

Tema: Suspensiones de sólidos - Fluidización

Evaluación de la performance - Circuitos

Los sistemas de control

# Concentración Gravimétrica

Métodos de separación por gravedad se agrupan en tres categorías

## *a) Separación por medios densos*

Las partículas se sumergen en un baño que contiene un fluido de **densidad** intermedia, de tal manera que algunas partículas floten y otras se hundan;

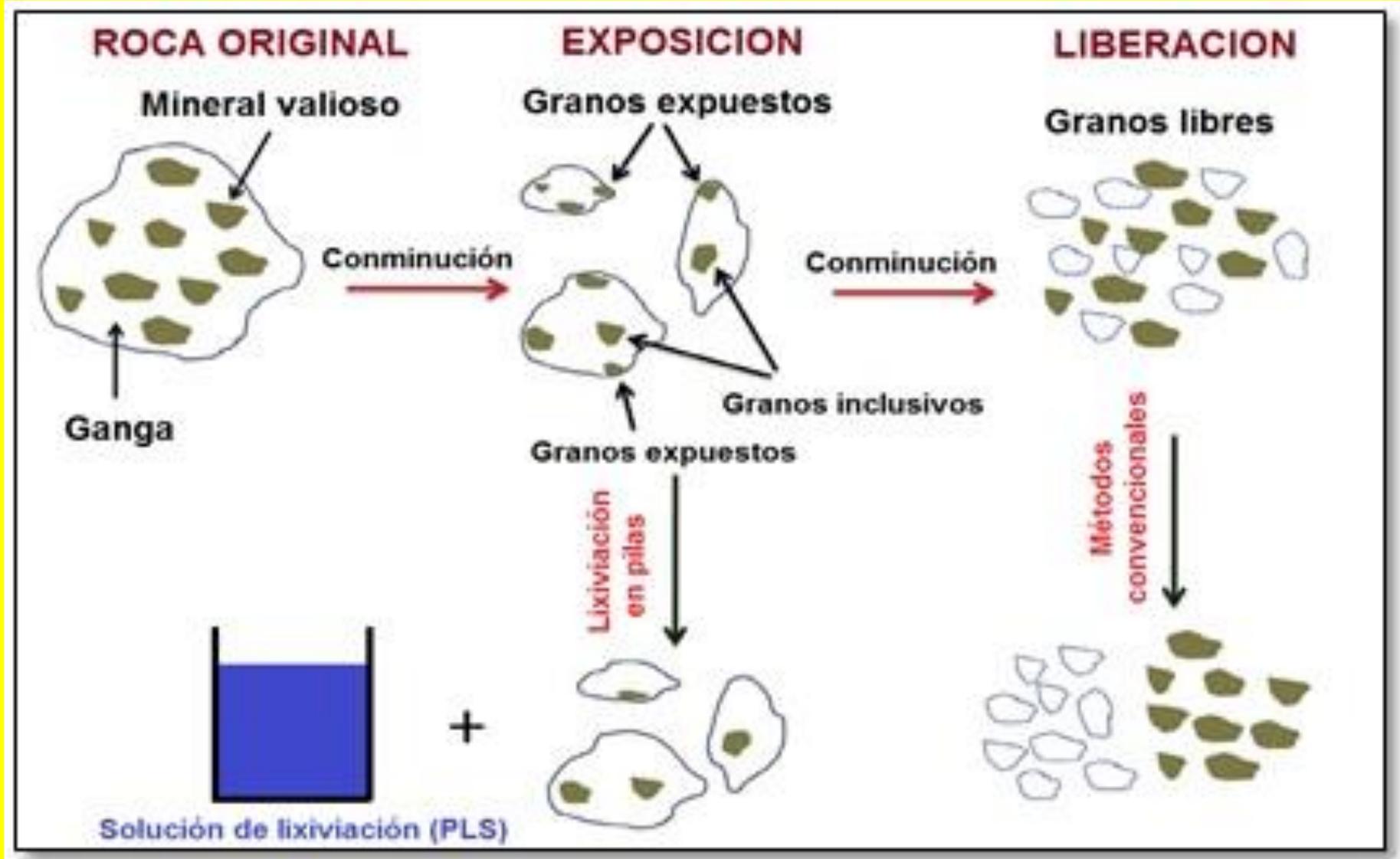
## *b) Separación por corrientes verticales*

En la cual se aprovechan las diferencias entre **velocidades** de sedimentación de las partículas pesadas y livianas

## *c) Separación en corrientes superficiales de agua o “clasificación en lámina delgada”*

Mesas concentradoras y los separadores de espiral

# La liberación de partículas



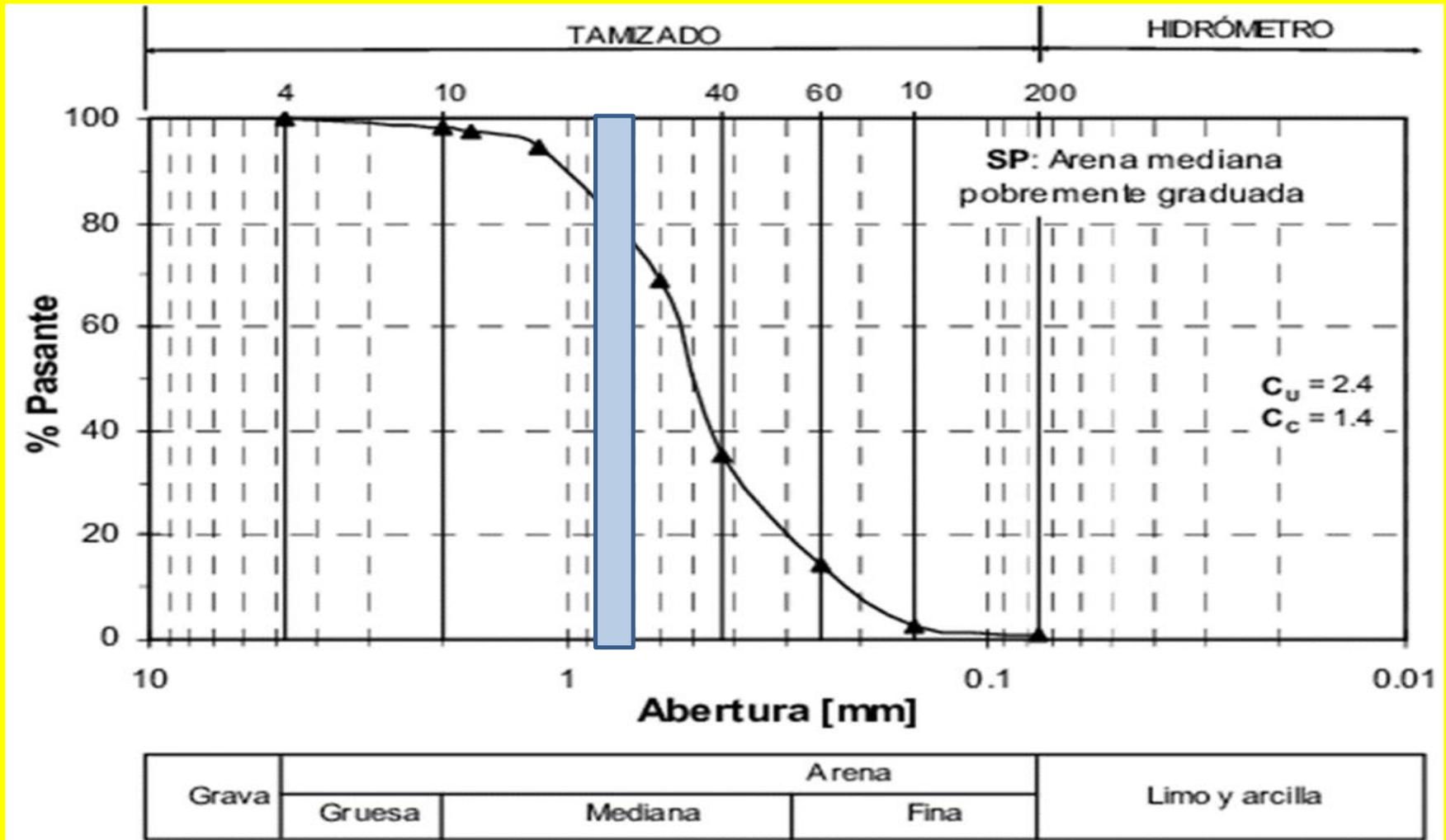
# Curva granulométrica típica

Malla serie	Tamaño	
	Pulgadas	Micras
6	0.1310	3360
8	0.0930	2380
10	0.0650	1680
14	0.0460	1190
20	0.0326	840
28	0.0232	595
35	0.0164	420
48	0.0116	297
65	0.0082	210
100	0.0058	149
150	0.0041	105
200	0.0029	74
325	0.0020	52
400	0.0014	37

Tabla I. Serie Tylor para tamices de acuerdo a ASTM E-11-61

El concepto de clase cerrada

# Concentración gravimétrica (CG) y Granulometría (Gr)



*Cuanto más pequeñas son las partículas, más fuertes son, con relación a la gravedad, las fuerzas hidráulicas y de viscosidad..(Van der Walls)*

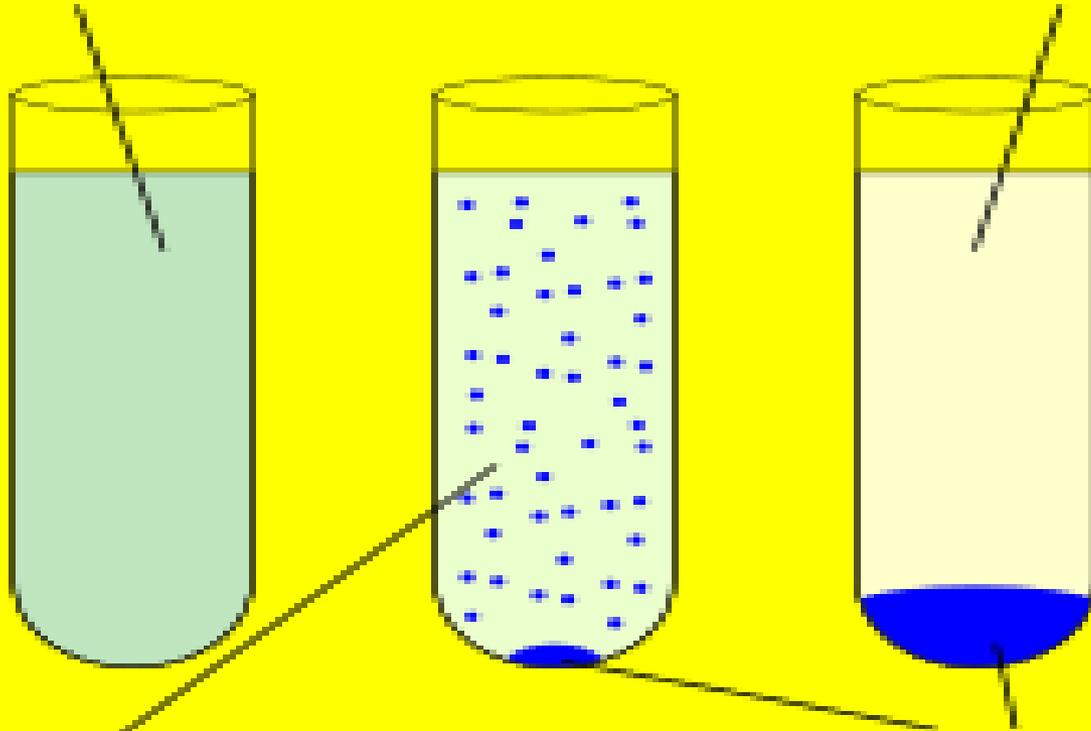
# Suspensiones de sólidos - Fluidización

Disolución

Sobrenadante

Suspensión

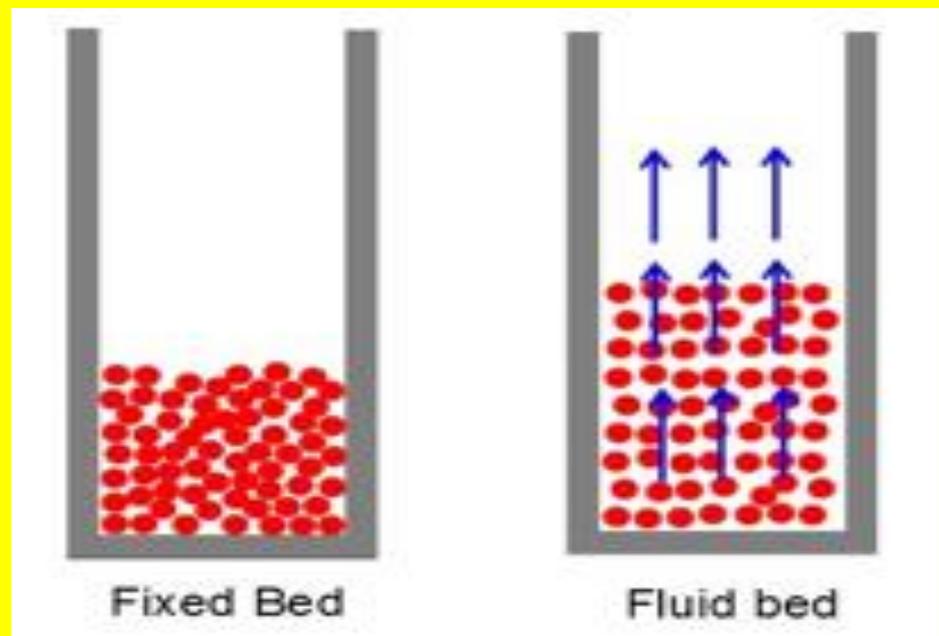
Precipitado



Es una mezcla heterogénea formada por un sólido en polvo o por pequeñas partículas no solubles (fase dispersa) que se dispersan en un fluido (fase dispersante o dispersora)

# SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS

## - FLUIDIZACIÓN



Es un proceso por el cual una corriente ascendente de fluido (líquido, gas o ambos) se utiliza para suspender partículas sólidas.



Desde un punto de vista macroscópico, la fase sólida (o fase dispersa) se comporta como un fluido, de ahí el origen del término "fluidización".



Al conjunto de partículas fluidizadas se le denomina también "lecho fluidizado".

## Propiedades de un lecho fluido

**Flotabilidad:** cualquier cuerpo sumergido en el lecho fluido de menor densidad que este “flotará” en él, mientras que uno de mayor densidad no lo hará.

**Horizontabilidad** de su superficie libre, al igual que la conseguida por la superficie libre de cualquier líquido contenido en un recipiente.

**De la misma forma** aparece el fenómeno de los vasos comunicantes entre lechos conectados y con su superficie libre a la misma presión.

**Capacidad de “fluir”** por un agujero practicado en un superficie en el interior del lecho.

**Las suspensiones no son estables → estabilidad física.**

***Para disminuir la velocidad de sedimentación hay que:.***

- Disminuir el tamaño de las partículas.**
- Aumentar la viscosidad de medio.**
- Evitar cambios bruscos de temperatura durante el almacenaje, transporte**
- Evitar cristalizaciones mediante la inclusión de anticongelantes en la formulación.**

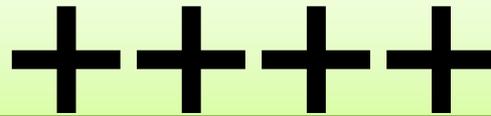
# Observación de procesos

<https://www.youtube.com/watch?v=Dan60DQ1oDA>

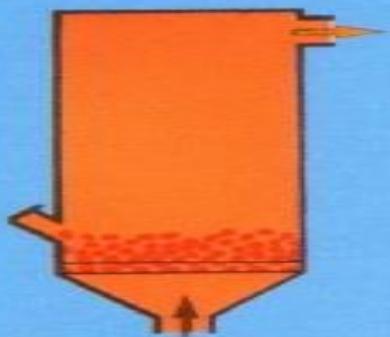
# LECHO Y EL PROCESO

Consiste en una columna formada por partículas sólidas, a través de las cuales pasa un fluido (líquido o gas) el cual puede ser librado de algunas impurezas y sufre una caída de presión.

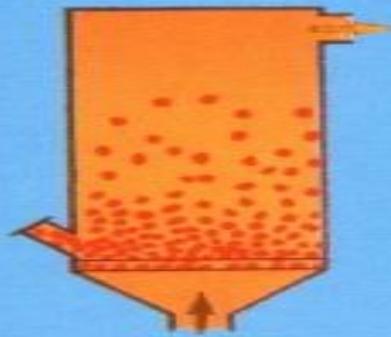
VELOCIDAD  
BAJA



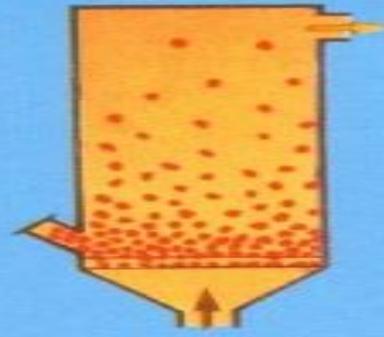
VELOCIDAD  
ALTA



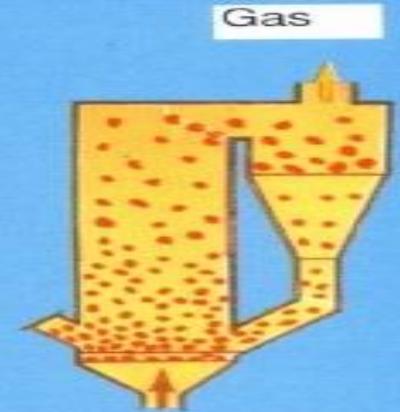
Aire lecho fijo



Aire burbujeante



Aire turbulento



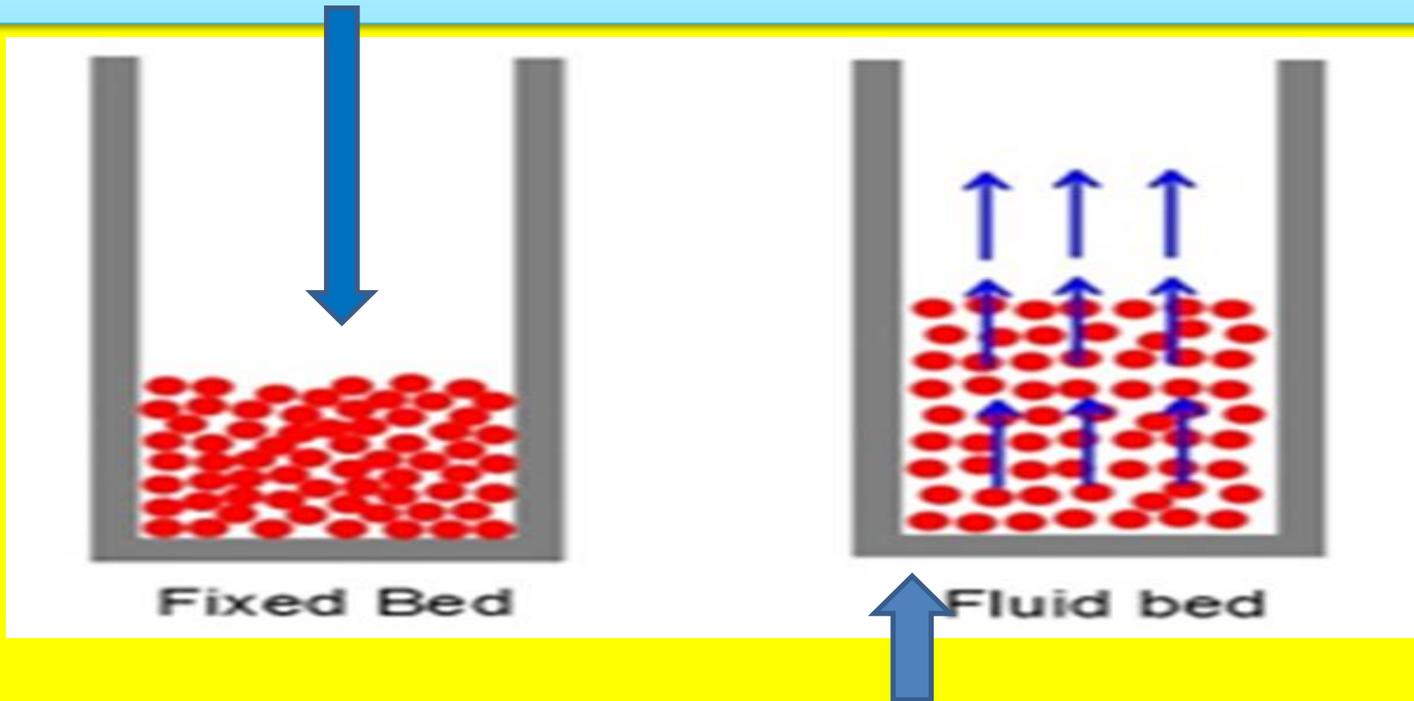
Aire circulante

Gas

A medida que se incrementa la velocidad del fluido, con lo cual también se aumenta el caudal se pueden distinguir diferentes etapas en el lecho

## ➤ Lecho fijo y lecho fluidizado

Las partículas permiten el paso tortuoso del fluido sin separarse una de otras, esto hace que la altura del lecho se mantenga constante y por tanto la fracción de vacío en el lecho (porosidad) se mantiene constante. En esta etapa el fluido experimenta la mayor caída de presión del proceso.



Lecho fluidizado: trata de un estado de transición entre el lecho fijo y el fluidizado. Una de las características que presenta esta etapa es que la velocidad en este punto recibe el nombre de velocidad mínima de fluidización. También se caracteriza porque la porosidad comienza a aumentar.

# Etapas de fluidización

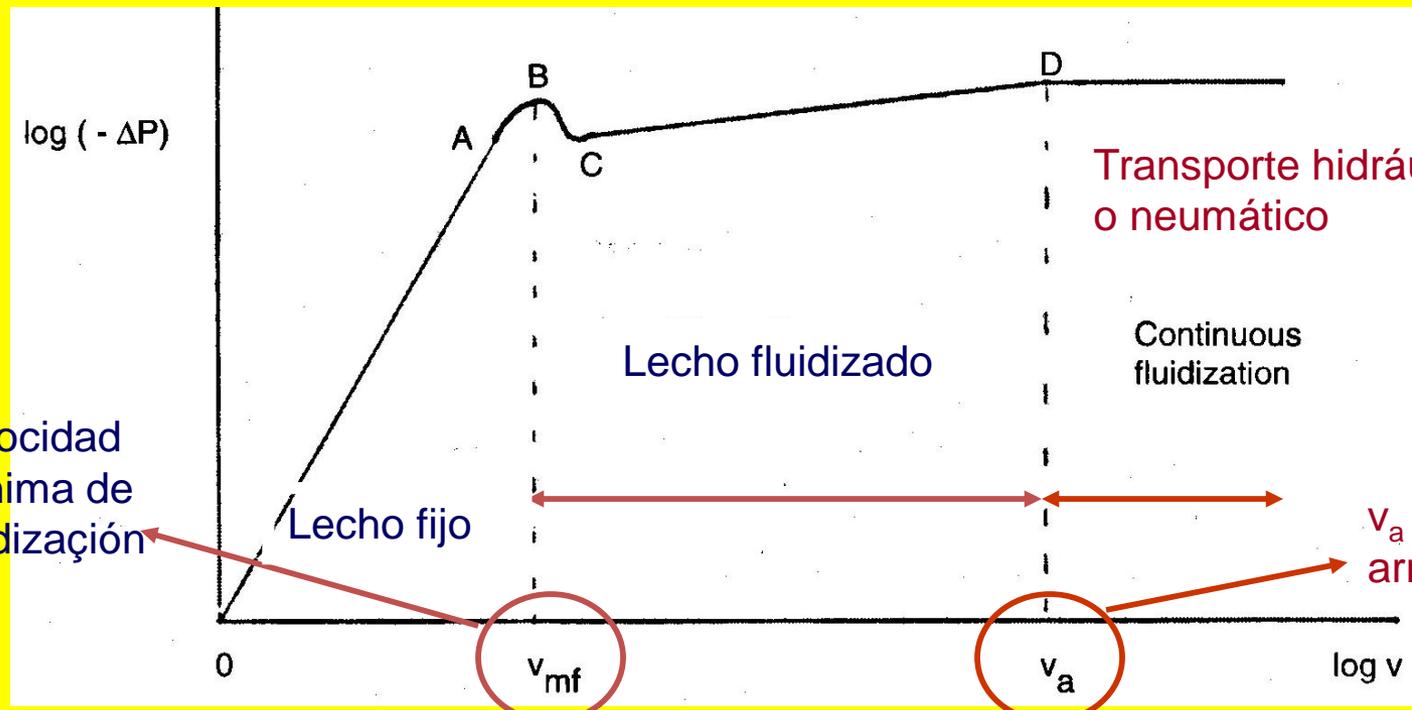
**O→A:** Aumento de velocidad por la presión del fluido

**A→B:** El lecho está iniciando la fluidización;

**B→C:** Con el aumento de la velocidad, se genera una leve depresión debido a una transferencia repentina de porosidad del lecho;

**C→D:** El  $\log(-\Delta P)$  varía linealmente con el  $\log(v)$  hasta el punto D.

**D→∞:** A partir del punto D, las partículas comienzan a ser acarreadas por el fluido y se adaptan su funcionalidad al sistema



# Parámetros de un lecho fluidizado

<https://www.youtube.com/watch?v=RDgZtTEhMVk>

<https://www.youtube.com/watch?v=nGovDPNvSDI>

- La naturaleza de las partículas sólidas
- La naturaleza del fluido
- Velocidad mínima de fluidización  $V_{mf}$
- La porosidad ( $\epsilon$ )
- El número de Reynolds (Re)
- Esfericidad de la partícula ( $\phi$ )
- Diámetros promedios

# dp DE LECHO FLUIDIZADO

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

$$dP = L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g$$

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

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

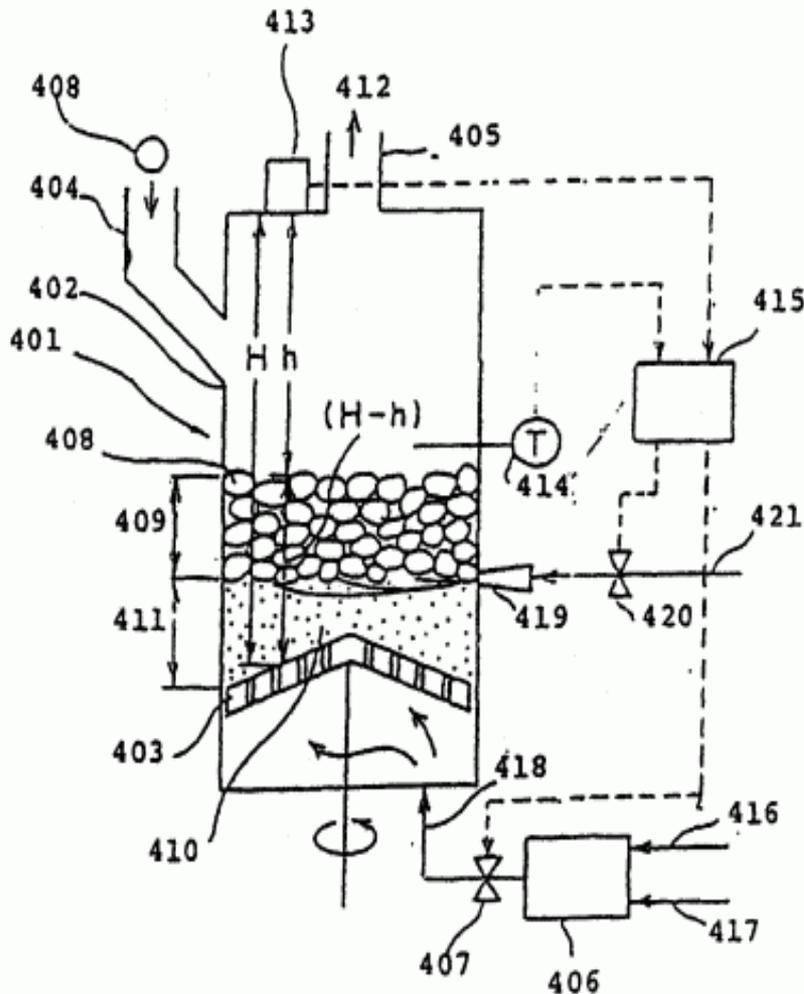
$\rho_s$  = densidad de la partícula.

$\rho_g$  = densidad de fluido

$g$  = aceleración de la gravedad

# dp del lecho fijo

FIG. 1



Considerar un lecho fijo de sólidos como se muestra en la figura. La caída de presión a través del lecho se debe al fluido a través de este y puede ser expresada por la ecuación de Ergun.

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_0}{(\phi d_p)^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U_0^2}{\phi d_p}$$

Donde,

$U_0$  = velocidad superficial del gas.

$\varepsilon$  = vacante del lecho

$D_p$  = diámetro de la partícula

$\mu$  = densidad del gas

$\phi$  = viscosidad del gas

# VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

La velocidad mínima de fluidización se observa cuando la mezcla del lecho es totalmente homogénea. Pero, gráficamente y matemáticamente es obtenida igualando las ecuaciones 1 y 2.

Igualando las ecuaciones nos da el cambio de presión, donde, la primera es para lecho fijo y la segunda para lecho fluidizado y por lo tanto, en el punto de intersección se obtiene en la  $L_{mf}$ . (altura del lecho)

$$\frac{1.75}{\phi \varepsilon_{mf}^2} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho g}{\mu} \right)^2 + \frac{150 (1 - \varepsilon_{mf})}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2}$$

**Además de las formas analizadas anteriormente, existen otros métodos para obtener la  $U_{mf}$**

**En donde, los valores numéricos de la  $U_{mf}$  para las partículas enteras en aire y agua estándar están trazadas**

# ALTURA DEL LECHO FLUIDIZADO

## **FIJO:**

Cuando la diferencia de presión varía con respecto a la velocidad, esto es, en valores menores que la mínima de fluidización.

La altura del lecho permanece constante debido a que las partículas no han sido aun suspendidas.

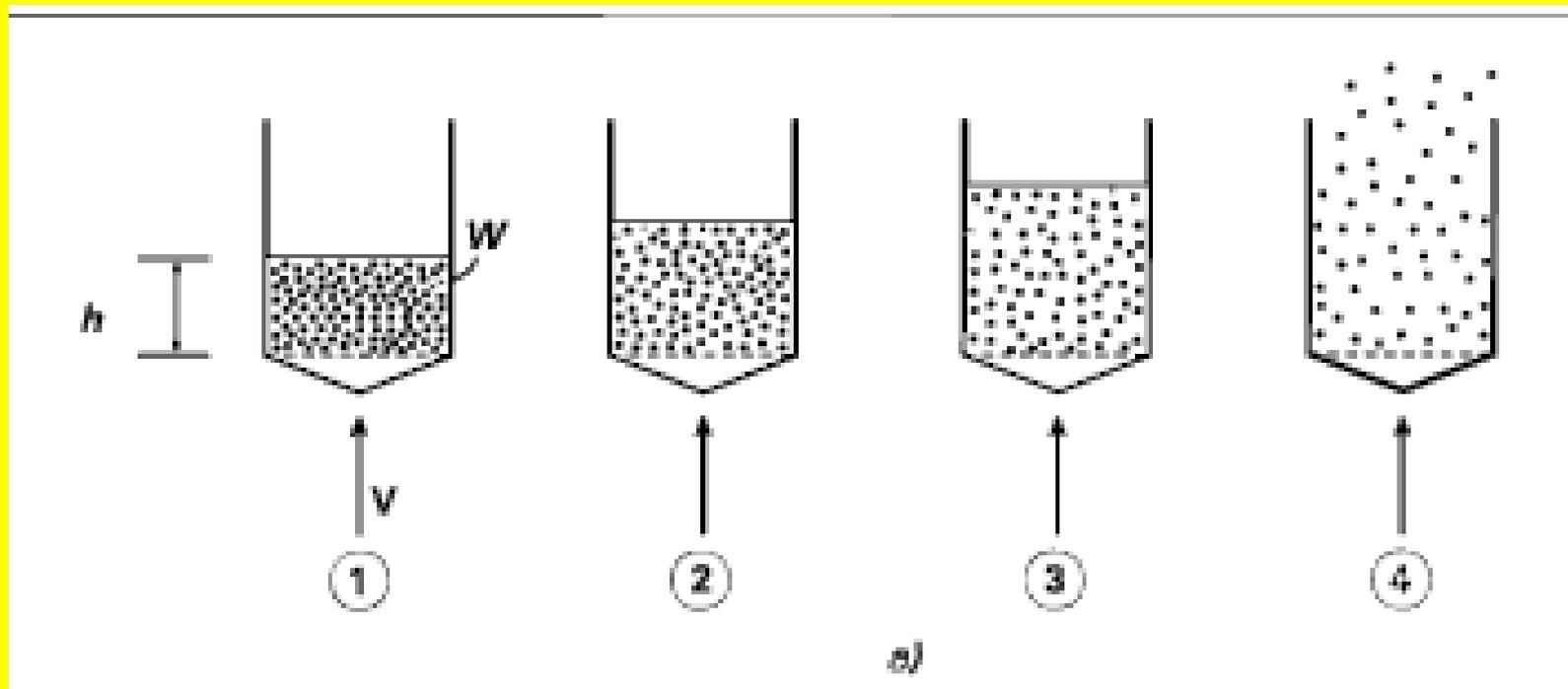
## **FLUIDIZADO:**

Las partículas comienzan a suspenderse y la altura entre estas cambian.

La velocidad que alcanza es la velocidad mínima de fluidización.

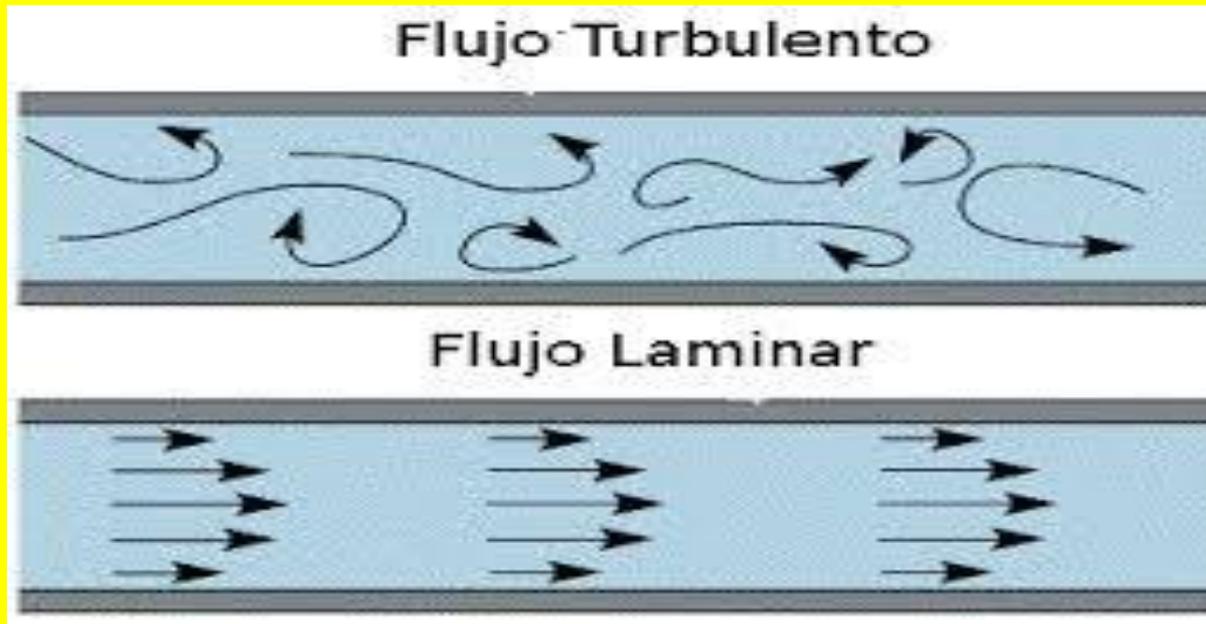
## VELOCIDAD DE ARRASTRE, CAPA FLUIDIZADA, VELOCIDAD CRÍTICA.

La velocidad del fluido para la que se alcanzan estas condiciones se denomina velocidad mínima de fluidización ( $U_{mf}$ ) y el lecho de partículas se conoce como lecho fluidizado.



Fases del lecho al aumentar la velocidad

# NÚMERO DE REYNOLDS



Si  $Re < 2000$  el flujo es laminar

Si  $Re > 3600$  el flujo es turbulento

Si  $Re$  se encuentra entre 2000 a 3600, es imposible predecir el tipo de flujo por lo que dicho intervalo se conoce como región crítica

# VELOCIDAD DE ARRASTRE, CAPA FLUIDIZADA, VELOCIDAD CRÍTICA.

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu}$$

$$; Re_p < 20$$

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p^* (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g}$$

$$; Re_p > 1000$$

La pérdida friccional para flujo a través de lechos rellenos puede calcularse utilizando la expresión de Ergun:

$$\sum F = \frac{150 \mu u_0 L (1 - \varepsilon)^2}{d_p^2 \cdot \rho \varepsilon^3} + \frac{1,75 u_0^2 L (1 - \varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} \quad \left[ \frac{J}{kg} \right]$$

pérdidas viscosas

pérdidas turbulentas

donde:

$\rho$ : densidad del fluido

$\mu$ : viscosidad del fluido

$d_p$ : diámetro de  
partícula

$L$ : altura de lecho

$\varepsilon$ : porosidad del lecho

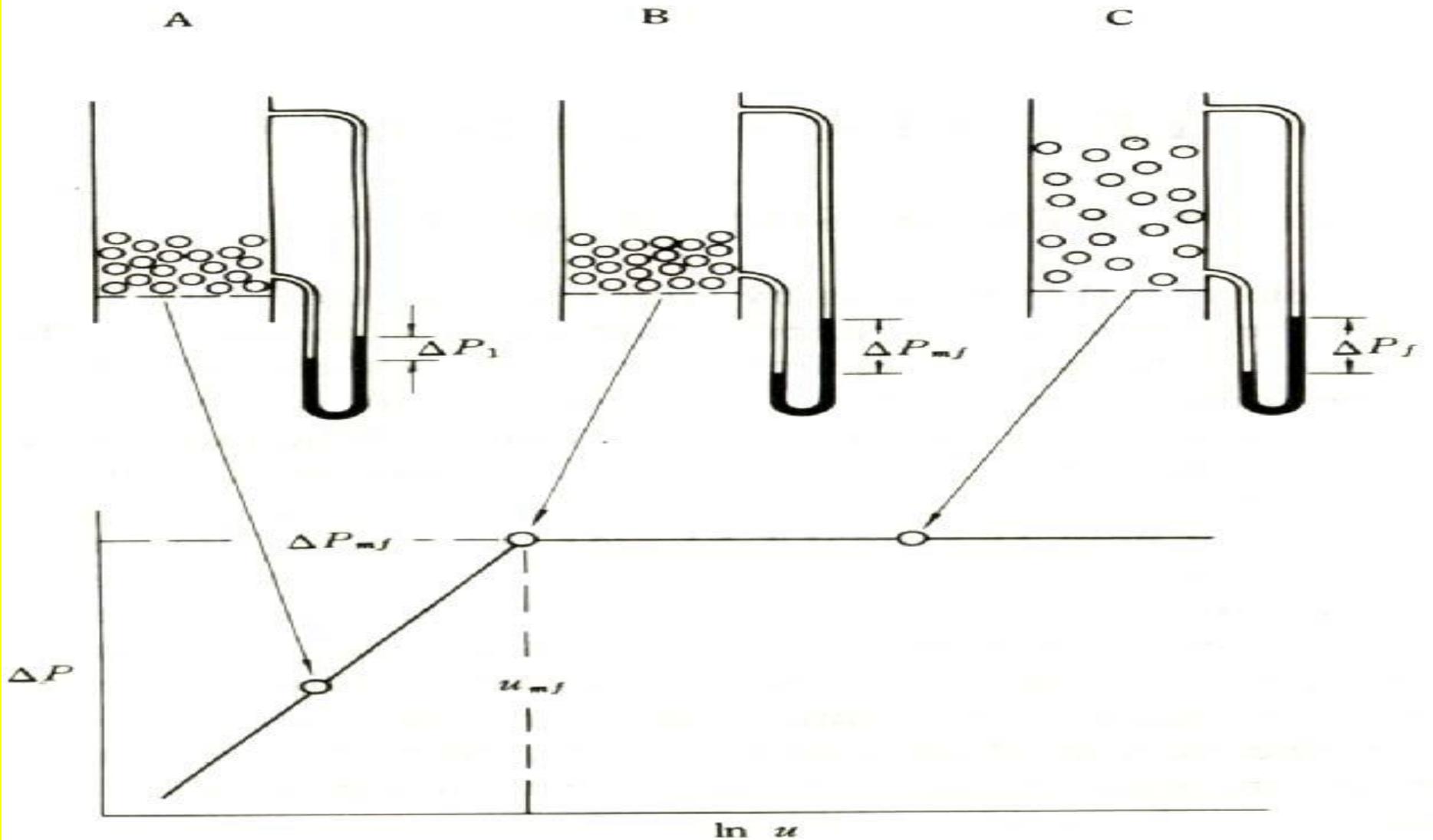
$U_0$ : velocidad

superficial del fluido.

Velocidad que tendría  
el fluido si el recipiente  
no contuviera sólidos

( $u_0 = Q/S$ )

# COMPORTAMIENTO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN LECHO RESPECTO DE LA VELOCIDAD



## ESFERICIDAD DE LA PARTÍCULA

Debido a que las partículas que se introducen un lecho son irregulares, es decir, no son redondas completamente, es necesario definir un parámetro que permita saber la forma real de la partícula.

Este concepto comprende la relación del área de una esfera con el área de la partícula, ambas partículas con el mismo volumen.

$$\varphi = \frac{\text{área superficial de una esfera con el mismo volumen que el de la partícula}}{\text{área superficial de la partícula}}$$

# DIÁMETRO DE LA PARTÍCULA

- ❖ El método más utilizado a los lechos fluidizados es que relaciona la superficie volumen diámetro,  $d_{sv}$ , y el peso de una fracción de la partícula.

$$d_p = d_{sv} = \frac{1}{\sum X_i / d_{pi}}$$

$d_p$  = Tamaño promedio de la partícula

$X_i$  = { peso fracción de tamaño pantalla promedio  $d_{pi}$

# POROSIDAD

Se le llama así al espacio libre que existe entre las partículas que se encuentran dentro de un lecho, este espacio libre entre moléculas es afectado por el tamaño y la forma de la partícula:

$$\epsilon = \frac{\text{volumen hueco}}{\text{volumen total}} = 1 - \frac{\text{volúmen del sólido}}{\text{volúmen del lecho}}$$

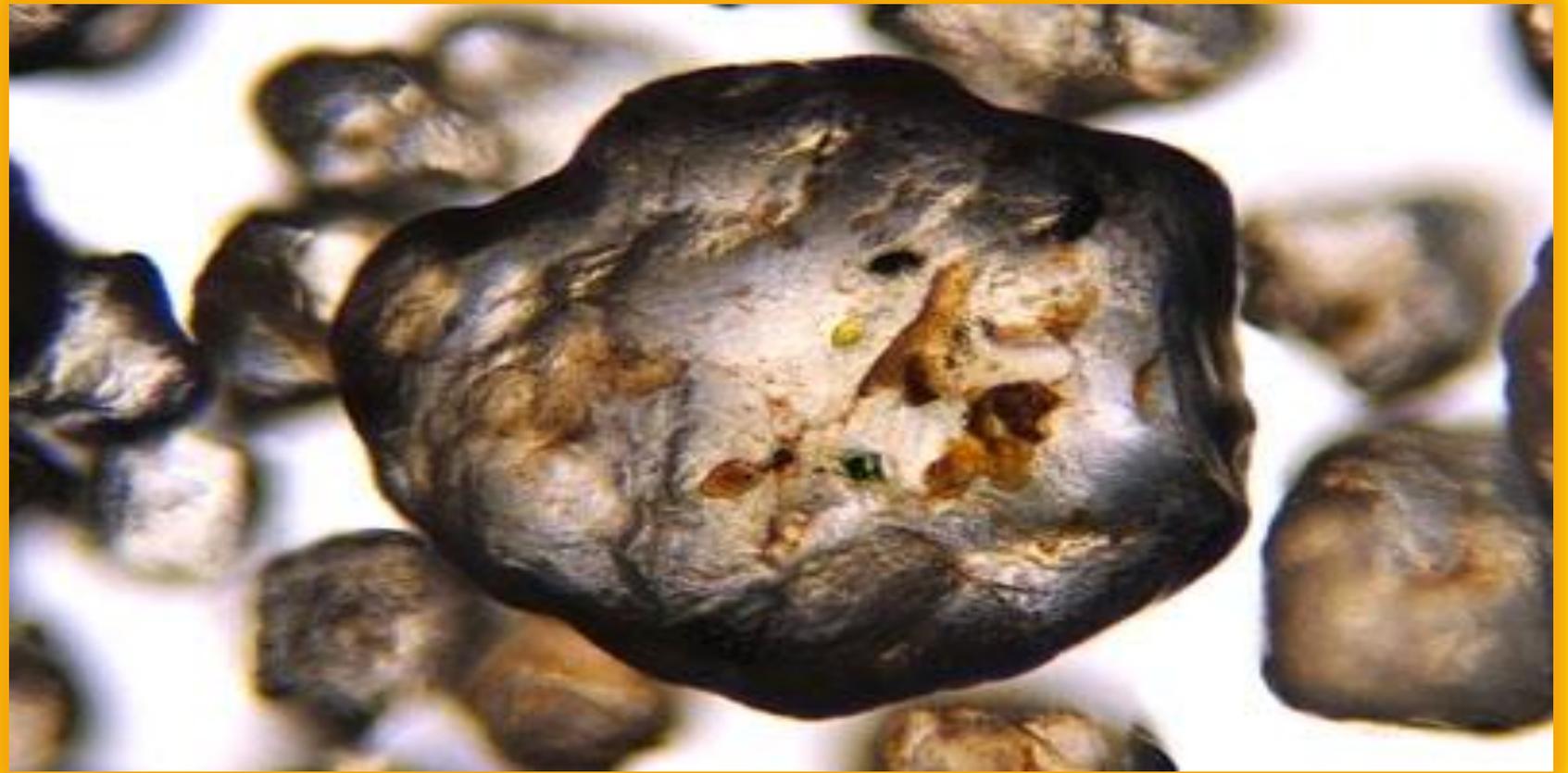
# CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS

Tamaño de partícula = Velocidad  
mínima de fluidización

## Grupo A : Materiales de tamaño medio pequeño o de baja densidad < 1.4 g/cm<sup>3</sup>. Se fluidizan rápidamente.

Muy baja densidad calórica	Baja densidad calórica	Moderada densidad calórica	Alta densidad calórica
Frutas frescas, vegetales, leche desnatada, infusiones sin azúcar, yogur desnatado, gelatina sin azúcar	Legumbres, cereales, pastas, carnes magras, queso untado, queso desnatado, requesón desnatado	Carne vacunas y porcinas, pollo, pescado, pan, quesos, requesón entero	Productos de snack, aceite, manteca, mayonesa, nata, frutas secas, frituras, chucherías, chocolate

**Grupo B: Parecidos a la arena o con diámetro de 40 a 500  $\mu\text{m}$  y densidad de 1.4 a 4  $\text{g}/\text{cm}^3$**



**Grupo C: Polvos muy finos y  
estos son difíciles de fluidizar**



**Grupo D: Partículas grandes y/o densas, son difíciles de fluidizar en lechos profundos**

