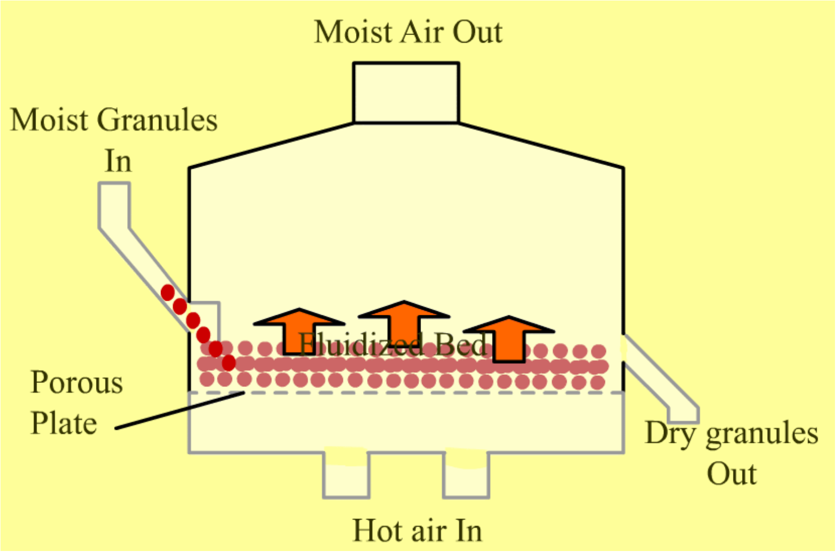
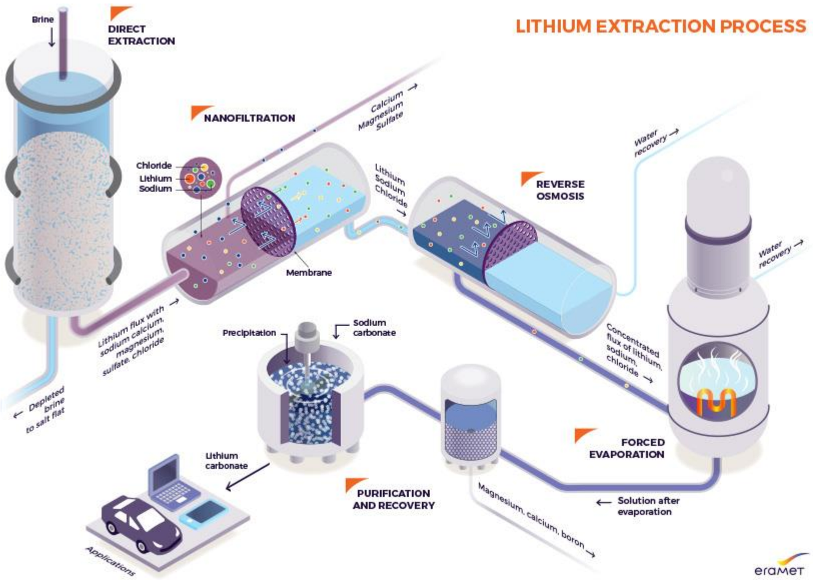
Operaciones Unitarias 1

Tecnología de los sistemas particulados

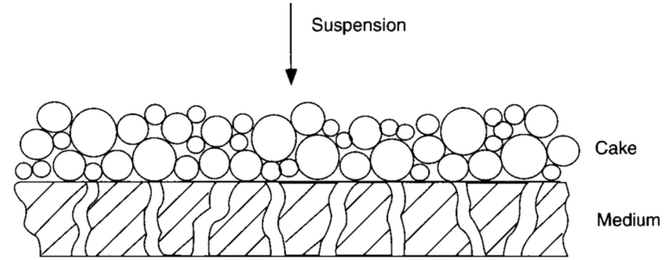
❖ **Operaciones en Lechos**

FLUJO A TRAVÉS DE SISTEMAS PARTICULADOS



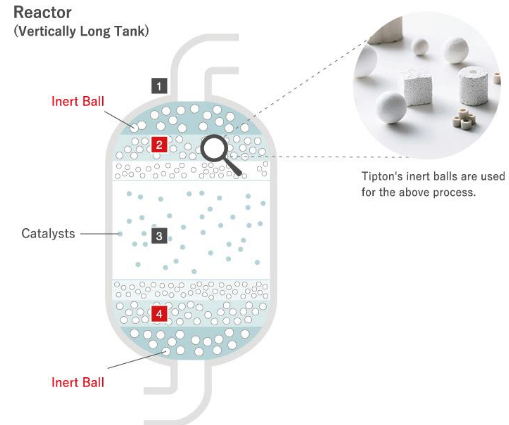


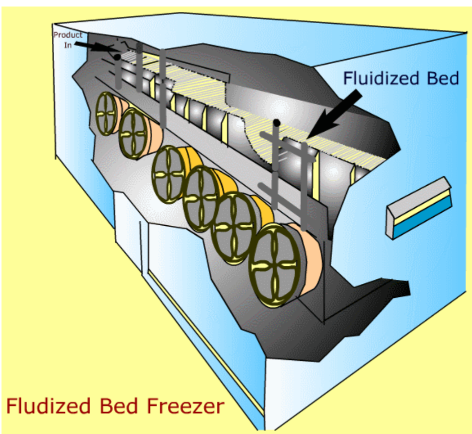
FLUJO A TRAVÉS DE SISTEMAS PARTICULADOS

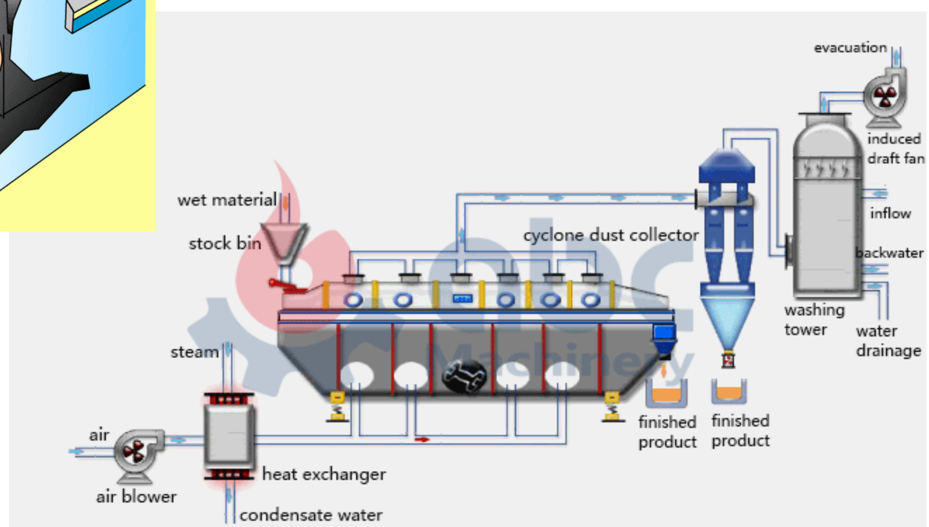


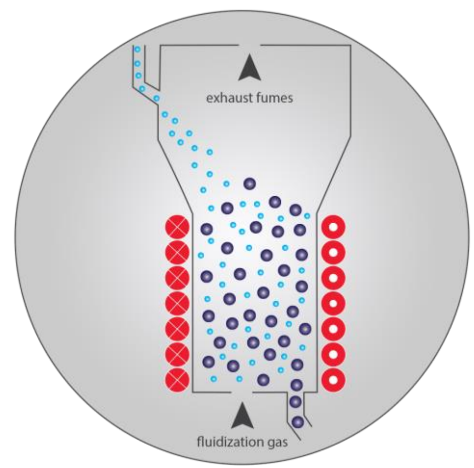
Matriz de partículas sólidas a través de la cual escurre un fluido

Un medio poroso rígido consta de poros (o canales) ubicados entre una fase sólida particulada, contenida dentro de un recipiente, o volumen de control. El fluido (liquido, gas) fluye a través de este sistema.









FLUJO A TRAVÉS DE SISTEMAS PARTICULADOS

El flujo a través de lechos de partículas sólidas aparece en numerosos procesos industriales. Ejemplos importantes son:

- **Filtración *dead-end*** , las partículas sólidas se depositan en un medio filtrante, y el fluido pasa a través de la masa filtrante depositada. El lecho de sólidos está formado por partículas que se separan del líquido mediante una tela filtrante o tamiz fino.
- **Lechos fijos y fluidizados** aplicados en los procesos de adsorción, absorción, intercambio iónico, micro destilación, humidificación, reactores heterogéneos, intercambiadores de calor regenerativos. El empacamiento provee un buen contacto para la transferencia entre las fases. El material particulado puede ser natural o de diseño, tener forma irregular o regular, configurar empaquetamientos al azar o estructurados.

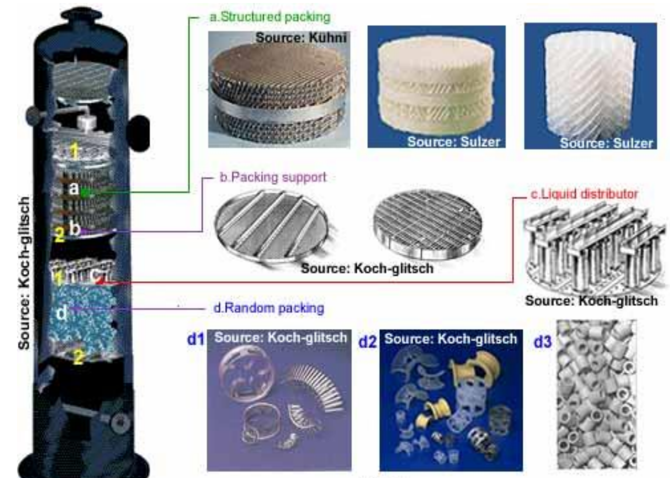
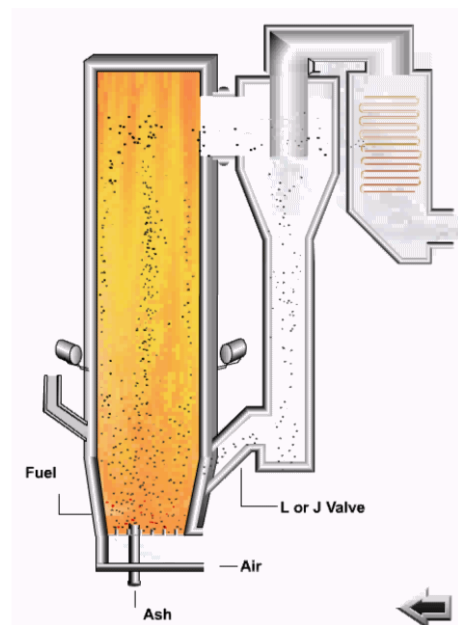
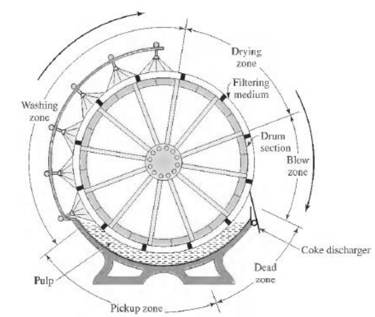


Fig.1





FLUJO A TRAVÉS DE SISTEMAS PARTICULADOS densidad, porosidad

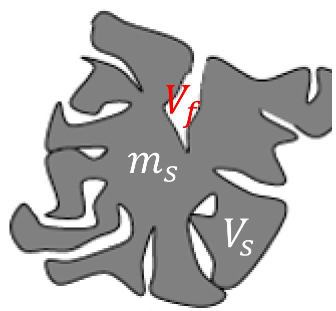
- Densidad de fluido $\rho = \frac{m_f}{V_f}$; V_f volumen ocupado por el fluido .

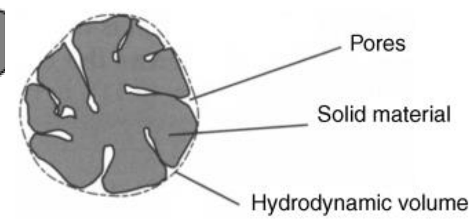
- Densidad del sólido (densidad absoluta) $\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$; V_s volumen ocupado por el sólido (excluido el volumen ocupado por poros y canales)

- Densidad de las partículas (densidad aparente o *envelope density*) $\rho_p = \frac{m_s}{V_p}$ $V_p = V_s + V_f$ volumen ocupado por las partículas (incluye el volumen ocupado por los poros internos; volumen hidrodinámico)

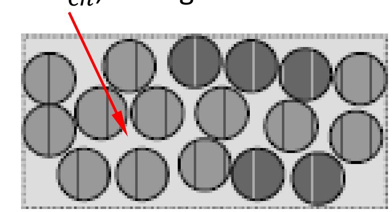
Volumen del lecho

$$V_B = V_s + V_f + V_{ch} = V_s + V_{tf}$$





V_{ch}, zona gris



Densidad del lecho (bulk density) $\rho_B = \frac{m_s + m_{tf}}{V_B}$ (masa del sólido + masa total de fluido, por unidad de volumen del lecho)

Porosidad (*voidage*) del lecho $\varepsilon_B = \frac{V_{tf}}{V_B}$ Concentración volumétrica de sólido $(1 - \varepsilon_B) = C_B = \frac{V_s}{V_B}$ $\varepsilon_B + C_B = 1$

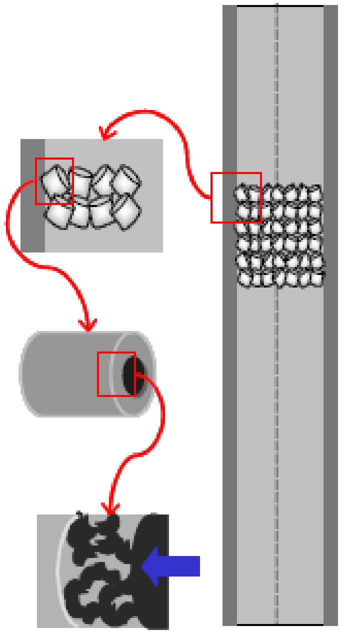
$\rho_B = (1 - \varepsilon_B)\rho_s + \rho\varepsilon_B$ Si $\rho_p \gg \rho \rightarrow \rho_B = (1 - \varepsilon_B)\rho_p$

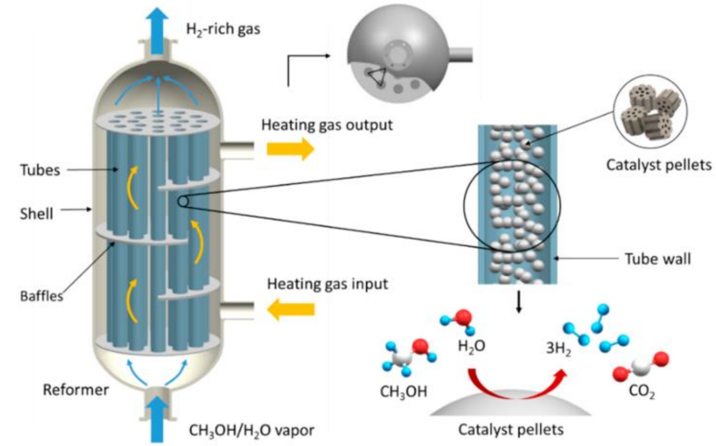
<u>Concentración másica C_W vs volumétrica C_B del lecho</u> $C_W = \frac{m_s}{m_{tf} + m_s} \rightarrow C_B = \frac{1}{1 + \frac{(1 - C_W)}{C_W}\frac{\rho_s}{\rho}}$

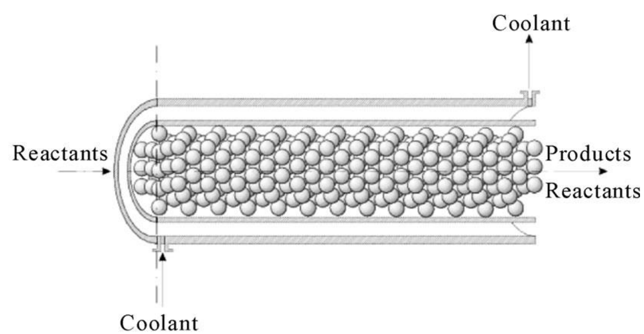
Un lecho de partículas se considera fijo, empacado o estacionario cuando todas sus características no varían durante el proceso.

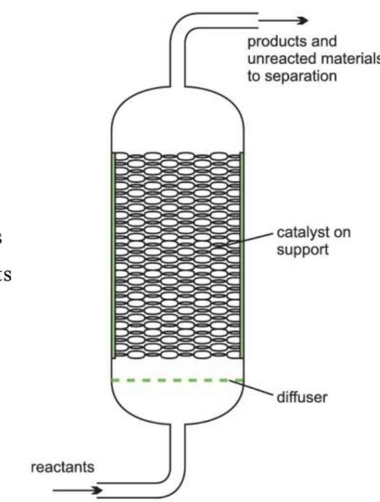
En un modelo de **matriz rígida** considera que:

1) Está conformado por partículas pequeñas de idéntica densidad, tamaño y forma.
2) Las partículas y el fluido son incomprensibles.
3) No existe transferencia de masa entre ambas fases
4) Se encuentran sometidos sólo a un campo gravitatorio.
5) No existen irreversibilidades entre las fronteras del volumen de control y el sistema particulado – fluido
6) La estructura es rígida e inmóvil.

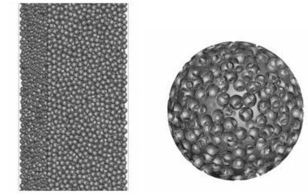








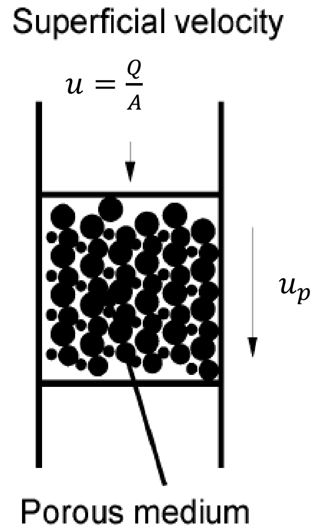
Lechos fijos o empacados, velocidad superficial

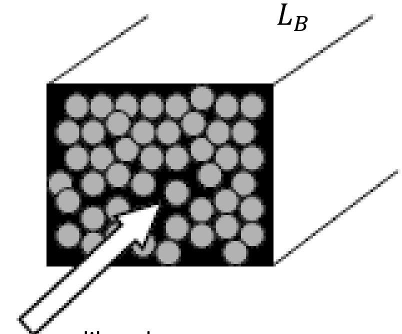


Considerar caudal de fluido a través del lecho, Q m^3.s^{-1}, y área de la sección transversal del lecho A m^2.

Se define la velocidad superficial (o de recipiente vacío) $u = Q/A$ m.s^{-1}.

Las partículas dentro del lecho reducirán el área disponible para el flujo. Para preservar la continuidad con el flujo superficial entrante, el fluido tendrá que pasar a través de un área más pequeña; por tanto, la velocidad intersticial (u_p) será mayor que la superficial (u).





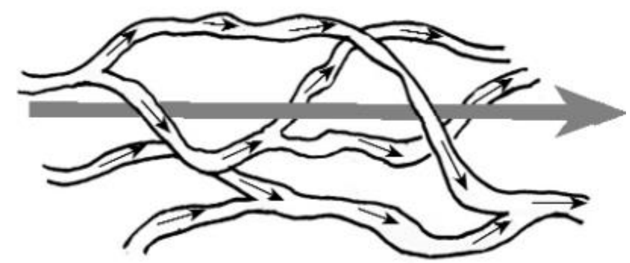
área libre de paso:

El caudal que pasa por el área transversal del volumen de control debe ser igual al caudal que pasa por los espacios libres entre las partículas

$$Q_{seccion\ vacía} = Q_{área\ libre\ de\ paso\ de\ flujo}$$

$$uA_B = u_p A_f \rightarrow uA_B L_B = u_p A_f L_B \rightarrow uV_B = u_p V_f \rightarrow u = u_p \frac{V_f}{V_B} \rightarrow u = u_p \varepsilon_B$$

$$u < u_p$$



La porosidad se supone una propiedad isotrópica (es decir, la misma en todas las direcciones)

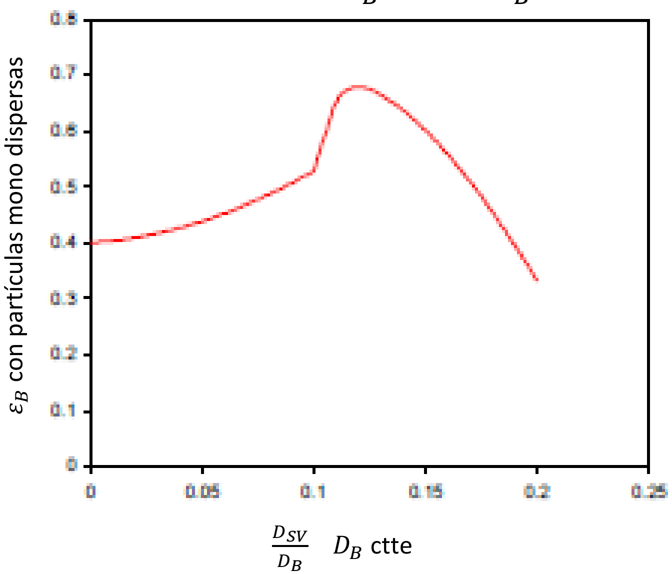
Lechos fijos o empacados, tipo de partícula y porosidad

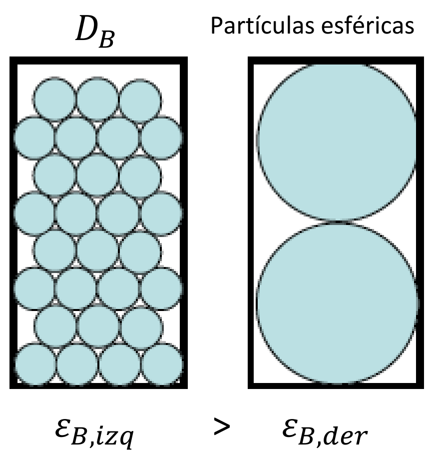
Sistema monodisperso (único tamaño): correlación de ε_B con D_{SV} y D_B (D_B: diámetro del lecho)

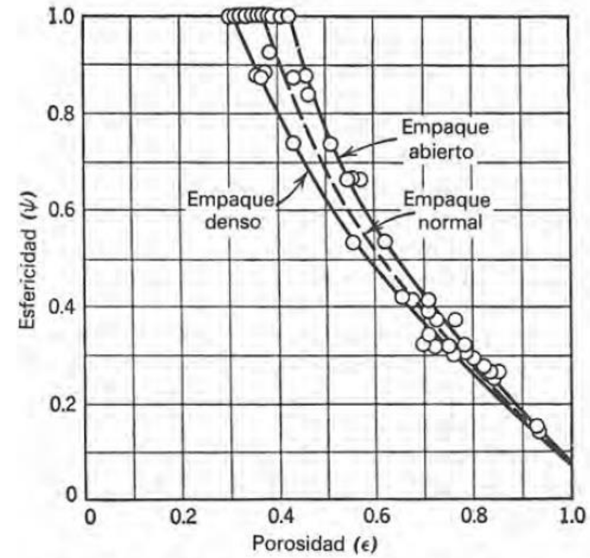
$$\varepsilon_B = 0{,}4 + 0{,}05\left(\frac{D_{SV}}{D_B}\right) + 0{,}412\left(\frac{D_{SV}}{D_B}\right)^2 \quad \frac{D_{SV}}{D_B} \le 0{,}5$$

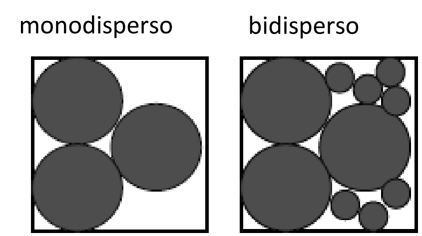
$$\varepsilon_B = 0{,}528 + 2{,}464\left(\frac{D_{SV}}{D_B} - 0{,}5\right) \quad 0{,}5 \le \frac{D_{SV}}{D_B} \le 0{,}536$$

$$\varepsilon_B = 1 - 0{,}667\left(\frac{D_{SV}}{D_B}\right)^3 \left[2\left(\frac{D_{SV}}{D_B}\right) - 1\right]^{0{,}5} \quad \frac{D_{SV}}{D_B} > 0{,}536$$









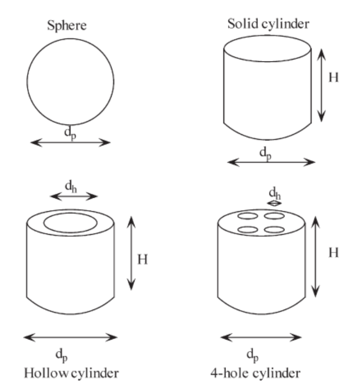
La porosidad del lecho es mayor cuando se utilizan partículas de igual tamaño.

Lecho relleno con partículas mono dispersas y esféricas: a partir de un óptimo, a mayor $\frac{D_{SV}}{D_B}$, la porosidad es menor.

Particulate Science and Technology, 23: 169–177, 2005
Copyright © Taylor & Francis Inc.
ISSN: 0272-6351 print/1548-0046 online
DOI: 10.1080/02726350590922242
Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Enhanced Voidage Correlations for Packed Beds of Various Particle Shapes and Sizes

F. BENYAHIA

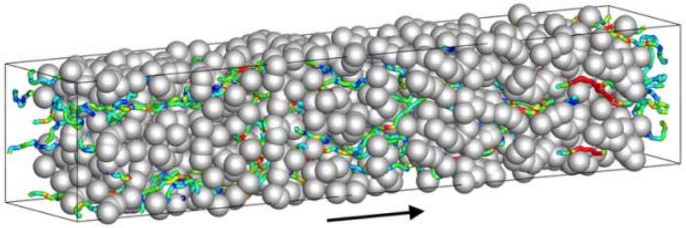


Lechos fijos o empacados, modelos de comportamiento

Modelo de partículas discretas

Asume que el lecho empacado consiste en un conjunto de partículas discretas que poseen su propia capa límite durante el flujo. Conceptualmente, este modelo está más cerca de la descripción física del flujo a través del lecho empacado

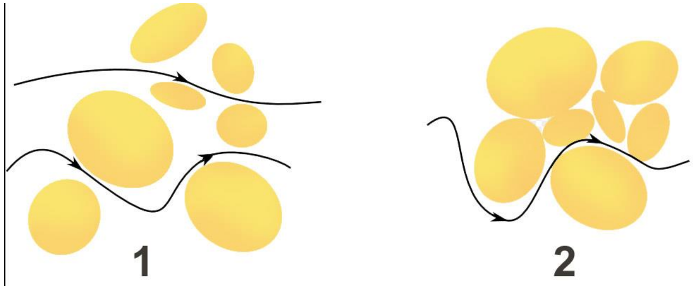
Modelo del flujo restringido modelo de tubo capilar o modelo de canal



Considera que el escurrimiento es a través de canales o capilares. La resistencia al flujo a través del medio poroso está relacionada con el número de partículas presentes, (relacionado al término $1-\varepsilon_B$ o C_B). Cuando el lecho es sólo sólido ($\varepsilon_B = 0$), la resistencia es infinita. Cuando no hay sólidos presentes ($\varepsilon_B = 1$) , y la velocidad intersticial u_p será la misma que la velocidad superficial u.

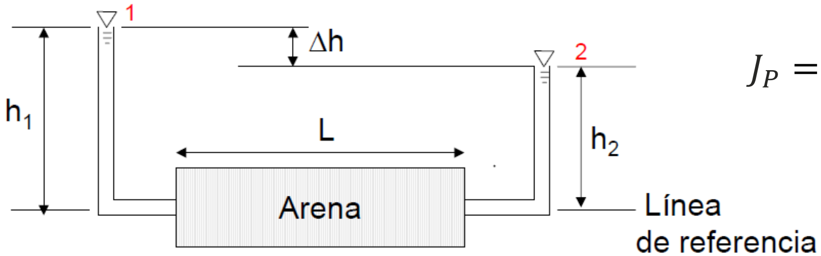
La resistencia al flujo de fluido da lugar a una caída de presión en el fluido, ΔP . Si se considera el gradiente ($-{}^{\Delta P}/_{L_B}$), la presión disminuye en la dirección de la velocidad del fluido.

Esta gradiente de presión está asociada a la irreversibilidad de flujo (arrastre de fricción y de forma); es la resultante de la disipación provocada por la interacción de todas las partículas del lecho con el fluido. Según el número de Reynolds, el flujo será laminar o turbulento y habrá rozamiento de forma, separación y formación de estela.

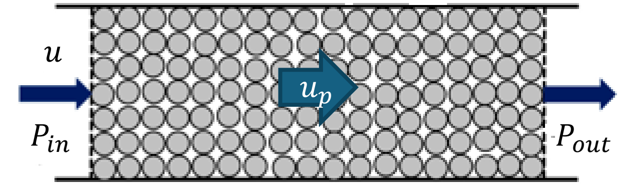


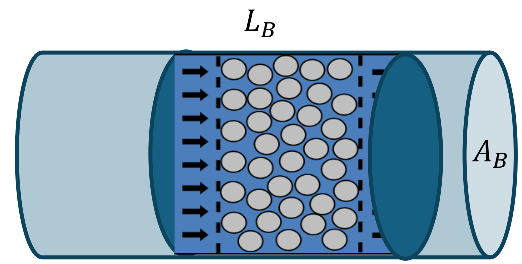
El flujo a través de dos medios porosos: En 1 menor caída de presión que en 2; la irreversibilidad depende del tamaño de los intersticios y la facilidad de comunicación entre ellos.

Lechos fijos o empacados, Ecuación de Darcy (1852) modelo empírico



$$J_P = -\frac{k_{perm}}{\mu}\left[\frac{dP}{dx}\right]$$

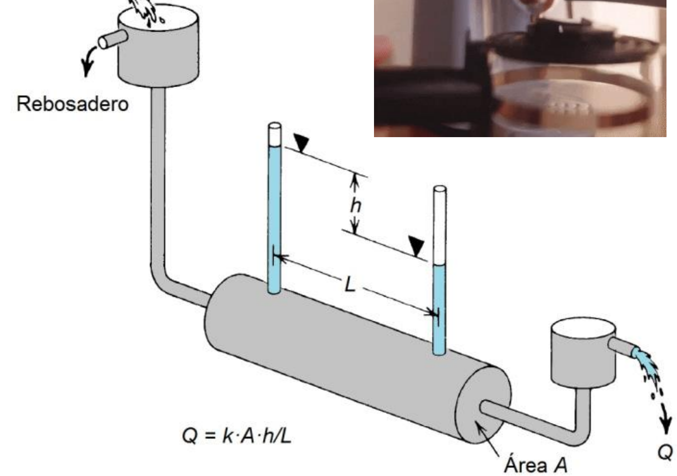




Gradiente Hidráulico   Conductividad Hidráulica $m.s^{-1}$

$$u = \frac{Q_v}{A} = -K\left[\frac{h_2 - h_1}{L_B - 0}\right] = -K\left[\frac{h_2 - h_1}{L_B}\right] = -k_{perm}\frac{\rho g}{\mu}\left[\frac{h_2 - h_1}{L_B}\right] = -\frac{k_{perm}}{\mu}\left[\frac{P_2 - P_1}{L_B}\right]$$

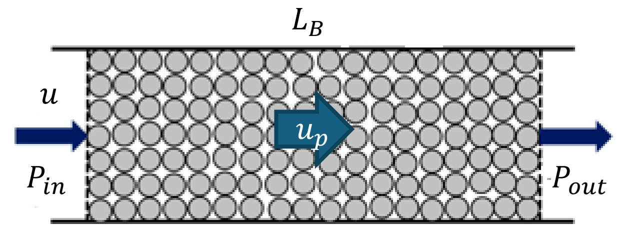
La velocidad superficial (o caudal, si considera el área de flujo, libre de sólido) es proporcional a la caída de presión que experimenta el fluido al atravesar el lecho e inversamente proporcional a la longitud de su trayectoria; esto es, proporcional al gradiente hidráulico. $K\ m.s^{-1}$ es la conductividad hidráulica. $k_{perm}\ m^2$es la **permeabilidad**; depende de las propiedades físicas del lecho y del fluido que circula a través éste.



La unidad de la permeabilidad es el Darcy: se define como la permeabilidad de un medio poroso al flujo viscoso para el paso de 1 ml.s^{-1}.cm^{-2} de un líquido con una viscosidad de 1 cP, bajo una caída de presión de 1 bar.cm^{-1}.

Lechos fijos o empacados, evaluación del diámetro hidráulico de canal $D_{h,canal}$

Para una partícula del lecho poroso con una superficie externa S_p y volumen V_p, $D_{SV} = 6V_p/S_p = \psi D_V$.



Canales no circulares; diámetro hidráulico $D_h = \frac{4A_{canal}}{P_{m,canal}}$

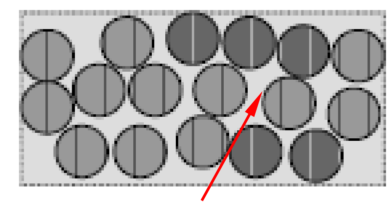
$$D_{h,canal} = \frac{4(A_{canal}L_B)}{P_{m,canal}\,L_B} = \frac{4 * Volumen\ hueco\ del\ lecho}{Área\ superficial\ humeda\ de\ particulas}$$

$$Área\ superficial\ humeda\ de\ particulas = nro\ de\ particulas * área\ superficial\ de\ una\ particula$$

$\varepsilon_B = \frac{V_f}{V_B}$ por lo que $(1-\varepsilon_B) = \frac{V_p}{V_B}$

$$Área\ superficial\ humeda\ de\ particulas = \frac{A_B L_B(1-\varepsilon_B)}{\pi D_{SV}^3/6} * \pi D_{SV}^2 = 6\frac{A_B L_B(1-\varepsilon_B)}{D_{SV}}$$

$$Volumen\ hueco\ del\ lecho = A_B L_B \varepsilon_B$$

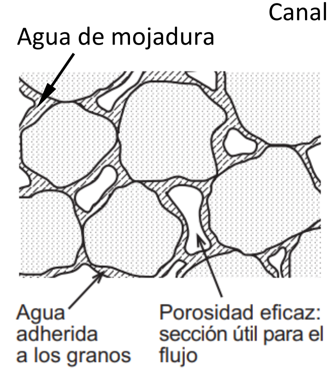


Canal no circular $D_{h,canal}$

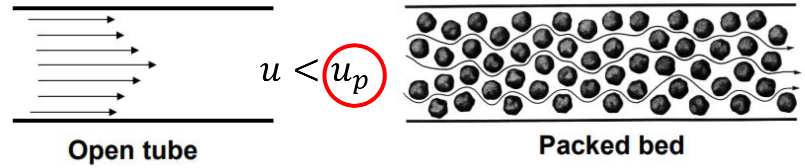
V_p volumen total ocupado por partículas

$$D_{h,canal} = \frac{4}{6}\frac{A_B L\,\varepsilon_B}{A_B L(1-\varepsilon_B)} D_{SV}$$

$$\boxed{D_{h,canal} = \frac{4}{6}\frac{\varepsilon_B}{(1-\varepsilon_B)} D_{SV}}$$



Lechos fijos o empacados, definición del número de Reynolds modificado Re_m



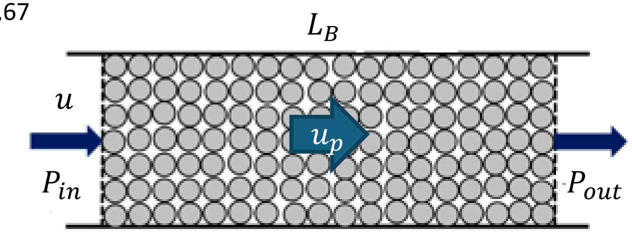
$$u = u_p \varepsilon_B$$

$$D_{h,canal} = \frac{4}{6}\frac{\varepsilon_B}{(1-\varepsilon_B)} D_{SV}$$

El número de Reynolds $Re = \frac{D_{h,canal}\,\rho\, u_p}{\mu}$ ρ y μ son la densidad y viscosidad del fluido

Kozeny elimina el termino 0,67

Se define número de Reynolds modificado $Re_m = \frac{4}{6}\frac{\varepsilon_B}{(1-\varepsilon_B)} D_{SV} \frac{u}{\varepsilon_B}\frac{\rho}{\mu}$



$$\boxed{Re_m = \frac{D_{SV}\,\rho u}{(1-\varepsilon_B)\mu}}$$

$Re_m > 1000$ es indicación de Régimen turbulento

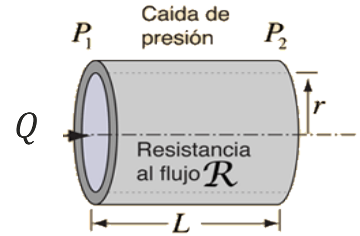
Lechos fijos o empacados, irreversibilidad en lecho fijo o caída de presión, Ecuación de Kozeny - Carman

$\Delta P_L = k\frac{\mu\,\bar{v}L}{D^2}$ ecuación de Hagen-Poiseuille en régimen laminar (para ductos circulares $k = 32$)


Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen


Jean Leonard Marie Poiseuille

La derivación asume que el flujo en un medio poroso se puede representar como el flujo a través de múltiples canales o capilares



$k = \emptyset(\varepsilon_B) \approx 150 - 180$

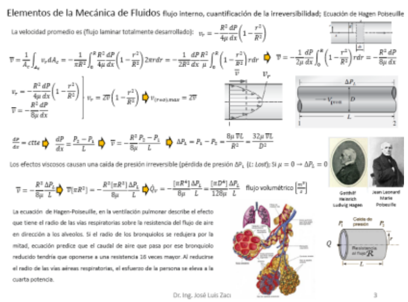
$$\Delta P_L = k\frac{\mu L_B u_p}{D_h^2} = k\mu L_B \frac{1}{\left(\frac{\varepsilon_B}{(1-\varepsilon_B)}D_{SV}\right)^2}\frac{u}{\varepsilon_B} \rightarrow \frac{\Delta P_L}{L_B} = k\mu\left[\frac{(1-\varepsilon_B)^2}{{\varepsilon_B}^3}\frac{1}{D_{SV}^2}\right]u$$

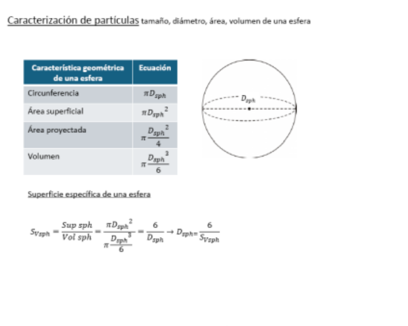
Ecuación de Kozeny – Carman $Re_m \leq 2$

$$D_{SV} = \frac{6}{S_V}$$

$$\frac{180}{6^2}$$

$$\frac{\Delta P_L}{L_B} = k\mu\left[\frac{(1-\varepsilon_B)^2}{{\varepsilon_B}^3}\frac{S_V^2}{6^2}\right]u \rightarrow \frac{\Delta P_L}{L_B} = \frac{k}{6^2}\mu\left[\frac{(1-\varepsilon_B)^2 S_V^2}{{\varepsilon_B}^3}\right]u \rightarrow \frac{\Delta P_L}{L_B} = 5\mu\left[\frac{(1-\varepsilon_B)^2 S_V^2}{{\varepsilon_B}^3}\right]u$$





Relación entre las ecuaciones de Darcy y Koseny - Carman

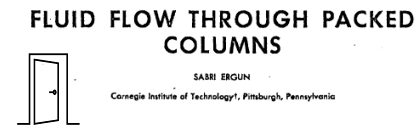
Resistencia al flujo del fluido

$$\frac{\Delta P_L}{L_B} = \mu\left[k\frac{(1-\varepsilon_B)^2}{{\varepsilon_B}^3}\frac{1}{D_{SV}^2}\right]u \rightarrow \frac{\Delta P_L}{L_B} = \frac{u}{\frac{1}{\mu}\left[\frac{{\varepsilon_B}^3 D_{SV}^2}{k(1-\varepsilon_B)^2}\right]} \rightarrow \frac{1}{\mu}\left[\frac{{\varepsilon_B}^3 D_{SV}^2}{k(1-\varepsilon_B)^2}\right]\frac{\Delta P_L}{L_B} = u$$

$$\frac{1}{\mu}k_{perm}\frac{\Delta P_L}{L_B} = u$$ ecuación de Darcy

Lechos fijos o empacados, irreversibilidad en lecho fijo, caída de presión, Ecuación de Ergun, factor de fricción

$$\frac{\Delta P_L}{L_B} = 150\,\frac{\mu}{D_{SV}^2}\frac{(1-\varepsilon_B)^2}{{\varepsilon_B}^3}u + 1{,}75\,\frac{(1-\varepsilon_B)}{{\varepsilon_B}^3}\frac{\rho}{D_{SV}}u^2 = 150\,\frac{\mu}{\psi^2 D_V^2}\frac{(1-\varepsilon_B)^2}{{\varepsilon_B}^3}u + 1{,}75\,\frac{(1-\varepsilon_B)}{{\varepsilon_B}^3}\frac{\rho}{\psi D_V}u^2$$


FLUID FLOW THROUGH PACKED COLUMNS

SABRI ERGUN

Carnegie Institute of Technology†, Pittsburgh, Pennsylvania

Ecuación de Ergun (1952)

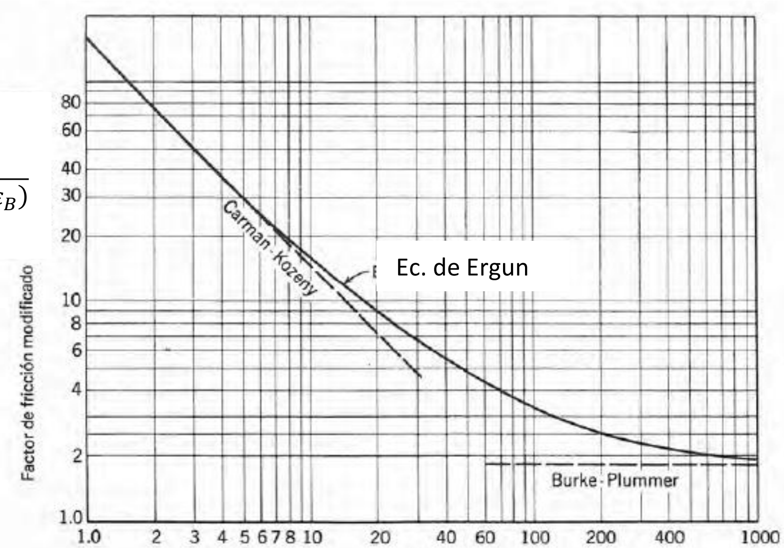
Se define factor de fricción para lechos empacados $\boxed{Re_m = \frac{D_{SV}\rho u}{(1-\varepsilon_B)\mu} = \frac{Re_p}{(1-\varepsilon_B)}}$

$$f_{lp} = \frac{\Delta P_L}{L_B}\frac{D_{SV}}{\rho u^2}\frac{{\varepsilon_B}^3}{(1-\varepsilon_B)} = \frac{150}{Re_m} + 1{,}75$$

$Re_m < 2$ $f_{lp} = \frac{150}{Re_m}$ Ecuación de **Kozeny** – Carman

$Re_m \geq 1000$ $f_{lp} = 1{,}75$ Ecuación de Burke - Plummer

$$f_{lp} = \frac{\Delta P_L}{L_B}\frac{D_{SV}}{\rho u^2}\frac{{\varepsilon_B}^3}{(1-\varepsilon_B)}$$



$$Re_m = \frac{D_{SV}u\rho}{(1-\varepsilon_B)\mu} = \frac{Re_p}{(1-\varepsilon_B)}$$


Powder Technology 283 (2015) 488–504

Contents lists available at ScienceDirect

Powder Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/powtec

A revisit of pressure drop-flow rate correlations for packed beds of spheres

Esra Erdim [a,1], Ömer Akgiray [b,*], İbrahim Demir [a]

Lechos fijos o empacados, caída de presión, ecuación de Ergun

Ecuación de Ergun (1952) $$\frac{\Delta P_L}{L_B} = 150\frac{\mu}{D_{SV}^2}\frac{(1-\varepsilon_B)^2}{{\varepsilon_B}^3}u + 1{,}75\frac{(1-\varepsilon_B)}{{\varepsilon_B}^3}\frac{\rho}{D_{SV}}u^2 = 150\frac{\mu}{\psi^2 D_V^2}\frac{(1-\varepsilon_B)^2}{{\varepsilon_B}^3}u + 1{,}75\frac{(1-\varepsilon_B)}{{\varepsilon_B}^3}\frac{\rho}{\psi D_V}u^2$$

El primer término del lado derecho de la ecuación de Ergun representa el componente laminar al gradiente de presión. El segundo término corresponde al régimen turbulento. De manera que, en flujo laminar el gradiente de presión aumenta de manera lineal con la velocidad. En cambio, en el régimen turbulento, la caída de presión aumenta de manera cuadrática y es independiente de la viscosidad del fluido. Las correlaciones son usualmente aplicables a $\psi > 0{,}6$

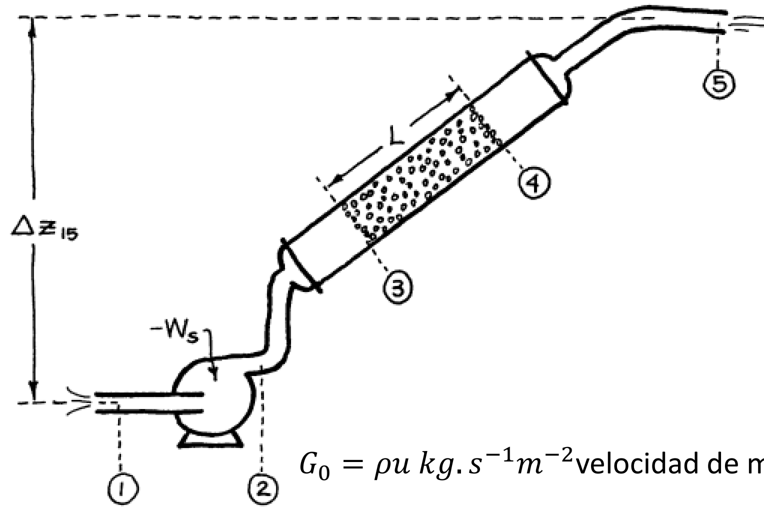
Dos lechos, uno relleno con partículas esféricas y otro con irregulares, tendrán igual caída de presión si se conserva el área total superficial y la misma fracción de vacíos (que es lo mismo que mantener el volumen de sólidos si la geometría del lecho está definida). Por esta razón el diámetro equivalente que debe usarse es $D_{SV} = \psi D_V$.

Lechos fijos o empacados, irreversibilidad, ecuación de Ergun, ecuación de Bernoulli, dimensionamiento

$$\frac{\Delta P_L}{L_B} = 150\frac{\mu}{\psi^2 D_V^2}\frac{(1-\varepsilon_B)^2}{{\varepsilon_B}^3}u + 1{,}75\frac{(1-\varepsilon_B)}{{\varepsilon_B}^3}\frac{\rho}{\psi D_V}u^2$$

$$\frac{\Delta P_L}{\rho} = 150\frac{\mu L_B}{\psi^2 D_V^2}\frac{(1-\varepsilon_B)^2}{{\varepsilon_B}^3\rho}u + 1{,}75\frac{(1-\varepsilon_B)}{{\varepsilon_B}^3}\frac{1}{\psi D_V}L_B u^2 = e_{L,pb}\ \frac{J}{kg}$$

Irreversibilidad para un lecho empacado; (*pb*: *packed bed*)



$$w_s = \int_1^5 \frac{dP}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta(u^2)}{2} + \sum e_L\ J.kg^{-1}$$

Flujo incompresible

$$0 = \frac{\Delta P}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta(u^2)}{2} + e_{L,pipe} + e_{L,pb} - w_s$$

Flujo compresible

$G_0 = \rho u\ kg.s^{-1}m^{-2}$velocidad de masa superficial

$$0 = \int_1^5 \frac{dP}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta(u^2)}{2} + e_{L,pipe} + e_{L,pb} - w_s \rightarrow 0 = \int_3^4 \frac{dP}{\rho} + e_{L,pb} \rightarrow \int_3^4 \frac{dP}{\rho u^2} + \frac{e_{L,pb}}{u^2} = 0 \rightarrow \int_3^4 \frac{\rho dP}{{G_0}^2} + \frac{e_{L,pb}}{u^2} = 0$$

$$\int_3^4 \frac{\rho dP}{{G_0}^2} + \frac{e_{L,pb}}{u^2} = 0 \rightarrow \int_3^4 \frac{\rho dP}{{G_0}^2} + 150\frac{\mu L_B}{\psi^2 D_V^2}\frac{(1-\varepsilon_B)^2}{{\varepsilon_B}^3 G_0} + 1{,}75\frac{(1-\varepsilon_B)}{{\varepsilon_B}^3}\frac{1}{\psi D_V}L_B = 0$$

Ecuación de dimensionamiento $\dot{m} = \frac{\pi D_B^2}{4}\rho u = \frac{\pi D_B^2}{4}G_0 \rightarrow D_B = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi G_0}} \quad L_B = \frac{m_s}{A_B\rho_p(1-\varepsilon_B)}$

$\dot{m}$: $k\dot{g}.hr^{-1}$de fluido

m_s: kg_s en el lecho