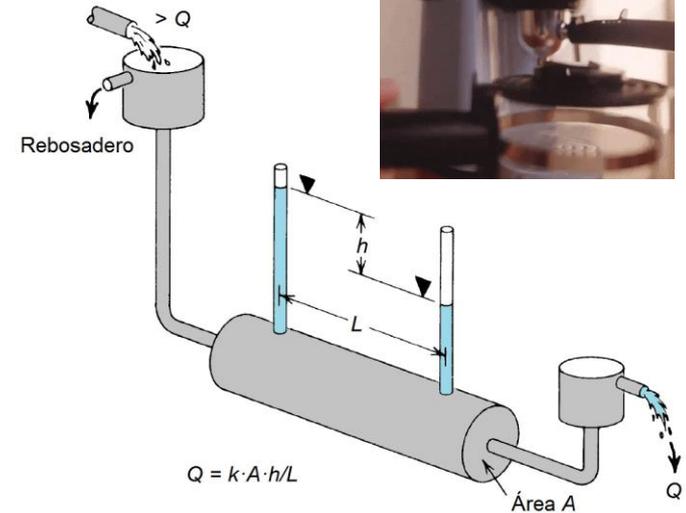
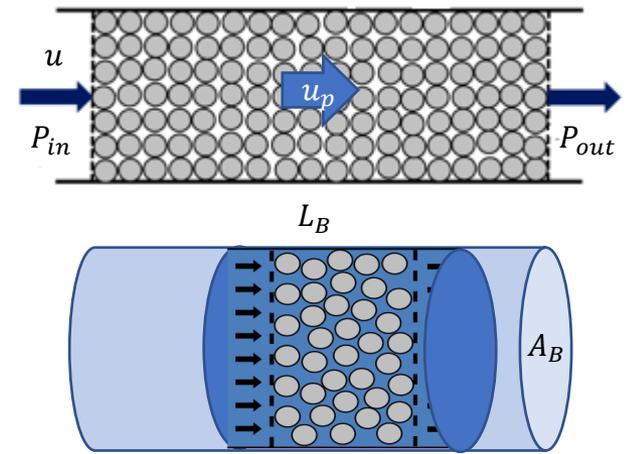
$$J_P = -\frac{k_{perm}}{\mu} \left[ \frac{dP}{dx} \right]$$

Gradiente Hidráulico

Conductividad Hidráulica

$$u = \frac{Q_v}{A} = -K \left[ \frac{h_2 - h_1}{L_B - 0} \right] = -K \left[ \frac{h_2 - h_1}{L_B} \right] = -k_{perm} \frac{\rho g}{\mu} \left[ \frac{h_2 - h_1}{L_B} \right] = -\frac{k_{perm}}{\mu} \left[ \frac{P_2 - P_1}{L_B} \right]$$

La velocidad superficial (o caudal, si considera el área de flujo, libre de sólido) es proporcional a la caída de presión que experimenta el fluido al atravesar el lecho e inversamente proporcional a la longitud de su trayectoria; esto es, proporcional al gradiente hidráulico.  $K \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  es la conductividad hidráulica.  $k_{perm} \text{ m}^2$  es la **permeabilidad**; depende de las propiedades físicas del lecho y del fluido que circula a través éste.

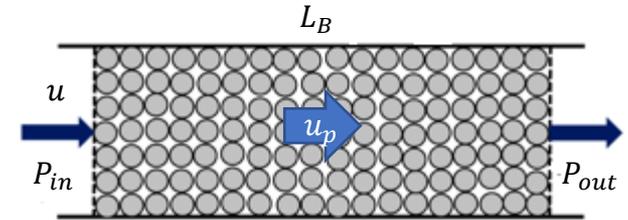


La unidad de la permeabilidad es el Darcy: se define como la permeabilidad de un medio poroso al flujo viscoso para el paso de  $1 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  de un líquido con una viscosidad de  $1 \text{ cP}$ , bajo una caída de presión de  $1 \text{ bar} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

# Lechos fijos o empacados, evaluación del diámetro hidráulico de canal $D_{h,canal}$

Para una partícula del lecho poroso con una superficie externa  $S_p$  y volumen  $V_p$ ,  $D_{SV} = 6V_p/S_p = \psi D_V$ .

Canales no circulares; diámetro hidráulico  $D_h = \frac{4A_{canal}}{P_{m,canal}}$

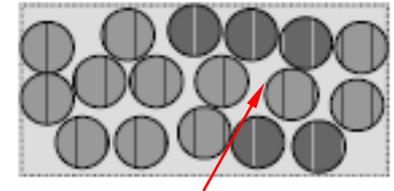


$$D_{h,canal} = \frac{4(A_{canal}L_B)}{P_{m,canal}L_B} = \frac{4 * \text{Volumen hueco del lecho}}{\text{Área superficial húmeda de partículas}} \rightarrow$$

Área superficial húmeda de partículas = nro de partículas \* área superficial de una partícula

$$\varepsilon_B = \frac{V_f}{V_B} \text{ por lo que } (1 - \varepsilon_B) = \frac{V_p}{V_B}$$

$$\text{Área superficial húmeda de partículas} = \frac{A_B L_B (1 - \varepsilon_B)}{\pi D_{SV}^3 / 6} * \pi D_{SV}^2 = 6 \frac{A_B L_B (1 - \varepsilon_B)}{D_{SV}}$$



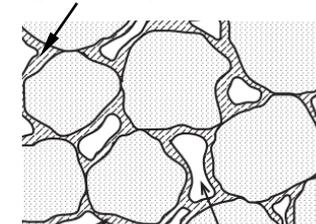
$$\text{Volumen hueco del lecho} = A_B L_B \varepsilon_B$$

$V_p$  volumen total ocupado por partículas

$$\rightarrow D_{h,canal} = \frac{4}{6} \frac{A_B L \varepsilon_B}{A_B L (1 - \varepsilon_B)} D_{SV} \rightarrow$$

$$D_{h,canal} = \frac{4}{6} \frac{\varepsilon_B}{(1 - \varepsilon_B)} D_{SV}$$

Agua de mojadura

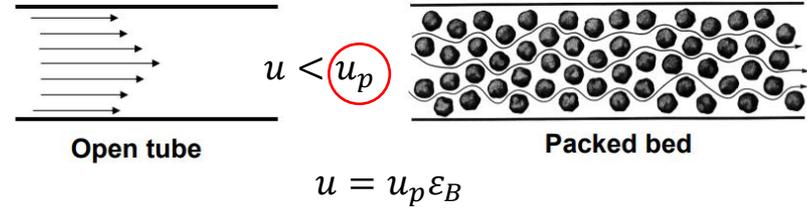


Agua adherida a los granos

Porosidad eficaz: sección útil para el flujo

# Lechos fijos o empacados, definición del número de Reynolds modificado $Re_m$

$$D_{h,canal} = \frac{4}{6} \frac{\epsilon_B}{(1 - \epsilon_B)} D_{SV}$$

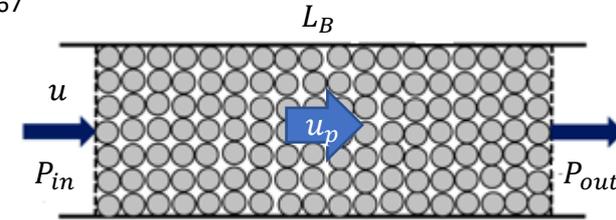


El número de Reynolds  $Re_y = \frac{D_{h,canal} \rho u_p}{\mu}$   $\rho$  y  $\mu$  son la densidad y viscosidad del fluido

Se define número de Reynolds modificado

$$Re_m = \frac{4}{6} \frac{\epsilon_B}{(1 - \epsilon_B)} D_{SV} \frac{u \rho}{\epsilon_B \mu}$$

Kozeny elimina el termino 0,67



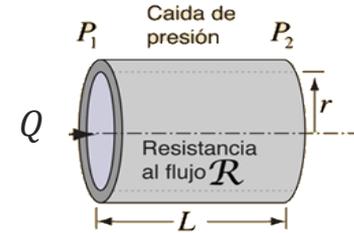
$$Re_m = \frac{D_{SV} \rho u}{(1 - \epsilon_B) \mu}$$

$Re_m > 1000$  es indicación de Régimen turbulento

# Lechos fijos o empacados, irreversibilidad en lecho fijo o caída de presión, Ecuación de Kozeny - Carman

$$\Delta P_L = k \frac{\mu \bar{v} L}{D^2} \text{ ecuación de Hagen-Poiseuille en régimen laminar (para ductos circulares } k=32)$$

La derivación asume que el flujo en un medio poroso se puede representar como el flujo a través de múltiples canales o capilares



$$\Delta P_L = k \frac{\mu L_B u_p}{D_h^2} = k \mu L_B \frac{1}{\left(\frac{\epsilon_B}{(1-\epsilon_B)} D_{SV}\right)^2 \epsilon_B} u \rightarrow \frac{\Delta P_L}{L_B} = k \mu \left[ \frac{(1-\epsilon_B)^2}{\epsilon_B^3} \frac{1}{D_{SV}^2} \right] u$$

$k = \phi(\epsilon_B) \approx 150 - 180$

$$D_{SV} = \frac{6}{S_V}$$

$$\frac{\Delta P_L}{L_B} = k \mu \left[ \frac{(1-\epsilon_B)^2 S_V^2}{\epsilon_B^3 6^2} \right] u \rightarrow \frac{\Delta P_L}{L_B} = \frac{k}{6^2} \mu \left[ \frac{(1-\epsilon_B)^2 S_V^2}{\epsilon_B^3} \right] u \rightarrow \frac{\Delta P_L}{L_B} = 5 \mu \left[ \frac{(1-\epsilon_B)^2 S_V^2}{\epsilon_B^3} \right] u$$

Ecuación de Kozeny - Carman  $Re_m \leq 2$

## Relación entre las ecuaciones de Darcy y Koseny - Carman

Resistencia al flujo del fluido

$$\frac{\Delta P_L}{L_B} = \mu \left[ k \frac{(1-\epsilon_B)^2}{\epsilon_B^3} \frac{1}{D_{SV}^2} \right] u \rightarrow \frac{\Delta P_L}{L_B} = \frac{u}{\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\epsilon_B^3 D_{SV}^2}{k(1-\epsilon_B)^2} \right]} \rightarrow \frac{1}{\mu} \left[ \frac{\epsilon_B^3 D_{SV}^2}{k(1-\epsilon_B)^2} \right] \frac{\Delta P_L}{L_B} = u$$

$$\frac{1}{\mu} k_{perm} \frac{\Delta P_L}{L_B} = u \text{ ecuación de Darcy}$$

# Lechos fijos o empacados, irreversibilidad en lecho fijo, caída de presión, Ecuación de Ergun, factor de fricción

$$\frac{\Delta P_L}{L_B} = 150 \frac{\mu}{D_{SV}^2} \frac{(1 - \varepsilon_B)^2}{\varepsilon_B^3} u + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_B)}{\varepsilon_B^3} \frac{\rho}{D_{SV}} u^2 = 150 \frac{\mu}{\psi^2 D_V^2} \frac{(1 - \varepsilon_B)^2}{\varepsilon_B^3} u + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_B)}{\varepsilon_B^3} \frac{\rho}{\psi D_V} u^2$$

## FLUID FLOW THROUGH PACKED COLUMNS



SABRI ERGUN  
Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, Pennsylvania

Ecuación de Ergun (1952)

Se define factor de fricción para lechos empacados

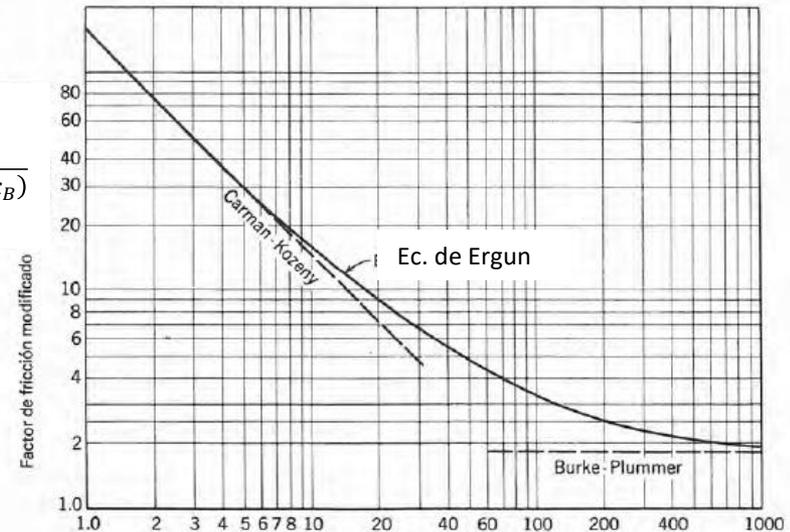
$$Re_m = \frac{D_{SV} \rho u}{(1 - \varepsilon_B) \mu} = \frac{Re_p}{(1 - \varepsilon_B)}$$

$$f_{lp} = \frac{\Delta P_L}{L_B} \frac{D_{SV}}{\rho u^2} \frac{\varepsilon_B^3}{(1 - \varepsilon_B)} = \frac{150}{Re_m} + 1,75$$

$$Re_m < 2 \quad f_{lp} = \frac{150}{Re_m} \quad \text{Ecuación de Kozeny - Carman}$$

$$f_{lp} = \frac{\Delta P_L}{L_B} \frac{D_{SV}}{\rho u^2} \frac{\varepsilon_B^3}{(1 - \varepsilon_B)}$$

$$Re_m \geq 1000 \quad f_{lp} = 1,75 \quad \text{Ecuación de Burke - Plummer}$$



$$Re_m = \frac{D_{SV} \rho u}{(1 - \varepsilon_B) \mu} = \frac{Re_p}{(1 - \varepsilon_B)}$$

Powder Technology 283 (2015) 488-504

Contents lists available at ScienceDirect

**Powder Technology**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/powtec](http://www.elsevier.com/locate/powtec)



A revisit of pressure drop-flow rate correlations for packed beds of spheres

Esra Erdim <sup>A,1</sup>, Ömer Akgiray <sup>B,\*</sup>, İbrahim Demir <sup>A</sup>

## Lechos fijos o empacados, caída de presión, ecuación de Ergun

$$\text{Ecuación de Ergun (1952)} \quad \frac{\Delta P_L}{L_B} = 150 \frac{\mu}{D_{SV}^2} \frac{(1 - \varepsilon_B)^2}{\varepsilon_B^3} u + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_B)}{\varepsilon_B^3} \frac{\rho}{D_{SV}} u^2 = 150 \frac{\mu}{\psi^2 D_V^2} \frac{(1 - \varepsilon_B)^2}{\varepsilon_B^3} u + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_B)}{\varepsilon_B^3} \frac{\rho}{\psi D_V} u^2$$

El primer término del lado derecho de la ecuación de Ergun representa el componente laminar al gradiente de presión. El segundo término corresponde al régimen turbulento. De manera que, en flujo laminar el gradiente de presión aumenta de manera lineal con la velocidad. En cambio, en el régimen turbulento, la caída de presión aumenta de manera cuadrática y es independiente de la viscosidad del fluido. Las correlaciones son usualmente aplicables a  $\psi > 0,6$

Dos lechos, uno relleno con partículas esféricas y otro con irregulares, tendrán igual caída de presión si se conserva el área total superficial y la misma fracción de vacíos (que es lo mismo que mantener el volumen de sólidos si la geometría del lecho está definida). Por esta razón el diámetro equivalente que debe usarse es  $D_{SV} = \psi D_V$ .

# Lechos fijos o empacados, irreversibilidad, ecuación de Ergun, ecuación de Bernoulli, dimensionamiento

$$\frac{\Delta P_L}{L_B} = 150 \frac{\mu}{\psi^2 D_V^2} \frac{(1 - \varepsilon_B)^2}{\varepsilon_B^3} u + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_B)}{\varepsilon_B^3} \frac{\rho}{\psi D_V} u^2$$

$$\frac{\Delta P_L}{\rho} = 150 \frac{\mu L_B}{\psi^2 D_V^2} \frac{(1 - \varepsilon_B)^2}{\varepsilon_B^3 \rho} u + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_B)}{\varepsilon_B^3} \frac{1}{\psi D_V} L_B u^2 = e_{L,pb} \frac{J}{kg} \quad \text{Irreversibilidad para un lecho empacado; (pb: packed bed)}$$

$$w_s = \int_1^5 \frac{dP}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta(u^2)}{2} + \sum e_L J \cdot kg^{-1}$$

Flujo incompresible

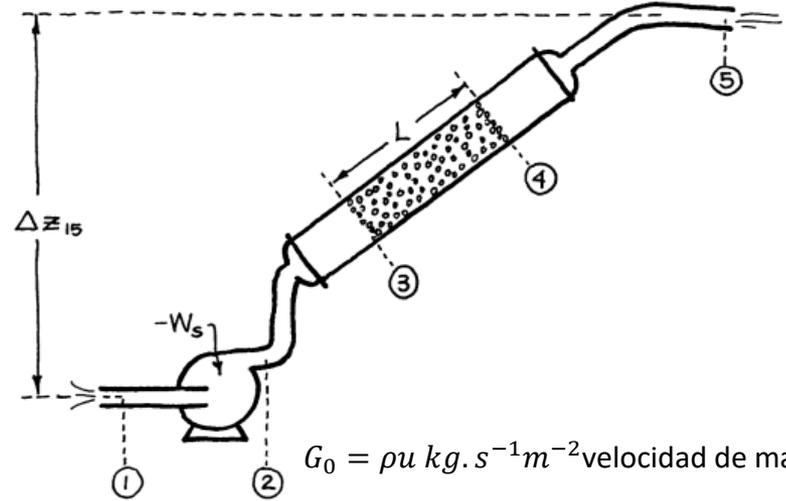
$$0 = \frac{\Delta P}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta(u^2)}{2} + e_{L,pipe} + e_{L,pb} - w_s$$

Flujo compresible

$$0 = \int_1^5 \frac{dP}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta(u^2)}{2} + e_{L,pipe} + e_{L,pb} - w_s \rightarrow 0 = \int_3^4 \frac{dP}{\rho} + e_{L,pb} \rightarrow \int_3^4 \frac{dP}{\rho u^2} + \frac{e_{L,pb}}{u^2} = 0 \rightarrow \int_3^4 \frac{\rho dP}{G_0^2} + \frac{e_{L,pb}}{u^2} = 0$$

$$\int_3^4 \frac{\rho dP}{G_0^2} + \frac{e_{L,pb}}{u^2} = 0 \rightarrow \int_3^4 \frac{\rho dP}{G_0^2} + 150 \frac{\mu L_B}{\psi^2 D_V^2} \frac{(1 - \varepsilon_B)^2}{\varepsilon_B^3 \rho G_0} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_B)}{\varepsilon_B^3} \frac{1}{\psi D_V} L_B = 0$$

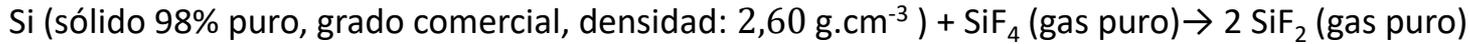
Ecuación de dimensionamiento  $\dot{m} = \frac{\pi D_B^2}{4} \rho u = \frac{\pi D_B^2}{4} G_0 \rightarrow D_B = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi G_0}} \quad L_B = \frac{m_s}{A_B \rho_p (1 - \varepsilon_B)}$



El paso crítico, en el proceso propuesto por Motorola, para producir silicio ultra puro, grado celda fotoeléctrica solar, es la reacción exotérmica:



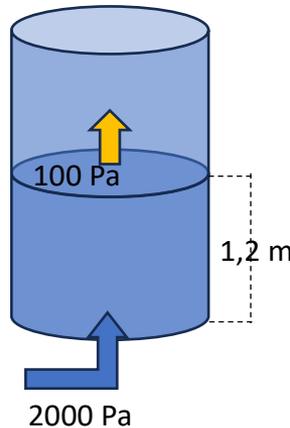
jlz\_TSP\_Lecho\_fijo\_motorola



El SiF<sub>2</sub>, que tiene un tiempo de vida media de 120 s, es luego convertido a silicio puro. A la temperatura de operación, 1350 K, la obtención es posible cuando la presión es inferior a 100 Pa. En esta condición, la conversión es completa, obteniéndose SiF<sub>2</sub> (monómero gas puro).

Se utiliza un reactor vertical (diámetro interior de 0,4 m), relleno de partículas de silicio (ε = 0,5), de 6 mm (diámetro volumétrico equivalente) y ψ = 0,80. El reactivo, (SiF<sub>4</sub> gas puro, μ=4.10<sup>-5</sup> kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>), ingresa al reactor a 2000 Pa y 1350 K; se observa que, a 1,2 m de altura, la presión desciende a 100 Pa.

a) Estimar la producción de SiF<sub>2</sub> (gas puro) kg.hr<sup>-1</sup> obtenible. b) Estimar la cantidad de Si grado comercial necesario para mantener en el lecho, como lecho fijo.



**United States Patent** [19] [11] **4,138,509**  
**Ingle et al.** [45] **Feb. 6, 1979**

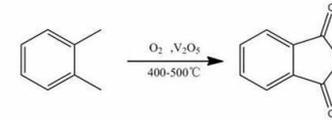
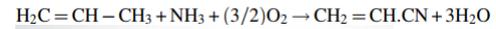
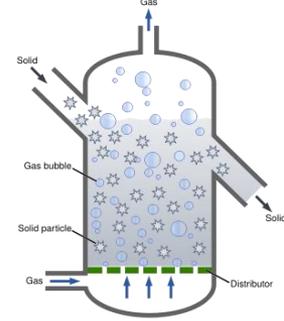
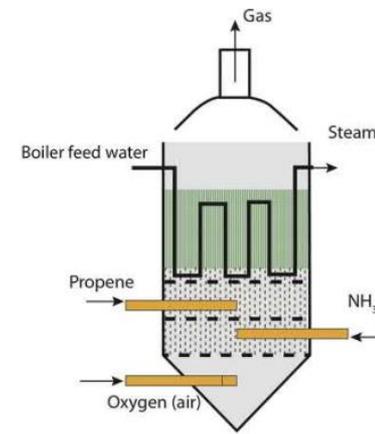
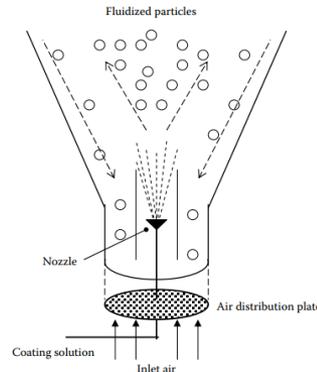
[54] **SILICON PURIFICATION PROCESS**  
 [75] Inventors: **William M. Ingle; Stephen W. Thompson**, both of Phoenix, Ariz.  
 [73] Assignee: **Motorola, Inc., Schaumburg, Ill.**  
 [21] Appl. No.: **864,055**  
 [22] Filed: **Dec. 23, 1977**  
 [51] Int. Cl.<sup>2</sup> ..... **C01B 33/02; C01B 33/08**  
 [52] U.S. Cl. .... **427/86; 156/613; 427/248 B; 427/255; 423/111; 423/341; 423/342; 423/349**  
 [58] Field of Search ..... **423/111, 341, 342, 349, 423/350; 427/86, 248 B, 255; 156/613**  
 [56] **References Cited**  
**U.S. PATENT DOCUMENTS**  
 938,634 11/1909 Betts ..... 423/111 X  
 2,840,588 6/1958 Pease ..... 423/341 X  
 4,070,444 1/1978 Ingle ..... 423/349  
**FOREIGN PATENT DOCUMENTS**  
 579643 7/1959 Canada ..... 423/350  
**OTHER PUBLICATIONS**  
 Timms, "J. of the Amer. Chem. Soc.," 87:13, 1965, pp. 2824-2828.  
*Primary Examiner—Jack Cooper*  
*Attorney, Agent, or Firm—John A. Fisher*  
**5 Claims, 2 Drawing Figures**

[57] **ABSTRACT**  
 A process for producing semiconductor grade silicon. Metallurgical grade silicon, silicon dioxide, and silicon tetrafluoride are chemically combined at an elevated temperature to form silicon difluoride gas. The silicon difluoride gas is then polymerized, preferably in a two-step process. An initial small quantity of silicon difluoride polymers is formed at a first temperature. This initial polymerization removes most of the impurities that were present in the original metallurgical grade silicon and which were transported by the silicon difluoride gas. The bulk of the remaining silicon difluoride gas is then polymerized at a second, lower temperature. These polymers are substantially free from all impurities. The pure silicon difluoride polymers are then thermally decomposed at temperatures below 400° C. to form binary silicon fluoride homologues. The homologues can be distilled for even higher purity, or can be used or stored as formed. The binary silicon fluoride homologues produce pure silicon and silicon tetrafluoride when heated to a temperature between 400° C. and 950° C. The disproportionation of the homologues can be accomplished by chemical vapor deposition techniques onto heated substrates of silicon, metal, or quartz. This disproportionation will result in amorphous, polycrystalline, or monocrystalline silicon depending on the temperatures employed and on the substrate used for deposition.

# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*)

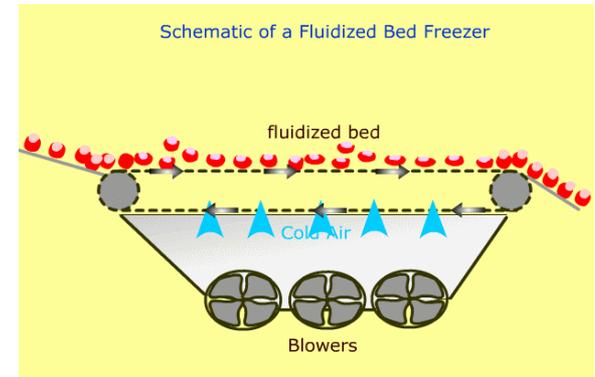
La razón más común para fluidizar un lecho es incrementar la interacción física y/o química de los sólidos en contacto con el fluido, haciendo que reacciones químicas y/o transferencias sean más eficientes.

- Industria petroquímica y química: cracking de fracciones pesadas, síntesis de combustibles por reacción de  $\text{CO} + \text{H}_2$ , oxidación de naftaleno a anhídrido ftálico.
- Combustión en lecho fluidizado.
- Secado o frizado en lecho fluidizado.
- *Coating* de partículas

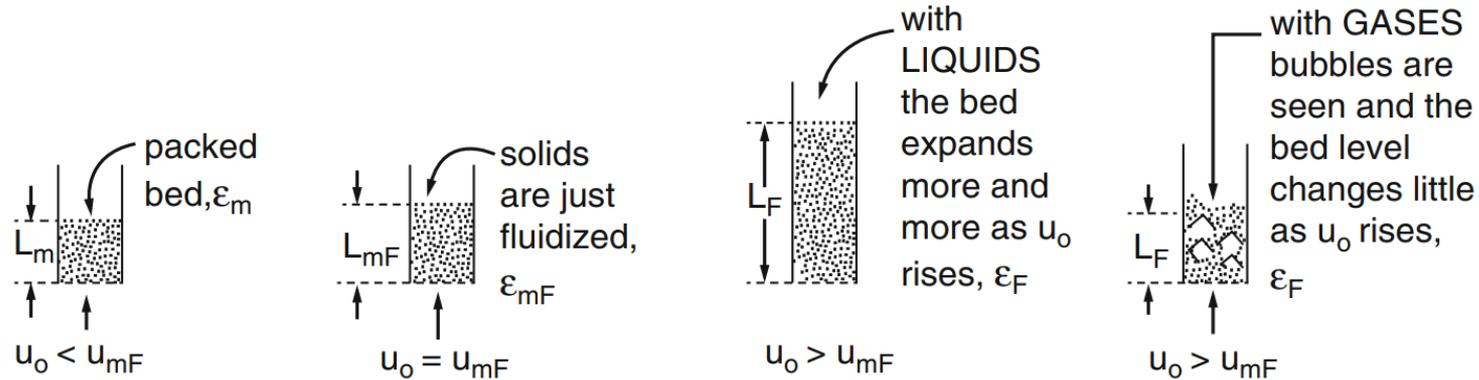


Los lechos fluidizados ofrecen tres ventajas distintas sobre otras tecnologías de proceso:

- Mejor transferencia de calor
- Capacidad para movilizar fácilmente sistemas particulados como fluidos
- Capacidad para procesar materiales sólidos con una amplia distribución de tamaños



## LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*)

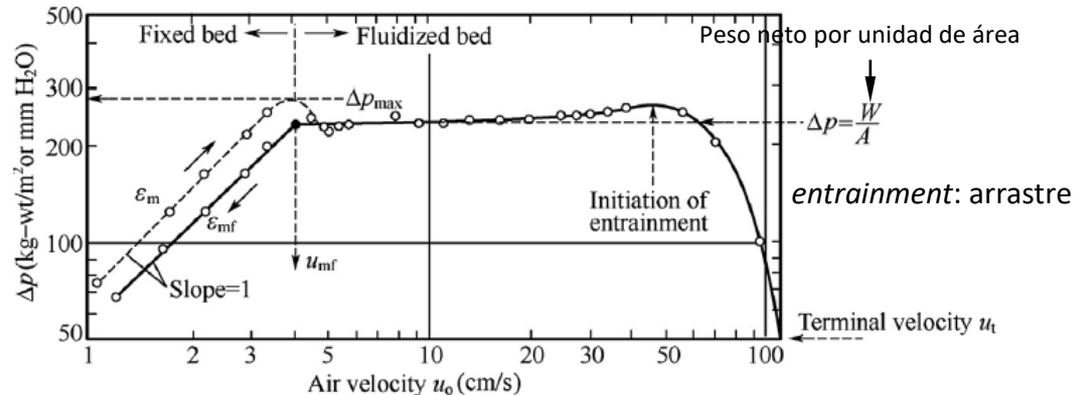
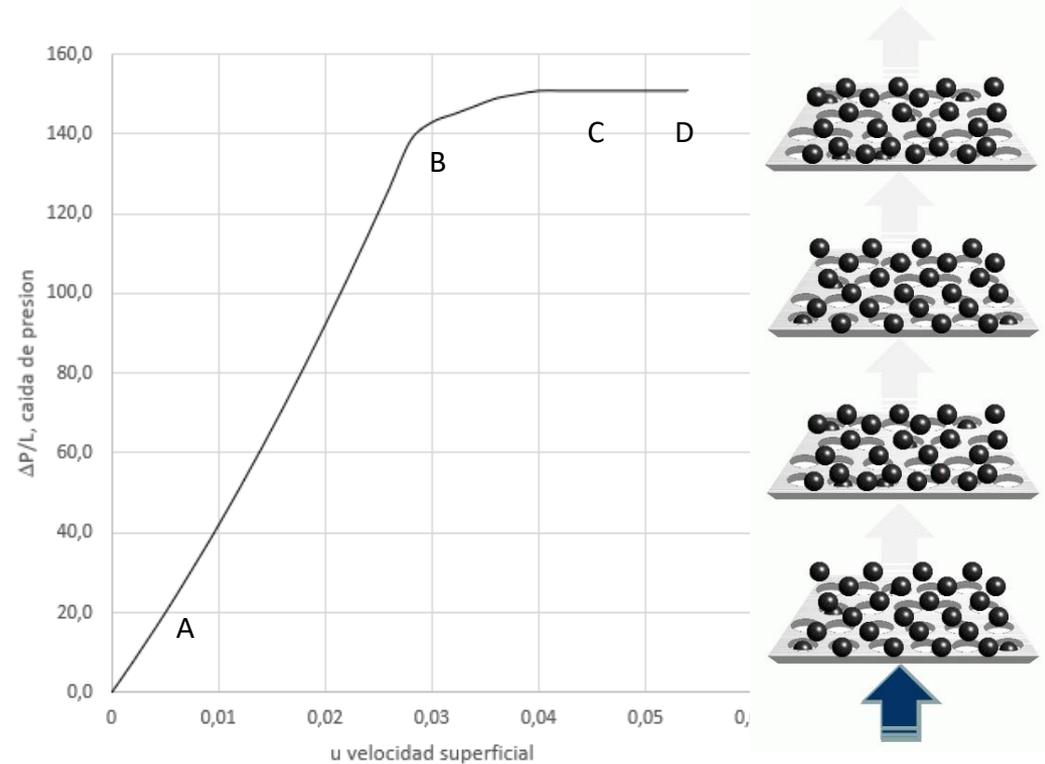


- Cuando un fluido pasa a muy baja velocidad a través de un lecho de partículas sólidas, las partículas no se mueven y el fluido percola a través de los espacios vacíos entre las partículas estacionarias.
- Con un aumento de la velocidad del fluido, se llega eventualmente a un punto donde las partículas comienzan a moverse y quedan suspendidas en el fluido. Este punto se conoce como el de fluidización incipiente o de mínima fluidización
- En un sistema líquido-sólido, un incremento en el caudal por encima del punto de mínima fluidización resulta en una suave, progresiva expansión del lecho. Se dice que es un lecho homogéneamente fluidizado.
- En un sistema gas-sólido, un incremento en el caudal por encima del punto de mínima fluidización, se presentan frecuentemente fenómenos de burbujeo y eventualmente canalización del flujo gaseoso, con ligera expansión.

# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Comportamiento de la caída de presión y de la altura del lecho

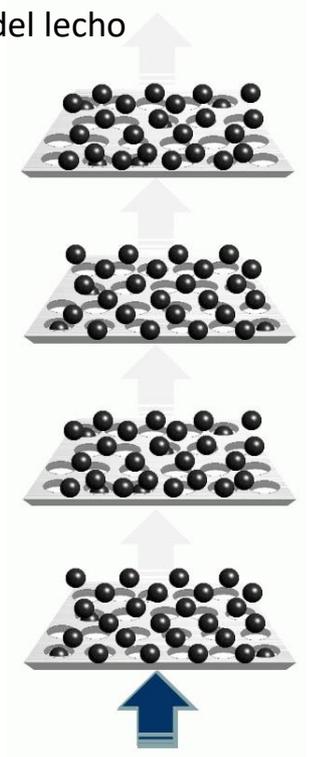
- Considerar un tubo vertical parcialmente lleno con material granular.
- La caída de presión a través del lecho se grafica en función de la velocidad superficial.
- En ausencia de flujo, la caída de presión (irreversibilidad)  $\Delta P_L$  es cero y el lecho tiene una cierta altura  $L_B$ .
- Al incrementar la velocidad superficial  $u$ , (trayectoria AB), la caída de presión aumenta mientras que la altura del lecho permanece fija. (Ec. de Ergun).

$$\Delta P_L = 150 \frac{\mu}{D_{SV}^2} \frac{(1 - \epsilon_B)^2}{\epsilon_B^3} L_B u + 1,75 \frac{(1 - \epsilon_B)}{\epsilon_B^3} \frac{\rho}{D_{SV}} L_B u^2$$

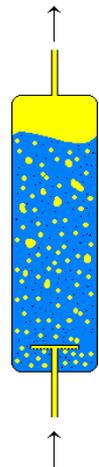


## LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Comportamiento de la caída de presión y de la altura del lecho

- Cuando se alcanza el punto B, la caída de presión es  $\Delta P_{max}$ ; el lecho se expande en altura;  $\varepsilon_B \rightarrow \varepsilon_{mf}$  y  $\Delta P_{max}$  se mantiene constante\*, a medida que aumenta  $u$  (trayectoria BCD).
- La fuerza hacia arriba ejercida por el fluido sobre las partículas es suficiente para equilibrar el peso **neto** del lecho y las partículas comienzan a separarse unas de otras y flotar en el fluido.
- La velocidad superficial que se requiere para soportar el lecho de partículas es menor que la velocidad terminal para las partículas individuales.

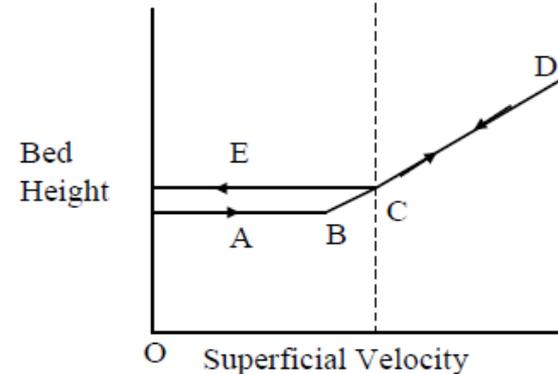
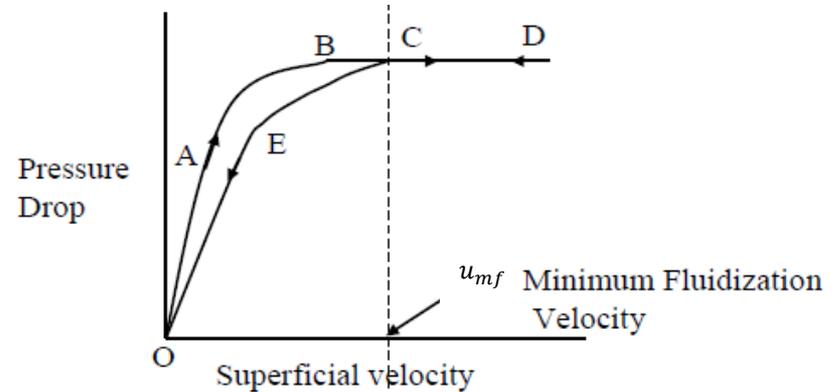
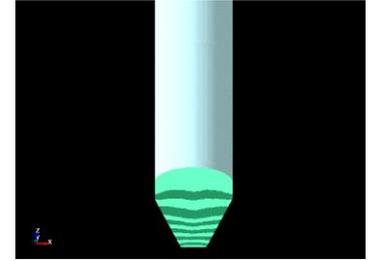


\* El lecho no experimenta aumentos de presión ya que la fase fluido-sólida está expandida y puede deformarse fácilmente sin ofrecer una resistencia apreciable. Comparar este comportamiento con el de los líquidos. Si en un tanque que contiene un líquido, se hace pasar un gas desde el fondo, debe vencerse la presión hidrostática del líquido, la cual es independiente del caudal de gas; depende de la  $P_{man}$



## LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Comportamiento de la caída de presión y de la altura del lecho

- Si se disminuye gradualmente la velocidad superficial, el comportamiento del lecho sigue las curvas DCE.
- Al principio, la caída de presión permanece fija mientras el lecho vuelve a asentarse, y luego comienza a disminuir cuando se alcanza el punto C.
- La altura del lecho ya no disminuye mientras la caída de presión sigue la curva del CEO.
- El comportamiento de histéresis observado se debe a que, después de la fluidización, el lecho se regenera en un estado más suelto.
- Un nuevo ciclo seguirá la ECD en ambas direcciones.
- La velocidad en el punto C es la velocidad mínima de fluidización  $u_{mf}$
- La porosidad del lecho es  $\varepsilon_{mf}$ .



# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Condición de mínima fluidización

Balance de fuerzas en el estado de mínima fluidización (*mf*)

$$F_w = m_s g = V_s \rho_s g = (1 - \epsilon_{mf}) V_B \rho_s g = (1 - \epsilon_{mf}) A_B L_{mf} g \quad \text{peso}$$

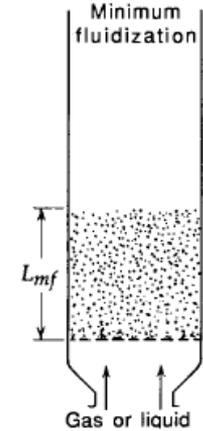
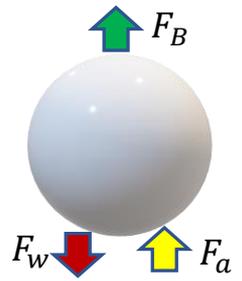
$$F_B = \frac{m_s}{\rho_s} \rho g = V_s \rho g = (1 - \epsilon_{mf}) V_B \rho g = (1 - \epsilon_{mf}) A_B L_{mf} \rho g \quad \text{fuerza de empuje}$$

$(F_w - F_B)$  peso neto

$$F_a = \Delta P_{B,mf} A_B \quad \text{fuerza debido a la ascensión del fluido; asociado a la velocidad superficial } u_{mf}$$

$$(F_w - F_B) - F_a = 0 \rightarrow \Delta P_B A_B = (1 - \epsilon_{mf}) A_B L_{mf} \rho_s g - (1 - \epsilon_{mf}) A_B L_{mf} \rho g$$

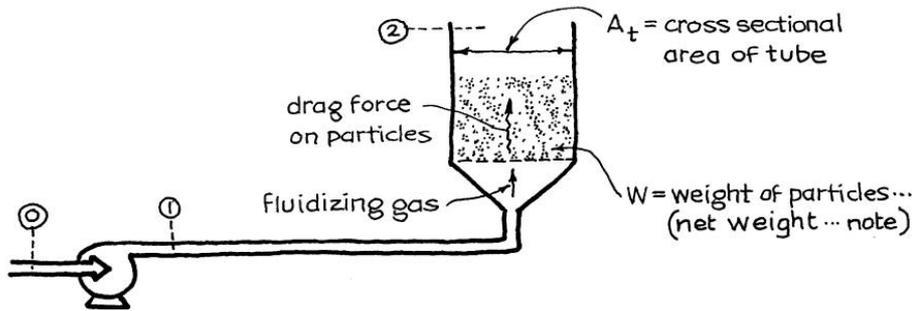
$$\Delta P_{B,mf} = (1 - \epsilon_{mf}) L_{mf} g (\rho_s - \rho) \text{ bar}$$



Requerimiento de energía en el estado de mínima fluidización (*mf*)

A  $u_{mf}$  el lecho se fluidiza

Sin tener en cuenta los efectos de posición o de energía cinética:



$$I_{B,mf} = \frac{\Delta P_{B,mf}}{\rho} = \frac{(1 - \epsilon_{mf}) L_{mf} g (\rho_s - \rho)}{\rho} \frac{J}{kg}$$

$$W_{s,mf} = \frac{\Delta P_{2 \rightarrow 0}}{\rho} + \frac{(1 - \epsilon_{mf}) L_{mf} g (\rho_s - \rho)}{\rho} \frac{J}{kg}$$

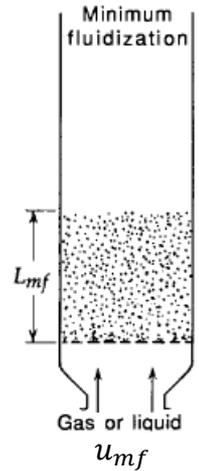
$$I_{B,f} = \frac{\Delta P_{B,mf}}{\rho} \left( \frac{Q_{v,u_f}}{Q_{v,u_{mf}}} \right)^2 \quad \text{Para } u_f > u_{mf}$$

# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Condición de mínima fluidización

$$\Delta P_{B,mf} = (1 - \varepsilon_{mf})L_{mf}g(\rho_s - \rho) \text{ bar} \quad \Rightarrow \quad \Delta P_{B,mf} = \Delta P_{B,max}$$

En esta condición, la Ecuación de Ergun:  $\Delta P_{B,max} = 150 \frac{\mu}{D_{SV}^2} \frac{(1-\varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} L_{mf} u_{mf} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} L_{mf} \frac{\rho u_{mf}^2}{D_{SV}}$

$$(1 - \varepsilon_{mf})L_{mf}g(\rho_s - \rho) = 150 \frac{\mu}{D_{SV}^2} \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} L_{mf} u_{mf} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} L_{mf} \frac{\rho u_{mf}^2}{D_{SV}} \quad \Rightarrow$$



relación de la fuerza de gravedad a la fuerza viscosa o de arrastre:  $Ga \equiv Ar = \frac{\rho D_{SV}^3 g (\rho_s - \rho)}{\mu^2}$

$$\left[ \frac{\rho D_{SV}^3}{\mu^2} \right] g(\rho_p - \rho) = \left[ \frac{\rho D_{SV}^3}{\mu^2} \right] 150 \frac{\mu}{D_{SV}^2} \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} u_{mf} + \left[ \frac{\rho D_{SV}^3}{\mu^2} \right] 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho u_{mf}^2}{D_{SV}} \quad \Rightarrow$$

$$Ar = \left[ \frac{\rho u_{mf} D_{SV}}{\mu} \right] 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} + \left[ \frac{\rho^2 u_{mf}^2 D_{SV}^2}{\mu^2} \right] 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} \quad \Rightarrow$$

$$Ar = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{p,mf} + 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{p,mf}^2$$

$$Re_{p,mf} = \frac{\rho u_{mf} D_{SV}}{\mu}$$

## LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Condición de mínima fluidización

Para partículas muy pequeñas, 2do término de la Ec. de Ergun se puede despreciar ( $Re_{p,mf} < 20$ , predominio de efectos viscosos) por lo que la velocidad mínima de fluidización  $u_{mf}$  se puede expresar como:

$$Ar = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{p,mf} \Rightarrow \frac{\rho D_{SV}^3 g (\rho_s - \rho)}{\mu^2} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf}) D_{SV} \rho u_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3 \mu} \Rightarrow u_{mf} = \frac{(\rho_s - \rho) g D_{SV}^2 \varepsilon_{mf}^3}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})}$$

Para partículas grandes, el 1er término de la Ec. de Ergun se puede despreciar cuando ( $Re_p > 1000$  predominio de efecto inerciales), por lo tanto, la expresión para  $u_{mf}$  se simplifica como:

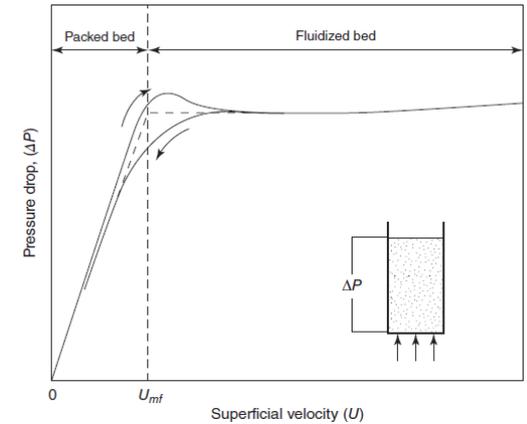
$$Ar = 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{p,mf}^2 \Rightarrow \frac{\rho D_{SV}^3 g (\rho_s - \rho)}{\mu^2} = 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu} \right)^2 \Rightarrow u_{mf} = \left[ \frac{D_{SV} (\rho_s - \rho) g \varepsilon_{mf}^3}{1,75 \rho} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Condición general de mínima fluidización si  $Ar = \frac{\rho D_{SV}^3 g (\rho_s - \rho)}{\mu^2}$

$$Ar = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu} \right) + 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu} \right)^2$$

## LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Condición de mínima fluidización

Puede ser determinada experimentalmente mediante un dispositivo que permita medir caudal de fluido y caída de presión. Se efectúa un ciclo de fluidización. Las mediciones son representadas. Se identifica el punto de intersección de dos líneas rectas extrapoladas: (1) la línea ajustada a la porción decreciente del lecho empacado del perfil de presión y (2) la línea horizontal correspondiente a la porción plana de la traza más allá de la velocidad en cuya fluidización se inició.



Para estimar  $u_{mf}$  a partir de la ecuación correspondiente a la condición de equilibrio, se requiere conocer la porosidad del lecho en la fluidización incipiente,  $\varepsilon_{mf} > \varepsilon_B$  y la esfericidad  $\psi$ . Si no se conocen,  $u_{mf}$  podría estimarse mediante correlaciones. En la literatura, se encuentran disponibles más de 100 correlaciones. Las aquí presentadas son válidas para los regímenes gas - sólido y liquido – solido. Las más utilizadas son las basadas en la ecuación de Wen-Yu.

$$Ar = K_1 \left( \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu} \right)^2 + K_2 \left( \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu} \right) = \frac{\rho D_{SV}^3 g (\rho_s - \rho)}{\mu^2}$$

Investigators	First, $K_2/2K_1$	Second, $1/K_1$
Wen and Yu [12] (1966) 284 data points from the literature	33.7	0.0408
Richardson [13] (1971)	25.7	0.0365
Saxena and Vogel [14] (1977) Dolomite at high temperature and pressure	25.3	0.0571
Babu et al. [15] (1978) Correlation of reported data until 1977	25.3	0.0651
Grace [16] (1982)	27.2	0.0408
Chitester et al. [17] (1984) Coal, char, Ballotini; up to 64 bar	28.7	0.0494

$K_1$  y  $K_2$  se mantienen aproximadamente constantes para diferentes partículas en un amplio rango de condiciones ( $0,001 < Re_{p,mf} < 4000$ ), permitiendo estimar  $u_{mf}$ . Las ecuaciones del tipo Wen-Yu son aplicables a lechos fluidizados líquidos o gaseosos

Ecuación de Chitester para partículas gruesas  $D_{SV} > 100 \mu\text{m}$

$$Re_{p,mf} = (C_1^2 + C_2 Ar)^{\frac{1}{2}} - C_1$$

$$C_1 = \frac{K_2}{2K_1} = 28,7 \quad Re_{p,mf} = \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu}$$

$$C_2 = \frac{1}{K_1} = 0,0494 \quad Ar = \frac{\rho D_{SV}^3 g (\rho_s - \rho)}{\mu^2}$$

Ecuación de Wen-Yu para partículas finas  $D_{SV} < 100 \mu\text{m}$

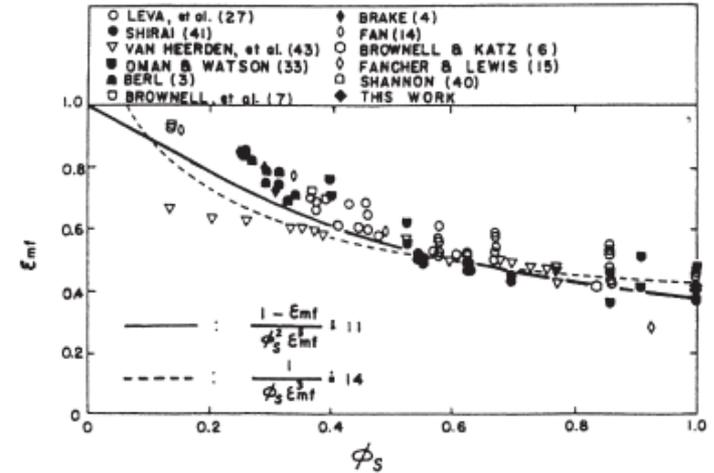
$$Re_{p,mf} = (C_1^2 + C_2 Ar)^{\frac{1}{2}} - C_1$$

$$C_1 = \frac{K_2}{2K_1} = 33,7 \quad Re_{p,mf} = \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu}$$

$$C_2 = \frac{1}{K_1} = 0,0408 \quad Ar = \frac{\rho D_{SV}^3 g (\rho_s - \rho)}{\mu^2}$$

## CHARACTERISTICS OF FLUIDIZATION AT HIGH PRESSURE

DOUGLAS C. CHITESTER and ROBERT M. KORNOSKY  
U.S. Department of Energy, Pittsburgh Energy Technology Center, U.S.A.



A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity

C. Y. WEN and Y. H. YU  
West Virginia University, Morgantown, West Virginia

Para bajos y altos números de Arquímedes, la ecuación de Wen-Yu se aproxima a los siguientes límites:

$$u_{mf} = \frac{6,1 \times 10^{-4} g (\rho_s - \rho) D_V^2}{\mu} \quad Ar \leq 10^3$$

$$u_{mf} = 0,202 \sqrt{\frac{g (\rho_s - \rho) D_V}{\rho}} \quad Ar \geq 10^7$$

# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Condición de mínima fluidización

Gráfica útil (para partículas esféricas y los fluidos agua y aire, a 20°C y 1 bar, de  $u_{mf}$  en función de  $D_{SV}$  y  $\rho_s$

Powder Technology 323 (2018) 454–485

Contents lists available at ScienceDirect

**Powder Technology**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/powtec](http://www.elsevier.com/locate/powtec)





Review

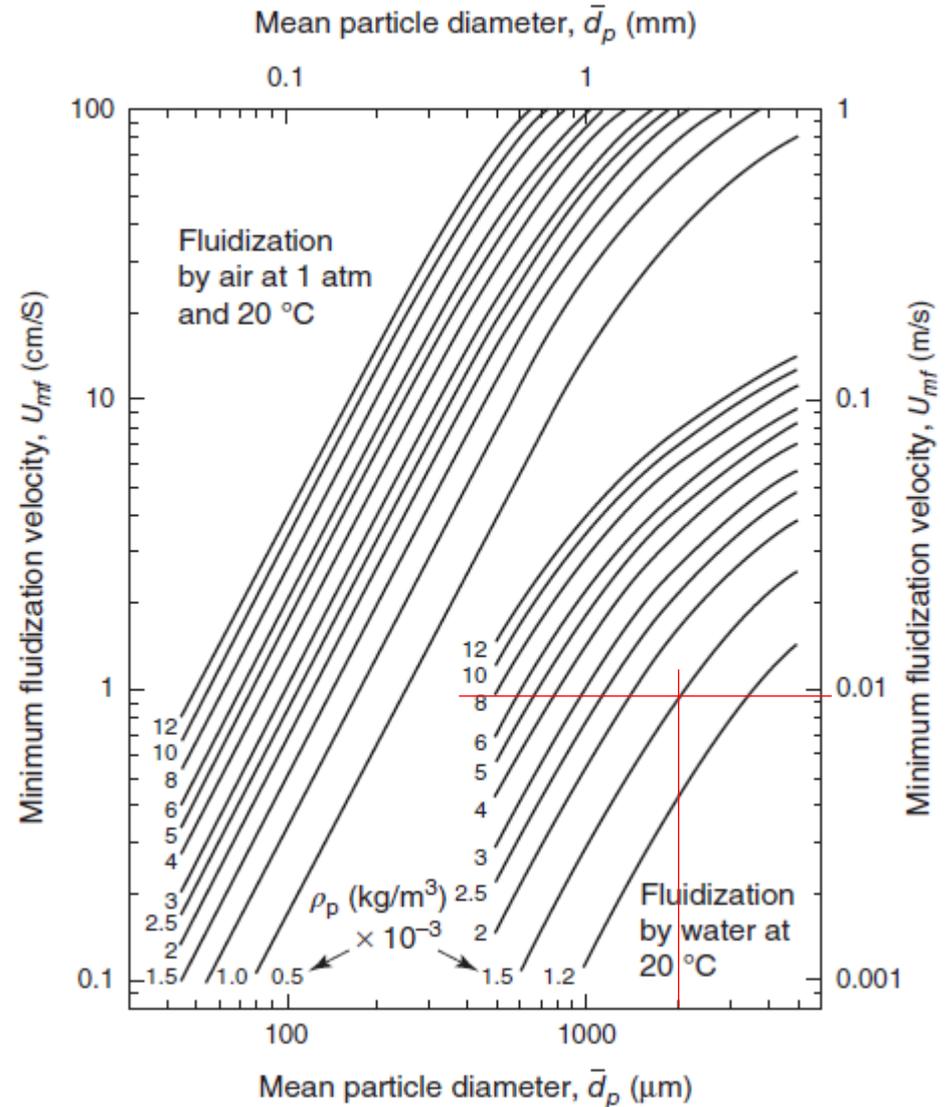
Evaluation of correlations for minimum fluidization velocity ( $U_{mf}$ ) in gas-solid fluidization

Aditya Anantharaman<sup>a</sup>, Ray A. Cocco<sup>b</sup>, Jia Wei Chew<sup>a,c,\*</sup>



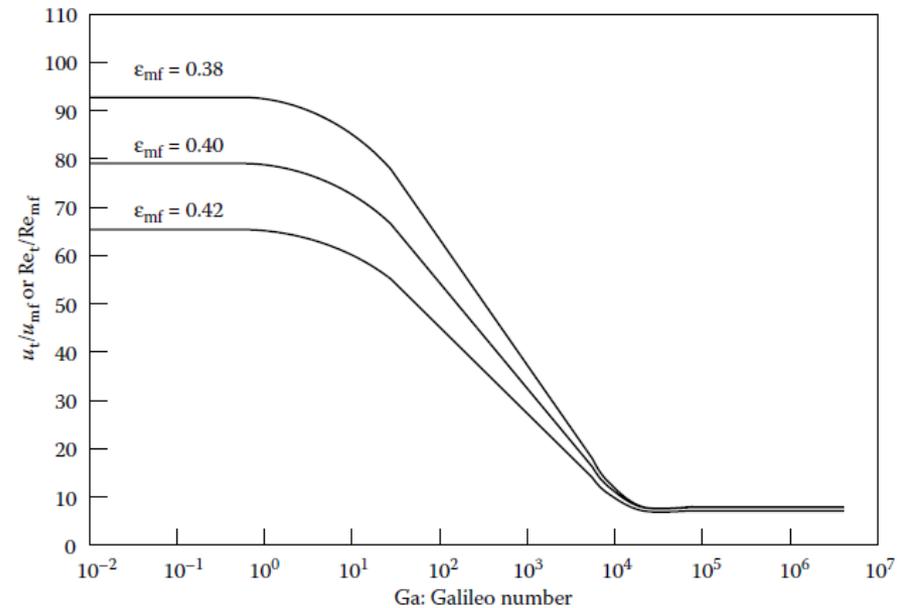
TABLE 3 Voidage at Minimum Fluidizing Conditions  $\epsilon_{mf}$

Particles	Size, $d_p$ (mm)						
	0.02	0.05	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40
Sharp sand, $\phi_s = 0.67$	—	0.60	0.59	0.58	0.54	0.50	0.49
Round sand, $\phi_s = 0.86$	—	0.56	0.52	0.48	0.44	0.42	—
Mixed round sand	—	—	0.42	0.42	0.41	—	—
Coal and glass powder	0.72	0.67	0.64	0.62	0.57	0.56	—
Anthracite coal, $\phi_s = 0.63$	—	0.62	0.61	0.60	0.56	0.53	0.51
Absorption carbon	0.74	0.72	0.71	0.69	—	—	—
Fischer-Tropsch catalyst $\phi_s = 0.58$	—	—	—	0.58	0.56	0.55	—
Carborundum	—	0.61	0.59	0.56	0.48	—	—



## LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) velocidad de arrastre (*entrainment*)

La velocidad terminal de las partículas,  $v_t$ , es la velocidad a la que las partículas individuales se acercan asintóticamente después de caer una cierta distancia a través un de fluido (gas o líquido). En la condición de sedimentación terminal, la fuerza de gravedad neta (es decir, peso menos flotabilidad) de una partícula, actuando en la dirección hacia abajo, es exactamente equilibrado por el arrastre hacia arriba impuesto por el fluido circundante debido a la velocidad relativa entre el fluido y la partícula.  $u_{sett} \equiv v_t$  corresponde a la iniciación del arrastre, donde el fluido adquiere la velocidad apropiada para la decantación (*settling*) de las partículas.



$$Ga \equiv Ar = \frac{\rho D_{SV}^3 g (\rho_s - \rho)}{\mu^2}$$

La solución iterativa del siguiente conjunto de ecuaciones calcula la  $u_{sett}$ :

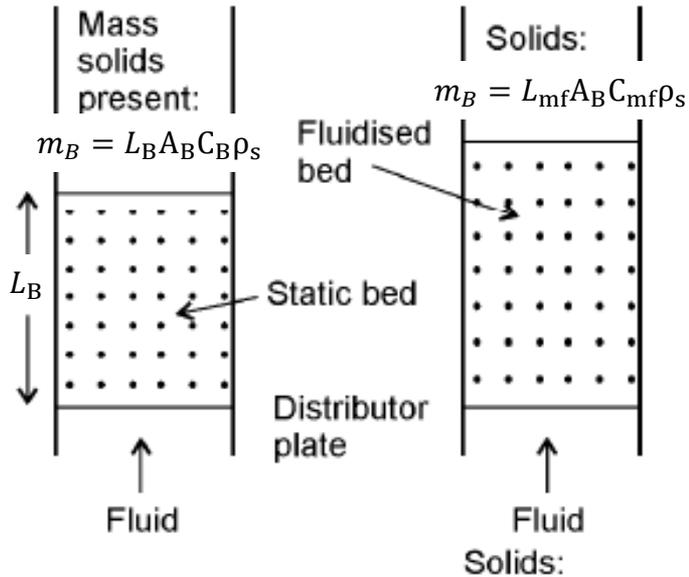
$$u_{sett} \equiv v_t = \sqrt{\frac{4 D_p g (\rho_s - \rho)}{3 \rho C_D}} \quad C_D = \frac{24}{Re_p} \left[ 1 + (8,171 e^{-4,0655 \psi}) (Re_p)^{0,0964 + 0,5565 \psi} \right] + \frac{73,69 (e^{-5,0748 \psi}) Re_p}{Re_p + 5,378 e^{6,2122 \psi}}$$

Ec. de Haider- Levenspiel (*HL*)

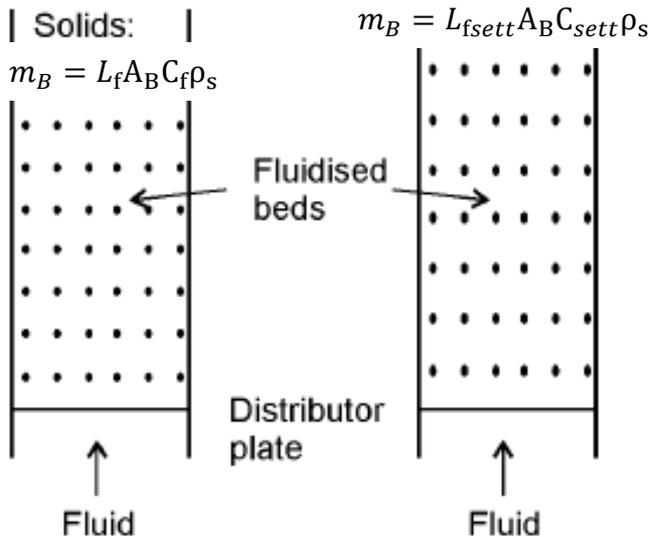
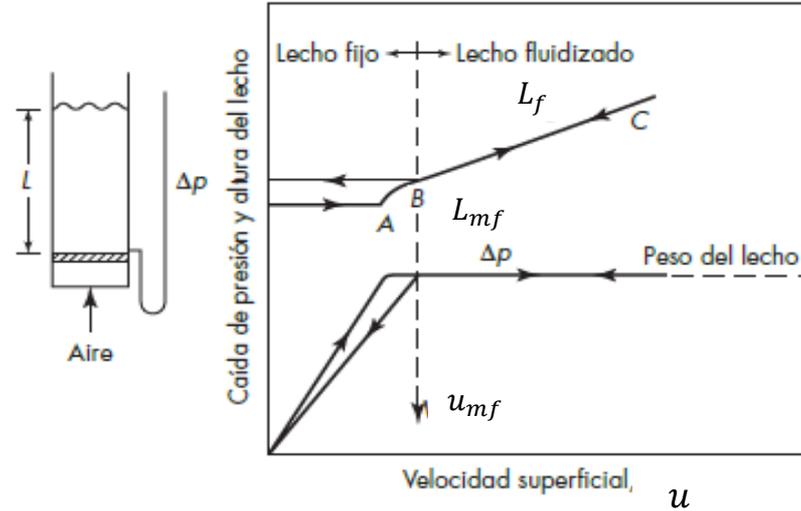
$Re_p = \frac{\rho v_t D_p}{\mu}$

$D_p \equiv D_V$

LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) condición de operación  $u_f$ ; expansión del lecho fluidizado



En la operación del lecho fluidizado,  $u_{mf} < u_f < u_{sett}$



$$C_i = (1 - \epsilon_i) \quad i: B, mf, f, sett$$

A las velocidades de operación  $u_{mf} < u < u_{sett}$ , la altura  $L_f$  se incrementa ( $L_{mf} < L_{fi}$ ) manteniendo constante la caída de presión  $\Delta P_{B,max}$ . La masa total del lecho,  $m_B = L_{fi} A_B C_i \rho_s$  permanece constante.

# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) condición de operación $u_f$ ; expansión del lecho fluidizado

Masa  $m_B$ , del material particulado verifica  $m_B = L_f A_B C_f \rho_s = L_f A_B (1 - \varepsilon_f) \rho_s = ctte$

En cualquier condición fluidizada, la caída de Presión  $\Delta P_f = ctte$

$$\Delta P_f = (1 - \varepsilon_f) L_f g (\rho_s - \rho)$$

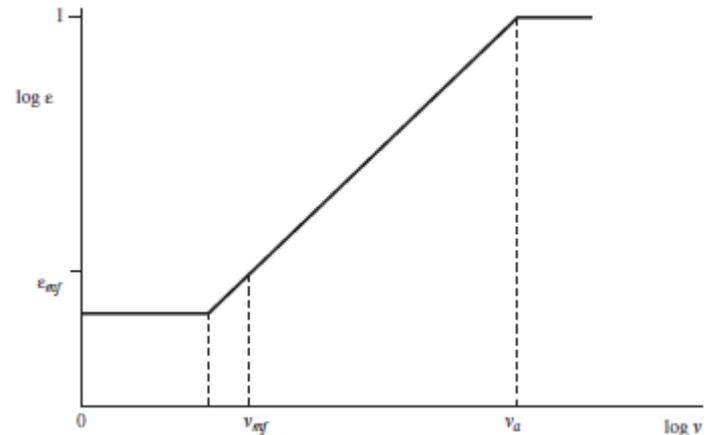
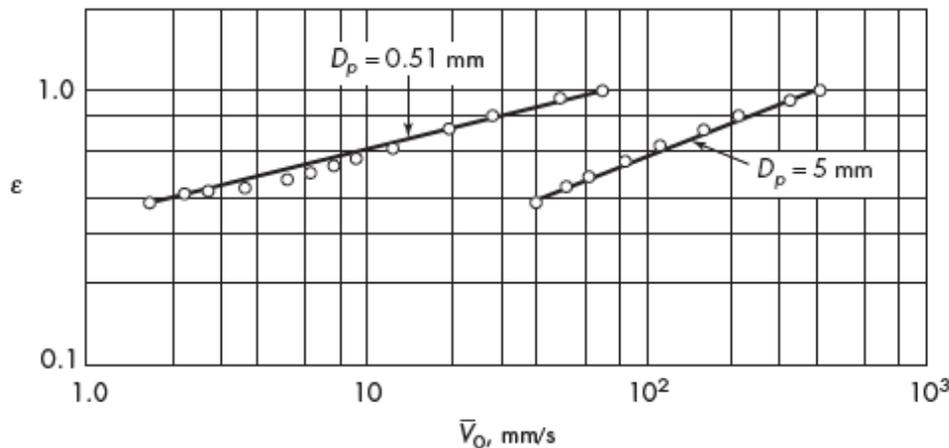
La modificación en sentidos contrarios de  $\varepsilon_f$  y  $L_f$  mantiene  $\Delta P_f = ctte$

Grado de expansión  $\Delta P_f = ctte$  o  $m_B = ctte$   $(1 - \varepsilon_{mf}) L_{mf} g (\rho_s - \rho) = (1 - \varepsilon_f) L_f g (\rho_s - \rho) \rightarrow \frac{L_f}{L_{mf}} = \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{(1 - \varepsilon_f)}$

$$Ar = \frac{\rho D_{SV}^3 g (\rho_s - \rho)}{\mu^2} \quad Ar = 150 \frac{(1 - \varepsilon_f)}{\varepsilon_f^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_f}{\mu} \right) + 1,75 \frac{1}{\varepsilon_f^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_f}{\mu} \right)^2$$

Relación de velocidades,  $\Delta P_f = ctte$ , verifica  $1 = \frac{150 \frac{(1 - \varepsilon_f)}{\varepsilon_f^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_f}{\mu} \right) + 1,75 \frac{1}{\varepsilon_f^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_f}{\mu} \right)^2}{150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu} \right) + 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu} \right)^2}$

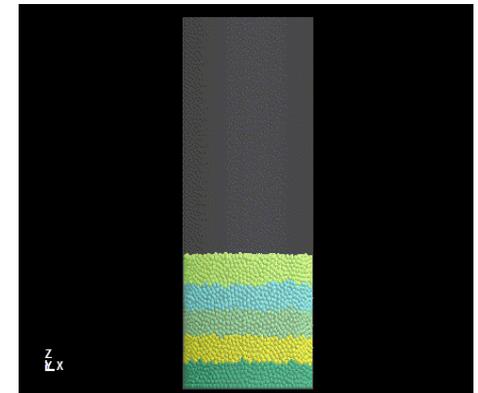
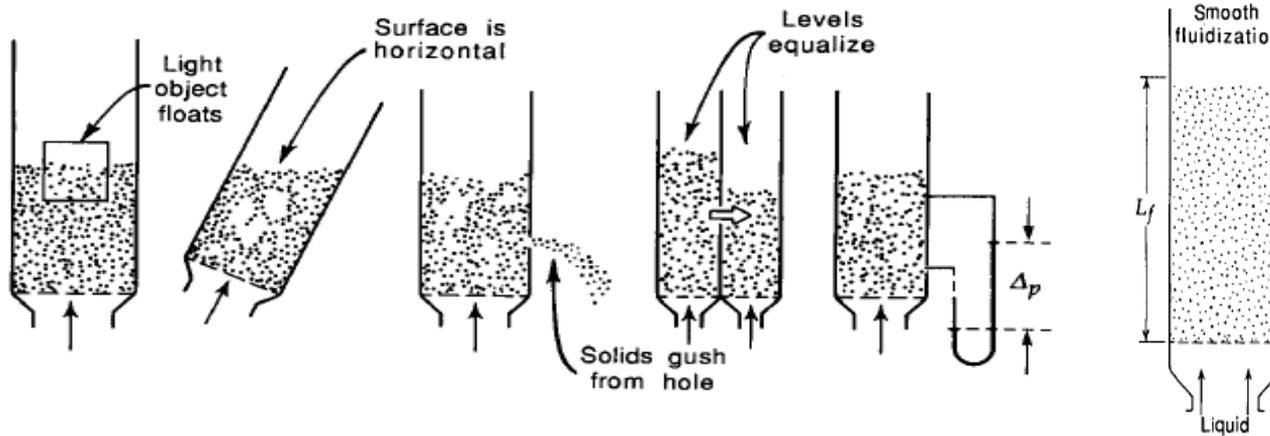
$\Delta P_f = ctte$  verifica en  $u_{mf} < u_f < u_{sett}$



# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Régimen de operación del lecho fluidizado

**Fluidización de partículas (*particulate, smooth*):** se presenta cuando las densidades del fluido,  $\rho$ , y del sólido,  $\rho_p$  no son muy diferentes, con diámetros de partículas ( $D_p$ ) pequeños y por lo tanto velocidades superficiales ( $u$ ) bajas; el lecho se fluidifica de manera uniforme, con cada partícula moviéndose individualmente en una trayectoria libre media uniforme. Este régimen es característico de los **sistemas líquido - sólido**

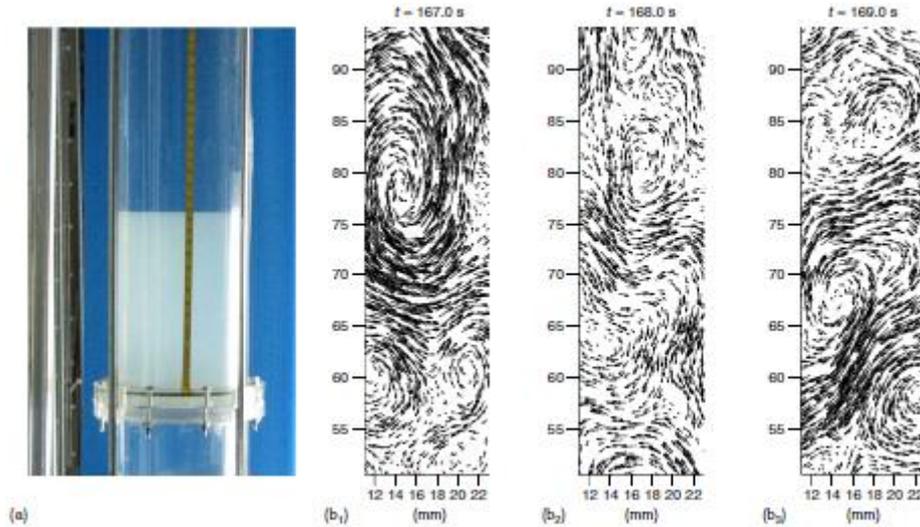
$$u_f = \frac{(\rho_s - \rho)gD_{SV}^2\epsilon_f^3}{150\mu(1 - \epsilon_f)} \quad Re_p < 20 *$$



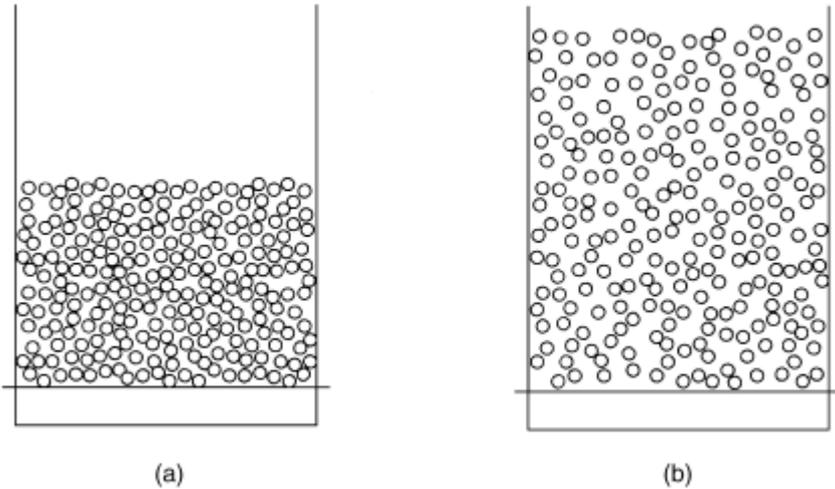
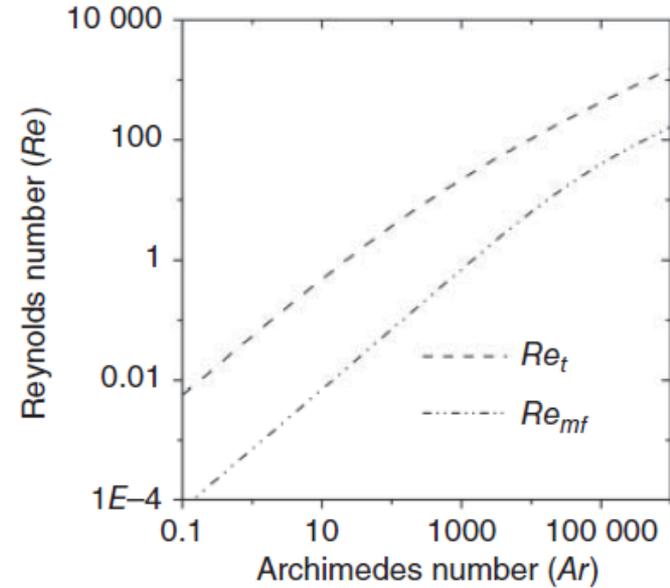
Comparación de un lecho fluidizado con un líquido

\* forma acotada de la ecuación de Arquímedes

# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Régimen de operación del lecho fluidizado campo de existencia



Fluidización “suave”



**Campo de existencia** de lechos fluidizados líquido - sólido ( $Re_{mf}$ : Reynolds mínima fluidización,  $Re_t$ : Reynolds en la condición de arrastre)

Expansión de un lecho líquido fluidizado: a)  $u_{mf}$  b)  $u_{mf} < u_f$

## Grado de expansión del lecho fluidizado relación porosidad – velocidad superficial

Para una velocidad de operación  $u_{mf} < u_f < u_{sett}$ , la altura  $L_f$  se incrementa ( $L_{mf} < L_f$ ) manteniendo constante la caída de presión  $\Delta P_{B,max}$

A la altura de operación  $L_f$ , para un área de lecho  $A_B$ , una masa de partículas  $m_B$ , la porosidad del lecho fluidizado está determinada por:

$$\varepsilon_f = 1 - \frac{m_B}{\rho_s A_B L_f}$$

A un dado caudal volumétrico  $Q_V$ , la velocidad superficial de operación  $u_f$  está definida por:

$$u_f = \frac{Q_V}{A_B}$$

Una relación entre  $\varepsilon_f$ , y  $u_f$  es la de Richardson - Zaki:  $u_f = u_i \varepsilon_f^n$  con  $u_i \approx k u_{sett}$ ;  $0,8 \leq k \leq 1$

$$0,015 Ar^{0,5} = \frac{4,8 - n}{n - 2,4} \quad \text{Partículas aproximadamente esféricas } \psi \geq 0,7$$

$D_p \equiv D_{SV}$

Powder Technology 343 (2019) 465–478



Contents lists available at ScienceDirect

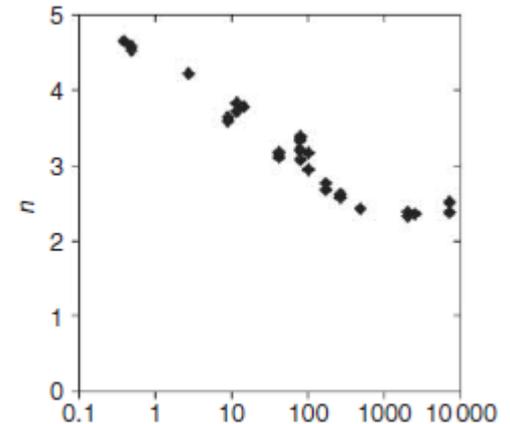
Powder Technology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/powtec](http://www.elsevier.com/locate/powtec)



Improvement of the Richardson-Zaki liquid-solid fluidisation model on the basis of hydraulics

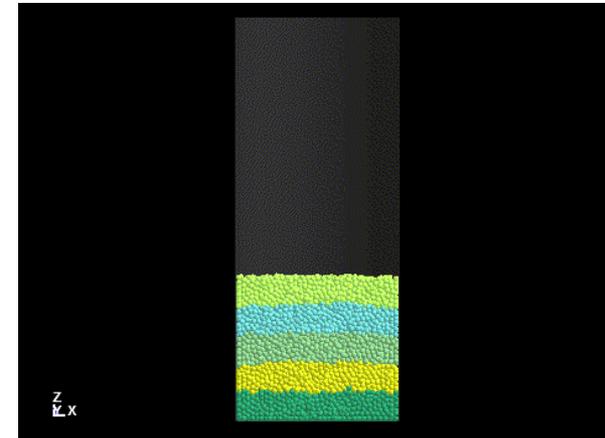
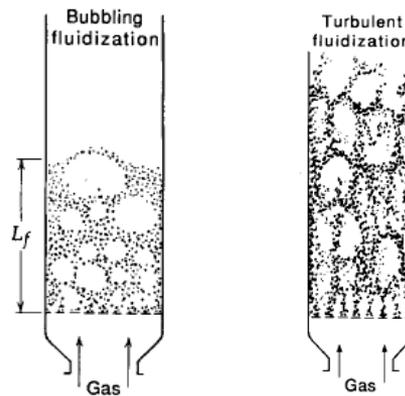
O.J.I. Kramer <sup>a,b,c,d,\*</sup>, P.J. de Moel <sup>a,e</sup>, E.T. Baars <sup>c</sup>, W.H. van Vugt <sup>d</sup>, J.T. Padding <sup>b</sup>, J.P. van der Hoek <sup>a,c</sup>



$$Re_{pt} = \frac{\rho v_t D_p}{\mu}$$

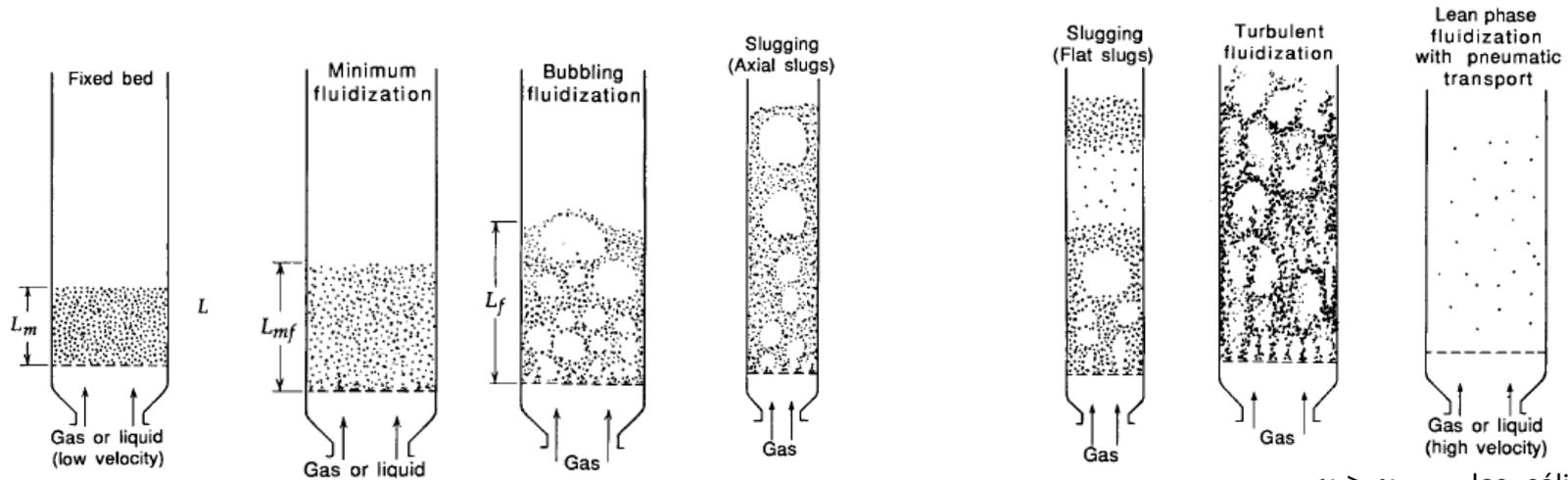
**Fluidización de agregados o burbujeante (*bubbling*):** se presenta cuando las densidades del fluido,  $\rho$ , y del sólido,  $\rho_p$  son muy diferentes, con diámetros de partículas ( $D_p$ ) grandes y por lo tanto velocidades superficiales ( $u$ ) altas. La fluidificación no es homogénea y la mayor parte del fluido pasa a través del lecho en grandes burbujas, las que desaparecen en su superficie, dando lugar a la aspersion de las partículas en su parte superior. Este régimen se presenta frecuentemente en **sistemas gas – sólido**.

$$u_f = \left[ \frac{D_{SV}}{1,75} \frac{(\rho_s - \rho) g \varepsilon_f^3}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad Re_p > 1000 *$$



\* forma acotada de la ecuación de Arquímedes

# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Régimen de operación del lecho fluidizado sistemas sólido -gas



Velocidad  $u$  muy baja no puede oponerse al peso de las partículas; el lecho permanece fijo

A  $u_{mf}$  el lecho iniciará la fluidización

Las burbujas coalescen y crecen, conformando tapones de gas (*slug*); pueden expandirse a lo ancho del lecho. Las partículas pequeñas fluyen hacia abajo en las cercanías de la pared, alrededor de los paquetes de gas que ascienden

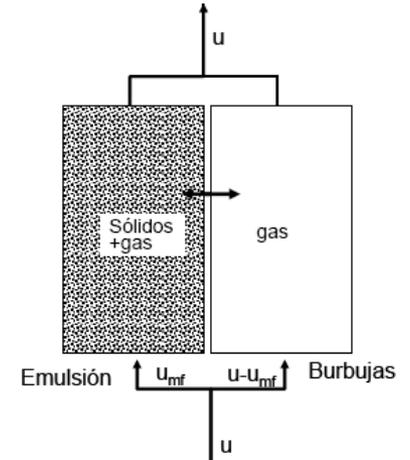
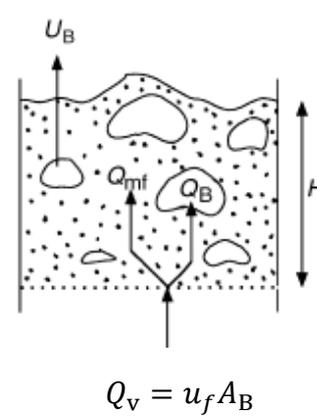
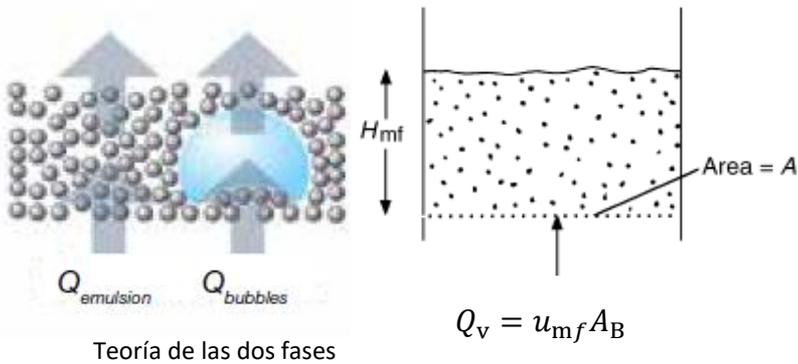
Partículas más grandes, el lecho que queda debajo de una burbuja es empujado como con un pistón. Los sólidos se reintegran al lecho porque "llueven" a través de los paquetes de gas

$u > u_{sett}$ , los sólidos son arrastrados fuera del lecho. Es posible el transporte neumático.

Modelos de interfase gas-sólido en un lecho fluidizado 

Dos modelos: El de dos fases (burbuja-emulsión) y el modelo trifásico (burbuja-nube / estela-emulsión).

El modelo de dos fases consta de una fase densa, o emulsión, formada por un gran número de partículas, y una fase diluida, o burbuja, sin partículas. Modelo trifásico que consiste en la combinación en fase de emulsión, flujo pistón en fase de burbuja; las reacciones heterogéneas ocurren en fase de emulsión, condición mínima de fluidización en la fase de emulsión. El movimiento de los sólidos ocurre solo mientras las burbujas pasan a través de la emulsión.



J MATER RES TECHNOL. 2015, 4(2):208-216



Review Article

Fluidized bed modeling applied to the analysis of processes: review and state of the art

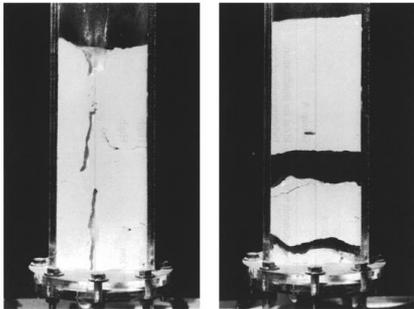
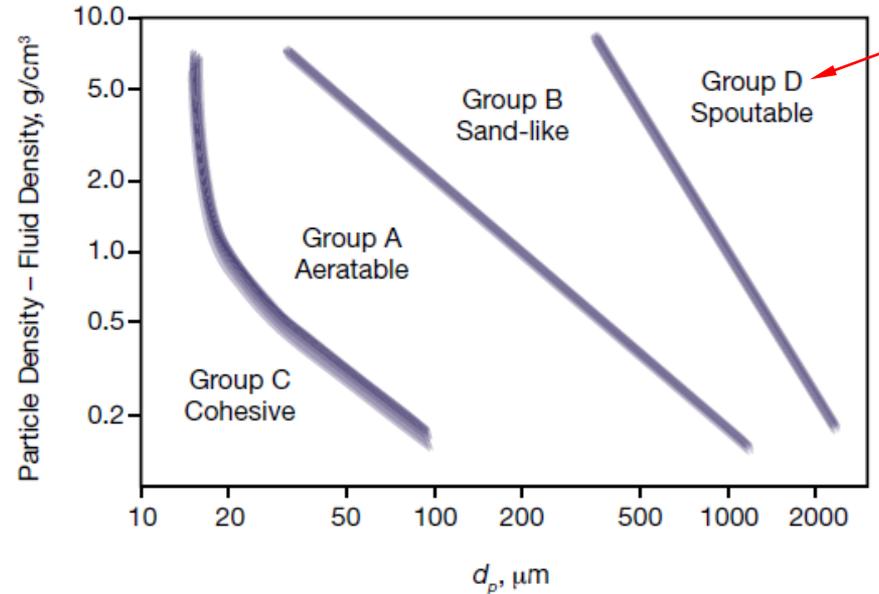


Caterina Gonçalves Philippsen<sup>a,\*</sup>, Antônio Cezar Faria Vilela<sup>a</sup>, Leandro Dalla Zen<sup>b</sup>

# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Régimen de operación del lecho fluidizado sistemas sólido -gas

La clasificación de **Geldart**, establece un criterio para predecir modos de fluidización y la transición de un modo a otro; está basado en el comportamiento de las partículas: Grupo **C**: Cohesivas; Grupo **A**: Aireadas, Grupo **B**: Burbujeo fácil (arenosas), Grupo **D**: jet (*spoutable*). El orden CABD está asociado al tamaño de partícula

Grupo **C**: Cohesivas, los sistemas particulados de este grupo C están dominados por fuerzas cohesivas entre partículas, de modo que no fluidizan fácilmente, sino que tienden a formar fisuras a través de las cuales fluye el gas. Un ejemplo es la harina.

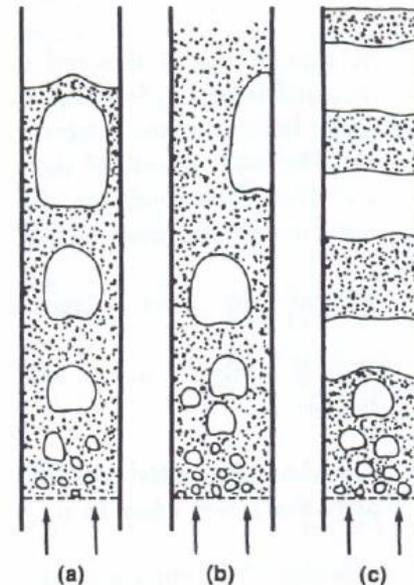
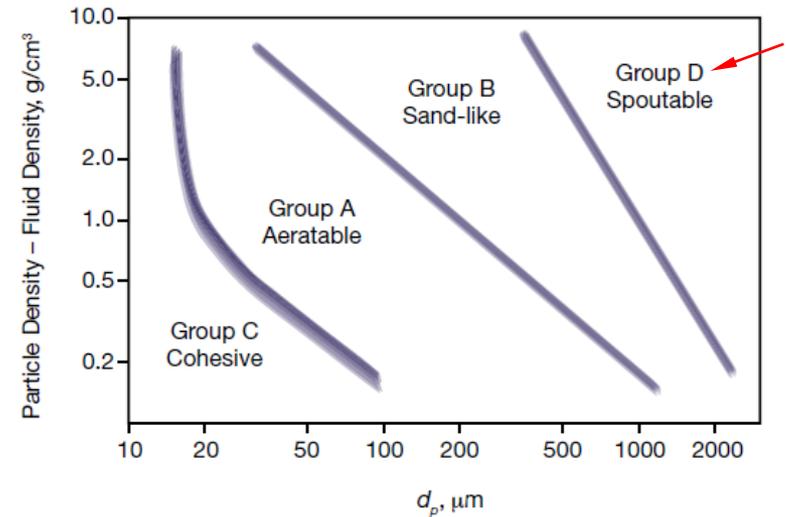


Grietas y canales en la fluidización de partículas C

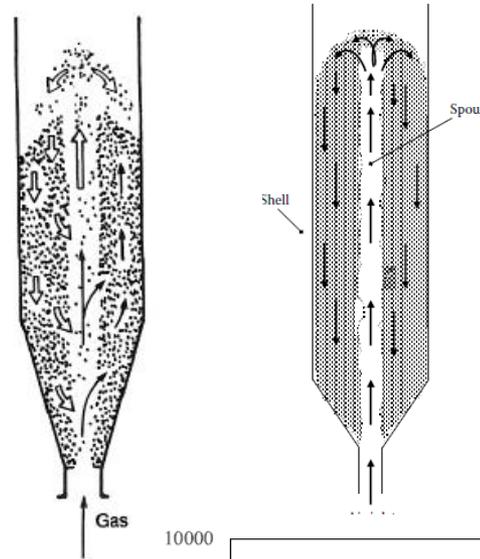
## LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Régimen de operación del lecho fluidizado sistemas sólido -gas

**Grupo A: Aireadas.** Las fuerzas entre partículas juegan un papel apreciable, pero no dominante. Cuando el flujo de gas ascendente a través de un lecho de un material de este grupo es suficiente para fluidizar las partículas, el flujo adicional conduce a la expansión del lecho, inicialmente sin la formación de burbujas. Los materiales de este grupo fluidizan suavemente. Es un ejemplo de este grupo los catalizadores basados en zeolitas para crackeo catalítico de hidrocarburos (FCC).

**Grupo B: Burbujas fáciles** (arenosas). Las interacciones interpartículas no son significativas. Los sistemas de este grupo no fluidizan suavemente y forman burbujas en el inicio de la fluidización. Las arenas de playa son ejemplo de este tipo de régimen. En un lecho fluidizado angosto y alto, las burbujas pueden crecer hasta el diámetro del lecho y formar estos slugs, o tapones de gas, los que pueden ser slugs axiales (a), sobre las paredes (b) o separarse completamente el gas de la emulsión (c).



Grupo **D**: Corresponden a partículas grandes, de difícil fluidización. Una técnica para su tratamiento es utilizar chorros de gas (Jet) obteniéndose lechos de chorro estables (*spouted beds*). En general el gas se canaliza, y se requieren grandes caudales de aire para lograr la fluidización.



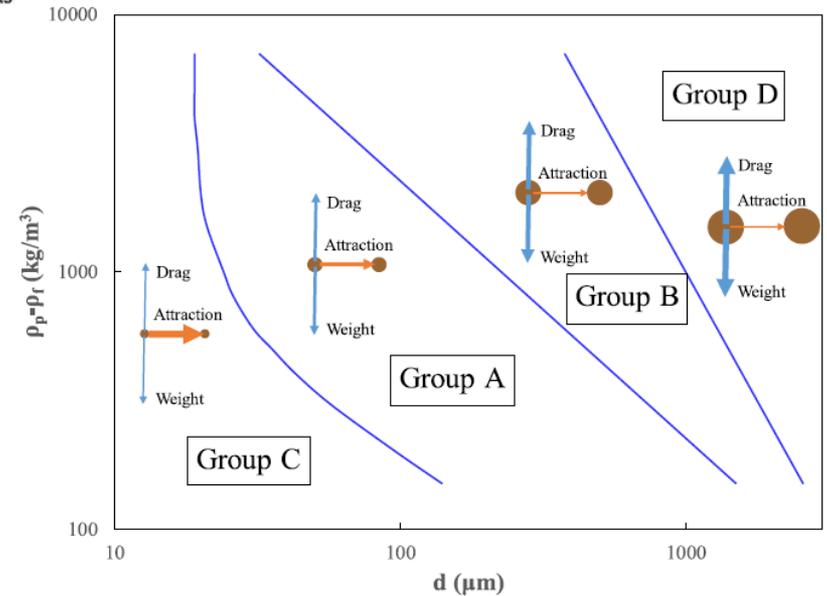
Chemical Engineering Science 229 (2021) 116029

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Engineering Science

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ces](http://www.elsevier.com/locate/ces)

Revisiting classification of powders based on interparticle forces  
Navid Mostoufi



Esta clasificación no es taxativa; es dependiente del sistema y de las condiciones de operación.

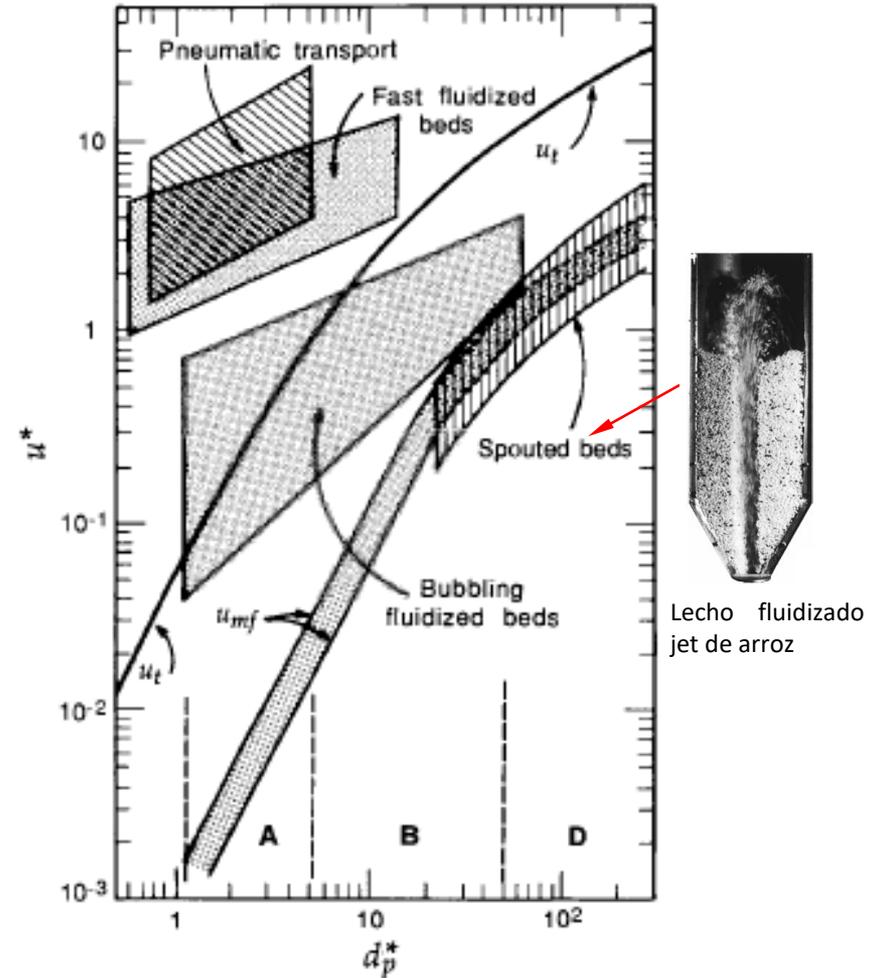
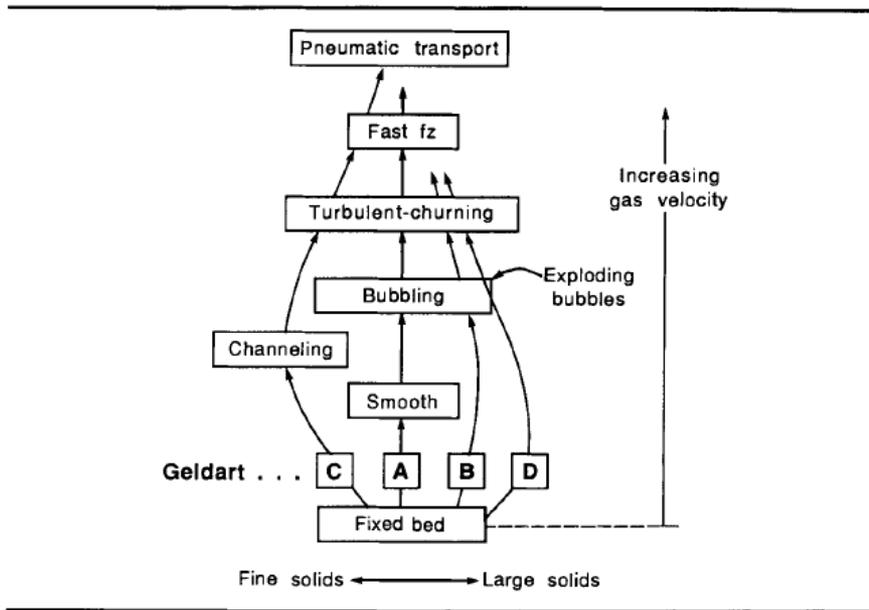
# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Régimen de operación del lecho fluidizado sistemas sólido -gas

## Régimen de operación del lecho fluidizado



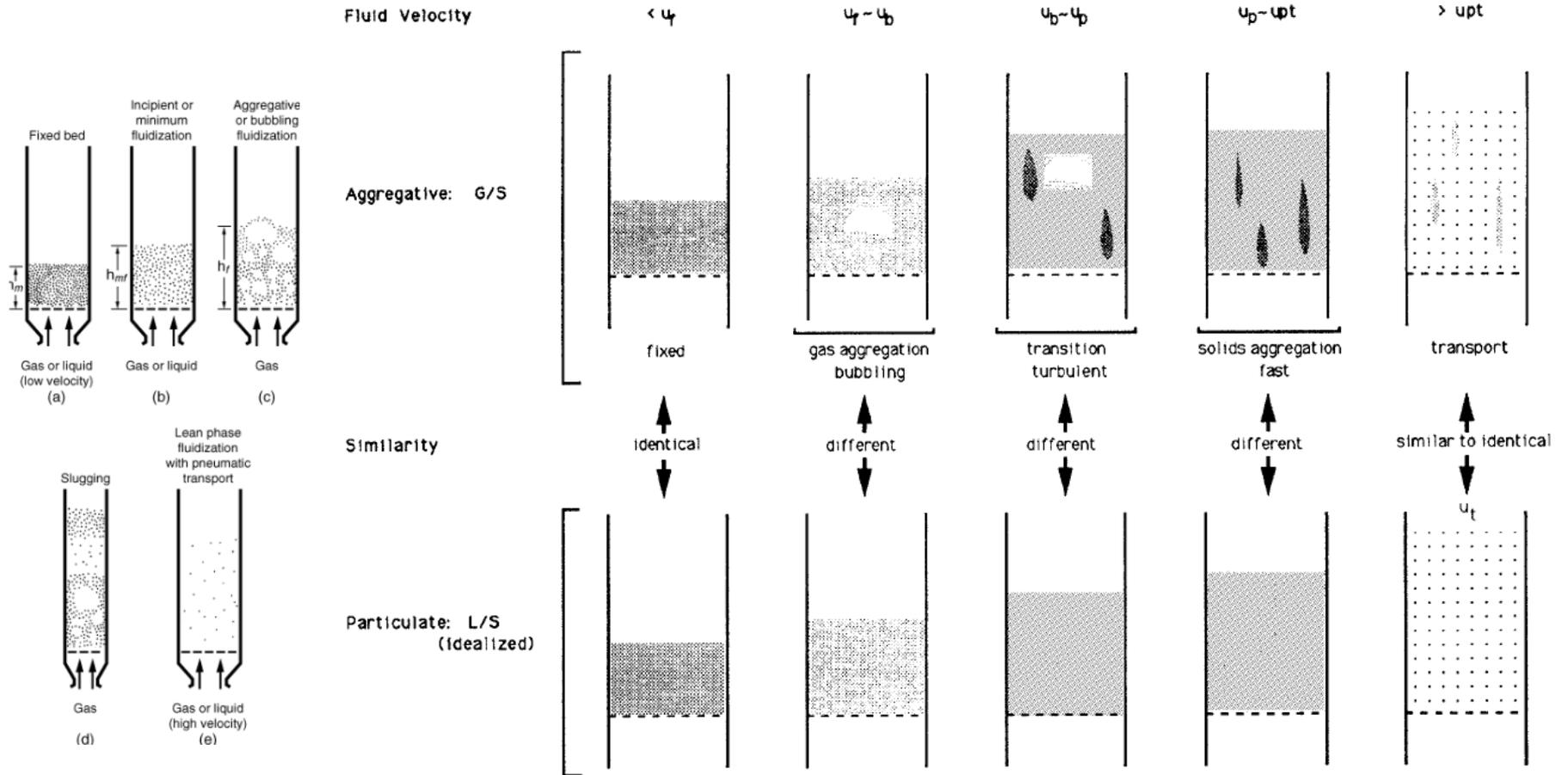
Un 3er criterio es la gráfica de Kunii-Levenspiel, según los números adimensionales de Hayden y Levenspiel (1989)

$$D_p^* = D_p \left( \frac{\rho g (\rho_p - \rho)}{\mu^2} \right)^{\frac{1}{3}} = Ar^{\frac{1}{3}} \quad u^* = u \left( \frac{\rho^2}{\mu g (\rho_p - \rho)} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{Re_p}{Ar^{\frac{1}{3}}}$$



p90

# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Régimen de operación del lecho fluidizado similitudes y diferencias



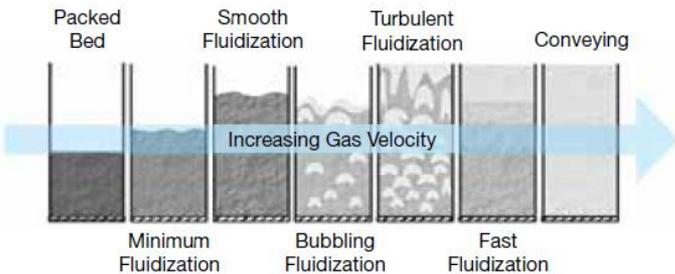
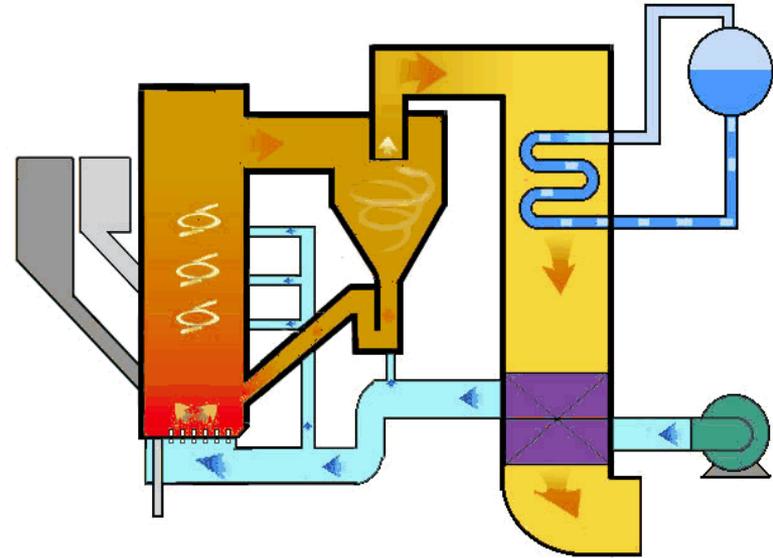
## PARTICULATE FLUIDIZATION: AN OVERVIEW

Mooson Kwauk\*



Lecho fluidizado con recirculación CFB (Circulating Fluid Bed o *Fast Fluidized Bed*)

Por incrementarse las capacidades de transferencia puede ser beneficioso operar un lecho a velocidades superficiales  $u$  grandes. Asimismo, ya que no todas las partículas son del mismo tamaño y que el  $D_{SV}$  es solo un tamaño medio, es probable que se produzcan partículas finas con el fluido a las relaciones  $\frac{u_{sett}}{u} > 30$ . En este régimen, el particulado puede recuperarse mediante filtros o separadores ciclónicos y devolverse al proceso.



**Fast Fluidization:** La fluidización rápida implica un flujo de fase densa *nonslugging* en el que aparecen grupos de partículas que se transportan hacia arriba con una circulación interna considerable.

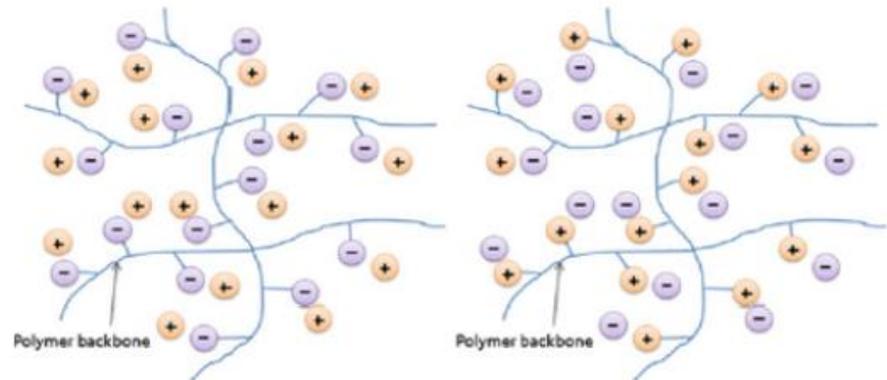
## Intercambio iónico

- El intercambio iónico es la operación unitaria que permite la separación de especies iónicas disueltas mediante su transferencia desde la fase líquida a un material intercambiador sólido, en el que sustituyen a otros iones de la misma carga eléctrica, que a su vez pasan a la fase líquida.
- En el proceso, de naturaleza reversible, no se producen transformaciones químicas en las especies iónicas que intervienen ni en el material intercambiador, circunstancia que permite su recuperación tras el intercambio iónico
- Las aplicaciones industriales de los procesos de intercambio iónico son numerosas: recuperación de cationes metálicos en disolución, separación de mezclas de especies iónicas, purificación de líquidos, liberación controlada de una especie química, recuperación de sales, ablandamiento de aguas y desmineralización de aguas, tratamiento químico: eliminación de alcalinidad; de cationes de metales; de aniones de ácidos fuertes tales como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ).



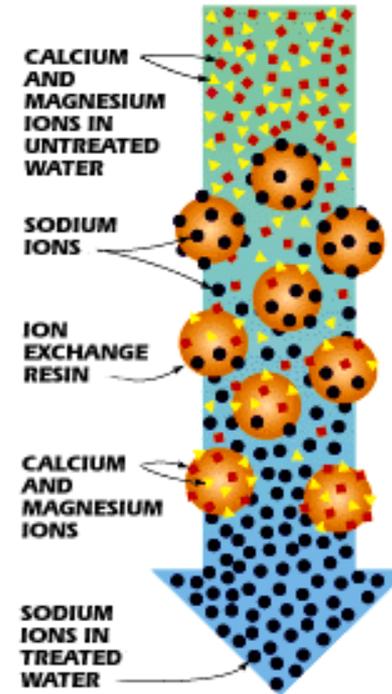
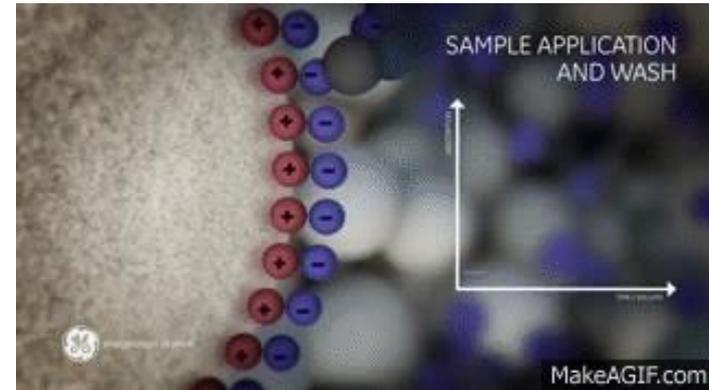
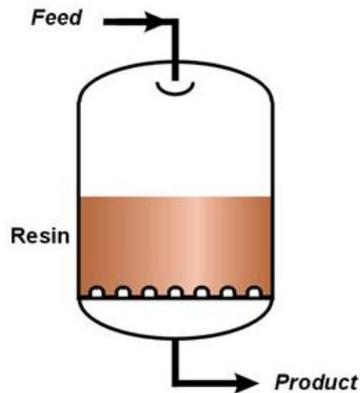
## Intercambio iónico

- En la práctica industrial se recurre a resinas intercambiadoras sintéticas, específicamente diseñadas para la recuperación de iones en condiciones de trabajo (medio acuoso, temperatura, presión, pH) determinadas.
- Las resinas de intercambio iónico se presentan normalmente en forma de partículas esféricas compuestas por un polímero reticulado al que se incorporan grupos funcionales específicos. La selección del grupo funcional determinará la naturaleza de las especies iónicas con las que puede establecerse el intercambio entre la resina y la solución acuosa que la rodea



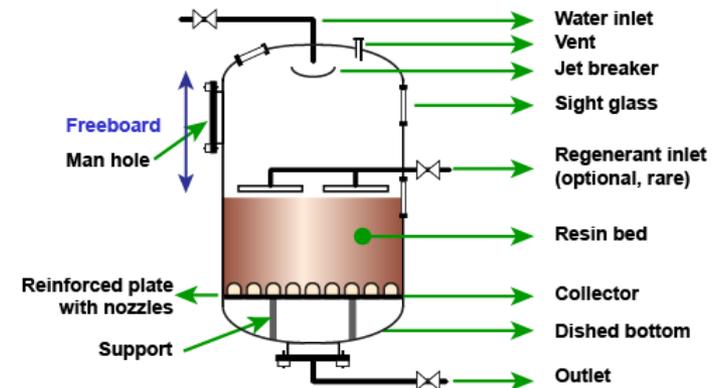
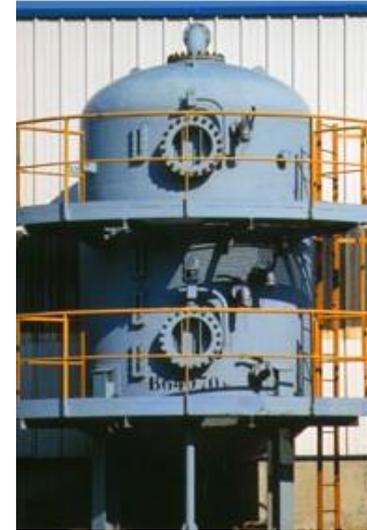
## Intercambio iónico proceso

- El proceso de intercambio entre la resina y la solución acuosa comprende etapas de difusión, adsorción, atracción electrostática y equilibrio ácido-base. El proceso es totalmente reversible, y bajo las condiciones adecuadas, el equilibrio puede ser desplazado en sentido contrario, dando lugar a la forma química original. Esta propiedad permite que las resinas de intercambio iónico puedan ser utilizadas a lo largo de muchos ciclos de carga y regeneración.



## Intercambio iónico proceso

- La columna no se rellena en su totalidad con la resina, sino que se deja suficiente espacio libre sobre el lecho para permitir la expansión del mismo.
- Las columnas de intercambio deben diseñarse considerando la pérdida de carga que se produce en el lecho, optimizando sección/altura o seleccionando cuidadosamente el tamaño de partícula. También deben procurar la distribución homogénea del líquido en el conjunto del lecho mediante el correcto dimensionamiento de los caudales de trabajo



*Columna regenerada de coflujo*

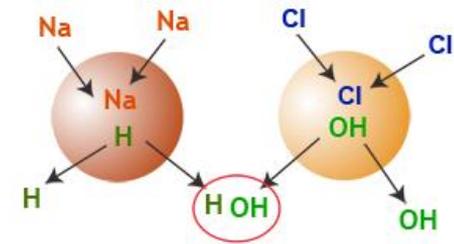
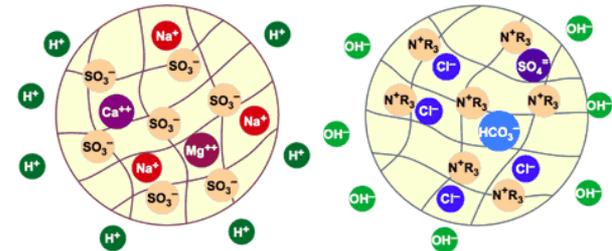
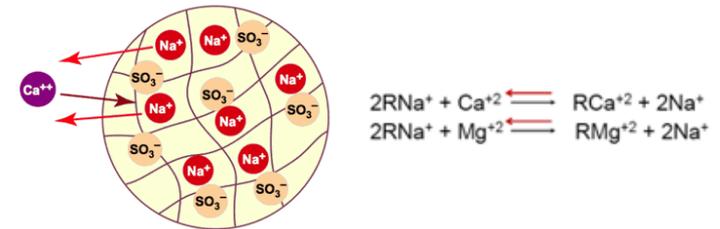
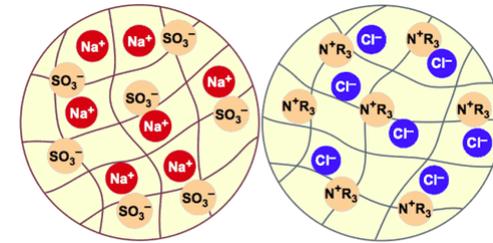
## Intercambio iónico tipos de resinas

**SAC**, Resinas catiónicas ácido fuerte: se caracterizan por tener grupos sulfónicos  $-\text{SO}_3^-$  como grupos funcionales. En forma de sodio, eliminan la dureza (esencialmente calcio y magnesio) del agua y otras soluciones. En forma de hidrógeno, eliminan todos los cationes. También se utilizan como catalizadores ácidos.

**WAC**, Resinas catiónicas ácido débil: Son resinas caracterizadas por la presencia del grupo carboxilo  $-\text{COOH}$  como grupo funcional. En forma de hidrógeno, eliminan preferentemente los iones divalentes (por ejemplo, calcio y magnesio) de las soluciones que contienen alcalinidad.

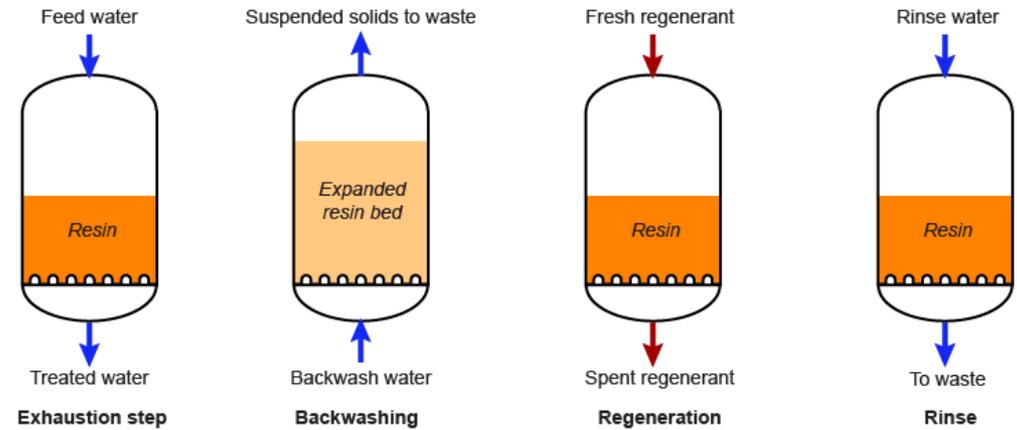
**SBA**, Resinas aniónicas base fuerte: Llevan iones de amonio cuaternario  $-\text{NR}_4^+$  en su estructura como grupos funcionales. En forma de hidróxido, eliminan todos los aniones. En forma de cloruro, eliminan el nitrato, el sulfato y varios otros iones.

**WBA**, Resinas aniónicas base débil: Llevan grupos amino  $-\text{NH}_2$  en su estructura. Después del intercambio catiónico, eliminan cloruro, sulfato, nitrato y otros aniones de ácidos fuertes, pero no eliminan ácidos débiles ( $\text{SiO}_2$  y  $\text{CO}_2$ .)



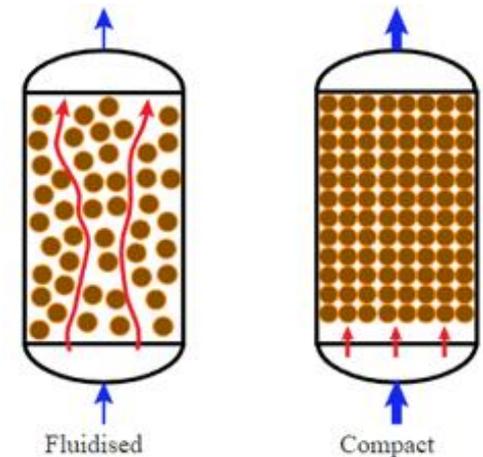
## Intercambio iónico operación

Procesos cíclicos de operación hasta el agotamiento de la capacidad de intercambio de la resina, momento en el que se procede a la subsiguiente regeneración de la misma. Un ciclo de trabajo típico consta de las siguientes fases o etapas:



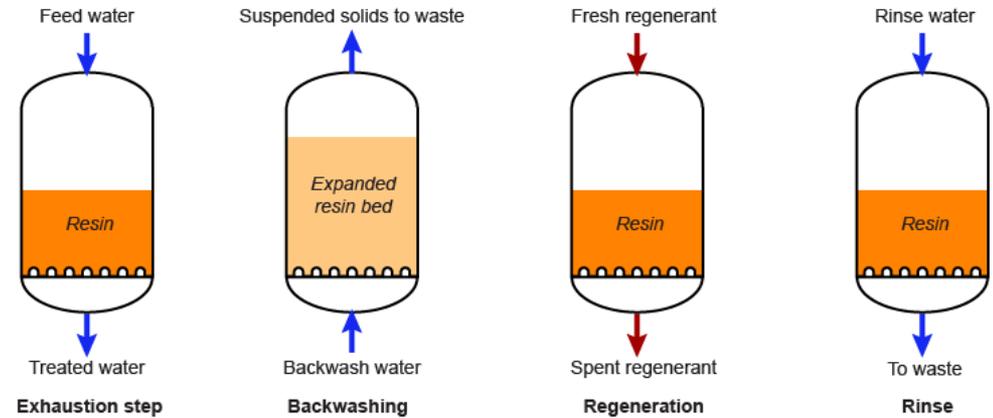
1. **Operación:** la solución de electrolitos a ser tratada se hace circular a través del lecho, recogándose a su salida con la composición iónica modificada. La especie iónica de interés queda incorporada a la fase sólida.

2. **Retrolavado** del lecho mediante un flujo ascendente de agua limpia. Esta etapa es en condición fluidizada (la única) con el propósito de eliminar los posibles finos y restos de partículas que se acumulan en el lecho de resina durante la fase de operación, así como a favorecer una reclasificación del material del lecho, evitando la formación de canales preferenciales



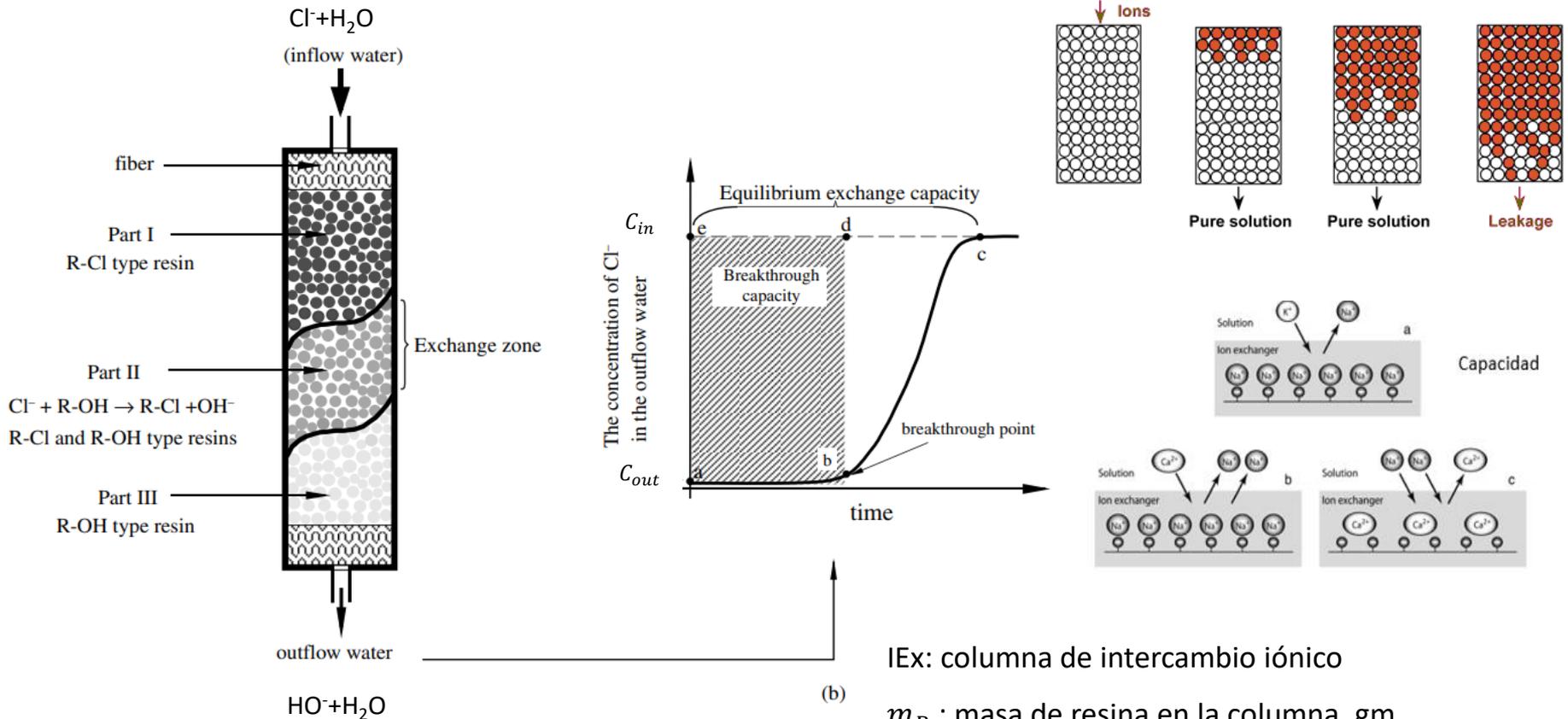
## Intercambio iónico operación

3. **Regeneración de la resina:** Esta fase tiene dos propósitos: recuperar los iones intercambiados en la fase de operación; regenerar las condiciones de servicio originales; a medida que transcurre la fase de operación, las resinas ven reducirse su capacidad de intercambio y es preciso volver a ponerlas en condiciones de servicio óptimas mediante el empleo de soluciones regeneradoras que restauren su forma iónica original y arrastran la especie iónica de interés desde la estructura de la resina. La regeneración puede ser en co-corriente o contracorriente



4. **Enjuagado:** propósito retirar el exceso de solución regenerante que haya podido quedar retenida en los poros de las partículas de resina y en los intersticios del lecho.

# Intercambio iónico operación; capacidad de intercambio de ruptura (*BEC: breakthrough Exchange Capacity*)



$$BEC = \frac{mEq}{m_R} = \frac{1}{m_R} (C_{in} - C_{out}) Q_{v,op} t_{op} \text{ meq. gm}^{-1}$$

$$mEq = \frac{mmoles}{v_{\pm} Z_{\pm}}$$

IEx: columna de intercambio iónico

$m_R$  : masa de resina en la columna, gm

$mEq$ : cantidad de iones absorbidos en la IEx, meq

$C_{in}$ : concentración del ion en el ingreso a la IEx, meq.L<sup>-1</sup>

$C_{out}$ : concentración del ion en el egreso de la IEx, meq.L<sup>-1</sup>

$Q_{v,op}$  : caudal de operación, L.min<sup>-1</sup>

$t_{op}$  : tiempo de operación, min

## Intercambio iónico parámetros de interés

### Capacidad de intercambio iónico ( $C_{iex}$ meq/L<sub>Res</sub>):

Es una medida de la cantidad de iones que es capaz de intercambiar en condiciones de trabajo concretas. Dado que los procesos de intercambio tienen lugar entre equivalentes químicos de las especies iónicas, la capacidad de intercambiado de las resinas se expresa habitualmente en equivalentes por unidad de volumen de resina.

$$\rho_{Res} C_{iex} \leq BEC \quad V_{Res} = A_{IEx} L_{IEx} (1 - \varepsilon_{IEx})$$

$$m_{Res} = V_{Res} \rho_{Res}$$

### Tiempo de autonomía ( $t_{op}$ ):

Balance de masa sobre ion intercambiado  $V_{Res} C_{IEx} = Q_v t_{op} (C_{in} - C_{out})$

IEx: columna de intercambio iónico

$m_{Res}$  : masa de resina en la columna, kg

$V_{Res}$ : Volumen de resina en la columna, L

$V_{IEx}$ : Volumen del IEx, L

$A_{IEx}$ : área transversal al flujo de la IEx dm<sup>2</sup>

$L_{IEx}$ : longitud del intercambiador

$\varepsilon_{IEx}$ : porosidad del lecho de resina

$\rho_{Res}$ : densidad de la resina g.L<sup>-1</sup>

Diámetro: 0,5 - 3,2 m

Caída de presión máx.: 150 kPa

## Intercambio iónico parámetros de interés

Tasa de servicio o tasas de flujo específico (BV, Bed Volume):  $BV[hr^{-1}] = \frac{\text{caudal de solución tratada}}{\text{volumen de resina}} = \frac{Q_v}{V_{resina}}$ ; Este

valor está determinado por la cinética de intercambio; para la mayor parte de las resinas se encuentra entre 5 y 50  $m^3 \cdot hr^{-1} \cdot m^{-3}$ , una tasa de servicio de 24 BV, implica un tiempo de residencia para el intercambio de  $t_{res} =$

$$\frac{1}{24} [hr] \times 60 \times \left[ \frac{min}{hr} \right] = 2,5 \text{ min.}$$

Número de líneas de intercambio operando simultáneamente se calcula a partir del caudal de alimentación y del volumen tratado por ciclo. El esquema más sencillo, es de dos líneas, de las cuales una está en operación y otra en regeneración, es aplicable a la mayor parte de los casos. El tiempo de regeneración total  $t_{reg}$  es fijado por el proveedor de resina

$$\text{no de lineas de iex} = \frac{t_{op} + t_{reg}}{t_{reg}}$$



Para abastecer el sector de calderas de una planta industrial con agua ablandada a partir de agua filtrada a 20°C se emplea un intercambiador iónico que opera según las condiciones descritas a continuación:

Condiciones operativas de la planta de tratamiento con marcha normal:

- Caudal de agua de alimentación: 180 m<sup>3</sup>.hr<sup>-1</sup>.
- La velocidad del agua en el interior de los equipos ablandadores será 75% menor que la velocidad para el comienzo de la fluidización.

Condiciones operativas para la regeneración de la resina:

- La operación se realizará en lecho fluidizado con una solución de salmuera (NaCl). Densidad salmuera: 1.10 g.cm<sup>-3</sup>; Viscosidad salmuera: 2.1 cp.
- La velocidad de fluidización será 50% menor que la velocidad de arrastre del lecho.

Características de la resina para el lecho:

- Partículas cilíndricas: 1 mm de diámetro y 2 mm de longitud
- Densidad de la resina: 1.5 g.cm<sup>-3</sup>.
- Relación de masa: 75 kg de resina por caudal (m<sup>3</sup>.hr<sup>-1</sup>) de agua a procesar.

- a) Diseñar el intercambiador iónico y calcular la cantidad necesaria de resina para llevar a cabo el proceso.
- b) Calcular la velocidad intersticial y la velocidad superficial de operación.
- c) Determinar la caída de presión en cada instancia (ablandamiento y regeneración), y la expansión del lecho en cada caso.
- d) Indicar el campo de existencia del lecho.



En un proceso de producción es necesario realizar la remoción boro de una solución mediante el uso de una columna de intercambio iónico. La resina seleccionada para el proceso es *Purolite™ S108*.

La solución ingresa a razón de  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1}$  con una concentración en boro de 1500 ppm en peso. A la temperatura de operación la solución tiene una viscosidad de  $1.16 \text{ cp}$  y una densidad de  $1000 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . La especificación de la corriente de salida es 30 ppm en Boro. Durante la operación se trabaja en la columna de intercambio iónico con una tasa de servicio de  $5 \text{ BV} \cdot \text{hr}^{-1}$  y una velocidad de  $10 \text{ m} \cdot \text{hr}^{-1}$ .

Actividades: a) Represente el diagrama de flujo de proceso. b) Especifique el sistema completo para obtener una operación continua. El proveedor de la resina de intercambio iónico suministra la siguiente distribución para las etapas de regeneración:

Etapas de regeneración	Fluido	Flujo ( $\text{BV} \cdot \text{hr}^{-1}$ )	Tiempo (min)
Desplazamiento	Agua desmineralizada	3	15
Retrolavado	Agua desmineralizada	9	20
Regeneración	Solución de HCl (8%) 160 g HCl.L <sup>-1</sup> resina	3	60
Enjuague	Agua desmineralizada	3	45
Conversión sódica	Solución NaOH (4%) 100 g NaOH.L <sup>-1</sup> resina	3	60
Enjuague	Agua desmineralizada	3	40