Nota técnica

Erosión local de equilibrio en estribos de puente

• Antonio Muñoz •
Universidad de Castilla La Mancha, España
Allianz Global Corporate & Specialty, Spain

• Christian Chreties • Luis Teixeira •
Universidad de la República, Uruguay

• Gonzalo Simarro •
Universidad de Castilla La Mancha, España

Resumen

Esta nota técnica introduce una generalización, para el caso de estribos de pared vertical, de la metodología para el análisis de la erosión local de equilibrio en pilas propuesta por Chreties *et al*. (2008). El objetivo de esta metodología es doble: primero, reducir el tiempo y el consumo de energía requeridos para llevar a cabo los ensayos y, segundo, reducir la incertidumbre que existe en la actualidad en la obtención de la erosión de equilibrio en experimentos de laboratorio. La nueva metodología ha sido probada y los resultados se han comparado con ensayos canónicos para la erosión local.

Palabras clave: erosión local, erosión de equilibrio, estribos de puentes.

Introducción

La erosión local en pilas y estribos es la principal causa de fallo en puentes ubicados sobre lechos fluviales (Melville y Coleman, 2000). Por la dificultad de modelación del fenómeno, que involucra un movimiento turbulento tridimensional con transporte de sedimento, el problema ha sido abordado fundamentalmente de forma experimental (Laursen y Toch, 1956; Kandasamy, 1989; Melville y Coleman, 2000; Fael *et al*., 2006). Los estudios se centran principalmente en la erosión de equilibrio, puesto que ésta establece una cota superior de la erosión que se puede alcanzar. En los ensayos habituales, o "canónicos", las condiciones de flujo deseadas (velocidad y calado, o tirante, aguas arriba del obstáculo) son impuestas y se deja que el proceso erosivo actúe hasta alcanzar, presumiblemente, un estado de equilibrio. Sin embargo, es bien conocido que después de incluso varias semanas de ensayo, el proceso erosivo puede seguir activo, dificultando por tanto la obtención experimental de la erosión de equilibrio. Por ello, existen diferentes criterios en la literatura para establecer cuándo se alcanza un estado de equilibrio o se está suficientemente próximo a él (Cardoso y Bettess, 1999; Melville y Chiew, 1999; Simarro-Grande y Martín-Vide, 2005; Fael *et al*., 2007). La mayoría de estos criterios asumen que la erosión de equilibrio "efectiva" es alcanzada cuando el incremento de erosión en las últimas 24 horas de ensayo está por debajo de algún valor dado. Para el caso de pilas, Melville y Chiew (1999) consideran este límite como el 5% del diámetro de la pila y, para el caso del estribos, Fael *et al*. (2006) consideran dos veces el tamaño medio de sedimento.

Recientemente, Chreties *et al*. (2008) han introducido una nueva metodología para

analizar la erosión de equilibrio en pilas. La metodología, descrita brevemente abajo, tiene por objeto reducir el tiempo del ensayo a unas pocas horas y evitar la incertidumbre sobre la erosión de equilibrio asociada con los procedimientos habituales. La hipótesis en la que se basa dicha metodología es que la forma de la fosa de erosión local, dados un material del lecho y una geometría de pila, está fundamentalmente determinada por la erosión máxima frente a la pila y sólo de forma indirecta por las condiciones de flujo.

En este trabajo presentamos una extensión de esta metodología para el caso de la erosión local en estribos de pared vertical.

Análisis dimensional y metodología

Como es habitual, se considera que la erosión local, d_s, en estribos con pared vertical en canales rectangulares puede ser descrita como:

$$d_s = f(\rho, \nu, \rho_s, d_{50}, q, h, d, w, g, t) \qquad (1)$$

donde ρ y ν son la densidad y la viscosidad cinemática del agua, ρ_s y d_{50} son la densidad y tamaño de sedimento (supuesto uniforme), q es el caudal unitario, h es el calado aguas arriba, d es la anchura del estribo (supuesto perpendicular a la margen), w es la anchura del canal, g es aceleración de la gravedad y t es el tiempo. Aplicando análisis dimensional a la expresión (1) obtenemos:

$$\frac{d_s}{d} = f\left(\frac{w}{d}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{gd^3}{\nu^2}, \frac{d_{50}}{d}, \frac{q}{d\sqrt{gd}}, \frac{h}{d}, \frac{qt}{d^2}\right) \qquad (2)$$

Con poca pérdida de generalidad de acuerdo con los resultados de la literatura; en los experimentos llevados a cabo se consideraron w/d, ρ_s/ρ, gd^3/ν^2 y d_{50}/d constantes, por lo que la expresión de arriba se puede reducir a:

$$\frac{d_s}{d} = f\left(\frac{q}{d\sqrt{gd}}, \frac{h}{d}, \frac{qt}{d^2}\right) \qquad (3)$$

y, por lo tanto, la erosión de equilibrio queda:

$$\frac{d_{se}}{d} = \lim_{t\to\infty} \frac{d_s}{d} = f\left(\frac{q}{d\sqrt{gd}}, \frac{h}{d}\right) \qquad (4)$$

Los ensayos canónicos alcanzan la erosión de equilibrio estableciendo previamente unas condiciones de velocidad y calado aguas arriba ($q/d\sqrt{gd}$ y h/d en la expresión (4)) constantes en el tiempo y luego permitiendo la evolución del proceso erosivo hasta que el criterio de equilibrio sea satisfecho. Como ya se ha comentado, este tipo de experimentos consumen mucho tiempo, puesto que la erosión de equilibrio se alcanza de forma asintótica en el tiempo.

La nueva metodología propuesta por Chreties *et al*. (2008) para el análisis de la erosión de equilibrio en pilas considera un planteamiento alternativo. La metodología se basa en la hipótesis de que la geometría de la fosa de erosión viene principalmente determinada por la erosión local y sólo de forma indirecta por las condiciones de movimiento aguas arriba.

En la nueva metodología, la profundidad de erosión deseada d_s es alcanzada con unas ciertas condiciones de caudal unitario q^s y calado h^s agresivas (pero siempre en aguas claras). Una vez obtenida la profundidad de erosión deseada d_s (en un proceso rápido, puesto que las condiciones pueden ser muy erosivas), las condiciones de aguas arriba son modificadas a unas condiciones débiles, asegurándose de que en estas condiciones el proceso erosivo esté parado. En el último paso, manteniendo un cierto valor q constante, el calado h se disminuye hasta encontrar la condición crítica para la cual se observa movimiento del sedimento en la fosa de erosión. En la condición crítica (descrita abajo para el caso de estribos), la erosión local d_s, establecida *a priori*, corresponde con la erosión de equilibrio para las condiciones actuales. Así, en lugar de encontrar la erosión de equilibrio para unas condiciones de caudal

y calado dadas (ensayos "canónicos"), tal y como se desprende de la ecuación (4), ahora se encuentran las condiciones hidrodinámicas para una determinada erosión previamente fijada, es decir:

$$\frac{h}{d} = f\left(\frac{q}{d\sqrt{gd}}, \frac{d_{se}}{d}\right) \tag{5}$$

Diseño de los experimentos

Se llevó a cabo una serie de ensayos para validar la metodología descrita. Los ensayos se corresponden a los "tipo II" propuestos por Chreties *et al*. (2008) y se han desarrollado en el mismo canal, en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Castilla La Mancha (figura 1). En este caso, el estribo está formado por una plancha metálica de 16 cm de ancho (d = 16 cm), y la erosión se mide con el mismo limnímetro de precisión. El sedimento es una arena con densidad $\rho_s \approx 2\,650$ kg/m^3, tamaño $d_{50} \approx 1.03$ mm y $\sigma_g \approx 1.27$ (*i.e.*, uniforme).

Los objetivos de los experimentos son, en primer lugar, establecer un criterio para encontrar la condición crítica (condición para la cual la profundidad de erosión es la erosión de equilibrio) y, en segundo lugar, comprobar hasta qué punto las condiciones hidrodinámicas agresivas (q^s, h^s) empleadas para alcanzar la erosión deseada no afectan al resultado. Además se hicieron dos ensayos canónicos, con una duración de dos semanas y media cada uno, para comprobar la validez de la metodología.

Figura 1. Instalación experimental vista hacia aguas abajo y detalle de la erosión local producida en el estribo.

Resultados

Una vez que se alcanza la erosión deseada y se pasa de unas condiciones de flujo agresivas a otras débiles, el caudal q se fija en el valor deseado; entonces el calado h se va disminuyendo lentamente hasta encontrar la condición crítica en la que se observa una reactivación del proceso erosivo. Conforme el calado h se va disminuyendo, se han distinguido siete estados (cuadro 1) diferenciados de forma visual por el comportamiento o movilidad del sedimento (en el caso de Chreties *et al*. se observaron únicamente seis estados). Denotaremos aquí como "condición 1" (o C = 1) a la frontera entre los estados "-1" y "1- 2"; como condición C = 2 a la frontera entre los estados"1-2" y "2- 3", y así sucesivamente.

La figura 2 muestra la evolución de h/d como función "C", para dos combinaciones diferentes de d_s/d, $q/d\sqrt{gd}$ (círculos y cuadrados respectivamente), que son:

$$\left\{\frac{d_s}{d}, \frac{q}{d\sqrt{gd}}\right\} = \{0.71,\ 0.27\}, \quad \text{y} \qquad \left\{\frac{d_s}{d}, \frac{q}{d\sqrt{gd}}\right\} = \{0.71,\ 0.20\} \tag{6}$$

Para cada combinación, la erosión local se obtuvo usando diferentes valores de q^s y h^s, con el fin de comprobar la independencia del proceso con respecto a dichos valores. Como se desprende de la figura 2, por lo compacto de cada una de las nubes, las condiciones (q^s, h^s) usadas para alcanzar la erosión objetivo tienen, en efecto, poca influencia en los resultados (cuadro 2).

Siguiendo a Chreties *et al*. (2008), y con el objetivo de distinguir cuál es verdaderamente la condición crítica, varios experimentos

Cuadro 1. Descripción de los diferentes estados.

Estado	Aguas abajo del estribo	Aguas arriba del estribo
-1	No hay movimiento	No hay movimiento
1-2	Granos tiemblan	No hay movimiento
2-3	Movimiento por impulsos	Granos tiemblan
3-4	Movimiento por impulsos	Granos caen por el talud
4-5	Movimiento por impulsos	Granos caen y suben por el talud
5-6	Movimiento por impulsos	Granos suben por el talud
6-	Movimiento general	Movimiento general

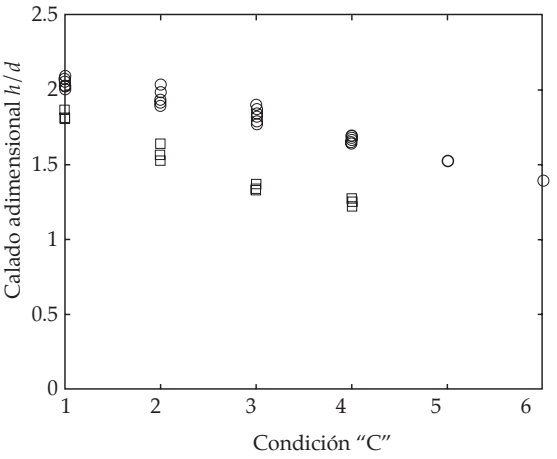

Figura 2. Resultados experimentales para h/d como función de la condición C para situaciones descritas en la ecuación (6). Los círculos indican (0.71, 0.27) y cuadrados (0.71, 0.20).

se dejaron correr en diferentes condiciones durante más de tres días, analizando el proceso erosivo (figura 3). De esta forma se obtiene para qué condición el proceso de erosión se reactiva nuevamente. La figura 3 muestra el proceso erosivo para diferentes condiciones (condiciones 4, 5 y 6). En la condición 6, *i.e.*, cuando existe movimiento general, la erosión muestra un incremento notable (20% en 24 horas). La condición 5 se descarta igualmente (figura 3). Finalmente, los resultados para la condición 4 son siempre negativos, es decir, no muestran un aumento de la erosión. Así pues, d_s es la erosión de equilibrio para h/d en esta condición.

De la figura 2 resulta por ejemplo, que para $\{d_s/d, q/d\sqrt{gd}\}=\{0.71;\ 0.27\}$ se tiene, en C = 4, h/d = 1.68. Así pues, la erosión de equilibrio para las condiciones

Cuadro 2. Ensayos realizados con ambas metodologías (nueva y canónica). En el caso de la nueva metodología, el valor de h/d corresponde a la condición C = 4.

Metodología	d_s/d	$q/d\sqrt{gd}$	h/d	$q^s/d\sqrt{gd}$	$h^{s/d}$
Nueva	0.71	0.27	1.68	0.30	1.09
Nueva	0.71	0.27	1.68	0.29	1.09
Nueva	0.71	0.20	1.22	0.35	1.58
Nueva	0.71	0.20	1.28	0.25	1.19
Nueva	0.71	0.20	1.25	0.30	0.94
Nueva	0.50	0.20	1.28	0.25	1.18
Canónica	-	0.27	1.68	-	-
Canónica	-	0.20	1.28	-	-

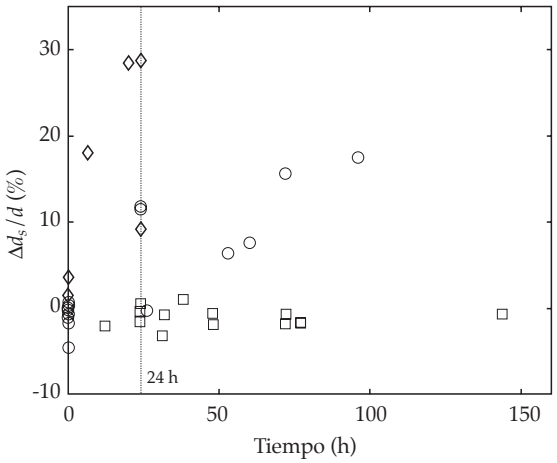

Figura 3. Análisis de equilibrio. Condición 6 (diamantes), condición 5 (círculos) y condición 4 (cuadrados).

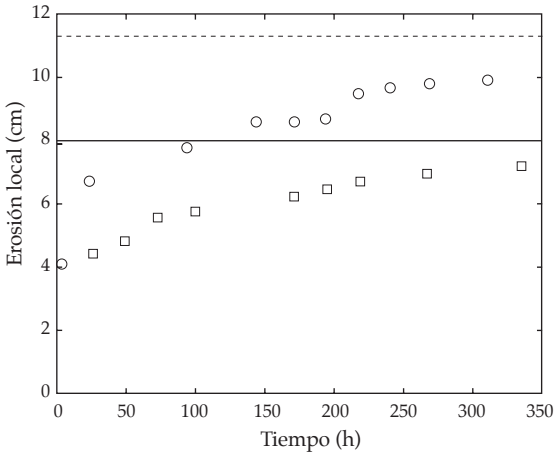

Figura 4. Comparación de la nueva metodología con los ensayos canónicos; 11.3 cm (círculos y línea discontinua) y 8 cm (cuadrados y línea continua).

$\{h/d, q/d\sqrt{gd}\}=\{1.68;\ 0.27\}$ será $d_{se}/d = 0.71$ (*i.e.*, $d_{se} = 11.3$ cm). Igualmente, $h/d \approx 1.25$ en C = 4 para $\{d_s/d, q/d\sqrt{gd}\}=\{0.71;\ 0.20\}$ (cuadrados), y por tanto $d_{se}/d = 0.71$ para $\{h/d, q/d\sqrt{gd}\}=\{1.25;\ 0.20\}$. También se ha obtenido, aunque no se muestra en la figura, $d_{se} = 8$ cm para $\{h/d, q/d\sqrt{gd}\}=\{1.28;\ 0.20\}$.

Finalmente, dos de los resultados de arriba (aquellos en que $\{h/d, q/d\sqrt{gd}\}=\{1.68;\ 0.27\}$ y $\{h/d, q/d\sqrt{gd}\}=\{1.28;\ 0.20\}$) han sido comparados con los obtenidos en ensayos canónicos de más de 430 horas de duración.

La figura 4 muestra los resultados, observándose cómo los ensayos canónicos tienden a alcanzar un valor similar al obtenido usando la nueva metodología. Cabe destacar que en los ensayos canónicos, la erosión de equilibrio se alcanza de forma lenta. En los casos aquí presentados, después de cien horas de ensayo, la erosión local supone el 60% de la erosión de equilibrio (la nueva metodología requiere sólo unas tres horas). Además, usando el criterio de erosión de equilibrio para estribos de pared vertical, Fael et al. (2006), los ensayos "canónicos" se habrían parado, respectivamente, a las 171 y 100 horas, obteniendo erosiones de equilibrio de $d_{se} = 8.6$ cm y $d_{se} = 5.8$ cm, respectivamente (un 25% inferior a los valores de $d_{se} = 11.3$ cm y $d_{se} = 8$ cm estimados con la nueva metodología).

Conclusiones

La metodología propuesta por Chreties *et al*. (2008) para analizar la erosión de equilibrio en pilas de puentes ha sido extendida para el caso de estribos. Los resultados presentan coherencia con los ensayos canónicos, mostrando cómo la metodología permite reducir de forma notable el tiempo invertido en los ensayos.

Agradecimientos

Antonio Muñoz pudo realizar su trabajo gracias a la colaboración del Ministerio de Educación y Ciencia español. Los autores quisieran agradecer de la misma forma a Eduardo Díaz, técnico del laboratorio, por su inestimable ayuda antes y durante los ensayos.

Recibido: 07/01/09
Aprobado: 25/08/10

Referencias

CARDOSO, A.H. and BETTESS, R. Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutment. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 125, No. 4, 1999, pp. 388-399.

CHRETIES, C., SIMARRO, G., and TEIXEIRA, L. New Experimental Method to Find Equilibrium Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 134, No. 10, 2008, pp. 1491-1496.

FAEL, C.M.S., SIMARRO, G., MARTÍN-VIDE, J.P., and CARDOSO, A.H. Local scour at vertical-wall abutments under clear water flow conditions. *Water Resources Research*. 2006.

KANDASAMY, J.K. *Abutment scour.* Report No. 458. Auckland, New Zealand: School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand, 1989.

LAURSEN, E.M. and TOCH, A. *Scour around bridge piers and abutments.* Ames: Iowa Highway Research Board, State University of Iowa, 1956.

MELVILLE, B.W. and CHIEW, Y.M. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 125, No. 1, 1999, pp. 59-65.

MELVILLE, B.W. and COLEMAN, S.E. *Bridge Scour.* Highlands Ranch: Water Resources Publications, LLC, 2000.

SIMARRO-GRANDE, G. y MARTÍN-VIDE, J. Estudio de la evolución temporal de la erosión local mediante la expresión exponencial. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XX, núm. 2, abril-junio de 2005, pp. 137-146.

Abstract

MUÑOZ, A., CHRETIES, C., TEIXEIRA, L. & SIMARRO, G. Equilibrium local scour at bridge abutments. Water Technology and Sciences, *formerly* Hydraulic engineering in Mexico *(in Spanish). Vol. II, no. 1, January-March, 2011, pp. 133-139.*

This technical note presents the extension of the methodology for the analysis of the equilibrium scour at bridge piers by Chreties et al. 2008 to the case of vertical-wall bridge abutments. The aim of the methodology is twofold: first, to reduce the time and the energy consumption required for performing the experiments and, second, to avoid the uncertainties related to the equilibrium scour being reached asymptotically in usual local scour experiments. The new methodology is tested and the results are compared with canonical experiments for local scour.

Keywords*: local scour, equilibrium scour, bridge abutments.*

Dirección institucional de los autores

Ing. Antonio Muñoz-Villanueva

Risk Engineer
Allianz Global Corporate & Specialty
Avenida General Perón, 27
Madrid, España
Teléfonos: +34 (660) 999 557 y +34 (915) 960 039
antonio.munoz@allianz.com
amv1985@gmail.com

Ing. Christian Chreties

Profesor investigador
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República
Avenida 18 de Julio 1968
Montevideo, Uruguay
Teléfono: +59 (82) 4009 201
chreties@fing.edu.uy

Dr. Luis Teixeira

Profesor titular
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República
Avenida 18 de Julio 1968
Montevideo, Uruguay
Teléfonos: +59 (82) 4009 201 y 4092 779
luistei@fing.edu.uy

Dr. Gonzalo Simarro-Grande

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos
Universidad De Castilla-La Mancha, España
Edificio Politécnico
Avenida Camilo José Cela s/n
13071 Ciudad Real, España
Teléfono: +34 (92) 6295 300, extensiones 3291 o 3280
gonzalo.simarro@uclm.es