

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

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

Pedro A. Basile^{(1),(2)}, **Gerardo Riccardi**^{(1),(2),(3)} y **Marina 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

RESUMEN:

Las relaciones funcionales que vinculan la tensión de corte adimensional crítica (o parámetro de Shields crítico) con características del material sedimentario que constituye el cauce, y sus correspondientes aplicaciones, dependen del abordaje utilizado para definir la condición de “movimiento incipiente” del sedimento. En este trabajo se presenta 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 τ_{*c} en función del diámetro adimensional D^* . Una de ellas es de utilidad práctica para el dimensionamiento de protecciones de lecho y/o márgenes en cauces fluviales. La otra expresión es apropiada para evaluar el transporte de sedimentos, mediante ecuaciones de transporte basadas en el exceso de tensión de corte.

ABSTRACT:

The functional relationships that link dimensionless critical shear stress (or critical Shields parameter) with characteristics of sedimentary material constituting the riverbed, and their applications, depend on the approach used to define the status of "incipient movement". In this work a significant amount of experimental data, including the different criteria used to define the condition of incipient movement of incoherent sediments, were collected. From these data two parametrized expressions for the dimensionless critical shear stress τ_{*c} as a function of dimensionless diameter D^* were developed. One of them is useful for the design of riverbed and riverbank protection measures. The other expression is appropriated to assess sediment transport rates by transport equations based on excess shear stress.

PALABRAS CLAVES: transporte de sedimentos; movimiento incipiente; curva de Shields.

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 realizó 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 práctica para el diseño en ingeniería fluvial (protecciones de lecho y/o márgenes) y otra utilizable en las ecuaciones de transporte basadas en el exceso de tensión de corte o eventualmente 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.

TENSIÓN DE CORTE ADIMENSIONAL CRÍTICA

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 (N/m²), siendo ρ : densidad del agua (kg/m³) y u_{*c} : velocidad de corte crítica (m/s); ρ_s es la densidad del sedimento (kg/m³), g es la aceleración de la gravedad (m/s²), d es el diámetro (m), y ν es la viscosidad cinemática (m²/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).

CONTRIBUCIÓN DE INVESTIGACIONES POSTERIORES A SHIELDS

Posteriormente a la investigación de Shields (1936), se han realizado numerosas contribuciones, consistentes en la adición de nuevos datos, revisiones y propuestas de modificaciones. Por ejemplo, Grass (1970), Gessler (1971) y Paintal (1971), reconocieron que el movimiento incipiente de un tamaño de grano en particular es inherentemente un problema estadístico, dependiendo de las funciones de distribución de probabilidad de la tensión de corte turbulento sobre el fondo y de la geometría intergranular del material del lecho, siendo esta última controlada por la forma del grano, la distribución granulométrica y la imbricación (Li y Komar, 1986; Kirchner et al., 1990; Buffington et al., 1992).

En consecuencia, existe una distribución de frecuencias de tensiones de corte críticas adimensionales para cualquier tamaño de grano. Gessler (1971) revisó los datos de Shields y después de corregirlos por efectos de pared lateral y resistencia de forma, determinó un valor de $\tau_{*c50} = 0.046$ para un 50 % de probabilidad de movimiento en flujo turbulento completamente desarrollado (Montgomery y Buffington, 1997).

DATOS EXPERIMENTALES SELECCIONADOS

Se realizó una recopilación exhaustiva de datos experimentales obtenidos por diversos autores. El total de datos experimentales recopilados asciende a 250, discriminados en: 60 (referencial), 181 (visual) y 9 (competente). Parte de los datos fueron obtenidos a partir del trabajo de Montgomery y Buffington (1997).

Para ser consistentes con los datos de Shields, los mismos han sido seleccionados considerando: i) flujo turbulento; ii) sumergencia relativa $h/d > 5$, siendo h la profundidad de flujo y d el diámetro, iii) sedimento cuasi-uniforme en el sentido de Folk y Ward (1957) con desvío estándar $\sigma_1 < 0.5$; iv) pendiente de fondo baja ($S_b < 1\%$). Los datos de Pilotti y Menduni (2001) fueron seleccionados siguiendo el mismo criterio.

Los datos recopilados se resumen en las Tablas 1, 2 y 3. En dichas Tablas se consignan los datos discriminados según el criterio de inicio de movimiento utilizado en las experimentaciones, es decir, referencial, visual y competente respectivamente (Basile, 2018).

Tabla 1.- Resumen de datos seleccionados para el criterio *referencial* de movimiento incipiente.

Autor	N° de datos	Rango de valores			
		τ_c (-)	Re_p (-)	d (mm)	ρ_s (kg/m ³)
Gilbert (1914)	2	0.051 - 0.059	227 - 489	4.94 - 7.01	2690
Casey (1935)	8	0.035 - 0.067	1.9 - 80	0.17 - 2.46	2650
Kramer (1935)	3	0.033 - 0.039	6.6 - 7.8	0.51 - 0.55	2700
USWES (1935)	6	0.035 - 0.051	2.2 - 7.8	0.21 - 0.52	2650
Shields (1936)	15	0.030 - 0.049	6.3 - 219	0.36 - 3.44	1060 - 4300
Guy et al. (1966)	1	0.040	2.1	0.19	2650
Williams (1970)	1	0.040	41	1.35	2650
Paintal (1971)	2	0.050 - 0.050	112 - 638	2.50 - 7.95	2650
Mizuyama (1977)	3	0.038 - 0.051	437 - 2841	6.40 - 22.5	2507 - 2656
Parker y Klingeman (1982)	1	0.035	6744	54.0	2850
Bathurst et al. (1987)	3	0.043 - 0.053	944 - 3231	11.5 - 22.2	2570 - 2650
Wilcock (1987)	2	0.023 - 0.037	12 - 332	0.67 - 5.28	2650
Asworth y Ferguson (1987)	2	0.054 - 0.072	7773 - 8463	50.0 - 57.5	2540 - 2600
Diplas (1987)	2	0.027 - 0.034	5923 - 6647	54.0	2850
Parker (1990)	1	0.034	6731	54.0	2850
Asworth et al. (1992)	1	0.061	2463	24.0	2650
Kuhnle (1992)	1	0.065	869	11.73	2650
Li y Komar (1992)	1	0.048	3.3	0.24	2650
Wilcock y McArdell (1993)	1	0.028	88	2.60	2610
Kuhnle (1993)	1	0.039	404	5.58	2650
Bridge y Dominic (1993)	3	0.040 - 0.052	4.2 - 286	0.30 - 4.94	2690

Tabla 2.- Resumen de datos seleccionados para el criterio *visual* de movimiento incipiente.

Autor	N° de datos	Rango de valores			
		τ_c (-)	Re_p (-)	d (mm)	ρ_s (kg/m ³)
Gilbert (1914)	13	0.032 - 0.069	52 - 587	1.71 - 7.01	2690
USWES (1935)	2	0.048 - 0.074	2.4 - 5.5	0.18 - 0.34	2650
Mavis et al. (1937)	16	0.022 - 0.037	37 - 235	1.40 - 4.30	2660
Ho (1939)	1	0.025	225	5.710	2660
Meyer-Peter y Müller (1948)	21	0.025 - 0.050	59 - 686	1.86 - 8.50	2680
Wolman y Brush (1961)	10	0.020 - 0.052	9.0 - 94	0.67 - 2.00	2650
Raudkivi (1963)	1	0.036	6	0.400	2600
Vanoni (1964)	4	0.097 - 0.226	0.43 - 1.50	0.037 - 0.102	2490 - 2650
Neill (1967)	20	0.023 - 0.056	221 - 2099	5.0 - 20.0	2490 - 2540
White (1970)	13	0.034 - 0.132	0.32 - 53	0.044 - 2.2	1050 - 2600
Everts (1973)	37	0.017 - 0.081	1.3 - 162	0.09 - 3.57	2650 - 4700
Mantz (1975)	15	0.062 - 0.165	0.27 - 0.81	0.03 - 0.076	2650 - 2740
Luque y Van Beek (1976)	5	0.038 - 0.047	16 - 127	0.9 - 3.3	1340 - 4580
Yalin y Karahan (1979)	6	0.03 - 0.113	1.5 - 25	0.1 - 1.0	2650
Ikeda (1982)	2	0.020 - 0.047	8.7 - 72	0.42 - 1.3	2650
Prager et al. (1996)	4	0.021 - 0.025	6.2 - 7.3	0.500	2500 - 2770
Pilotti y Menduni (2001)	11	0.022 - 0.047	18.6 - 168.2	0.8 - 3.0	2460 - 2570

Tabla 3.- Resumen de datos seleccionados para el criterio *competente* de movimiento incipiente.

Autor	N° de datos	Rango de valores			
		τ_c (-)	Re_p (-)	d (mm)	ρ_s (kg/m ³)
Andrews y Erman (1983)	1	0.050	8377	58.0	2650
Carling (1983)	1	0.027	911	15.5	2650
Hammond et al. (1984)	1	0.025	877	15.5	2650
Komar (1987)	1	0.027	7277	63.0	2850
Ferguson et al. (1989)	1	0.047	37880	73.0	2800
Komar y Carling (1991)	1	0.039	9182	62.0	2710
Ashworth et al. (1992)	1	0.049	1807	21.0	2650
Ferguson (1994)	1	0.047	11943	75.0	2650
Wethen et al. (1995)	1	0.059	2025	21.3	2650

En la Figura 1 se representan los pares de datos experimentales (Re_{pc}, τ_c) correspondientes a las investigaciones reportadas en las Tablas 1, 2 y 3 para los distintos tipos de criterios utilizados en la definición del movimiento incipiente. En la misma Figura se representa también la curva parametrizada de Van Rijn (1984).

En dicha Figura se observa que los datos correspondientes al criterio referencial (círculos negros) se ubican preferentemente en la parte superior de la banda configurada por los datos correspondientes al criterio visual (rombos grises). En este sentido, cabe aclarar que el criterio referencial, asociado a un transporte relativamente bajo (no nulo), ha tenido origen en el estudio del transporte de sedimentos y la calibración de distintas ecuaciones de cálculo.

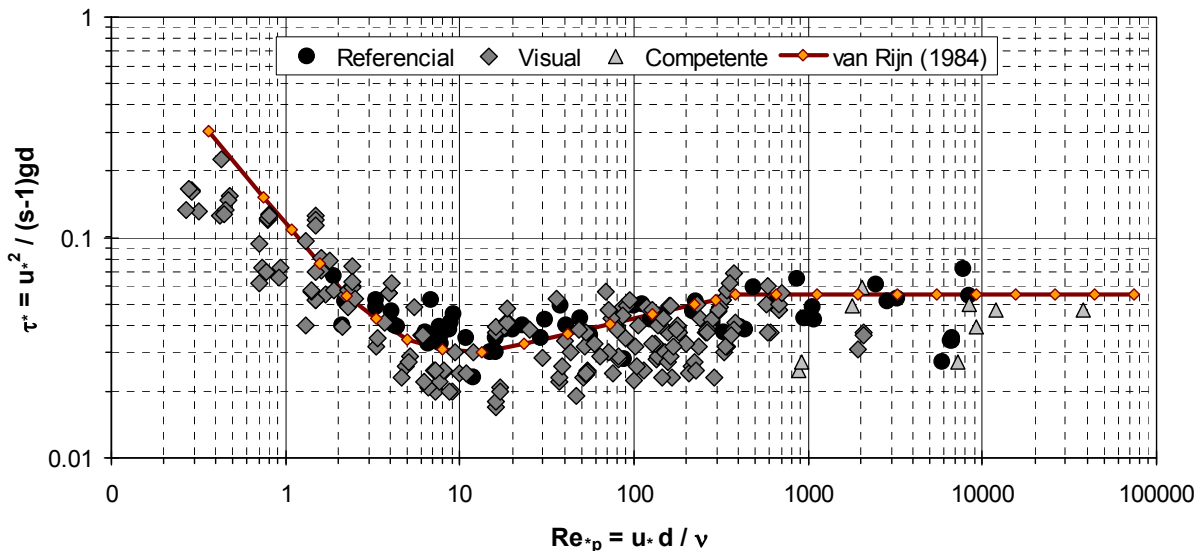


Figura 1.- Valores de tensión de corte adimensional crítica en función de Re_{*pc} para los distintos criterios de movimiento incipiente y ecuación parametrizada de van Rijn (1984).

Los valores más bajos de τ_{*c} determinados a partir del criterio competente (triángulos grises) pueden estar reflejando un sesgo asociado con el uso del grano móvil de tamaño más grande presente en la superficie del lecho. En efecto, los clastos superficiales de mayor tamaño del lecho pueden tener umbrales de movilidad más bajos, debido a la mayor protuberancia y a al ángulo de fricción intergranular más pequeño (Buffington et al., 1992). Komar y Carling (1991) propusieron una variante del criterio competente, reemplazando el tamaño máximo por el tamaño de grano medio del transporte de fondo, con lo cual se obtienen valores de τ_{*c} similares a los determinados mediante el criterio referencial.

DIFERENCIA ENTRE τ_{*c} VISUAL Y REFERENCIAL

La tensión de corte adimensional crítica (o parámetro de Shields crítico) determinada a partir del criterio visual o mediante el criterio referencial asociado a un transporte suficientemente bajo, presentan algunas diferencias. En el primer caso (criterio visual), τ_{*c} , es el valor de τ_* para el cual comienza a producirse el arrastre de granos (según los distintos niveles de Kramer). Si se observan granos móviles: $\tau_* > \tau_{*c}$ y si no hay granos que se están moviendo: $\tau_* < \tau_{*c}$. Pero, con el fin de determinar si los granos se están moviendo o no, eso plantea la cuestión de cuánto tiempo uno debe observar el lecho y que extensión de la superficie del lecho se debe observar. Cuando el flujo es turbulento, la tensión de corte sobre el fondo τ_b es fluctuante en el tiempo, por lo tanto, las respuestas a estas preguntas no son fáciles de responder.

Por otra parte, si el objetivo es predecir la tasa de transporte de sedimentos, la alternativa práctica es utilizar una tensión de corte crítica de referencia, que es el valor de τ_b asociado con una muy pequeña tasa predeterminada de transporte. Por lo tanto, por definición, la tensión de corte de referencia se asocia con una pequeña cantidad de transporte, y consecuentemente debe ser ligeramente más grande que la tensión de corte crítica derivada con el criterio visual, en particular, si este último se corresponde con los niveles *Ninguno*, *Débil* y *Mediano* de Kramer.

Sin embargo, si no se considera el efecto de resistencia de forma se puede sobreestimar el valor de τ_{*c} . Comúnmente se da por sentado que, en los estudios en canales de laboratorio, el lecho es inicialmente plano y libre de la influencia de resistencia de forma causada por formas de fondo (Miller et al., 1977). Esto es cierto para los estudios de movimiento incipiente basados en el criterio visual, pero no es así para la mayoría de los estudios basados en el criterio referencial.

En los estudios basados en el criterio visual, el flujo se incrementa gradualmente hasta que se observan granos que comienzan a moverse sobre la superficie plana del lecho. Por el contrario, en la mayoría de los estudios basados en el criterio referencial, los datos de transporte de fondo son muestreados después de alcanzar condiciones de equilibrio, las cuales en muchos casos se caracterizan por la presencia de formas de fondo (Gilbert, 1914; Shields, 1936; De Guy et al., 1966; Wilcock y Southard, 1988). Esto se traduce en una diferencia significativa entre la tensión de corte asociada a la resistencia de grano (superficial) y la tensión de corte total determinada, por ejemplo, en función de la profundidad de flujo y la pendiente. Por lo tanto, el valor τ_{*c} calculado sin considerar el efecto de las formas de fondo, conduce a una sobrestimación del mismo.

Aunque la resistencia de forma no es un problema en los estudios basados en el criterio visual, una sumergencia relativa pequeña puede proporcionar una fuente igualmente importante de resistencia de forma y conducir a una sobreestimación del valor de τ_{*c} . No obstante, los datos reportados en la Figura 1 han sido seleccionados para sumergencia relativa $h/d > 5$, que permite eliminar los efectos de sobrestimación del valor de τ_{*c} (Basile, 2018).

DIFERENTES APLICACIONES DEL CONCEPTO DE MOVIMIENTO INCIPIENTE

Las aplicaciones del concepto de movimiento incipiente del sedimento 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 del canal (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.

PROCEDIMIENTO DE PARAMETRIZACIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS

La curva de Shields en el sistema de ejes coordenados de la Figura 1 (Re_{*p}, τ_*) no es muy útil porque u_{*c} (o τ_{bc}) debe determinarse por tanteos ya que aparece en los dos ejes. Una forma más apropiada de representar la curva de Shields es en el sistema de ejes (D_*, τ_*), donde D_* es el diámetro adimensional, el cual se define como:

$$D_* = \left(\frac{Re_{*p}^2}{\tau_*} \right)^{1/3} = d \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3} \quad [2]$$

Una manera de reducir la dispersión que exhiben los pares de datos experimentales (D_*, τ_{*c}) es utilizando el parámetro $\chi_{*c} = f(D_*)$, donde $\chi_{*c} = u_{*c}/w_s$, siendo w_s la velocidad de caída de la partícula (Cheng, 1997). Es decir, representando el conjunto de mediciones en el sistema de ejes (D_*, χ_{*c}), como se observa en la Figura 2.

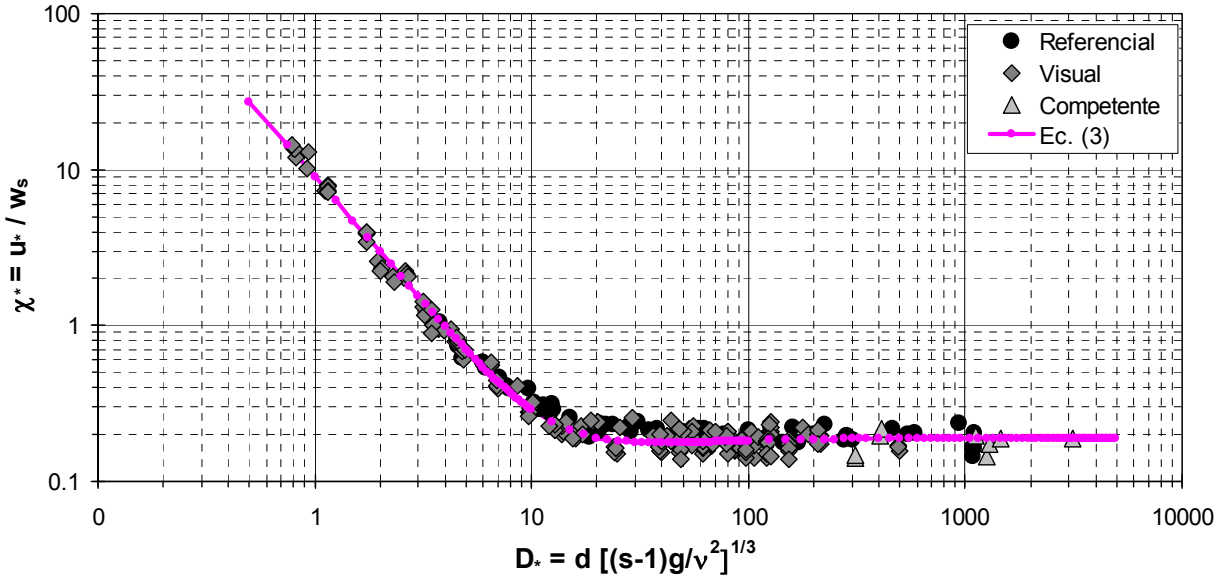


Figura 2.- Curva de inicio de movimiento de sedimentos en el sistema de ejes (D_*, χ_*) .

La curva media ajustada a los pares de datos experimentales (D_*, χ_{*c}) , representados en la Figura 2, se obtuvo minimizando el error cuadrático medio entre valores calculados y observados. La ecuación que representa el mejor ajuste se expresa mediante:

$$\chi_{*c} = \frac{u_{*c}}{w_s} = 9 D_*^{-1.6} + 0.19 \text{EXP}(-16 D_*^{-1.16}) \quad [3]$$

A los fines prácticos, el valor de la velocidad de corte crítica se puede obtener a través de la multiplicación entre χ_{*c} dado por la expresión (3) y la ecuación de velocidad de caída de Cheng (1997). Por otra parte, dividiendo el parámetro de Shields crítico (1) por w_s^2 se obtiene:

$$\frac{\tau_{*c}}{w_s^2} = \frac{\chi_{*c}^2}{(s-1)gd} \quad [4]$$

Expresando w_s mediante la ecuación de Cheng (1997) y despejando τ_{*c} de (4) se obtiene la ecuación parametrizada de la curva media, en términos de tensión de corte adimensional crítica:

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

Para visualizar la curva parametrizada dada por (5) en el sistema de ejes (D_*, τ_*) , la misma se representa en la Figura 3. Se observa que la expresión (5) describe una curva media que se ajusta a la serie de observaciones experimentales.

Tal ecuación puede ser de utilidad para determinar τ_{*c} a los efectos del cálculo del transporte de sedimentos con ecuaciones basadas en el exceso de tensión de corte.

En particular, se observa que para $D_* \geq 400$ ($d \geq 16$ mm) la tensión de corte adimensional crítica es $\tau_{*c} = 0.045$ aproximadamente y tiende asintóticamente a $\tau_{*c} = 0.047$ para valores elevados de D_* . Estos valores son consistentes con los obtenidos previamente por diversos autores, como por ejemplo, Meyer-Peter y Müller, 1948; Gessler, 1971; Yalin y Kaharan, 1979.

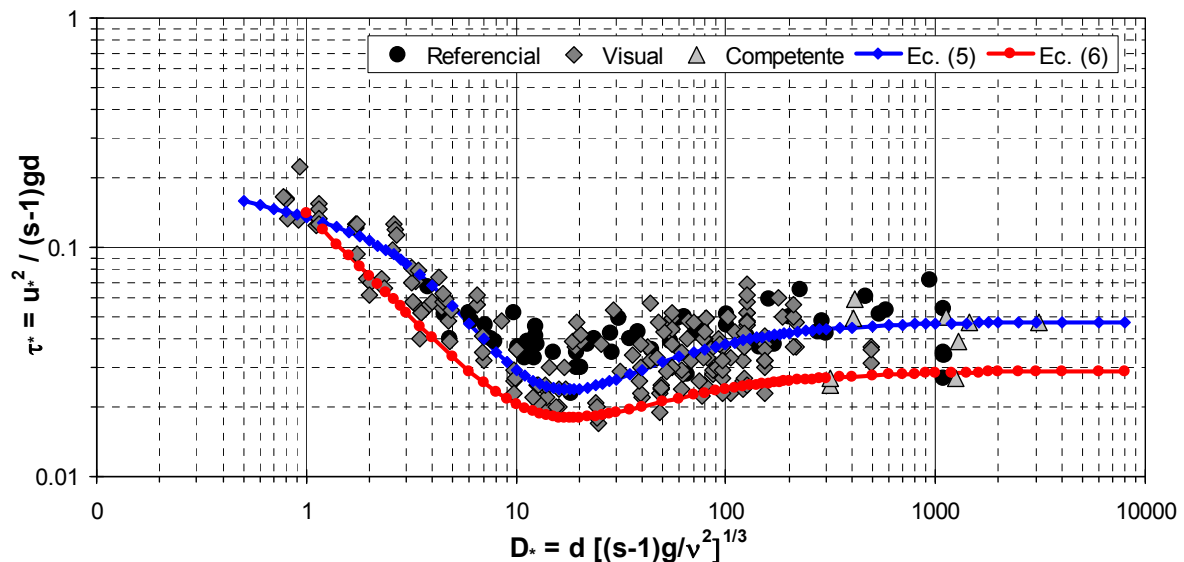


Figura 3.- Valores de tensión de corte adimensional crítica en función de D_* para distintos criterios de inicio de movimiento, conjuntamente con curvas parametrizadas.

La parametrización de la curva envolvente a los pares de datos (D_*, τ_{*c}) , se obtuvo a partir de la modificación de la expresión de Brownlie (1981). Cabe señalar que, un ajuste de la expresión de Brownlie (1981), ha sido propuesta en trabajos precedentes (García, 2008; Parker, 2008), los cuales recomiendan multiplicar por 0.5 los valores de τ_{*c} dados por la curva analítica de Brownlie (1981). En el presente trabajo, la ecuación obtenida se expresa como:

$$\tau_{*c} = 0.14 D_*^{-0.9} + 0.029 \text{ EXP}(-18 D_*^{-0.9}) \quad , \quad D_* \geq 1 \quad [6]$$

Para visualizar la relación (6) en el sistema de ejes (D_*, τ_*) , la misma se representa en la Figura 3. Se observa que dicha curva representa el límite inferior de los datos de τ_{*c} para todo el rango de $D_* \geq 1$, es decir, 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) la tensión de corte adimensional crítica es $\tau_{*c} = 0.027$ aproximadamente y la curva tiende a $\tau_{*c} = 0.029$ para valores elevados de D_* .

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. (6), 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. (5) debe ser corregido con oportunos coeficientes de protección-exposición.

AGRADECIMIENTOS. Los autores agradecen a la UNR por el apoyo brindado en el marco de los proyectos PID ING514 e ING509.

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.
- Ashworth, P.J., Ferguson, R.I., Ashmore, P.E., Paola, C., Powell, D.M., and Prestegard, K.L.** (1992). "Measurements in a braided river chute and lobe, 2, Sorting of bed load during entrainment, transport, and deposition". *Water Resources Research*, 28, 1887-1896.
- Basile, P.A.** (2018). *Transporte de Sedimentos y Morfodinámica de Ríos Aluviales*. UNR Editora, 455 p., ISBN 978-987-702-257-5, <http://hdl.handle.net/2133/10738>.
- Bridge, J.S. and Dominic, D.F.** (1984). "Bed load grain velocities and sediment transport rates". *Water Resources Research*, 20, 476-490.
- Brownlie, W.R.** (1981). *Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels*. Report N. KH-R-43A, W. M. Keck Lab. of Hydr. and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA, 232 p.
- Buffington, J.M., Dietrich, W.E. and Kirchner, J.W.** (1992). "Friction angle measurements on a naturally formed gravel streambed: Implications for critical boundary shear stress". *Water Resources Research*, 28, 411-425.
- Buffington, J.M.** (1999). "The Legend of A.F. Shields". *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 376-387.
- Carling, P.A.** (1983). "Threshold of coarse sediment transport in broad and narrow natural streams". *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, 1-18.
- Cheng, N.S.** (1997). "Simplified settling velocity formula for sediment particle". *J. of Hyd. Engrg.*, 123(2), 149-152.
- Diplas, P.** (1987). "Bed Load Transport in Gravel Bed Streams". *J. of Hyd. Engrg.*, ASCE, 113(3), 277-292.
- Folk, R.L. and Ward, W.C.** (1957). "Brazos River bar, a study in the significance of grain-size parameters". *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-27.
- 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, edited by H. W. Shen, pp. 7:1-7:22, H.W. Shen, Fort Collins, Colorado.
- Gilbert, G.K.** (1914). "The transportation of debris by running water". *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 86, 263 p.
- Grass, A.J.** (1970). "Initial instability of fine bed sand". *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, 96, 619-632.
- Guy, H.P., Simons, D.B. and Richardson, E.V.** (1966). "Summary of alluvial channel data from flume experiments". 1956-61, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 462-I, 96 p.
- Jiang, Z. and Haff, P.K.** (1993). "Multiparticle simulation methods applied to the micromechanics of bed load transport". *Water Resources Research*, 29, 399-412.
- Kirchner, J.W., Dietrich, W.E., Iseya, F. and Ikeda, H.** (1990). "The variability of critical shear stress, friction angle, and grain protrusion in water worked sediments". *Sedimentology*, 37, 647-672.
- Komar, P.D. and Carling, P.A.** (1991). "Grain sorting in gravel-bed streams and the choice of particle sizes for flow-competence evaluations". *Sedimentology*, 38, 489-502.
- Komar, P.D.** (1987). "Selective gravel entrainment and the empirical evaluation of flow competence". *Sedimentology*, 34, 1165-1176.
- Kramer, H.** (1935). "Sand mixtures and sand movement in fluvial models". *Trans. ASCE*, 100(1909), 798-838.
- Li, M.Z. and Komar, P.D.** (1986). "Laboratory measurements of pivoting angles for applications to selective entrainment of gravel in a current". *Sedimentology*, 33, 413-423.
- Meyer-Peter, E. and Müller, R.** (1948). "Formulas for bed-load transport". *Proc. 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*, pp. 39-64, Inter. Assoc. for Hydraul. Res., Delft, Netherlands.
- Miller, M.C., McCave, I.N. and Komar, P.D.** (1977). "Threshold of sediment motion under unidirectional currents". *Sedimentology*. 24, 507-527.

- Montgomery, D.R. and Buffington, J.M.** (1997). "A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers". *Water Resources Research*, 33(8), 1993-2029.
- Neill, C.R. and Yalin, M.S.** (1969). "Quantitative definition of beginning of bed movement". *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, 95, 585-588.
- Paintal, A.S.** (1971). "Concept of Critical Shear Stress in Loose Boundary Open Channels". *J. Hydr. Res.*, 9(1), 91-113.
- Parker, G.** (2008). *Transport of Gravel and Sediment Mixtures*. Chapter 3, 165-251. Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice. ASCE Manual and Reports on Engineering Practice N° 110. Marcelo H. García (Ed.).
- Parker, G. and Klingeman, P.C.** (1982). "On why gravel bed streams are paved". *Water Res. Research*, 18, 1409-1423.
- Parker, G.** (1990). "Surface-based bedload transport relation for gravel rivers". *J. of Hydraulic Research*, 28, 417-436.
- Pilotti, M. and Menduni, G.** (2001). "Beginning of sediment transport of incoherent grains in shallow shear flows". *Journal of Hydraulic Research*, 39(2), 115-124.
- Shields, A.** (1936). *Application of Similitude Mechanics and the Research on Turbulence to Bed Form Movement*. (en Alemán), Mitt. Preuss. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Heft 26, Berlin.
- Van Rijn, L.C.** (1984). "Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport". *J. of Hydr. Engrg*, 110 (10), 1431-1456.
- Wathen, S.J., Ferguson, R.I., Hoey, T.B. and Werritty, A.** (1995). "Unequal mobility of gravel and sand in weakly bimodal river sediments". *Water Resources Research*, 31, 2087-2096.
- White, C.M.** (1940). "The equilibrium of grains on the bed of a stream". *Proc. R. Soc. London A*, 174, 322-338.
- Wiberg, P.L. and Smith, J.D.** (1987). "Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments". *Water Resources Research*, 23, 1471-1480.
- Wilcock, P.R.** (1992). "Flow competence: A criticism of a classic concept". *Earth Surf. Proc. Landforms*, 17, 289-298.
- Yalin, M.S. and Karahan, E.** (1979). "Inception of sediment transport". *J. of Hydr. Division*, ASCE, 105, 1433-1443.