

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

FUNDADA Y SOSTENIDA POR EL CUERPO NACIONAL DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Redactor-Presidente..... Ilmo. Sr. D. Federico Rivero O'Neale, Inspector general del Cuerpo.
Redactores..... Los Sres. Presidentes de las Comisiones regionales de Ingenieros.
 D. Toribio Cáceres, Profesor de la Escuela de Caminos.
 D. Enrique Latre, Ingeniero de Caminos (Sección de Información).
 D. Manuel Maluquer, Ingeniero del mismo Cuerpo, *Secretario*.
Colaboradores..... Todos los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

SE PUBLICA LOS JUEVES

Redacción y Administración: Puerta del Sol, 9, pral.

REVISTA EXTRANJERA

Acerca de la sedimentación.

(Extractado de «*Proceedings of the A. S. of Civil Engineers*»,
Abril 1904.)

Desde que Sedden publicó en el *Journal of the Association of Engineering Societies* (año 1889, pág. 477), su estudio acerca de la sedimentación, se ha publicado poco acerca de esta materia que, sin embargo, ha adelantado en la práctica. Se ha observado, por ejemplo, en San Luis, que la operación continua da tan buenos resultados como la intermitente propuesta por Sedden, y permite colocar el desagüe a un nivel más elevado, con economía evidente. El uso de las pantallas (*Baffles*, literalmente *burladeros*), permite obtener de un depósito pequeño el mismo resultado que de uno grande desprovisto de esta disposición.

Esperamos que el estudio teórico de estas cuestiones permitirá llevar el asunto a mayores perfeccionamientos prácticos.

La marcha del fenómeno de la sedimentación es en la práctica muy compleja; tomaremos casos hipotéticos más sencillos, de los cuales podrán deducirse aproximadamente las condiciones de la práctica.

Hipótesis general.—Supondremos: Primero, que cuando una de las partículas suspendidas en el agua toca en el fondo del depósito, ni se mueve a lo largo de él, ni se vuelve a levantar; y segundo, que todas las partículas tienen el mismo valor hidráulico; es decir, que tardan lo mismo en llegar desde la superficie al fondo.

Y sean:

t) Tiempo que tarda una partícula en llegar de la superficie al fondo en agua quieta.

a) El tiempo de sedimentación en marcha intermitente; y en marcha continua la relación entre la capacidad del depósito y la cantidad de agua que pasa por él durante la unidad de tiempo.

n) El número de depósitos, si son varios.

x) La proporción de sedimento en suspensión restante con relación al que había al principio, tomado por unidad.

Proposición primera.—Supongamos un depósito lleno de agua turbia en reposo perfecto.

Cada partícula descenderá hacia el fondo con la velocidad admitida, y al cabo de un tiempo dado habrá una capa superior de agua clara, cuyo espesor será la longitud correspondiente a la velocidad de caída para el tiempo dado. Entre tanto se habrá depositado en el fondo una cantidad de sedimento igual al contenido originalmente en la capa que actualmente está clara. El tiempo necesario para la sedimentación total será t . Durante un tiempo menor a la proporción sedimentada será $\frac{a}{t}$ y la pro-

porción en suspensión será

$$x = 1 - \frac{a}{t} \quad (1).$$

En la práctica hay movimientos que, mezclando el agua clara con la turbia, perturban la marcha indicada.

1.º Por que se conserva durante mucho tiempo la energía cinética de entrada del agua, perseverando los movimientos giratorios. Se atenúa proporcionando un ingreso de agua de muy pequeña velocidad.

2.º En depósitos abiertos, por la acción del viento.

3.º Por los cambios de temperatura, que, aun siendo pequeños, producen variaciones de densidad y las corrientes consiguientes.

El estudio de Sedden contiene desarrollos de esta proposición y detalles acerca de los movimientos y mezclas señalados.

Proposición segunda.—Supongamos un depósito con agua turbia, y que durante la sedimentación se mezcla el agua de tal modo que la densidad de la materia en suspensión es uniforme en todo el depósito. En un tiempo da el movimiento del agua será inapreciable, y se podrá aplicar la fórmula (1), según la cual

el sedimento en suspensión será $1 - \frac{da}{t}$. Como la proporción

de la materia en suspensión al fin de cada intervalo estará con la correspondiente al principio del mismo en la misma relación para todos los intervalos, se obtendrá la proporción restante al cabo de un tiempo, multiplicando la relación correspondiente al primero por sí misma, tantas veces como intervalos han transcurrido, y se tendrá (1):

$$x = \left(1 - \frac{da}{t}\right)^{\frac{a}{da}} \quad (2).$$

Para resolverla, haciendo $a = t$ y desarrollando por la fórmula del binomio, se encuentra que para la relación $\frac{a}{t} = 1$ el valor de x será $x = 0,367878$. Para otros valores de la relación $\frac{a}{t}$ los valores de x pueden deducirse de éste por logaritmos.

La mezcla supuesta es irrealizable; para obtenerla se necesitarían velocidades infinitas, pero representa un caso límite de una serie cuyos términos intermedios existen realmente, y cuyo estudio se facilita con la consideración de estos casos extremos. Si el grado de mezcla es menor que el supuesto, la marcha de la sedimentación será más rápida.

Modificación de la proposición segunda.—Supongamos la mezcla tal que sea constante la densidad de materias en los $\frac{7}{10}$ inferiores

(1) Esta fórmula está equivocada en el original, evidentemente por errata de imprenta. El valor que toma para $t = a$ es en el límite, igual a $\frac{1}{e} = N$. del T.

de la altura, y en los $\frac{3}{10}$ restantes, decreciente desde dicha densidad constante hasta o en la superficie, y que la densidad media sea los $\frac{9}{10}$ de la densidad en el fondo.

Estos supuestos corresponden bastante bien con las densidades de sedimento observadas en los depósitos. La cantidad en suspensión es 0,9, de la que habría, si la densidad fuese uniformemente la del fondo y la densidad de la capa de fondo, que es la que deposita el sedimento, será de $\frac{1}{0,9}$ de la que habría si la mezcla fuese total. La velocidad de sedimentación en un tiempo determinado depende sólo de la densidad del fondo, y será, por tanto, $\frac{1}{9}$ más rápido de lo que sería con una mezcla completa.

Se alcanzará un valor dado de x en las $\frac{9}{10}$ partes del tiempo necesario para conseguirlo si la mezcla fuese perfecta.

Hay que corregir este resultado, porque al principio la densidad será uniforme. Admitiremos que el tiempo necesario para el aclaramiento inicial de la capa superior sea $\frac{1}{10}$ de t , y la ganancia será $\frac{1}{10}$ de todo el tiempo restante.

No se calcula la ecuación de esta nueva línea; pero trazada por puntos la correspondiente a la hipótesis anterior, es fácil de obtener gráficamente (1) tomando en ambas $\frac{a}{t}$ como abscisas y α como ordenadas.

La línea trazada así puede admitirse como la representación de la velocidad de la sedimentación en el sistema intermitente. Para compararla con la correspondiente a la del sistema continuo, en el cual la corriente atraviesa los depósitos, es necesario tener en cuenta el exceso de capacidad necesario en el sistema discontinuo, porque antes de comenzar la sedimentación hay que gastar tiempo en llenar el depósito, y después de terminada hay que gastarlo también en vaciarlo. El tiempo necesario dependerá de las instalaciones, y admitiendo que sea igual al tiempo útil, será necesario duplicar el volumen que, según el cálculo, sea necesario para obtener un resultado determinado. Según esta hipótesis, la curva tendrá un valor de $\frac{a}{t}$ doble que la últimamente trazada para un mismo valor de x .

Proposición tercera.—Supóngase un depósito con funcionamiento continuo; en él entra el agua por un lado y sale por otro de un modo continuo, y supóngase que el agua del depósito se mantiene continuamente mezclada de tal modo que la densidad de la turbia sea uniforme en todo él.

La densidad será x . En un tiempo da se depositará una proporción $\frac{da}{t}$ y una cantidad total igual a $x \frac{da}{t}$. La cantidad de agua (2) que habrá entrado será $\frac{da}{a}$ y como el valor de x correspondiente al agua que entra es la unidad, la cantidad depositada será $\frac{da}{a}$. La cantidad de sedimento arrastrado por el agua

que sale será $x \frac{da}{a}$; y la cantidad depositada será igual a la diferencia entre la cantidad de sedimento del agua que entra y la que sale; por tanto:

$$\frac{xda}{t} = \frac{da}{a} - \frac{xda}{a},$$

de donde

$$x = \frac{1}{1 + \frac{a}{t}} \quad (3).$$

Primera modificación de la proposición tercera.—Supóngase que el agua lleva menos materias en suspensión cerca de la superficie que en el fondo, por no ser la mezcla perfecta.

La sedimentación será más rápida y la corrección puede computarse en un 10 por 100, como se ha hecho en la proposición segunda.

Segunda modificación.—Supóngase la velocidad de entrada del agua suficiente para impedir toda sedimentación en una cierta área.

En este caso, la rapidez de la sedimentación total vendrá disminuida en la relación de dicha área al área total. Esta corrección y la anterior se compensan en parte.

Proposición cuarta.—Admitamos dos depósitos situados, de tal modo, que el agua al salir del uno penetre en el otro, siendo las demás condiciones las mismas admitidas para la proposición tercera.

El periodo de tiempo para el primer depósito se convierte en $\frac{a}{2}$.

La proporción de sedimento restante, al salir del primer depósito, será

$$\frac{1}{1 + \frac{a}{2t}},$$

y como en el segundo se reducirá en la misma relación, la proporción al salir del segundo, será

$$x = \left(\frac{1}{1 + \frac{a}{2t}} \right)^2 \quad (4).$$

Proposición quinta.—Los depósitos son en número de n .

$$x = \left(\frac{1}{1 + \frac{a}{nt}} \right)^n \quad (5).$$

Si un depósito es muy largo, sus dos extremos obrarán con cierta independencia y se acercarán a hacer el efecto de dos depósitos; puede entonces aplicarse la (5) a un sólo depósito, haciendo $n = 1,5$.

Proposición sexta.—Sean infinitos depósitos, es decir, una corriente en la cual el agua se mezcle de arriba á abajo, pero no en el sentido del movimiento; entonces n es infinito y

$$x = \left(\frac{1}{1 + \frac{a}{nt}} \right)^n = \left(1 - \frac{a}{nt} \right)^n \quad (6).$$

Esta ecuación da para x los mismos valores que la (2).

Proposición séptima.—Admitase que hay áreas en los rincones, etc., que permanecen fuera de la corriente, ó casi fuera.

Hay que descontarlas total ó parcialmente, en proporción al sedimento en suspensión que la corriente conserve en ellas.

(1) En la hipótesis anterior conocemos dos valores de x (cantidad de materia que queda en suspensión) para $\frac{a}{t} = 0$ $x = 1,00$, y para $\frac{a}{t} = 1$ $\alpha = 0,368$, y la curva deducida es tan parecida á una recta, que los errores inherentes al procedimiento no se agravarian absolutamente nada por tomar en vez de la ecuación (2) esta otra bien sencilla y que da resultados casi idénticos,

$$\alpha = 1 - 0,632 \frac{a}{t}.$$

En esta hipótesis y en la siguiente pueden trazarse rectas con igual facilidad.—N. del T.

(2) No se olvide el nuevo significado de la letra a .—N. del T.

Proposición octava.—El agua tiene en todo el fondo ó en parte de él tal velocidad, que no permite á las materias en suspensión depositarse en la solera (1).

Proposición novena.—Supóngase un depósito de muy poca profundidad. Hasta aquí se ha encontrado la rapidez de la sedimentación en función de $\frac{a}{t}$. Seeding y otros han opinado que la utilidad de un depósito depende de su área, más que de su volumen. Examinemos esta cuestión, y sean

b El área del depósito.

c Su capacidad.

d Su profundidad.

e La cantidad de agua, tratada por unidad de tiempo.

v El valor hidráulico del sedimento, ó sea la velocidad á la cual se deposita en agua tranquila.

Entonces

$$a = \frac{c}{e} = \frac{bd}{e} \text{ y } t = \frac{d}{v}$$

de donde

$$\frac{a}{t} = \frac{bv}{e} \quad (7).$$

De modo que en todos los casos estudiados la rapidez de sedimentación es función del valor hidráulico de la turbia y de la cantidad de agua sometida al tratamiento por unidad de tiempo; pero es independiente de la profundidad. Un depósito somero dará el mismo resultado que uno profundo á igualdad de área.

Para calcular los resultados de un depósito obsérvese que en la fórmula $7 \frac{e}{b}$ sería la velocidad necesaria para que el agua

atravesase verticalmente el depósito, y $\frac{a}{t}$ se obtendría dividiendo el valor hidráulico v por esta velocidad hipotética; para este cálculo no se necesita conocer la profundidad.

El único modo como la profundidad influye es evitando velocidades excesivas en el fondo.

Proposición décima.—El agua corre por una capa superficial delgada, y el agua de debajo está en reposo ó casi.

Esto puede suceder si el agua entra más caliente que la que estaba ya en el depósito.

Según la proposición anterior, el depósito se convertirá en otro más somero, cuyo fondo es de agua y podrá hacer el mismo servicio, salvo que siendo indefinida la línea de transición entre el agua corriente y el agua quieta, la cuestión de la velocidad en el fondo queda eliminada, condición tan favorable que sugiere la conveniencia de instalar tabiques en el fondo para mantener el reposo total ó relativo las capas profundas.

Proposición undécima.—Supóngase, por el contrario, que el agua de la capa del fondo se mueve, permaneciendo quietas las capas superiores. Este caso puede presentarse al introducir agua más fría que la del depósito; es aplicable lo dicho acerca de los depósitos someros; pero la cuestión de las velocidades de fondo se agrava.

Proposición duodécima.—Admitase un depósito provisto de vertederos de superficie extendidos uniformemente en toda su área, y un ingreso de agua cerca del fondo.

La capa superficial se aclara rapidísimamente; se comprende que si se pudiera realizar la instalación evitando toda mezcla, se habría conseguido una gran ventaja.

Esta idea se aplicó primero en los depósitos de sedimentación de aguas de alcantarilla de Rother-Rothe, construídos en Alemania, y más modernamente en las obras de abastecimiento de Denver.

Si pudieran conseguirse las condiciones enunciadas, la ley

(1) Nos limitamos á traducir el enunciado. Sigue una larga discusión, llena de vaguedades, de la cual nada aprovechable se saca.—N. del T.

de sedimentación sería la deducida para la proposición primera; pero parece posible ponerse en condiciones de que la curva representativa sea, término medio, entre las correspondientes á la primera y á la segunda.

(Se continuará.)

ABASTECIMIENTO DE AGUA DE BUENOS AIRES

(CONCLUSIÓN)

El terreno disponible en Recoleta no permitía proyectar la extensión de depósitos y filtros necesarios para clarificar los 222.000 metros cúbicos de agua que se puede levantar del río.

4.º Cuatro filtros con reservas de agua filtrada y una superficie filtrante total de 31.291 metros cuadrados, que junta con la entonces existente, se elevaría á 72.934 metros cuadrados. Descontando el 10 por 100 por limpieza, etc., el rendimiento diario de los filtros existentes y de los proyectados sería de 157.500 metros cúbicos, siempre con la velocidad de filtración de 10 centímetros por hora. Pero ya la experiencia de muchos años había demostrado que con tal velocidad no se conseguía el agua ni medianamente clara en las épocas en que la del río viene muy turbia, y se llegó á la conclusión de que no era aceptable una velocidad mayor de siete centímetros por hora. Con este coeficiente la producción de agua filtrada quedaba reducida á unos 110.000 por día.

Las reservas de los filtros proyectados podrían contener 92.320 metros cúbicos de agua filtrada y 143.528 junto con las reservas entonces existentes.

5.º Una nueva casa de bombas impelentes; de triple expansión, con motores de 1.077 caballos.

6.º Transformación de los motores de las bombas impelentes denominadas núm. 1 antiguas, en motores Compound ó de triple expansión.

7.º Establecimiento de dos nuevas líneas de caños de bombeo, de 0,91 m. de diámetro, que condujeran directamente el agua filtrada á la cañería maestra de la calle Rivadavia, por Libertad y Centro América, y tuvieran ramales del mismo diámetro al gran depósito distribuidor, que se desprendieran de la línea principal en la calle Córdoba y permitieran llegar hasta los tanques de aquél el exceso del bombeo sobre el consumo.

8.º Modificación en la entrada y salida del agua en el gran depósito para hacer posible el paso directo del agua de las cañerías de bombeo á las cañerías de distribución, sin subir previamente á los tanques, ó bien dirigir el agua á los tanques de los diferentes pisos de aquél, y al mismo tiempo hacer el bombeo directamente á la ciudad, aprovechando la independencia con que pueden funcionar las diferentes máquinas impelentes y sus correspondientes caños de bombeo.

9.º Extensión de la red de cañerías á nuevos distritos.

Con excepción de la construcción de los nuevos depósitos de clarificación y de una parte de los filtros y de la transformación y sustitución de los motores de la casa de bombas núm. 1, antiguas, todas las demás obras que figuran en este plan, han sido terminadas y están en servicio actualmente.

Por algún tiempo más, serán suficientes las máquinas impelentes en su estado actual, para el servicio á que están destinadas, dejando las proyectadas reformas para cuando sean indispensables. En cuanto á filtros, se ha construído uno de los cuatro proyectados.

La oportuna adopción, á fines de 1900, del empleo de coagulantes como auxiliares de los filtros de arena en la clarificación del agua, y los felices resultados obtenidos con ellos, en experiencias en grande escala durante dos años, ha modificado las ideas de la Comisión respecto á la necesidad de nuevos filtros y