

## TEMA 2.5 PARTICULAS Y MEDIO AMBIENTE

### CI41B Ingeniería Ambiental

Profesores C. Espinoza, D. Rodríguez y R. Muñoz  
Semestre Primavera 2005

#### 1. INTRODUCCION

Una partícula puede ser definida como una porción de materia sólida, líquida o gaseosa más grande que una pequeña molécula individual (mayor que 1 nanometro en diámetro). Residuos líquidos, sólidos o gaseosos contienen muchas partículas que varían considerablemente en tamaño. Para muchas situaciones es importante el encontrar una forma de expresar el tamaño de las partículas, su forma y la distribución de su tamaño.

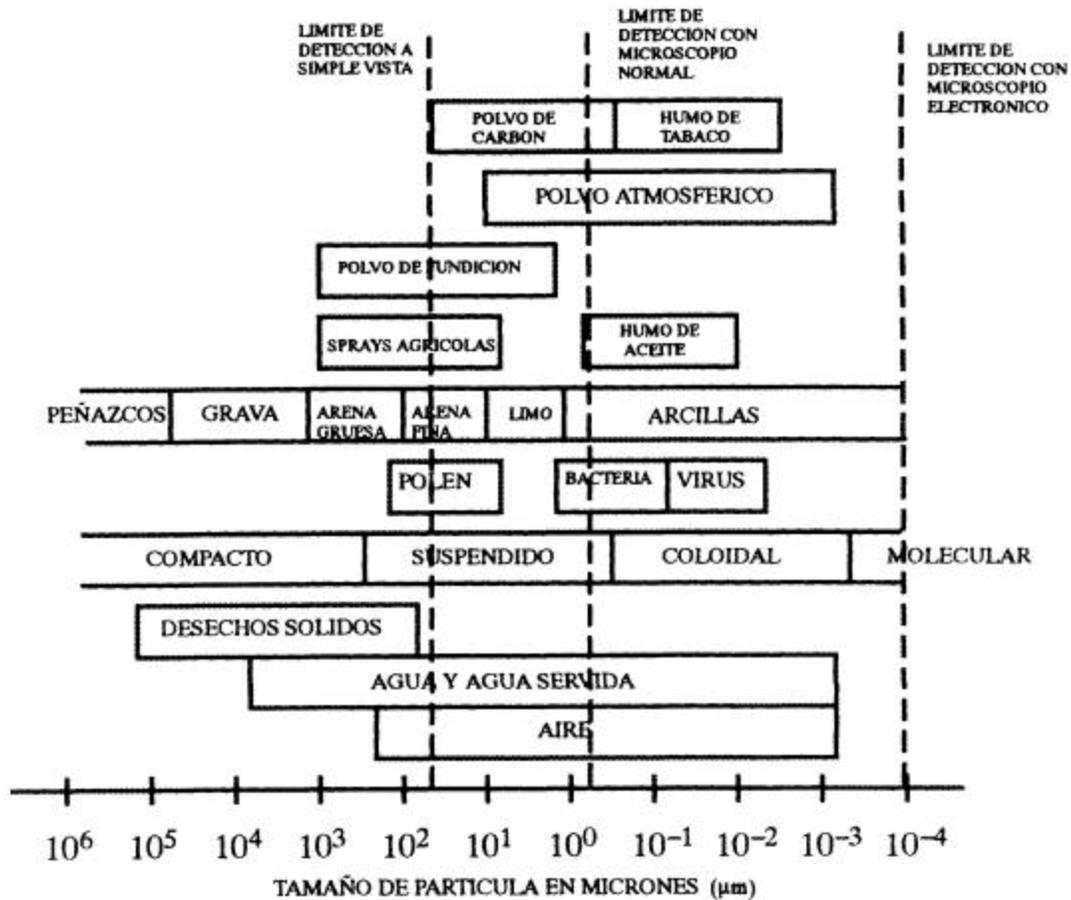
#### 2. PROPIEDADES

La Figura 1 muestra un diagrama esquemático, en escala logarítmica, que cubre el rango de partículas de interés en ingeniería ambiental. En el agua, las partículas están en suspensión cuando ellas pueden ser removidas por sedimentación o filtración en papel filtro. El límite inferior para esto último es alrededor de 0.4 mm. Partículas más pequeñas son llamadas *coloides*. Normalmente estas últimas partículas se encuentran comprendidas en un rango entre 1 y 400 nm, por lo que no son visibles a través de un microscopio ordinario. Debido a su importancia en el área de ingeniería ambiental nos referiremos en forma separada acerca de estos elementos. Por debajo de 1 nm se considera que las partículas están disueltas en un solvente formando una solución.

Muy rara vez las partículas en una mezcla o suspensión son de tamaño uniforme o de forma esférica. En general es muy difícil el clasificar partículas debido a la diversidad de sus formas. Existen diversos criterios que son utilizados para clasificar la forma de las partículas. Una de las más utilizadas es el asociar a la partícula un coeficiente de **esfericidad**,  $Y$ , el que mide su similitud con una esfera o círculo. Si este coeficiente es cercano a 1.0 estamos en presencia de una partícula redondeada, pero a medida que se aleja de la unidad su forma se hace más irregular.

La distribución del tamaño de partículas no puede ser caracterizada por un parámetro único, como por ejemplo su diámetro medio. En general, un método para medir la distribución de tamaños se basa en el análisis de una muestra usando mallas o rejillas de apertura definida. En este análisis se pesa la muestra inicial y se determina la cantidad de material que ha sido retenida en una malla determinada. Una vez concluido este análisis se grafica la información para determinar algunos diámetros o tamaños relevantes de la muestra. Uno de estos valores es el diámetro  $d_{10}$  que indica que sólo el 10% de la muestra es menor que ese tamaño. Otros diámetros representativos son el  $d_{50}$  y el  $d_{90}$ .

**Figura 1**  
**Distribución de Partículas en Sistemas Ambientales**



### 3. DISPERSIONES COLOIDALES

Dispersiones coloidales consisten en pequeñas partículas entre 1 y 400 nm, separadas por el medio de dispersión. Las partículas de la dispersión coloidal pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas. Nombres comunes para dispersiones coloidales son:

FASE DISPERSA	MEDIO DE DISPERSION	NOMBRE COMUN
Sólido	Líquido	Suspensión
Líquido	Líquido	Emulsión
Gas	Líquido	Espuma
Sólido	Gas	Humo, Aerosol
Líquido	Gas	Bruma, Aerosol

Las propiedades características de las dispersiones coloidales pueden ser atribuidas a su pequeño tamaño, lo cual proporciona una gran área superficial por unidad de volumen. Para estudiar esta situación analicemos el siguiente problema.

Debido a su gran área superficial versus volumen ( $A/V$ ) los coloides tiene una gran capacidad de absorción, relativa a su pequeña masa. Asimismo, su gran área superficial determina que los

coloides presenten una importante carga eléctrica superficial. La capacidad de **absorción** exhibida por un coloide se refiere a su capacidad para retener ciertos elementos sobre su superficie. La **carga eléctrica** del coloide puede ser positiva o negativa dependiendo del tipo de partícula que ha sido adsorbida en su superficie. Esta característica de los coloides hace que sea muy difícil el unirlos o aglomerarlos con el objetivo de eliminarlos de un sistema específico (agua o aire). Un método, coagulación, destinado a superar esta situación será estudiado más adelante.

#### 4. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS

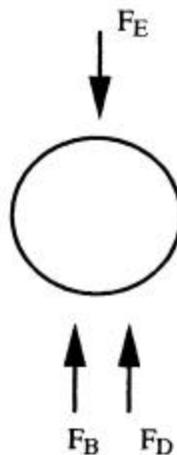
Los principios involucrados en la sedimentación de partículas en un fluido pueden ser usados para la remoción de sólidos suspendidos en un río o lago, el diseño de sedimentadores y la sedimentación de material particulado desde el aire.

Consideremos una partícula de arena sedimentando a una velocidad  $u$  en un fluido quieto. Una partícula cayendo debido a la acción de la gravedad experimentará una aceleración inicial hasta que la fuerza de fricción debida al fluido equilibrará este efecto y la partícula alcanzará un régimen de caída con una velocidad constante conocida como la velocidad terminal de sedimentación,  $u_t$ . Esta velocidad puede ser calculada mediante un balance de masas practicado sobre una partícula individual (ver Figura 2):

$$F_R = F_E - F_B - F_D \quad (1)$$

donde  $F_R$  es la fuerza resultante,  $F_E$  son las fuerza externas sobre la partícula (en este caso sólo la gravitacional),  $F_B$  es la fuerza de empuje debido al volumen de líquido desplazado por la partícula y  $F_D$  es la fuerza de fricción que se opone a la caída de la partícula. Estas fuerzas se pueden expresar como:

**Figura 2**  
**Partícula Cayendo en un Medio**



$$F_R = M \cdot \frac{du}{dt} \quad (2)$$

$$F_E = M \cdot g \quad (3)$$

$$F_B = \frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}_p} \cdot M \cdot g \quad (4)$$

donde  $M$  es la masa de la partícula,  $u$  es la velocidad de sedimentación,  $g$  es la aceleración de gravedad,  $\mathbf{r}$  es la densidad del fluido, y  $\mathbf{r}_p$  es la densidad de la partícula. Sustituyendo los valores de  $F_R$ ,  $F_E$  y  $F_B$  en la ecuación (1) obtenemos:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\mathbf{r}_p - \mathbf{r}}{\mathbf{r}_p} g - \frac{F_D}{M} \quad (5)$$

Experimentalmente se ha determinado que la fuerza de fricción puede ser escrita como:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A_p \cdot \mathbf{r} \cdot u^2 \quad (6)$$

donde  $C_D$  es el coeficiente de fricción (sin dimensiones) y  $A_p$  es el área proyectada de la partícula. Sustituyendo esta expresión en la ecuación (5) obtenemos:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\mathbf{r}_p - \mathbf{r}}{\mathbf{r}_p} \cdot g - \frac{C_D \cdot A_p \cdot \mathbf{r} \cdot u^2}{2 \cdot M} \quad (7)$$

Si suponemos que la partícula es esférica podemos escribir:

$$\frac{A_p}{M} = \frac{\mathbf{p} d_p^2 / 4}{(\mathbf{p} d_p^3 / 6) \mathbf{r}_p} = \frac{3}{2 \cdot \mathbf{r}_p \cdot d_p} \quad (8)$$

donde  $d_p$  es el diámetro de la partícula. Al substituir el valor de  $A_p/M$  en la ecuación (7) obtenemos:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\mathbf{r}_p - \mathbf{r}}{\mathbf{r}_p} \cdot g - \frac{3 \cdot C_D \cdot \mathbf{r} \cdot u^2}{4 \cdot \mathbf{r}_p \cdot d_p} \quad (9)$$

La velocidad terminal de sedimentación  $u_t$  se alcanza en forma muy rápida. En ese momento:

$$\frac{du}{dt} = 0 \quad (10)$$

con lo cual:

$$u_t = \left( \frac{4 \cdot g \cdot (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}) \cdot d_p}{3 \cdot C_D \cdot \mathbf{r}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Esta última ecuación es válida en el caso de partículas que sedimentan ( $r_p > r$ ) o aquellas que se elevan ( $r_p < r$ ) tales como burbujas de aceite o aire en agua. Por medio de experimentos se ha determinado que  $C_D$  es una función del número de Reynolds de la partícula,  $Re$ :

$$C_D = \frac{b}{Re^n} \quad \text{con} \quad Re = \frac{u \cdot d_p \cdot r}{\mu} \quad (12)$$

donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido, y los valores de  $b$  y  $n$  están dados en la siguiente tabla.

**Tabla 1**  
**Características del Flujo**

Tipo de Flujo	Re	b	n
Laminar	<2	24.0	1.0
Intermedio	2-500	18.5	0.6
Turbulento	>500	0.44	0.0

Para flujo laminar podemos escribir:

$$C_D = \frac{24}{Re} = \frac{24 \cdot \mu}{u \cdot d_p \cdot r} \quad (13)$$

Al sustituirla en la ecuación (11) podemos obtener:

$$u_t = \frac{(r_p - r) \cdot g \cdot d_p^2}{18\mu} \quad (14)$$

Esta última expresión se denomina velocidad terminal de Stokes y es válida sólo si el flujo es laminar y las partículas son esféricas. En la naturaleza las partículas son rara vez esféricas por lo cual debemos recurrir al concepto de **esfericidad**,  $\Psi$ , para modificar la ecuación (11) de la siguiente forma:

$$\frac{A_p}{M} = \frac{\Psi}{2 \cdot r_p \cdot d_p} \quad (15)$$

El coeficiente de esfericidad toma un valor de 1.0 para esferas, mientras que para partículas no esféricas es siempre menor que 1.0. Por ejemplo, para lentes de mica es igual a 0.28 mientras que para carbón pulverizado alcanza a 0.73.

Resumiendo podemos escribir las siguientes expresiones para el cálculo de la velocidad de sedimentación en los casos de régimen laminar, transición y turbulento.

### Régimen Laminar

$$u_t = \frac{(r_p - r) \cdot g \cdot d_p^2}{18\mu} \quad (16)$$

### Régimen Transición Laminar-Turbulento

$$u_t = \left( \frac{4 \cdot g \cdot (r_p - r) \cdot d_p}{3 \cdot C_D \cdot r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17a)$$

con

$$C_D = \frac{18.5}{\text{Re}^{0.6}} \quad (17b)$$

### Régimen Turbulento

$$u_{tT} = \left( \frac{4}{3} \cdot \frac{r_p - r}{r} \cdot \frac{g \cdot d_p}{0.44} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Para el caso de las velocidades terminales de sedimentación en los casos de régimen laminar y turbulento los cálculos son directos, debiéndose verificar posteriormente el valor del número de Reynolds correspondiente. En el caso del régimen de transición el cálculo es iterativo utilizando las expresiones (17a) y (17b).

### **EJEMPLO 1**

#### **Area superficial de un cubo.**

Considere un cubo de 1 cm por lado. Calcule su volumen y área superficial. Enseguida, divida cada cara del cubo por la mitad y determine su nuevo volumen y área. Finalmente, divida cada cara del cubo en cuatro partes. Repita el análisis anterior. Qué ocurre con el volumen y área superficial del cubo en estos tres casos?

### **EJEMPLO 2**

#### **Velocidad de sedimentación.**

Calcular la velocidad de sedimentación de dos partículas esféricas de diámetro (a) 0.1 mm y (b) 0.001 mm en agua detenida y con una temperatura de 20°C. La gravedad específica del material sólido es 2.65. Asuma condiciones laminares. Un tiempo de detención común para tanques de sedimentación es alrededor de 2 hr. De acuerdo a sus cálculos será posible que estas partículas puedan alcanzar el fondo de un tanque sedimentación de 3.5 m de profundidad en el tiempo de detención señalado?

### **EJEMPLO 3**

#### **Descarga de Fósforo en un Lago**

Un lago con una superficie igual a  $80 \times 10^6 \text{ m}^2$  es alimentado por un río con un caudal promedio de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  y una concentración de fósforo, también promedio, de 0.010 mg/L. Además, un efluente desde una planta de tratamiento agrega un caudal de  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$  con una concentración de 5.0 mg/L de fósforo. La tasa de sedimentación del fósforo se ha estimado igual a 10 m/año.

- a) Estimar la concentración promedio de fósforo en el lago.
- b) ¿Qué tasa de remoción de fósforo, a nivel de la planta de tratamiento, debiera ser necesaria para obtener una concentración aceptable en el lago?

### **EJEMPLO 4**

#### **Descarga de una Industria a un Lago**

Una industria se encuentra aportando sus residuos líquidos a un estero que descarga sus aguas a un lago situado en sus inmediaciones como se muestra en la Figura E4.1. El principal compuesto que se encuentra en estos residuos es fósforo, el que tiene una importancia fundamental para el problema de eutroficación de lagos. El caudal de descarga de la industria es de 15 l/s con una concentración de fósforo igual a 0.3 mg/L; el estero conduce un caudal de 500 l/s y no contiene fósforo. Debido a su localización geográfica este lago presenta una estratificación bastante marcada, lo que permite identificar dos estratos muy diferentes. Las características promedio de cada estrato, durante el verano, se especifican en la Tabla E4.1.

**Figura E4.1**  
**Esquema de Lago que Recibe Aportes**



**Tabla E4.1**  
**Características Promedio de Cada Estrato**

Parámetro	Estrato	valor	unidad
Espesor	Superior	2.0	m
	Inferior	6.0	m
velocidad de sedimentación	Superior	6.0	m/día
Volumen	Superior	40,000.0	m <sup>3</sup>
	Inferior	120,000.0	m <sup>3</sup>
Temperatura	Superior	15.0	°C
	Inferior	8.0	°C

Estudios hidrodinámicos indican que el estrato superior se comporta como un sistema de flujo pistón, mientras que el inferior presenta condiciones de mezcla completa. Los puntos de entrada y salida del estero se ubican dentro del área de influencia del estrato superior (es decir el estero no contribuye masa de fósforo al estrato inferior del lago, ver Figura). El único mecanismo de transporte de fósforo desde el estrato superior al inferior se produce debido a sedimentación. El lago puede asimilarse a un paralelepípedo rectangular con un área superficial de 20000 m<sup>2</sup>, una altura total de 8 m, y una longitud de 500 m.

Estudios de laboratorio muestran que el fósforo presente en el estrato superior no sufre ningún tipo de reacción química, mientras que el fósforo del estrato inferior se consume siguiendo una ley de primer orden cuya constante es igual a 0.2 1/día a 20°C. Para diferentes temperaturas del agua se utiliza:

$$(k_1)_T = (k_1)_{20} \cdot \theta^{T-20}$$

con  $\theta$  igual a 1.032.

- (1) Suponiendo condiciones estacionarias, encuentre expresiones algebraicas (no numéricas) que describan la concentración de equilibrio de fósforo a la salida del lago (en el estero) y en el estrato inferior.
- (2) Calcule la concentración de equilibrio de fósforo, a la salida del lago y en el estrato inferior, para las condiciones indicadas en el problema.
- (3) Si la concentración de fósforo en el estrato inferior es superior a 0.015 mg/L, determine cual debiera ser la concentración de fósforo descargada por la industria para que este límite no se supere. ¿Cuál sería la concentración a la salida del lago para estas condiciones?