
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Rosario
Cátedra de Ing. De las Reacciones



Trabajo practico N° 5:

Fluidización

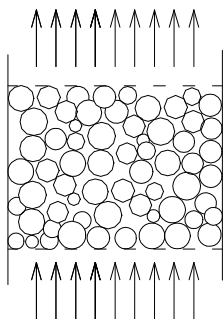
Ing. Roque Masciarelli - Ing Silvia Stancich - Ing. Stoppani Fernando

OBJETIVOS:

- Determinar experimentalmente la pérdida de carga en un lecho fijo y en un lecho fluidizado en función de la velocidad del fluido.
- Comparar los valores reales en un lecho fijo con los calculados por la ecuación de Ergun.
- Determinar el punto de inicio de la fluidización y observar el comportamiento del lecho en sus diferentes estados.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS:

Cuando un líquido o un gas se mueve con velocidades bajas a través de un lecho poroso de partículas sólidas como en el caso de una torre de relleno, no produce movimiento de partículas.



El fluido circula a través de canales pequeños y tortuosos, perdiendo energía lo cual se manifiesta en una disminución de la presión del fluido. Existen varias expresiones para determinar la pérdida de presión a través de un lecho empacado, es decir cuando no hay movimiento de las partículas sólidas.

La más utilizada es la *Expresión de Ergun*, la cual se obtiene teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las partículas están dispuestas al azar.
- Los efectos de rugosidad son despreciables.
- Todas las partículas tienen el mismo tamaño y forma.
- Los efectos de pared (disposición diferente de las partículas vecinas a la pared), son despreciables. Esto es válido cuando el diámetro y la altura del lecho son grandes en comparación con el diámetro de la partícula.
- Los canales reales por donde pasa el fluido pueden sustituirse por un conjunto de conductos idénticos paralelos.
- El radio hidráulico medio tiene en cuenta las variaciones de la sección transversal.
- El frotamiento total por unidad de área de la pared es igual a la suma de 2 tipos de fuerzas:
 - ✓ Fuerzas por frotamiento viscoso.
 - ✓ Fuerzas de inercia.

$$\left| \frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu v}{(\phi D_p)^2} + 1,75 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \frac{\rho_{gas} v^2}{\phi D_p} \right| \quad [Ecuación de Ergún] (1)$$
$$\left[\begin{array}{l} \text{Pérdida de carga} \\ \text{por viscosidad} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Pérdida de carga} \\ \text{por energía cinética} \end{array} \right]$$

Dónde la simbología corresponde a:

ΔP : caída de presión provocada por el lecho ($\text{Pa} = \text{Kg}/\text{m s}^2$)

L: altura del lecho (m)

ε : porosidad del lecho

μ : viscosidad del fluido ($\text{Kg} / \text{m s}$)

ϕ : esfericidad de las partículas que conforman el lecho

D_p : diámetro de las partículas (m)

v: velocidad del fluido (m/s)

ρ_{gas} : densidad del fluido (Kg / m^3)

En este punto es conveniente aclarar que:

- La porosidad se define como:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen de huecos}}{\text{Volumen total (huecos+sólidos)}}$$

generalmente $0,35 < \varepsilon < 0,70$

- La esfericidad es igual a 1 para partículas esféricas, y para partículas no esféricas se puede obtener según gráficas como veremos más adelante.
- El diámetro de las partículas (D_p) se define como el diámetro de una esfera que ocupa el mismo volumen que la partícula en cuestión.

Según los valores del número de Reynolds, la ecuación (1) se puede simplificar:

$$\text{Si } Re < 20 \Rightarrow \frac{\Delta P}{L} g_c = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu v}{(\phi D_p)^2} \left[\begin{array}{l} \text{Ecuación de Koseny Karman} \\ \text{(sólo } \Delta P \text{ por viscosidad)} \end{array} \right]$$

$$\text{Si } Re > 1000 \Rightarrow \frac{\Delta P}{L} g_c = 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_{\text{gas}} v^2}{\phi D_p} \left[\begin{array}{l} \text{Ecuación de Blake - Plummer} \\ \text{(sólo } \Delta P \text{ por Energía Cinética)} \end{array} \right]$$

Si se aumenta constantemente la velocidad del fluido, la pérdida de carga ΔP irá aumentando hasta un punto en el que las partículas no permanecen más inmóviles, sino que *fluidizan* por acción del mencionado fluido (líquido o gas).

MECANISMO DE FLUIDIZACIÓN

Cuando un gas atraviesa un lecho de partículas sólidas en dirección vertical de abajo hacia arriba, al aumentar la velocidad del gas se pueden verificar diferentes estados del lecho (Ver **Figura 1**):

- **Lecho fijo** (segmento \overline{OA}): Cuando la velocidad del fluido es baja las partículas permanecen inmóviles, y a medida que se aumenta la velocidad aumenta la caída de presión del aire que circula a través del lecho. Llega un momento en que la caída de presión es igual a la fuerza de gravedad sobre las partículas por unidad de área de sección, y entonces las partículas comienzan a moverse (punto A).

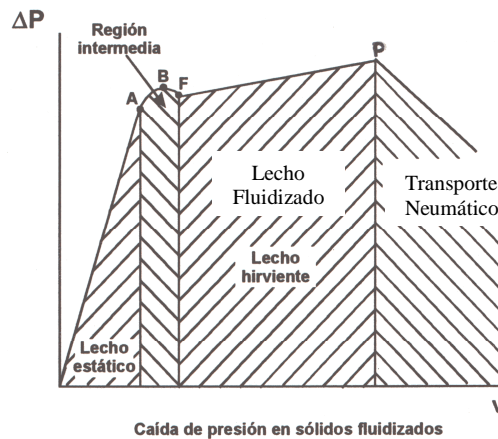


Figura 1

- **Región intermedia** (curva \overline{ABF}): Al principio el lecho se expande lentamente manteniendo los granos todavía en contacto; la porosidad aumenta (Ver **Figura 2**) y la caída de presión aumenta ahora más lentamente. Cuando se alcanza el punto B, el lecho está en la condición menos compacta posible, manteniéndose los granos todavía en contacto. Al aumentar aún más la velocidad, los granos se separan y comienza la verdadera fluidización. La caída de presión disminuye a veces un poco desde el punto B al F.

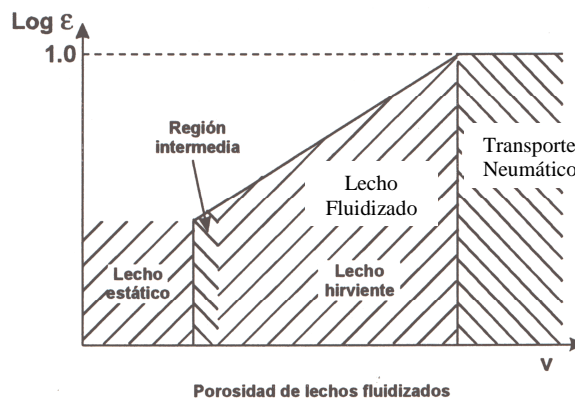


Figura 2

- **Lecho fluidizado** (segmento \overline{FP}): A partir del punto F (*punto de fluidización incipiente*) el movimiento de las partículas es cada vez más intenso, formándose torbellinos y desplazándose al azar. El contenido del tubo se parece a un líquido en ebullición debido a la formación de burbujas del fluido gaseoso similares a las del vapor, y se ha dado el nombre de *lecho hirviente* a los sólidos fluidizados de este modo. La velocidad lineal del fluido entre las partículas es mucho mayor que la velocidad en el espacio situado por encima del lecho. Por consiguiente, casi todas las partículas caen al lecho una vez que el fluido abandona éste.

Cuando el fluido es un líquido las partículas se mueven al azar por el seno del mismo, y generalmente lo hacen en forma individual, ésta es la *fluidización particulada*.

En el caso de que el fluido sea un gas, el comportamiento del lecho está influenciado, en gran medida por el tamaño de las partículas. En condiciones de buena fluidización parte del gas circula entre las partículas individuales, pero la mayor parte del mismo circula en burbujas que no contienen prácticamente sólidos. En la superficie del lecho, las burbujas se rompen formando salpicaduras de partículas en la parte superior. Dentro del lecho, las partículas se mueven en agregados que son elevados por las burbujas o que se deshacen para permitir el paso de las mismas. Este fenómeno se conoce como *fluidización agregativa o borboteante*.

Cuando las partículas fluidizan en un recipiente alto y estrecho, puede ocurrir un fenómeno conocido como *fraccionamiento del lecho o fluidización en tapón* (Ver **Figura 3 c**). Las burbujas del gas tienden a unirse y a crecer a medida que avanzan por el lecho, llegando en algunos casos a tener el mismo diámetro del tubo. En estos casos se forma un lecho de gran espesor y las partículas ascienden por el recipiente separadas por una masa gaseosa. Este tipo de fluidización es normalmente indeseable.

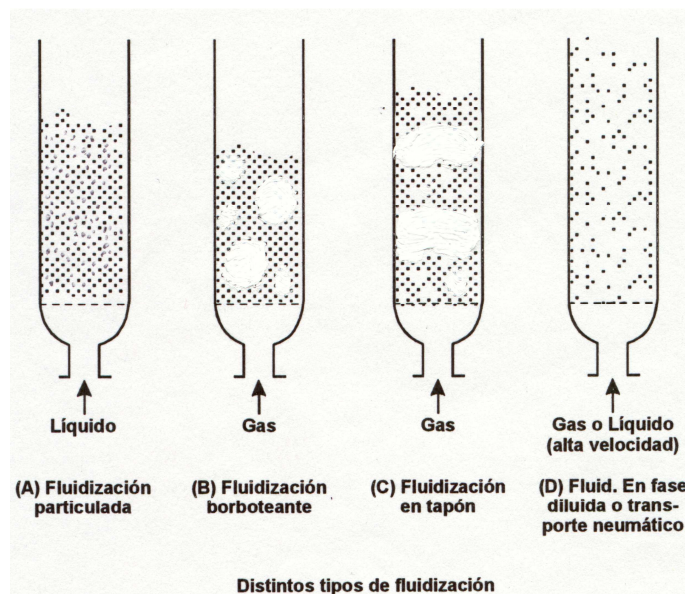


Figura 3

- **Fluidización continua:** Cuando la velocidad del fluido sea suficientemente alta las partículas son arrastradas fuera del lecho, la porosidad se aproxima a la unidad (Ver **Figura 2**) y el lecho deja de existir como tal. El ΔP del lecho cae. La velocidad mínima a la cual las partículas son arrastradas fuera del lecho se denomina velocidad límite o terminal de las partículas (v_t). Esta velocidad límite puede ser calculada en forma aproximada (ignorando la interacción entre partículas) por la Ley de Stokes:

$$(\rho_s - \rho_g)g \cdot V_p = 3\pi\mu D_p v_t$$

Si la partícula es esférica $V_p = \frac{4}{3}\pi(D_p/2)^3$, con lo cual obtenemos:

$$v_t = D_p^2 \frac{(\rho_s - \rho_g)g}{18\mu}$$

que es la velocidad a la cual ocurriría el arrastre. En general se recomienda operar en el lecho con un fluido cuya velocidad sea la mitad de la velocidad límite.

CARACTERÍSTICAS DE LAS FASES EN UN LECHO FLUIDIZADO

Dependiendo de la diferencia de densidades entre fluido y partículas fluidizadas, podemos obtener un sistema uniforme libre de burbujas, o bien, como es más común en sistemas gas-sólido, un sistema multifase que consiste en:

- (1) Una fase de burbujas gaseosas relativamente sin sólidos.
- (2) Una fase emulsión rica en partículas.
- (3) Una fase envolvente o nebulosa que contiene una fracción menor de partículas y que existe entre las burbujas y la fase emulsión.

En el rango de interés práctico ($veloc > 2 \cdot vel_{min \text{ fluidiz}}$) se observa que los sólidos tienen un movimiento descendente, lo cual se explica sobre la base de que las burbujas ascendentes transportan sólidos en su estela.

Cuando se forma una burbuja y emerge desde el fondo del lecho, atrae partículas a su estela y las transporta hacia arriba. Cuando la burbuja emerge en el tope del lecho, las partículas son liberadas y recirculan hacia abajo. Las burbujas actúan como un dispositivo de bombeo de la fase emulsión.

APLICACIONES DE LA FLUIDIZACIÓN

La utilización amplia de la fluidización comenzó en los reactores catalíticos de cracking en la industria del petróleo. Actualmente se aplica la fluidización a muchos procesos catalíticos y a otras operaciones, tales como secado de cristales, secado de cereales, congelación de alimentos, combustión de residuos, separación de residuos sólidos, etc.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FLUIDIZACIÓN

Las principales ventajas de la fluidización son:

- Asegura el contacto del fluido con toda la superficie de la partícula sólida.
- Las variaciones de temperatura dentro del lecho son mínimas.
- Se evita la existencia de puntos calientes, los cuales pueden estar presentes en lechos estáticos.
- Pueden ponerse, dentro del lecho, cortacorrientes o “baffles” y equipos de intercambio de calor como dentro de una fase fluida.
- Se pueden utilizar partículas de tamaño muy pequeño, aumentando la superficie de contacto entre las dos fases y por ende la efectividad de la operación. En nuestro caso nos interesa indicar que la efectividad de un catalizador sólido, aumenta considerablemente cuando se lo opera en lecho fluidizado.
- Asimismo, en el caso de los catalizadores usados y/o carbonizados se los puede recircular entre el reactor y el regenerador en forma continua, como se ejemplifica en la **Figura 5**.
- La caída de presión es independiente del flujo.

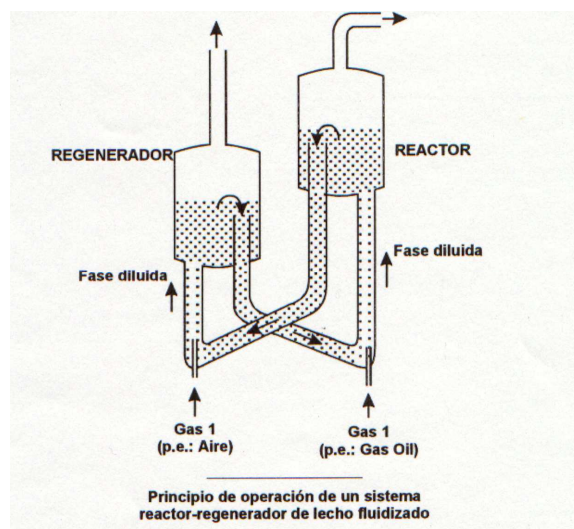


Figura 5

Las desventajas son:

- El aumento de potencia necesaria debido a la caída de presión en un lecho fluidizado.
- El aumento del tamaño del tanque o reactor.
- Una mayor rotura de las partículas sólidas. En el caso de los catalizadores las pérdidas por frotamiento y arrastre pueden ser significativas.
- Dado que las burbujas constituyen un cortocircuito, en la circulación, es posible que parte de la alimentación fluida escape sin contactar el sólido el cual está principalmente concentrado en la estela de burbujas y en la fase emulsión.

EQUIPOS A UTILIZAR:

- **Lecho fluidizado:** perteneciente al CIDTA. Se trata de un pequeño lecho de vidrio, atravesado por una corriente de aire ascendente proveniente de un ventilador. La transparencia del material permite cual permite observar el comportamiento de las partículas. Previo a la entrada del lecho existe una válvula con la que se regula manualmente el caudal del fluido ingresante.
- **Manómetro:** mide la diferencia de presión entre la entrada del lecho y la presión ambiental.
- **Anemómetro de hilo caliente:** se trata de un equipo perteneciente al CIDTA que indica la velocidad del aire a la salida del lecho por el efecto del aire sobre un hilo de alambre caliente.

MATERIAL A UTILIZAR:

Estudiaremos el comportamiento del lecho cuando el mismo se empaca con semillas de soja.

TÉCNICA OPERATORIA:

- (1) Se conecta el manómetro.
- (2) Se coloca una cierta cantidad de soja en el lecho, cuidando que la altura no sobrepase el diámetro. Se toma la altura del lecho.
- (3) Se pone en marcha el ventilador y se abre la válvula de entrada del aire suavemente tomándose la presión en el manómetro, la velocidad y temperatura del aire.
- (4) Se modifica la entrada de aire y se repiten las mediciones observando simultáneamente el comportamiento del lecho para determinar la velocidad de mínima fluidización. Observar además la etapas cuando se producen las burbujas y su posterior derrame en la parte superior, la existencia del flujo tapón y finalmente el arrastre de las partículas.
- (5) Se vacía el lecho y se repite la operación de medición de presión y velocidad del aire, tratando de regular el ingreso del mismo para obtener datos de presión correspondientes a las mismas velocidades determinadas en los puntos 3º y 4º).
- (6) Con los datos obtenidos se construye la siguiente tabla:

Velocidad	$\Delta P_{\text{GRILLA} + \text{LECHO}}$ (1)	ΔP_{GRILLA} (2)	ΔP_{LECHO} (1) - (2)	Altura L
v_1				
v_2				
:				
v_n				

CÁLCULOS:

Determinación de la caída de presión teórica

Utilizaremos la Ecuación de Ergum para calcular la caída de presión en un lecho fijo, y para ello es necesario determinar los siguientes parámetros:

- **Porosidad y diámetro de partícula:**

Se debe contar una determinada cantidad de partículas (N), en nuestro caso, semillas de soja. Los granos se colocan en una probeta. Deben dejarse ubicados en la posición en que caen. Se lee el volumen que ocupan (V_T). Se agrega gasoil con una pipeta, relleno solo los huecos libres.

$$V_T = V_{\text{sólido}} + V_{\text{gasoil}}$$

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{gasoil}}}{V_T}$$

también se que

$$V_{\text{sólido}} = V_T - V_{\text{gasoil}}$$

$$V_p = \frac{V_{\text{sólido}}}{N} = \frac{4}{3} \pi \left(D_p / 2 \right)^3 \quad V_p = \text{volumen de la partícula}$$

De aquí se despeja el diámetro de la partícula. Se realiza un promedio de tres determinaciones realizadas en probetas de distintas capacidades.

En forma más precisa el ensayo se puede realizar pesando los materiales:

P_s : peso de la probeta más sólido. P_T : peso de la probeta con soja y gasoil

$$P_T - P_s = P_{\text{gasoil}}$$

$$\frac{P_{\text{gasoil}}}{\rho_{\text{gasoil}}} = V_{\text{gasoil}} = V_{\text{huecos}}$$

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{huecos}}}{V_T}$$

El calculo del diámetro se realiza de igual manera que la anterior.

Para distintas alturas del lecho, si se mantiene constante el volumen de sólidos, se puede calcular la porosidad:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{huecos}}}{V_T} \Rightarrow 1 - \varepsilon = \frac{V_{\text{sólido}}}{V_T}$$

de dónde:

$$V_{\text{sólido}} = V_T (1 - \varepsilon)$$

y si el volumen de sólido se mantiene constante:

$$V_{T1}(1-\varepsilon_1) = V_{T2}(1-\varepsilon_2)$$

$$L_1 \cdot A(1-\varepsilon_1) = L_2 \cdot A(1-\varepsilon_2)$$

y entonces:

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{L_1}{L_2}(1-\varepsilon_1)$$

- **Esfericidad**

Se define como:

$$\phi = \frac{\text{Sup de una esfera de igual volumen de la partícula}}{\text{Superficie de la partícula}}$$

Para la soja se puede considerar igual a la unidad ($\phi = 1$).

Existen gráficos que permiten calcular la esfericidad en función de la porosidad y el tipo de material empleado (Ver **Figura 5**).

Otros gráficos relacionan la esfericidad y la porosidad con el coeficiente de frotamiento.

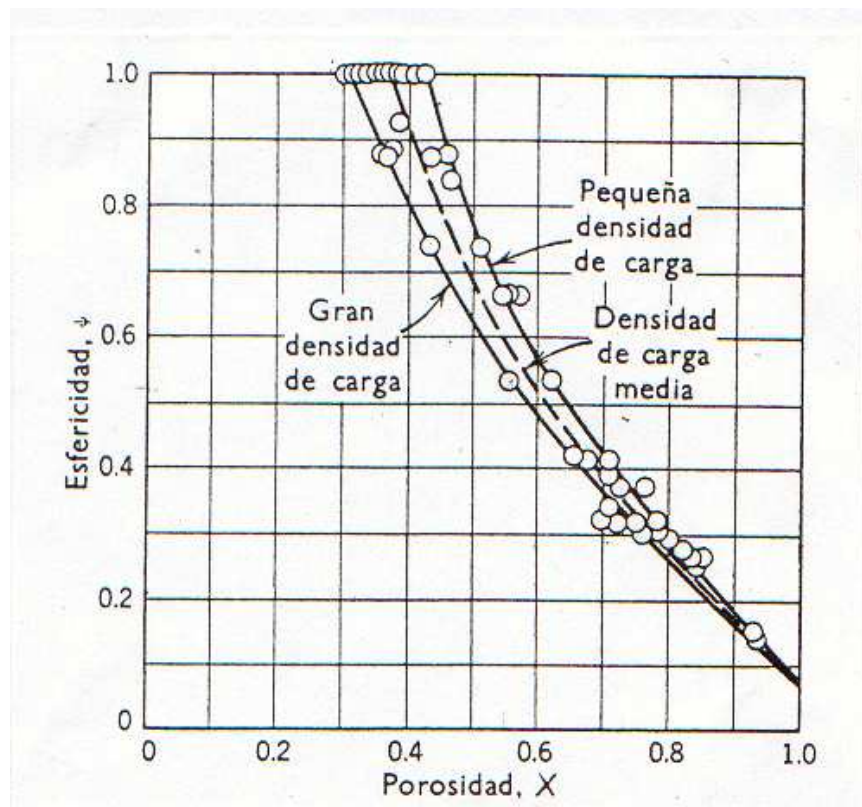


Figura 5

- **Viscosidad**

Para obtener la viscosidad se puede utilizar la fórmula de Sutherland⁽¹⁾:

$$\mu = 0,01709 \frac{273,1+114}{T+114} \left(\frac{T}{273,1} \right)^{3/2} [\text{centipoise}]$$

Con estos parámetros estamos en condiciones de calcular la pérdida de carga teórica utilizando la ecuación Ergún. (pasar la viscosidad a Kg /m s)

Gráfico comparativo

Se realiza un gráfico de $\Delta P = f(v)$, incluyendo los valores teóricos y los reales de la caída de presión en la grilla.

Calcular la velocidad mínima de fluidización en el grafico experimental.

(Equivalencia 1 cm agua = 98.066 Pa)

CONCLUSIONES:

BIBLIOGRAFÍA