

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE CAÍDA DE UNA MASA DE SEDIMENTO EN AGUA EN REPOSO

Alba Adell, Raul Sosa y Allen Bateman

GITS-UPC. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos - Jordi Girona 31-34 Barcelona - 639217557
E-mail: allen.bateman@upc.edu

Resumen

El proceso de *capping* en un lago con sedimentos contaminados puede hacerse mediante el vertido de material granular desde la superficie. Este proceso tiene como objeto cubrir el sedimento contaminado con material limpio, de tal forma que lo impermeabilice del contacto con el medio acuático y evite su dispersión.

Se han realizado experimentos con dos tamaños físicos diferentes. Uno dejando caer medio millar de quilos en un tanque de 5x5x5 m y otro a escala reducida, dejando caer varias masas de 60 y 200 g en un tanque de 50x50x60 cm. Los resultados indican que la fuerza del material al caer y los fenómenos complejos que se dan durante su trayectoria hacen de este proceso un verdadero reto experimental. Uno de estos fenómenos es la formación de anillos concéntricos en el depósito una vez caído el material.

En el modelo a escala pequeña se analizó la velocidad de caída del grupo, la deformación del material durante la caída, y la influencia del aire dentro del proceso de caída. El proceso en general es no lineal con cambios drásticos en la velocidad de caída, influenciada por los arreglos que va teniendo la arena, el aire y el agua durante la caída.

En el experimento a escala grande, como el material utilizado es de granulometría extendida, se observó una segregación del material de acuerdo a los círculos concéntricos que se forman en el depósito.

Introducción

Uno de los proyectos más importantes, a nivel español, de remediación de sedimentos contaminados ha sido el realizado en el río Ebro a su paso por la localidad de Flix (Tarragona). Más de un siglo de actividad industrial a orillas del río desde 1908, concretamente en el embalse de Flix 1949, generó más de 800.000 ton de sedimentos contaminados, principalmente por mercurio, compuestos organoclorados y radionucleidos.



Figura 1.- Fotografía aérea del embalse de Flix antes de la descontaminación (Google Earth, 2009).

Para tratar esta problemática, se realizó un tratamiento ex situ, que involucra la extracción del sedimento contaminado del medio acuático. No obstante, en la etapa final de la descontaminación del embalse, surgió la necesidad de aplicar una tecnología de remediación in situ conocida como *capping*. El *capping* in situ se utiliza en los Estados Unidos desde principios de los años 80 y consiste en la colocación de un revestimiento de sedimentos limpios sobre un depósito in situ de sedimentos contaminados. De esta forma se crea un nuevo sustrato inferior, y dichos sedimentos quedan inmovilizados y

aislados del medio ambiente. El *capping* se puede realizar con sedimentos limpios como arenas o gravas, o puede implicar un diseño más complejo con múltiples capas de sedimentos, geotextiles y geomembranas.

La Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) ha realizado dos estudios experimentales entorno a la práctica del *capping*. En el primer estudio, se realizaron ensayos a escala real para determinar los parámetros de diseño y de ejecución del *capping* en embalses. A raíz de este estudio, se originaron una serie de incertidumbres en cuanto a la forma en que se deposita el material al verterse desde la superficie del agua. Esto derivó a la realización de unos ensayos de laboratorio con el objetivo de estudiar diferentes parámetros hidrodinámicos que permitieran entender el comportamiento del material durante su caída a través del medio acuático.

Materiales y métodos

Los ensayos a escala real consisten en dejar caer, de golpe, una masa entre 500 kg y 1000 kg de material de cantera sobre un depósito con agua de 5x5x5 m. El material se dejó caer con una cuchara bivalva a diferentes alturas respecto la superficie del agua.

Los ensayos de laboratorio consistieron en dejar caer una masa de sedimento en agua desde la superficie de la misma. Se utilizó un depósito de 50x50x60 cm de metacrilato. El material se introduce en un tubo transparente y posteriormente se quita súbitamente una placa del tubo para dejar caer el material por su propio peso. El proceso de caída se filma con una cámara canon a una velocidad de 50 fps. Se ilumina adecuadamente para mantener el mayor contraste en la fotografía. Se usan masas de 60 y 200 g y una profundidad de agua de 10, 20, 30, 40 y 50 cm. Con las fotografías se mide la deformación de la masa y la posición a lo largo de la caída. Además, se han observado diferentes fenómenos, entre los cuales, el anillo que se forma en el fondo del tanque y que ya se observó en el experimento a gran escala. (Adell, 2017).

Descripción del fenómeno y resultados

En los ensayos a escala real, se observa que el material, al penetrar en el agua, crea un vórtice tridimensional alrededor del eje z (vertical de entrada del material) en forma de tubo o rosquilla. Este vórtice desparrama rápidamente los finos y arenas por todo el depósito, mientras que el árido grueso cae en forma de bulbo al fondo. El material, al tocar el fondo (de hormigón), llega disperso en forma de círculo, entonces, el vórtice antes nombrado arrastra hacia afuera del eje z el sedimento que rodea la zona central del círculo. El sedimento de la parte central se ve menos afectado por el vórtice, ya que éste no puede alcanzar el centro al ser de sección circular. Debido a esto, se forman dos aros de sedimento grueso diferenciados. En la Tabla 1 se pueden ver las manchas de sedimento generadas en diferentes situaciones. Otro fenómeno que se da al llegar el sedimento al fondo es el de la incursión de las gravas finas bajo las gruesas (Figura 2). Las primeras en tocar el fondo son las gruesas, pero después, gracias a la turbulencia, éstas sufren pequeños movimientos y los huecos generados son rápidamente rellenados con gravas finas. Este fenómeno seguramente no se produciría si el lecho fuese más blando, ya que los áridos más gruesos quedarían algo incrustados en el lecho. Más tarde caen los finos y arenas encima de los áridos gruesos.

Tabla 1.- Comparativa de ensayos a gran escala. (Bateman, 2015).

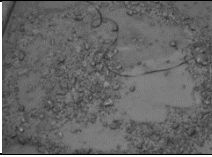
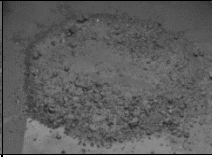
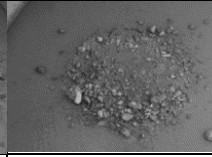
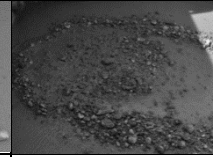

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
M sedimento	1000 kg	1000 kg	500 kg	1000 kg	900 kg
H agua	2,4 m	2,4 m	2,4 m	2,4 m	1,6 m
H caída libre	0 m	2 m	2m	1 m	1 m
Foto cenital					
Dimensiones	$\Phi_{total} = 3,4 \text{ m}$ $\Phi_{centro} = 1,6 \text{ m}$ Ancho aro ext. = 0,3 m L entre aros = 0,6 m $H_{centro} = 5,5 \text{ cm}$ $H_{aro \text{ ext.}} = 5 \text{ cm}$	$\Phi_{total} = 2,8 \text{ m}$ $\Phi_{centro} = 1 \text{ m}$ $H_{centro} = 6 \text{ cm}$ $H_{aro \text{ ext.}} = 11 \text{ cm}$	$\Phi_{total} = 1,7 \text{ m}$ $\Phi_{centro} = 0,8 \text{ m}$ $H_{centro} = 12 \text{ cm}$ $H_{aro \text{ ext.}} = 6 \text{ cm}$	$\Phi_{tot, medio} = 3,1 \text{ m}$ $\Phi_{centro, medio} = 1,35 \text{ m}$ Ancho aro ext. = 0,2 m L entre aros = 0,68 m $H_{centro} = 11 \text{ cm}$ $H_{aro \text{ ext.}} = 11 \text{ cm}$	$\Phi_{total} = 2,45 \text{ m}$ $\Phi_{centro} = 1,2 \text{ m}$ $H_{centro} = 5 \text{ cm}$ $H_{aro \text{ ext.}} = 14 \text{ cm}$
Granulometría	Dos aros de árido grueso. Gravilla depositada bajo la grava, finos y arenas encima.	Áridos gruesos acumulados en el aro exterior. Gravilla depositada bajo la grava, finos y arenas encima.	Similar al ensayo 2 pero con una mancha más pequeña.	Similar al ensayo 1 pero en forma elipsoidal.	Menos disperso que el ensayo 4, se puede ver la transición de la dispersión a medida que aumenta la profundidad.



Figura 2.- Estratigrafía aro exterior, ensayo 1. (Bateman, 2015).

Hay que decir que estos fenómenos debidos a la turbulencia generada se ven muy afectados por la altura a la que se deja caer el material y la altura de columna de agua hasta el lecho. Cuando el material se deja caer a cierta altura genera menos turbulencia que si se deja caer a poca altura o a nivel. Esto se debe a que durante la caída libre el material se disgrega debido a la aceleración que sufren las partículas, que al aumentar la velocidad se separan entre ellas, permitiendo así dejar pasar el agua por el interior del bulbo de sedimento. Esto parece disminuir la turbulencia.

En cuanto a los ensayos a pequeña escala, el primer efecto que se observa es en la entrada de la masa en el agua, momento en el que empiezan las mediciones con la cámara. A pesar de lo aparatosa que es la entrada, una vez el material ha entrado, se presenta como una esfera casi sin deformaciones. La estructura al caer dentro del agua, además de sufrir aceleraciones y desaceleraciones súbitas, va cambiando su forma.

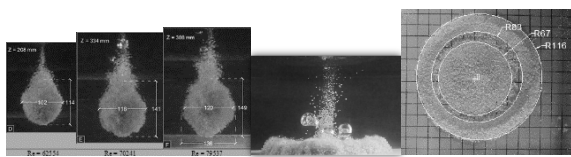


Figura 3.- Imágenes de los ensayos con 200 g de masa a diferentes alturas de agua. En la banda azul se muestra el número de Reynolds en cada imagen. (Adell, 2017).

Se presentan varios fenómenos complejos de evaluar, como son la interacción entre el sedimento, el agua y el aire que está entre los poros. En tanto que el material cae, el agua empieza a penetrar entre los poros, el aire atrapado en su interior se ve sometido a fuerzas de empuje que lo incitan a ir hacia arriba. Sólo después de una larga trayectoria se observan algunas burbujas que van saliendo de la masa. Cuando el material impacta con el fondo, el resto de aire comienza a subir, y el material forma en el fondo una estructura en forma de anillo que cambia de diámetro según la masa y la profundidad que tuvo de caída el sedimento. Por otra parte, el espacio que ocupa el

material al caer va en aumento, por un lado, debido a la presión interna del aire atrapado y por otra parte por el esfuerzo que ejerce el agua al entra entre los poros.

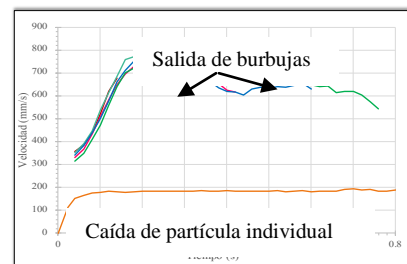


Figura 4.- Velocidad de caída para alturas de 10, 20, 30, 40 y 50 cm de profundidad y masa 200 g. Se acompaña con la velocidad de caída de una partícula individual. (Adell, 2017).

En Figura 3, se observa en las 3 primeras imágenes cómo se va transformando el volumen del material al caer. En la tercera imagen se observa la formación de un vórtice en forma de toro de revolución y el aire saliendo expulsado. Es este vórtice el que forma la configuración final de la arena. En la Figura 4 se observa como la partícula individual cae con una velocidad 3,5 veces inferior que la velocidad de grupo. La salida de burbujas presenta un cambio en el comportamiento de la velocidad de caída.

Conclusiones

Al verter material a cierta distancia de la superficie del agua la dinámica del material al entrar en el agua se diferencia bastante. El material sufre disgregación espacial antes de entrar en el agua, debido a la aceleración de la gravedad. La masa a medida que cae se va expandiendo debido a la entrada de agua y a la salida de aire, adquiriendo además más energía. Una vez se deposita el material en el fondo forma anillos concéntricos que se diferencian por la cantidad de material y por la altura de agua. A más material se crean depósitos internos y a mayor altura de caída menos.

Referencias

Adell, A., (2017). "Estudio experimental de la caída de material granular sobre un medio acuático en condiciones hidrostáticas" Tesina. UPC. Bateman, A., (2015). "Experimento sobre la segregación de material de cantera para cubrimiento de la zona de obras de Flix" Informe GITs-UPC.