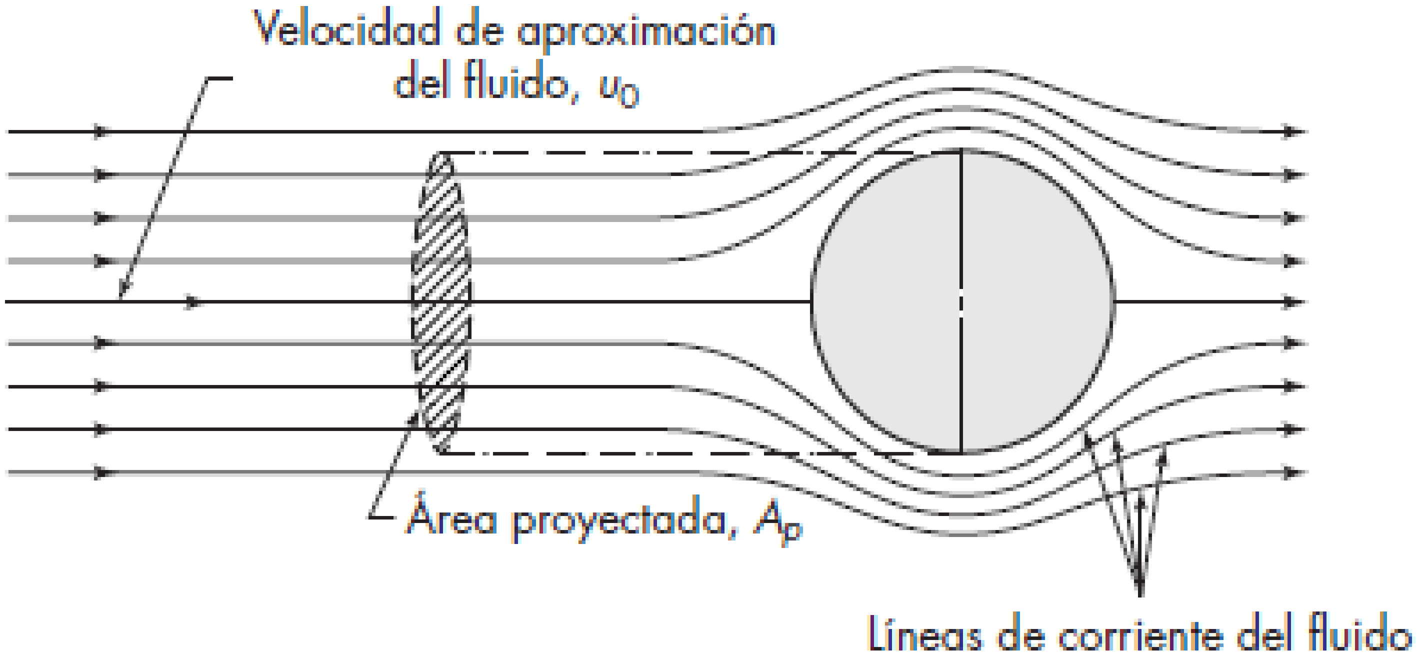
Lechos empacados, Fluidización

El fluido ejerce una fuerza sobre el sólido en la dirección de flujo, conocida como arrastre o rozamiento. Existen una gran cantidad de factores que afectan a los rozamientos de pared y de forma en cuerpos sumergidos, de manera que no se pueden predecir.



$$C_D \equiv \frac{F_D/A_P}{\rho v_0^2/2}$$

Coeficiente de arrastre

$$C_D = \frac{F_D/_{A_P}}{\frac{\rho v_0^2}{2}}$$

Reynolds para una partícula en un fluido

$$Re_P = \frac{G_0 D_P}{\mu}$$

D_P= longitud característica
v_0=velocidad de la corriente
G_0=ρv_0

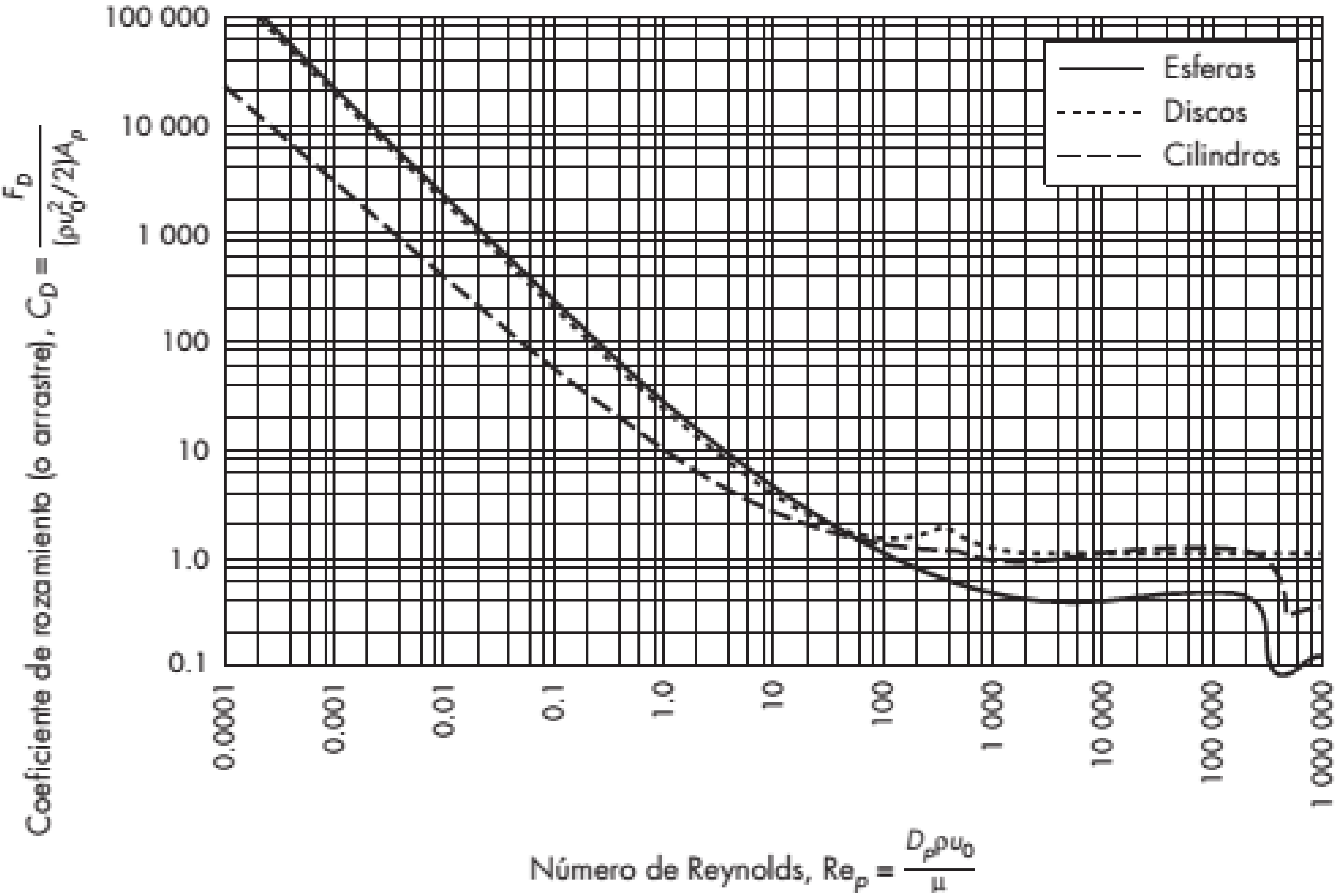
Ley de Stokes (esferas, bajos Re, Re<1)

$$F_D = 3\pi\mu v_0 D_P$$

$$C_D = \frac{24}{Re_P}$$

El efecto de pared influye en la ley de Stokes.

Es útil en cálculo de resistencias de partículas pequeñas, como polvo o niebla, en líquidos viscosos o gases, o de partículas grandes en líquidos muy viscosos.



100 000
10 000
1 000
100
10
1.0
0.1
Esferas
Discos
Cilindros
Coeficiente de rozamiento (o arrastre), $C_D = \frac{F_D}{(\rho u_0^2/2)A_p}$
0.0001
0.001
0.01
0.1
1.0
10
100
1 000
10 000
100 000
1 000 000
Número de Reynolds, $Re_p = \frac{D_p \rho u_0}{\mu}$

Flujo en lechos sólidos

La resistencia al flujo de un fluido a través de los huecos de un lecho sólido se da como resultado del rozamiento de todas las partículas del lecho con el fluido. No hay una transición brusca de régimen laminar a turbulento.

Flujo en lechos con Re≤1:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\overline{V_0}\mu}{\Phi_s^2 D_P^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$$

Φ_s es la esfericidad (relación área superficial/volumen de partícula)

V_0 es la velocidad superficial o con el lecho vacío

ε es la porosidad o fracción hueca del lecho

Ecuación de Kozeny-Carman

TABLA 7.1

Esfericidad de materiales diversos†

Material	Esfericidad	Material	Esfericidad
Esferas, cubos, cilindros		Arena de Ottawa	0.95
cortos ($L = D_p$)	1.0	Arena redonda	0.83
Anillos Raschig ($L = D_p$)		Polvo de carbón	0.73
$L = D_o$, $D_i = 0.5D_o$	0.58‡	Arena de roca	0.65
$L = D_o$, $D_i = 0.75D_o$	0.33‡	Vidrios triturados	0.65
Silletas Berl	0.3	Hojuelas de mica	0.28

TABLA 7.2

Fracciones huecas para empaques apilados o rellenos al azar

D_p/D_t	ε para esferas	ε para cilindros
~0	0.34	0.34
0.1	0.38	0.35
0.2	0.42	0.39
0.3	0.46	0.45
0.4	0.50	0.53
0.5	0.55	0.60

Para números de Reynolds $Re_p>1000$, se usa la ecuación de Burke-Plummer

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{1.75\rho\bar{V}_0^2}{\Phi_s\ D_P}\,\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}$$

La ecuación de Ergun abarca un amplio intervalo de velocidades, para muchos tipos de partículas.

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\overline{V_0}\mu}{\Phi_s^2 D_P^2}\,\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1.75\rho\bar{V}_0^2}{\Phi_s\ D_P}\,\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}$$

Para anillos Raschig y silletas Berl, la ecuación de Ergun predice resultados menores a los obtenidos. Se debe multiplicar esta ecuación por un factor de corrección dado por proveedor

Para mezclas de partículas de diferente tamaño, se debe usar un diámetro corregido.

$$\overline{D}_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_i \overline{D}_{pi}^3}{\sum_{i=1}^{n} N_i \overline{D}_{pi}^2}$$

$$\overline{D}_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \left(x_i/\overline{D}_{pi}\right)}$$

N = número de partículas
x = fracción en masa

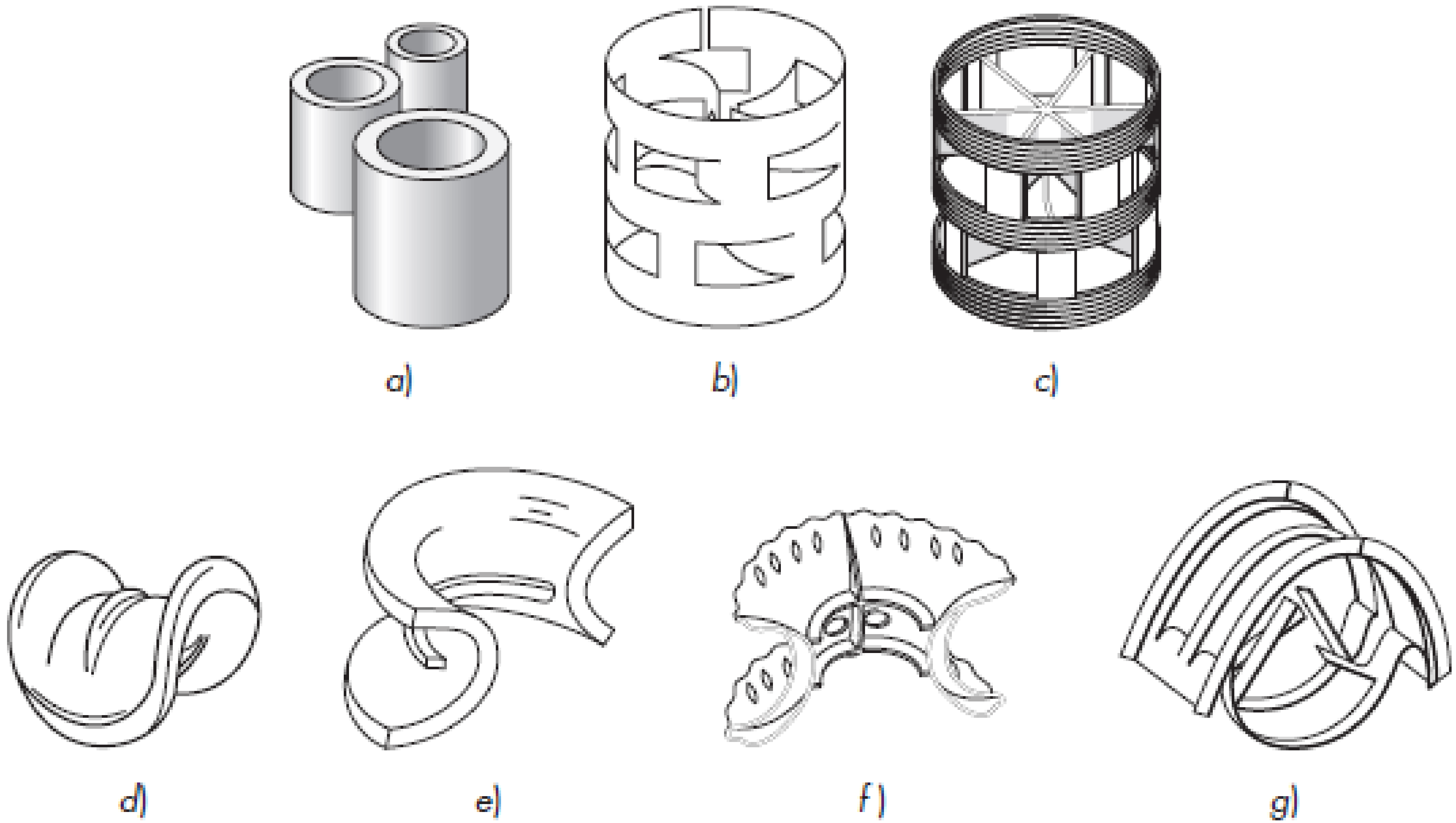


FIGURA 18.2

Empaques comunes en torres: *a*) anillos Raschig; *b*) anillo matálico Pall; *c*) anillo plástico Pall; *d*) montura Berl; *e*) montura de cerámica Intalox; *f*) montura plástica Super Intalox; *g*) montura metálica Intalox.

Movimiento de partículas en fluidos

Las partículas alcanzan una velocidad constante al moverse en un fluido gracias al arrastre creciente, lo que se conoce como velocidad terminal.

$$v_t = \sqrt{\frac{2g(\rho_p - \rho)m}{A_p \rho_p C_D \rho}} = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho)D_p}{3C_D \rho}}$$

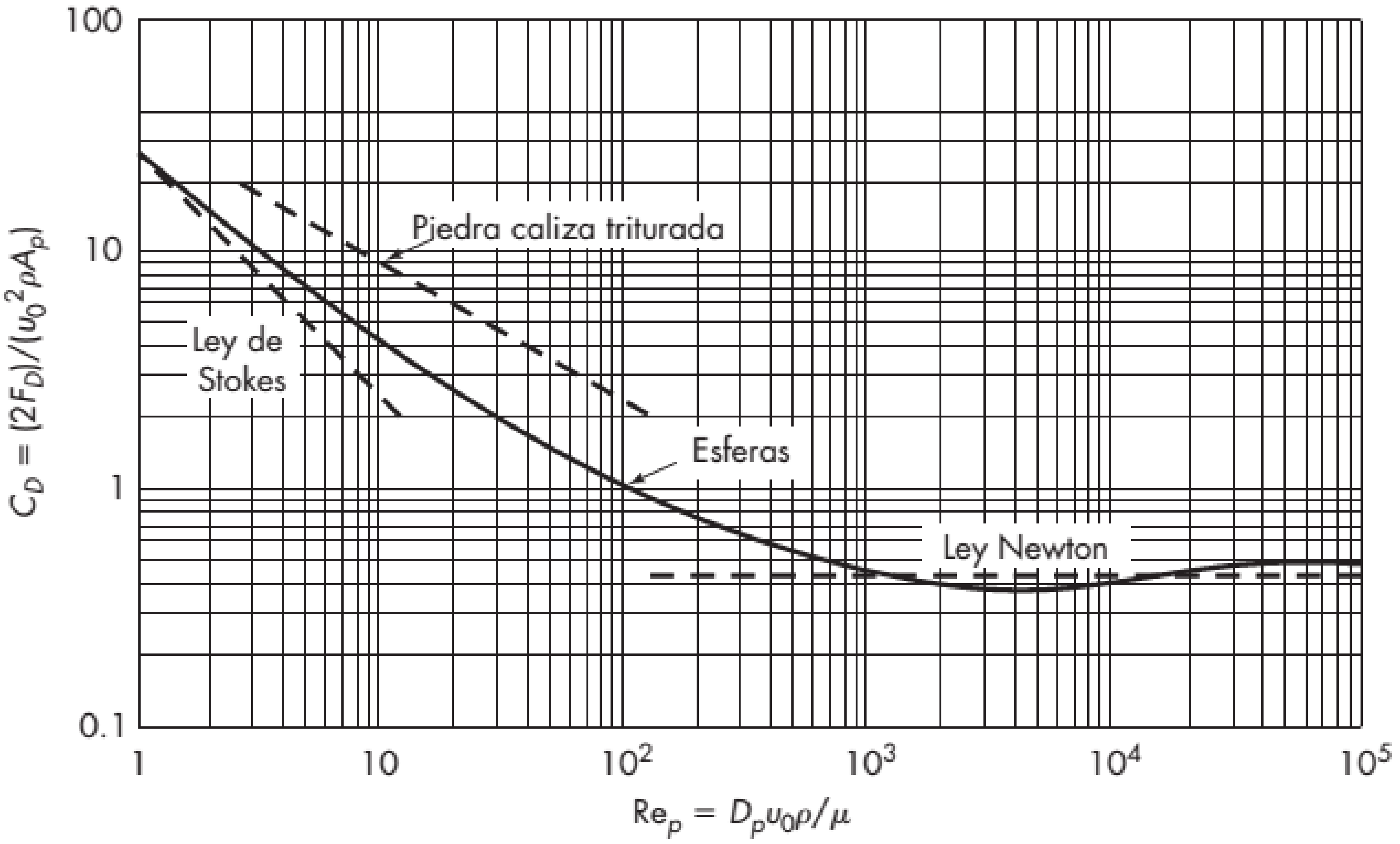
Asentamiento de esferas por gravedad

Para el movimiento centrífugo, la velocidad terminal es:

$$v_t = \omega \sqrt{\frac{2r(\rho_p - \rho)m}{A_p \rho_p C_D \rho}}$$

m es la masa de la partícula, ω es la velocidad angular (rad/s) y r es el radio de la trayectoria de la partícula.

La velocidad terminal se obtiene por ensayo y error, proponiendo un C_D inicial.



100
10
1
0.1
1
10
10^2
10^3
10^4
10^5
$C_D = (2F_D)/(u_0^2 \rho A_p)$
$Re_p = D_p u_0 \rho / \mu$
Piedra caliza triturada
Ley de Stokes
Esferas
Ley Newton

Para bajos números de Reynolds

$$C_D = \frac{24}{Re_P}$$

$$F_D = 3\pi\mu v_t D_P$$

$$v_t = \frac{g D_P^2(\rho_P - \rho)}{18\mu}$$

Ley de Stokes; Re<1.0

Para Re= 1.0, C_D=26.5/Re_P.

En un campo centrífugo:

$$v_t = \frac{r\omega^2 D_P^2(\rho_P - \rho)}{18\mu}$$

Para 1000<Re_P<200 000:

C_D=0.44

$$F_D = 0.055\pi D_P^2 v_t^2 \rho$$

$$v_t = 1.75\sqrt{\frac{g D_P(\rho_P - \rho)}{\rho}}$$

Ley de Newton; Partículas relativamente grandes en fluidos de baja viscosidad.

$$Re_P = \frac{D_P^3 g\rho(\rho_P - \rho)}{18\mu^2}$$

Para el intervalo de la Ley de Stokes

Se suele usar un criterio K:

$$K = D_P \left[\frac{g\rho(\rho_P - \rho)}{\mu^2}\right]^{\frac{1}{3}}$$

Si K<2.6, se aplica la ley de Stokes; si 68.9<K<2360, se aplica la ley de Newton; si K>2360 o 2.6<K<68.9, se usa C_D por prueba y error de la figura presentada con la ecuación de Stokes.

a) Estime la velocidad terminal para partículas de piedra caliza de 80 a 100 mallas (ρ=2800 kg/m^3) que sedimenta en agua a 30°C. b) ¿Cuál sería la velocidad en un separador centrífugo en el que la aceleración es 50g?

D_p=0.147 mm (malla 100)

D_p=0.175 mm (malla 80)

D_p=0.161 (promedio)

μ=0.801 cP

ρ=995.7 kg/m^3

- **Calcular K**
- **Usar ecuación adecuada para velocidad terminal (con C_D)**
- **Comprobar el Re**
- **Corregir C_D si hay una diferencia importante**

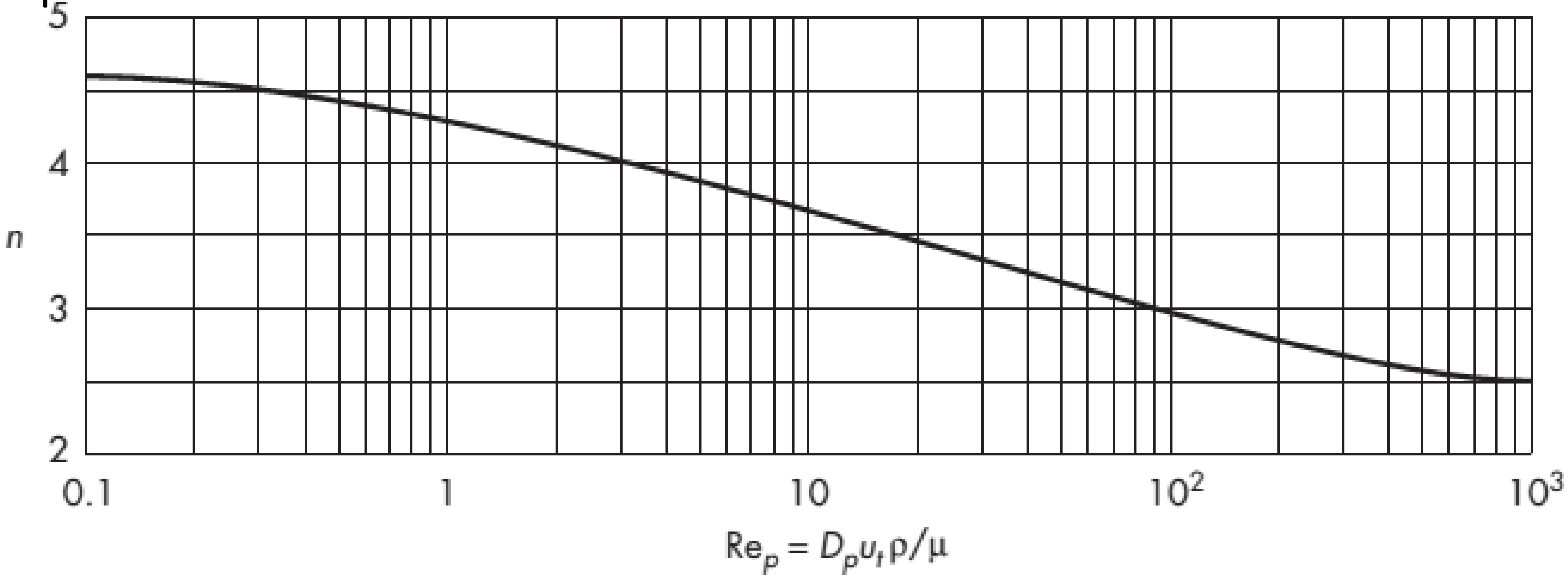
Asentamiento impedido

La concentración de partículas o la presencia de fronteras sólidas afecta el movimiento de cada una de las partículas. Para una suspensión uniforme, la velocidad de asentamiento se obtiene por la relación empírica de Maude y Whitmore.

$$u_s = u_t(\varepsilon)^n$$

ε es la fracción hueca, o bien, la fracción en volumen de la suspensión más fina

Debe usarse esta ecuación con precaución; es preferible contar con datos experimentales.



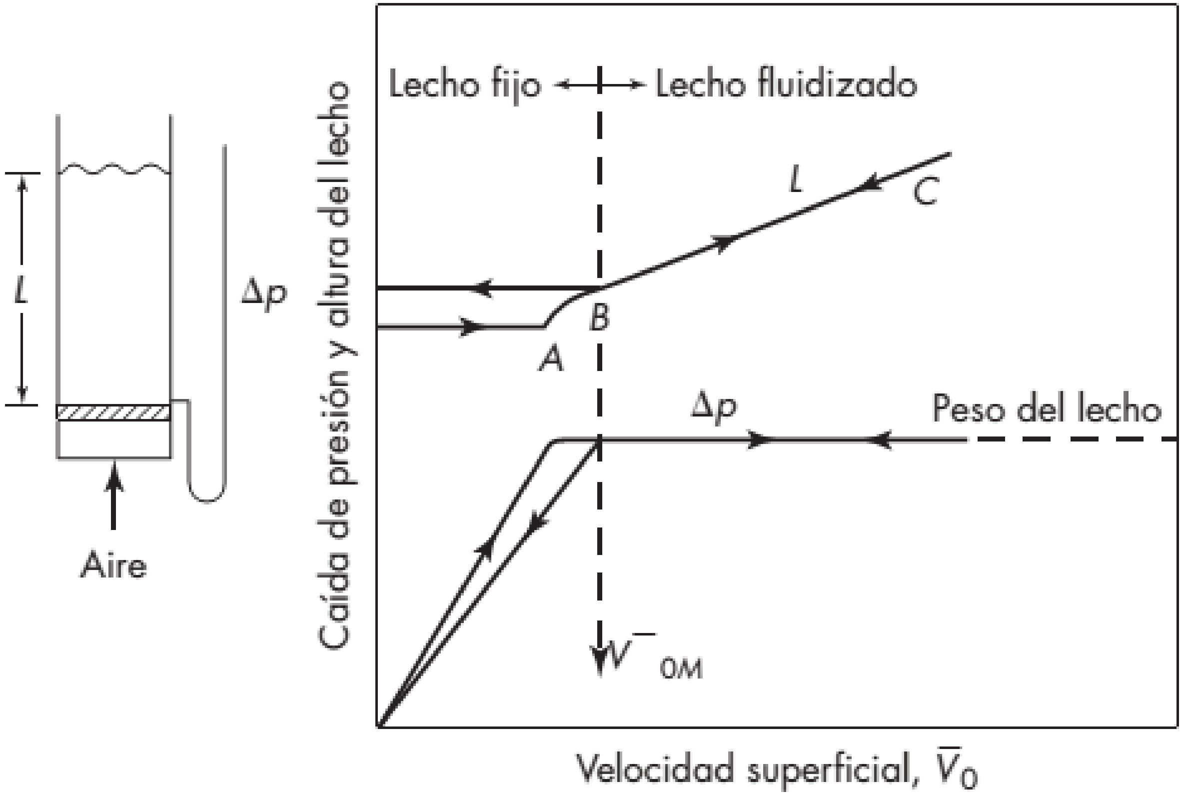
Se asientan por gravedad partículas de esfalerita (sg=4.0) en CCl_4 a 20°C (sg=1.594). El diámetro de las partículas es de 0.1 mm. La fracción en volumen de esfalerita es 0.2. ¿Cuál es la velocidad de asentamiento de las partículas?

μ_{CCl4}=1.03 cP

- Calcular K
- Seleccionar ecuación para u_t
- Calcular Re_P usando u_t
- Obtener n de la figura
- Calcular u_s

Fluidización

Cuando el fluido pasa a muy baja velocidad por el lecho de partículas, éste no se ve perturbado y se puede usar la ecuación de Ergun para encontrar la caída de presión. Al aumentar la velocidad, aumenta la caída de presión y las partículas comenzarán a moverse para quedar suspendidas, haciendo que la suspensión se comporte como un fluido denso.



Para la velocidad mínima de fluidización:

$$\frac{\Delta p}{L} = g(1-\varepsilon)(\rho_P-\rho)$$

Cuando se da la fluidización incipiente, ε es la porosidad mínima ε_m.

$$\frac{\Delta p}{L} = g(1-\varepsilon_m)(\rho_P-\rho)$$

Y a partir de esta se obtiene una ecuación para la velocidad de fluidización mínima.

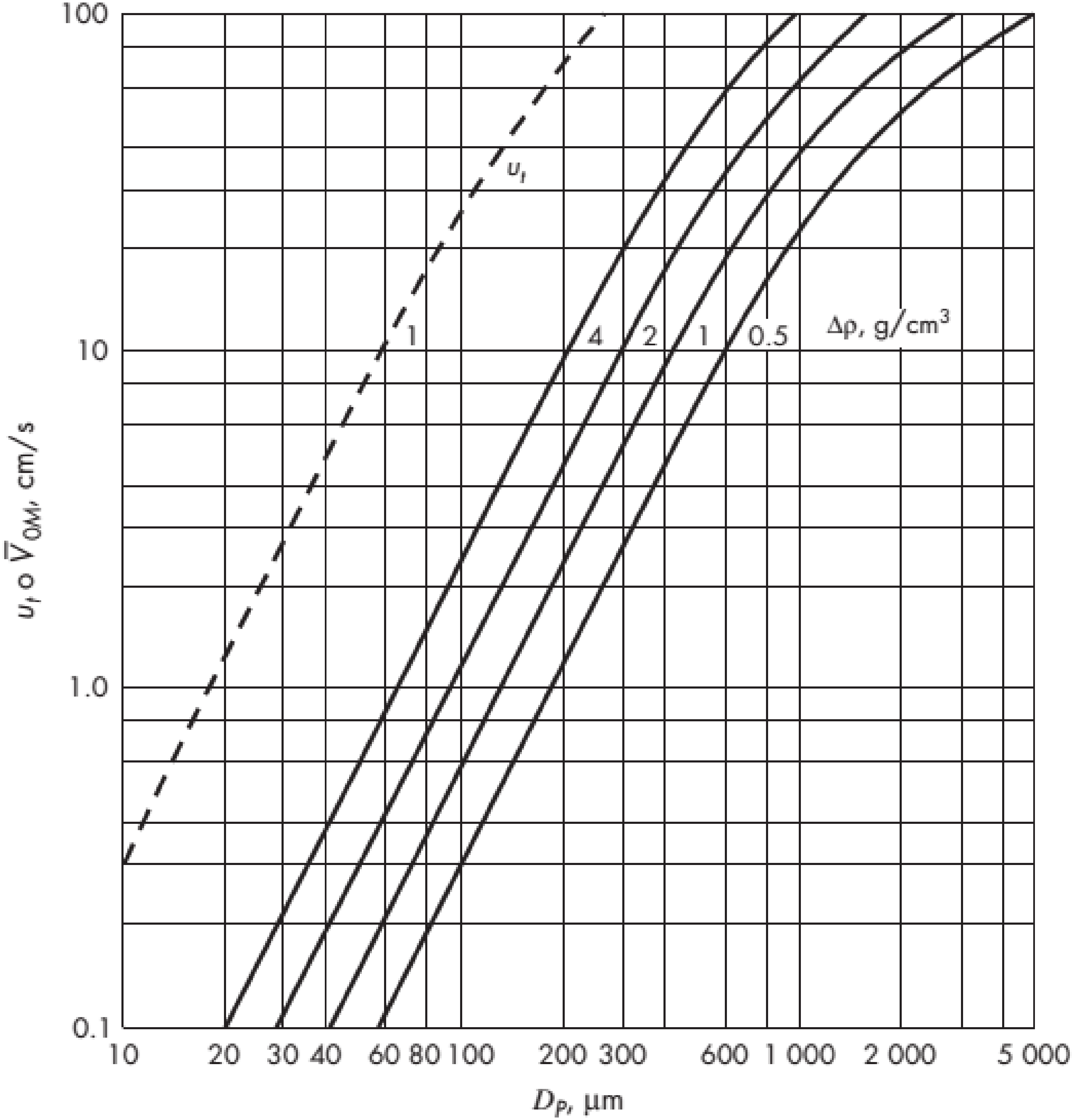
$$\frac{150\mu\overline{V_{om}}}{\Phi_s^2 D_P^2}\,\frac{(1-\varepsilon_m)}{\varepsilon_m^3}+\frac{1.75\rho\overline{V_{om}^2}}{\Phi_s D_P}\,\frac{1}{\varepsilon_m^3} = g(\rho_P-\rho)$$

Para Re<1

$$\bar{V}_{0m} = \frac{g(\rho_P-\rho)}{150\mu}\,\frac{\varepsilon_m^3}{(1-\varepsilon_m)}\Phi_s^2 D_P^2$$

Para Re>1000

$$\bar{V}_{0m} \approx \left[\frac{\Phi_s D_P g(\rho_P-\rho)\varepsilon_m^3}{1.75\rho}\right]^{1/2}$$



100
10
1.0
0.1
u_t o $\overline{V}_{0M}$, cm/s
u_t
1
4
2
1
0.5
Δρ, g/cm³
10
20
30
40
60
80
100
200
300
600
1 000
2 000
5 000
D_P, µm

Expansión de lechos

En la fluidización con partículas, se sigue aplicando la ecuación de Ergun de manera aproximada.

$$\frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} = \frac{150\bar{V}_0\mu}{g(\rho_P - \rho)\Phi_s^2 D_P^2}$$

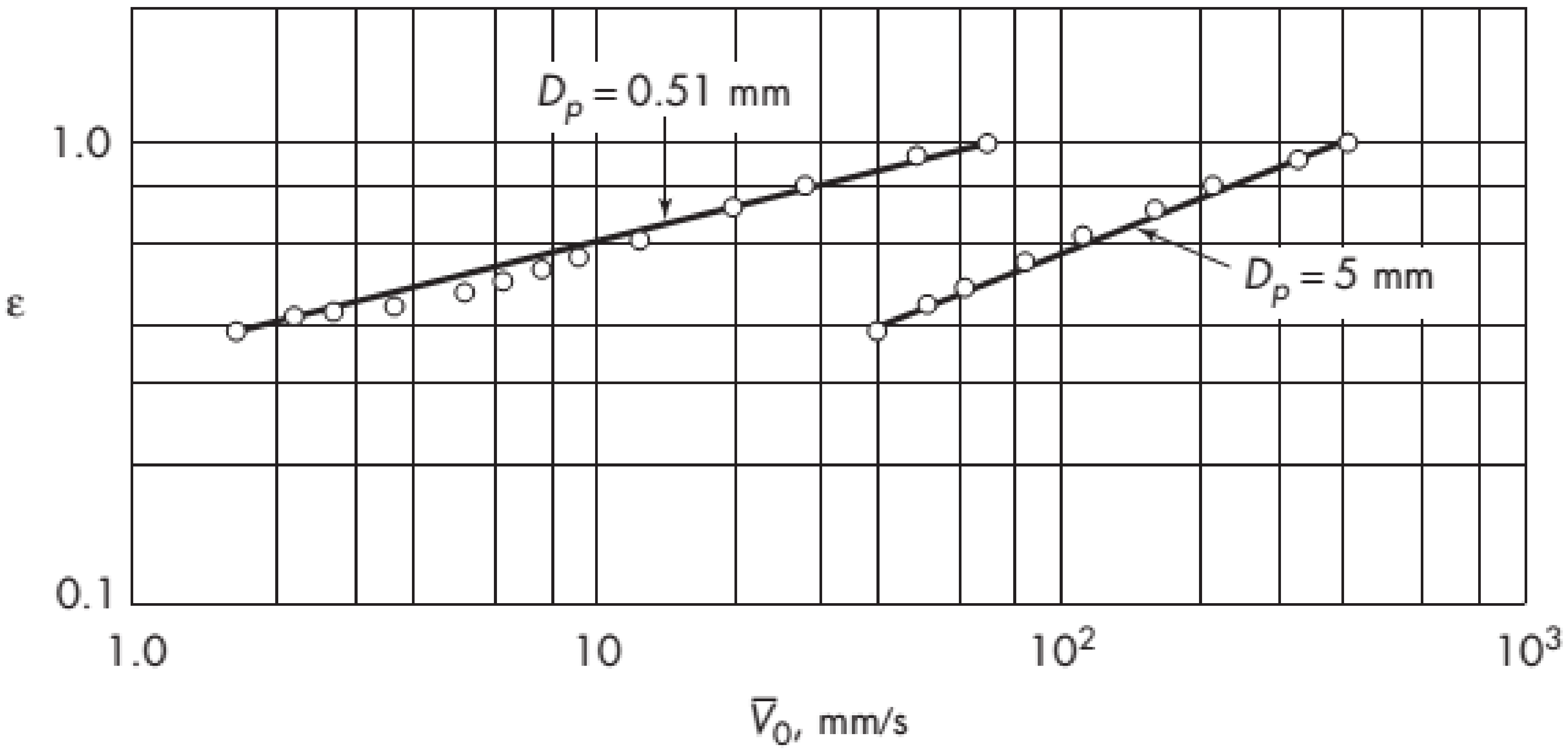
$$L = L_M \frac{1-\varepsilon_m}{1-\varepsilon}$$

Para partículas grandes

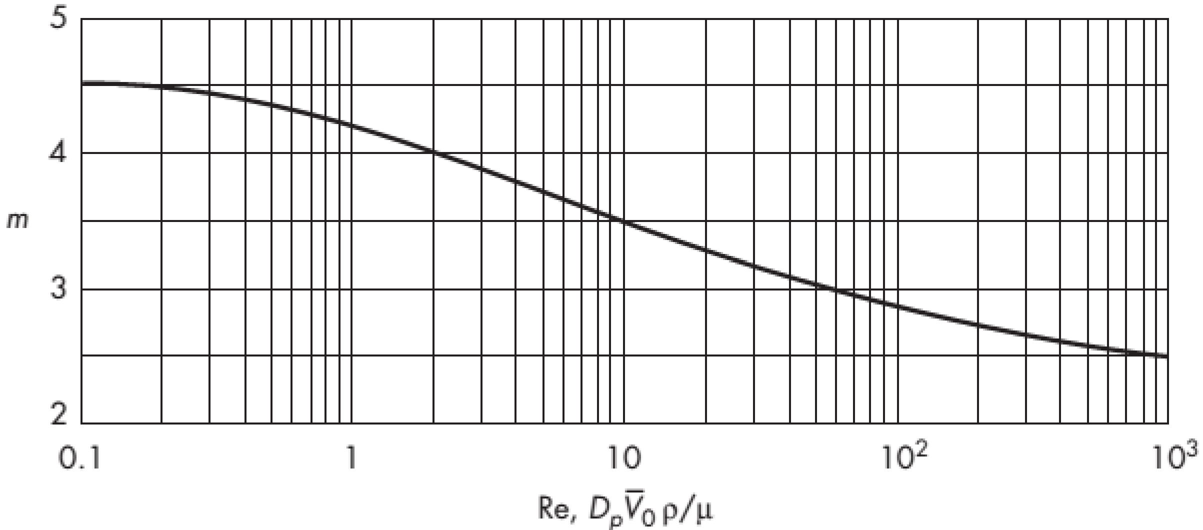
$$\bar{V}_0 = \varepsilon^m$$

O en la forma

$$\frac{\bar{V}_0}{\bar{V}_{0m}} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}\right)^m$$



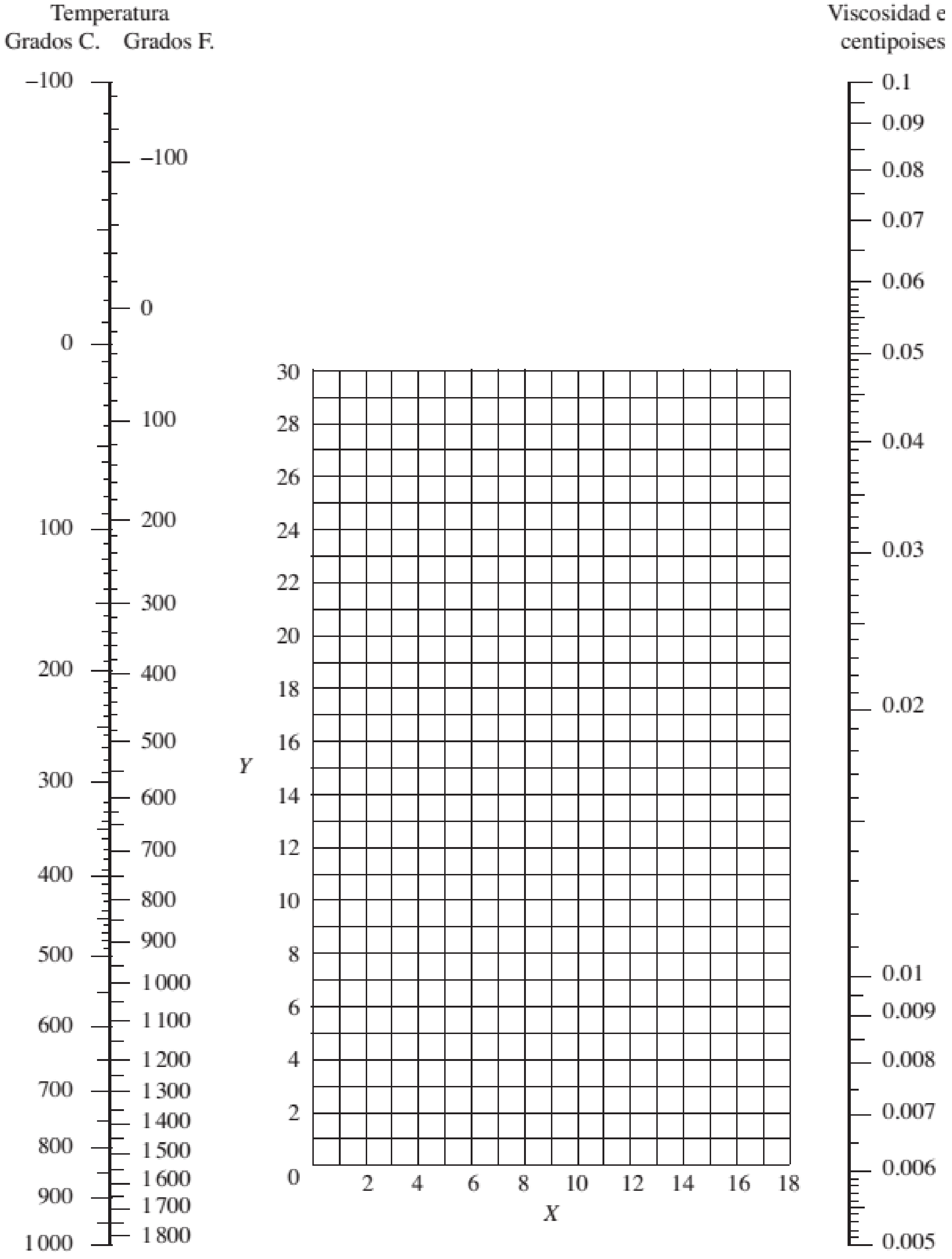
$D_p = 0.51$ mm
$D_p = 5$ mm
1.0
0.1
ε
1.0
10
10^2
10^3
$\overline{V}_0$, mm/s



5
4
3
2
m
0.1
1
10
10^2
10^3
Re, $D_p \overline{V}_0 \rho/\mu$

Un lecho de partículas de intercambio de iones de 8 ft de profundidad se lava con flujo ascendente de agua, con el fin de eliminar la suciedad. Las partículas tienen una densidad de 1.24 g/cm^3 y un tamaño medio de 1.1 mm. ¿Cuál es la velocidad mínima de fluidización si se usa agua a 20°C, y qué velocidad se requiere para expandir el lecho un 25%? Se supone que los lechos tienen partículas esféricas y $\varepsilon_m = 0.40$.

$\mu = 0.01$ P



Viscosidades de gases y vapores a 1 atm; para las coordenadas, véase tabla de la página anterior.