

EFFECTOS DE LA TURBULENCIA EN EL INICIO DE MOVIMIENTO DE LAS PROTECCIONES DE FONDO EN RÍOS DE ALTA MONTAÑA

Cristina Fernández López, Allen Bateman Pinzón y Vicente Medina Iglesias

Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos. C/ Jordi Girona, 1-3, 08034, Barcelona.
E-mail: allen.bateman@gits.ws, cristina.fernandez@gits.ws, vicente.medina@gits.ws

Introducción

La hidráulica de los cauces de alta montaña continúa estando hoy en día menos estudiada y entendida que la de los ríos aluviales de bajo gradiente hidráulico. Sin embargo, la alta turbulencia generada en estos cauces provoca profundas erosiones que a menudo han de ser paliadas por la mano del hombre. Las protecciones con escollera son actualmente el método de protección contra la erosión más ampliamente utilizado en todo el mundo debido a sus características de flexibilidad, facilidad de puesta en obra y reparación, durabilidad y apariencia natural.

El presente estudio pretende arrojar luz sobre el mecanismo que desencadena el inicio del movimiento de estas partículas en flujos de pendiente motriz acusada y pone de manifiesto la importancia en el proceso de los parámetros turbulentos asociados al flujo, para un tratamiento estocástico del problema, obteniendo así una probabilidad de fallo de la protección.

Turbulencia en alta pendiente

Los flujos macrorrugosos resultan ser altamente turbulentos, las variables del flujo sufren fuertes fluctuaciones. Desde el descubrimiento de los llamados "Bursting events" por Kline (1967), apareció un interés en relacionar estas estructuras coherentes con el inicio del movimiento (Adrian, (2007)). El concepto se basa en considerar los pares de velocidades instantáneas (u', w'), longitudinal y vertical respectivamente. Convencionalmente, "Sweeps" Q2 ($u' > 0$ $w' < 0$) y "Ejections" Q4 ($u' < 0$ $w' > 0$) han sido considerados como máximos responsables del arrastre y transporte de sedimentos, al contribuir positivamente a la tensión de corte en el fondo τ_0 , ya que su fluctuación (tensión de Reynolds $-\rho u' w'$) resulta ser positiva, Cheng y Chiew (1998). Los últimos hallazgos han proporcionado pruebas de que no sólo la magnitud de las fuerzas turbulentas que actúan sobre los granos es decisiva, sino que también su duración de aplicación Diplas et al (2008).

Dispositivo experimental

Los experimentos se han llevado a cabo en el Laboratorio de Morfodinámica Fluvial II "EL CUBO" del Grupo GITS, Grupo de investigación de Transporte de Sedimentos, de la UPC, Universidad Politécnica de Cataluña. La geometría de estudio principal se ha confeccionado con bolo rodado de río con un diámetro medio de $D_{50}=50$ -mm, formando una sección trapezoidal con una pendiente longitudinal del 3%. El material ensayado, dispuesto en una longitud de 1 metro, ha sido grava partida de 3 tamaños diferentes, $D_{50}= 17.7$ -mm, $D_{50}= 29.2$ -mm, y $D_{50}= 43.3$ -mm. El intervalo de caudales ensayados va desde 30 a 260-l/s con incrementos de 2 l/s hasta el punto de inicio de movimiento de las partículas. Para las mediciones de turbulencia se ha utilizado un Velocímetro de tipo Doppler (ADV), midiendo así diferentes perfiles de velocidad asociadas a cada experimento. Las tres granulometrías son ensayadas evaluando dos escenarios en cada caso, partículas (protección) simplemente vertida, y con las partículas conformadas creando así un lecho lo más plano posible, para ver que influencia tiene

la rugosidad en el inicio del movimiento de las partículas. Los resultados hidrodinámicos de los experimentos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.- Resultados hidrodinámicos.

Nº TEST	Flow R. [l/s]	D_{50} [mm]	F	Re	τ_0 [N/m ²]	τ_{cr} [N/m ²]
CG-1	61,6	17,82	1,21	88724	19,37	16,77
CG-2	65,24	17,82	1,18	93654	19,78	16,77
CG-3	137,4	30,02	1,27	175110	27,47	28,24
CG-4	157,4	30,02	1,35	193338	31,4	28,24
CG-5	231,41	51,08	1,19	282722	42,21	48,06
CG-6	260,38	51,08	1,25	320978	46,1	48,06

Modelo conceptual

El modelo conceptual incluye por un lado un esquema energético de las partículas para evaluar el impulso crítico necesario para su movilización, y por otro lado la obtención de la señal de impulso que las tensiones ejercen sobre las partículas.

El impulso crítico es aquel impulso mínimo necesario para poner en movimiento la partícula, y es igual a la variación de cantidad de movimiento (p), $I_{cr} = \Delta p$. Basándonos en el esquema de la figura 1, a una partícula localizada en el lecho se le ha de aplicar una energía (ΔE) para elevar la partícula Δz , así conseguir que ésta sea barrida por la velocidad de corte crítica u_{cr} , obtenida mediante la tensión crítica de Shields (ecuación 1). ΔE es la suma de la $E_{én}$ potencial y cinética gastada en efectuar estos desplazamientos, y es además el trabajo realizado por la fuerza motriz (ecuación 2). Mediante la ecuación 3 se obtiene la I_{cr} asociada a cada tamaño de partícula D_x . Se ha dividido cada granulometría ensayada en 10 clases ($x=10$), de manera que se obtienen 10 tamaños de partícula.

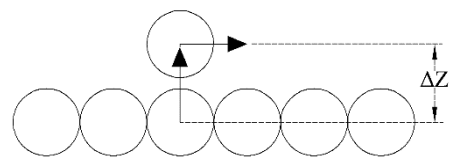


Figura 1.- Esquema conceptual.

$$u_{cr} = \sqrt{\tau_{cr}/\rho_w} = \sqrt{\tau^* \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D \cdot g/\rho_w} \quad [1]$$

$$W = I \cdot u_{cr} = \Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p = \frac{m \cdot u_{cr}^2}{2} + m \cdot g \cdot \Delta z \quad [2]$$

$$I_{cr} = m \left(\frac{u_{cr}}{2} + \frac{g \cdot \Delta z}{u_{cr}} \right) \quad [3]$$

Al considerar la tensión de Reynolds como la fuerza motriz, por unidad de área, ($-\rho u' w'$), los eventos en los cuadrantes Q2 ($u' < 0$ y $w' > 0$) y Q4 ($u' > 0$ y $w' < 0$) contribuyen de forma positiva a la fluctuación, y al impulso aplicado. Mientras que Q1 ($u' > 0$ y $w' > 0$) y Q3 ($u' < 0$ and $w' < 0$) contribuyeren de manera negativa.

El tiempo durante el que se integra la fuerza motriz, para obtener una señal de impulso a comparar con I_{cr} , se corresponde

con la duración de pulso, definido como el tiempo ininterrumpido en el que un evento $u'w'$ permanece en un cuadrante determinado. De esta manera se puede considerar que la fuerza motriz ($-pu'w'$) está aplicada en una misma dirección. Sin embargo, si un pulso en el cuadrante Q2 está precedido por uno en el Q4, la tensión seguirá estando aplicada en una misma dirección (positiva), mientras que en una sucesión de Q1 y Q3 la dirección de aplicación será la misma y negativa. Por lo tanto, se ha considerado que el impulso no solo viene aplicado por pulsos, sino por secuencias de pulsos. Se ha dividido cada señal en paquetes de impulso aplicado por una sucesión de pulsos y secuencias, donde las secuencias consideradas han sido, Q2-Q4, Q4-Q2, Q2-Q4-Q2, Q4-Q2-Q4, Q1-Q3, Q3-Q1, Q1-Q3-Q1 y Q3-Q1-Q3, de manera que una señal de impulso sería una sucesión como el ejemplo a continuación:

(Q1)-(Q2)-(Q3-Q1)-(Q2-Q4-Q2)-(Q3)-(Q4)-(Q1-Q3)-(Q4-Q2)-(Q1-Q3-Q1)-(Q4-Q2-Q4)-(Q3-Q1)-(Q2-Q4)-(Q3-Q1-Q3)-(Q2). El impulso ejercido por cada paquete se calcula mediante la ecuación 4. Sin embargo, para considerar el impulso aplicado a un cierto tamaño de partícula (D_x) se aplica la ecuación 5, obteniendo así una señal de impulso particularizada para cada D_x . Se define la tasa de impulso (T. Imp.) como la probabilidad de que un impulso exceda el valor crítico (ecuación 6).

$$I_i/m^2 = \overline{\Delta p}/m^2 = \int \overline{F/A} dt = \tau_{xzi} \cdot \Delta t \quad [4]$$

$$I_i = (\tau_{xzi} \cdot \Delta t) \cdot A_p \quad [5]$$

$$T. Imp. = P(I_i > I_{cr}) = \frac{\sum I(I_i > I_{cr})}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad [6]$$

Cada vez que se cumple que $I_i > I_{cr}$, la partícula (D_x) recibe la energía necesaria para ser desplazada (Figura 2), y por lo tanto todas las partículas D_x se movilizan (expresión 7), mientras que si $I_i < I_{cr}$, permanecen en su sitio (expresión 8). $N_E(D_x)$ es el n° de partículas expuestas, $N_D(D_x)$ el n° de partículas movilizadas y N_T el n° total de partículas. El n° total de partículas movilizadas (N_D) es igual al sumatorio de $N_D(D_x)$ de cada clase (ecuación 9). La fracción de piedras que entra en movimiento durante la medida se define mediante la tasa de movimiento (T. Mov.), ecuación 10, que representa la capacidad de movilización del flujo asociado a una granulometría determinada (10 clases). Cuanto mayor sea el n° de clases en el que se divide la granulometría del sedimento, más preciso será este índice. Finalmente se define el Índice de movimiento (I. Mov) que no es más que el T. Mov. por unidad de tiempo, equation 11, donde T_a es la duración de la medida.

$$\sum_{i=1}^n (I_i > I_{cr})_{D_x} \neq 0 \quad N_D(D_x) = N_E(D_x) \quad [7]$$

$$\sum_{i=1}^n (I_i > I_{cr})_{D_x} = 0 \quad N_D(D_x) = 0 \quad [8]$$

$$N_D = \sum_{x=1}^{nx} N_D(D_x) \quad [9]$$

$$Motion R. = \frac{N_D}{N_T} = \frac{\sum_{x=1}^{nx} N_D(D_x)}{N_T} \quad [10]$$

$$Motion I. = \frac{Motion R.}{T_a} \quad [11]$$

Se pretende comparar este índice con el obtenido mediante la inspección visual de los experimentos, que se obtiene mediante la ecuación 12, donde N_D es el n° de partículas movilizadas reales durante el ensayo y T_f la duración del ensayo.

$$Motion I. = \frac{Motion R.}{T_f} = \frac{N_D}{N_T} \cdot \frac{1}{T_f} \quad [12]$$

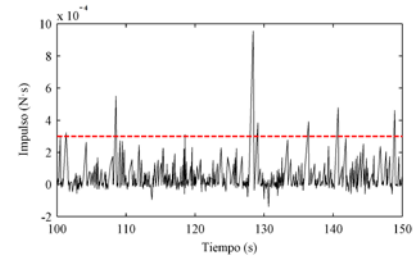


Figura 2.- Señal de impulso ejercida (línea negra) a una partícula $D=12$ -mm en comparación al impulso crítico (roja) necesaria por este tamaño.

Resultados

Se ha valorado el transporte de partículas en los seis escenarios de protección mediante la evaluación cuantitativa del fallo de la protección de forma visual, y mediante el modelo conceptual que pone de relieve el papel que tienen las tensiones de Reynolds cuando éstas son consideradas la fuerza motriz (por unidad de superficie) de las partículas.

En la figura 3 se muestra el índice de movimiento obtenido mediante el análisis de impulsos para los 6 experimentos a lo largo del perfil de calado, el I. Mov. obtenido mediante la inspección visual se muestra en la tabla 2, así como el promediado obtenido del impulso en la zona de cercana a la partícula.

Tabla 2.- Resultados hidrodinámicos.

N° TEST	Experimental I. Mov. [%]	Análisis Impulso	
		Z [m]	I. Mov. [%]
CG-1	0,09%	(0,06-0,012)	7,93%
CG-2	0,08%	(0,085-0,0125)	8,13%
CG-3	0,06%	(0,06-0,02)	5,14%
CG-4	0,05%	(0,03-0,021)	2,95%
CG-5	0,03%	(0,03-0,031)	1,14%
CG-6	0,02%	(0,08-0,03)	0,94%

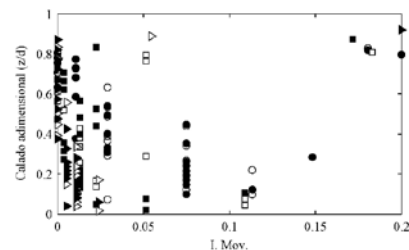


Figura 3.- Distribución vertical del índice de movimiento obtenido del análisis de impulso. Leyenda, ○ CG-1, ● CG-2, □ CG-3, ■ CG-4, ▷ CG-5 and ► CG-6.

Los resultados sugieren correlación entre ambos índices de movimiento, aunque existen ciertas incertidumbres asociadas al modelo conceptual, vibración de partículas, fuerzas de sujeción entre ellas etc. que tan solo permiten que éste sea válido de manera cualitativa y no cuantitativa.

Referencias

- Adrian, R.J (2007). "Hairpin vortex organization in Wall turbulence". *Physics of fluids* 19, 041301, 1-6.
- Cheng S. y Chiew M. (1998). "Pick-up probability for sediment entrainment." *J. Hydrol. Eng.* Vol. 124, N° 232.
- Diplas, P., Dancy, C. L., Celik, A. O., Valyrakis, M., Greer, K. y Akar, (2008). "The role of impulse on the initiation of particle movement under turbulent flow conditions". *Science* N° 322, pp 717-720.
- Kline, S. J., W. C. Reynolds, F. A. Schraub, y P. W. (1967). "The Structure of Turbulent Boundary Layers." *J. of Fluid Mec.*, Vol. 30, pp 741-773.
- Shields, A. (2006). "Application of similarity principles and turbulence research to bedload movement". *California Institute of Technology, Hydrodynamics Lab.*, N° 167-37.