

## Granulometría. Técnicas de sedimentación.

### La relación entre tamaño y velocidad de sedimentación: ley de Stokes.

Las técnicas de análisis granulométrico por sedimentación se basan en la **ley de Stokes**, que relaciona el tamaño de las partículas, supuestas esféricas, de superficie lisa, y situadas en un medio infinito, con su velocidad de sedimentación.

Una partícula esférica de densidad  $\rho$ , de superficie lisa y de radio  $r$ , situada en el interior de un fluido infinito, de viscosidad  $\eta$ , se mueve bajo la acción de las siguientes fuerzas (figura 1):

- **Fuerza de fricción ( $F_f$ )** proporcional a su radio ( $r$ ), a la velocidad de caída ( $v$ ) y la viscosidad del fluido ( $\eta$ ):

$$F_f = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$$

- **Peso de la partícula ( $w$ )**, que si se considera esférica, de densidad ( $\rho_s$ ) es:

$$w = \rho_s \cdot V \cdot g = \rho_s \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot g$$

- **Empuje hidrostático ( $F_H$ )**

$$F_H = \rho_L \cdot V \cdot g = \rho_L \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot g$$

La aparición de una fuerza de fricción, proporcional a la velocidad de caída, tiene como consecuencia que las partículas esféricas adquieran, tras un breve período de transición, una velocidad de caída constante que se alcanza cuando la fuerza de fricción iguala a la de la gravedad menos el empuje hidrostático, es decir, cuando:

$$6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot (\rho_s - \rho_L) \cdot g$$

en la que:

$\rho_s$  : densidad del sólido (g/cc).

$\rho_L$  : densidad del líquido (g/cc).

De esta igualdad se deduce que la velocidad de sedimentación de una partícula de radio  $r$  es:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_L)}{\eta} \cdot g \cdot r^2$$

Esta expresión puede simplificarse, quedando:

$$v = C_s \cdot r^2$$

Así pues, la velocidad de caída de una partícula esférica de superficies lisas, y situada en un medio infinito (sin influencia de las paredes) es directamente proporcional al cuadrado de su radio. La constante de proporcionalidad ( $C_s$ ) recibe el nombre de **constante de Stokes** y sus unidades, en el sistema CGS, son  $\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

$$C_s = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_L)}{\eta} \cdot g$$

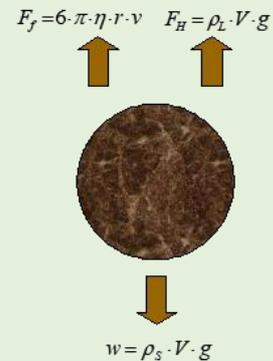


Figura 1. Equilibrio de fuerzas durante la sedimentación de la partícula en régimen laminar.

### Técnicas.

Las principales técnicas empleadas para la determinación de la distribución granulométrica basadas en la sedimentación son la **pipeta de Andreasen**, el **Sedigra**ph y el **Fotosedimentograph**.

La aplicación de la ecuación de Stokes implica admitir que la partícula es esférica, rígida y de superficie lisa. Se supone además que la velocidad terminal de la partícula se alcanza casi instantáneamente y que se mueve sin ninguna interferencia ni interacción con otras partículas del sistema, condición que sólo se cumple en suspensiones muy diluidas.

Una limitación de las técnicas de sedimentación radica en el hecho de que partículas con tamaños inferiores a  $0,5 \mu\text{m}$  están muy influenciadas por el movimiento browniano, por lo que su velocidad de sedimentación no se ajusta a la ley de Stokes. Esta influencia es tanto mayor cuanto menor es la densidad de las partículas <sup>(1)</sup>.

**Pipeta de Andreasen.**

Es una técnica de medida de la distribución de tamaños de una muestra mediante medidas indirectas de su velocidad de sedimentación.

La Pipeta de Andreasen es un cilindro graduado provisto de una pipeta que pasa a través del centro del tapón. Sobre éste, una llave de tres vías permite la comunicación entre el tubo interior del cilindro, un bulbo de 10 ml de capacidad exacta y un tubo de vaciado (figura 2). El análisis se realiza con una suspensión entre el 1 % y el 3 % de sólidos, dispersada con ayuda de un equipo de ultrasonidos y la adición de un desfloculante de concentración conocida.

De acuerdo con la ley de Stokes, la velocidad de sedimentación puede considerarse constante, y por tanto se expresa en función de la distancia recorrida (altura **h**, en cm) y del tiempo (**t**, en segundos).

$$v = \frac{h}{t}$$

Por tanto el diámetro (cm) de la partícula se puede calcular según:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{h}{C_s \cdot t}}$$

Si se desea expresar el diámetro de la partícula en  $\mu\text{m}$ , esta ecuación queda de la siguiente forma:

$$d = 2 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{\frac{h}{C_s \cdot t}}$$

**Método operativo.**

Una muestra seca de peso exactamente conocido se dispersa, tamiza y se introduce en el recipiente hasta enrase, realizando extracciones de 10 cc a intervalos crecientes de tiempo. Los tiempos de extracción (**t**) determinan los diámetros (**d**) medidos en función de la altura de sedimentación (**h**) que se lee en la escala del recipiente. Las muestras extraídas se llevan a sequedad en estufa y se pesa el residuo. El peso de cada muestra permite obtener los cernidos acumulados del tamaño correspondiente al diámetro calculado (ver ejemplo).

La exactitud de la determinación depende de la preparación de la suspensión, ya que el material a analizar debe estar completamente disperso, para lo que debe lograrse la destrucción de todos los aglomerados de partículas. Para lograr una buena dispersión se recurre a la desfloculación de la suspensión y a su agitación mediante ultrasonidos.



Figura 2. Pipeta de Andreasen.  
Fotografía: Rafael Galindo.

**Ejemplo**

A título orientativo, en la figura 3 se muestra una captura de pantalla de una hoja Excel con los cálculos relativos a un ensayo de una pasta empleada en la fabricación de baldosas cerámicas.



Figura 6. Cálculo de una distribución granulométrica mediante pipeta de Andreasen.

**Bibliografía**

- (1) AJIT JILLAVENKATESA; STANLEY J. DAPKUNAS; LIN-SIEN H. LUM. "Particle size characterization" National Institute of Standards and Technology. Special Publication 960-1. (2001).