

## **CAPITULO 3.**

### **PRINCIPIOS DE FLUIDIZACIÓN.**

#### **3.1 Definición y descripción de fluidización.**

La fluidización se define como un proceso en el que, en un lecho con partículas sólidas, se hace pasar un fluido hasta lograr una mezcla homogénea entre las partículas y el fluido. A velocidades de gas arriba de la velocidad mínima de fluidización, algunos de los gases fluyen como paquetes de gas llamados burbujas. Este movimiento de burbujas conduce a:

- \* Mezclas sólidas rápidas.
- \* Buen contacto entre partículas y gas.
- \* Uniformidad axial en temperatura y composición.

Estas propiedades hacen que los lechos sean útiles para operaciones, tales como:

- Reacciones químicas.
- Intercambio de calor.
- Transferencia de masa.

Algunas aplicaciones típicas incluyen:

- Combustión y gasificación del carbón
- Síntesis catalítica (Frischer Tropsch)
- Secado de sólidos.

#### **3.2 Características de los lechos fijos y fluidizados.**

### 3.2.1 Esfericidad.

En principio se puede pensar que las partículas contenidas en el lecho fluidizado son totalmente esféricas, sin embargo, estas son irregulares en su geometría y un parámetro que nos permite definir dicha geometría es la esfericidad (F) la cual se define de la siguiente forma:

$$F = (\text{área superficial de la esfera} / \text{área superficial de la partícula}) \text{ volumen.}$$

Es decir; lo anterior es un indicador que nos permite saber que tan esférica es una partícula, así por ejemplo, para partículas como la arena, el carbón y el hierro se tiene que su esfericidad se encuentra entre el siguiente rango:  $0.5 < F < 0.9$ . [6]

### 3.2.2 DP de lecho fijo.

Considerar un lecho fijo de sólidos tal como se muestra en la figura 3.1. La caída de presión a través del lecho se debe al gas fluyendo a través del lecho y puede ser expresada mediante la ecuación de Ergun (citado por Levy K. Edward).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_o}{(\phi d_p)^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U_o^2}{\phi d_p} \quad (3.1)$$

Donde,

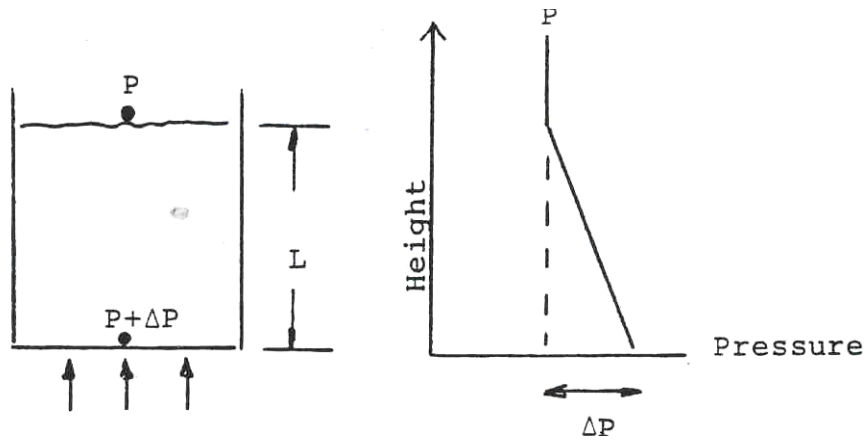
$U_o$  = velocidad superficial del gas.

$\varepsilon$  = vacante del lecho.

$D_p$  = diámetro de partícula.

$\rho$  = densidad del gas.

$\mu$  = viscosidad del gas.



**Figura 3.1** Caída de presión del lecho fijo. [6]

### 3.2.3 DP del lecho fluidizado.

La caída de presión (DP), es una característica que se da en las lechos fluidizados y que más allá de la velocidad mínima de fluidización, se debe a la densidad de las partículas contenidas en el lecho y es expresada con la siguiente formula:

$$DP = L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g \quad (3.2)$$

Donde;

$L_{mf}$  = altura del lecho a la velocidad mínima de fluidización.

$\epsilon_{mf}$  = vacío a la velocidad mínima de fluidización.

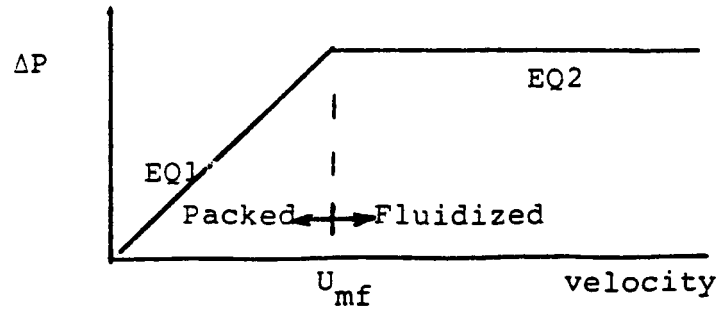
$\rho_s$  = densidad de la partícula.

$\rho_g$  = densidad del fluido.

$g$  = aceleración de la gravedad.

### 3.2.4 Velocidad mínima de fluidización.

La velocidad mínima de fluidización se observa cuando la mezcla en el lecho es totalmente homogénea. Pero, gráficamente y matemáticamente es obtenida igualando las ecuaciones 3.1 y 3.2. [6].



**Figura 3.2** Velocidad mínima de fluidización. [6]

La igualdad de las ecuaciones nos da el cambio de presión, donde, la primera es para lecho fijo y la segunda es para el lecho fluidizado y por lo tanto, en el punto de intersección se obtiene la  $U_{mf}$ .

$$\frac{1.75}{\phi \epsilon_{mf}^3} \left( \frac{\bar{d}_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\phi^2 \epsilon_{mf}^3} \left( \frac{\bar{d}_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{\bar{d}_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.3)$$

Usando las aproximaciones de Wen y Yu: [7]

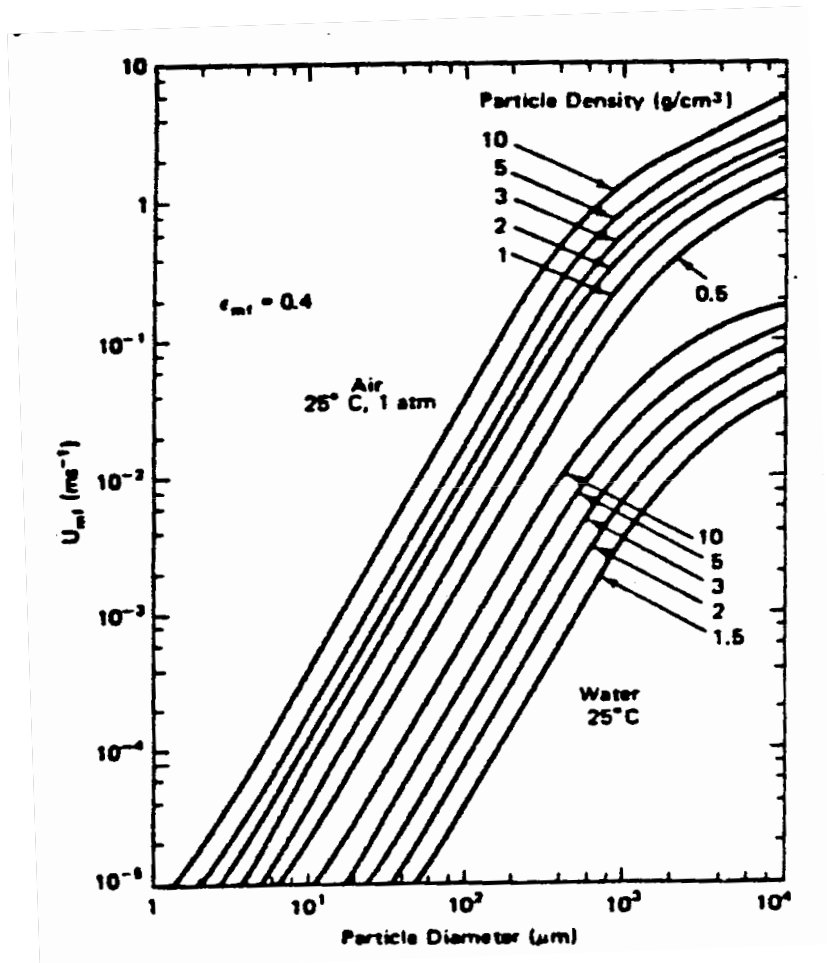
$$\frac{1}{\phi \epsilon_{mf}^3} \cong 14 \quad (3.4)$$

$$\frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi^2 \epsilon_{mf}} \cong 11 \quad (3.5)$$

Se obtiene la ecuación 2.5 para la  $U_{mf}$ .

$$\frac{\bar{d}_p U_{mf} \rho_g}{\mu} = \left[ (33.7)^2 + 0.0408 \frac{\bar{d}_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/2} - 33.7 \quad (3.6)$$

Además, de las formas analizadas anteriormente, existe otro método para obtener la  $U_{mf}$  y es a través de la figura 3.3.

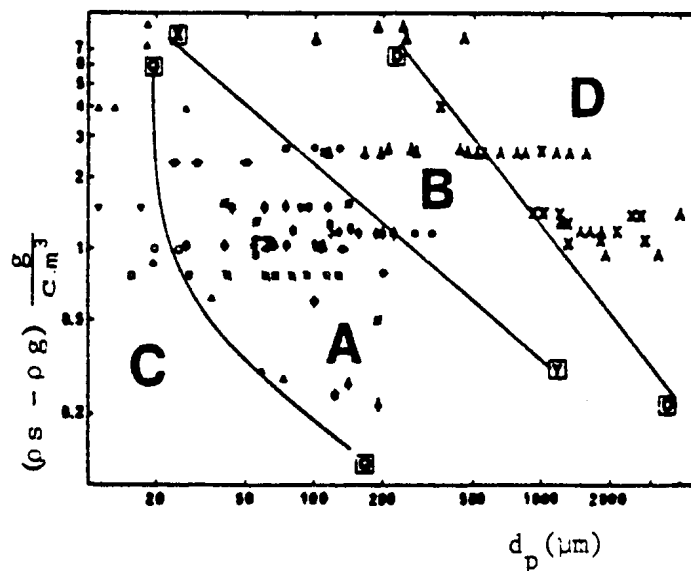


**Figura 3.3**  $U_{mf}$  Vs. Tamaño de partícula para lechos fluidizados en aire y agua. [6]

Donde, los valores numéricos de la  $U_{mf}$  para partículas esféricas en aire y agua estándar están trazadas contra  $r_g$  y  $d_p$ . Así que, analizando la grafica se observa que conforme se aumenta el diámetro de las partículas también se aumenta la  $U_{mf}$ , de igual forma, para la densidad ocurre lo mismo. El efecto anterior ocurre tanto con aire como con agua, no obstante que, con aire la  $U_{mf}$  es mayor tomando en cuenta que la densidad de este ultimo es menor.

### 3.2.5 Clasificación de las partículas.

Se ha determinado que las partículas no son totalmente esféricas, pero además de eso, a partir de experimentos con lechos fluidizados, se ha descubierto que no todos los materiales fluidizan de la misma manera. A consecuencia de eso, Geldart (citado por Levy K. Edward) propuso una clasificación basada en sus características de fluidización, donde dicha clasificación se dividió en cuatro categorías (ver figura 3.4). [6]

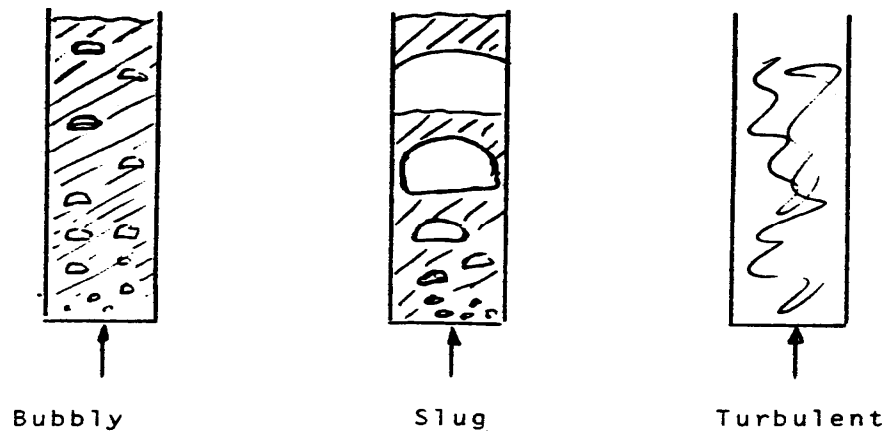


**Figura 3.4** Clasificación de partículas para fluidización en aire. [6]

En este diagrama de fluidización las categorías van de A-D. En la cual, la categoría A exhibe una apreciable expansión de fase después de la fluidización mínima y antes de que inicie el burbujeo. Los que se encuentran en la categoría B son como arena y burbujean a la velocidad mínima de fluidización. La categoría C es difícil de fluidizar. Finalmente, la categoría D chorrean con facilidad, y son partículas muy densas. [6]

### 3.2.6 Regímenes de fluidización.

Una vez fluidizados, los lechos de partículas también pueden ser operados en una variedad de diferentes regímenes de flujo, dependiendo del tamaño de partícula y densidad, presión del gas y temperatura, velocidad de fluidización, profundidad del lecho, diámetro del lecho y construcción de la rejilla para alimentar el fluido. Los regímenes de fluidización son: el burbujeante, el de burbujas grandes y el turbulento (ver figura 3.5)



**Figura 3.5** Regímenes de fluidización. [6]

Staub y Canada, [8] y otros investigadores han desarrollado mapas de regímenes de flujo a partir de varios experimentos con varios lechos fluidizados. Estos mapas nos permiten

visualizar el regimen de fluidización en base a determinadas características del lecho fluidizado.

### 3.3 Flujo del gas en los lechos fluidizados.

En muchas situaciones prácticas, el lecho es operado en el regimen burbujeante, donde pequeñas burbujas son formadas en el distribuidor, unidas fluyen hacia arriba hasta romperse en la superficie libre. No es el caso para las burbujas en líquidos, estas no tienen fronteras insensibles para flujos de gas dentro y fuera de la partícula conforme la partícula sube a través del lecho. Además, la tensión superficial no es un factor y las burbujas no son completamente esféricas. Entonces, para propósitos de análisis, la geometría de la burbuja frecuentemente es considerada esférica con el fondo cubierto de material del lecho [6]. El volumen de la estela formada en el fondo depende del tamaño de la partícula y del tipo de material del lecho (ver figura 3.6).

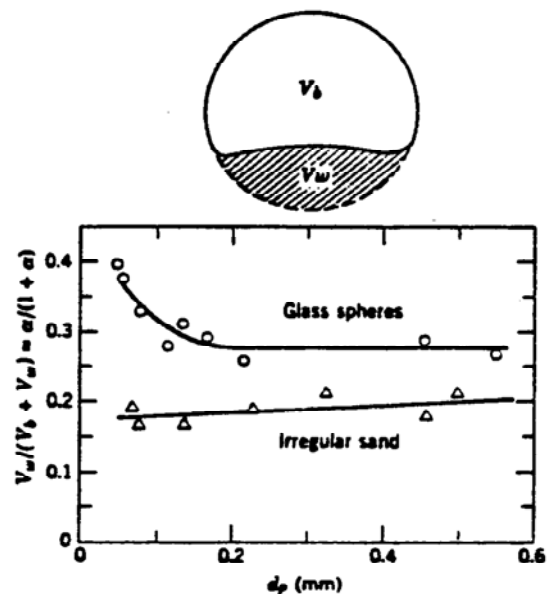


Figura 3.6 Relación entre volumen de estela y volumen de burbuja ascendiendo. [6]



### 3.3.1 Expansión del lecho.

La teoría de las dos fases [9] puede ser usada para explicar la expansión del lecho con la velocidad superficial del gas. Asumiendo que todos los flujos superiores a  $U_{mf}$  aparecen como flujo de burbujas visible y definiendo:

$U_o$  - velocidad superficial del gas.

$\beta$  - fracción vacía de la burbuja.

$U_b$  - velocidad absoluta de la burbuja.

$U_{br}$  - velocidad de la burbuja en la fluidización mínima.

$A$  - área de la sección transversal del lecho.

El porcentaje del flujo de masa del gas a través de la fase burbujeante puede ser oprimida como:

$$\rho_g \beta U_b = \rho_g A (U_o - U_{mf}) \quad (3.7)$$

La fracción de la burbuja vacía es igual a:

$$\beta = \frac{L - L_{mf}}{L} \quad (3.8)$$

Donde:

$L$  - altura del lecho

$L_{mf}$  - altura del lecho a  $U_{mf}$ .

Eliminando  $\beta$  y reordenando términos se obtiene lo siguiente:

$$\frac{L - L_{mf}}{L_{mf}} = \frac{U_o - U_{mf}}{U_{br}} \quad (3.9)$$

### 3.3.2 Diámetro inicial de la burbuja

Las burbujas se originan en el distribuidor cuando el gas es inyectado dentro del lecho. Con flujos bajos por el distribuidor, el exceso del flujo de gas forma pequeñas burbujas. Con flujos más altos, el gas formará cavidades parecidas a chorros o tubo. Un modelo que permite obtener el volumen inicial de la burbuja fue obtenido por Harrison y Leung (citados por Levy K. Edaward). Quienes estudiaron el caso de la formación de burbuja a bajas velocidades en el orificio. Ellos asumieron que cuando se forma la burbuja, esta desplaza el material del lecho hacia arriba y existe un balance entre la fuerza de flotamiento y la inercia del material rodeando la burbuja. A partir de esta suposición obtuvieron: [6]

$$V_{b_0} = \left( \frac{6}{\pi} \right)^{1/5} \frac{G^{6/5}}{g^{3/5}} \quad (3.10)$$

Donde;

$V_{b_0}$  - volumen inicial de la burbuja. [ml.]

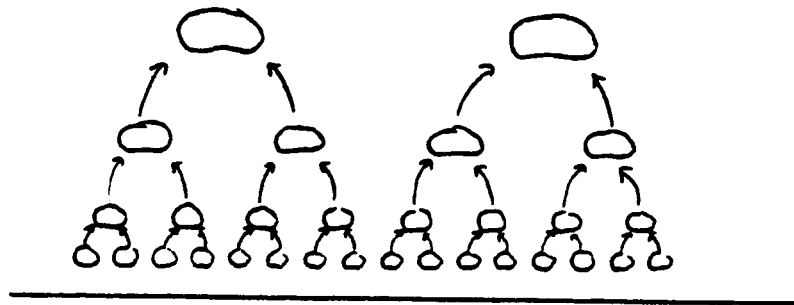
$G$  - porcentaje del flujo del gas dentro de la burbuja. [ml/s.]

$g$  - aceleración de la gravedad. [ $m/s^2$ ]

### 3.3.3. Crecimiento de la burbuja

Después de formarse en el distribuidor, las burbujas suben, chocan y se unen para formar burbujas más grandes. Lo anterior fue necesario presentarlo mediante un modelo así que, numerosos investigadores habían intentado desarrollar modelos con el fin de predecir el crecimiento de la burbuja en los lechos fluidizados. Uno de esos modelos, desarrollado por

Darton (citado por Levy K. Edaward.) asume el patrón de unión de burbujas mostrado en la figura 3.7.



**Figura 3.7** Patrón de unión de burbujas. [6]

A partir de esa suposición encontraron la relación:

$$D_e = 0.54(U_o - U_{mf})^{2/5} \frac{(h + 4.0\sqrt{A_o})^{4/5}}{g^{1/5}} \quad (3.11)$$

Donde:

$A_o$  – área del distribuidor placa/agujero. [ $\text{cm}^2$ ]

$h$  – distancia vertical arriba del distribuidor. [cm.]

$D_e$ - diámetro equivalente de las burbujas. [cm.]

$U_o$  – velocidad de operación. [cm/s]

$U_{mf}$ – velocidad mínima de fluidización. [m/s]

$g$  – aceleración de la gravedad. [ $\text{m/s}^2$ ]

### 3.3.4 Tamaño máximo de la burbuja

Son muchos los factores que pueden contribuir o limitar el tamaño de burbuja en un lecho.

[6]

\* Para profundidad, diámetros de lecho pequeños, con  $L/D_{\text{lecho}} \gg 1$ , se desarrollan burbujas grandes cuando  $D_{\text{burbuja}} \rightarrow D_{\text{lecho}}$ .

\* Harrison (citado Levy K. Edward) formo una hipótesis que si la velocidad absoluta del gas fluye a través de la burbuja excede la velocidad terminal de la partícula, las partículas son atraídas dentro la burbuja desde abajo.

\* El techo de la burbuja es también inestable a perturbaciones, y esto da como resultado la desintegración y fragmentación de la burbuja.

Matsen (citado por Levy K. Edward) presento otra evidencia experimental de un tamaño de burbuja estable. Mostró que  $U_o/U_{mf} \gg 1$  donde la expansión del lecho era una función lineal de la velocidad superficial del gas. A partir de la ecuación de la expansión del lecho:

$$\frac{L}{L_{mf}} - 1 = \frac{U_o - U_{mf}}{0.71\sqrt{gD_e}} \quad (3.12)$$

la cual sugiere que el diámetro de la burbuja permanezca constante cuando la velocidad del gas es incrementada.

### 3.3.5 Flujo del gas a través de las burbujas.

Se han desarrollado diferentes modelos para estimar el flujo del gas a través de las burbujas y el flujo de sólidos alrededor de las mismas. El modelo más simple es el que postula Davidson (citado por Levy K. Edward) el cual postula que: [6]}

- La burbuja es de forma esférica.
- Cuando la burbuja sube, las partículas se mueven al lado como un fluido incompresible de densidad  $\rho_s (1 - \epsilon_{mf})$ . Esto permite el uso de la teoría de flujo potencial para determinar el movimiento de los sólidos alrededor de la burbuja.
- Fuera de la burbuja, el gas fluye a través de la emulsión de fase como un fluido de arrastre viscoso incompresible. La distribución de presión en esta región está dada por  $\nabla^2 P = 0$  y la velocidad relativa entre el gas y sólidos es  $(U_{gas} - U_{sólido})_x = K \frac{\partial P}{\partial x}$ .
- Dentro de la burbuja la presión es constante.
- Lejos de la burbuja, existe un gradiente de presión sin tocar.

$$\frac{\nabla P}{L} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \quad (3.13)$$

El patrón del flujo de gas resultante depende de la siguiente razón:

$$U_{br}/U_f$$

Donde:

$U_{br}$  - velocidad de la burbuja en la fluidización incipiente.

$U_f$  - velocidad intersticial del gas en fase de emulsión.

$$U_f = U_{mf}/\epsilon_{mf}$$

Burbuja lenta (pequeña). ( $U_{br} / U_f < 1$ )

El gas entra a través de la parte inferior y sale por la superior. Algunos gases forman un patrón de recirculación en un lado de la burbuja.

Burbujas rápidas (grandes). ( $U_{br} / U_f > 1$ )

Todo el gas entra por la parte inferior y sale por la parte superior recirculando otra vez a la burbuja. La parte extendida de la región de recirculación se le identifica como una nube de burbujas. El gas recirculando en la nube no se mezcla con el resto del gas en el lecho.

Las teorías de las burbujas permiten un cálculo del tamaño de la nube como una función del radio de la burbuja,  $U_{br}$  y  $U_f$ .

$$\frac{R_b^3}{Rb^3} = \frac{U_{br} + 2U_f}{U_{br} - 2U_f} \quad (3.14)$$

A partir de la teoría de la burbuja, el flujo del gas dentro y fuera de la burbuja es:  $q = 3 U_{mf} \pi R_b^2$ , la cual muestra que en la sección transversal máxima de la burbuja, la velocidad del gas dentro de la burbuja es:  $U_{gas} = U_{mf}$ .

Tomando en cuenta todo el análisis de la teoría de la burbuja se llega a las siguientes conclusiones:

- El flujo del gas que fluye hacia arriba a través de la burbuja mantiene a la burbuja alejada del colapso.
- En una burbuja rápida, el gas puede retener su identidad, pasando a través del lecho prácticamente sin interacción con la fase sólida.

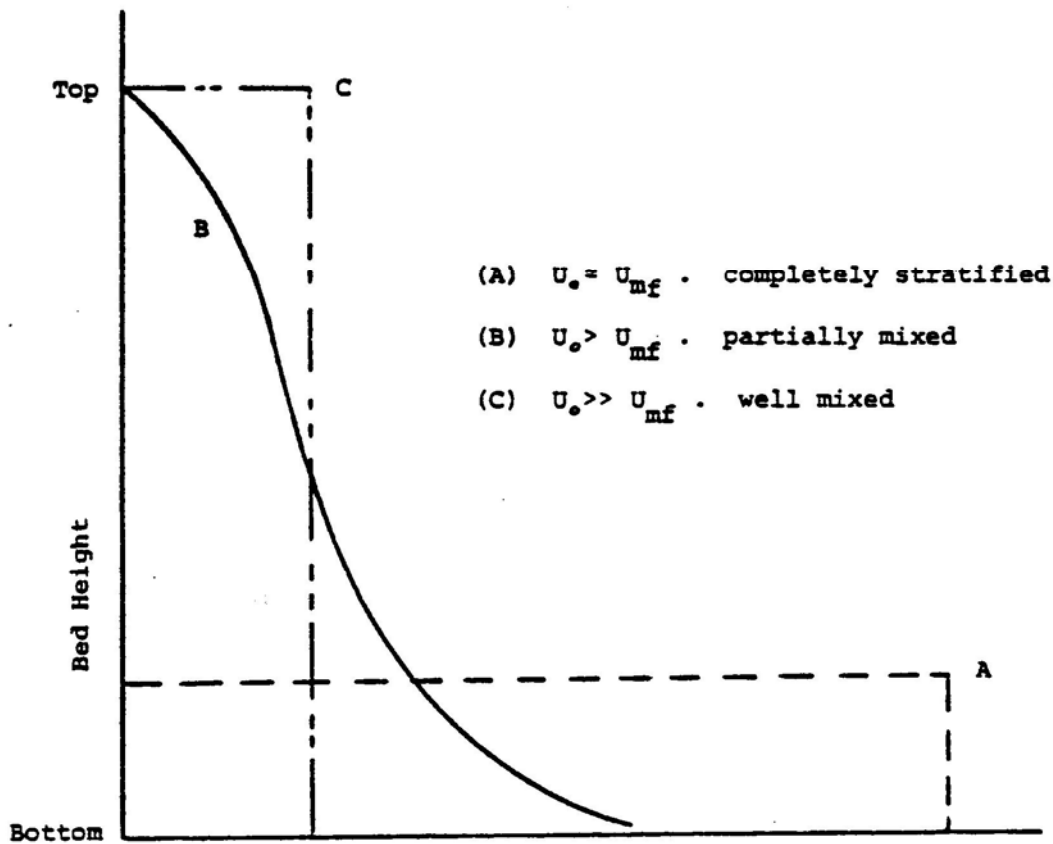
### **3.4 Comportamiento de la fase de emulsión.**

### 3.4.1 Estratificación axial.

En un lecho fluidizado donde partículas de diferentes densidades existen, hay una tendencia cerca de las condiciones mínimas de fluidización para los sólidos que estratifican en la dirección vertical de acuerdo a la densidad, y a la superficie de contacto. Dos mecanismos parecen controlar la manera en que las partículas segregan.

- Cuando las burbujas suben a través del lecho, las partículas son llevadas a lo largo de la estela de la burbuja. Esto tiende a contrarrestar la segregación sólida causando la remezcla del material estable. Este, sin embargo, es también el mecanismo por el cual las partículas encuentran su camino hacia la superficie del lecho.
- Como las burbujas se mueven verticalmente hacia arriba del lecho, estas causan que las partículas densas descendan. Las partículas densas tienden a caer a través del espacio libre de las burbujas y son arrastradas hacia abajo a través de la fase de emulsión en la región disturbada por las burbujas.

Las burbujas juegan un papel importante en la mezcla y en la estratificación, y en el grado de de segregación que ocurre dependiendo mucho de el exceso de la velocidad del gas ( $U - U_{mf}$ ), como se muestra en la figura 3.8.



**Figura 3.8** Efecto de la velocidad de fluidización en la estratificación del lecho. [6]

Donde la curva A es un caso de una segregación de lecho muy cerca de las condiciones de fluidización, la curva B es el perfil de concentración de el sólido con una velocidad de fluidización intermedia, por ultimo, la curva C es el caso en el cual el lecho esta perfectamente mezclado a valores altos de velocidad de fluidización.





