

Contenido *Tema 10*

FLUIDIZACIÓN

- ❑ Introducción. Progreso de la fluidización

- ❑ Estimación de la velocidad mínima de fluidización
 - Régimen viscoso
 - Régimen turbulento
 - Aplicación lavado de filtros de arena

- ❑ Mínima fluidización, lecho expandido y arrastre
 - Partículas ligeras y/o pequeñas
 - Partículas densas y/o grandes

- ❑ Clases de fluidización
 - Fluidización burbujeante
 - Fluidización particulada

- ❑ Aplicaciones de fluidización, Ventajas e inconvenientes

Introducción. Progreso de la fluidización.

En el lecho fluidización se producen cambios en el lecho particulado a medida que se modifica la velocidad:

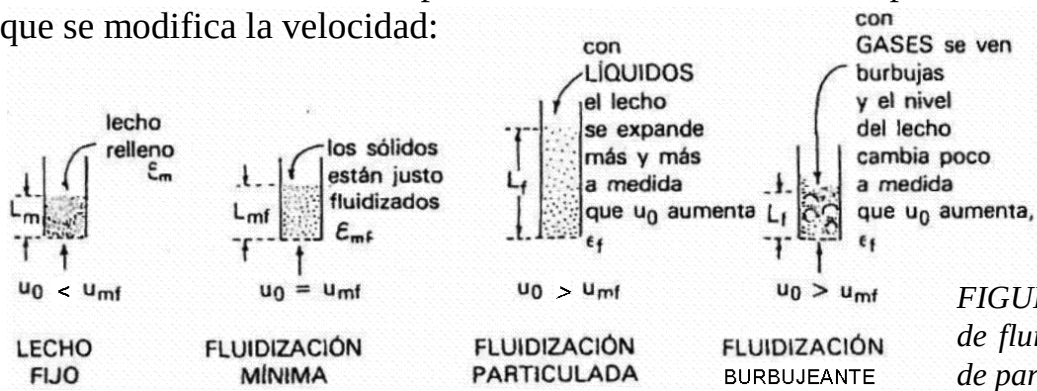


FIGURA 1. situaciones de fluidización de lecho de partículas

— $u_0 < u_{mf}$

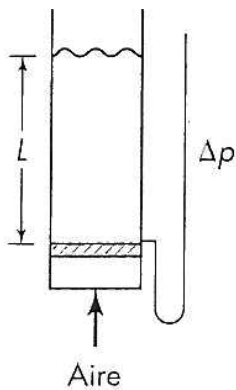
Lecho fijo

— $u_0 = u_{mf}$

Lecho esencialmente quieto. Reordenación de partículas.

— $u_0 > u_{mf}$

Hay que distinguir entre fluidización con líquido o con gas.



- En la fluidización con líquidos el lecho se expanden mas y mas con el aumento de la velocidad. Normalmente en fluidización particulada.
- En la fluidización con aire aparecen burbujas y el nivel del lecho cambia poco. Fluidización particulada o burbujeante.

El punto crítico e la fluidización es la **velocidad mínima de fluidización** . En esta situación se produce que:

$$\left(\begin{matrix} \text{Fuerza de rozamiento} \\ \text{ejercida por fluido} \end{matrix} \right) = \left(\begin{matrix} \text{Peso neto de} \\ \text{sólidos en el lecho} \end{matrix} \right)$$

$$\Delta P A = A L (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho) g$$

$$\boxed{\frac{\Delta P}{L} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho) g}$$

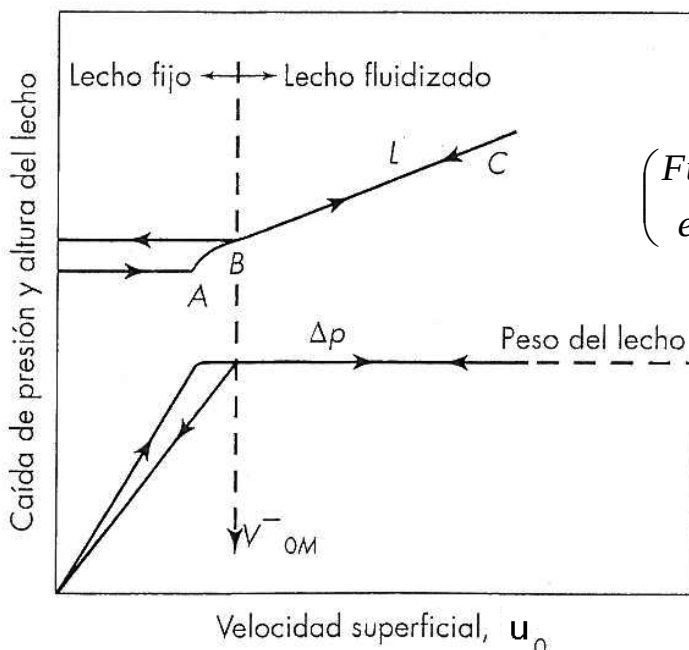


FIGURA 2. Caída de presión en fluidización

Estimación de la velocidad mínima de fluidización

La fluidización mínima puede considerarse como un lecho relleno ligeramente expandido en primera aproximación la ecuación de Ergun puede emplearse para la determinación de la u_{mf} al combinar con la expresión anterior

$$\frac{1,75}{\epsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} Re_{mf} = \frac{d_p^3 (\rho_p - \rho) \rho g}{\mu^2}$$

$$\frac{L}{L_{mf}} = \frac{(1-\epsilon_{mf})}{(1-\epsilon)}$$

La porosidad del lecho en mínima fluidización se calcula a partir de la medición experimental de L_{mf} y propiedades del lecho fijo.

A veces L_{mf} es difícil de determinar y puede recurrirse a la ecuación de Ergun, teniendo en cuenta las simplificaciones siguientes:

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} = 14 \quad (*)$$

$$\frac{1-\epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} = 11 \quad (**)$$

Para $Re_p < 20$ régimen viscoso

$$\frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} Re_{mf} = \frac{d_p^3 (\rho_p - \rho) \rho g}{\mu^2} \xrightarrow{(**)} u_{mf} = \frac{d_e^2 (\rho_p - \rho) g}{1650 \mu}$$

Para $Re_p > 1000$ régimen turbulento

$$\frac{1,75}{\epsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 = \frac{d_p^3 (\rho_p - \rho) \rho g}{\mu^2} \xrightarrow{(*)} u_{mf}^2 = \frac{d_e (\rho_p - \rho) g}{24,5 \rho}$$

Utilizar las simplificaciones (*) y (**) conllevan un error importante y solamente se recomienda su uso si no se conoce ϵ_{mf} .

Lavado de filtros de arena

En el lavado de filtros de arena se realizan normalmente condiciones superiores a la fluidización mínima $u_{rv} > u_{mf}$, por consiguiente, la ecuaciones anteriores pueden emplearse como base para el cálculo de los caudales de retrolavado:

$$Q_{rv} = u_{rv} A$$

Mínima fluidización y lecho expandido

Es interesante observar el grado de separación de la velocidad requerida para la mínima fluidización de la velocidad de arrastre representada por la velocidad terminal de sedimentación de la partícula

Para la u_t calculamos empleamos la ecuación de Stokes considerando flujo viscoso o turbulento según los casos

Partículas ligeras y/o pequeñas

En estos casos se dan condiciones de flujo viscoso

$$\frac{u_t}{u_{mf}} = \frac{\frac{gd_p^2(\rho_p - \rho)}{18\mu}}{\frac{150\mu}{g(\rho_p - \rho)d_p^2} \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\epsilon_{mf}^3}} \Rightarrow \frac{u_t}{u_{mf}} = \frac{8,33(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3}$$

u_t según Stokes en régimen viscoso $1/u_{mf}$ en régimen viscoso

Si tenemos en cuenta valores típicos de $\epsilon_{mf} \sim 0,45$ la velocidad necesaria para el arrastre es del orden de **50 veces superior a la mínima a la mínima de fluidización**

Partículas densas y/o grandes

En estos casos la velocidad necesaria de fluidización es claramente superior y se dan condiciones de régimen turbulento

$$\frac{u_t}{u_{mf}} = 1,75 \left(\frac{4gd_p(\rho_p - \rho)}{3\rho} \right)^{1/2} \left(\frac{1,75\rho}{gd_p(\rho_p - \rho)\epsilon_{mf}^3} \right)^{1/2} \Rightarrow \frac{u_t}{u_{mf}} = \frac{2,33}{\epsilon_{mf}^{3/2}}$$

u_t según Stokes en régimen turbulento considera $C_D \sim 0,4$ $1/u_{mf}$ en régimen turbulento

Si tenemos en cuenta valores típicos de $\epsilon_{mf} \sim 0,45$ la velocidad necesaria para arrastre es del orden de **7,7 veces superior a la mínima de fluidización**; mucho menos intervalo que en caso anterior

Clases de fluidización

Fluidización particulada

En principio podríamos emplear la ecuación de Ergun en régimen viscoso cuando no se encuentra discretamente por encima de u_{mf}

Podemos emplear inversamente para obtener la ϵ según la ecuación anterior. La porosidad como L sigue una dependencia lineal con la u_o

Se observan discrepancia en la práctica entre valor predicho y el experimental.

Las ecuaciones anteriores aún producen más error en líquidos. La carga cinética en estos casos se refleja también en la ΔP . Las ϵ todavía son aun mayores que las calculadas teóricamente.

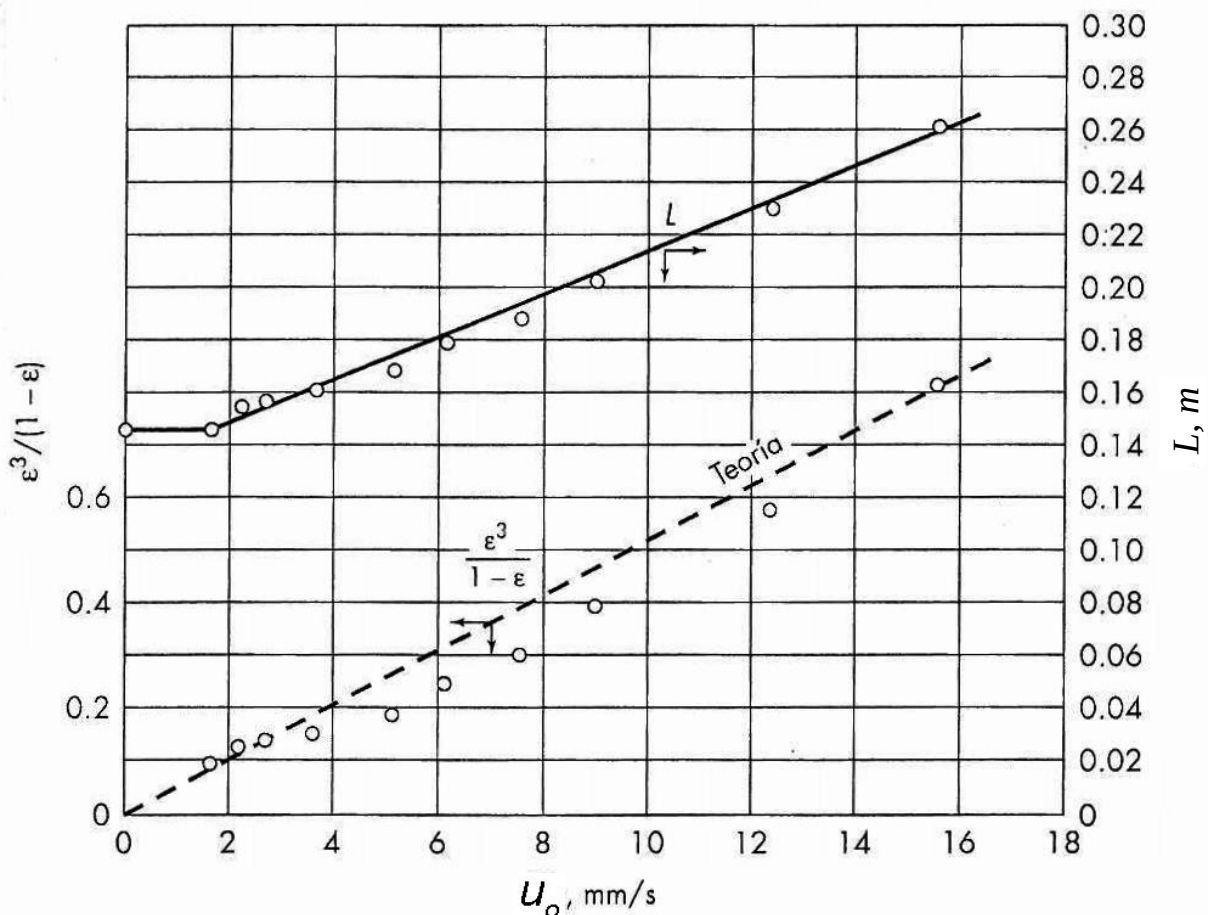


FIGURA 3. Las expresiones derivadas de Ergun válidas para mínima fluidización no sirven para la predicción de la ϵ en fluidización particulada.

Para más exactitud se emplean correlaciones empíricas como las de Lewis Gillilan y Bauer

$$u_o = cte \epsilon^m \quad \epsilon = cte u_o^{1/m}$$

Las ctes. son características de un determinado sistema sólido-fluido

$$\frac{u_o}{u_{mf}} = \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{mf}} \right)^m$$

Se emplean utilizando El estado de mínima fluidización como referencia

No obstante tal correlación no tiene carácter universal se observa una tendencia a la disminución de m con el aumento del tamaño de partícula

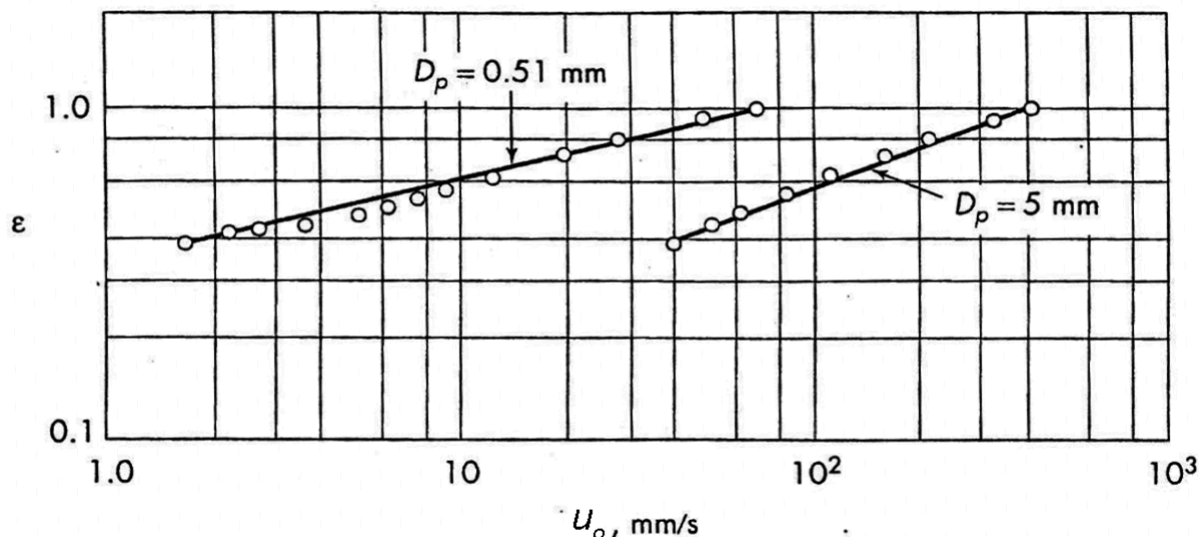


FIGURA 4. El tamaño de partícula potencia el aumento de la porosidad en la fluidización particulada.

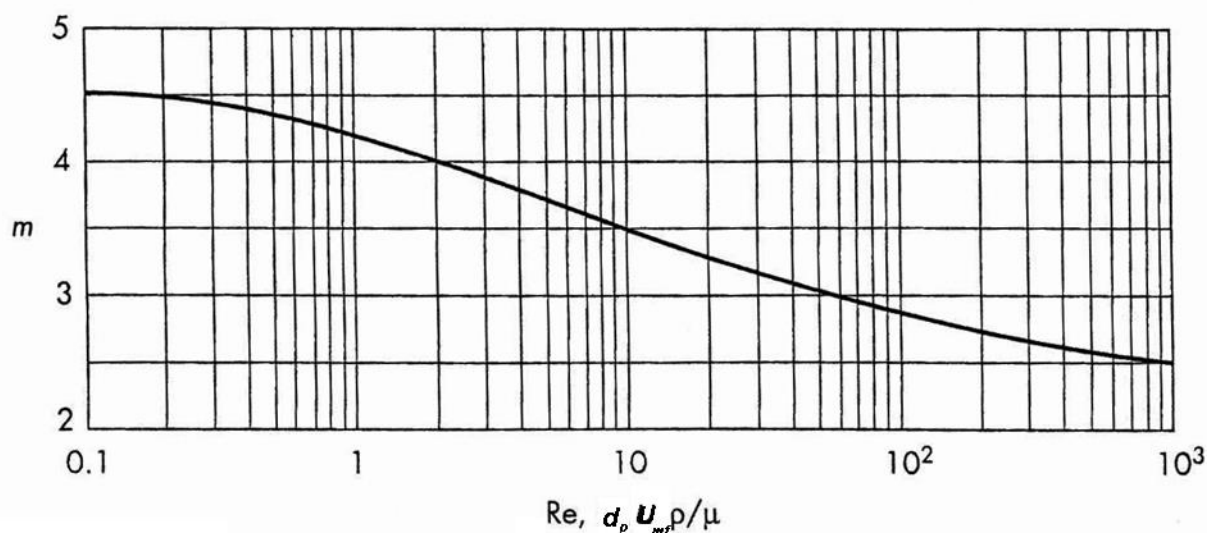


FIGURA 5. Se han llegado a obtener correlaciones empíricas de m vs Re , con la velocidad mínima de fluidización, que permite la predicción de la porosidad en fluidización particulada

Fluidización burbujeante

Se suele dar con mucha frecuencia en gases. Al aumentar la velocidad del aire las pequeñas burbujas tienden a unirse. Una parte se encuentra en mínima fluidización y en la otra aparecen burbujas. La velocidad superficial u_o puede calcularse

$$u_o = f_b u_b + (1 - f_b) u_{mf}$$

Fracción de lecho ocupado por burbujas: $f_b < \epsilon$

$$L_{mf} = L(1 - f_b)$$

Se suponen burbujas uniformemente distribuidas. El hinchamiento del lecho depende únicamente de la f_b

$$\frac{L}{L_{mf}} = \frac{(u_b - u_{mf})}{(u_b - u_o)}$$

Permite calcular la altura del lecho bajo una estimación de u_b siempre mas factible

La u_b puede estimarse a través de correlaciones empíricas.

En ellas d_b es la dimensión características de la burbuja con tratamiento a través de la esfericidad como en las partículas.

$$u_b = 0,7 \sqrt{g d_b}$$

La expansión del lecho crece linealmente con la velocidad pero el aumento es muy pequeño escasamente llega al 50 % empleando velocidades 50 veces superior a la u_{mf} .

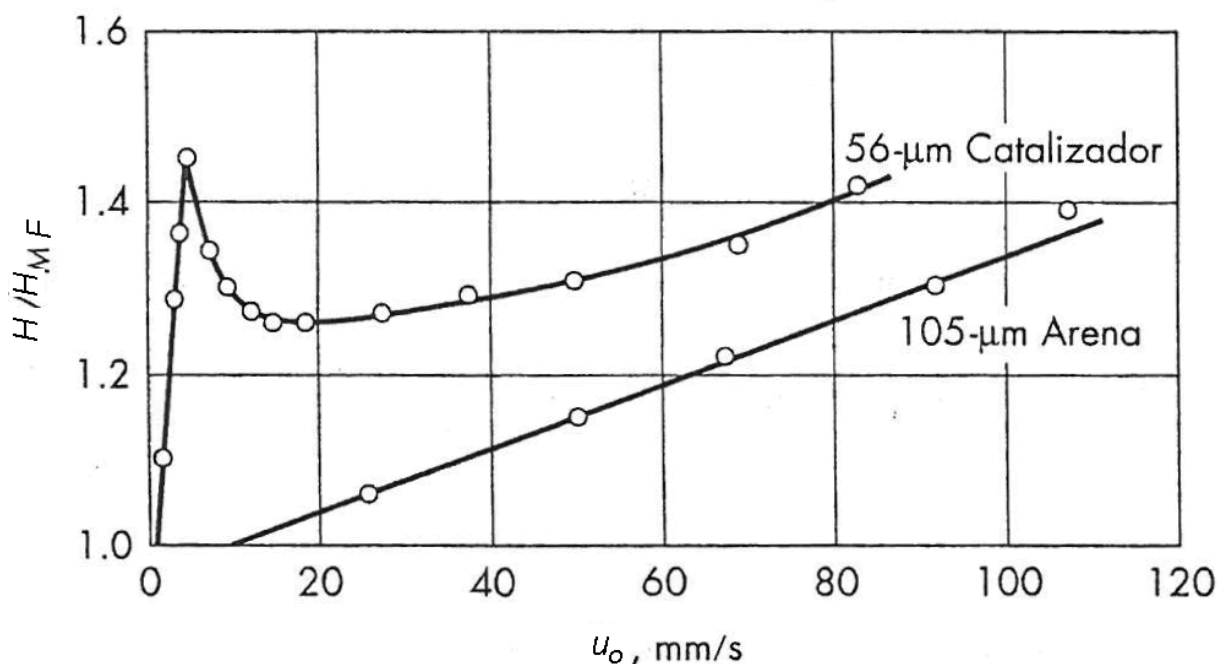


FIGURA 6. La expansión en lecho burbujeante es considerablemente menor que en f . particulada. Con partículas pequeñas y/o ligeras se pueden llegar a dar los dos tipos de fluidización

Aplicaciones de fluidización

Algunos casos...

- Craqueo catalítico; ahora en elcho fijo. Regeneración de catalizadores
- Síntesis de acrilonitrilo
- Reacciones gas – sólido: combustión, curtido de minerales, secado, adsorción, secado adsorción.

Ventajas

- No gradientes térmicos. Elevadas velocidades de t. de calor y de materia.

Desventajas

- Fluidización de burbujeo —> contacto desigual. Malo en la zona de burbujas; en grades más.
- Pérdida de partículas. Empelo de ciclones o y trituración de las partículas
- La erosión de partes internas del equipo
- Fraccionamiento de las partículas fluidizadas.