

CAPÍTULO 5

CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS PARTICULADOS SÓLIDO-FLUIDO

5.1.- Caracterización de sólidos granulares

Propiedades primarias

Son las propiedades de la partícula sólida por sí misma y que se pueden medir, al menos en teoría, con independencia del entorno. Ejemplos: densidad, tamaño (d), forma volumen, área superficial, dureza, porosidad interna, conductividad térmica, etc.

Propiedades secundarias

Son las que reflejan el comportamiento o disposición de una partícula respecto al entorno en que se encuentra. Ejemplos: densidad efectiva o aparente (de un conjunto particulado), ángulo de reposo, porosidad externa, velocidad de sedimentación (o de caída libre), conductividad térmica efectiva (de un conjunto particulado), etc.

Usualmente tenemos que tratar el comportamiento de un conjunto de partículas que experimentan un proceso. Lo normal es que todas las partículas sean diferentes, lo que hace necesario un tratamiento estadístico. Ejemplos: el producto de una operación de molienda, el producto de una cristalización.

Se supondrá que la única propiedad que varía es el tamaño y que las otras propiedades son uniformes excepto en cuanto dependen del tamaño. Una excepción de importancia práctica es la extracción de minerales en que los primeros productos de la molienda pueden tener grandes variaciones de densidad, debido a variaciones aleatorias de la composición mineralógica.

El tamaño de una esfera se mide por su diámetro. Para partículas no esféricas, la definición de tamaño requiere de una definición de la forma. Esto significa que se necesitan al menos 2 parámetros para caracterizar una partícula no esférica: una definición de tamaño y un factor de forma.

Definiciones de tamaño

Algunas definiciones comunes de tamaño son las siguientes:

d_v : diámetro de la esfera de igual volumen que la partícula

d_s : diámetro de la esfera de igual área superficial que la partícula

d_{sv} : diámetro de la esfera de igual “superficie específica” que la partícula

$$\text{Superficie específica } a = \frac{S}{V} = \frac{\text{área superficial partícula}}{\text{volumen partícula}} \quad [5.1.1]$$

d_h : diámetro de la esfera de igual velocidad de sedimentación que la partícula (“diámetro hidrodinámico”)

Definiciones de factor de forma

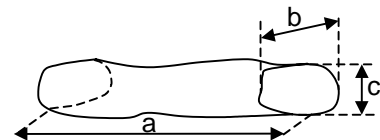
i. Esfericidad ϕ , definida como:

$$\phi = \frac{\text{área superficial de una esfera de igual volumen}}{\text{área superficial de la partícula}} \quad [5.1.2]$$

$$\text{Se demuestra que: } \phi = \frac{6}{a \cdot d_v} \leq 1 \quad [5.1.3]$$

ii. Factor de forma de McNown, definido como:

$$SF = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}} \leq 1 \quad [5.1.4]$$



en que $a > b > c$, son las dimensiones de la partícula según 3 ejes ortogonales.

iii. Factor de forma de Heywood k , que se define como:

$$k \cdot d^3 = \text{volumen de la partícula} \quad [5.1.5]$$

Con d , el diámetro de un círculo de igual área que la mayor sección de la partícula. Se tiene que:

$$k \leq \frac{\pi}{6} \quad [5.1.6]$$

Medición del tamaño

- a) Medición directa con regla, pie de metro o microscopio con reticulado. Este es un método laborioso y poco práctico.
- b) Métodos de sedimentación, que en realidad miden la velocidad de sedimentación, de la cual se deduce el tamaño. Para ciertas condiciones, se pueden medir partículas individuales; comúnmente, se mide la distribución estadística.
- c) Tamizado: es lo más común, pero mide distribución de tamaños (un histograma): se hace pasar la muestra a través de una serie de mallas de abertura decreciente, de modo que la muestra se clasifica en varios intervalos, que atraviesan un tamiz y quedan retenidos en el siguiente. Se pesa el material retenido entre cada 2 mallas.

Hay una tabla que contiene varias normalizaciones de aberturas de malla (**tabla normalizaciones**). Las mallas se designan por un número que representa el número de aberturas por pulgada lineal. Las aberturas sucesivas van en razón geométrica $\sqrt[4]{2}$, pero comúnmente se usan espaciadas según $\sqrt{2}$.

Interpretación del tamizado

Se supone que cada fracción separada por tamizado está formada por partículas cuyo tamaño es igual al promedio de las aberturas de malla que encierran el intervalo. Como la aberturas van en razón geométrica, se acostumbra usar el promedio geométrico:

$$\overline{d_i} = \sqrt{d_{i-1} \cdot d_i} \quad [5.1.7]$$

en que d_i es la abertura (lado del cuadrado). Pero se puede usar el promedio aritmético sin gran error si los tamices son cercanos.

El tamaño así determinado se puede llamar “diámetro de tamizado”, y corresponde al diámetro de una esfera que atraviesa la misma malla que la partícula. Pero no se puede correlacionar con el volumen o área superficial de la partícula a menos que se tenga alguna idea del factor de forma.

5.2.- Distribuciones de frecuencia de tamaños

Distribución estadística de tamaños en una población particulada (granulometría)

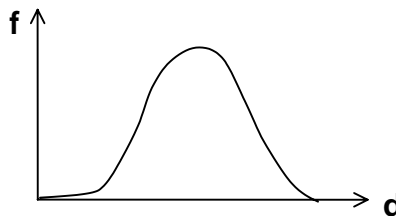
Entenderemos que al habla de tamaño, se ha definido un método de medición. Se supondrá que se conocen los coeficientes k_v y k_s definidos por:

$$\text{Volumen} = k_v \cdot d^3 \quad [5.2.1]$$

$$\text{Área superficial} = k_s \cdot d^2 \quad [5.2.2]$$

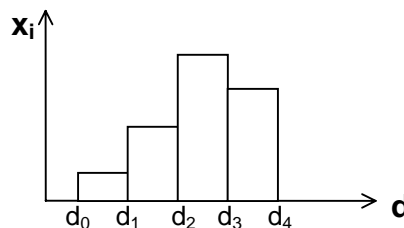
Distribución de frecuencia $f(d)$

Si δd es un diferencial del tamaño d , $f(d)\delta d$ es la fracción de la población cuyo tamaño está comprendido entre d y $(d + \delta d)$.



$$\int_0^{\infty} f(d) \delta d = 1 \quad [5.2.3]$$

En términos discretos, si los tamaños presentes en la población se dividen en n intervalos separados por $(n-1)$ valores d_0, d_1, \dots, d_n , x_i es la fracción de la población cuyo tamaño está comprendido entre d_{i-1} y d_i .

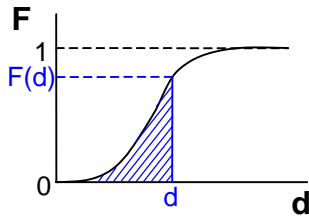


$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad [5.2.4]$$

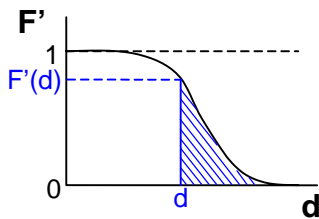
Distribución de frecuencia $f(d)$

$F(d)$ es la fracción de la población cuyo tamaño es $\leq d$.

$$F(d) = \int_0^d f(d) \delta d \quad [5.2.5]$$



$F'(d)$ es la fracción de la población cuyo tamaño es $\geq d$.



$$F'(d) = \int_d^{\infty} f(d) \delta d \quad [5.2.6]$$

En términos discretos:

$$F_i = \sum_{j=1}^i x_j \quad [5.2.7]$$

$$F'_i = \sum_{j=i+1}^n x_j \quad [5.2.8]$$

Interpretaciones de la expresión “fracción de la población”

Las definiciones estadísticas anteriores se interpretan comúnmente como refiriéndose a la fracción del número de individuos de la población cuyo tamaño cumple cierta condición. Designaremos estas funciones por f_N , F_N , x_N .

Otras interpretaciones útiles son:

Fracción del área superficial total de partículas que corresponde a partículas cuyo tamaño cumple cierta condición: f_S , F_S , x_S .

Fracción del volumen total de partículas que corresponde a partículas cuyo tamaño cumple cierta condición: f_V , F_V , x_V .

Para partículas de densidad homogénea, las funciones volumétricas son idénticas a las funciones másicas: f_M , F_M , x_M .

Cuando x vaya sin subíndice, se entenderá que es fracción másica.

Ejemplo: F_S es la fracción del área superficial total de partículas de la población que corresponde a partículas cuyo tamaño es $\leq d$.

Por tamizado se obtienen fracciones másicas. Por medición directa se obtienen fracciones por número de partículas.

Transformación de funciones de distribución

Ejemplo: Obtener f_S a partir de f_N .

La población tiene N partículas

$f_N \cdot \delta d \cdot N = n^\circ$ de partículas de tamaño entre d y $(d + \delta d)$

$k_S \cdot d^2 =$ área superficial de una partícula

$k_S \cdot d^2 \cdot f_N \cdot \delta d \cdot N =$ área superficial correspondiente a partículas de tamaño entre d y $(d + \delta d)$

$\int_0^\infty k_S \cdot d^2 \cdot f_N \cdot \delta d \cdot N =$ área superficial total de la población

La razón entre estas últimas dos magnitudes es, por definición, la fracción de área superficial total asociada con partículas de tamaño entre d y $(d + \delta d)$, o sea, es $f_S \cdot \delta d$:

$$f_s \cdot \delta d = \frac{ks \cdot d^2 \cdot f_N \cdot \delta d \cdot N}{\int_0^\infty ks \cdot d^2 \cdot f_N \cdot \delta d \cdot N}$$

Entonces:

$$f_s = f_N \cdot \frac{d^2}{\int_0^\infty d^2 \cdot f_N \cdot \delta d} \quad [5.2.9]$$

El mismo ejemplo en forma discreta: Obtener x_s a partir de x_N .

$X_{Ni} \cdot N = n^0$ de partículas entre d_{i-1} y d_i (\bar{d}_i)

$ks \cdot \bar{d}_i \cdot X_{Ni} \cdot N =$ área superficial correspondiente a partículas de tamaño , esto es, entre d_{i-1} y d_i .

$ks \cdot N \cdot \sum_{i=1}^n x_{Ni} \cdot \bar{d}_i^2 =$ área superficial total

$$x_{Si} = \frac{ks \cdot \bar{d}_i^2 \cdot x_{Ni} \cdot N}{ks \cdot N \cdot \sum_{i=1}^n x_{Ni} \cdot \bar{d}_i^2} = \frac{x_{Ni} \cdot \bar{d}_i^2}{\sum_{i=1}^n x_{Ni} \cdot \bar{d}_i^2} \quad [5.2.10]$$

Otras transformaciones se formulan en forma similar. Algunos resultados son:

$$x_i = x_{Vi} = x_{Mi} = \frac{x_{Ni} \cdot \bar{d}_i^3}{\sum_{i=1}^n x_{Ni} \cdot \bar{d}_i^3} \quad [5.2.11]$$

$$x_{Si} = \frac{\left(\frac{x_i}{\bar{d}_i} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\bar{d}_i} \right)} \quad [5.2.12]$$

Tamaño mínimo y máximo para distribuciones discretas

Suele ocurrir en un tamizado que queda material retenido en la malla de máxima abertura (malla “n”). Para asignarle un tamaño, puede suponerse que ese material atravesó la malla siguiente en la progresión geométrica utilizada.

Casi siempre hay material que atraviesa la malla “0” (los “finos”). Para este caso, se ha encontrado empíricamente que se puede extrapolar cuando el material es producto de una molienda.

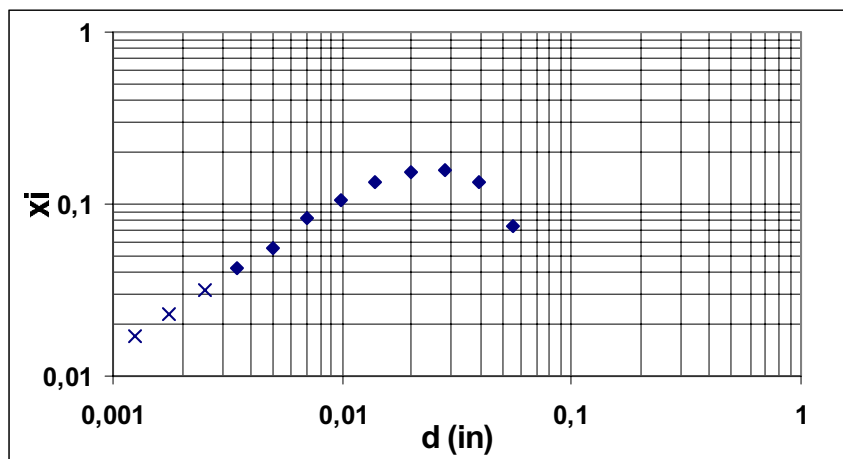
Ejemplo: Se ha hecho un análisis granulométrico del producto de la molienda de ilmenita. Completar por extrapolación la distribución de tamaños bajo 200 mallas.

Datos:

Malla Tyler		xi	\bar{d}_i (in)
- 10	+ 14	0,075	0,0555
- 14	+ 20	0,136	0,0394
- 20	+ 28	0,158	0,0280
- 28	+ 35	0,154	0,0198
- 35	+ 48	0,133	0,0140
- 48	+ 65	0,106	0,0099
- 65	+ 100	0,082	0,0070
- 100	+ 150	0,056	0,0050
- 150	+ 200	0,043	0,0035
- 200		0,057	

Solución:

Los datos se han representado en un gráfico bilogarítmico (círculos). Los cuatro puntos de menores diámetros definen una línea recta. En la extrapolación de esa recta se lee la fracción másica a intervalos de $\sqrt{2}$ de los diámetros, siguiendo la misma secuencia de los puntos experimentales. Las lecturas se señalan como ‘x’ en el gráfico.



Cálculos:

\bar{d}_i (in)	x_i	x_i ajustada
0,0025	0,032	0,032
0,00175	0,023	0,023
0,00124	0,017	0,002
	0,072	0,057

La extrapolación continúa hasta enterar la fracción másica 0,057 que corresponde al intervalo bajo 200 mallas. Arbitrariamente se ha truncado la última fracción para alcanzar el total exacto.

5.3.- Definiciones de promedios

Para cualquiera función del tamaño $g(d)$, su promedio es:

$$\bar{g} = \int_0^{\infty} g(d) \cdot f(d) \delta d = \int_0^1 g(d) \delta F \quad [5.3.1]$$

dado que $\delta F = f(d) \delta d$

Para cada función $g(d)$ se generan distintos promedios según la interpretación que se asigne a $f(d)$.

En forma discreta:

$$\bar{g} = \sum_{i=1}^n \bar{g}_i \cdot x_i \quad [5.3.2]$$

en que \bar{g}_i es un valor promedio de g en el intervalo d_{i-1} y d_i .

Se pueden promediar distintas funciones $g(d)$ que sean relevantes para una determinada aplicación (d , d^2 , d^3 , $\log d$, $1/d$, etc.).

Se pueden ponderar según distintas distribuciones: f_N , f_S , f_M . Se puede diseñar entonces una matriz de promedios posibles:

	x_N	x_S	x_M
d	$d_N = \sum_{i=1}^n d_i \cdot x_{Ni}$ promedio aritmético	$\bar{d}_S = \sum_{i=1}^n \bar{d}_i \cdot x_{Si}$ promedio ponderado por área superficial ("diámetro de Sauter")	$\bar{d}_V = \sum_{i=1}^n \bar{d}_i \cdot x_{Mi}$ promedio ponderado por masa
d^2	$(d_S)^2 = \sum_{i=1}^n \bar{d}_i^2 \cdot x_{Ni}$ área superficial promedio aritmético		
d^3	$(d_V)^3 = \sum_{i=1}^n \bar{d}_i^3 \cdot x_{Ni}$ volumen promedio aritmético		

Notar que \bar{d}_S , el diámetro de Sauter, tiene igual área específica que el conjunto de la población.

Se podrían llenar los casilleros que faltan en la tabla anterior, pero no se utilizan en la práctica. Los más empleados son $\overline{d_s}$ (el diámetro de Sauter, útil en procesos que ocurren en la superficie de la partícula) y $\overline{d_v}$, el promedio ponderado por masa (o volumen), que corresponde a las aplicaciones generales.

Es conveniente transformar las definiciones de la tabla en función de x_M (que es el dato más común)

$$d_N = \frac{\sum_1^n \frac{x_i}{d_i^2}}{\sum_1^n \frac{x_i}{d_i^3}} \quad [5.3.3]$$

$$\overline{d_s} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{x_i}{d_i}} \quad [5.3.4]$$

$$d_s = \frac{\sum_1^n \frac{x_i}{d_i}}{\sum_1^n \frac{x_i}{d_i^3}} \quad [5.3.5]$$

$$d_v = \frac{1}{\left[\sum_1^n \frac{x_i}{d_i^3} \right]^{1/3}} \quad [5.3.6]$$

5.4.- Representaciones analíticas

Objetivos:

Ir más allá de un promedio y obtener 2 o 3 parámetros que caractericen con más exactitud una distribución granulométrica, con fines de:

- i. Control de calidad y cumplimiento de especificaciones
- ii. Modelamiento de procesos

Distribución log-normal

La distribución normal o gaussiana no representa en forma adecuada las distribuciones granulométricas de la práctica, debido a que estas son sesgadas (no simétricas) y, por supuesto, no incluyen tamaños negativos.

Reemplazando en la distribución normal las variables por sus logaritmos naturales, se obtiene la **distribución log-normal**, que es ampliamente utilizada en el análisis granulométrico:

$$\text{Normal: } \frac{\delta F}{\delta d} = f = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(d - d_a)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] \quad [5.4.1]$$

$$\text{Log-normal: } \frac{\delta F}{\delta(\ln d)} = \frac{d \delta F}{\delta d} = df = \frac{1}{\ln \sigma_g \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(\ln d - \ln d_g)^2}{2 \cdot (\ln \sigma_g)^2} \right] \quad [5.4.2]$$

En que d_a es el promedio aritmético ($g(d) = d$), σ su desviación estándar; d_g es el promedio geométrico, definido por $g(d) = \ln d$, y σ_g su correspondiente desviación estándar.

Se dispone del papel log-probabilidades, en que la coordenada “f”, se ha transformado de tal modo que la distribución normal se transforme en una línea recta. Se demuestra que, en tal recta, se verifica:

$$d_g = d_{50} \text{ (la abscisa } d \text{ para la cual } F = 50\%, \text{ la mediana)} \quad [5.4.3]$$

$$\sigma_g = d_{84,1}/d_{50} = d_{50}/d_{15,9} \quad [5.4.4]$$

El modo d_m (el tamaño de máxima frecuencia) es:

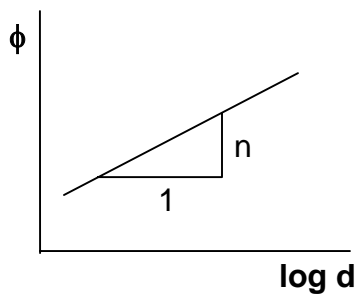
$$\ln d_m = \ln d_g - (\ln \sigma_g)^2 \quad [5.4.5]$$

El promedio aritmético da es:

$$\ln d_a = \ln d_g + 0,5 \cdot (\ln \sigma_g)^2 \quad [5.4.6]$$

Estas relaciones son válidas para cualquier significado que se le asigne a f : f_N , f_S , f_M .

En el uso práctico, se representan los puntos medidos de un análisis granulométrico en un gráfico log-probabilidades, se traza la mejor recta y se leen d_{50} y $d_{84,1}$ (o $d_{15,9}$). Las relaciones anteriores permiten calcular los parámetros estadísticos.



Si los puntos experimentales difieren claramente de una línea recta, hay que usar otra distribución.

Distribución Rosin-Rammler

Es una distribución empírica que también se puede transformar en una línea recta usando el **papel Rosin-Rammler**. Suele ser apropiada para carbón triturado y otros materiales que no se representan bien en papel log-probabilidades.

$$1 - F = F' = \exp \left[- \left(\frac{d}{d_R} \right)^n \right] \quad [5.4.7]$$

en que d_R , n son los parámetros de la distribución. El papel Rosin-Rammler se basa en la transformación:

$$\phi = \log \left(\ln \frac{1}{F'} \right) = n \cdot \log d - n \cdot \log d_R \quad [5.4.8]$$

El exponente n es la pendiente de la recta. Se demuestra que d_R se lee en la abscisa para $F = 63,2\%$ o $F' = 36,8\%$.

Distribución de Harris

Si los puntos experimentales también dan una curva en el papel Rosin-Rammler, se puede usar la generalización de Harris:

$$F' = \left[1 - \left(\frac{d}{d_0} \right)^s \right]^r \quad [5.4.9]$$

con 3 parámetros: d_0 , s y r .

Aquí d_0 es el tamaño máximo presente en la población, s es la pendiente de una recta que representa el material fino en el gráfico y r se puede aproximar por la pendiente del gráfico en la región de tamaños gruesos.

5.5.- Movimiento de partículas sólidas en un fluido

Velocidad de sedimentación de partículas

En todas las operaciones que involucran sistemas fluido-partícula, la trayectoria de las partículas resulta de la fuerza de gravedad, el empuje y la fuerza de arrastre que ejerce el fluido (F_D). Si V es la velocidad del fluido relativa a la partícula, se tiene:

$$F_D = C_D \cdot S \cdot (1/2) \cdot \rho \cdot V^2 \quad [5.5.1]$$

(definición de C_D , coeficiente de arrastre o de resistencia)

En que S es el área de la proyección de la partícula en un plano normal a V .

Usualmente, se caracteriza el comportamiento de la partícula por su velocidad de sedimentación (o velocidad de caída libre), que es la velocidad terminal que alcanza una partícula cuando su peso sumergido equilibra la fuerza de arrastre (o de resistencia), lo que da aceleración nula, velocidad constante.

Llamando w a la velocidad de sedimentación, el equilibrio para una partícula de volumen ∇ y densidad ρ_S en caída libre en un fluido de densidad ρ_F es:

$$(\rho_S - \rho_F) \cdot g \cdot \nabla = C_D \cdot S \cdot (1/2) \cdot \rho_F \cdot w^2 \quad [5.5.2]$$

El coeficiente C_D es función de la forma de la partícula y del número de Reynolds Re_w :

$$Re_w = \frac{\rho_F \cdot w \cdot d}{\mu_F} \quad [5.5.3]$$

Por supuesto, no siempre la partícula tiene su velocidad de sedimentación, pero se acepta ésta como la mejor caracterización hidrodinámica de la partícula.

Velocidad de sedimentación de esferas

Para el coeficiente C_D existe solución teórica de Stokes para flujos muy lentos:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad [5.5.4]$$

$$F_D = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d \cdot V \quad [5.5.5]$$

$$Re = \frac{\rho_F \cdot V \cdot d}{\mu_F} \quad [5.5.6]$$

Reemplazando en la ecuación de equilibrio, se obtiene la velocidad de sedimentación de Stokes w_{St} :

$$w_{St} = \frac{|\rho_S - \rho_F| \cdot g \cdot d^2}{18 \cdot \mu} \quad [5.5.7]$$

que se ha encontrado que es válida en la práctica para $Re_w < 0,1$; se puede aplicar con error pequeño hasta $Re_w < 1$.

Se ha escrito $|\rho_S - \rho_F|$ para incluir el caso en que $\rho_S < \rho_F$, en que simplemente cambia la dirección de la velocidad (la partícula “sube”).

Para el caso general, con Re mayor, la ecuación de equilibrio da:

$$w = \left[\frac{4 \cdot g}{3 \cdot C_D} \cdot \frac{|\rho_S - \rho_F|}{\rho_F} \cdot d \right]^{\frac{1}{2}} \quad [5.5.8]$$

Existen gráficos con curvas de los valores experimentales para C_D para diferentes formas de partículas (esferas, discos). Hay una variedad de fórmulas numéricas para representar dichas curvas. Una aproximación simple es:

$$\text{Transición: } C_D = 18,5 \cdot Re^{-0,6} \quad \text{para } 1 < Re < 1000 \quad [5.5.9]$$

$$\text{Turbulento: } C_D = 0,4 \quad (\text{varía entre } 0,38 \text{ y } 0,44) \quad \text{para } 10^3 < Re < 10^5 \quad [5.5.10]$$

Una transformación útil de la función $C_D(Re)$ para el cálculo directo de $w(d)$ es la siguiente (**gráfico de Heywood**):

$$\text{Ordenada: } \alpha \cdot d = (C_D \cdot Re^2)^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{4 \cdot g \cdot |\rho_S - \rho_F| \cdot \rho_F}{3 \cdot \mu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot d \quad [5.5.11]$$

$$\text{Abscisa: } \beta \cdot w = \left(\frac{Re}{C_D} \right)^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{3 \cdot \rho_F^2}{4 \cdot g \cdot |\rho_S - \rho_F| \cdot \mu} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot w \quad [5.5.12]$$

Los dos paréntesis son funciones sólo de las propiedades del sistema (ρ_S , ρ_F , μ) y, por lo tanto, se pueden calcular a priori. Así, el gráfico da directamente w en función de d o viceversa.

Velocidad de sedimentación de partículas no esféricas

El gráfico de Heywood incluye curvas adicionales para partículas no esféricas, en términos de un factor de forma k . Se define k mediante $k \cdot d^3 = \forall$ en que “ d ” es el diámetro de un círculo de igual área que la mayor sección transversal de la partícula.

Esta definición sólo es cómoda para formas geométricas regulares. Para partículas de forma irregular, se recomienda estimar k en base a las 3 dimensiones de la partícula según ejes ortogonales, como se describe al pie del gráfico.

Velocidad de sedimentación inhibida

Para altas concentraciones de partículas, la sedimentación se ve retardada, debido a interacciones entre partículas y a la velocidad de desplazamiento del fluido (que es despreciable cuando sedimenta una partícula aislada).

De entre muchas fórmulas propuestas para corregir w por efecto de la concentración, se puede usar la de Richardson y Zaki; la velocidad de sedimentación inhibida w_i está dada por:

$$w_i = w \cdot (1 - C_V)^n \quad [5.5.13]$$

en que w es la velocidad de sedimentación de una partícula aislada, C_V es la concentración volumétrica de sólidos (volumen sólidos/volumen total) y n es un exponente dado por:

$$n = 4,65 \quad \text{para} \quad Re_w < 0,2 \quad [5.5.14]$$

$$n = 4,35 \cdot Re_w^{-0,03} \quad \text{para} \quad 0,2 < Re_w < 1 \quad [5.5.15]$$

$$n = 4,45 \cdot Re_w^{-0,1} \quad \text{para} \quad 1,0 < Re_w < 500 \quad [5.5.16]$$

$$n = 2,35 \quad \text{para} \quad Re_w > 500 \quad [5.5.17]$$

Re_w se calcula con w .

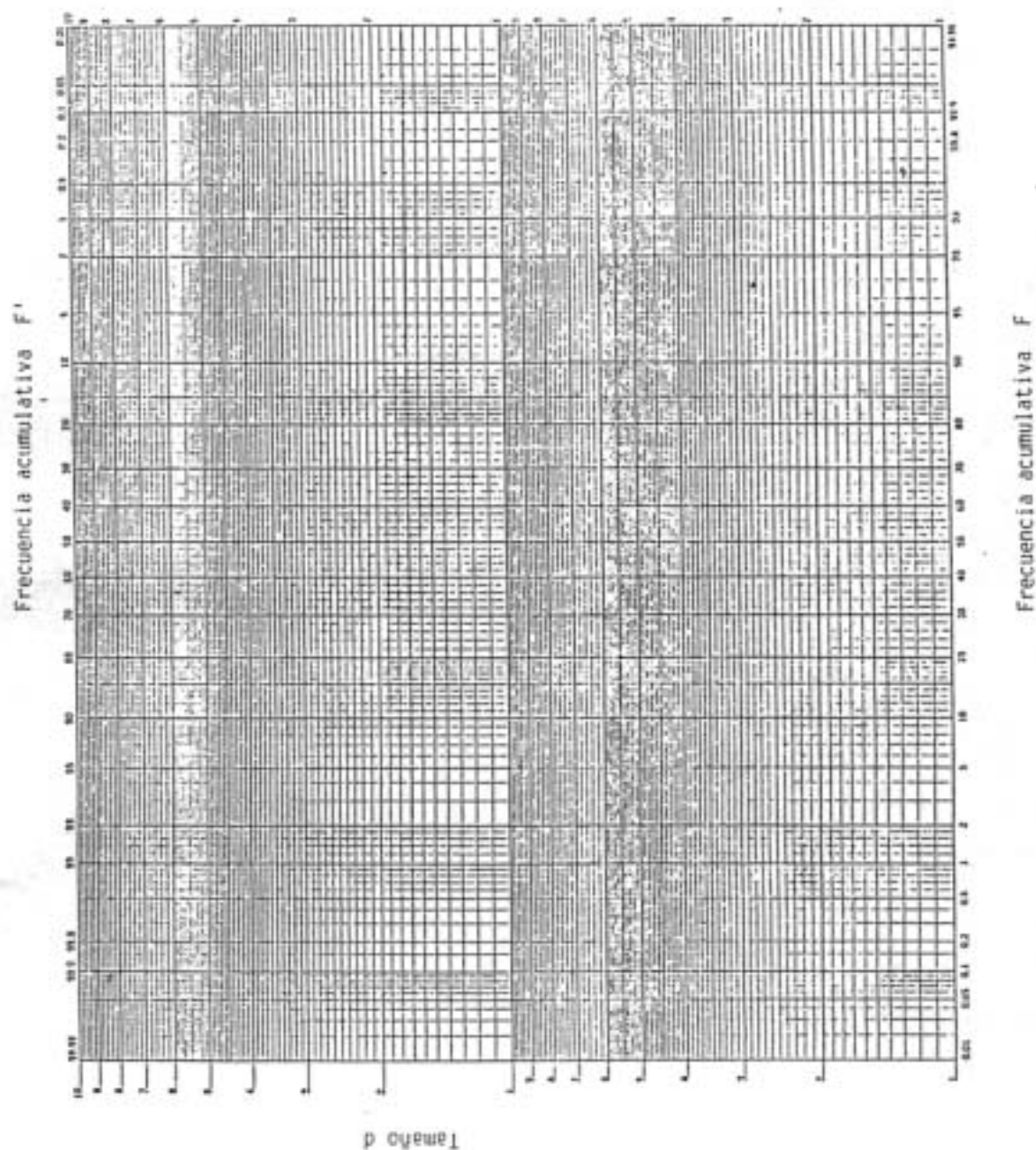
NORMALIZACION DE ABERTURAS DE MALLAS

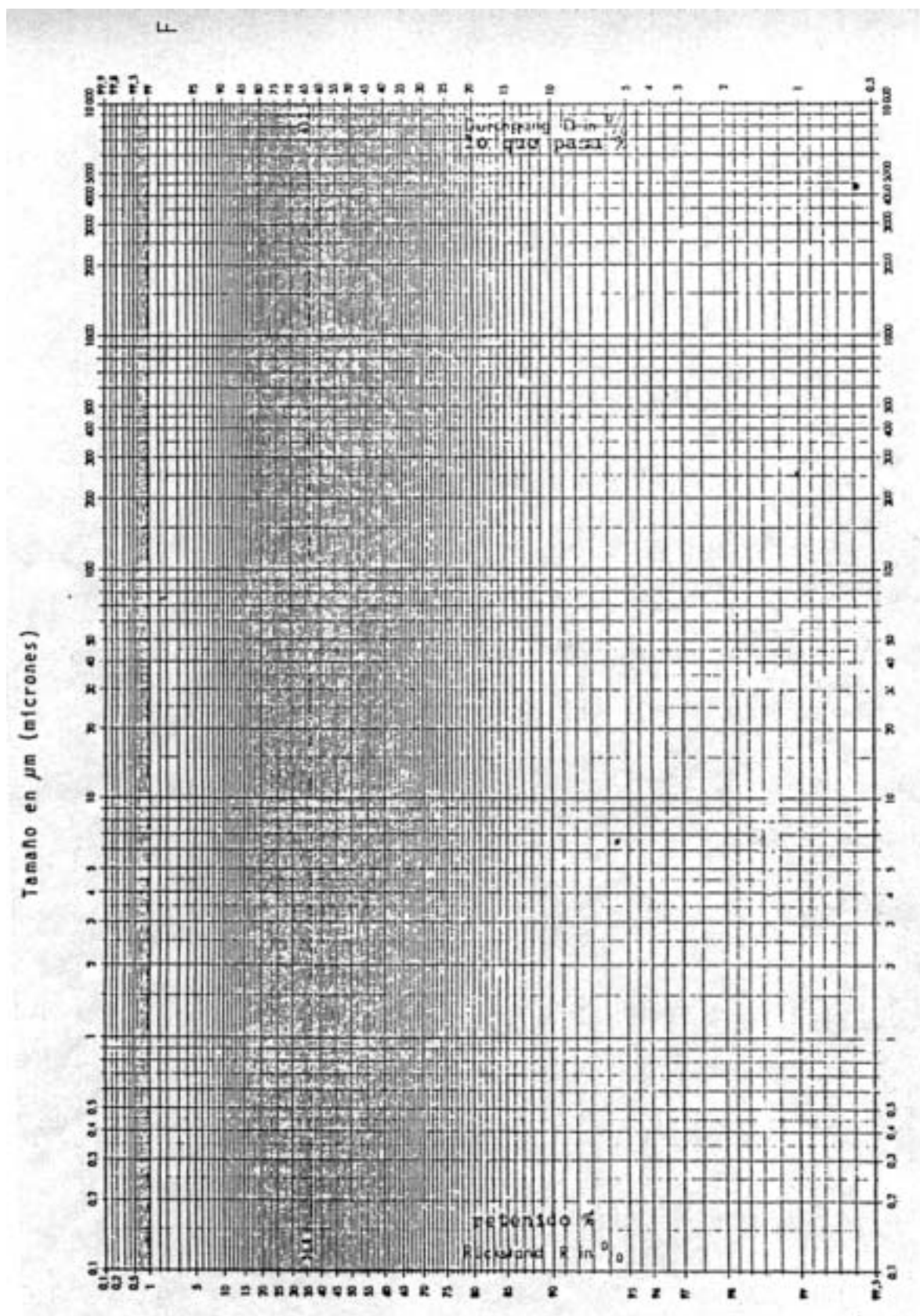
British fine mesh (B.S.S. 410) ^{1,40}			I.M.M. ¹³			U.S. Tyler ¹³			U.S. A.S.T.M. ¹³		
Sieve no.	Nominal aperture		Sieve no.	Nominal aperture		Sieve no.	Nominal aperture		Sieve no.	Nominal aperture	
	in.	µm		in.	µm		in.	µm		in.	µm
300	0.0021	53				325	0.0017	43	325	0.0017	44
240	0.0026	66				270	0.0021	53	270	0.0021	53
200	0.0030	76	200	0.0025	63	250	0.0024	61	230	0.0024	61
170	0.0035	89				200 -	0.0029	74	200	0.0029	74
150	0.0041	104	150	0.0033	84	170	0.0035	89	170	0.0034	88
120	0.0049	124				150 -	0.0041	104	140	0.0041	104
100	0.0060	152	120	0.0042	107	115	0.0049	125	120	0.0049	125
			100	0.0050	127	100 -	0.0058	147	100	0.0059	150
			90	0.0055	139	80	0.0069	175	80	0.0070	177
85	0.0070	178	80	0.0062	157	65 -	0.0082	208	70	0.0083	210
			70	0.0071	180				60	0.0098	250
72	0.0083	211	60	0.0083	211	60	0.0097	246	50	0.0117	297
60	0.0099	251							45	0.0138	350
52	0.0116	295	50	0.0100	254	48 -	0.0116	295	40	0.0165	420
			40	0.0125	317	42	0.0133	351	35	0.0197	500
44	0.0139	353				35 -	0.0164	417	30	0.0232	590
36	0.0166	422	30	0.0166	422	32	0.0195	495			
30	0.0197	500				28 -	0.0232	589			
25	0.0236	600									
22	0.0275	699	20	0.0250	635	24	0.0276	701	25	0.0280	710
18	0.0336	853	16	0.0312	792	20 -	0.0328	833	20	0.0331	840
16	0.0395	1003				16	0.0390	991	18	0.0394	1000
14	0.0474	1204	12	0.0416	1056	14 -	0.0460	1168	16	0.0469	1190
12	0.0553	1405	10	0.0500	1270	12	0.0550	1397			
10	0.0660	1676	8	0.0620	1574	10 -	0.0650	1651	14	0.0555	1410
8	0.0810	2057				9	0.0780	1981	12	0.0661	1680
7	0.0949	2411				8 -	0.0930	2362	10	0.0787	2000
6	0.1107	2812	5	0.1000	2540	7	0.1100	2794	8	0.0937	2380
5	0.1320	3353				6 -	0.1310	3327			
						5	0.1560	3962	7	0.1110	2839
						4 -	0.1850	4699			
									6	0.1320	3360
									5	0.1570	4000
									4	0.1870	4760

Continúa abajo

THE TYLER STANDARD SCREEN SCALE

Mesh	Clear open- ing, in.	Clear open- ing, mm	Opening, in. (approx.)	Diameter of wire, in.
...	1.050	26.67	1	0.148
...	0.883	22.43	3/4	0.135
...	0.742	18.85	3/4	0.135
...	0.624	15.85	3/4	0.120
...	0.525	13.33	3/4	0.105
...	0.441	11.20	3/4	0.105
...	0.371	9.423	3/4	0.092
2 3/4	0.312	7.925	3/4	0.088
3 -	0.263	6.680	3/4	0.070
3 3/4	0.221	5.613	3/4	0.065
4 -	0.185	4.699	3/4	0.065





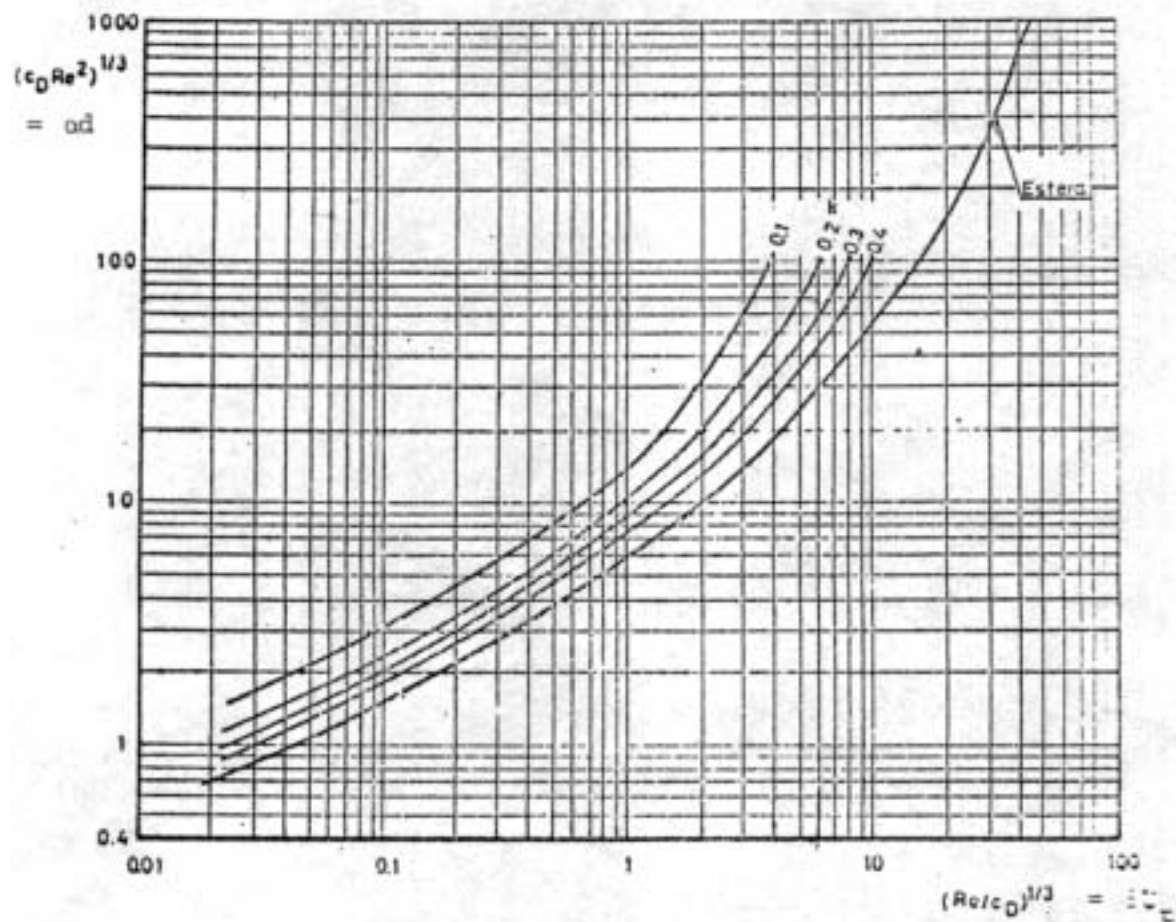


Fig. 11-1: Gráfico de Heywood para la determinación de la velocidad de sedimentación.

Factor de forma: $k = k_e c / \sqrt{ab}$, en que:

$a > b > c$ son las dimensiones triaxiales de la partícula.

$k_e = 0,38$ para partículas angulosas de forma piramidal.
 $k_e = 0,47$ " " " " de forma prismoidal.
 $k_e = 0,51$ " " " " sub angulosas.
 $k_e = 0,54$ " " " " redondeadas.

(Adaptado de H. Heywood, Uniform and non-uniform motion of particles in fluids, Proc. of the Symp. on the Interaction between Fluids and Particles, London, 1962, The Inst. of Chemical Engineers).

$$\alpha = \left[\frac{4g(\rho_s - \rho)\rho}{3\mu^2} \right]^{1/3}$$

$$\beta = \left[\frac{3\rho^2}{4g(\rho_s - \rho)\mu} \right]^{1/3}$$