

# SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES: FORMULACIÓN GENERAL Y ANÁLISIS CRÍTICO DE METODOLOGÍAS EXISTENTES

Hector Daniel Farias, María T. Pilán, Francisco J. Pece, Mónica T. Mattar

Instituto de Recursos Hídricos (IRHi-FCEyT-UNSE), Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina

E-mail: hfarias@bigfoot.com - Web: http://irh-fce.unse.edu.ar/

## Introducción

El problema de estimar la socavación local en pilas de puentes es de significativa importancia en hidráulica fluvial. Sin embargo, la mayor parte de los métodos que se emplean en la actualidad están basados en datos de laboratorio con importantes limitaciones, tales como rangos limitados de los parámetros, efectos de escala y hasta inadecuados ajustes de las ecuaciones matemáticas para describir las tendencias observadas.

En este trabajo, luego de una formulación general del problema de socavación local en pilas, se revisan algunos métodos de amplia difusión a nivel mundial, puntualizándose algunas deficiencias importantes de los mismos y se proponen nuevas líneas a investigar para mejorar las predicciones.

## Aspectos Teóricos

Para evaluar la profundidad de socavación local en la situación de equilibrio ( $d_{se}$ ) puede formularse la siguiente relación funcional general:

$$d_{se} = f_{sc} (V, h, d, \sigma_d, \rho_s, \mu, \rho, g, a, \phi_{Fi}, \phi_\alpha)$$

$V$  es la velocidad media del flujo de aproximación,  $h$  es el tirante o profundidad del flujo de aproximación,  $d$  es el tamaño mediano de las partículas de sedimento que conforman el lecho fluvial,  $\sigma_d$  es una medida de la dispersión de la distribución granulométrica del material (habitualmente la desviación estándar geométrica del material),  $\rho_s$  es la densidad del sedimento,  $\mu$  es la viscosidad del agua,  $\rho$  es la densidad del agua,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $a$  el diámetro o ancho característico (normal al flujo) de la pila,  $\phi_{Fi}$  indica un conjunto de factores de forma que dependen de la geometría de la pila (puede ser uno o varios),  $\phi_\alpha$  es un factor que depende del alineamiento de la pila respecto a la dirección dominante del flujo en la sección de cruce del puente. Algunos autores incluyen en la lista otras cantidades como  $V_c$  (la velocidad crítica para el inicio del movimiento de partículas del lecho) y  $C_s$  (concentración de sedimentos del flujo de aproximación). Sin embargo, estas cantidades se pueden encontrar a partir de las variables primarias: por ejemplo, la velocidad crítica puede expresarse como  $V_c = f_{Vc}(h, d, \rho, \rho_s, \mu, g)$ . Para el rango de arenas, una ecuación muy usada se expresa en la forma:  $V_c = 6.19 d^{1/3} h^{1/6}$  (unidades SI). Por su parte, la concentración de sedimentos también puede expresarse a través de una relación funcional del tipo:  $C_s = f_{Cs}(V, h, d, \dots)$  en la que la forma final de la ecuación depende del autor. La razón ( $V/V_c$ ) es de singular importancia, ya que define las características del proceso de erosión en función de la presencia o no de transporte sólido en el flujo de aproximación.

Si se aplican las técnicas de análisis dimensional sobre la función general, aparecen parámetros típicos tales como el número de Froude del flujo [ $Fr = V/(g \cdot h)^{0.5}$ ], un número de Reynolds [ $Re_a = V \cdot a/\nu$ ] asociado a la pila y una serie de razones de longitudes, basadas en una longitud patrón, que generalmente corresponde al ancho de la pila, es decir:  $(d_s/a)$ ,  $(h/a)$ ,  $(d/a)$  sumados a los factores de forma.

## Ecuación Generalizada de Erosión Local

Para describir la evolución temporal del proceso de socavación local alrededor de una estructura cualesquiera interpuesta en un campo de flujo, se emplea la siguiente ecuación exponencial (Hoffmans y Verheij, 2002):

$d_s(t)/d_{se} = f(t) = 1 - e^{-\lambda(t/t_1)^\eta}$ , mientras que para la socavación final de equilibrio la fórmula se expresa

como:  $d_{se}/L_E = \prod_{i=1}^n f_i$ , donde  $L_E$  es la longitud

característica o escala espacial del fenómeno,  $t_1$  es un tiempo característico de modo tal que para  $t = t_1$ :  $d_s = L_E$ , el coeficiente del exponente

$\lambda = -\ln(1 - L_E/d_{se})$  y  $\eta$  es una constante. Las

funciones  $f_i$  dependen de las variables fundamentales: velocidad del flujo, tirante, geometría de las estructuras, características del sedimento, etc.

Gran parte de las ecuaciones que se usan en la actualidad (e.g., Melville y Coleman, 2000) pueden expresarse en este formato general.

## Ecuaciones Tradicionales

La ecuación desarrollada por investigadores de la Universidad del Estado de Colorado (CSU) y adoptada por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) en su circular N° 18 (este documento se ha popularizado como Circular HEC-18) se basa en un procedimiento empírico de ajuste a una curva de datos observados en laboratorio. Los experimentos de laboratorio en los que se basa la fórmula CSU corresponden a ensayos realizados para pilas cilíndricas individuales, usando como sedimento arena con tamaños medianos de 0.24 mm, 0.26 mm y 0.52 mm. La fórmula CSU original se escribe como:  $d_s/h = 2.0 (a/h)^{0.65} Fr^{0.43}$

Según Jones y Sheppard (2000), los datos empleados para el desarrollo de la fórmula CSU fueron en esencia los correspondientes a dos bases: por un lado los correspondientes a las mediciones de Chabert y Engeldinger (realizadas en 1956), que comprenden dos sub-conjuntos (72 corridas para un sedimento de 0.52 mm y 30 corridas para un sedimento de 0.26 mm), y los datos publicados por Shen, Schneider y Karaki en 1967, basados en 21 corridas con un sedimento de 0.24 mm.

Considerando los parámetros adimensionales:

$$Y_{d_s} = d_s/h, X_a = a/h, X_F = Fr = V/(g \cdot h)^{0.5}$$

la relación funcional para la socavación puede escribirse en la forma:  $Y_{d_s} = \Phi_{d_s}(X_a, X_F)$ . Expresando esta relación en forma de ecuación potencial (al estilo de la fórmula CSU o HEC-18), se obtiene:  $Y_{d_s} = c_0 X_a^{c_1} X_F^{c_2}$ .

con:  $c_0 = c_0' \prod_{i=1}^n K_i$ , siendo  $c_0'$  un factor numérico de

ajuste y los  $K_i$  son factores de corrección para tener en cuenta las condiciones distintas que se presentan en la práctica respecto de la situación ideal de una pila cilíndrica aislada con flujo uniforme, sedimentos uniformes, etc. (Richardson y Briaud, 2001).

La ecuación CSU en su encarnación actual puede escribirse como:  $Y_{ds} = 2.0K_1K_2K_3K_4 X_a^{0.65} X_F^{0.43}$

Haciendo abstracción de los  $K_i$  y volviendo al formato básico, la fórmula CSU está basada en la condición  $Y_{ds} = \Phi_{ds}(X)$ , donde:  $X = X_a^3 \cdot X_F^2$ , de modo que en una ecuación de la forma:  $Y_{ds} = m_0 X^{m_1}$  (como es en esencia la fórmula CSU), los exponentes de  $X_a$  y  $X_F$  guardan una proporción constante.

Tabla 1.- Resumen de datos usados en la ec. CSU

Fuente de Datos	Número	$d_{50}$ [mm]	$Fr = V/(gh)^{0.5}$	$a/h$	$d_s/h$
CSU (Shen et al)	21	0.24	0.20-0.95	0.57-1.34	0.43-1.52
Chabert & Engeldinger 1	72	0.52	0.13-0.48	0.14-1.00	0.22-1.33
Chabert & Engeldinger 2	30	0.26	0.10-0.25	0.14-1.50	0.19-1.08
TOTAL	123	0.24-0.52	0.10-0.95	0.14-1.50	0.19-1.52

En la Fig. 1 se representa la ec. CSU con los datos originales y se han agregado algunos datos más recientes. Aunque el ajuste global parece bastante bueno, si se discriminan pilas delgadas y anchas (Jones y Sheppard, 2000) puede advertirse que la ec. CSU tiende a sobreestimar las erosiones para estas últimas (Fig. 2).

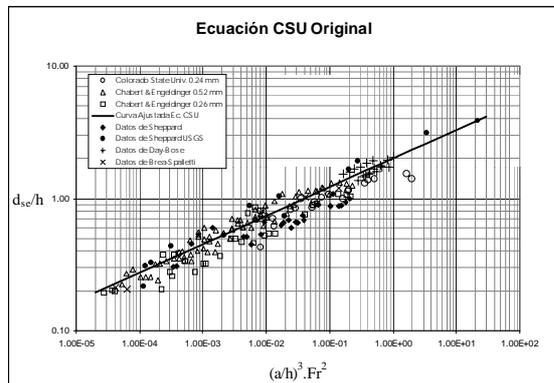


Figura 1.- Ecuación CSU original con datos adicionales

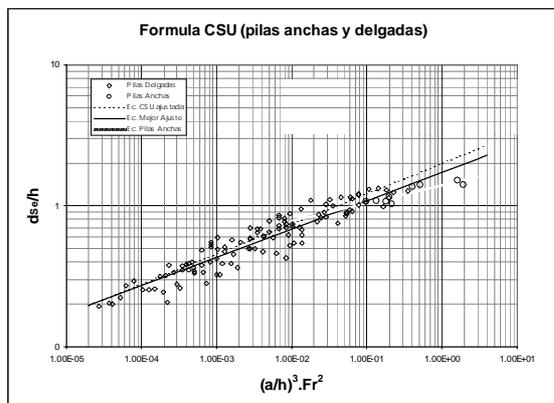


Figura 2.- Ecuación CSU para pilas delgadas y anchas

Sin embargo, este aspecto no es el más crítico de la ec. CSU. En efecto, si se consideran los datos originales y se realiza un análisis de regresión se obtiene:  $m_0=1.7241$  y  $m_1=0.2012$  (con  $r=0.9454$ ), a diferencia de los valores  $m_0=2.0$  y  $m_1=0.215$  que corresponden al ajuste publicado inicialmente por la CSU. Pero si se considera la función  $Y_{ds} = c_0 X_a^{c_1} X_F^{c_2}$ , y se realiza un análisis de regresión no lineal múltiple, se obtiene:  $c_0=1.6$ ;  $c_1=0.5$ ;  $c_2=0.375$ . Es decir, que si se hubiera procedido de esta manera en el análisis inicial de los datos originales, la ecuación CSU habría tenido la forma:  $d_s/h = 1.6 (a/h)^{0.5} Fr^{0.375}$ . Las predicciones de esta ecuación son claramente superiores a la CSU original (Figs. 3 y 4).

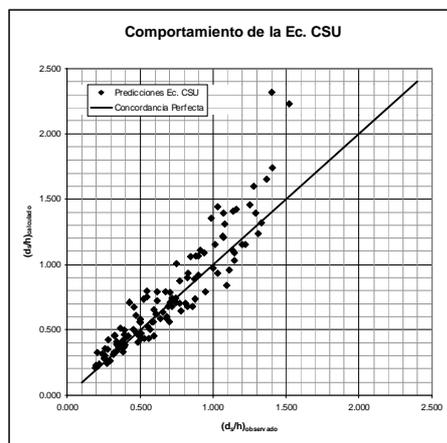


Fig. 3.- Predicciones de la ec. CSU original

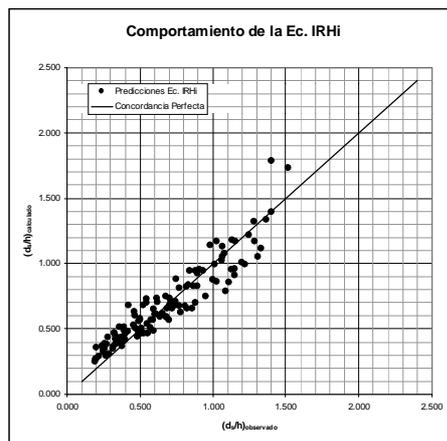


Fig. 3.- Predicciones de la ec. CSU modificada

Conclusiones

Algunas formulaciones muy difundidas para la estimación de la erosión local en pilas de puentes (e.g. la ec. CSU o HEC18) están basadas en datos de laboratorio que no han sido tratados debidamente en su análisis inicial y por lo tanto resulta necesario revisar dichas ecuaciones incorporando nueva información experimental (de laboratorio y de prototipo) ampliando los rangos de los parámetros fundamentales. Las predicciones que se obtienen con las ecuaciones en su versión actual pueden conducir a errores importantes, máxime si se tiene en cuenta su gran nivel de aceptación actual, al punto de estar incluidas en paquetes de software de uso masivo, como HEC-RAS.

Referencias Bibliográficas

Hoffmans, G.J.C.M. and H.J. Verheij (1997). *Scour Manual*. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Hoffmans, G.J.C.M. and H.J. Verheij (2002). "On the Challenges of Scour Prediction", *Proceedings of ICSF*, Texas A&M Univ. College Station, Texas, USA.

Jones, J.S. and Sheppard, D.M. (2000). "Scour at Wide Piers". *Proc. Joint Conference on Water Resources Engineering*, ASCE, Minneapolis, MN, USA.

Melville, B. W. & Coleman, S. E. (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA.

Richardson, E. V. & Briaud, J.L. (2001) "United States Practice for Bridge Scour Analysis". *Proc. ISSMGE 2001*, Istanbul, Turkey.