

Capítulo 5. FLUIDIZACIÓN

5.1. Introducción

La fluidización ocurre cuando pequeñas partículas sólidas son suspendidas por una corriente de un fluido que se dirige de abajo hacia arriba venciendo el peso de las mismas. Cuando la velocidad del fluido debe ser lo suficientemente alta como para suspender las partículas, pero a la vez no tan elevada como para expulsar las partículas fuera del recipiente. Las partículas sólidas rotan en el lecho rápidamente, creándose un excelente mezclado. El material que se fluidiza es casi siempre un sólido y el medio que fluidiza puede ser tanto líquido como gas. Las características y comportamiento de los lechos fluidizados dependen fuertemente de las propiedades del sólido y del fluido.

5.2. El fenómeno de la fluidización

Consideremos el lecho vertical relleno de partículas sólidas mostrado en la Figura 5.1.

- Si la velocidad del gas de fluidización (u) es muy baja no podrá contrarrestar el peso de las partículas y el lecho se comportará como un lecho fijo (Figura 5.1a).
- Existirá un valor de velocidad (velocidad mínima de fluidización, u_{mf}) a partir de la cual el lecho se fluidizará (Figura 5.1b).
- Velocidades mayores de fluidización conducen a una expansión del lecho, pudiéndose dar una fluidización homogénea (Figura 5.1c). Cuando se fluidiza con gas este comportamiento puede observarse sólo en condiciones especiales (partículas livianas y gas denso a alta presión).
- Los lechos gas-sólido presentan burbujas y canalización de gas cuando la velocidad se aumenta sobre la de mínima fluidización (Figura 5.1.d). Cuando las burbujas aparecen la agitación del lecho es vigorosa, y el lecho no se expande mucho más allá de la altura de mínima fluidización, a este tipo de operación se la denomina comúnmente fluidización burbujeante. En muy raras ocasiones un sistema líquido-sólido se comporta como lecho burbujeante.
- Las burbujas pueden coalescer y crecer a medida que ascienden por el lecho, y eventualmente pueden ser lo suficientemente grandes como para expandirse a lo ancho del lecho. Si se trata de partículas pequeñas, ellas fluyen hacia abajo en las cercanías de la pared, alrededor de los paquetes de gas que

ascienden (Figura 5.1e). Si las partículas son más grandes, el lecho que queda debajo de una burbuja es empujado como con un pistón. Los sólidos se reintegran al lecho por que “llueven” a través de los paquetes de gas (Figura 5.1f). Este comportamiento suele presentarse en lechos de pequeños diámetros.

- Cuando el lecho se fluidiza a altas velocidades la velocidad terminal de las partículas puede superarse, en este caso la superficie superior del lecho se desdibuja. El gas se lleva material particulado y en lugar de burbujas se observa un movimiento turbulento de paquetes de sólidos y espacios llenos de gas de varias formas y tamaños (Figura 5.1g). En estas condiciones el lecho se denomina lecho fluidizado turbulento.
- Si la velocidad se aumenta más aún, los sólidos son arrastrados fuera del lecho, existe un transporte neumático de los sólidos. (Figura 5.1h).

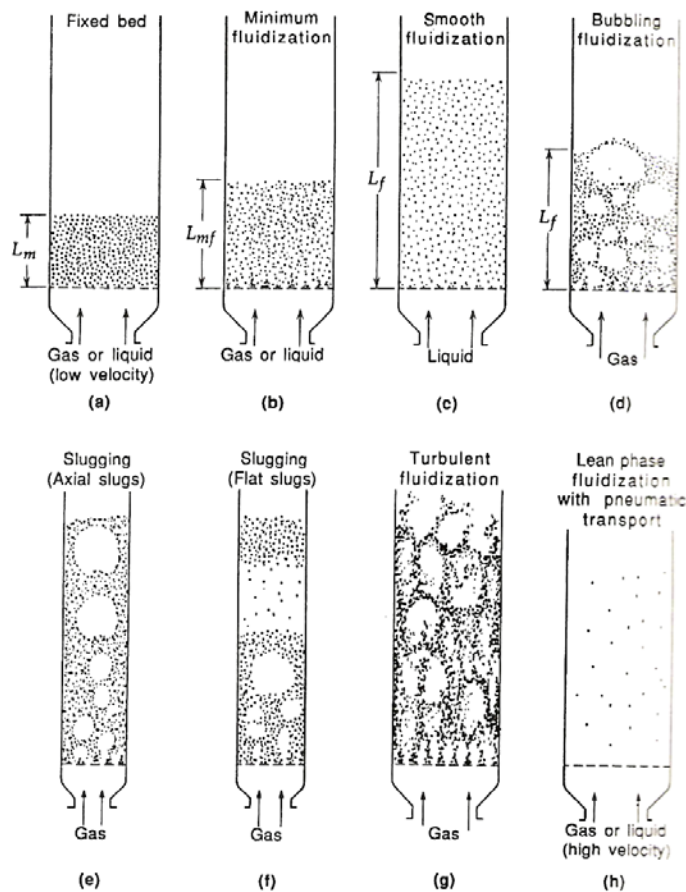


Figura 5.1. Tipos de contacto sólido-fluido. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).

En la Figura 5.2 se presenta un lecho de “chorro” (spouted bed). Cuando se utiliza gas para fluidizar, si se utilizan altas velocidades y las partículas son relativamente grandes, el gas sale como un chorro que arrastra partículas hacia la superficie del lecho. Los sólidos se mueven hacia abajo alrededor del chorro y también dentro del chorro.

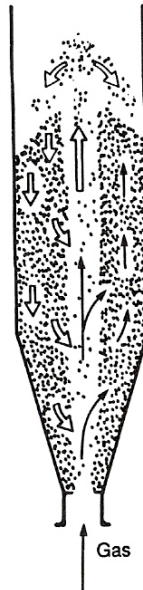


Figura 5.2. Spouted Bed. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).

5.3. Lechos fluidizados vs. líquidos.

Los lechos densos fluidizados con gas se parecen mucho a los líquidos. Esta característica se muestra en la Figura 5.3.

- Por ejemplo los objetos livianos flotarán sobre la superficie.
- Si el lecho se inclina, la superficie del mismo permanecerá horizontal.
- Si se realiza una perforación en el lecho los sólidos saldrán como un chorro.
- Cuando dos lechos fluidizados se conectan, el nivel tiende a igualarse.
- Por último, la caída de presión entre dos alturas del lecho es aproximadamente igual a la presión hidrostática entre ambos puntos.

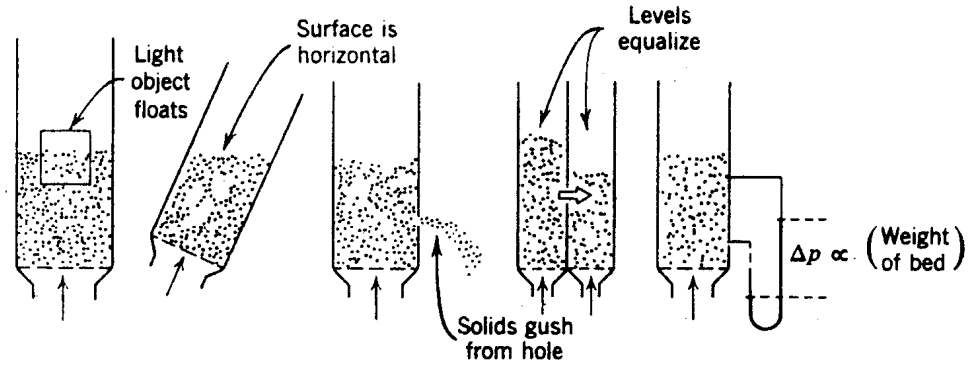


Figura 5.3. Comportamiento de los lechos fluidizados similar al de los líquidos.
Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).

5.4. Caída de presión en el lecho fluidizado y velocidad de fluidización mínima (u_{mf})

5.4.1. Lechos rellenos con partículas de igual tamaño

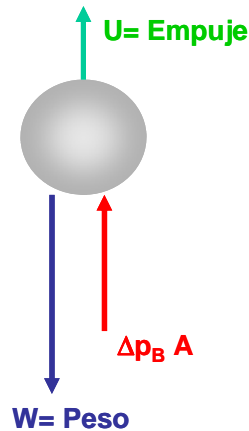


Figura 5.4. Balance de fuerzas en el estado de mínima fluidización

En el estado de mínima fluidización el peso de la partícula debe ser contrarrestado por la fuerza ejercida (F) por el fluido que asciende y el empuje, ver Figura 5.4. El peso de las partículas está dado por:

$$P = m_p g = V_p \rho_p g \quad (5.1)$$

donde V_p es el volumen del lecho ocupado por partículas. El empuje puede expresarse como:

$$U = m_f g = V_p \rho_f g \quad (5.2)$$

El volumen de partículas total puede expresarse como sigue:

$$V_p = (1 - \varepsilon) V \quad (5.3)$$

donde V es el volumen del lecho. En el estado de mínima fluidización la fuerza de arrastre iguala a la gravitacional neta, en esta condición la porosidad es la de mínima fluidización (ε_{mf}):

$$\Delta p_B A = (1 - \varepsilon_{mf}) V g (\rho_p - \rho_f) \quad (5.4)$$

donde A es el área transversal del lecho (sin considerar la restricción de los sólidos), en el estado de mínima fluidización el volumen del lecho puede expresarse como:

$$V = A L_{mf} \quad (5.5)$$

donde L_{mf} es la altura del lecho en el estado de mínima fluidización. Combinando las ecuaciones (5.5) y (5.4), la caída de presión en el lecho en condiciones de mínima fluidización está dada por:

$$\frac{\Delta p_B}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_f) g \quad (5.6)$$

La porosidad ε_{mf} es sólo un poco más grande que la del lecho fijo (como valor típico podría asumirse 0.4), en efecto el estado de mínima fluidización es el estado de transición de lecho fijo a fluidizado. En la Figura 5.5 se muestra la caída de presión en función de la **velocidad superficial**. Hasta alcanzar el estado de mínima fluidización, la caída de presión en el lecho aumenta con la velocidad según lo predice la ecuación de Ergun. Cualquier velocidad de fluidización mayor que u_{mf} no provocará un aumento de la caída de presión, sí cambiará la altura y porosidad del lecho para seguir cumpliendo la ecuación (5.6).

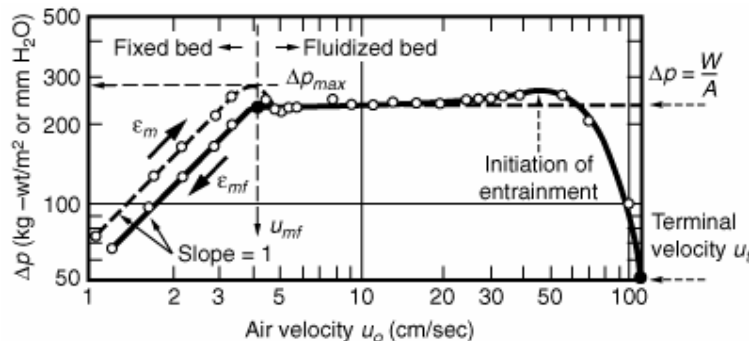


Figura 5.5. Caída de presión en función de la velocidad de fluidización. Partículas de tamaño uniforme. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).

De acuerdo a lo visto en la Figura 5.5, resulta razonable igualar la expresión (4.35) – ecuación de Ergun- con la ecuación (5.6)

$$(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)g = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu u_{mf}}{d_{SV}^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_f u_{mf}^2}{d_{SV}} \quad (5.7)$$

La ecuación (5.7) puede ser expresada como:

$$150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_{SV} u_{mf} \rho_f}{\mu} \right) + \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_{SV} u_{mf} \rho_f}{\mu} \right)^2 = \frac{d_{SV}^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu^2} \quad (5.8)$$

Considerando que la esfericidad permite relacionar los diámetros equivalentes que conservan volumen y S/V ($d_v \psi = d_{SV}$), la ecuación (5.8) puede escribirse como:

$$150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \psi^2} \left(\frac{d_v u_{mf} \rho_f}{\mu} \right) + \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \psi} \left(\frac{d_v u_{mf} \rho_f}{\mu} \right)^2 = \frac{d_v^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu^2} \quad (5.9)$$

Definiendo el Reynolds como: $Re_{p,mf} = \frac{d_v u_{mf} \rho_f}{\mu}$, la ecuación (5.9) se convierte en:

$$150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \psi^2} Re_{p,mf} + \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \psi} (Re_{p,mf})^2 = Ar \quad (5.10)$$

Tanto la ecuación (5.9) como la (5.10) son expresiones implícitas para el cálculo de la u_{mf} (**velocidad superficial**), la cual puede ser estimada si se conoce el diámetro que mantiene la S/V de la población (o el d_v y la esfericidad), las propiedades del fluido y de la partícula, y la porosidad en las condiciones de mínima fluidización.

Cuando las partículas son muy pequeñas, la ecuación (5.9) se reduce a:

$$u_{mf} = \frac{d_v^2 (\rho_p - \rho_f) g \varepsilon_{mf}^3 \psi^2}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})} \quad Re_{p,mf} = \frac{d_v u_{mf} \rho_f}{\mu} < 20 \quad (5.11)$$

Cuando las partículas son muy grandes, la ecuación (5.9) se aproxima a:

$$u_{mf}^2 = \frac{d_{SV} \varepsilon_{mf}^3 \psi (\rho_p - \rho_f) g}{1.75 \rho_f} \quad Re_{p,mf} = \frac{d_v u_{mf} \rho_f}{\mu} > 1000 \quad (5.12)$$

Las ecuaciones (5.11) y (5.12) son explícitas y aproximadas. Para rangos intermedios del número de Reynolds no pueden ser usadas.

La Figura 5.5, tanto como las ecuaciones arriba presentadas, corresponden a lecho cargado con sólidos de igual tamaño. Como ya se mencionó, la caída de presión de un lecho fijo aumenta a medida que la velocidad del fluido se incrementa. Usualmente se alcanza una caída de presión máxima que es ligeramente mayor que la presión estática del lecho (ver trayectoria a rayas en la Figura 5.5). Al aumentar un poco más la velocidad el lecho se desempaca, en otras palabras la porosidad ε_B cambia a ε_{mf} , lo que ocasiona una disminución de la caída de presión ($\varepsilon_{mf} > \varepsilon_B$) que tiende a ser la presión estática del lecho W/A (peso de sólidos neto/área transversal del lecho). Esto puede observarse en la ecuación 5.4 si la densidad del fluido es despreciable respecto a la del sólido. Como ya se comentó aunque se aumente la velocidad más allá de la de mínima fluidización, utilizando gas el lecho se expande apareciendo burbujas. El lecho no experimenta aumentos de presión ya que la fase gas-sólida está bien aireada y puede deformarse fácilmente sin ofrecer una resistencia apreciable. Es interesante comparar este comportamiento con el de los líquidos. Si en un tanque tenemos un líquido y queremos hacer pasar un gas desde el fondo debemos vencer la presión hidrostática del líquido, la cual es independiente del caudal de gas que pasemos.

Cuando de un estado fluidizado se disminuye progresivamente la velocidad, las partículas se van asentando formando un lecho fijo menos compacto que el original, consecuentemente la caída de presión es menor.

5.4.2. Lechos rellenos con partículas de distintos tamaños

A medida que se incrementa la velocidad del gas, las partículas más pequeñas pueden escurrirse por los intersticios dejados por las partículas grandes y fluidizarse cuando las partículas grandes todavía permanecen estacionarias. Ocurre entonces una *fluidización parcial* del lecho, dando una caída de presión intermedia. A medida que sube la velocidad del gas, ΔP se aproxima al valor W/A , lo que indica que todo el lecho está fluidizado. La Figura 5.6, típica de estos sistemas con distribución de tamaños amplia, ilustra esta fluidización gradual del lecho.

En los sistemas de partículas de tamaño variado, la velocidad en el mínimo de fluidización (u_{mf}) se define por convención como la intersección de la recta de ΔP para lecho fijo con la recta de valor W/A .

Cuando se fluidiza sólidos con una distribución de tamaños se debe recordar que el diámetro d_{SV} en las ecuaciones anteriores debe ser sustituido por el de Sauter x_{SV} .

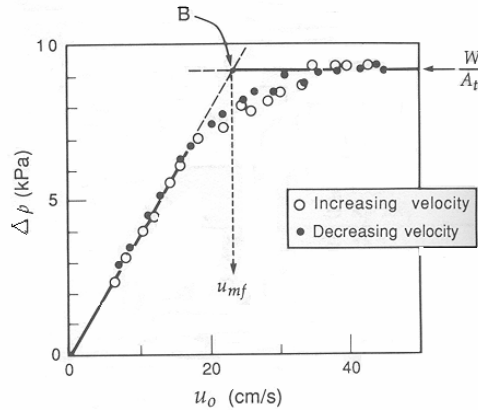


Figura 5.6. Caída de presión en función de la velocidad de fluidización, para partículas con amplia distribución de tamaños. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).

5.4.3. Cálculo aproximado de la velocidad mínima de fluidización (sin conocer el valor experimental de ϵ_{mf}).

En ausencia de datos experimentales, la porosidad del lecho en el estado de mínima fluidización (parámetro necesario para el cálculo de la velocidad mínima de fluidización) puede calcularse por correlaciones.

La ecuación (5.10) puede ser expresada también como:

$$K_2 Re_{p,mf} + K_1 (Re_{p,mf})^2 = Ar \quad (5.13)$$

Wen y Yu (AIChE J. 12, 610, 1966 y Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. 62, 100, 1966) observaron que los grupos K_1 y K_2 se mantenían relativamente constante para varios tipos de partículas. Hallaron que las siguientes relaciones se satisfacen:

$$\frac{1}{\psi \epsilon_{mf}^3} \cong 14 \quad (5.14)$$

$$\frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\psi^2 \epsilon_{mf}^3} \cong 11 \quad (5.15)$$

Teniendo en cuenta las expresiones (5.14), (5.15) y (5.10), se obtiene:

$$1650 \text{Re}_{p,mf} + 24.5(\text{Re}_{p,mf})^2 = \text{Ar} \quad (5.16)$$

La expresión (5.16) puede utilizarse en ausencia de valores de porosidad mínima de fluidización.

Ejemplo:

Calcular la velocidad mínima de fluidización para el sistema cuyos datos experimentales se presentaron en la Figura 5.5. Considere que se dispone de la siguiente información adicional.

Datos adicionales:

$$\begin{aligned} \epsilon_{mf} &= 0.55 \\ \psi &= 0.67 \\ \rho_f &= 0.0012 \text{ g/cm}^3 \\ \rho_p &= 2.6 \text{ g/cm}^3 \\ \mu &= 0.00018 \text{ g/cm s} \\ d_V &= 160 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

Datos

emf=	0.55
rop=	2.6 g/cm3
d _v =	0.0160 cm
Esfericidad=	0.67
d _{sv} =	0.01072
rof=	0.0012 g/cm3
mu=	1.80E-04 g/cm s
g=	980 cm/s2

Fórmula completa:

vmf=	3.978419739 cm/s
Remf=	4.24E-01
Term 1=	3.84E+02
Term 2=	2.827182388
Term 3=	3.86E+02
Fobj=	-7.90E-05

$$150 \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \psi^2} \left(\frac{d_V u_{mf} \rho_f}{\mu} \right) + \frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \psi} \left(\frac{d_V u_{mf} \rho_f}{\mu} \right)^2 = \frac{d_V^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu^2}$$

Términos Bhaskara

A=	15.69911524
B=	903.7870182
C=	-3.86E+02

Remf1	0.424364858
Remf2	-1.007371375

vmf= 3.98E+00 cm/s

Flujo laminar emf conocida Re<20

vmf=	4.01E+00 cm/s
Remf=	2.86E-01

$$u_{mf} = \frac{d_V^2 (\rho_p - \rho_f) g \epsilon_{mf}^3 \psi^2}{150 \mu (1 - \epsilon_{mf})}$$

$$\text{Re}_{p,mf} = \frac{d_V u_{mf} \rho_f}{\mu} < 20$$

OK, <20

Flujo turbulento emf conocida Re>1000

vmf=	1.61E+01 cm/s
Remf=	1.15E+00

$$u_{mf}^2 = \frac{d_{SV} \epsilon_{mf}^3 \psi (\rho_p - \rho_f) g}{1.75 \rho_f}$$

$$\text{Re}_{p,mf} = \frac{d_V u_{mf} \rho_f}{\mu} > 1000$$

NO, <1000

Velocidad Aproximada

$$1650 \text{Re}_{p,mf} + 24.5(\text{Re}_{p,mf})^2 = \text{Ar}$$

Términos Bhaskara

A=	24.5
B=	1650
C=	-3.86E+02

Remf1	0.23335063
Remf2	-0.63108981

vmf= 2.19E+00 cm/s

Conociendo el valor de la porosidad de mínima fluidización, los cálculos conducen a una $u_{mf}=4$ cm/s (muy próxima a la experimental). Si se desconoce la porosidad de mínima fluidización, la ecuación (5.16) conduce a una velocidad de aproximadamente 2.2 cm/s.

5.5. Transición de fluidización suave a lechos burbujeantes

La velocidad de fluido que hace que aparezcan las primeras burbujas se llama velocidad de mínimo burbujeo (u_{mb}). Cuando se fluidiza con líquidos esta velocidad no tiene significado. Si se fluidiza con gas y las partículas son grandes, las burbujas aparecen tan pronto como se logra fluidizar, es decir: $u_{mb} \cong u_{mf}$. Cuando las partículas son muy pequeñas, el burbujeo se da a velocidades mayores que la mínima de fluidización.

Para todo punto operativo del lecho fluidizado la caída de presión permanece constante, por lo tanto a partir de la ecuación (5.4) puede deducirse que:

$$(1 - \varepsilon_f)L_f g(\rho_p - \rho_f) = (1 - \varepsilon_{mf})L_{mf} g(\rho_p - \rho_f) \quad (5.17)$$

En otros términos,

$$\frac{L_f}{L_{mf}} = \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{(1 - \varepsilon_f)} \quad (5.18)$$

Cuando el lecho se expande porque ha aumentado la velocidad del gas, la porosidad del lecho disminuye para que se satisfaga la condición de caída de presión constante.

5.6. Clasificación Geldart de partículas

Geldart (Powder Technology, 7,285, 1973 y 19, 133, 1978) estudió la fluidización de una gran cantidad de sólidos de diferentes tipos y tamaños, reconoció que existían cuatro clases de partículas bien definidas. En la Figura 5.7 se presenta la clasificación hallada. Ordenadas de menor a mayor tamaño, las clases de Geldart son:

- **Grupo C:** Las partículas son cohesivas o son polvos. Es muy complicado lograr una fluidización porque las fuerzas entre partículas son difíciles de vencer. Como ejemplo podemos citar las harinas, almidón, etc. Para poder fluidizarlas deben ser mezcladas con partículas de mayor tamaño.
- **Grupo A:** Las partículas pueden ser aireadas, se fluidizan fácilmente. Se logra una fluidización suave a bajas velocidades y lechos burbujeantes controlados con

pequeñas burbujas a altas velocidades. Pertenecen a este grupo las partículas que poseen una baja densidad de partícula y/o diámetros relativamente pequeños. La velocidad de mínimo burbujeo es mayor que la de mínima fluidización.

- **Grupo B:** Estos sólidos se fluidizan bien, se forman burbujas vigorosas que crecen hasta tamaños importantes. Las burbujas aparecen tan pronto como se alcanza la velocidad mínima de fluidización.
- **Grupo D:** Con este tipo de sólidos se obtienen lechos de chorro estables (spouted beds). En general el gas se canaliza, y se requieren grandes caudales de aire para lograr la fluidización. En estos casos los lechos burbujeantes pueden lograrse si se utilizan lechos de poca altura y si la velocidad no es mucho mayor que la de mínima fluidización. Para evitar el slugging se diseña una parte superior del lecho con un área mayor.

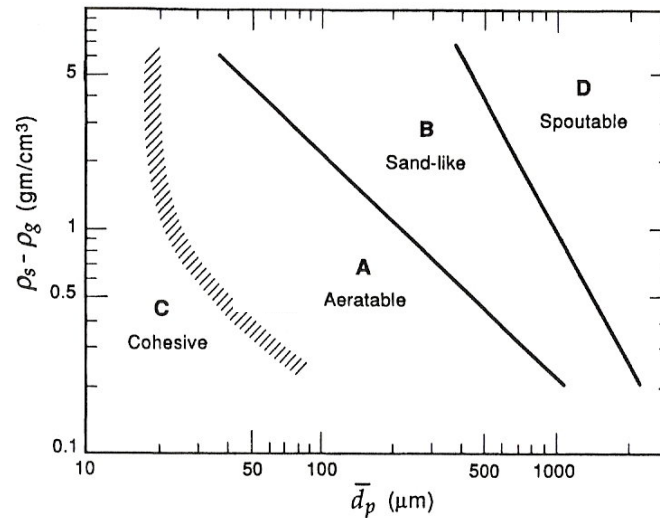


Figura 5.7. Clasificación de partículas Geldart. $\bar{d}_p = x_{SV}$, $\rho_s = \rho_p$. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).

5.7. Velocidad Terminal

Las partículas pueden abandonar el lecho fluidizado y ser arrastrado por el mismo si la velocidad superficial de fluidización supera la velocidad terminal de las partículas. El cálculo de la velocidad terminal se realiza según lo descrito en el Capítulo 4. Para evitar que las partículas sean arrastradas fuera del lecho, el equipo debe diseñarse de tal modo que la velocidad del gas satisfaga la siguiente condición:

$$u_{mf} < u < u_t \tag{5.19}$$

Cuando tenemos una distribución la velocidad mínima de fluidización debe calcularse usando el x_{SV} , mientras que para calcular la u_t debe considerarse el tamaño más pequeño presente en la distribución.

5.8. Regímenes de fluidización. Ventanas operativas.

Varios investigadores han construido mapas de operación para identificar a priori el tipo de comportamiento que tendrá el lecho. La Figura 5.8 presenta los regímenes de operación, según el valor de la abscisa ($d_v^* = x^*$), visto en el Capítulo 4 y el valor de la ordenada u^* :

$$d_v^* = d_v \left[\frac{(\rho_p - \rho_f) g \rho_f}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (4.20)$$

$$u^* = u \left[\frac{\rho_f^2}{(\rho_p - \rho_f) g \mu} \right]^{1/3} \quad (4.21)$$

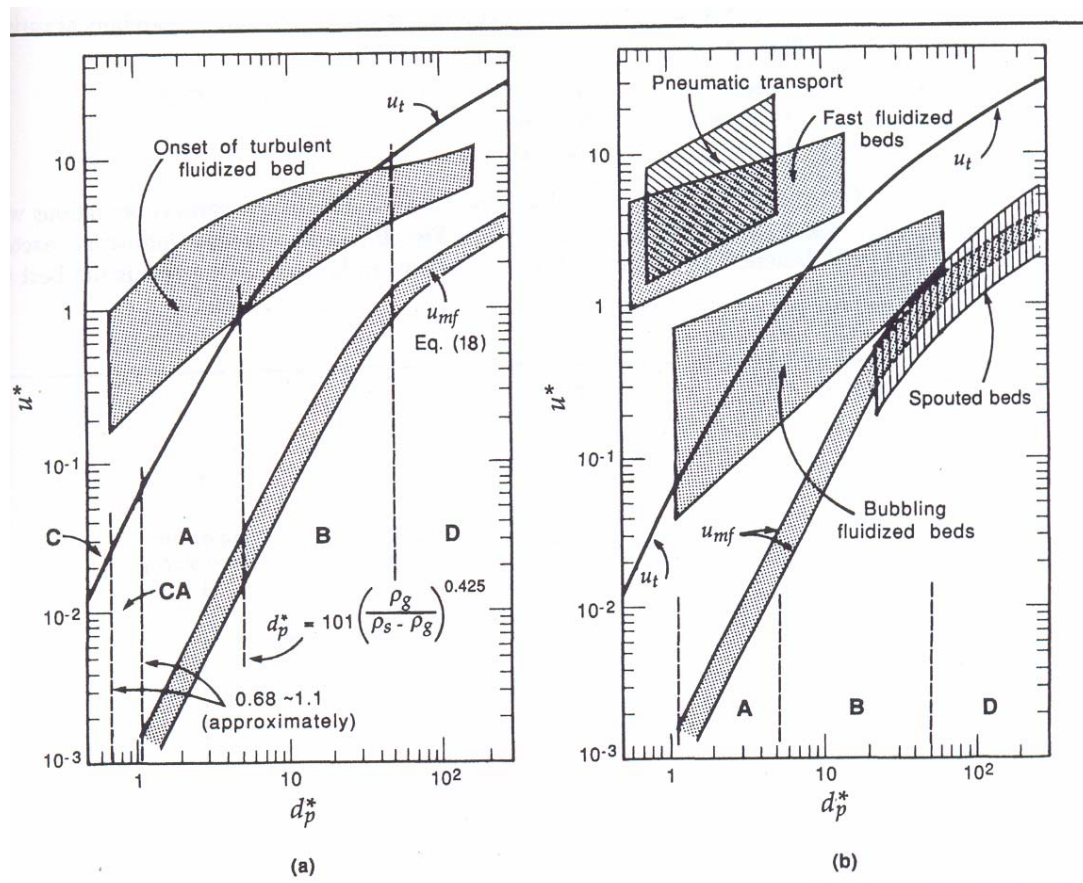


Figura 5.8. Regímenes de operación. $d_p^* = d_v^*$. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).

Ejemplo:

Predecir el modo de fluidización de dos tipos de partículas que son fluidizadas con gas a una velocidad superficial de 40 y 80 cm/s.

a) $\rho_p = 1.5 \text{ g/cm}^3$; $d_V = 60 \text{ }\mu\text{m}$; $\rho_f = 0.0015 \text{ g/cm}^3$; $\mu = 2 \times 10^{-4} \text{ g/cm s}$

b) $\rho_p = 1.5 \text{ g/cm}^3$; $d_V = 450 \text{ }\mu\text{m}$; $\rho_f = 0.001 \text{ g/cm}^3$; $\mu = 2.5 \times 10^{-4} \text{ g/cm s}$

u=	40 cm/s	80 cm/s
dv*=	2.2827	2.28273736
u*=	0.7885	1.5765

Según la Figura 5.8 b, el lecho es burbujeante y está cercano a un régimen turbulento

Según la Figura 5.8 b, el lecho ingresa a la zona fluidización rápida
Se superó u_t

Caso b)

Rof=	1.00E-03 g/cm ³
Rop=	1.5 g/cm ³
dv=	0.045 cm
mu=	2.50E-04 g/cm s

u=	40 cm/s	80 cm/s
dv*=	12.8903	12.890262
u*=	0.5586	1.1169

Según la Figura 5.8 b, el lecho es burbujeante

Según la Figura 5.8 b, el lecho es burbujeante

5.9. Caída de presión total en un lecho fluidizado.

En la Figura 5.9 se muestra un lecho fluidizado indicando tres localizaciones donde se mide la presión del fluido. La caída de presión del lecho (ΔP_B) se define como sigue:

$$-\Delta P_B = P_3 - P_2 \quad (5.20)$$

El medio que se utiliza para fluidizar sufre una caída de presión en el lecho, y una caída adicional en la grilla (ΔP_g), la cual puede ser calculada a partir de datos experimentales como:

$$-\Delta P_g = P_2 - P_1 \quad (5.21)$$

En consecuencia la caída de presión total en el lecho es:

$$\Delta P_T = \Delta P_B + \Delta P_g = P_1 - P_3 \quad (5.22)$$

Si es necesario diseñar el compresor, soplante o ventilador que permita la fluidización el valor de la caída de presión total debe conocerse. Además, dependiendo de la caída de presión que se registre en la grilla se logrará o no una buena distribución del fluido en el lecho.

Ya se ha visto como calcular la caída de presión en el lecho, a continuación se presentarán expresiones para el cálculo de la pérdida de carga en la grilla y reglas del pulgar para un buen diseño del distribuidor.

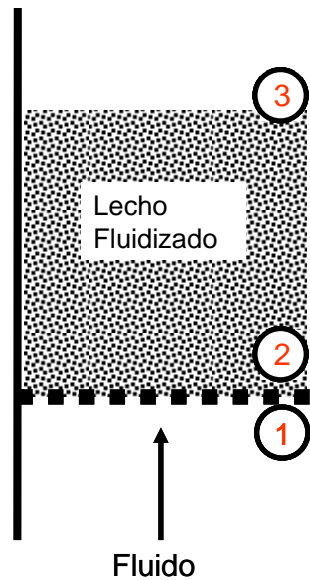


Figura 5.9. Medidores de presión. Cálculo de la caída de presión total.

5.9.1. Diseño del distribuidor. Pérdida de carga.

5.9.1.1. Tipos de grillas

Los distribuidores (también llamados grillas) deben diseñarse para:

- Producir una fluidización estable en todo el lecho.
- Operar por varios años sin obstruirse o romperse.
- Soportar el peso del lecho en el arranque de la unidad.
- Minimizar el escurrimiento de sólidos debajo de la grilla.

Existen muchos tipos de grillas, en la Figura 5.10 sólo se esquematizan algunas de ellas.

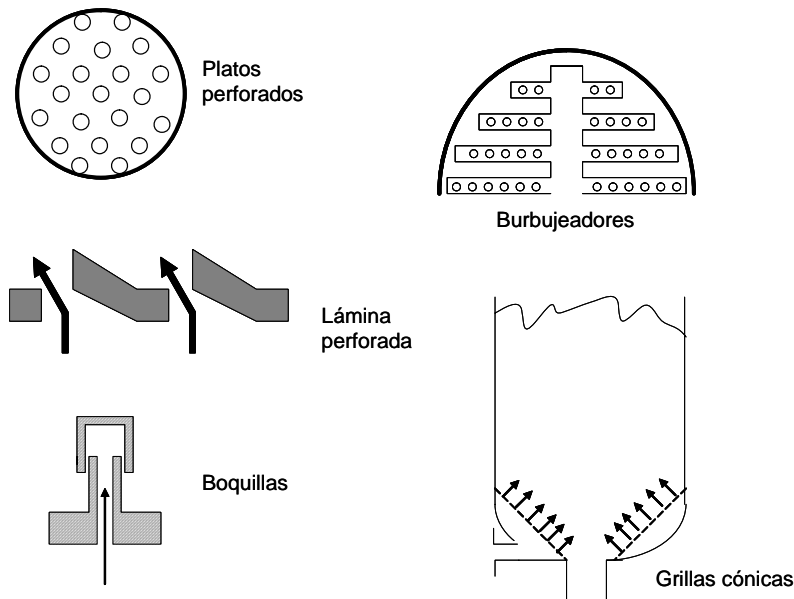


Figura 5.10. Grillas comunes.

Platos perforados: son de simple fabricación y económicos, sin embargo pueden deformarse durante la operación, para evitar el pasaje de sólidos hacia debajo de la grilla se requiere una alta pérdida de carga.

Boquillas: con este diseño el pasaje de sólidos hacia debajo de la grilla se evita casi totalmente, sin embargo suelen ser costosas, difíciles de limpiar.

Burbujeadores: como son tubos perforados los sólidos no pueden ingresar a la zona por donde entra el medio de fluidización, sin embargo se pueden localizar sólidos debajo del burbujeador y no integrarse al lecho.

Grillas laterales cónicas: promueven un buen mezclado de los sólidos, evitan la segregación y facilitan la descarga de los sólidos. Son relativamente más complicadas para construir y requieren una pérdida de carga de consideración para asegurar una buena distribución del fluido.

Láminas perforadas: Las placas son relativamente finas, poseen agujeros semielípticos con un borde sobresaliente (similar a los típicos rayadores de queso). Los agujeros permiten por ejemplo conducir los sólidos hacia el área de descarga.

Esta grilla promueve el mezclado de los sólidos. Estas placas requieren algún refuerzo mecánico debajo de ellas para soportar el peso del lecho.

5.9.1.2. Penetración de los jets

En la Figura 5.11a se muestra la formación de burbujas inmediata arriba del distribuidor, esto sucede cuando la velocidad es relativamente pequeña en el orificio de la placa. Sin embargo cuando la velocidad en los orificios (Figura 5.11b) es más grande se forma un jet que tiene una dada altura, a partir del cual la burbuja se despega. Es importante conocer la penetración del jet la por las siguientes razones:

- Para determinar cuan lejos hay que localizar elementos en el lecho para evitar la erosión (los jets llevan sólidos a altas velocidades lo que causa efectos como el del arenado).
- Para decidir el diseño de la grilla, a los efectos de tener la longitud del jet deseada.
- Para minimizar (o eventualmente) maximizar la atrición de los sólidos en la región del jet.

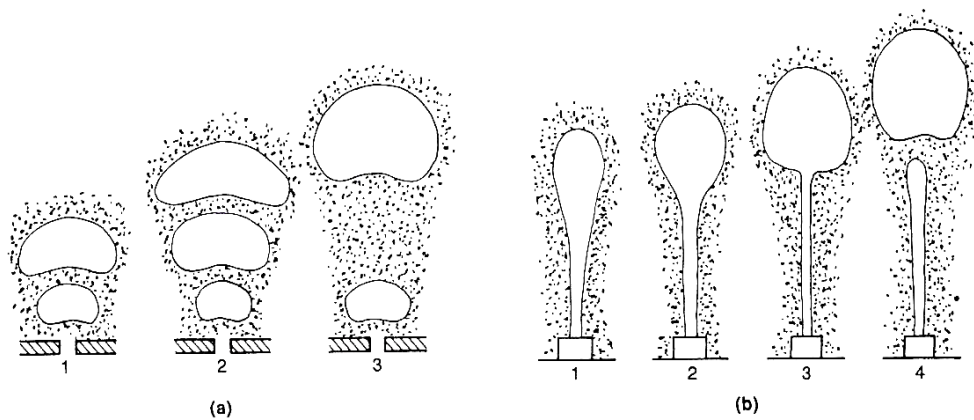


Figura 5.11. a) Formación de burbujas para una velocidad en el orificio relativamente baja, b) para altas velocidades, formación inicial del jet. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991).

La longitud del jet se define como la distancia entre la grilla y el centro de la primera burbuja que se despegan del jet. Existen varias correlaciones, y se han encontrado diferencias significativas en las predicciones, de manera que hay que seleccionar la correlación que represente mejor el sistema y los resultados deben considerarse como aproximados. En este apunte se cita la correlación descrita por Kunii y Levenspiel (1991).

$$\frac{L_j}{d_{or}} = 21.2 \left(\frac{u_{or}^2}{g d_v} \right)^{0.37} \left(\frac{d_{or} u_{or} \rho_g}{\mu} \right)^{0.05} \left(\frac{\rho_g}{\rho_p} \right)^{0.68} \left(\frac{d_v}{d_{or}} \right)^{0.24} \quad (5.23)$$

donde L_j , d_{or} y u_{or} son la longitud del jet, el diámetro del orificio y la velocidad en el orificio, respectivamente. La ecuación indica que si los orificios son más pequeños la penetración del jet será menor pero a costa de una mayor caída de presión en la grilla.

5.9.1.3. Caída de presión en la grilla

La experiencia en distribuidores indica que si la grilla posee una caída de presión suficiente se garantiza un flujo similar en toda la sección del distribuidor. La **primera regla del pulgar** aceptada en el diseño de las placas distribuidoras es:

$$\Delta P_g = (0.2 - 0.4) \Delta P_B \quad (5.24)$$

Esto indica que la caída de presión en la grilla debe ser menor que la que se observa en el lecho en un porcentaje que va del 20 al 40 % de la pérdida de carga en el lecho. Esta relación debe considerarse como un valor conservativo, en casos especiales la relación entre ambas caídas de presión puede ser menor.

Como **segunda regla del pulgar** debe considerarse que en lechos de gran escala la pérdida de carga en la grilla no puede ser menor que:

$$\Delta P_g \geq 2.5 \text{ KPa} \quad (5.25)$$

5.9.1.4. Diseño de la grilla

Para diseñar la geometría del distribuidor, por ejemplo el área libre de paso, es necesario conocer la velocidad en los orificios. Como en cualquier descarga a través de una restricción, la velocidad en los orificios puede calcularse como sigue.

$$u_{or} = C_{d_{or}} \left(\frac{2 \Delta P_g}{\rho_f} \right)^{0.5} \quad (5.26)$$

donde $C_{d_{or}}$ es el coeficiente de descarga.

El coeficiente de descarga es función del espesor del plato distribuidor, del arreglo de los agujeros, etc. Hay diferentes correlaciones dependiendo del tipo del distribuidor. Usaremos la relación que presenta Kunii y Levenspiel en función del número de Reynolds del lecho (D = diámetro del lecho, y u es la velocidad superficial en el lecho) (ver Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Coeficiente de descarga para platos perforados y boquillas

$Re_t = \frac{D u \rho_f}{\mu}$	100	300	500	1000	2000	>3000
Cd_{or}	0.68	0.70	0.68	0.64	0.61	0.60

La relación entre u y u_{or} permite calcular el porcentaje de área libre de la placa de distribución. En efecto, la siguiente relación se satisface:

$$\frac{u}{u_{or}} = \frac{A_{or}}{A_t} = \text{fracción de área libre} \quad (5.26)$$

donde A_t representa el área transversal total de la grilla y A_{or} el área total de los orificios. La fracción de área libre dada por la ecuación (5.26) no puede ser mayor que el 10%.

El número de agujeros de la grilla requerido, a partir de la ecuación (5.26), debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$u = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 u_{or} N_{or} \quad (5.27)$$

donde N_{or} es el número de orificios totales en la placa, expresado por unidad de área. Se recomienda un número de orificios por m^2 mayor a 20.

Ejemplo:

Diseñe un distribuidor de placa perforado. La presión y velocidad superficial del gas antes de entrar al distribuidor son 3 bar y 0.4 m/s; respectivamente. Considere además que para evitar la atrición de sólidos la velocidad en los agujeros debe ser menor o igual a 40 m/s.

Datos:

$$D = 4m$$

$$\rho_p = 1500 \text{ Kg/m}^3$$

$$L_{mf} = 2m$$

$$\rho_f = 3.6 \text{ Kg/m}^3$$

$$\varepsilon_{mf} = 0.48$$

$$\mu = 2e - 5 \text{ Kg/m s}$$

1. Cálculo de la caída de presión en el lecho

$$\Delta P_B = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_f) g L_{mf}$$

$$\Delta P_B = 15,251.31 \text{ Pa} = 153 \text{ cm agua}$$

2. Cálculo de la caída de presión en la grilla

$$\Delta P_g = 0.3 \Delta P_B$$

$$\Delta P_g = 4,575.39 \text{ Pa} = 46 \text{ cm agua} >2500 \text{ Pa, OK!}$$

3. Cálculo del Re en el lecho

$$Re_t = \frac{D u \rho_f}{\mu}$$

$$Re_t = 2.88E+05 >3000$$

$$Cd_{or} = 0.6$$

4. Cálculo de la velocidad en los orificios

$$u_{or} = Cd_{or} \left(\frac{2 \Delta P_g}{\rho_f} \right)^{0.5}$$

$$u_{or} = 30.25 \text{ m/s} <40 \text{ m/s OK!}$$

5. Cálculo de área libre

$$\frac{u}{u_{or}} = \frac{A_{or}}{A_t} = \text{fracción de área libre}$$

$$\% \text{ Area libre} = 1.32 <10\% \text{ OK}$$

$$A_t = 12.57 \text{ m}^2$$

6. Número de orificios

$$u = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 u_{or} N_{or}$$

El número de orificios depende del diámetro seleccionado!

$d_{or} \text{ (m)}$	0.001	0.002	0.003	0.004
N_{or}	16836.08	4209.02	1870.68	1052.25

Si el diámetro es muy chico se puede obstruir, si es muy grande los sólidos pueden pasar

5.10. Régimen Burbujeante

En la Figura 5.12 se muestra un lecho burbujeante y los principales componentes de las burbujas. En lecho burbujeante se pueden reconocer dos regiones bien definidas:

- **Burbujas:** En esta fase la concentración de sólidos es muy baja o nula.
- **Emulsión:** Esta región contiene casi la totalidad de los sólidos, por eso la fase emulsión también es llamada fase densa. Además de los sólidos contiene

una fracción del gas total del sistema. Estudios realizados indican que el gas que pasa por la emulsión es la cantidad mínima que se necesita para fluidizar los sólidos, entonces la fase densa puede asumirse en condiciones de mínima fluidización.

El gas excedente atraviesa el lecho como burbujas. La Figura 5.13 muestra la conceptualización de ambas fases. Entre ambas fases se puede intercambiar masa y energía de manera muy eficiente.

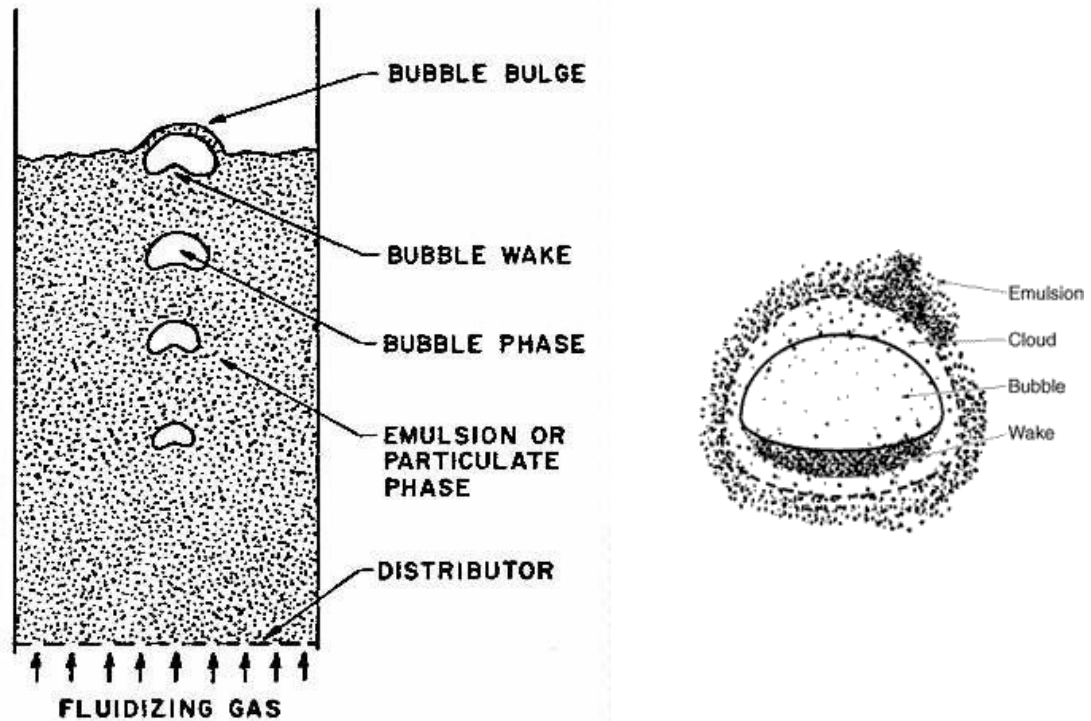


Figura 5.12. Burbujas en un lecho burbujeante.

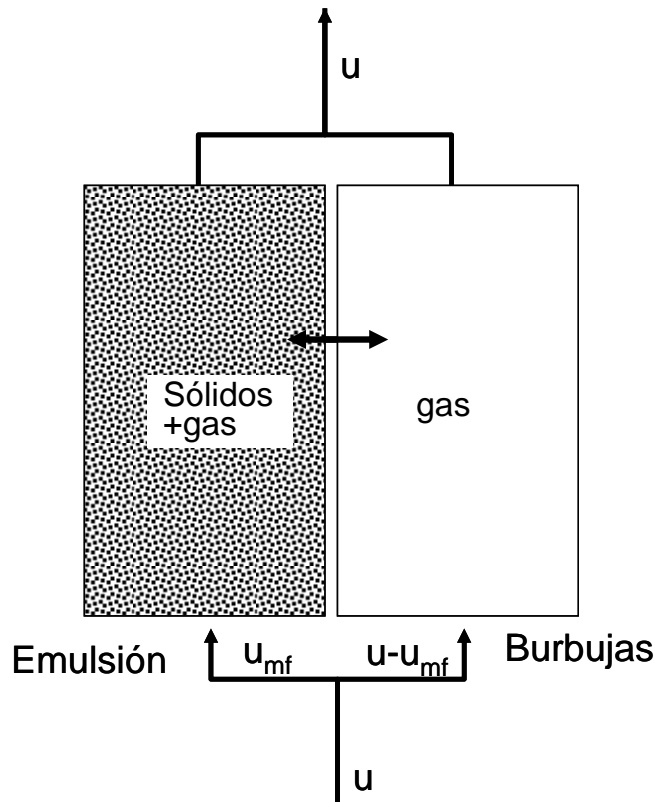


Figura 5.13. Conceptualización del modelo de dos fases de un lecho burbujeante.

5.10.1. Características de las burbujas

Algunas características distintivas de las burbujas se listan a continuación:

- Las burbujas tienen una pequeña cantidad de sólidos.
- No son esféricas, son prácticamente semiesféricas en la parte superior, y achatadas en la inferior (ver Figura 5.12).
- Las burbujas pequeñas suben despacio, mientras que las grandes lo hacen más rápido.
- Pueden coalescer para dar burbujas más grandes, por lo tanto las propiedades de una burbuja aislada se ven afectadas por la presencia de otras.
- Una burbuja aislada asciende por el lecho con una velocidad (u_{br}), que está dada por las siguientes correlaciones:

$$u_{br} = 0.711 (gd_b)^{1/2} \quad \text{para } \frac{d_b}{D} < 0.125 \quad (5.28)$$

$$u_{br} = \left[0.711 (gd_b)^{1/2} \right] 1.2 \exp\left(-1.49 \frac{d_b}{D}\right) \quad \text{para } 0.125 < \frac{d_b}{D} < 0.6 \quad (5.29)$$

donde d_b es el diámetro de las burbujas y D es el diámetro del lecho, para relaciones $\frac{d_b}{D} > 0.6$, el lecho no es burbujeante, se producen slugs.

- Las burbujas a medida que ascienden tienen una estela (wake) con una cantidad significativa de sólidos. Aunque si bien los sólidos ascienden con las burbujas, el flujo neto de sólidos en la emulsión es hacia abajo.
- El gas de las burbujas permanece mayoritariamente dentro de ellas, sin embargo parte del gas puede penetrar una pequeña distancia dentro de la emulsión, esta región se denomina nube. La nube puede ser fina o gruesa de acuerdo a las velocidades relativas de la burbuja y de la emulsión (ver Figura 5.12).
- **Las burbujas lentas no tienen nubes apreciables.** Esto se da cuando $u_{br} < u_f = u_{mf} / \epsilon_{mf}$ (la velocidad de la burbuja es menor que la velocidad del gas intersticial en la emulsión).
- **Las burbujas rápidas tienen nubes apreciables.** Este comportamiento se verifica cuando $u_{br} > u_f = u_{mf} / \epsilon_{mf}$ (la velocidad de la burbuja es menor que la velocidad del gas intersticial en la emulsión).

5.10.2. Movimiento de los sólidos

La Figura 5.14 muestra una secuencia de fotografías indicando que cuando la burbuja sube arrastra sólidos en la estela, que luego se reintegran a la emulsión. El lugar del lecho por donde los sólidos son arrastrados o caen es diferente de acuerdo a la geometría del lecho, caudal de fluidización y al tipo de partículas. La Figura 5.15 muestra los patrones de flujo para distintas condiciones. Las flechas ascendentes indican el movimiento de las burbujas que arrastran a los sólidos, mientras que las descendentes indican el movimiento de sólidos sin estar asociados al movimiento de las burbujas.

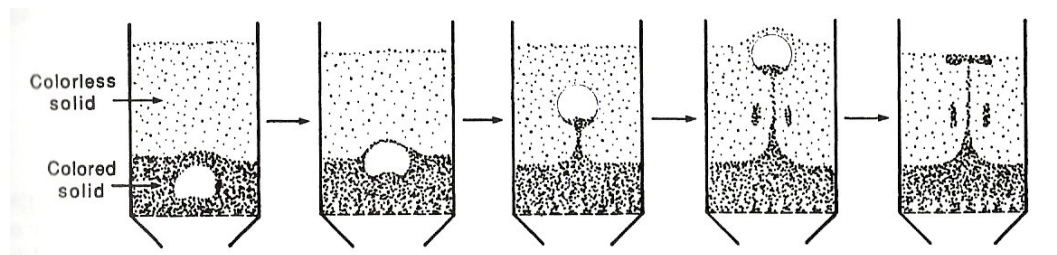


Figura 5.14. Movimiento de sólidos. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991)

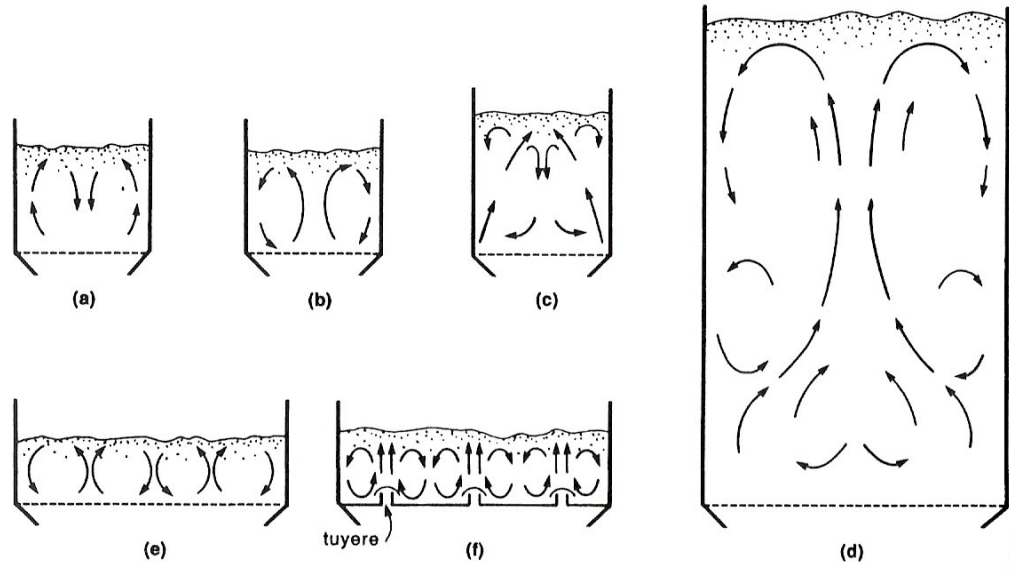


Figura 5.15. Movimiento de sólidos. H= altura del lecho, D= diámetro del lecho. a) $H/D \cong 1$ y baja u ; b) $H/D \cong 1$ y alta u ; c) $H/D \cong 2$ y alta u ; d) patrón de flujo común en lechos profundos, e) lechos poco profundos con placa de distribución, f) lechos poco profundos con boquillas. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991)

5.10.3. El modelo de las dos fases modificado

El modelo simple de las dos fases de la Figura 5.13 indica que la velocidad en exceso definida como:

$$u_{ex} = u - u_{mf} \quad (5.30)$$

es la velocidad del gas que circula como burbujas. Esta suposición del modelo simple no es válida ya que las burbujas no se mueven en realidad a dicha velocidad. Kunii y Levenspiel, a partir del modelo original de las dos fases, introducido originalmente por Toomey y Johnstone (1952), realizaron una serie de suposiciones que permitieron convertir el modelo de las dos fases en una representación matemática simple de mucho uso. Para llegar al modelo de Kunii y Levenspiel se deben cuantificar ciertas propiedades que se describen a continuación.

Tamaño y crecimiento de las burbujas

Como se mencionara anteriormente las burbujas tienen una forma particular, que además varía a lo largo del lecho. Sin embargo es necesario describir el diámetro promedio de la burbuja. El promedio se define usualmente como el diámetro de una esfera equivalente que posee el mismo volumen que la burbuja original. Si bien las burbujas crecen, cuando se fluidizan partículas pequeñas, lo hacen hasta un diámetro

final relativamente pequeño. A medida que las partículas son de mayor tamaño, las burbujas evolucionan hasta tamaños más grandes, y en el caso extremo de sólidos muy grandes las burbujas parecen crecer sin límite. Veremos a continuación algunas correlaciones para determinar el diámetro de las burbujas.

Mori y Wen (1975) para **sólidos del tipo B y D** propusieron la siguiente correlación:

$$\frac{d_{bm} - d_b}{d_{bm} - d_{b0}} = e^{-0.3z/D} \quad (5.31)$$

donde d_b es el diámetro de la burbuja en cualquier cota axial z , d_{bm} es el diámetro máximo que alcanzaría la burbuja en un lecho extremadamente alto, d_{b0} el diámetro inicial de la burbuja (arriba del distribuidor), y D es el diámetro del lecho. El valor de d_{bm} está dado por la siguiente ecuación:

$$d_{bm} = 0.65 \left[\frac{\pi}{4} D^2 (u - u_{mf}) \right]^{0.4} \quad [\text{cm}] \quad (5.32)$$

Si el lecho se fluidiza con una **baja velocidad**, las burbujas que se forman en el distribuidor no se tocan entre sí, el d_{b0} puede calcularse como sigue:

$$d_{b0} = \frac{1.30}{g^{0.2}} \left[\frac{(u - u_{mf})}{N_{or}} \right]^{0.4} \quad \text{válida para } d_{b0} \leq l_{or}, \quad [\text{cm}] \quad (5.33)$$

donde l_{or} es el espacio entre los centros dos agujeros adyacentes, por lo tanto el número de orificios por unidad de área se calcula como sigue:

$$N_{or} = \frac{1}{l_{or}^2} \quad \text{para un arreglo cuadrado de agujeros} \quad (5.34)$$

$$N_{or} = \frac{2}{\sqrt{3} l_{or}^2} \quad \text{para un arreglo de agujeros triangular equilátero} \quad (5.35)$$

Si el lecho se fluidiza con una **alta velocidad**, las burbujas que se forman en el distribuidor pueden tocarse y solaparse arriba del distribuidor, en este caso el d_{b0} se calcula del siguiente modo:

$$d_{b0} = \frac{2.78}{g} (u - u_{mf})^2 \quad \text{válida para } d_{b0} > l_{or}, \quad [\text{cm}] \quad (5.36)$$

La ecuación (5.31) es válida para las siguientes condiciones experimentales:

$$\begin{aligned}
 D &\leq 1.3\text{m} \\
 60 &\leq d_v \leq 450\mu\text{m} \\
 0.5 &\leq u_{mf} \leq 20\text{cm/s} \\
 u - u_{mf} &\leq 48\text{cm/s}
 \end{aligned}
 \tag{5.37}$$

Velocidad de ascenso de las burbujas

Las ecuaciones (5.28) y (5.29) representan la velocidad de ascenso de una burbuja aislada, sin embargo la velocidad de las burbujas en su conjunto verifican las siguientes ecuaciones (note que la u_b que se presenta no es igual a u_{ex} definida por la ecuación (5.30):

Para sólidos tipo **Geldart A** y $D \leq 1$ m:

$$u_b = 1.55[(u - u_{mf}) + 14.1(d_b + 0.005)]D^{0.32} + u_{br}, \quad \text{m/s} \tag{5.38}$$

Para sólidos tipo **Geldart B** y $D \leq 1$ m:

$$u_b = 1.6[(u - u_{mf}) + 1.13 d_b^{0.5}]D^{1.35} + u_{br}, \quad \text{m/s} \tag{5.39}$$

La u_{br} utilizada en las ecuaciones (5.38) y (5.39) es la (5.28), independientemente de la relación existente entre d_b y D .

Ejemplo:

Estime el diámetro promedio de burbuja d_b y la velocidad de las burbujas para una altura de lecho $z=0.5$ m en un lecho de $D=0.5$ m. El sólido es arena y el distribuidor es un plato perforado con un arreglo de agujeros de manera triangular.

Datos:

$$D = 0.5\text{m}$$

$$z = 0.5\text{m}$$

$$\rho_p = 2.6\text{g/cm}^3$$

$$x_{SV} = 100\mu\text{m}$$

$$u_{mf} = 1\text{cm/s}$$

$$u = 0.45\text{m/s}$$

$$l_{or} = 30\text{mm}$$

Datos

D= 50 cm
z= 50 cm
ρ_{op}= 2600 Kg/m³
x_{sv}= 100 μm
u_{mf}= 1 cm/s
u= 45 cm/s
l_{or}= 0.03 m
g= 980 cm/s²

Cálculo de db

Tipo de partícula: **B** Según Fig. 5.7, asumiendo r_{of}=0.

$$N_{or} = \frac{2}{\sqrt{3} l_{or}^2}$$

$$N_{or} = 0.1283 \text{ cm}^{-2}$$

$$d_{b0} = \frac{1.30}{g^{0.2}} \left[\frac{(u - u_{mf})}{N_{or}} \right]^{0.4}$$

todas las variables expresadas en cm!!!!

$$d_{b0} = 3.3868 \text{ cm}$$

no sirve correlación usada db0>l_{or}

$$d_{b0} = \frac{2.78}{g} (u - u_{mf})^2$$

$$d_{b0} = 5.4919 \text{ cm}$$

db0>l_{or}, OK!!!

$$d_{bm} = 0.65 \left[\frac{\pi}{4} D^2 (u - u_{mf}) \right]^{-0.4}$$

todas las variables expresadas en cm!!!!

$$d_{bm} = 61.306 \text{ cm}$$

$$\frac{d_{bm} - d_b}{d_{bm} - d_{b0}} = e^{-0.3 z / D}$$

$$d_b = d_{bm} - (d_{bm} - d_{b0}) e^{-0.3 z / D}$$

$$d_b = 19.958 \text{ cm}$$

Cálculo de ub

$$u_{br} = 0.711 (g d_b)^{1/2}$$

$$0.39916072$$

$$u_{br} = 99.436 \text{ cm/s}$$

$$0.99435517 \text{ m/s}$$

$$u_b = 1.6 \left[(u - u_{mf}) + 1.13 d_b^{0.5} \right] D^{1.35} + u_{br}$$

todo en m!!!!

$$u_b = 1.5874 \text{ m/s}$$

El modelo de Kunii y Levenspiel

Se considera que el lecho burbujeante está constituido por dos fases: emulsión y burbuja. La porosidad en las burbujas se asume unitaria ($\varepsilon_b=1$; no hay sólidos en su interior). La fracción de burbujas en el lecho se denomina δ , mientras que las porosidades total del lecho y de la emulsión se denominan ε_f y ε_e ; respectivamente. Estas propiedades se relacionan del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \varepsilon_f &= \delta + (1 - \delta) \varepsilon_e \\ \frac{m_{fT}^3}{m_b^3} &= \frac{m_{burb}^3}{m_b^3} + \left(\frac{m_b^3}{m_b^3} - \frac{m_{burb}^3}{m_b^3} \right) \frac{m_{fe}^3}{m_e^3} \\ \frac{m_{fT}^3}{m_b^3} &= \frac{m_{burb}^3}{m_b^3} + \left(\frac{m_e^3}{m_b^3} \right) \frac{m_{fe}^3}{m_e^3} \\ \frac{m_{fT}^3}{m_b^3} &= \frac{m_{burb}^3}{m_b^3} + \frac{m_{fe}^3}{m_b^3} \end{aligned} \quad (5.40)$$

La expresión (5.40) también puede ser expresada como:

$$1 - \varepsilon_f = (1 - \delta)(1 - \varepsilon_e) \quad (5.41)$$

Las ecuaciones (5.40) o (5.41) puede ser utilizada para determinar la porosidad en la emulsión si se conocen los otros parámetros. En caso de no conocerlos, la porosidad de la emulsión puede ser aproximada como sigue:

$$\begin{aligned} \varepsilon_e &\cong \varepsilon_{mb} && \text{para sólidos Geldart A} \\ \varepsilon_e &\cong \varepsilon_{mf} && \text{para sólidos Geldart B y D} \end{aligned} \quad (5.42)$$

La velocidad intersticial de ascenso del gas en la emulsión se define como (asumiendo $\varepsilon_e \cong \varepsilon_{mf}$):

$$u_e = \frac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}} \quad (5.42)$$

Kunni y Levenspiel sugieren las siguientes correlaciones para estimar la fracción de burbujas en el lecho:

- Burbujas lentas: $u_b < u_e$

$$\delta = \frac{u - u_{mf}}{u_b + 2u_{mf}} \quad (5.43)$$

- Burbujas intermedias: $u_e < u_b < 5u_e$

$$\delta = \begin{cases} \frac{u - u_{mf}}{u_b + u_{mf}} & \text{cuando } u_b \cong u_e \\ \frac{u - u_{mf}}{u_b} & \text{cuando } u_b \cong 5u_e \end{cases} \quad (5.44)$$

- Burbujas rápidas: $u_b > 5u_e$

$$\delta = \frac{u - u_{mf}}{u_b - u_{mf}} \quad (5.45)$$

- Burbujas muy rápidas: $u \gg u_{mf}$

$$\delta = \frac{u}{u_b} \quad (5.46)$$

5.11. Slugging

Cuando el lecho fluidizado es angosto y alto, las burbujas que se forman en el distribuidor pueden crecer hasta el diámetro del lecho y formarse slugs, o tapones de gas. Pueden producirse slugs axiales (Figura 5.16a), sobre las paredes (Figura 5.16b) o separarse completamente el gas de la emulsión (Figura 5.16c).

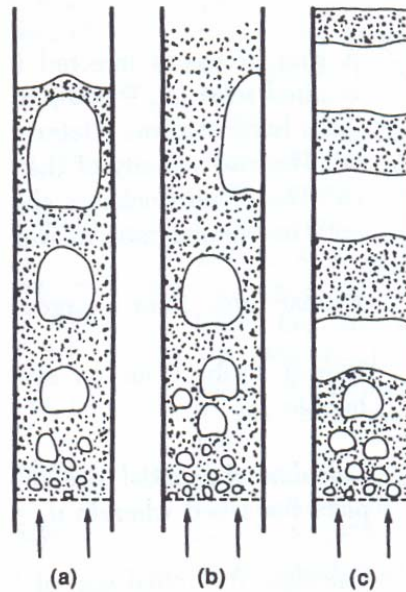


Figura 5.16. Diferentes tipos de slugs. Fuente: Kunii y Levenspiel (1991)

Para evitar este modo de contacto se pueden realizar los siguientes cálculos:

$$u_{\text{slug}} = u_{\text{mf}} + 0.07(gD)^{0.5} \quad (5.47)$$

$$z_{\text{slug}} = 60(D)^{0.175} \quad [\text{cm}] \quad (5.48)$$

Un lecho estará en condiciones de slugging si la $u > u_{\text{slug}}$ y la altura del lecho es mayor a z_{slug} .