

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/>

RESUMEN

El cálculo de la socavación local en pilas de puentes es de significativa importancia en hidráulica fluvial. De los métodos que se aplican en la actualidad muchos están basados en datos de laboratorio que muestran importantes limitaciones, tales como rangos restringidos de los parámetros, efectos de escala y hasta inadecuados ajustes de las ecuaciones matemáticas para describir las tendencias observadas. En este trabajo 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. Se concluye que 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, teniendo en cuenta que gozan de un gran nivel de aceptación y están incorporadas en paquetes de software de uso masivo, como HEC-RAS.

ABSTRACT

The computation of local scour at bridge piers is very important in the field of fluvial hydraulics. Among the currently available practical methods of calculation, most of them are based on scarce laboratory data that show important shortcomings, such as, limited range of parameters, scale effects, and even incorrect mathematical curve fitting procedures to describe the observed trend of data points. This paper presents a review of some available methods, which are used worldwide, and several problematic issues are pointed out. A preliminary result of the study shows that several formulae for pier scour calculation (e.g., CSU or HEC18) are based on curve fit procedures on a few laboratory data, that were not correctly analyzed in their initial formulation. Thus, it is necessary to review such equations, adding new experimental information (laboratory and field data) and expanding the ranges of the involved parameters. The predictions from current equations can yield important errors, taking into account that they are used broadly and they are enclosed in software packages, such as HEC-RAS.

INTRODUCCIÓN

El problema de estimar la socavación local en pilas de puentes es de significativa importancia en hidráulica fluvial. En efecto, uno de los aspectos más importantes de la Hidráulica de Puentes lo constituye precisamente este tópico. Sin embargo, la mayor parte de los métodos que se emplean en la actualidad están basados en datos de laboratorio, los cuales, aparte de ser escasos en número, exhiben importantes limitaciones, tales como rangos restringidos 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:

$$d_{s_e} = f_{s_e} (V, h, d, \sigma_d, \rho_s, \mu, \rho, g, a, \phi_{Fi}, \phi_\alpha) \quad (1)$$

donde 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, σ_d es una medida de la dispersión de la distribución granulométrica del material (habitualmente la desviación estándar geométrica del material), ρ_s es la densidad del sedimento, μ es la viscosidad del agua, ρ es la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad, a el diámetro o ancho característico (normal al flujo) de la pila, ϕ_{Fi} indica un conjunto de factores de forma que dependen de la geometría de la pila (puede ser uno o varios), ϕ_α 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 $V_c = f_{V_c}(h, d, \rho, \rho_s, \mu, g)$. 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: $C_s = f_{C_s}(V, h, d, \dots)$ en la que la forma final de la ecuación depende del autor que se considere.

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.

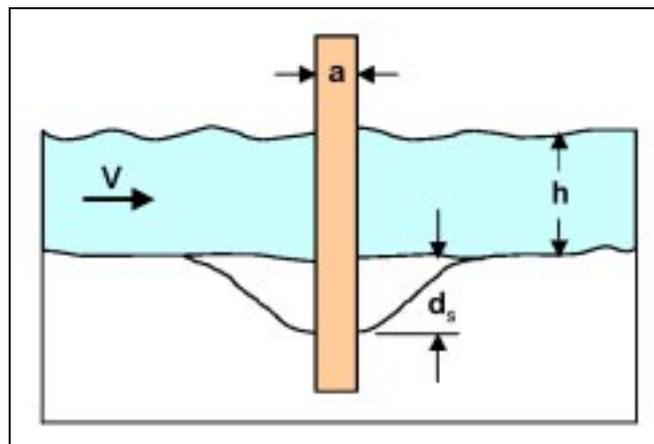


Figura 1.- Esquema de definición para la socavación local en pilas.

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.

De esta manera, en una primera instancia se podría plantear una ecuación generalizada en variables adimensionales a partir de la siguiente relación funcional:

$$\frac{d_{s_e}}{a} = F_{d_{s_e}} \left(Fr, Re_a, \frac{h}{a}, \frac{V}{V_c}, \frac{a}{d}, \sigma_d, \phi_F, C_S \right) \quad (2)$$

Ecuación generalizada de socavación de Hoffmans y Verheij (2002)

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:

$$d_s(t) / d_{s_e} = f(t) = 1 - e^{-\lambda(t/t_1)^\eta} \quad (3)$$

mientras que para la socavación final de equilibrio la fórmula se expresa como:

$$d_{s_e} / L_E = \prod_{i=1}^n f_i \quad (4)$$

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 $\lambda = -\ln(1 - L_E / d_{s_e})$ y η 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. Inclusive, muchas de ellas usan el artificio que aplicar una serie de factores correctivos sobre una ecuación básica, como la ecuación CSU. En ese caso, el resultado final de la predicción siempre está sujeto a la bondad de la estimación de la ecuación básica, que generalmente corresponde a la socavación sobre una pila circular aislada, bajo condiciones de flujo uniforme, tales como las condiciones bajo las cuales se realizaron los experimentos iniciales que dieron origen a las formulaciones más antiguas.

ALGUNAS ECUACIONES TRADICIONALES

Pueden considerarse ahora los siguientes parámetros adimensionales:

$$Y_{d_s} = d_s / h, X_a = a / h, X_F = Fr = V / (g h)^{0.5} \quad (5)$$

de manera tal que la relación funcional para la socavación puede escribirse en la forma:

$$Y_{d_s} = \Phi_{d_s} (X_a, X_F) \quad (6)$$

Expresando esta relación en forma de ecuación potencial (al estilo de la fórmula CSU o HEC-18), se obtiene:

$$Y_{d_s} = c_0 X_a^{c_1} X_F^{c_2} \quad (7)$$

El factor c_0 puede expresarse a su vez como:

$$c_0 = c_0' \cdot \prod_{i=1}^n K_i \quad (8)$$

Teniendo en cuenta lo expresado en el texto de Hoffmans y Verheij (1997), existe una ecuación desarrollada por Johnson en 1992, la cual está basada en un enfoque probabilístico "para el diseño de puentes seguros, de modo tal que sus fundaciones no fueran socavadas". Debe interpretarse a esta ecuación como una curva de mejor ajuste de la envolvente superior de los datos usados para su desarrollo. La ecuación resultante es la siguiente:

$$d_s / h = 2.02 (a/h)^{0.98} Fr^{0.21} \quad (9)$$

o bien en formato de variables adimensionales:

$$Y_{d_s} = 2.02 X_a^{0.98} X_F^{0.21} \quad (10)$$

Es decir, los valores de los coeficientes resultan en este caso: $c_0 = 2.02$; $c_1 = 0.98$; $c_2 = 0.21$

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:

$$d_s / h = 2.0 (a/h)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (11)$$

o bien en variables adimensionales:

$$Y_{d_s} = 2.0 X_a^{0.65} X_F^{0.43} \quad (12)$$

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 (Tabla 1).

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

Tabla 1.- Resumen de la base de datos usada para la calibración de la ecuación CSU

Fuente de Datos	Número	d_{50} [mm]	$Fr = V/(gh)^{0.5}$	a/h	d_{se}/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. 2 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 sobre-estimar las erosiones para estas últimas (Fig. 3).

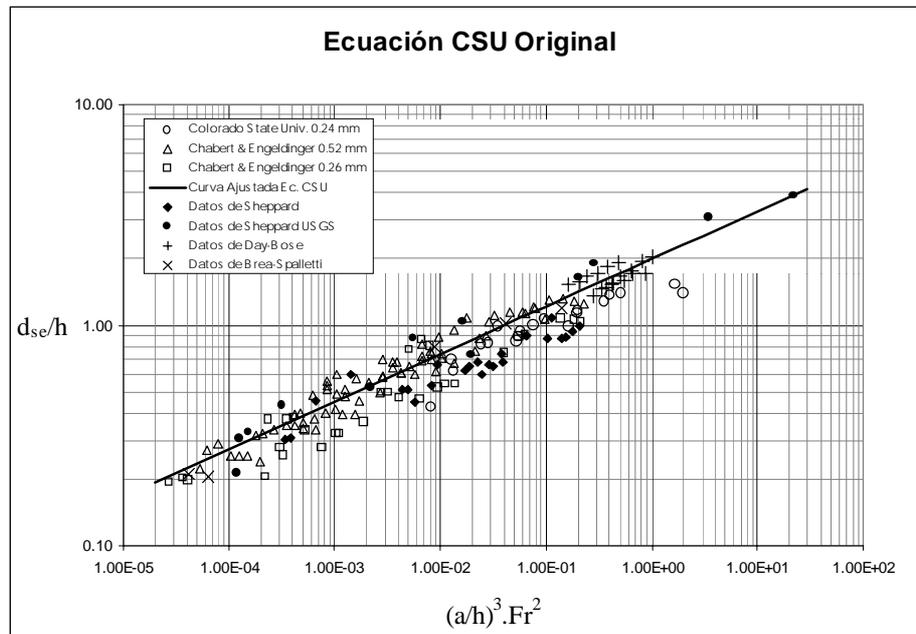


Figura 2.- Ecuación CSU original con datos adicionales

En la Figura 3 se plotean los datos originales, pero separando los correspondientes a pilas delgadas y pilas anchas. Si se ensayan ajustes separados para pilas delgadas y anchas se obtienen las curvas indicadas en el gráfico de la Figura 3. Es decir, el exponente es menor para el caso de pilas anchas y más grande para el caso de pilas delgadas.

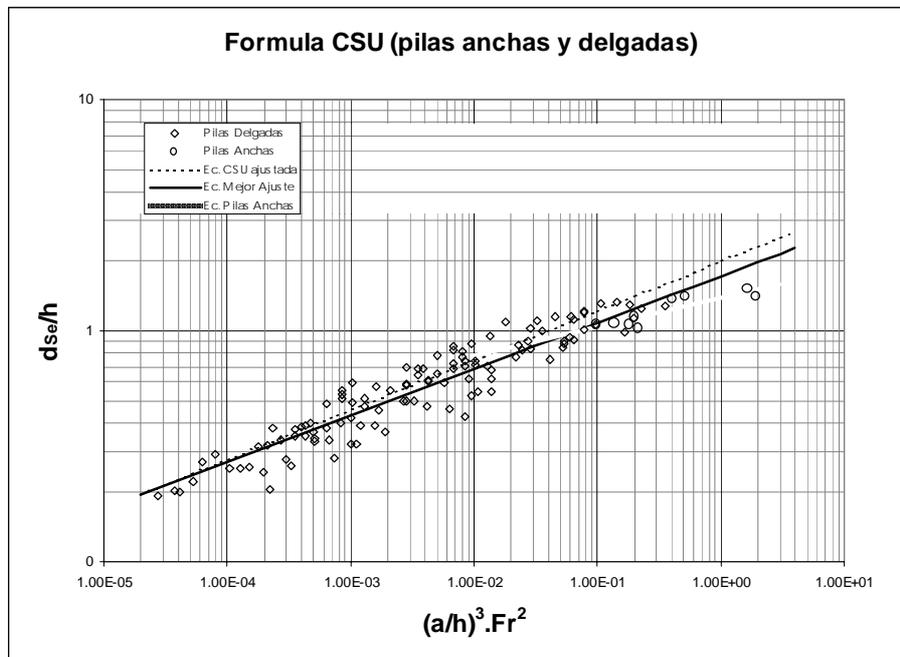


Figura 3.- Ecuación CSU para pilas delgadas y anchas

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:

$$m_0 = 1.7241, \quad m_1 = 0.2012 \quad (\text{con un coeficiente de correlación } r = 0.9454)$$

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:

$$Y_{d_s} = c_0 X_a^{c_1} X_F^{c_2} \quad (13)$$

y se realiza un análisis de regresión no lineal múltiple, se obtiene para el factor y los exponentes de la ecuación los siguientes valores:

$$c_0=1.6; \quad c_1=0.5; \quad c_2=0.375.$$

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:

$$d_s/h = 1.6 (a/h)^{0.5} Fr^{0.375} \quad (14)$$

Las predicciones de esta ecuación son claramente superiores a la CSU original, tal como puede inferirse a partir de las comparaciones entre valores calculados y observados que se presentan en las Figs. 4 y 5.

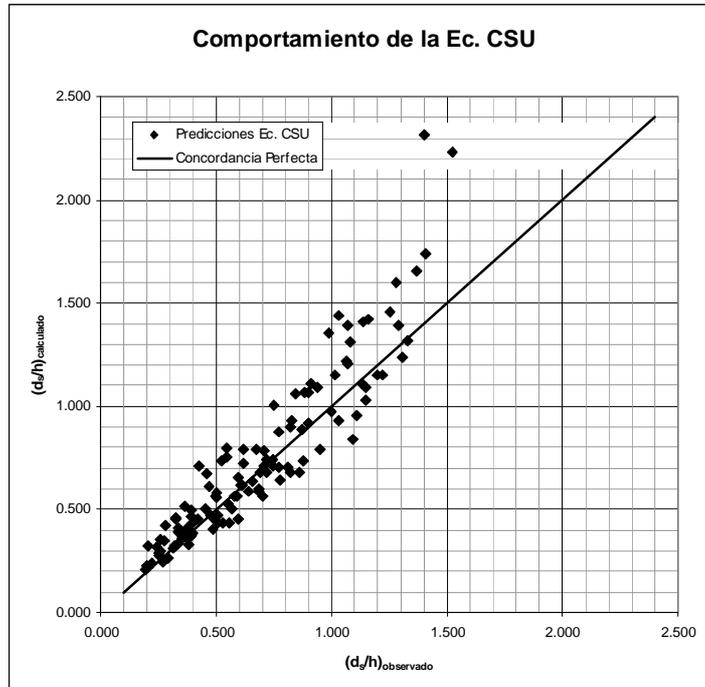


Fig. 4.- Predicciones de la ec. CSU original

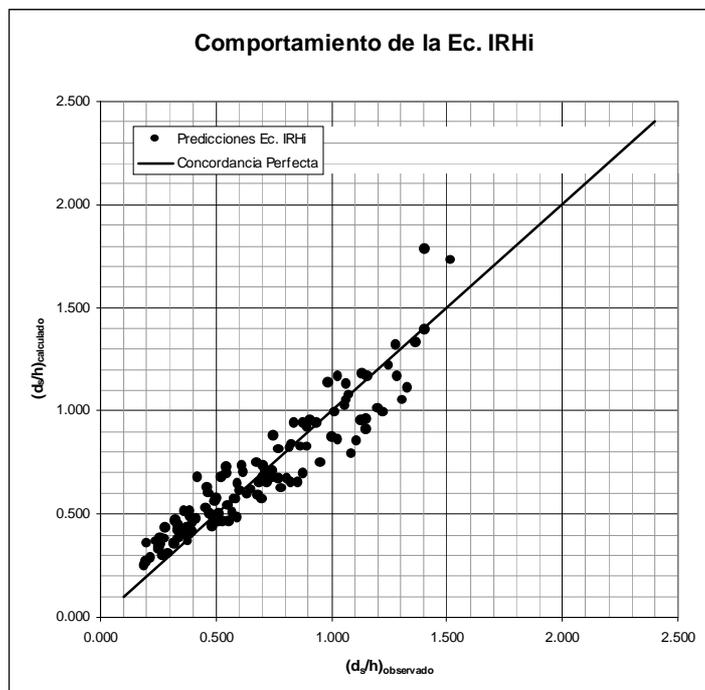


Fig. 5.- Predicciones de la ec. CSU modificada (IRHi)

OTRAS FORMULACIONES RECIENTES

Fórmula de Melville

Esta ecuación se desarrolló en 1997 en base a experiencias de laboratorio y esencialmente se basa en una serie de factores empíricos. La misma se escribe como sigue:

$$d_{S_c} = K_I K_d K_{ha} K_\alpha K_F \quad (15)$$

donde:

K_I : Factor que depende la intensidad del flujo

K_d : Factor dependiente del tamaño del sedimento

K_{ha} : Factor que depende de la relación entre la profundidad del flujo y el ancho de la pila (este factor se escribe como K_{yD} en la nomenclatura usada por Melville)

K_α : Factor dependiente del ángulo de ataque de la corriente o esviate

K_F : factor que depende de la forma de la pila

Los valores de cada uno de los factores se indican a continuación:

Para condiciones de lecho vivo ($V/V_c > 1$) el factor de intensidad de flujo adquiere el valor unitario, es decir: $K_I = 1$, mientras que para una situación de aguas claras ($V/V_c < 1$) el factor vale: $K_I = (V/V_c)$, es decir, directamente la razón de velocidades.

Con respecto al factor dependiente del tamaño del sedimento K_d , en realidad lo que se compara es la relación entre el tamaño del sedimento y el ancho de la pila. Cuando $a/d > 25$ (sedimento relativamente fino) $K_d = 1$, mientras que para $a/d < 25$ (sedimento grueso), Melville propone la siguiente ecuación:

$$K_d = 0.57 \log[2.24(a/d)]$$

El factor K_{ha} (que a diferencia de los restantes no es un parámetro adimensional, sino tiene dimensiones de una longitud) es quizás el más importante, ya que el mismo es el que exhibe un mayor fundamento físico en relación a los factores de escala que considera. Para este factor, Melville propone tres ecuaciones según sea el rango de localización de la razón (a/h):

Para $(a/h) < 0.7$, $K_{ha} = 2.4 a$

Para $0.7 < (a/h) < 5$, $K_{ha} = 2 \cdot (h \cdot a)^{0.5}$

Para $(a/h) > 5$, $K_{ha} = 4.5 h$

Los factores K_α y K_F se estiman a partir de tablas y gráficos (Melville y Coleman, 2000).

Fórmulas de Sheppard

En una serie de investigaciones recientes (e.g. Sheppard, 2003) llevadas a cabo entre la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos y varios Departamentos de Transporte estatales, se han analizado en detalle algunas ventajas y limitaciones de varias formulaciones existentes para la estimación de la socavación local, tanto en pilas simples, como

en pilas de geometrías complejas y grupos de pilas, conjuntos columna-cabezal-pilotes, etc.

Las relaciones obtenidas para pilas complejas y grupos estructurales de cimentación se basan en la aplicación del principio de superposición en base a experimentos cuidadosos llevados a cabo separando los elementos estructurales que producen procesos de socavación local y sumando sus efectos.

Sin embargo la aplicación exitosa de tales metodologías muchas veces está basada en una correcta evaluación de la socavación en pilas sencillas, para luego aplicar coeficientes de corrección de manera de tener en cuenta el efecto de grupo o bien singularidades geométricas.

Las ecuaciones propuestas por Sheppard para la estimación de la socavación local en pilas simples, se diferencian según sea la condición del flujo de aproximación en cuanto al transporte de sedimentos.

Para situación de agua clara [$0.47 < (V/V_c) < 1.00$], la fórmula para d_s se expresa en función del producto de tres funciones principales:

$$d_s / a = 2.5 K_F f_1(h/a) f_2(V/V_c) f_3(a/d) \quad (16)$$

donde:

$$f_1\left(\frac{h}{a}\right) = \tanh\left[\left(\frac{h}{a}\right)^{0.4}\right]$$

$$f_2\left(\frac{V}{V_c}\right) = 1 - 0.75[\ln(V/V_c)]^2$$

$$f_3\left(\frac{a}{d}\right) = 3.05 \left\{ 2.6 \exp\left[0.45\left(\log\left(\frac{a}{d}\right) - 1.64\right)\right] + 0.45 \exp\left[-2.6\left(\log\left(\frac{a}{d}\right) - 1.64\right)\right] \right\}^{-1}$$

Para la condición de lecho vivo, es decir, cuando [$1.0 < (V/V_c) < (V_{lp}/V_c)$] (donde V_{lp} es la velocidad límite de erosión en lecho vivo), las ecuaciones propuestas por Sheppard son las siguientes:

$$d_s / a = K_F f_1(h/a) \left[2.2 \left(\frac{V - V_c}{V_{lp} - V_c} \right) + 2.5 f_2(a/d) \left(\frac{V_{lp} - V}{V_{lp} - V_c} \right) \right] \quad (17)$$

y cuando [$(V/V_c) > (V_{lp}/V_c)$]:

$$d_s / d = 2.2 K_F \tanh\left[\left(\frac{h}{d}\right)^{0.4}\right] \quad (18)$$

Según reporta Sheppard (2003), estas ecuaciones son válidas para pilas cilíndricas y en el caso de otras geometrías se indican factores de corrección por forma.

El conjunto de ecuaciones de Sheppard está basado en la consideración de las investigaciones previas (consolidando los resultados obtenidos a través de varios años de experimentos llevados a cabo por Sterling Jones en la FHWA, algunos aspectos de la escuela europea de erosión local, fundamentalmente holandeses a partir de las investigaciones de Breussers, y una gran cantidad de experimentos propios).

A pesar de su aparente complejidad, las ecuaciones de Sheppard se pueden programar fácilmente o bien implementarse a través de hojas de cálculo y se estima que sus resultados deberían ser lo suficientemente confiables, teniendo en cuenta las bases de datos empleadas para su desarrollo.

En esta instancia de la investigación, está en marcha un programa tendiente a la verificación de la bondad predictiva de las ecuaciones de Melville y Sheppard, procurando reunir datos de prototipo independientes (es decir, que no hayan sido empleados para el ajuste de las fórmulas) cubriendo amplios rangos de los parámetros adimensionales.

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.

Agradecimiento. Parte de las investigaciones que se presentan en este trabajo han sido financiadas por el Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (CICYT-UNSE) a través de fondos de subsidios y por el CONICET. Los autores también desean expresar su gratitud al Ing. J. Sterling Jones de la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) y a los Ings. Daniel Brea y Pablo Spalletti del Instituto Nacional del Agua (Argentina), quienes gentilmente facilitaron parte de los datos experimentales usados en este trabajo.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a: ancho o diámetro de la pila
- B: ancho del cauce
- C_s : concentración de sedimentos en transporte
- d: tamaño del sedimento
- d_s : profundidad de socavación
- d_{se} : profundidad de socavación en la condición de equilibrio

Fr:	número de Froude
f:	función
g:	aceleración de la gravedad
h:	profundidad del flujo
L_E :	longitud característica
K_F :	factor de forma de la pila
K_i :	factores de corrección varios
Re_a :	número de Reynolds asociado a la pila [$Re_a=V.a/v$]
V:	velocidad media del flujo
V_c :	velocidad crítica para el inicio de la erosión
V_{lp} :	velocidad límite de erosión para la condición de lecho vivo
X_a :	parámetro adimensional de ancho de la pila
Y_{ds} :	parámetro adimensional de socavación local
α :	ángulo de ataque de la corriente
Δ :	densidad relativa del sedimento sumergido
ϕ_α :	factor de corrección por ángulo de ataque
ϕ_{Fi} :	conjunto de factores de forma
ρ :	densidad del agua
ρ_s :	densidad del sedimento
τ :	tensión de corte en el lecho
τ_* :	tensión adimensional de Shields

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brea, J. D., Spalletti, P. y otros (1999). "Modelación Física de la Erosión Local al Pie de las Pilas y Defensas de la Conexión Vial Rosario-Victoria". *Informe LHA-180-01-99*. Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Bs.As., Argentina.

Breusers, H.N.C. & Raudkivi, A.J. (1991). *Scouring*. Hydraulics Design Manual, International Association for Hydraulic Research (IAHR), A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.

Brice, J.C. and J.C. Blodgett (1978). "Countermeasure for Hydraulic Problems at Bridges, Volumes 1 and 2". FHWA-RD-78-162 and 163, USGS, Menlo Park, CA, USA.

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", Invited Lecture, *Proceedings of ICSF-1: First International Conference on Scour of Foundations*. Nov. 17-20, 2002. Texas A&M Univ. College Station, Texas, USA.

Jones, J.S. and Sheppard, D.M. (2000). "Scour at Wide Piers". *Proceedings for the 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management*, ASCE, Minneapolis, MN, July 30-August 2.

Lagasse, P.F., L.W. Zevenbergen, J.D. Schall, P.E. Clopper (2001): "Bridge Scour And Stream Instability Countermeasures Experience, Selection, and Design Guidance" (Second Edition). Hydraulic Engineering Circular No. 23, Publication No. FHWA NHI 01-003, U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration. Washington, DC, USA.

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

Neill, C. R. (1973) (Ed.). *Guide to Bridge Hydraulics*. Roads and Transportation Assoc. of Canada, University of Toronto Press, Toronto, Canada, 191 pp.

Richardson, E. V. and Davis, S. R. (1995). *Evaluating Scour at Bridges*. Report No. FHWAIP- 90-017, Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18), Third Edition, Office of Technology Applications, HTA-22, Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, Washington, D. C., U. S. A., November, 204 pp.

Richardson, E.V., D.B. Simons, and P.F. Lagasse (2001). *River Engineering for Highway Encroachments - Highways in the River Environment*. Report FHWA NHI 01-004, Federal Highway Administration, Hydraulic Design Series No. 6, Washington, D.C., USA.

Richardson, E. V. & Briaud, J.L. (2001) "United States Practice for Bridge Scour Analysis". *XV International Conference on Soil Mechanics and Geotech Engineering*, ISSMGE 2001, Istanbul, Turkey.

Sheppard, D.M. (2003). "Scour at Complex Piers". *Final Report Project FDOT BC354 RPWO 35*, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL, USA. 48 p.