

PARAMETRIZACIONES DE LA CURVA DE SHIELDS PARA DIFERENTES APLICACIONES DEL CRITERIO DE MOVIMIENTO INCIPIENTE

Pedro A. Basile^{1,2}, Gerardo A. Riccardi^{1,2,3} y Marina L. Garcia^{1,2}

¹ Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA – UNR).

² Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA – UNR).

³ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario (CIUNR) Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina.

E-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar

Introducción

La condición de flujo en el instante que se produce el “movimiento incipiente” del sedimento del lecho recibe el nombre de condición hidrodinámica crítica, la cual puede representarse generalmente a través de un valor crítico de la tensión de corte sobre el fondo. Para determinarla se han desarrollado diversas relaciones funcionales, que vinculan la tensión de corte crítica con características del material sedimentario que constituye el cauce. El conocimiento de dichas relaciones son de utilidad práctica para: i) el diseño de canales estables, ii) el dimensionamiento de protecciones del lecho y/o de márgenes de ríos, iii) la evaluación del exceso de tensión de corte en ecuaciones de transporte, iv) la evolución del proceso erosivo en brechas en presas de materiales sueltos, vi) la evacuación hidráulica de sedimentos depositados en embalses, etc. Todas estas relaciones funcionales y sus correspondientes aplicaciones, sin embargo, dependen del abordaje utilizado para definir justamente la condición de “movimiento incipiente”. En este trabajo se realiza la recopilación de una importante cantidad de datos experimentales, que incluyen los distintos criterios utilizados para definir el movimiento incipiente de sedimentos incoherentes. A partir de los mismos se desarrollaron dos expresiones parametrizadas para la tensión de corte adimensional crítica en función del diámetro adimensional. Una de ellas es de utilidad para el diseño en ingeniería (protecciones de lecho y/o márgenes) y otra utilizable en las ecuaciones de transporte basadas en el exceso de tensión de corte o en aquellas que utilizan una tensión de corte de referencia.

Criterios utilizados para definir el movimiento incipiente

Los cuatro criterios utilizados para definir la condición de movimiento incipiente de sedimentos incoherentes son: i) referencial, ii) visual, iii) competente y iv) teórico. Los valores de tensión de corte crítica determinados con el criterio referencial se obtienen extrapolando mediciones simultáneas de transporte de fondo y de tensión de corte, a un transporte de referencia igual a cero o suficientemente bajo (Shields, 1936; Parker y Klingeman, 1982; Parker, 1990; Bridge y Dominic, 1993). Los valores determinados a partir de este enfoque son sensibles al método utilizado para realizar la extrapolación (Parker y Klingeman, 1982; Diplas, 1987; Ashworth y Ferguson, 1989; Ashworth et al., 1992) y al valor particular de transporte de referencia adoptado (Wilcock, 1988).

Con respecto al criterio visual, Kramer (1935) propuso cuatro niveles para definir el movimiento incipiente a partir de la observación visual: i) *Ninguno*: todas las partículas permanecen en el lecho en su posición original, ii) *Débil*: varias partículas pequeñas, que pueden ser contabilizadas, se encuentran en movimiento en lugares aislados, iii) *Mediano*: partículas de diámetro medio están en movimiento en un número demasiado grande como para ser contabilizadas, el movimiento ya no es de carácter local, aunque no es lo suficientemente fuerte como para afectar la configuración del lecho y producir el transporte de una cantidad apreciable de material y iv) *General*: todas las partículas de sedimento están en movimiento, el mismo es lo suficientemente

fuerte como para cambiar la configuración del lecho y producir el transporte de una cantidad apreciable de material.

Por lo tanto, el criterio basado en la observación visual del lecho permite relacionar directamente la tensión de corte que produce el movimiento incipiente (Gilbert, 1914; Kramer, 1935; Yalin y Karahan, 1979). Este criterio posee un cierto grado de subjetividad ya que, de acuerdo a Kramer, depende de la definición del nivel que constituye el movimiento incipiente (Gilbert, 1914; Kramer, 1935; Neill y Yalin, 1969; Wilcock, 1988). Se han realizado diversos intentos por reducir tal subjetividad, introduciendo expresiones que tienen en cuenta el número de granos desplazados por unidad de área del lecho, la duración de la observación y las tensiones de corte aplicadas (Neill y Yalin, 1969; Wilcock, 1988), sin embargo, estas expresiones no han sido ampliamente adoptadas.

El criterio competente se refiere a la utilización de funciones de competencia que relacionan la tensión de corte con el tamaño más grande de sedimento presente en el lecho, a partir de las cuales se puede establecer la tensión de corte crítica para un tamaño determinado (Andrews, 1983; Carling, 1983; Komar, 1987). Las funciones de competencia son sensibles al tamaño máximo de las partículas, a la eficiencia de las trampas de sedimentos utilizadas para medir el transporte, al tamaño de la muestra, a la estrategia de muestreo, a la disponibilidad de tamaños de grano grueso y a la técnica de ajuste de las curvas de tensiones de corte versus diámetros (Wilcock, 1992; Wathen et al., 1995).

El cuarto criterio consiste en el cálculo teórico de la tensión de corte crítica. En este criterio se utilizan conceptos de equilibrio de fuerzas para predecir los umbrales correspondientes al movimiento incipiente (White, 1940; Wiberg y Smith, 1987; Jiang y Haff, 1993). Este abordaje es sensible a los valores que se asignan a las distintas variables intervinientes en el proceso, como por ejemplo, la forma de las partículas, el empaquetamiento, la imbricación y el coeficiente de fricción estática de Coulomb del sedimento del lecho.

Las aplicaciones del concepto de movimiento incipiente pueden asociarse a dos objetivos. El primero se refiere a la utilización de la tensión de corte crítica, derivada a partir del criterio referencial o visual, como umbral en una fórmula de transporte de sedimentos basada en el exceso de tensión de corte. En ese caso, el objetivo no es controlar el arrastre de cualquier grano en particular; sino saber el flujo para el cual comienza el transporte de sedimentos. Este es el propósito por el cual se desarrolló la tensión de corte crítica basada en el criterio referencial, a menudo denominada, tensión de corte de referencia. Un valor pequeño del transporte, en el inicio del proceso, no modifica sustancialmente los valores de transporte para tensiones de corte elevadas, como por ejemplo, durante crecidas excepcionales en los ríos. En este caso, para caracterizar la condición de movimiento incipiente, es recomendable utilizar una curva media ajustada a los datos experimentales. El segundo objetivo se centra en el arrastre de granos individuales. Es decir, en aquellos casos en que la estabilidad del cauce depende de que el material no se mueva en absoluto. Nos podríamos preguntar: ¿Dado un caudal de diseño,

para qué tamaños de clastos, la protección del lecho (o de las márgenes), no evidencia ningún tipo de falla (100 % de los clastos no se mueven)? En este caso es recomendable utilizar una curva de inicio de movimiento “envolvente”, es decir, una curva tal que represente el límite inferior del conjunto de las observaciones experimentales.

Tensión de corte adimensional crítica y datos experimentales seleccionados

La tensión de corte adimensional crítica sobre el fondo (o parámetro de Shields crítico) es función del número de Reynolds crítico de la partícula asociado a la velocidad de corte y se expresa como:

$$\tau_{*c} = \frac{\tau_{bc}}{(\rho_s - \rho)gd} = f\left(\frac{u_{*c}d}{\nu}\right) \quad [1]$$

donde $\tau_{bc} = \rho u_{*c}^2$ es la tensión de corte crítica sobre el fondo (N/m^2), ρ_s es la densidad del sedimento (kg/m^3), ρ es la densidad del agua (kg/m^3), g la aceleración de la gravedad (m/s^2), d el diámetro (m), u_{*c} es la velocidad de corte crítica (m/s) y ν la viscosidad cinemática (m^2/s). Shields (1936) fue el primero en arribar a la expresión (1) a través de análisis dimensional y, mediante una serie de experimentos en un canal de laboratorio, logró corroborar la validez de la misma para una vasta gama de partículas angulares de barita, granito, ámbar y carbón (Buffington, 1999).

Shields definió la tensión de corte crítica como aquella para la cual el transporte de fondo tiende a cero, es decir, utilizó el criterio referencial con transporte igual a cero. Sin embargo, algunos investigadores argumentan que Shields pudo haber incluso utilizado, en algunos casos, el nivel de movimiento general de Kramer (Buffington, 1999). La relación (1) no es muy práctica ya que u_{*c} debe determinarse por tanteos, debido a que u_{*c} está incluida en los dos miembros. Por lo tanto, relacionando el número de Reynolds de la partícula con τ_{*c} , se obtiene la expresión $\tau_{*c} = f(D_*)$, siendo D_* el diámetro adimensional definido como: $D_* = d [(s-1)g/\nu^2]^{1/3}$. Posteriormente a la investigación de Shields, se han realizado numerosas contribuciones, consistentes en la adición de nuevos datos, revisiones y propuestas de modificaciones. El total de datos experimentales recopilados en este trabajo (incluyendo los de Shields) asciende a 250, discriminados en 60 (referencial), 181 (visual) y 9 (competente), los cuales se presentan en la Figura 1. Para ser consistentes con los datos originales de Shields, los mismos han sido seleccionados considerando: i) flujo turbulento, ii) sumergencia relativa $h/d > 5$ y iii) sedimentos cuasi-uniformes en el sentido de Folk y Ward (1957) con desvío estándar $\sigma_1 < 0.5$, iv) pendientes bajas ($S_b < 1\%$).

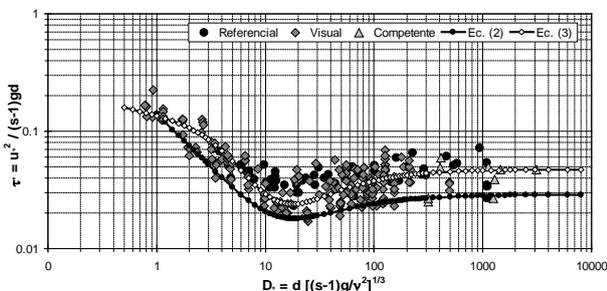


Figura 1.- Tensión de corte adimensional crítica en función de D_* para distintos criterios de inicio de movimiento y curvas parametrizadas.

Resultados obtenidos de la parametrización de curvas (τ_{*c} , D_*)

La parametrización de la curva envolvente a los datos (τ_{*c} , D_*)

presentados en la Figura 1, se obtuvo a partir de la modificación de la expresión de Brownlie (1981). La ecuación obtenida se expresa como:

$$\tau_{*c} = 0.14 D_*^{-0.9} + 0.029 e^{-18 D_*^{-0.9}} \quad [2]$$

La ec. (2) representa el límite inferior de los datos de τ_{*c} para todo el rango de $D_* \geq 1$, por encima de la misma se encuentra el 98 % de los datos experimentales. En particular, se observa que para $D_* \geq 150$ ($d \geq 6$ mm), $\tau_{*c} = 0.027$ y la curva tiende a $\tau_{*c} = 0.029$ para valores elevados de D_* .

La curva media ajustada a los datos experimentales se obtuvo minimizando el error cuadrático medio entre valores calculados y observados de la relación $\chi_{*c} = f(D_*)$, donde $\chi_{*c} = u_{*c}/w_s$, siendo w_s la velocidad de caída de la partícula (Cheng, 1997). La ecuación obtenida, en términos de tensión de corte adimensional crítica, es:

$$\tau_{*c} = \left(9 D_*^{-1.6} + 0.19 e^{-16 D_*^{-1.16}} \right)^2 \left(\frac{\sqrt{25 + 1.2 D_*^2} - 5}{D_*} \right)^3 \quad [3]$$

Se observa que, para $D_* \geq 400$ ($d \geq 16$ mm), $\tau_{*c} = 0.045$ y tiende asintóticamente a $\tau_{*c} = 0.047$ para valores elevados de D_* . Estos valores son consistentes con los obtenidos por diversos autores (Meyer-Peter y Müller, 1948; Gessler, 1971; Yalin y Kaharan, 1979).

Conclusiones

A partir de la recopilación de una importante cantidad de datos experimentales, reportados por diversos investigadores, se parametrizaron dos curvas $\tau_{*c} = f(D_*)$, las cuales son de utilidad para el diseño de protecciones contra erosión fluvial y para el cálculo del transporte de sedimentos con ecuaciones basadas en el exceso de tensión de corte.

En particular, para el cálculo de protecciones de lecho (o márgenes) con enrocados, etc.; se recomienda utilizar la ec. (2), con las eventuales correcciones de τ_{*c} debido a sumergencia relativa, pendiente del canal (pendiente de márgenes), elevada turbulencia local, etc. Asimismo, para el cálculo del transporte por clases granulométricas, el valor de τ_{*c} dado por la ec. (3) debe ser corregido con oportunos coeficientes de protección-exposición.

Referencias bibliográficas

- Andrews, E.D. (1983). "Entrainment of Gravel from Naturally Sorted River-Bed Material". *Geological Society of America Bulletin*, 94(10), 1225-1231.
- Ashworth, P.J. and Ferguson, R.I. (1989). "Size-Selected Entrainment of Bed Load in Gravel Bed Streams". *Water Resources Research*, 25(4), 627-634.
- Buffington, J.M. (1999). "The Legend of A.F. Shields". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125(4), 376-387.
- García, M.H. (2008). *Sediment Transport and Morphodynamics*. Chapter 2, 21-163. Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice. ASCE Manual and Reports on Engineering Practice N° 110. Marcelo H. García (Ed.).
- Gessler, J. (1971). *Beginning and ceasing of sediment motion*. In River Mechanics, H.W. Shen (Ed.), 7:1-7:22, Fort Collins, Colorado.
- Parker, G. (1990). "Surface-based bedload transport relation for gravel rivers". *Journal of Hydraulic Research*, 28(4), 417-436.