

MACRORUGOSIDAD EN LECHOS MÓVILES

Bateman, A.¹; Onorati, B.²; Sosa, R.¹; Marín B.¹

¹Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos GITS-UPC. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña

²Scuola di Ingegneria. Università degli Studi della Basilicata, Potenza, 85100, Italia.

Resumen

Se ha escrito bastante sobre la macrorugosidad en lechos fijos, pero poco se habla de la influencia o acción de la macrorugosidad en lechos móviles. Este documento presenta un análisis cualitativo de la erosión local y movilización del sedimento en lechos móviles en presencia de macrorugosidad. La macrorugosidad es una forma de aumentar la rugosidad en una zona concreta del lecho marino o fluvial, las consecuencias son diversas, pero una de ellas es mantener activa la turbulencia local y por tanto control de la misma aportando más o menos rugosidad al lecho. La macrorugosidad se ha simulado con objetos de diferentes formas colocados a lo largo de un canal de 2.52 m de anchura en régimen de aguas claras, creando una faja de objetos con anchura de al menos 60 cm. Esto crea un corredor central dentro del canal que se comporta diferente que los laterales con el fin de observar su influencia local y general. Se han usado bloques cúbicos de hormigón colocados de manera que una cara sea normal al flujo, bloques cúbicos de hormigón girados 45° respecto de la configuración anterior, se han usado elementos en forma de ángulo, placas normales al flujo, inclinadas y otras geometrías. Se observa que cada elemento tiene comportamientos muy diferentes respecto a la erosión/sedimentación y transporte del material que se encuentra a su alrededor.

Palabras Clave: Macrorugosidad, tensión de fondo, erosión local, inicio movimiento

Introducción

Uno de los temas más complejos de la hidráulica evidentemente es la resistencia al flujo. Esta es el resultado de la interacción entre las superficies y obstáculos que encuentra el flujo a su paso y el propio fluido.

La rugosidad produce un efecto de intercambio de cantidad de movimiento que se traduce en lo que conocemos como turbulencia. Esta puede producirse por la interacción entre fluido y superficies como en la interacción entre las partes del propio fluido.

Así una superficie lisa produce menos turbulencia que una superficie rugosa. Es decir, existe menos transferencia de momentum transversal a la dirección del flujo en las superficies lisas que en las rugosas.

Las macrorugosidades artificiales como las que se mostraran en este trabajo pretenden dar una idea global de su comportamiento, así las formas utilizadas son diversas tales como cubos, placas y otras formas más complejas.

Otro fenómeno que provoca una macrorugosidad es la adición de una fuerza local externa en la masa de fluido. Ya que el flujo al chocar con los elementos macrorugosos tiende a acelerarse cambiando de dirección, esta aceleración está provocada por la fuerza adicional que ejerce el elemento sobre el fluido. Una de las consecuencias de este intercambio de fuerzas es la creación de vórtices que pueden ser de eje horizontal o vertical. Las placas colocadas oblicuamente al flujo provocan la formación de vórtices de eje horizontal que son capaces de generar tensiones cerca del fondo superiores a las que está soportando el lecho si no estuviesen estas macrorugosidades. Nikuradse, J. (1926), Sayre W, Albertson (1961), Koloseus J, Davidian, J. 1966,

Christodoulo, (2014) son algunos autores que han realizado estudio de macrorugosidades en lecho fijo, Odgaard, 1985 estudia paneles sumergidos colocados en lechos fluviales que es otra forma de colocar macrorugosidades.

Descripción de los elementos

Se probaron diferentes elementos para colocar en el lecho como macrorugosidad. El primer elemento que pareció interesante probar fue un cubo de 2.7 cm de lado. Adicionalmente se probaron otras formas como se muestra en la **Figura 1**. Los cubos se alinearon con el flujo a 90° y 45° y los ángulos a 90° y 30°. Otros elementos solo se han comprobado individualmente.

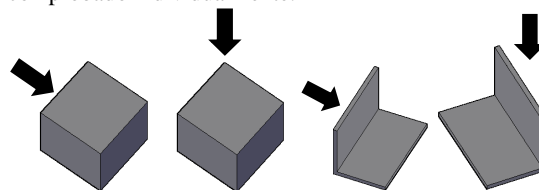


Figura 1. Dos de las formas principales que se han analizado en dos diferentes posiciones

Descripción de los experimentos

Los experimentos se han realizado en el laboratorio de morfodinámica fluvial I de GITS-UPC en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Se usó un canal de 9 m de longitud por 2.52 m de ancho que comporta una zanja en el medio con una longitud de 2.50 m y una profundidad de 50 cm. La zanja se rellena de arena de $D_{50}=1.6$ mm y se allana con una pendiente de 1.10^{-3} . El inicio del movimiento de esta arena con las condiciones de ensayo se da para 100 l/s, con una profundidad de 10 cm, aproximadamente la tensión de fondo es de $1N/m^2$. Los ensayos con macrorugosidades se hacen para tensiones de fondo menores a este valor con un caudal de 59 l/s y partiendo con un nivel de agua de 21 cm, con ello se pretende conocer la inducción al inicio del movimiento de los elementos colocados. Así el ensayo comienza para valores muy bajos de tensión durante lo cual no ocurre nada, esta se va incrementando simplemente bajando el nivel de la condición de contorno. A medida que la velocidad y tensión van incrementándose, la erosión local en el sistema comienza a desplazar las partículas de arena hacia aguas abajo. Hay geometrías de los elementos que con las mismas condiciones hidráulicas son más eficientes para movilizar el sedimento. Se probaron elementos aislados y en conjunto por ahora solo para los cubos. El conjunto de cubos se distribuyó manteniendo una distancia de 10 cm entre ellos y cada fila. Las filas se desplazan entre sí con la relación aurea para evitar al máximo elementos alineados con el flujo. En el diagrama de Shields de la Figura 2 se presentan los valores en que se han realizado algunos de los experimentos.

Cuando el nivel de agua es de 9.5 cm comienzan a moverse las pequeñas partículas a una tensión adimensional de 0.015 y para 7.5 cm comienza un fuerte proceso de erosión local para una tensión adimensional de 0.023. Ambas por debajo del inicio del movimiento sin macrorugosidad. En la imagen de la Figura 3 se observa uno de los ensayos con la serie de cubos a 45° con el flujo y algunos elementos individuales en las franjas laterales.

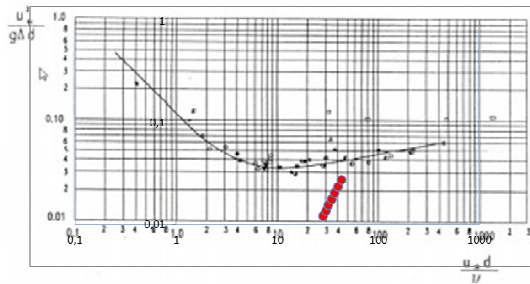


Figura 2. Representación de las condiciones de tensión adimensional en condiciones hidrostáticas de los experimentos en el ábaco de Shields para cubos dispuestos a 90° con el flujo.

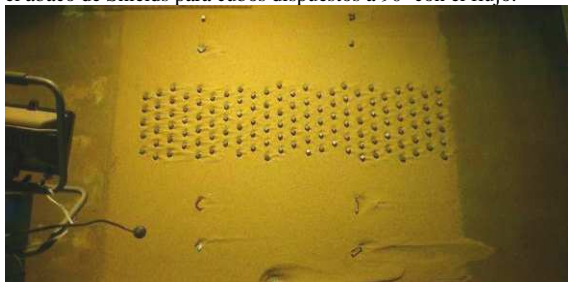


Figura 3. Imagen con los cubos alineados a 45° con el flujo, se observan algunos elementos individuales a lado y lado de la franja central.

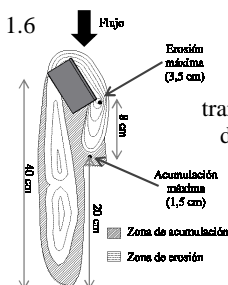
Tabla 1. Muestra de las características de algunos de los ensayos realizados con cubos, las dos primeras líneas a 90° el resto a 45° como en la foto.

Q l/s	h/K -	V m/s	h m	Fr -	τ_b N/m ²	τ N/m ²	τ_{bo}/τ_b -
59	3.8	0.25	0.095	0.26	0.36	0.014	2.9
59	3	0.31	0.075	0.36	0.61	0.024	1.7
69	3.2	0.34	0.08	0.39	0.73	0.028	1.4
77	3.4	0.36	0.085	0.39	0.77	0.030	1.3
84	3.6	0.37	0.09	0.39	0.82	0.031	1.3
100	4	0.40	0.1	0.40	0.90	0.035	1.2
116	4.4	0.42	0.11	0.40	0.98	0.038	1.1
134	4.8	0.44	0.12	0.41	1.07	0.041	1.0
152	5.2	0.46	0.13	0.41	1.15	0.044	0.9

La macro rugosidad en general provoca un aumento local de las tensiones de Reynolds, el material se mueve debido a ello y esto provoca como ya se sabe la erosión local. Pero si una partícula es movida del lecho al avanzar cae atrapada en otro foso de erosión esto crea una dinámica de movimiento de partículas hacia adelante que reptan por el fondo. En este caso partículas de mm avanzan de foso en foso con un 75% de las tensiones necesarias. Esto provoca un transporte adicional del caudal sólido de fondo. Parece coherente pensar que las partículas de menor tamaño puedan entrar en suspensión y ser transportadas aguas abajo por el exceso de turbulencia local, aunque esta hipótesis tendrá que valorarse en un futuro.

Figura 4. Erosión más larga encontrada en los diferentes elementos analizados. Prácticamente triplica la distancia de la alteración de los cubos.

En la Figura 4 se muestra el resultado de la erosión individual en un elemento tipo “L” colocada a 21° con la dirección de la corriente. Se observa erosión que se traslada hacia aguas abajo en unos 40cm. Dado que la “L”



es de tres centímetros, es decir afecta a una longitud en casi 12 veces la longitud del elemento.

Durante los experimentos se observa que existen burst o turbulencias localizadas que se desprenden aleatoriamente de cada cubo.

Los elementos más eficientes son las macrorugosidades en forma de L, no es la forma de L la que influye, sino el efecto de delgadez de la pared. Este efecto forma mayor turbulencia detrás de la pared que si esta tuviese grosor como el cubo. Ya lo observó en su momento Sayre W, Albertson (1961), tal y como se aprecia en la foto de la Figura 3.

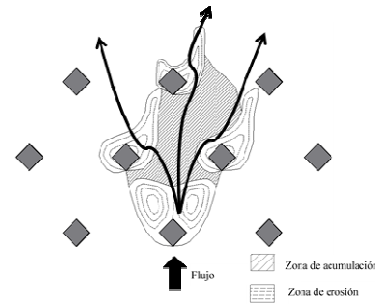


Figura 5. Trayectoria de las partículas que salen de un foso de un cubo genérico hacia los cubos distribuidos aguas abajo.

Conclusiones

La macrorugosidad provoca en el fondo del cauce una erosión local, igual que lo hace una pila de puente en el lecho a su alrededor. Una macrorugosidad con diferente forma es capaz de producir una erosión local mayor que otra. Por lo que hay formas más eficientes en la generación de turbulencia local y aumento de tensiones. La colocación sistemática de elementos macrorugosos en el lecho del cauce provoca el establecimiento o conexión tensional entre uno y otro elemento, de manera que una partícula es capaz de moverse de aguas arriba hacia aguas abajo ininterrumpidamente hasta donde se hayan puesto estos elementos. Contribuyendo a un transporte local de material por el fondo. Se intuye que es posible que se pueda transportar material en suspensión también de forma ininterrumpida debido al aumento local de las tensiones de fondo.

La erosión obtenida por un elemento en forma de L colocada con un ángulo de 21° con el flujo es la que mayor erosión con alcance longitudinal se ha obtenido. Una buena distribución de estos elementos puede disminuir el número de elementos y aumentar la eficiencia de transporte de fondo.

Los elementos han tenido que ser arriostros con sendos tornillos hincados en la arena, de lo contrario la propia erosión local los va volcando y enterrando.

El futuro de estos elementos es el de movilizar sedimento en zonas que se requiere limpiar de sedimento utilizando la propia fuerza del agua.

Referencias

Nikuradse, 1926. Untersuchungen über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Stromungen. Thesis Göttingen, VDI Forschungsheft 281, Berlin, 1926.
 Sayre and Albertson Roughness Spacing in rigid open channels, Transactions, ASCE, 128, 196 pp 343-427
 Koloseus and Davidian, 1966 Free surface instability correlation, Geologicval survey. Water Supply. Paper 1592C. U.S. Government Printing Office, 1966.
 Christodoulo 2014, Equivalent Roughness of Submerged Obstacles in Open-Channel Flows. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 140, No. 2, February 1, 2014. © ASCE, ISSN 0733 429/2014/2-226-230