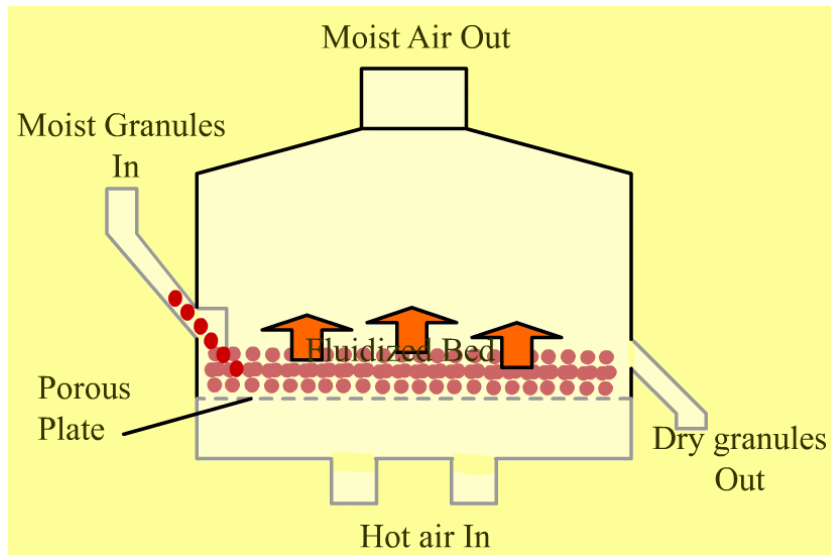


# Operaciones Unitarias 1

## Tecnología de los sistemas particulados

### ❖ Operaciones en Lechos fluidizados

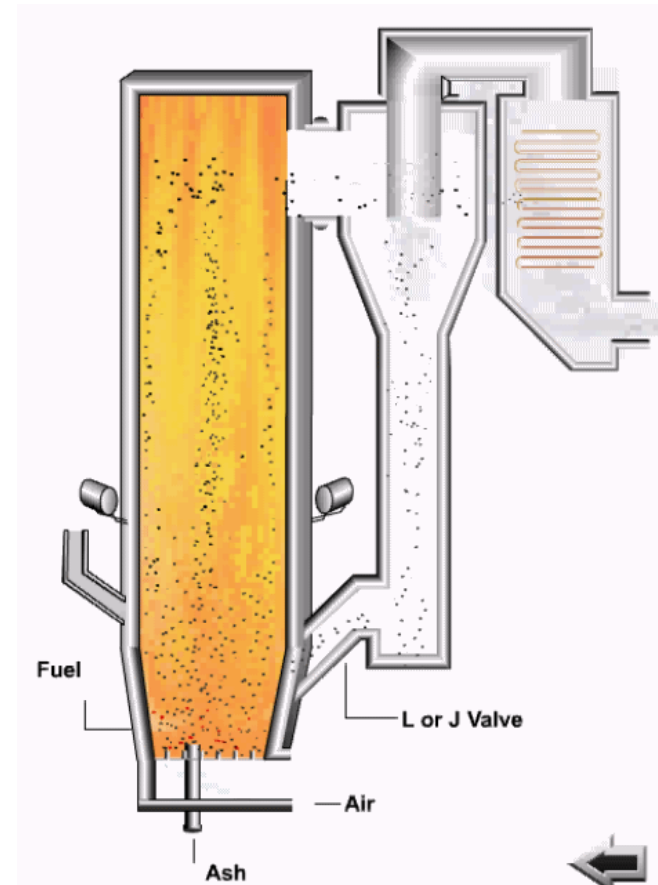


[https://youtu.be/SQ719OHZNBk?si=A1075elgvll\\_d\\_5L](https://youtu.be/SQ719OHZNBk?si=A1075elgvll_d_5L)

Animación de un secador de lecho fluidizado

[https://youtu.be/dwHFKyf\\_ZLc?si=hSeAGLR9ZSPU0M4F](https://youtu.be/dwHFKyf_ZLc?si=hSeAGLR9ZSPU0M4F)

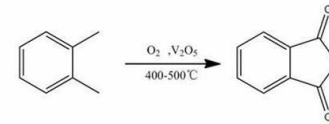
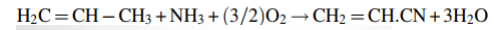
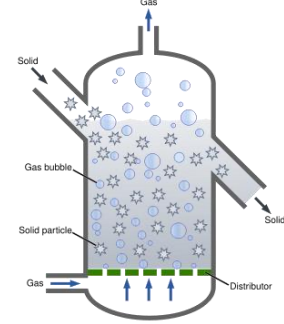
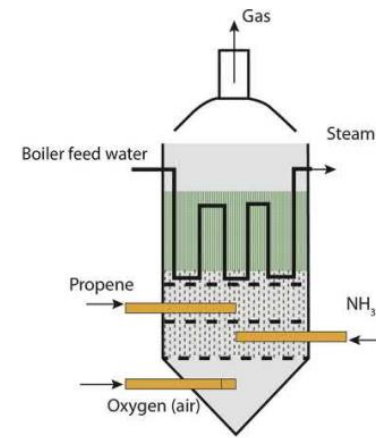
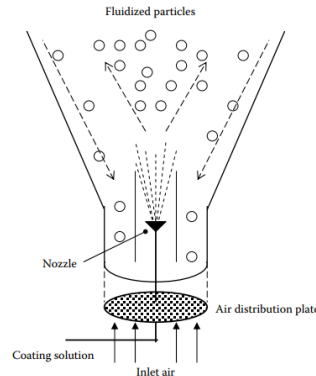
Secador de lecho fluidizado farmacéutico



# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*)

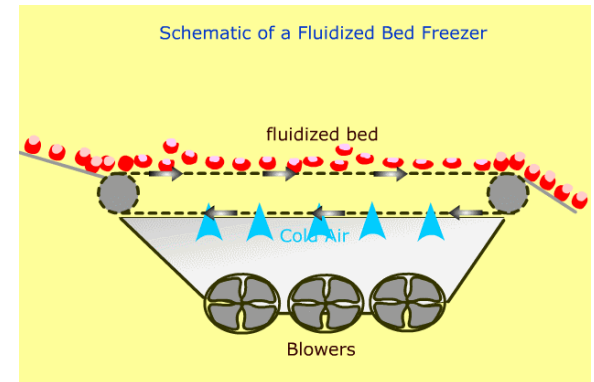
La razón más común para fluidizar un lecho es incrementar la interacción física y/o química de los sólidos en contacto con el fluido, haciendo que reacciones químicas y/o transferencias sean más eficientes.

- 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

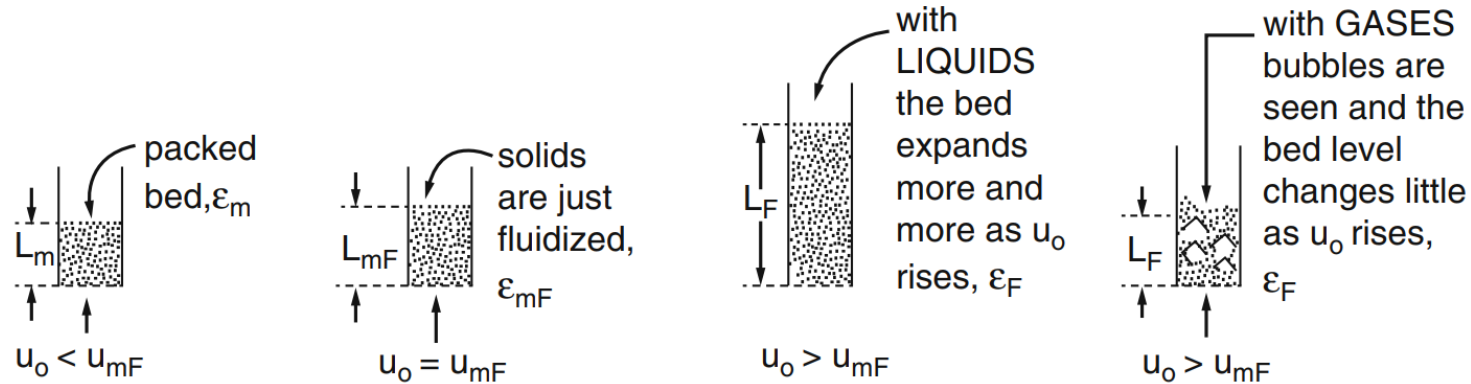


Los lechos fluidizados ofrecen tres ventajas distintas sobre otras tecnologías de proceso:

- 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*)

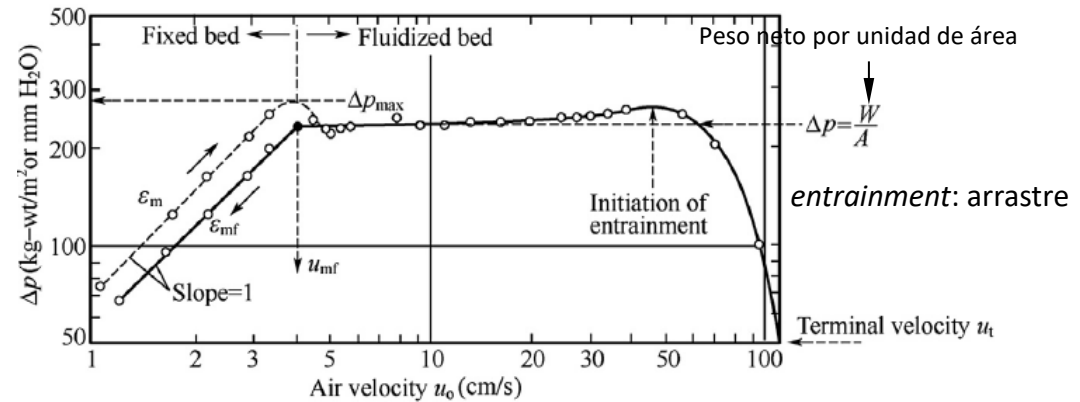
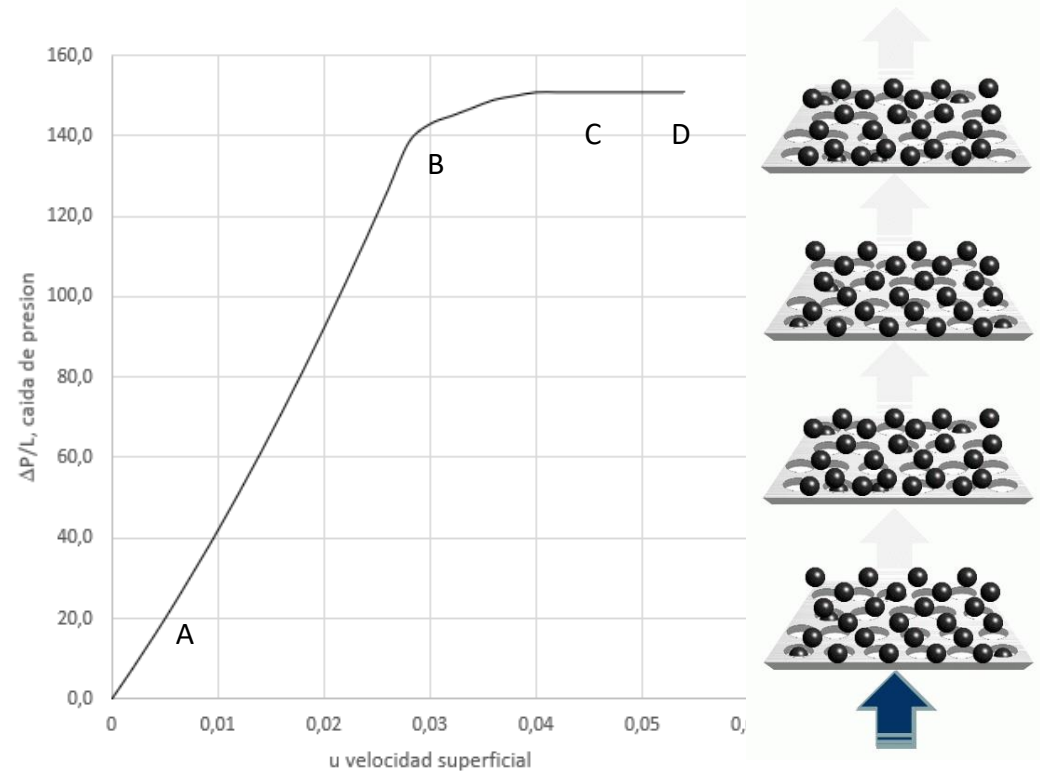


- Cuando un fluido pasa a muy baja velocidad a través de un lecho de partículas sólidas, las partículas no se mueven y el fluido percola a través de los espacios vacíos entre las partículas estacionarias.
- Con un aumento de la velocidad del fluido, se llega eventualmente a un punto donde las partículas 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

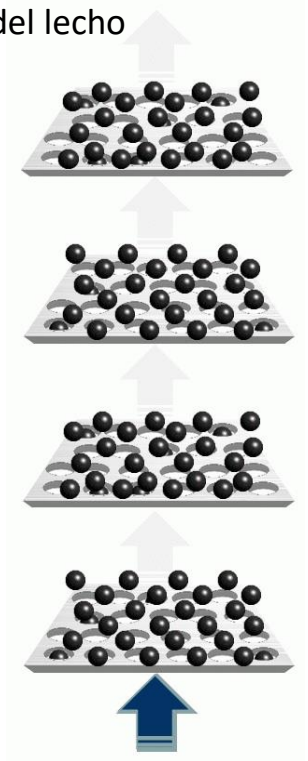
- Considerar un tubo vertical parcialmente lleno con material granular.
- La caída de presión a través del lecho se grafica en función de la velocidad superficial.
- En ausencia de flujo, la caída de presión (irreversibilidad)  $\Delta P_L$  es cero y el lecho tiene una cierta altura  $L_B$ .
- Al incrementar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

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

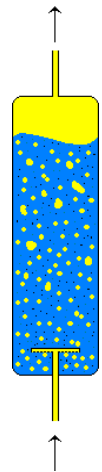


## LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Comportamiento de la caída de presión y de la altura del lecho

- 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.

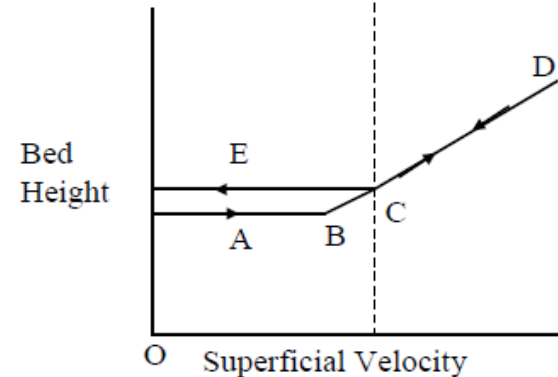
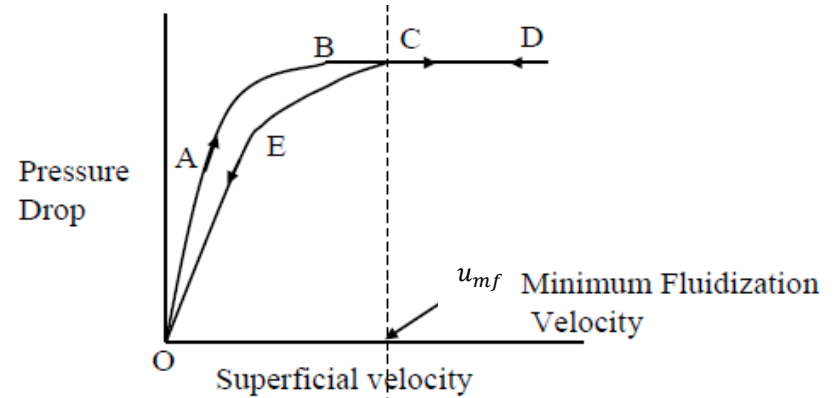
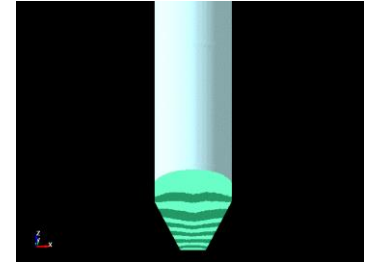


\* El lecho no experimenta aumentos de presión ya que la fase fluido-sólida está expandida y puede deformarse fácilmente sin ofrecer una resistencia apreciable. Comparar este comportamiento con el de los líquidos. Si en un tanque que contiene un líquido, se hace pasar un gas desde el fondo, debe vencerse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

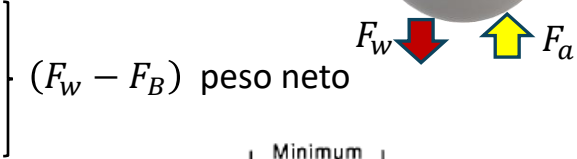


# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Condición de mínima fluidización

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

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

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

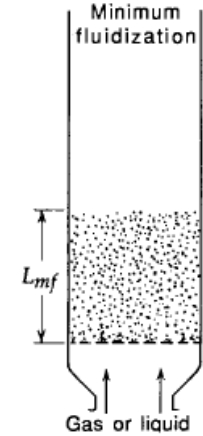


$(F_w - F_B)$  peso neto

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

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

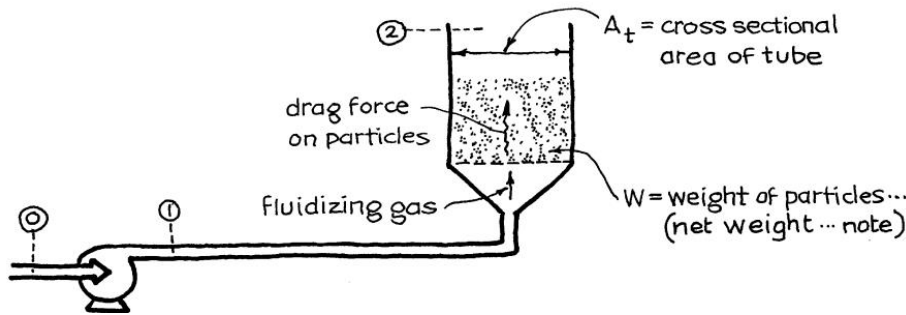
$$\Delta P_{B,mf} = (1 - \epsilon_{mf}) L_{mf} g (\rho_s - \rho) \text{ bar}$$



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:



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

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

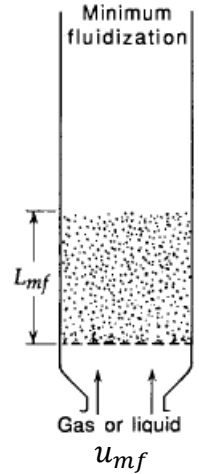
$$e_{B,f} = \frac{\Delta P_{B,mf}}{\rho} \left( \frac{Q_{v,u_f}}{Q_{v,u_{mf}}} \right)^2 \quad \text{Para } u_f > u_{mf}$$

# 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:

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

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:

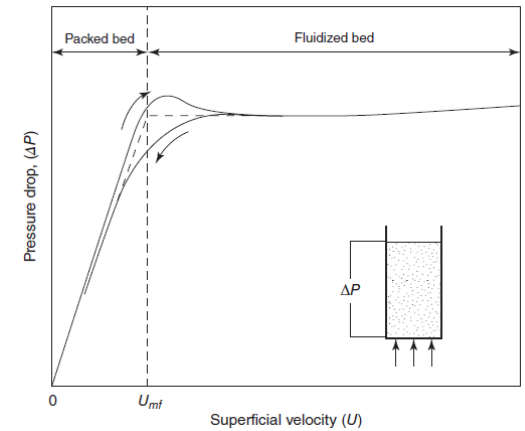
$$Ar = 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{p,mf}^2 \Rightarrow \frac{\rho D_{SV}^3 g (\rho_s - \rho)}{\mu^2} = 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu} \right)^2 \Rightarrow u_{mf} = \left[ \frac{D_{SV} (\rho_s - \rho) g \varepsilon_{mf}^3}{1,75 \rho} \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

$$Ar = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu} \right) + 1,75 \frac{1}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{D_{SV} \rho u_{mf}}{\mu} \right)^2 \quad \text{Requiere información simultánea de } \varepsilon_{mf} \text{ y } u_{mf}$$

## 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 - sólido. 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  $D_{SV} < 100 \mu\text{m}$

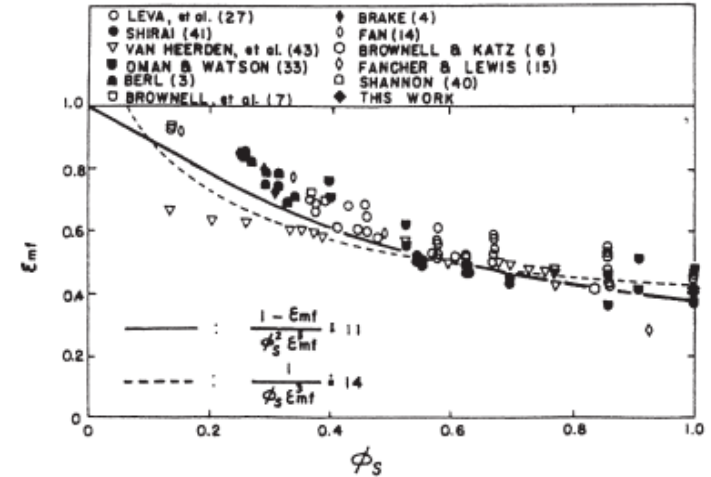
$$Re_{p,mf} = (C_1^2 + C_2 Ar)^{\frac{1}{2}} - C_1$$

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

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

## 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  $\rho_p$



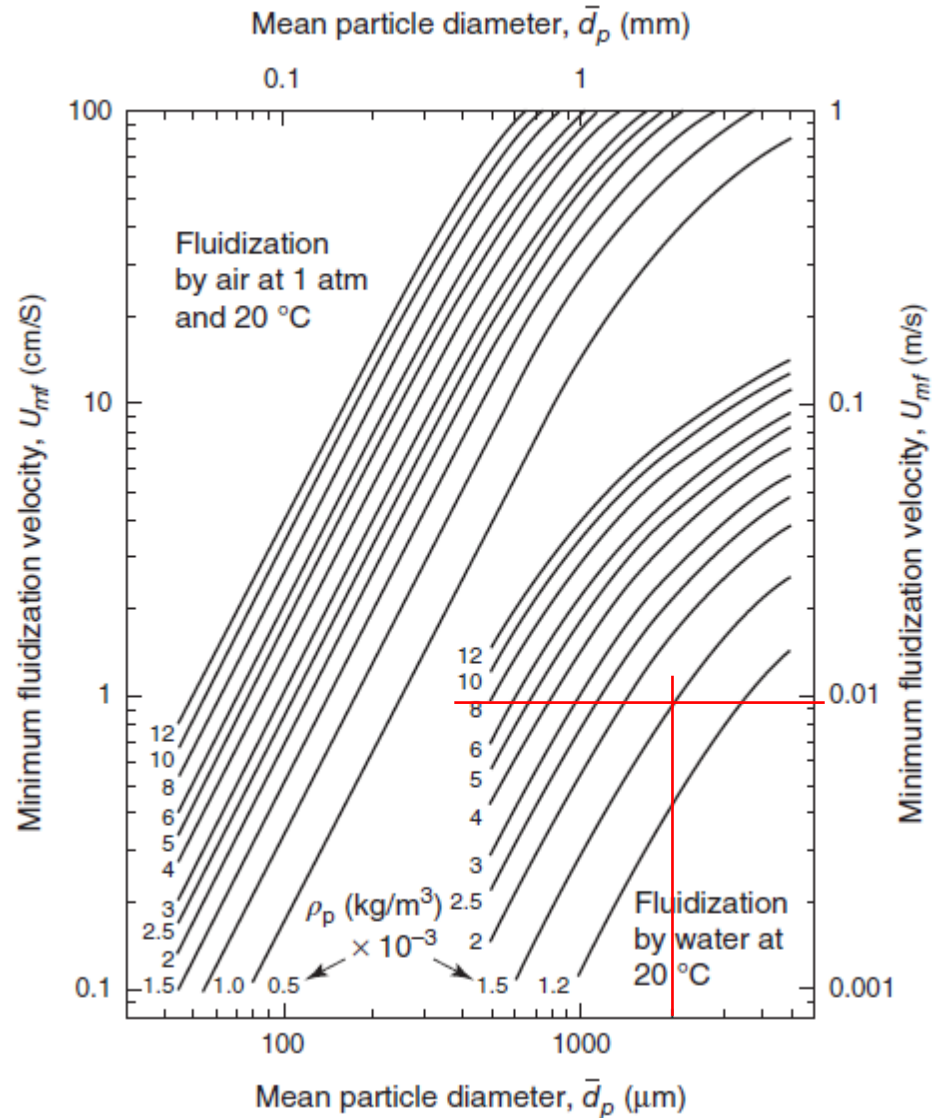
Review  
 Evaluation of correlations for minimum fluidization velocity ( $U_{mf}$ ) in gas-solid fluidization

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



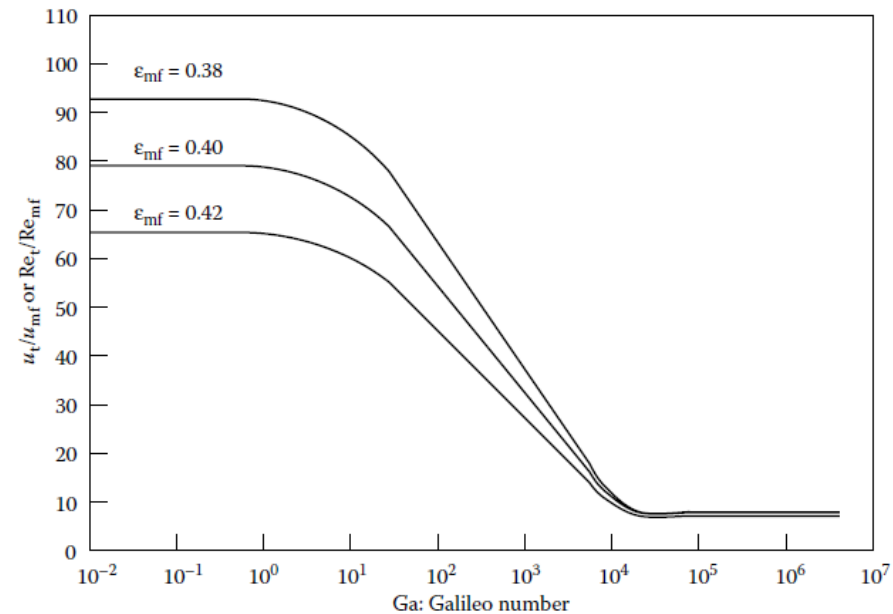
TABLE 3 Voidage at Minimum Fluidizing Conditions  $\epsilon_{mf}$

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  $u_{sett}$ :

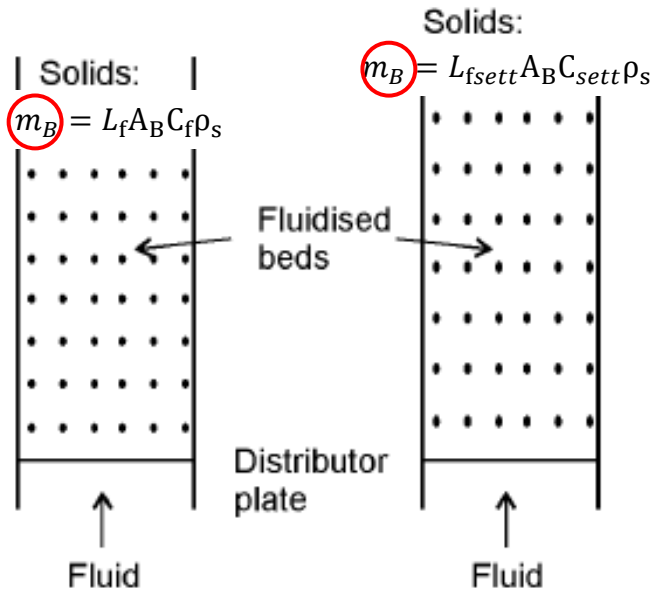
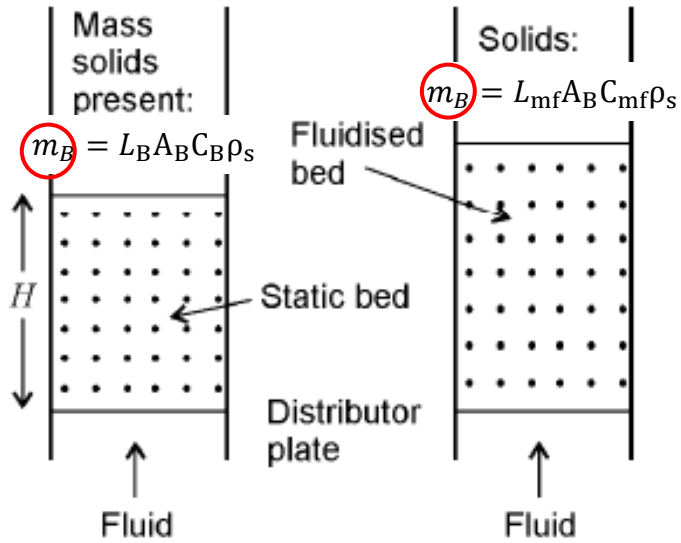
$$u_{sett} \equiv v_t = \sqrt{\frac{4 D_p g (\rho_s - \rho)}{3 \rho C_D}} \quad C_D = \frac{24}{Re_p} \left[ 1 + (8,171 e^{-4,0655 \psi}) (Re_p)^{0,0964 + 0,5565 \psi} \right] + \frac{73,69 (e^{-5,0748 \psi}) Re_p}{Re_p + 5,378 e^{6,2122 \psi}}$$

Ec. de Haider- Levenspiel (*HL*)

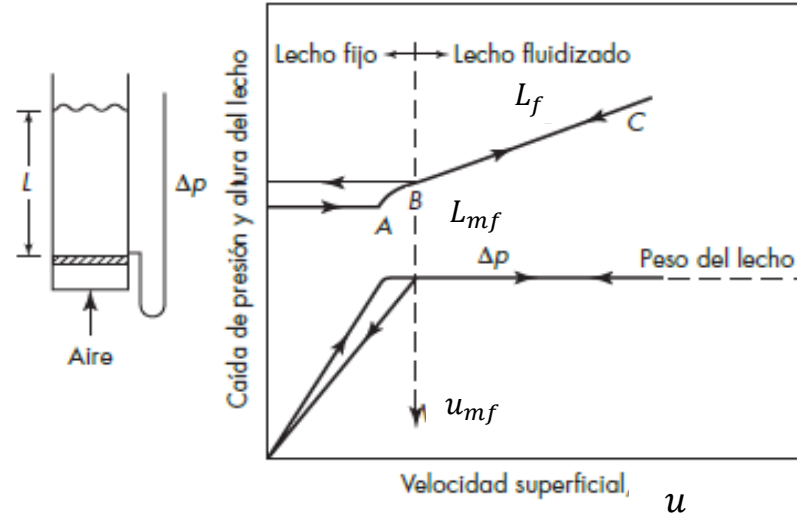
$Re_p = \frac{\rho v_t D_p}{\mu}$

$D_p \equiv D_V$

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  $\Delta P_f = ctte$

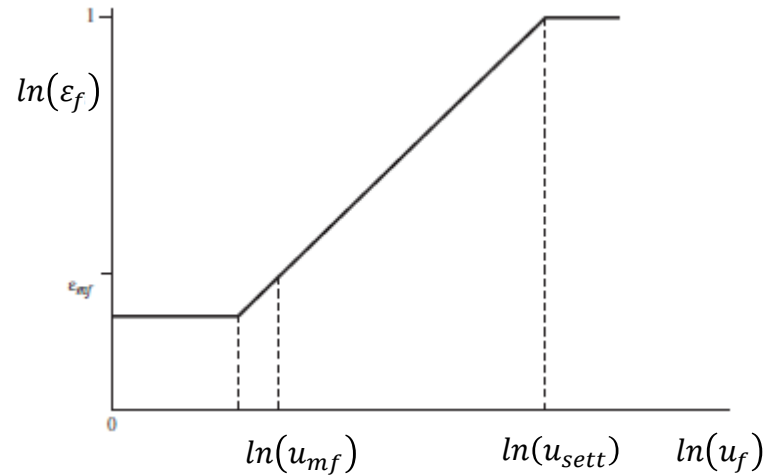
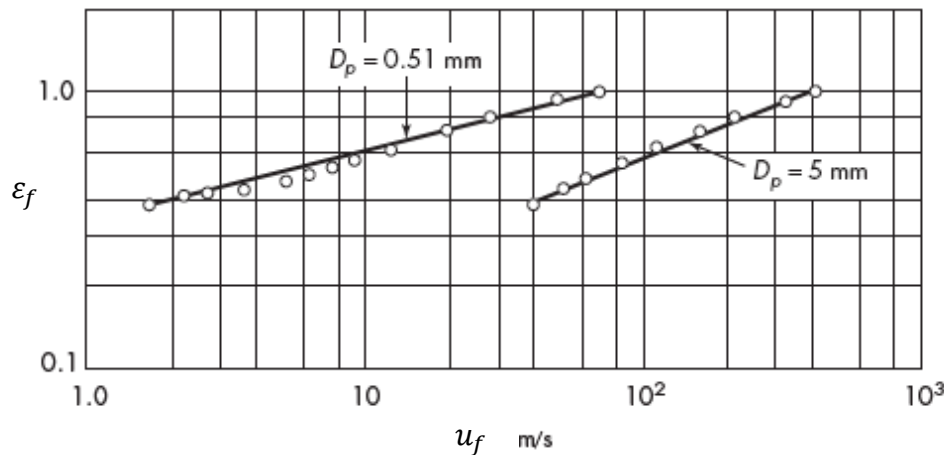
Grado de expansión  $\Delta P_f = ctte$  o  $m_B = ctte$   $(1 - \varepsilon_{mf}) L_{mf} g (\rho_s - \rho) = (1 - \varepsilon_f) L_f g (\rho_s - \rho) \rightarrow \frac{L_f}{L_{mf}} = \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{(1 - \varepsilon_f)}$

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

La relación de velocidades  $\frac{u_f}{u_{mf}}$ , a  $\Delta P_f = ctte$ , verifica

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

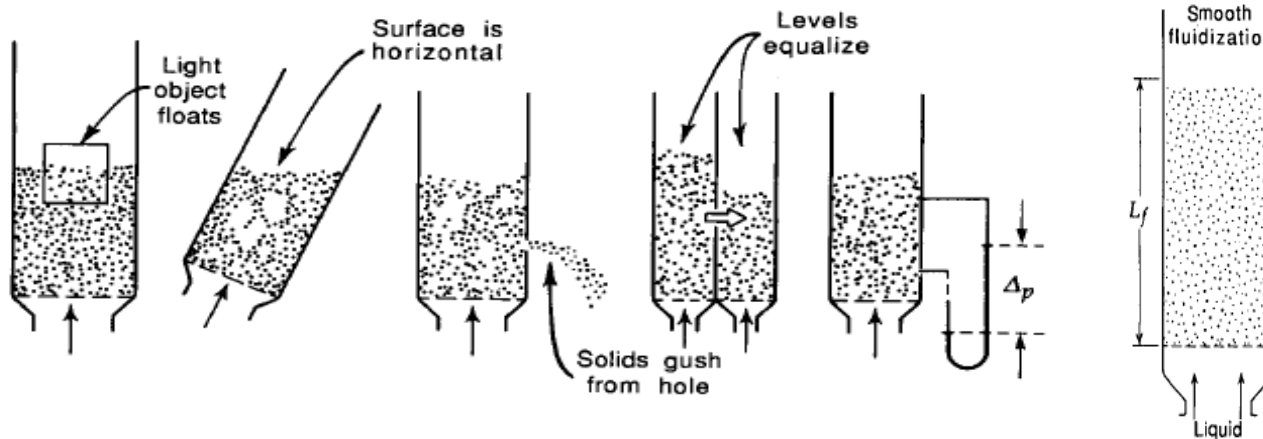
$\Delta P_f = ctte$  verifica en  $u_{mf} < u_f < u_{sett}$



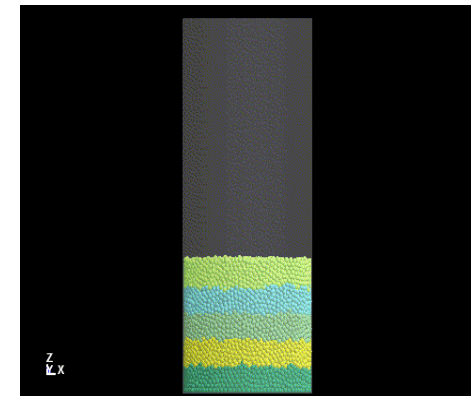
# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Régimen de operación del lecho fluidizado

**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**

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



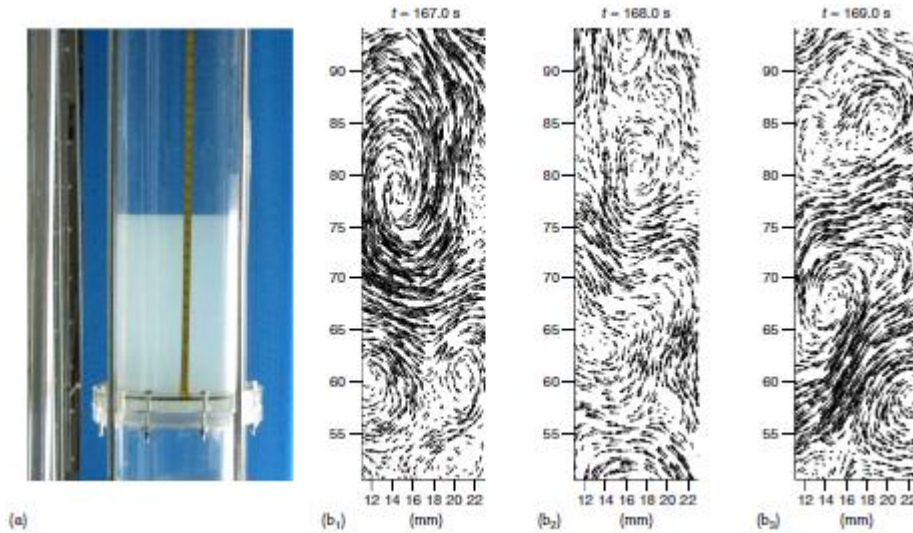
Comparación de un lecho fluidizado con un líquido



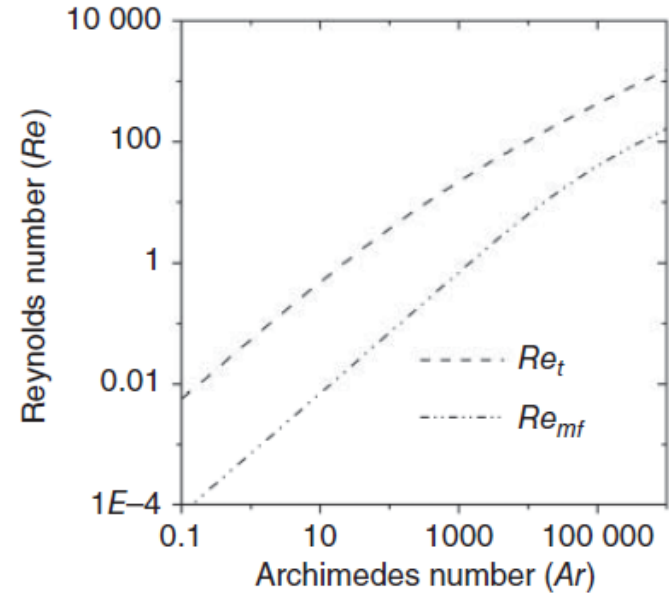
\* forma acotada de la ecuación de Arquímedes



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

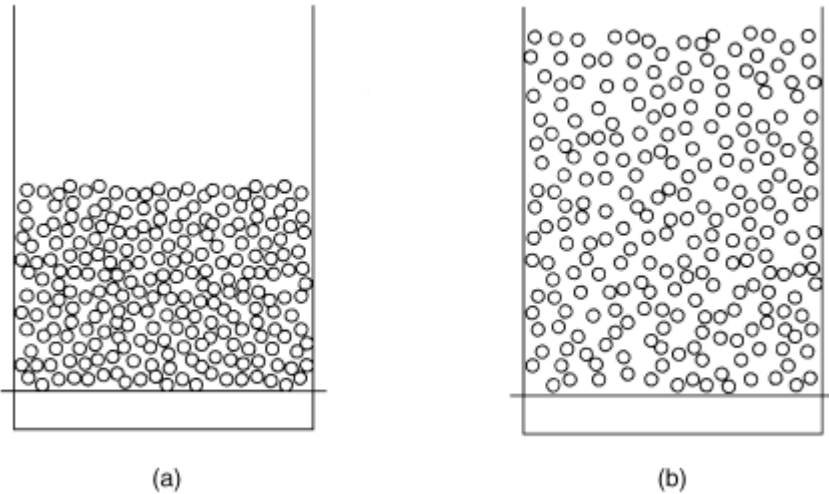


Fluidización “suave”



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

**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

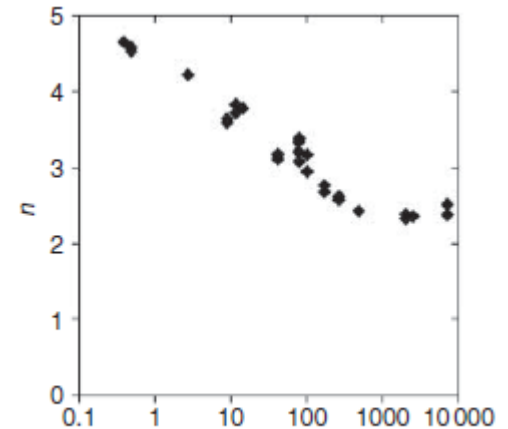
Powder Technology

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

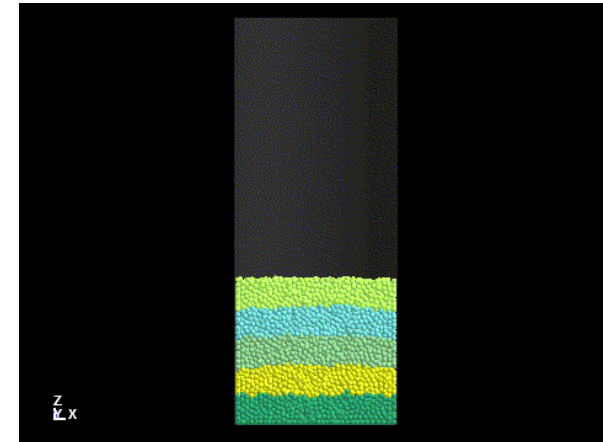
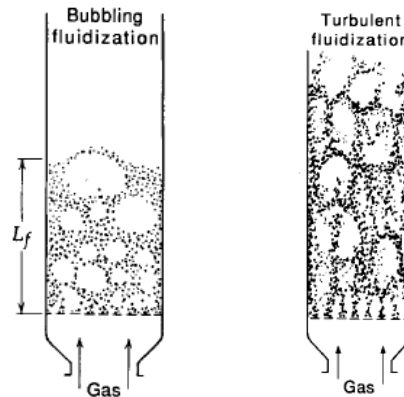
O.J.I. Kramer <sup>a,b,c,d,\*</sup>, P.J. de Moel <sup>a,e</sup>, E.T. Baars <sup>c</sup>, W.H. van Vugt <sup>d</sup>, J.T. Padding <sup>b</sup>, J.P. van der Hoek <sup>a,c</sup>



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

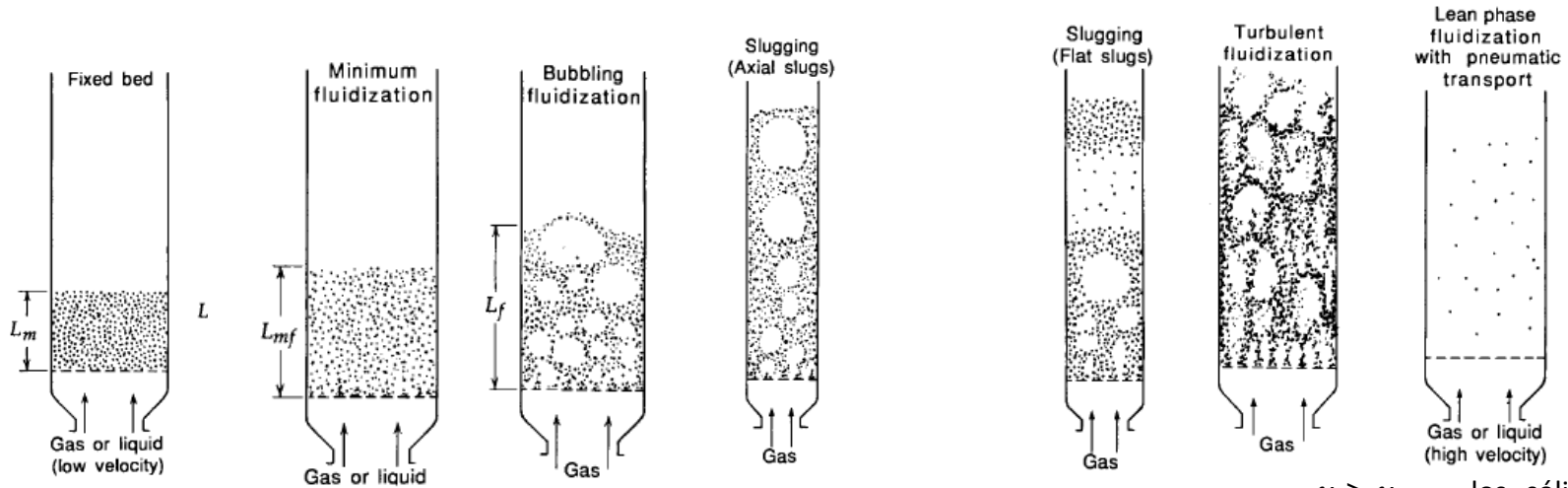
**Fluidización de agregados o burbujeante (*bubbling*):** se presenta cuando las densidades del fluido,  $\rho$ , y del sólido,  $\rho_p$  son muy diferentes, con diámetros de partículas ( $D_p$ ) grandes y por lo tanto velocidades superficiales ( $u$ ) altas. La fluidificación no es homogénea y la mayor 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

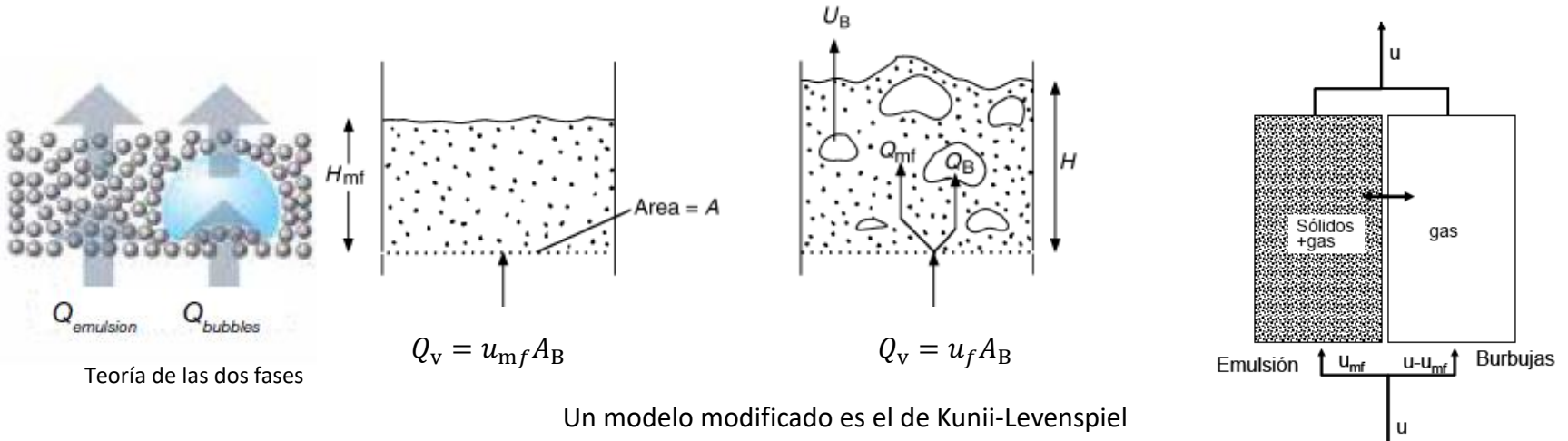
Partículas más grandes, el lecho que queda debajo de una burbuja es empujado como con un pistón. Los sólidos se reintegran al lecho porque "llueven" a través de los paquetes de gas

$u > u_{sett}$ , 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**

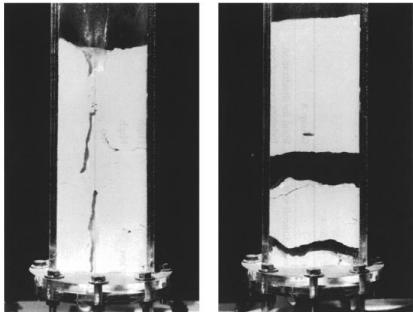
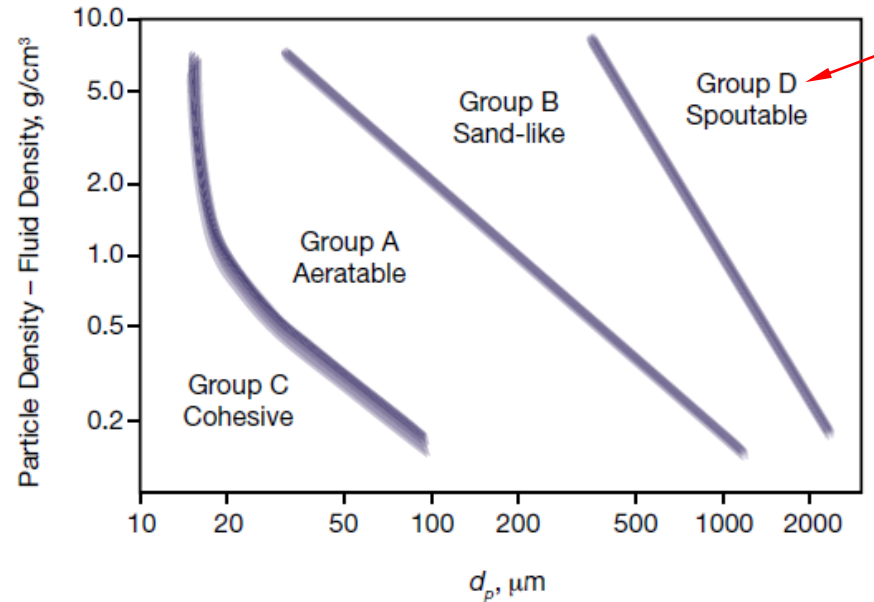


Caterina Gonçalves Philippsen<sup>a,\*</sup>, Antônio Cezar Faria Vilela<sup>a</sup>, Leandro Dalla Zen<sup>b</sup>

## 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.

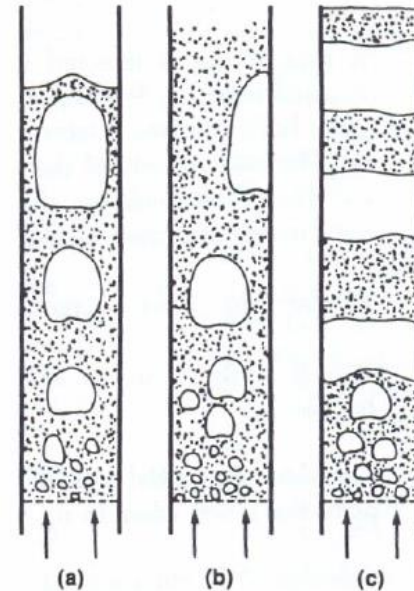
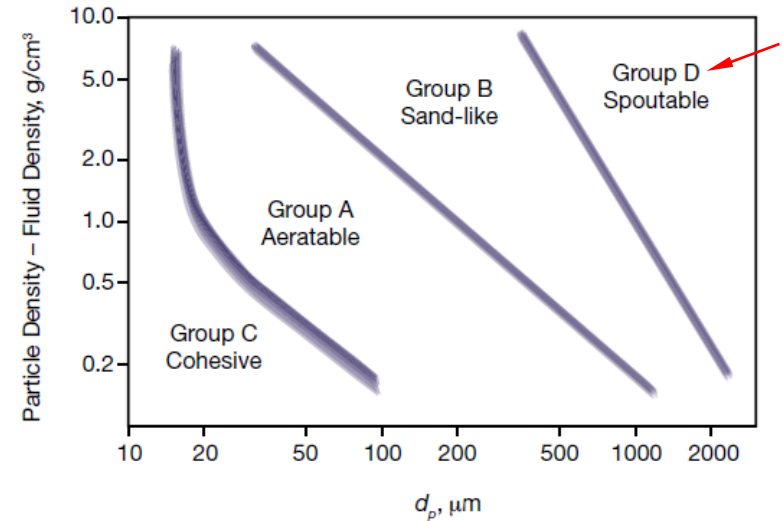


Grietas y canales en la fluidización de partículas C

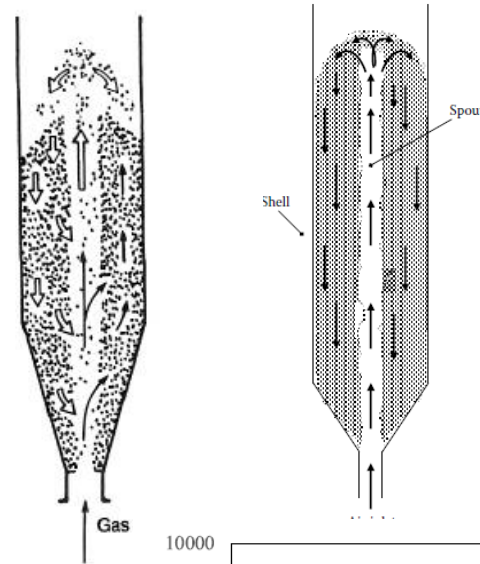
# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Régimen de operación del lecho fluidizado sistemas sólido -gas

**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.



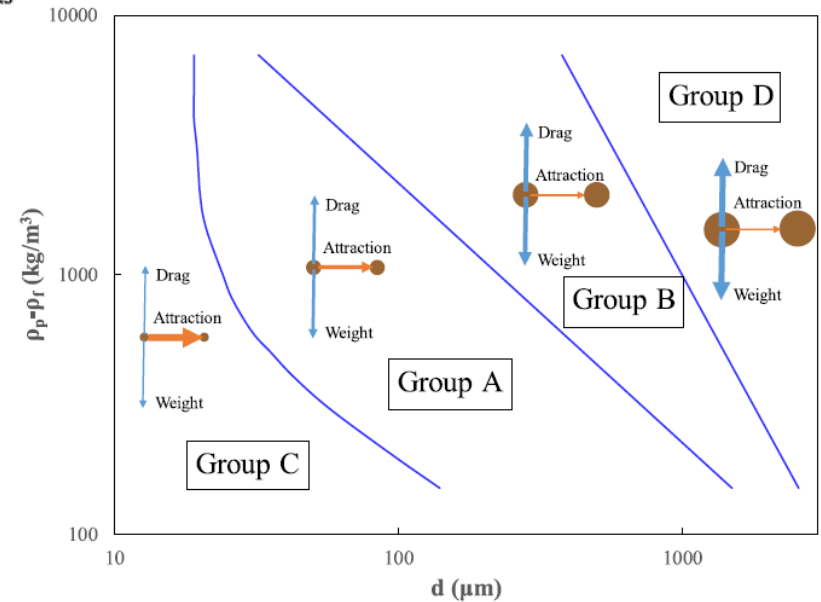
Chemical Engineering Science 229 (2021) 116029

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.



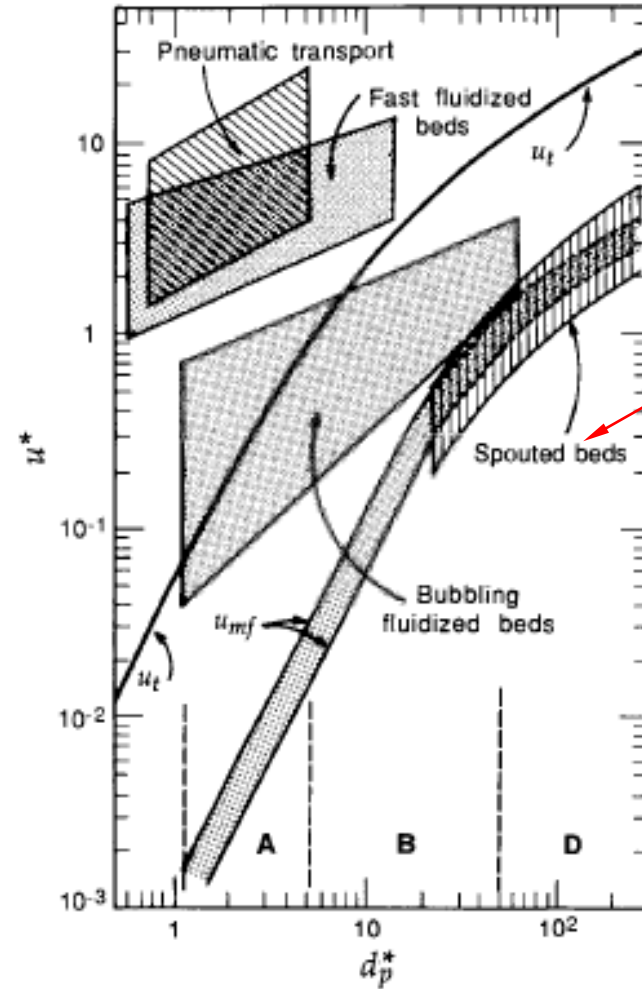
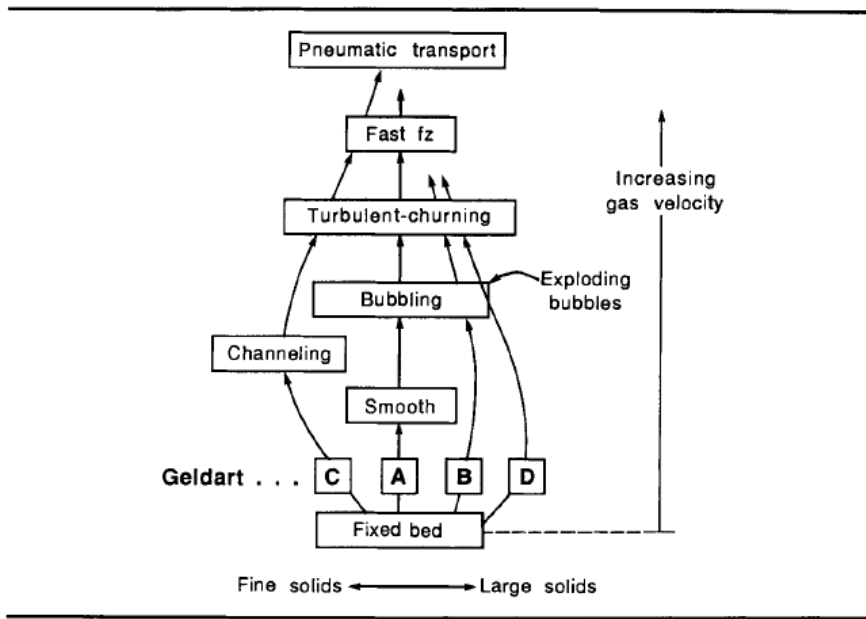
# LECHOS FLUIDIZADOS (*FLUIDIZED BEDS*) Régimen de operación del lecho fluidizado sistemas sólido -gas

## Régimen de operación del lecho fluidizado

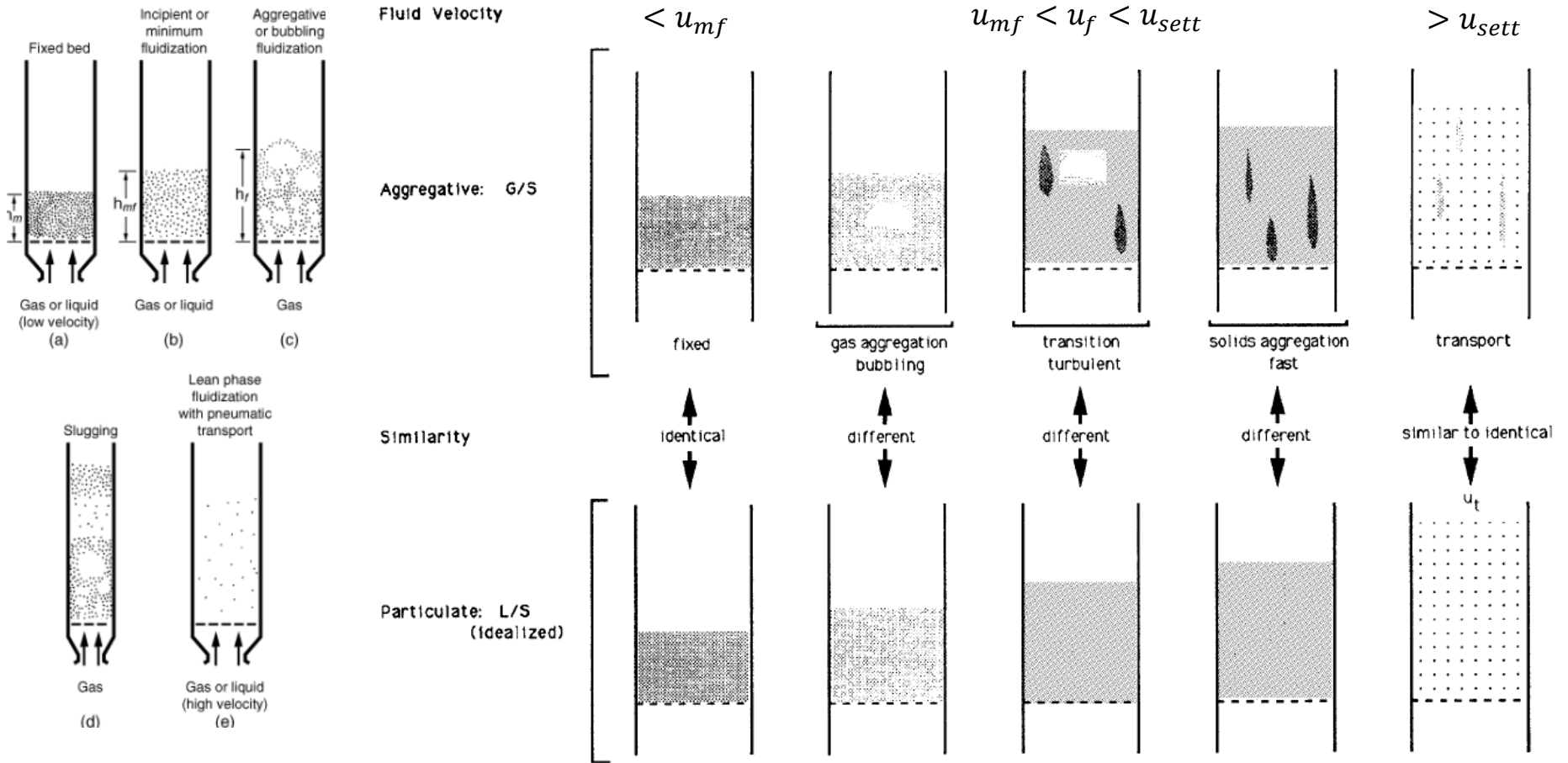


Un 3er criterio es la gráfica de Kunii-Levenspiel, según los números adimensionales de Hayden y Levenspiel (1989)

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



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



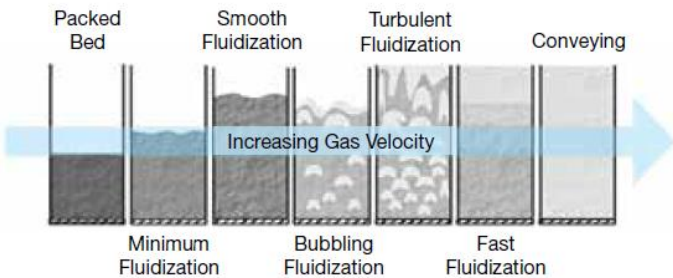
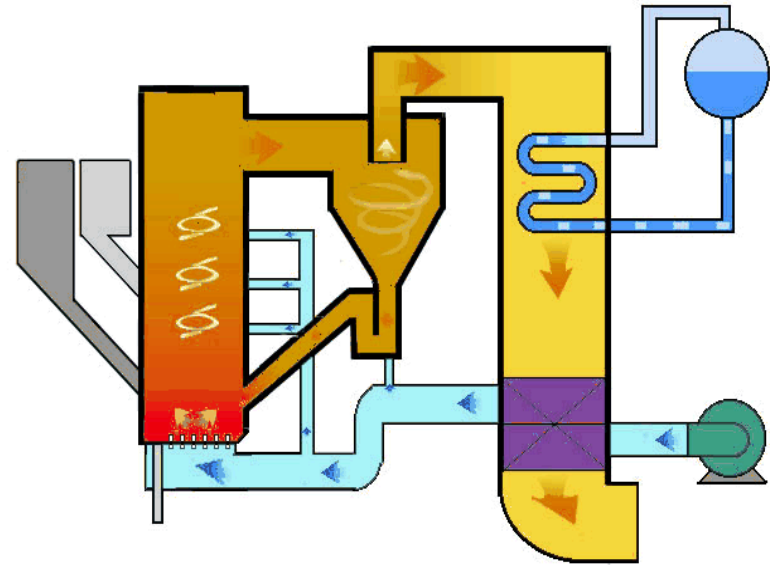
## PARTICULATE FLUIDIZATION: AN OVERVIEW

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.

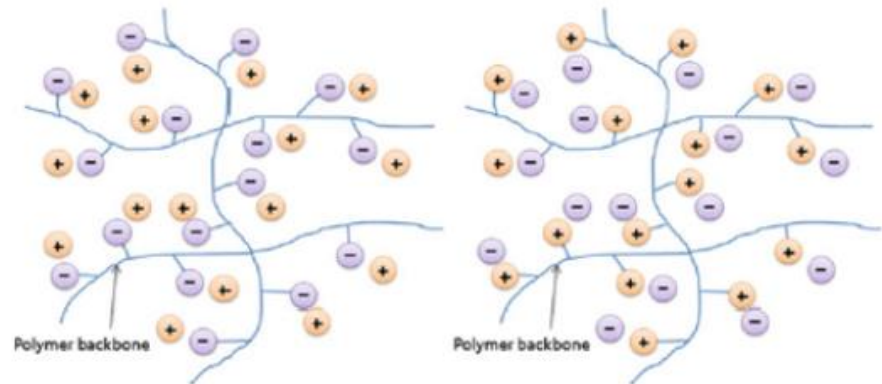
## Intercambio iónico (IEx)

- 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 ( $\text{SO}_4^{-2}$ ).



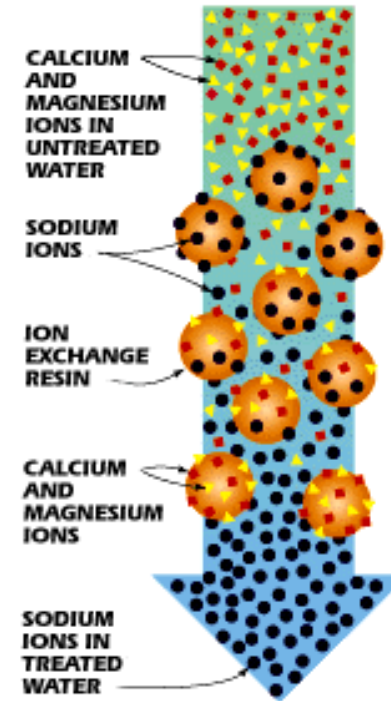
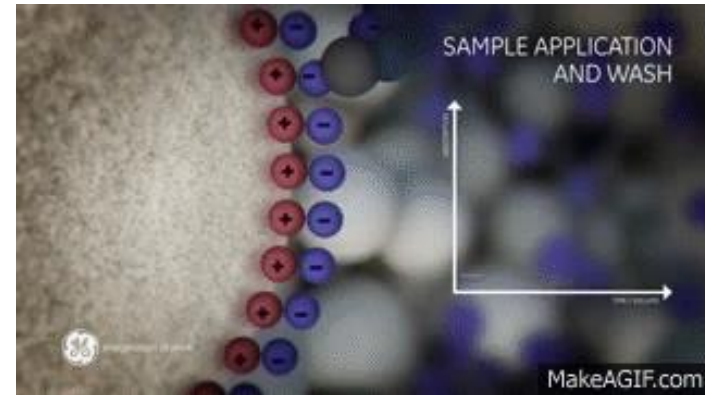
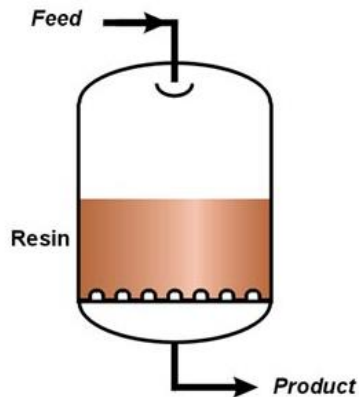
## Intercambio iónico (IEx)

- 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



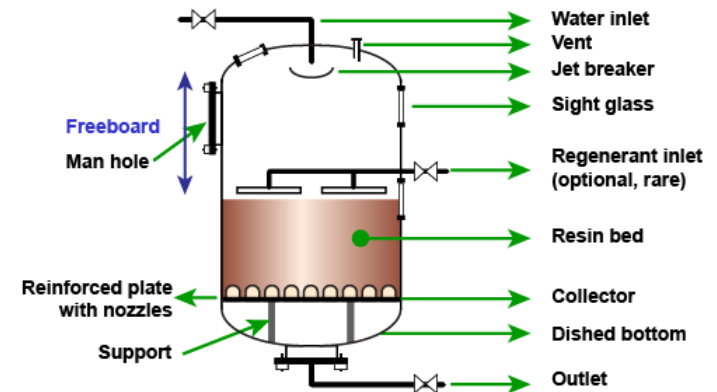
## Intercambio iónico proceso

- 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*

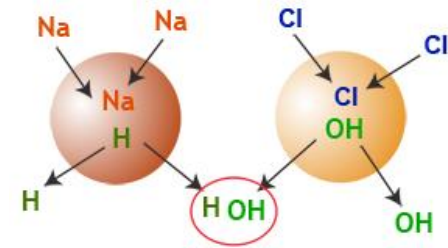
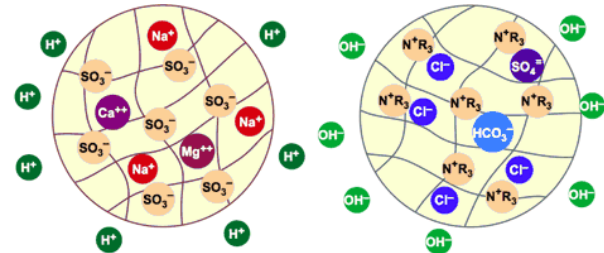
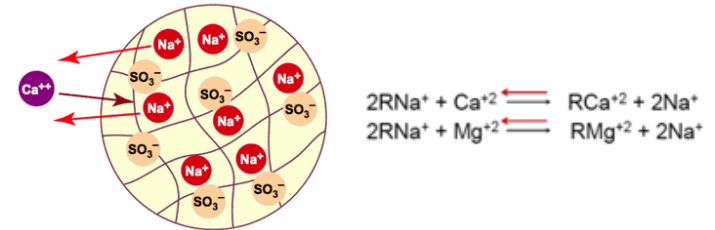
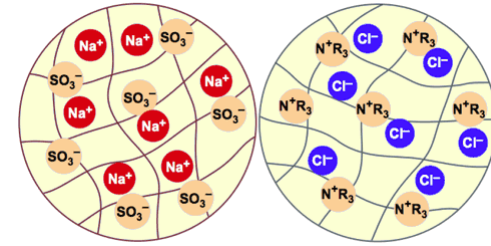
## Intercambio iónico tipos de resinas

**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

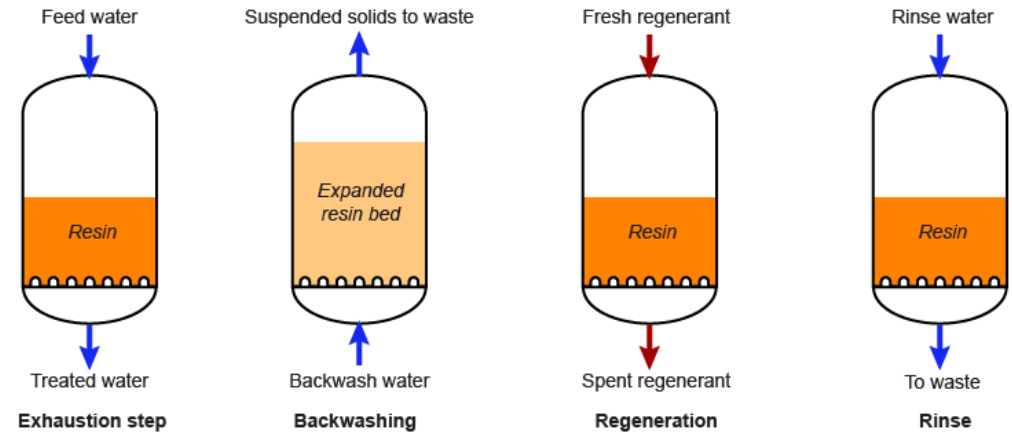
**WBA**, Resinas aniónicas base débil: Llevan grupos amino  $-\text{NH}_2$  en su estructura. Después del intercambio catiónico, eliminan cloruro, sulfato, nitrato y otros aniones de ácidos fuertes, pero no eliminan ácidos débiles ( $\text{SiO}_2$  y  $\text{CO}_2$ .)





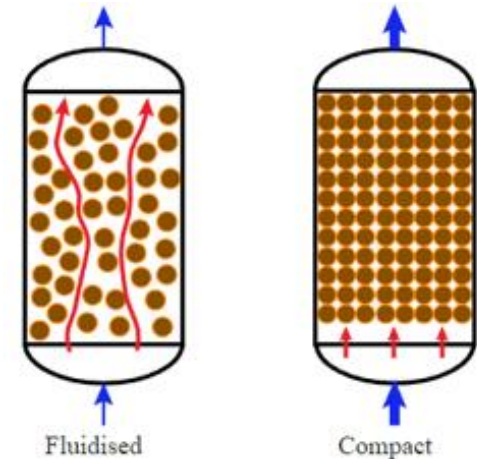
## Intercambio iónico operación

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:



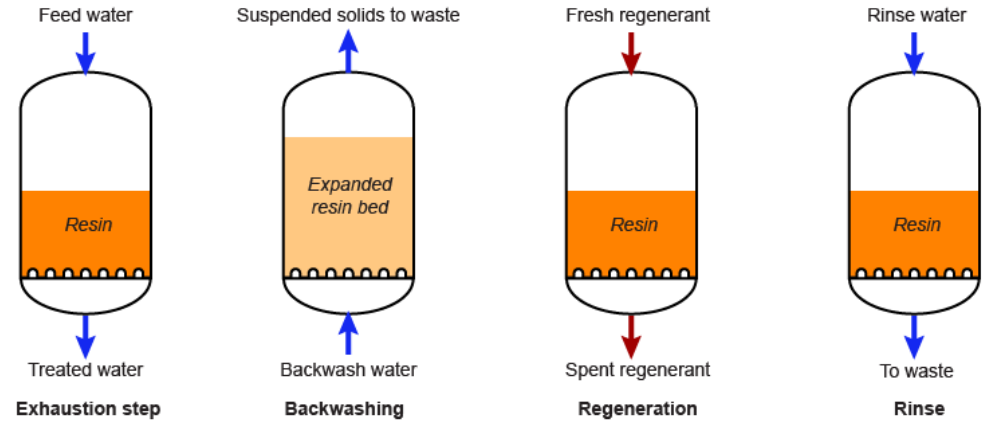
1. **Operación:** la solución de electrolitos a ser tratada se hace circular a través del lecho, recogiénose a su salida con la composición iónica modificada. La especie iónica de interés queda incorporada a la fase sólida. Seguidamente, estos iones pueden ser luego desplazados por una solución apropiada, según recomendaciones del proveedor; o bien este desplazamiento ocurre durante la etapa de regeneración.

2. **Retrolavado** del lecho mediante un flujo ascendente de agua limpia. Esta etapa es en condición fluidizada (usualmente 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 puede tener dos propósitos: a) recuperar los iones intercambiados en la fase de operación (sino fueron obtenidos anteriormente); b) 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 original intercambiada 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.

# Elementos de diseño de un IEx; curva de ruptura, Breakthrough Curve (BTC)

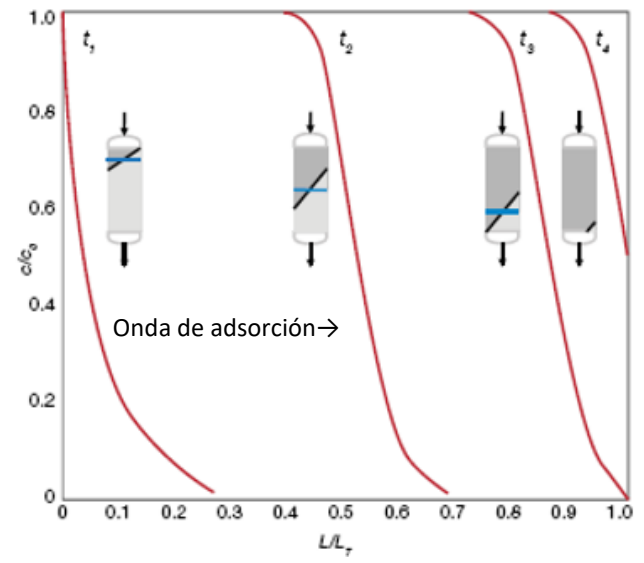
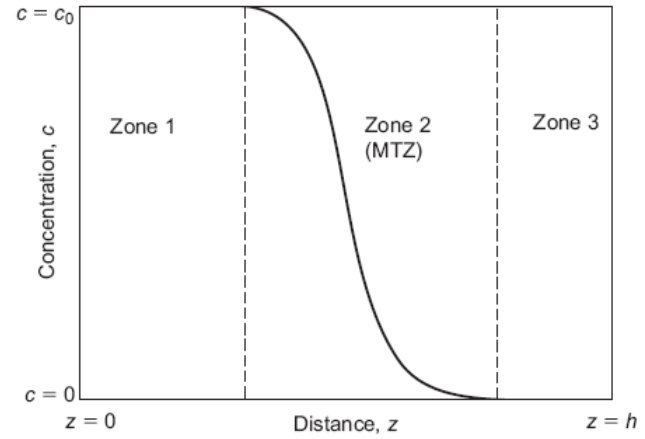
El proceso de IEx a través de un lecho fijo es dependiente del tiempo y la distancia.

Cada partícula de resina acumula efectúa el intercambio con la solución percolada, hasta que alcanza la condición de equilibrio.

El proceso de equilibrio avanza progresivamente, capa a capa, desde el ingreso a la columna hasta su salida. Debido a la cinética de intercambio no existe un límite definido entre las capas cargadas y las no cargadas.

El equilibrio tiene lugar en una zona del lecho (*MTZ: Mass Transfer Zone*). En un dado momento  $t$ , se diferencian las siguientes zonas:

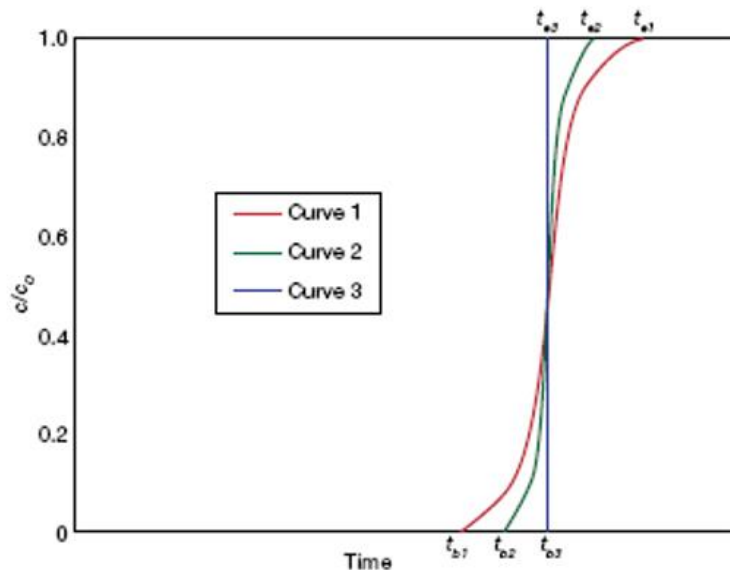
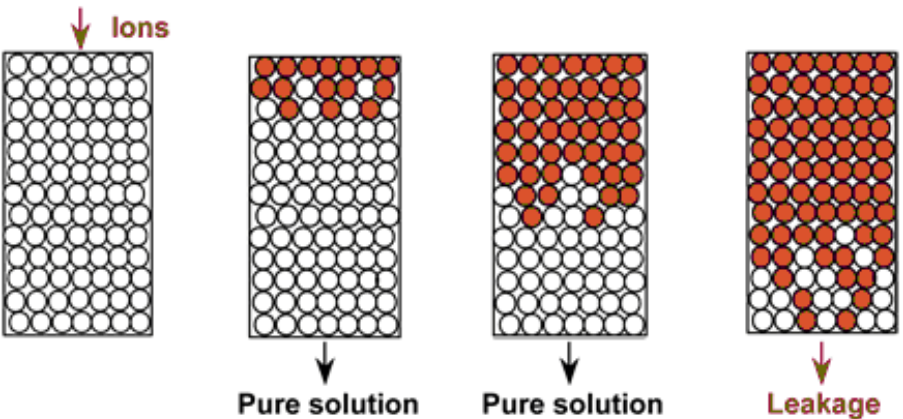
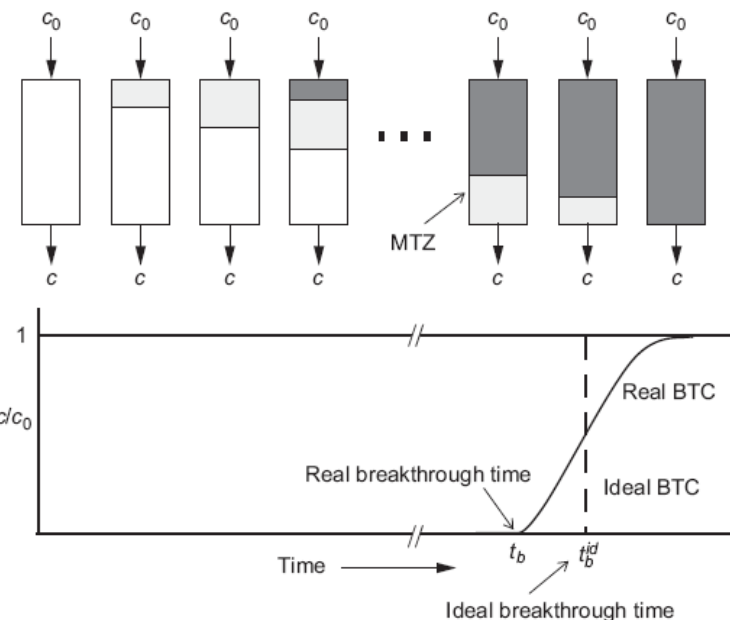
- Zona 1: masa de resina agotada en su capacidad de intercambio con una cantidad del ion intercambiado  $q_0 \cong c_0$ , en equilibrio con la solución que lo contiene
- Zona 2, *MTZ* : ocurre la transferencia de masa y  $c: c_0 \rightarrow c = 0$ , en tanto que su cantidad en el lecho  $q: q = 0 \rightarrow q_0$ ; la forma y longitud de *MTZ* depende de la velocidad de intercambio y de la forma de la curva de equilibrio.
- Zona 3: zona libre del ion intercambiado; su concentración en la solución es  $c = 0$ .



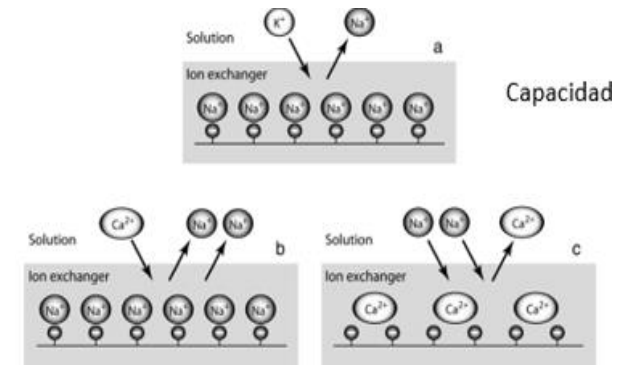
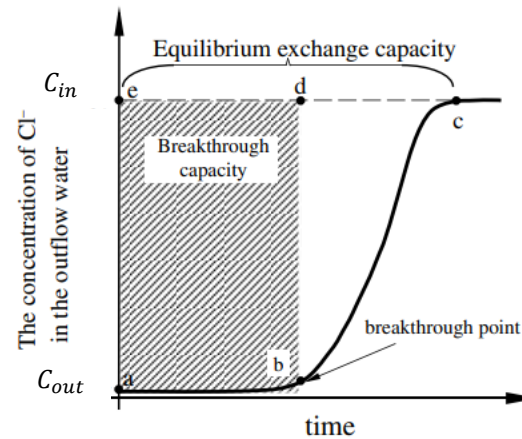
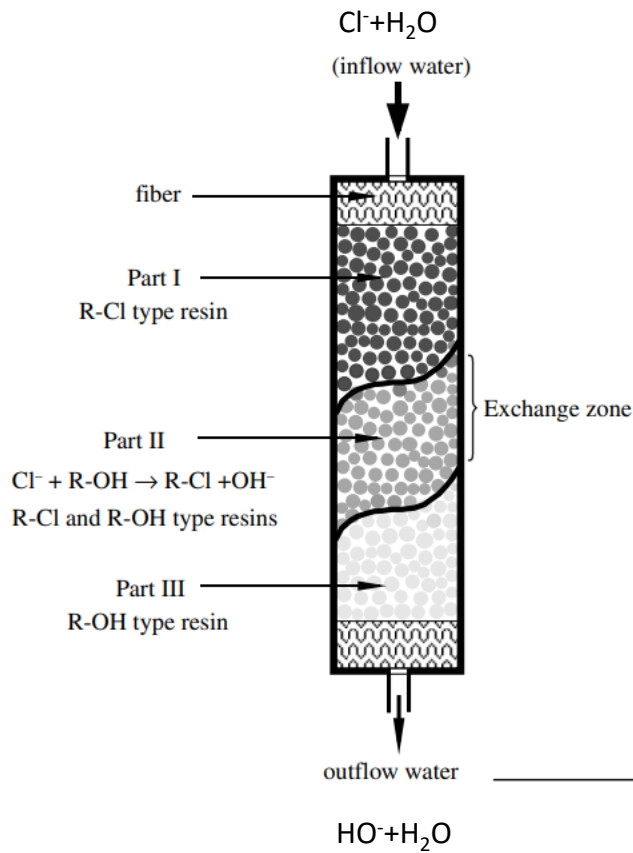
# Elementos de diseño de un IEx; curva de ruptura, Breakthrough Curve (BTC)

Durante el proceso de adsorción la MTZ se traslada a través del reactor.

Mientras la MTZ no alcanza la salida del reactor, la concentración de salida es  $c = 0$ . El ion intercambiado aparecerá a la salida del reactor por primera vez cuando la MTZ alcance el extremo del reactor. Este momento es el tiempo de ruptura,  $t_b$  (*breakthrough time*). Superado este tiempo, la concentración de salida aumenta de  $c = 0 \rightarrow c_0$ , conforme a la saturación del MTZ saliente. Este es el tiempo de saturación  $t_s$ .



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



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

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

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

## Intercambio iónico parámetros de interés

### Capacidad de intercambio iónico ( $C_{iex}$ $mEq/L_{Res}$ ):

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.

$$V_{Res} = A_{IEx} L_{IEx} (1 - \varepsilon_{IEx}) \quad m_{Res} = V_{Res} \rho_{Res}$$

$$\frac{C_{iex}}{\rho_{Res}} \leq BEC \quad BEC: \text{breakthrough Exchange Capacity}$$

### Tiempo de autonomía (o de operación, $t_{op}$ ):

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

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  $dm^2$

$L_{IEx}$ : longitud del intercambiador

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

$\rho_{Res}$ : densidad de la resina  $g.L^{-1}$

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*):  $BV[hr^{-1}] = \frac{\text{caudal de solución tratada}}{\text{volumen de resina}} = \frac{Q_v}{V_{Res,cat}}$ ; 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  $t_{res} =$

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

$$BV = \frac{Q_v}{V_{Res,cat}} \rightarrow V_{Res,cat} = \frac{Q_v}{BV}$$

Nota: el  $V_{Res,cat}$  informado por el proveedor, corresponde al volumen total de ésta (Volumen ocupado por el granulo de resina solida + Volumen ocupado por los huecos: *bulk Volume*) por lo que el cómputo de  $m_{Res} = V_{Res,cat}(1 - \varepsilon_{IEx})\rho_{Res}$

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; éste es aplicable a la mayor parte de los casos. El tiempo de regeneración total  $t_{reg}$  es fijado por el proveedor de resina.

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