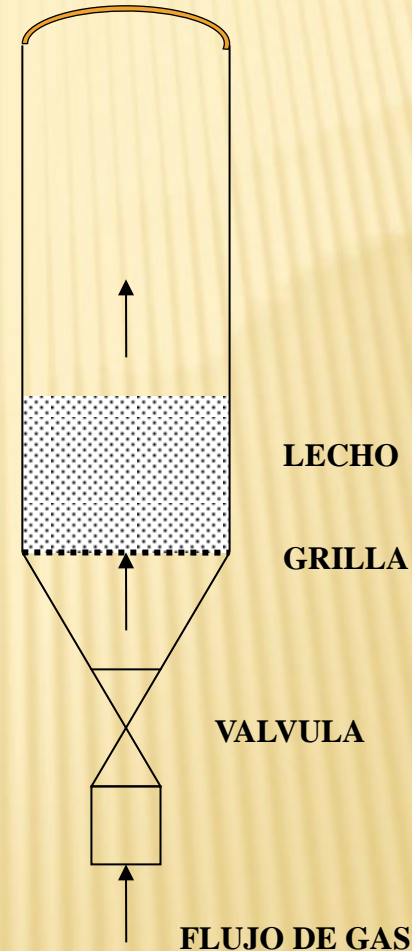


FLUIDIZACION

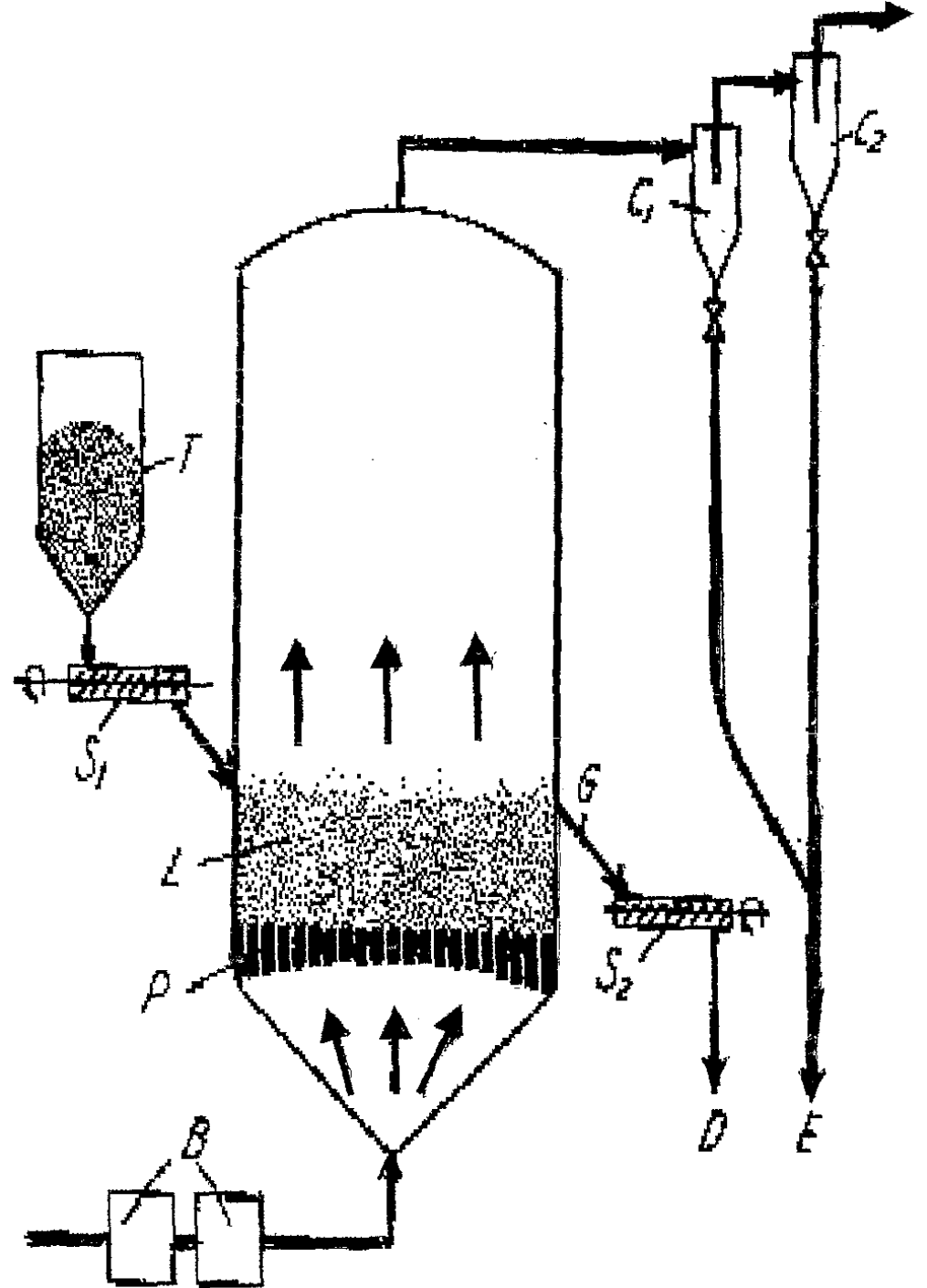
La fluidización consiste en suspender una masa de sólidos finamente divididos en una corriente gaseosa sin que sea arrastrado por la misma. Los sólidos se comportan en su conjunto como un fluido y se hallan en movimiento turbulento.

Esta operación permite realizar transferencia de masa y energía en forma muy eficiente porque el área específica es muy grande.

USOS: La operación se usa para reacciones catalizadas que requieran mucha superficie específica (cracking catalítico, desulfurización de gases, secado de granos y productos alimenticios, enfriamiento de los mismos, biorreactores para tratamiento de suelos contaminados).



ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN DE LECHO FLUIDIZADO.



VENTAJAS

Se asimila a un fluido lo que permite operaciones continuas

El reactor trabaja isotérmico (no hay gradientes de temperatura axiales o radiales)

Hay un rápido mezclado

Optima transferencia de calor

Alta transferencia de masa

Permite el transporte neumático

DESVENTAJAS

La fluidodinámica es compleja (burbujas) y no hay un contacto gas-sólido íntimo

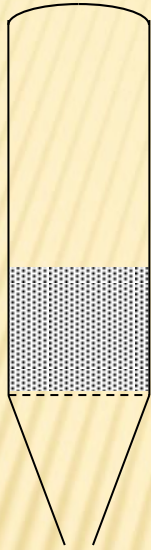
Hay dificultades para extrapolar resultados de laboratorio, por lo que hay que hacer serios estudios en plantas pilotos.

Hay atricción de partículas, lo que exige reposición de stock

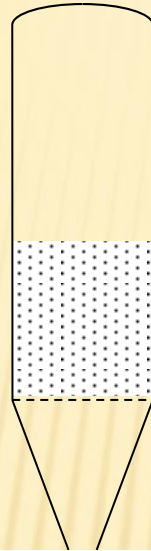
Produce erosión en los conductos y paredes del reactor

Se adapta mejor a plantas grandes

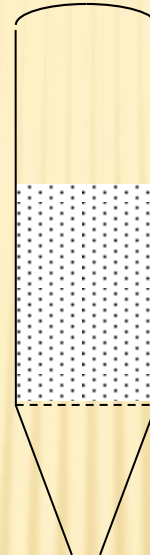
Etapas



Lecho fijo



Lecho prefluidizado



Lecho fluidizado



Lecho fluidizado con transporte neumático

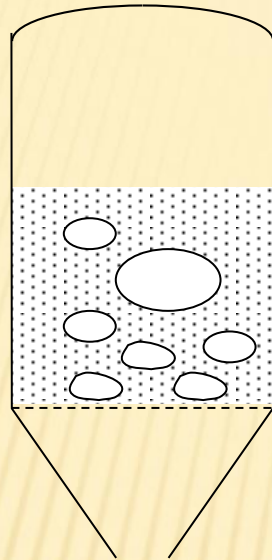
Bajo

Alto

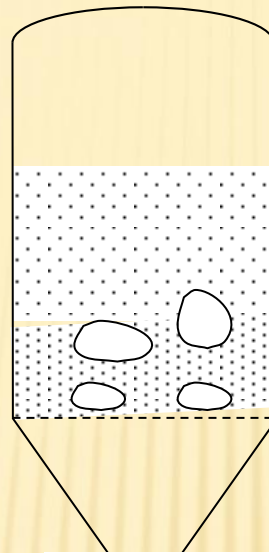


Velocidad del fluido

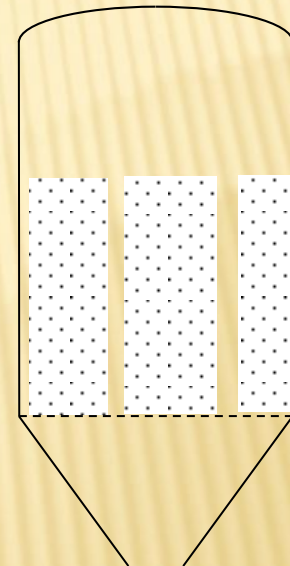
Características indeseables



Burbujeo



Lecho fluidizado rápido con burbujeo

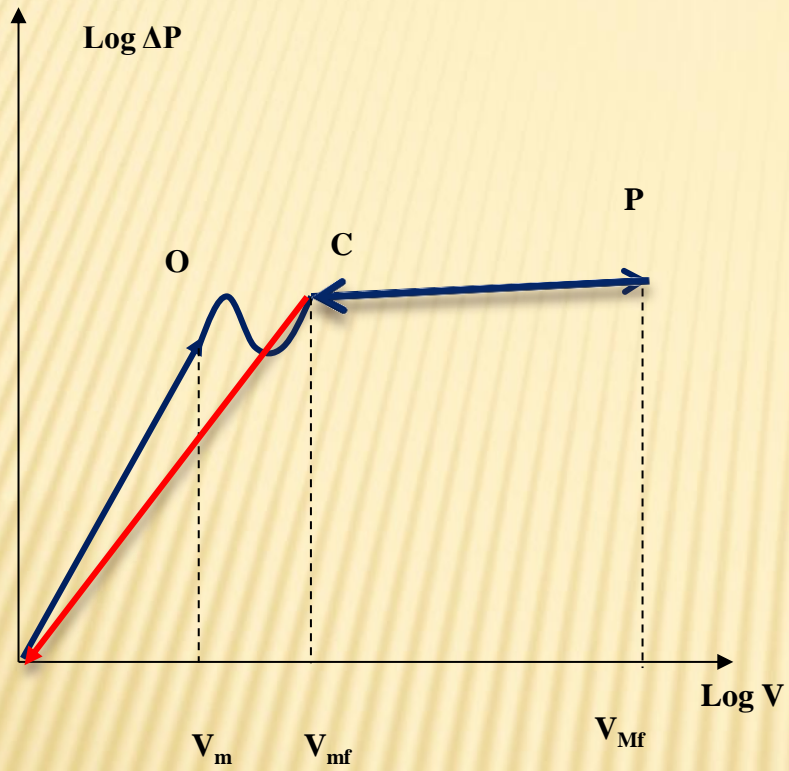


Lecho fluidizado con canalización

CARACTERÍSTICAS DEL LECHO

**Gran desarrollo superficial (vol =0,2 m³, Φ_p = 300 μ la superficie es de 4000)
Alto grado de turbulencia. En la interfase gas-sólido hay una capa adherida al sólido
Facilidad de ejecución de procesos exo o endotérmicos**

Pérdida de carga (ΔP)



Variación de la porosidad

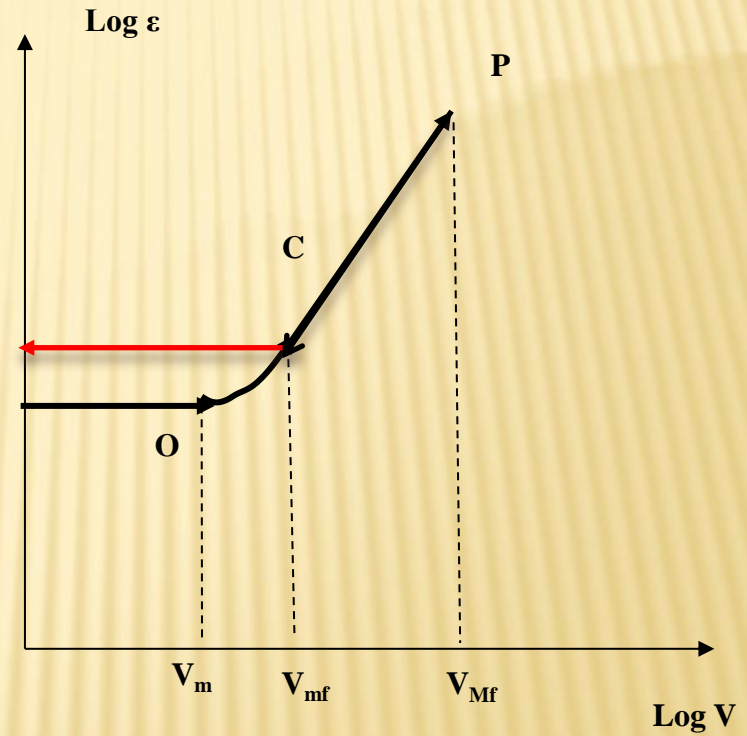
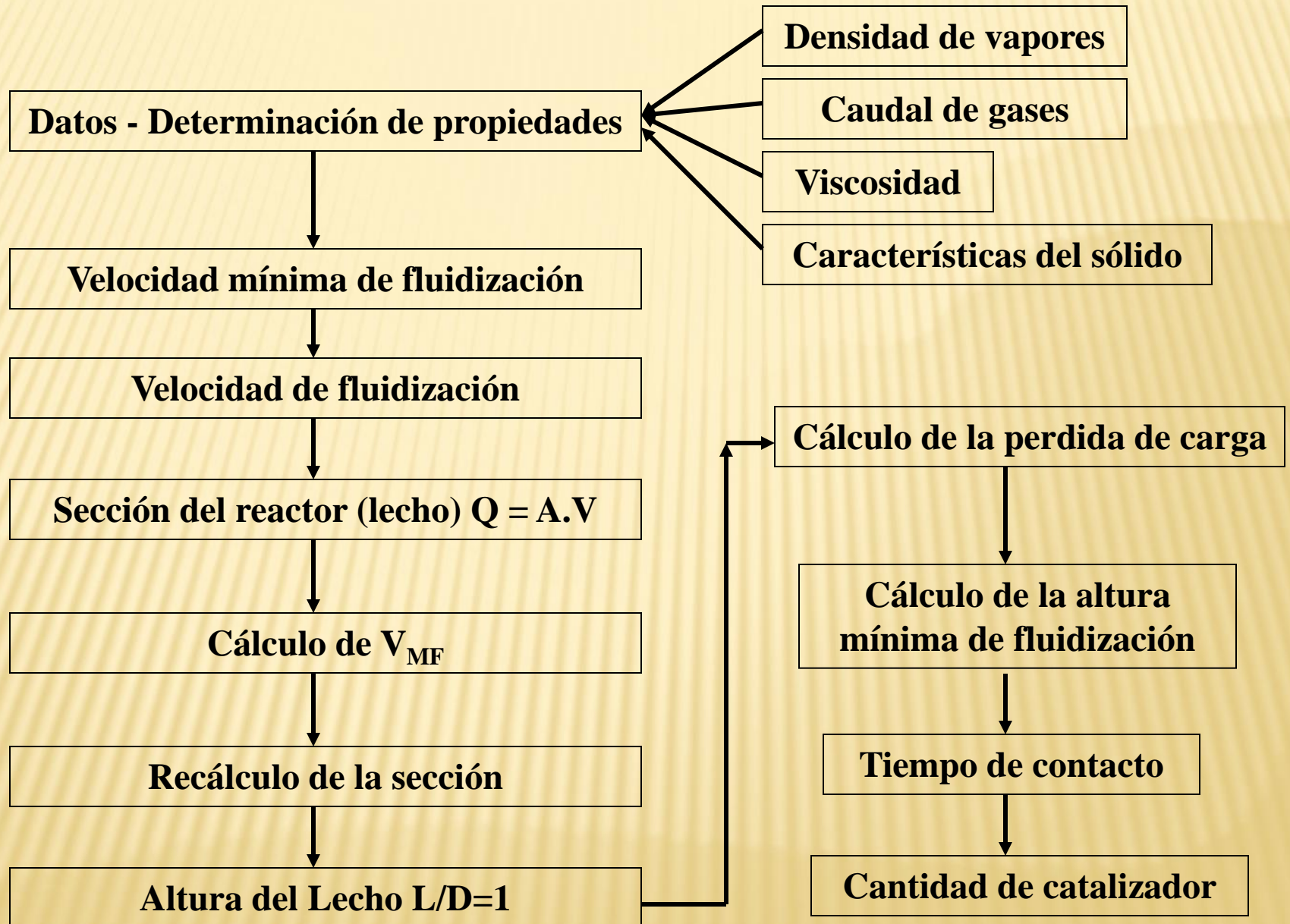


Diagrama de cálculo de un lecho fluidizado



4 CARACTERIZACIÓN Y PROPIEDADES DE LAS PARTÍCULAS

Las partículas se caracterizan por:

- 1) Diámetro
- 2) Densidad
- 3) Porosidad correspondiente a la fluidización incipiente (Emf)
- 4) Factor de forma.

DIÁMETRO MEDIO:

- a) basado en la superficie específica: $d = 1 / \sum_1^n (X_i/d_i)$
- b) Diámetro Medio en volúmen: $d = \sum_1^n (X_i \cdot d_{vi}^3)$
- c) Diámetro medio en masa: $d = \sum_1^n (X_i \cdot d_i)$

DENSIDAD: picnómetro o a través de la pérdida de carga (ERGUN)

POROSIDAD: La porosidad del lecho correspondiente a la fluidización incipiente (ϵ_{mf}) se determina experimentalmente vertiendo una masa de partículas en un recipiente aforado, evitando cualquier vibración que compacte el lecho.

$$\epsilon = \text{Volúmen de Vacíos} / \text{Volumen Total}$$

$$\epsilon_{mf} = 1 - m_p / V_p \cdot (\rho_s - \rho)$$

La COMPACIDAD se define: $C = 1 - \epsilon = \text{Volumen Sólidos} / \text{Volumen total}$

FACTOR DE FORMA (Φ)

Al no ser esféricas las partículas en la realidad se define un factor de forma: Φ , como la relación de las siguientes superficies:

$$\Phi = \frac{\text{Sup. esfera de volumen igual a la partícula}}{\text{Superficie de la partícula}}$$

WEN Y YU (1966) establecieron las siguientes relaciones entre la porosidad y el factor de forma en la fluidización incipiente:

$$\frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\Phi^2 \cdot \varepsilon_{mf}^3} = 11$$

$$\frac{1}{\Phi \cdot \varepsilon_{mf}^3} = 14$$

Se trabaja con el promedio

Se ha observado que las propiedades de las partículas afectan en gran manera el comportamiento general del lecho y la calidad de la fluidización. Se distinguen dos casos:

Catalizadores: 60 – 80 μm : Si aumenta el tenor de finos las partículas se agregan, se cohesionan o se aglomeran, produciendo canalizaciones en el lecho. Con el transcurso de la operación se van aumentando la cantidad de finos a causa de la atrición, dando finalmente como resultado una disminución en la calidad de la fluidización.

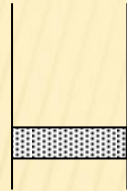
Fluidización de otros sólidos: aquí los problemas que se presentan son diversos:

- a) Aglomeración en-sólidos húmedos o pegajosos**
- b) Gran dispersión de tamaños**
- c) Secado de sustancias pastosas, etc.**

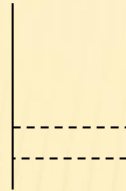
TIPO DE GRILLA



Plato perforado plano



Plato poroso



Dos platos superpuestos al trespelillo



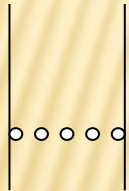
Plato perforado cóncavo



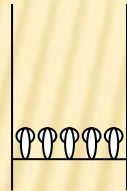
Plato perforado convexo



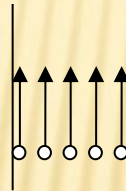
Lecho fijo de esferas



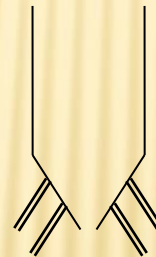
Parrilla de tubos



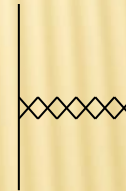
Plato de campanas de burbujeo



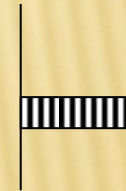
Parrilla de tubos perforados



Múltiples entradas de gas



Rejilla



Sistema aislado térmicamente

$$0,6 \text{ cm} < d < 2,5 \text{ cm}$$

$$10 < [\Delta P_g / \Delta P] \cdot 100 < 40$$

PÉRDIDA DE CARGA:

Es necesaria conocerla para poder estimar la potencia que será necesaria aplicar. Su cálculo puede hacerse igualando el peso "aparente" de las partículas de sólidos por unidad de área de la sección transversal de la columna (pérdida de carga experimentada por el gas).

Peso de las partículas: $P_s = A.L.(1 - \epsilon) \cdot \rho_s.g$

Empuje que reciben: $E = AL.(1 - \epsilon). \rho.g$

Peso Neto del lecho: $P_s - E = PN = A.L.(l - \epsilon).(\rho_s - \rho).g$ [1]

La fuerza ejercida por el fluido (y que sostiene el sólido) será: $F=MA$ [2]
igualando: [1] = [2] :

$\Delta P.A = A.L.(l - \epsilon).(\rho_s - \rho).g$

$\Delta P/L = (1 - \epsilon).(\rho_s - \rho).g$ [3]

Que es la caída de presión por unidad de altura del lecho.

Evaluación de la Velocidad de Fluidización:

Si observamos el gráfico anterior: $\Delta P = \varphi (V)$, observamos que ΔP se mantiene prácticamente constante entre la velocidad mínima de fluidización y la velocidad máxima de fluidización, por lo que será válida en dicho intervalo la fórmula

$$\Delta P / L_{mf} = (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \quad [4] \text{ para el estado de comienzo de la fluidización.}$$

El cálculo de la velocidad mínima de fluidización puede obtenerse igualando la [4] con la fórmula de Ergun (1952) que da la pérdida de carga que sufre el gas al atravesar el lecho fijo de partículas, en el momento de la fluidización incipiente, y que fué lograda por desarrollos del Análisis Dimensional:

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = \frac{150 \mu V_{mf} (1 - \varepsilon_{mf})^2}{d^2 \cdot \varepsilon_{mf}^3 \Phi} + \frac{1,75 \rho V_{mf}^2 (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi} \quad [5]$$

Igualando [4] y [5]

$$(1 - \varepsilon) \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g = \frac{150 \mu V_{mf} (1 - \varepsilon_{mf})^2}{d^2 \cdot \varepsilon_{mf}^3 \Phi} + \frac{1,75 \rho V_{mf}^2 (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi} \quad [6]$$

Régimen Laminar **Régimen Turbulento**

Esta fórmula nos permite calcular teóricamente: (V_{mf}) , pero si no se conoce el factor de forma Φ y la porosidad ε_{mf} , no puede calcularse.

Cuando no se conoce Φ

1º) Determinar experimentalmente V_{mf} , en una columna transparente y observando el comportamiento del lecho. Como el caudal del gas "Q" se mide, luego:

$Q = V_{mf} \cdot A$ y de aquí se calcula: V_{mf}

2°) Utilizando las expresiones: [1] de Wen y Yu y reemplazando en la [6]:

$$\begin{aligned}
 (\rho_s - \rho).g = & \frac{150\mu V_{mf}}{d^2} \cdot 11 + \frac{1,75 \rho V_{mf}^2}{d} \cdot 14 = 1650 \cdot \frac{\mu V_{mf}}{d^2} + 24,5 \cdot \frac{\rho V_{mf}^2}{d} \\
 [7]
 \end{aligned}$$

Esta fórmula puede expresarse en grupos adimensionales, multiplicando ambos miembros por: $\rho \cdot d^3 / \mu^2$

$$\begin{aligned}
 \frac{(\rho_s - \rho).g \rho \cdot d^3}{\mu^2} = & 1650 \cdot \frac{\rho \cdot d \cdot V_{mf}}{\mu} + 24,5 \frac{\rho^2 d^2 V_{mf}^2}{\mu^2} \\
 \text{Ga(N° Galileo)} & \qquad \qquad \text{Re} \qquad \qquad \qquad (\text{Re})^2
 \end{aligned}$$

$$Ga = 1650.Re + 24,5.Re^2$$

$$Re = \sqrt{(33,7)^2 + 0,0408.Ga} - 33,7 \qquad [8]$$

3. Una tercera forma de encontrar V_{mf} sería observando en la [6] que el 2º miembro de Ergun, considera dos contribuciones a la pérdida de carga: una primera debida a la viscosidad y una segunda a efectos cinéticos.

$$V_{mf} = \frac{d^2 (\rho_s - \rho) \cdot g}{1650 \cdot \mu} \iff (Re_p) < 20$$

$$V_{mf} = \sqrt{\frac{d^2 (\rho_s - \rho) \cdot g}{24,5 \rho}} \iff (Re_p) > 1000$$

Para calcular la velocidad de fluidización máxima V_{Mf} tendremos presente que este estado límite ocurrirá cuando la fuerza de arrastre del gas sea igual al peso de las partículas en el seno del fluido.

La resistencia: "R" que opone una partícula esférica a la corriente de gas, por unidad de área proyectada, será:

$$R = \frac{4/3 \cdot \pi \cdot d^3/8 (\rho_s - \rho) \cdot g}{\pi \cdot d^2/4} = 2/3 \cdot d \cdot ((\rho_s - \rho) \cdot g)$$

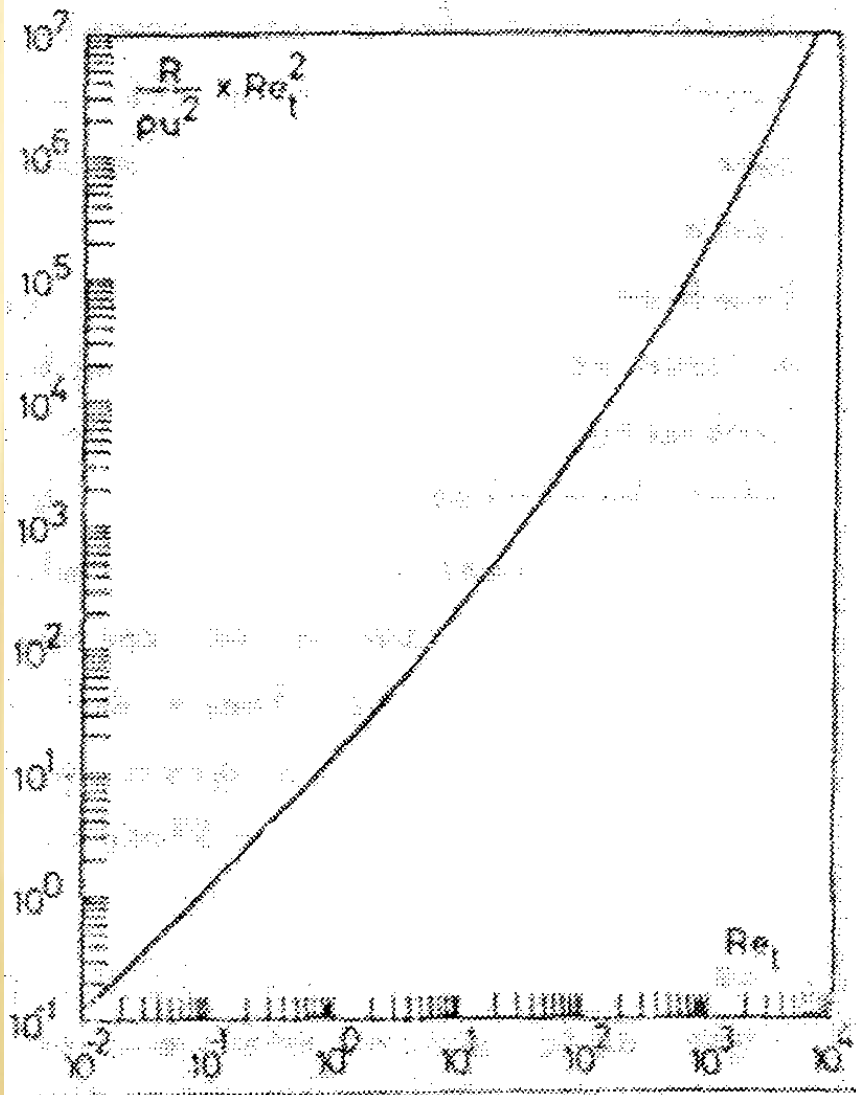
HEYWOOD EN 1948 FORMÓ EL SIGUIENTE GRUPO ADIMENSIONAL:

$$\frac{R}{\rho V_{MF}^2} \cdot \frac{V_{MF}^2 D^2 \cdot P^2}{M^2} = \frac{2 D^3 P \cdot G \cdot (P_s - P)}{3 M^2} = \frac{2}{3} GA$$

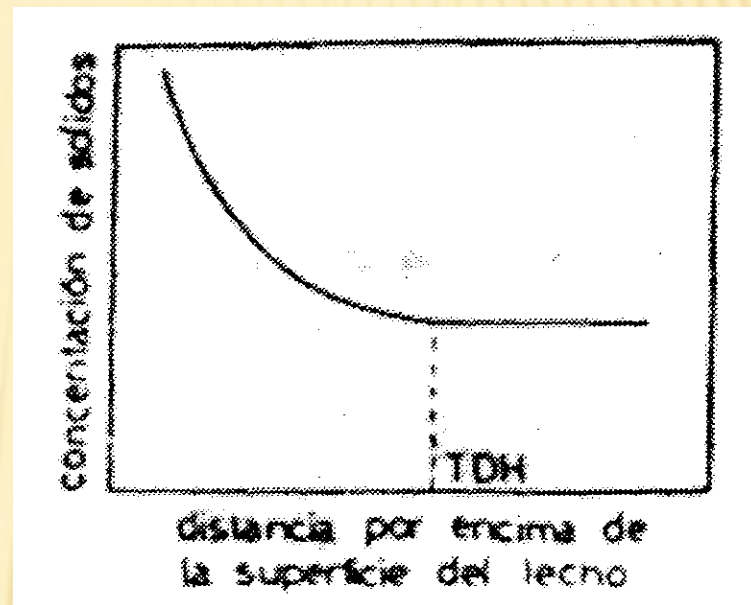
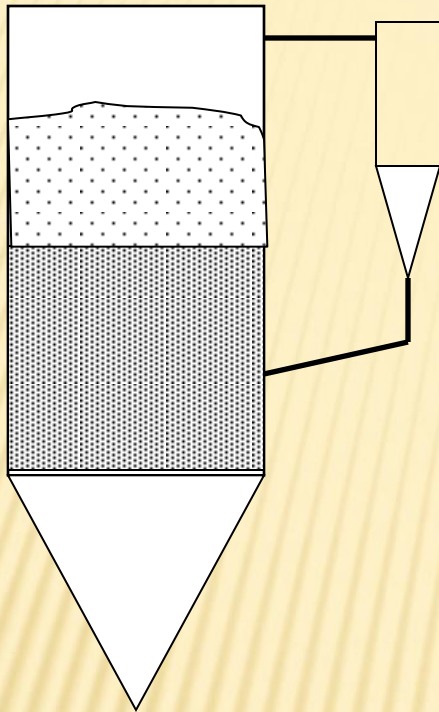
$$\frac{R}{\rho V_{Mf}^2} \cdot R_{et}^2 \implies R_{et}^2 \implies V_{MF}$$

$$V_{mf} < V_F < V_{MF}$$

$$V_F = 3 \text{ a } 5 V_{mj}$$



ALTURA CRITICA DE RECUPERACIÓN DE PARTICULAS (T.D.H.)



Más precisión se consigue con el criterio de Fournol (1973) que definió la T.D.H. como la altura por encima de la superficie del lecho, para que el valor inverso del N° de Froude sea igual a 1000:

$$\frac{g \cdot \text{T.D.H.}}{Vf^2} = 1000$$

$$\text{T.D.H.} = \frac{1000 \cdot Vf^2}{g}$$

EFICIENCIA DE LA FLUIDIZACIÓN

$$P_0 = \Delta P \cdot (\pi D^2 / 4) \cdot V_0 \quad P_f = \Delta P' \cdot (\pi \cdot D^2 / 4) \cdot V_r$$

Observando el gráfico: $\Delta P = F(V)$ notamos que ΔP desde "0" hasta cualquier punto de fluidización "f" es casi constante (es decir tiene poca variación), o sea: $\Delta P \approx \Delta P'$, por lo que podremos hacer la siguiente relación:

$$\frac{P_f - P_0}{P_f} = \frac{V_f - V_0}{V_f} \cdot \frac{\rho}{\rho} = \frac{G_r - G_0}{G_r} = \eta$$

Hay dos gráficos generalizados, para calcular el " η ", y luego con este valor, establecer la altura del lecho: L_f

1° con la relación: G_r / G_{mf} se obtiene: η (primer grafico)

2° con este valor de η , y el diámetro de la partícula se obtiene:

$$R = (L_f / L_{fm})$$

y como: L_{fm} se puede calcular, se obtiene finalmente. " L_f " (segundo gráfico)

TRANSFERENCIA DE CALOR

PARTICULA – GAS

LECHO - PARED

SE MEJORA LA TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE

- Al aumentar los G
- Al aumentar los K del fluido
- Al disminuir los D_p
- Al disminuir la altura de la superficie a través de la que se efectúa la transferencia

