

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PROFUNDIDAD
DE
EROSIÓN LOCAL EN PILAS**

Guillermo López, Luis Teixeira, Gonzalo Simarro, Miguel Ortega

*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República,
Uruguay*

Investigador contratado Ramón y Cajal, Instituto de Ciencias del Mar (CSIC), Barcelona, España

Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, CEAMA-Universidad de Granada, España

glopez@fing.edu.uy, luistei@fing.edu.uy, simarro@icm.csic.es, miguelos@ugr.es

RESUMEN:

La erosión local en pilas y estribos de puente es una de las principales causas de daño en estas estructuras (Melville y Coleman, 2000). En el diseño de fundaciones de puentes es usual utilizar la profundidad de erosión de equilibrio que se alcanza con el caudal pico del hidrograma de diseño. La profundidad de erosión que se genera al pasar un evento de crecida puede ser bastante menor a la profundidad de equilibrio ya que las escalas de tiempos del evento son, en general, mucho menores que las que alcanzan las erosiones de equilibrio. Por esto, es que la evolución temporal de la profundidad de erosión alrededor de obstáculos presenta una creciente atención de la comunidad científica.

En este artículo, se analiza la evolución temporal de la profundidad de erosión local alrededor de una pila cilíndrica en condiciones de flujo estacionario y agua clara, en base a un enfoque experimental. En particular, se valida una expresión para la estimación de la evolución temporal de la erosión.

Complementariamente, se analiza la evolución del proceso erosivo, identificando sus distintas fases y cuantificando la duración de la fase inicial del proceso, así como las características geométricas de la fosa.

ABSTRACT:

Pier and abutment scour are one of the main reasons for bridge collapse (Melville y Coleman, 2000). In bridge foundation design it is usual to consider the equilibrium scour depth estimated for peak flow discharge conditions. During a flood event the local scour depth may be much smaller than the equilibrium scour depth, since flood time scales are usually shorter than those reaching equilibrium. Therefore, the analysis of the evolution of local scour under steady flow conditions is receiving increased attention.

In this paper, the evolution of local scour depth around a cylindrical pier in clear water conditions under steady flow is analyzed, based on experimental approach. An expression to estimate the local scour depth evolution under steady flow conditions is validated.

Complementary, the scour process is analyzed, identifying the principals characteristics of the scour hole geometry and the phases durations.

PALABRAS CLAVES: Erosión local, pilas de puentes, evolución temporal, flujo estacionario.

INTRODUCCIÓN

La erosión local en pilas y estribos de puente es una de las principales causas de daño en estas estructuras. El proceso de erosión local en pilas es complejo, puesto que involucra un movimiento tridimensional y turbulento del flujo junto con el transporte de sedimentos. Por ello, la inmensa mayoría de los estudios que se encuentran en la bibliografía parten de un planteamiento experimental (Breusuers et al., 1977; Melville y Southerland, 1988; Richardson y Davis, 1993; Simarro et al., 2011).

La erosión asociada a la configuración de equilibrio tiene gran importancia desde un punto de vista ingenieril, puesto que representa la cota superior de la erosión local. Por ello los estudios experimentales se han centrado en encontrar la erosión de equilibrio para diferentes condiciones de flujo, sedimento y geometría de la pila y del canal (Melville y Coleman, 2000).

A pesar de la sencillez del concepto de erosión de equilibrio o final, la situación de equilibrio es difícil de lograr en laboratorio pues parece alcanzarse de forma asintótica en el tiempo. Sobre esta base y dada la experiencia en laboratorio, algunos autores (e.g., Breusuers et al. 1977, Franzetti et al. 1989, Bertoldi y Jones, 1998), afirman que el proceso erosivo nunca alcanza la profundidad de erosión de equilibrio, y sostienen que la evolución de la profundidad de erosión bajo condiciones de agua clara tiende de manera asintótica a un valor sin alcanzarlo.

Sin embargo, en el diseño de puentes es usual considerar la erosión de equilibrio asociada al caudal de diseño. Por otra parte, el caudal de diseño puede no persistir el tiempo suficiente para que la profundidad de erosión se acerque al valor de equilibrio. Por tanto esa metodología de diseño en base a la estimación de la profundidad de erosión máxima o de equilibrio debe ser cuestionada debido a que puede resultar en un diseño antieconómico.

Las dificultades para alcanzar la erosión de equilibrio en laboratorio han llevado a algunos autores a proponer expresiones para la evolución temporal de la erosión que no consideran ni siquiera la existencia de erosión de equilibrio (e.g., Oliveto y Hager, 2002).

El objetivo de este trabajo es avanzar en el estudio de la evolución temporal de la erosión local en pilas basándose en trabajo experimental. En particular, la atención se centra en validar un procedimiento de cálculo para la evolución temporal de la erosión local al-rededor de pilas cilíndricas bajo condiciones estacionarias de flujo en agua clara.

METODOLOGIA

Instalaciones experimentales

Los experimentos se han llevado a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ETSICCP de la Universidad de Castilla-La Mancha (España).

El canal utilizado tiene una longitud de 37 m de longitud y una ancho de 0,75 m, siendo el fondo de acero y las paredes de cristal. La profundidad del flujo en el canal se controla a través de una compuerta situada en el extremo de aguas abajo. La zona de trabajo se ubica a 27 m del comienzo del canal y consta de un cuenco de 3 m de longitud y 0,3 m de profundidad específicamente diseñado para analizar fenómenos de erosión local. En medio de la zona de trabajo se situó una pila cilíndrica de 9 cm de diámetro. Sobre el canal se colocó una capa de sedimento de 7 cm de espesor, que estaba caracterizado por un tamaño medio del grano $d_{50} = 1.65$ mm, una desviación estándar $\sigma_g = 1.32$ (< 1.5 , i.e., sedimento uniforme) y una densidad del sedimento $\rho_s = 2650$ kg/m³.

La profundidad de erosión y la superficie de agua fueron medidas utilizando limnímetros de aguja convencionales. Las medidas de profundidad de erosión local han sido realizadas en el borde frontal aguas arriba de la pila cilíndrica. Mediante ensayos preliminares se determinó la capacidad hidráulica del canal y la mejor configuración de inicio de experimentos.

La descripción detallada de las instalaciones experimentales y de las características de los ensayos se encuentra en López (2007).

Plan de ensayos

De acuerdo con el objetivo planteado se han desarrollado 29 experimentos en condiciones de flujo uniforme y agua clara.

El rango de los parámetros dimensionales de los ensayos son:

- Parámetros del flujo: $24,7 \text{ L/s} < Q < 80,5 \text{ L/s}$; $11,1 \text{ cm} < h < 31,2 \text{ cm}$; $28,5 \text{ cm/s} < v < 47,0 \text{ cm/s}$.
- Tiempo de duración del ensayo: $9,1 \text{ h} < t_{\text{ens}} < 145,2 \text{ h}$

Los rangos de los parámetros adimensionales dados por los ensayos desarrollados en esta instancia son los siguientes:

- $5.01 < Fr_s = v^2 / g d_{50} < 13.67$
- $0.09 < Fr_p = v^2 / g D < 0.25$
- $1.23 < h/D < 3.47$
- $D/d_{50} = 54.54$
- $32900 < Re = v h / \nu < 107300$
- $25600 < Re_p = v D / \nu < 42300$

Análisis de resultados experimentales

El análisis de los resultados de los experimentos se basa en la comparación de los resultados obtenidos con los que proporcionan distintas expresiones de la evolución temporal de la profundidad de erosión y se orienta a la elección de una de ellas. Las expresiones con las que se han comparado los resultados son las de Shen et al. (1966), Franzetti et al. (1989), Summer (1992), Melville y Chiew (1999), Oliveto y Hager (2002), Mia y Nago (2003), y Chang et al. (2004), que se presentan en el Anexo.

RESULTADOS

Evolución del proceso erosivo

Durante el desarrollo de los ensayos se han observado las características del flujo en torno a la pila y el mecanismo de erosión. En la totalidad de los ensayos, el proceso erosivo comienza en ambos bordes de la pila en la zona ubicada aproximadamente a 70° del eje longitudinal del canal (medido desde el punto medio de aguas arriba). A medida que el ensayo evoluciona, las fosas laterales de erosión migran hacia la nariz de la pila de aguas arriba, hasta formar una única fosa. Luego de esa fase inicial, los granos de arena ubicados sobre el borde del talud de aguas arriba de la pila son desestabilizados por el vórtice herradura. Esto provoca que estos se deslicen e ingresen a la zona activamente erosiva, donde actúa este vórtice. A medida que la fosa de erosión crece con el tiempo, el vórtice herradura se debilita, perdiendo capacidad de erosión, y por tanto la profundidad de erosión se acerca de manera asintótica a un valor de equilibrio. Estas observaciones son consistentes con las recopiladas de la literatura, Oliveto y Hager (2002), Chang et al. (2004), Yanamaz y Altinbilek (1991), entre otros.

A partir de los datos tomados en la nariz de aguas arriba y a 45° hacia aguas abajo del eje longitudinal, se pudo observar cualitativamente la evolución de la fosa en ambos puntos. Con estas observaciones se pudo analizar la evolución de la fosa, en particular en la fase inicial del proceso erosivo. En la figura 1, se presenta la diferencia entre la profundidad del borde frontal con la profundidad a 45° , para los resultados de los ensayos E14, E70, E78 y E81. Se presentan éstos por ser representativos del comportamiento del resto de los ensayos.

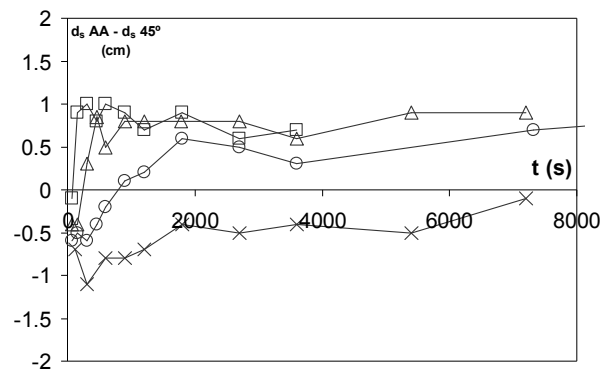


Figura 1.- Evolución temporal de la diferencia entre las profundidades de erosión en la generatriz frontal de la pila y en la generatriz a 45° del eje longitudinal del canal para los ensayos E14 (círculos), E70 (cruces), E78 (cuadrados) y E81 (triángulos). Las profundidades de erosión se midieron con cintas graduadas adosadas a la pila

En esta figura se puede observar que en algunos ensayos, a lo largo de toda la duración, sólo se desarrolla la fase inicial del proceso erosivo (la profundidad de erosión a 45° es mayor durante todo el ensayo que la profundidad de erosión en el borde frontal), como es el caso del ensayo E70. Al contrario, es posible observar ensayos (E78) donde prácticamente no existe la fase inicial del proceso. Situaciones intermedias son los ensayos que presentan una duración de la fase inicial entre algún minuto a alguna decena de minutos (ensayos E81 y E14).

La duración de la fase inicial, medida como el tiempo en que la profundidad de erosión de aguas arriba alcanza la profundidad a 45°, varía para los distintos ensayos. En la figura 2 se presentan la relación entre la velocidad del flujo de cada ensayo y la duración de la primera fase del proceso erosivo en los respectivos ensayos.

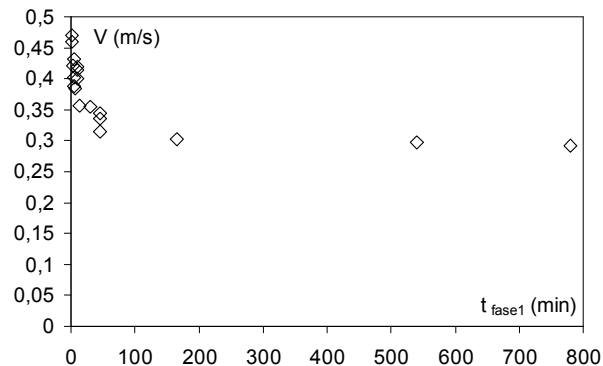


Figura 2.- Relación entre la velocidad media del flujo aguas arriba de la pila y la duración de la fase inicial del proceso erosivo. Cada punto indica esa relación para cada ensayo

En esta figura se observa que para ensayos con velocidades del flujo altas la duración de la fase inicial del proceso erosivo es corta, y viceversa: para ensayos con velocidades bajas la duración de la etapa inicial es larga, alcanzando incluso todo el ensayo. Es más, se puede observar que a medida que la velocidad del flujo decrece la duración de la fase inicial aumenta. En función de esta observación y teniendo en cuenta que la determinación de la duración de la fase inicial del proceso erosivo es sólo una aproximación, se puede afirmar que existe cierta correlación entre esta duración y las características hidráulicas del ensayo, en particular la velocidad del flujo aguas arriba de la pila.

Descripción geométrica de la fosa de erosión

Los resultados muestran que la fosa de erosión alrededor de una pila cilíndrica es prácticamente simétrica respecto del eje longitudinal del canal. La erosión en la fosa se limita a una

región adyacente a la pila, ubicada aguas arriba de ésta. Hacia aguas abajo, en cambio, se puede apreciar una zona de sedimentación y la duna que se forma en consecuencia. La parte más profunda de la fosa es una pequeña zona entre 1 y 3 cm de ancho, donde la profundidad de erosión es aproximadamente la misma. En esta zona, que podemos denominar: base de la fosa, es donde se desarrolla el vórtice herradura y por tanto donde se observa mayor actividad erosiva, incluso cuando el proceso se aproxima al equilibrio. A partir de esa base, la fosa avanza con dos pendientes diferentes. La primera, próxima a la zona del vórtice, algo más elevada que la pendiente dada por el ángulo de reposo interno del sedimento del lecho. La acción del vórtice es lo que permite que el material del fondo se mantenga estable en estas condiciones, con una pendiente mayor a la natural. La segunda pendiente es la situada en la parte superior del foso, es menor que la anterior y aproximadamente igual al ángulo de reposo interno del sedimento del lecho. La diferencia entre estas dos pendientes es pequeña, por lo que se puede asumir que la pendiente media es próxima a la dada por el ángulo de reposo del material del fondo.

Con el objetivo de generalizar la observación de las características geométricas de la fosa de erosión se midieron para cada ensayo las principales dimensiones en planta y en profundidad. En particular, la distancia entre el perímetro de la pila y los bordes de la fosa de erosión, tanto laterales como el borde frontal.

En la figura 3, se presenta los resultados de los ángulos dados por las pendientes frontales y laterales al finalizar los ensayos.

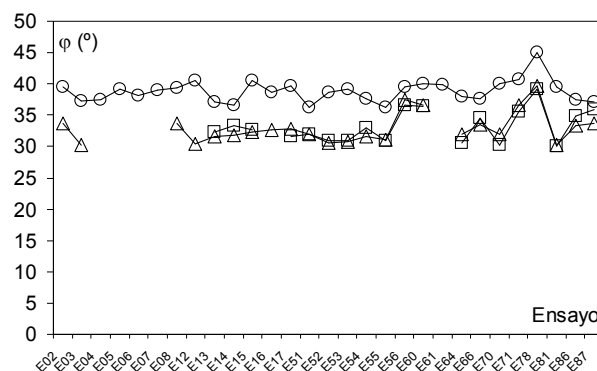


Figura 3.- Ángulos de la pendiente frontal de aguas arriba (círculos) y de las pendiente lateral izquierda (triángulos) y derecha (cuadrados) resultante de cada ensayo

En primer lugar, en la figura se observa que los ángulos de las pendientes laterales izquierdas y derechas con prácticamente los mismos para cada ensayo. Esto era de esperar dada la simetría de la fosa de erosión. Por otra parte, la pendiente frontal es algo superior que las pendientes laterales en todos los ensayos. Incluso, las pendientes frontales de la fosa de erosión son algo mayores en la fase inicial de la evolución de la fosa de erosión. Esta observación se puede adjudicar a la acción del vórtice herradura. En los primeros tiempo el vórtice es más potente, permitiendo que el material del fondo se mantenga estable para taludes más pronunciados que en tiempos posteriores donde el vórtice se debilita.

De los datos medidos surge que los ángulos medios de las pendientes laterales y frontales son 36.4° y 38.8° respectivamente. Estos resultados se encuentran muy próximos al ángulo de reposo interno del material de fondo (entre 36° y 38°). La desviación estándar de los ángulos de los taludes frontales de todos los ensayos es de 3° . Las diferencias ente el máximo y el mínimo ángulo de todos los ensayos es de 9° y 11° , para el talud frontal y lateral respectivamente.

Evaluación de los modelos de evolución temporal de la erosión local

En la figura 4 se presenta la comparación entre los resultados experimentales y los calculados con cada una de las siete formulaciones implementadas. La comparación se realiza para cada ensayo y para cada medida de la erosión tomada lo largo del tiempo en cada uno de ellos.

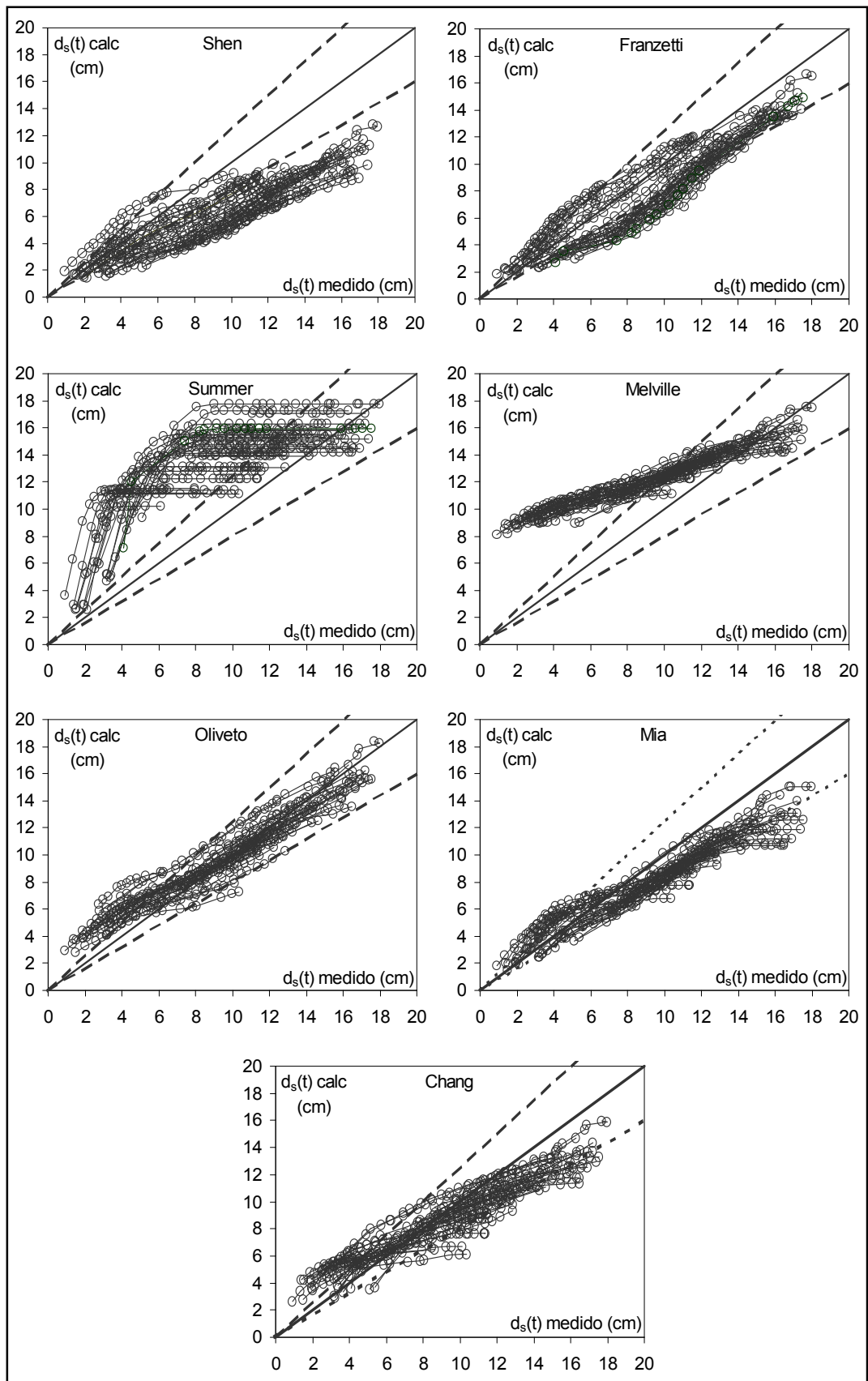


Figura 4.- Comparación entre las profundidades de erosión medidas y las calculadas con los siete modelos implementados. La banda determinada por la línea a trazos representa la banda de ajuste con 25% de error

Se nota en primer lugar el amplio rango de resultados que existe entre las predicciones realizadas. Los modelos de Sumer et al (1992) y Melville y Chiew (1999) predicen muy mal la evolución temporal de la profundidad de erosión, estimando valores muchos mayores a los medidos. Esto se puede explicar la propia génesis de estas expresiones, ya que han sido obtenidas como envolventes de datos experimentales.

Los valores previstos por el modelo de Shen et al (1966) son menores a los resultados experimentales para toda la duración del ensayo.

Los resultados de Shen et al. (1966), Mia y Nago (2003) y Chang et al. (2004) muestran una tendencia clara a subestimar la erosión para tiempos elevados. El resto de los modelos (Franzetti y particularmente Oliveto y Hager) muestran una buena coincidencia con los resultados experimentales obtenidos, manteniéndose los errores casi siempre dentro del rango de error del 25%. Nótese que para tiempos mayores el modelo que mejor reproduce los datos experimentales es el de Oliveto y Hager (2002). A su vez, para tiempos menores el modelo que mejor predice la evolución temporal de la profundidad de erosión es el propuesto por Franzetti (1989).

Con los resultados obtenidos de los modelos implementados y los resultados experimentales se calculó el error cuadrático medio, la media y la varianza del cuadrado de las diferencias entre las profundidades de erosión medida y calculadas. Estas diferencias se determinaron para cada instante de tiempo de cada ensayo. El error cuadrático medio se determina de la siguiente manera:

$$e = \sqrt{\frac{\sum (d_s^{\text{medido}} - d_s^{\text{calc}})^2}{n}} \quad [1]$$

donde,

e : error cuadrático medio,

d_s^{medido} : profundidad de erosión medida en un instante de tiempo de un ensayo,

d_s^{calc} : profundidad de erosión calculada en un instante de tiempo de un ensayo,

n : cantidad de profundidades de erosión medidas en todos los ensayos.

Los resultados se presentan en la tabla 1.

Tabla 1.- Error cuadrático medio, media y varianza de los cuadrados de las diferencias entre las profundidades de erosión calculadas y medidas al cuadrado

	Chang	Melville	Shen	Summer	Mia	Oliveto	Franzetti
e (cm)	1.76	3.63	3.62	4.91	1.91	1.32	1.90
media	3.30	13.15	13.12	24.11	3.64	1.74	3.62
varianza	17.10	220.38	170.88	503.18	27.74	6.15	11.68

De la tabla se observa que los resultados obtenidos con de Chang, Mia, Oliveto y Franzetti, son lo que proporcionan menor error cuadrático medio, menor media y varianza de los cuadrados de las diferencias de las profundidades de erosión medidas y calculadas.

A pesar de que la expresión de Oliveto y Hager no considera una erosión de equilibrio, algo incoherente conceptualmente, es la que mejor se ajusta a los resultados experimentales en las condiciones ensayadas en el presente estudio. Sin duda, no sería éste el caso si en los experimentos se hubieran alcanzado, claramente, estados de equilibrio. La formulación de Franzetti tiene un comportamiento aceptable y similar al de la formulación de Oliveto y Hager.

Por otra parte, desde el punto de vista conceptual se entiende que la profundidad de equilibrio existe y por lo tanto es pertinente incluirla en la formulación de la evolución temporal de la erosión, por lo que la formulación de Franzetti parece ser más coherente que la de Oliveto y Hager.

Por lo tanto, es necesario realizar un ajuste de los parámetros de la formulación de Franzetti de manera de obtener un mejor comportamiento de esta metodología, para las condiciones de los ensayos aquí presentado.

CONCLUSIONES

Este artículo avanza en el estudio de la evolución temporal de la erosión local en pilas basándose en trabajo experimental y análisis dimensional. En particular, se valida un procedimiento de cálculo para la evolución temporal de la erosión local alrededor de pilas cilíndricas bajo condiciones estacionarias de flujo en agua clara.

Se han analizado varias metodologías de cálculo para la evolución temporal de la profundidad de erosión local alrededor de pilas de puentes bajo condiciones estacionarias, donde el amplio rango de resultados que existe entre las predicciones realizadas por los distintos modelos verifica la dificultad que presenta lograr predecir de manera aceptable la evolución temporal de la erosión local. La ecuación propuesta por Oliveto y Hager predice la evolución de la de erosión en las condiciones ensayadas de buena manera. La formulación de Franzetti es adecuada desde el punto de vista conceptual, por lo que lo que ajustando a las condiciones ensayadas también la hace una formulación pertinente. Para esto es necesario realizado ensayos adicionales que alcancen la profundidad de erosión de equilibrio.

También parece ser necesario continuar trabajando para ampliar el rango de validez de la ecuación de Oliveto y Hager. Es conveniente, a su vez, verificar los resultados con datos de campo de manera de minimizar los efectos de escala.

Complementariamente, se ha analizado la evolución del proceso erosivo. Aquí se han identificado las distintas fases del proceso: inicio de erosión, etapa erosiva y aproximación al equilibrio. demás, se analizó cualitativamente la duración de la fase inicial del proceso, donde se puede concluir que existe correlación entre las características hidráulicas del ensayo y la duración de esa fase.

En cuanto a la forma de la fosa, se ha verificado el comportamiento descrito por otros autores. La geometría de la fosa de erosión se puede asumir como un cono invertido truncado. La pendiente media hacia aguas arriba es prácticamente igual a la del ángulo de reposo del material del lecho. Las pendientes laterales son apenas algo más tendidas que la pendiente hacia aguas arriba. La forma de la fosa de erosión evoluciona con el tiempo manteniendo su forma simétrica. Por otra parte, es necesario estudiar con mayor rigurosidad y detalle la geometría de la fosa de erosión; en particular la evolución de la geometría de la fosa de erosión durante los ensayos en marcha.

Agradecimientos

El autor realizó los ensayos gracias al programa de profesores visitantes de la UCLM y a la financiación de la Agencia Nacional de Innovación e Investigación de Uruguay (ANII). Los autores quieren agradecer a Eduardo Días Poblete por su ayuda en el desarrollo de la parte experimental.

ANEXO

Principales características de las metodologías de estimación de la evolución temporal de la profundidad de erosión bajo condiciones de flujo estacionario analizadas

Shen et al (1966)	$\frac{d_s}{d_{se}} = 1 - e^{-aE^2}$	$a = 0.026 \cdot e^{((2.932 \cdot ft)h)} \quad E = \left(Fr \frac{D}{h} \right)^{1/5} \ln \left(\frac{ut}{h} \right)$
Franzetti et al. (1989)	$\frac{d_s}{d_{se}} = 1 - e^{-\alpha \left(\frac{t \cdot u}{D} \right)^\beta}$	$\alpha: \text{coef exp (}=0.028 \text{ para pila cilíndrica)}$ $\beta: \text{coef exp (}=0.333 \text{ para pila cilíndrica)}$
Summer (1992)	$\frac{d_s}{d_{se}} = 1 - e^{-t/T}$	$T = \frac{D^2}{\left(\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot g \cdot d_{50}^3 \right)} \cdot \frac{1}{2000} \cdot \frac{h}{D} \cdot \left(\frac{u_*^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot g \cdot d_{50}} \right)^{-2.2}$
Melville y Chiew (1999)	$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp \left[-0.03 \cdot \left(\frac{u_c}{u} \cdot \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right)^{1.6} \right]$	$t_e(\text{dias}) = 48.26 \cdot \frac{D}{u} \left(\frac{u}{u_c} - 0.4 \right) \quad \text{si } h/d > 6$ $t_e(\text{dias}) = 30.89 \cdot \frac{D}{u} \left(\frac{u}{u_c} - 0.4 \right) \cdot \left(\frac{h}{D} \right)^{0.25} \quad \text{si } h/d \leq 6$
Oliveto y Hager (2002)	$\frac{d_s}{(h_0 D)^{1/3}} = 0.068 \cdot N \cdot \sigma^{-1/2} \cdot F_d^{1.5} \cdot \log T$	$F_d = \frac{V}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}}$ $T = \frac{t \cdot \sigma^{1/3} \cdot (g(s-1)d_{50})^{1/2}}{(h_0 D^2)^{1/3}}$
Mia y Nago (2003)	$d_{st} = \sqrt{\frac{6 \tan \phi}{\pi} \left(\sum_{i=0}^n q_{st_i} \right) + \frac{9 D^2 \tan^2 \phi}{16} - \frac{3 D \tan \phi}{4}}$ $q_{st} = 1.80 d_{50} u_{*t} s_t \left(1 - \frac{1}{a s_t} \ln(1 + a s_t) \right)$	$s_t = \frac{u_{*t}}{u_{*c}} - 1 \quad a = 2.45 \frac{\sqrt{\psi_c}}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^{0.4}}$ $A_t = A_0 + A_{st} \quad A_0 = \frac{\pi}{4} D_v^2 \quad A_{st} = \frac{1}{2} \frac{d_{st}^2}{\tan \phi}$ $\frac{D_v}{h} = 0.28 \left(\frac{D}{h} \right)^{0.85} \quad u_{*t} = 3.3 \cdot u_* \cdot \left(\frac{A_0}{A_t} \right)^{0.29}$
Chang et al (2004)	$\frac{d_s}{D} = 0.08 \cdot K_\sigma \cdot K_v \cdot T_c^{-1.3} \cdot T \quad \text{si } 0 \leq T \leq T_c$ $\frac{d_s}{D} = \frac{d_{se}}{D} - 0.27 \cdot K_\sigma \cdot K_v \cdot (T^{-0.3} + 0.41) \quad \text{si } T_c \leq T \leq 0.04$ $\frac{d_s}{D} = \frac{d_{se}}{D} - 1.1 \cdot K_\sigma \cdot K_v \cdot (T - 2.22 T^{0.45} + 1.22) \quad \text{si } 0.04 \leq T \leq 1$	$T_c = \left(\frac{d_{se}/D}{0.35 \cdot K_\sigma \cdot K_v} - 0.31 \right)^{-3.33}$ $K_\sigma: \text{coef. sedimentos no uniformes}$ $K_v = u/u_c - 0.4$ $T: = t/t_e \cdot t_e: \text{tiempo de erosión de equilibrio}$

d_s : profundidad de erosión,

d_{se} : profundidad de erosión de equilibrio,

Fr : numero de Froude,

D : diámetro de pila,

h, h_0 : profundidad del flujo en las cercanías,

u, V : velocidad media aguas arriba de la pila,

u_* : velocidad de corte o de fondo aguas arriba de la pila,

u_{*t} : velocidad de corte en la nariz de la pila en el instante t ,

u_c : velocidad de corte media aguas arriba de la pila,

t : tiempo.

ρ_s : densidad del sedimento,

ρ : densidad del agua,

s : peso específico del sedimento,

d_{50} : tamaño medio del sedimento del lecho,

σ : desviación estándar del sedimento

ϕ : ángulo de reposo interno del material del lecho,

g : aceleración gravitacional,

ψ_c : parámetro adimensional de inicio de movimiento dado por van Rijn (1984a, b, c),

q_{st} : tasa de transporte de sedimento volumétrico por unidad de ancho,

A_t : Área transversal del vórtice herradura en cualquier instante de tiempo,

A_0 : Área transversal del vórtice herradura en el instante inicial,

A_{st} : Área transversal de la fosa de erosión en cualquier instante de tiempo,

D_v : Diámetro del vórtice herradura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Breusuers, H.N.C., Niccolet, G. and Shen, H.W.** (1977). "Local scour around bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 15, No3, pp 211-252.
- Chang, W.Y., Lai, J.S. and Yen, C.L.** (2004). "Evolution of scour depth at circular bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol 130, No 9, pp 905-913.
- Franzetti, S.; Larcán, E. and Mignosa, P.** (1989). "Erosione alla Base di Pile Circolari di Ponti: Verifica Sperimentale Dell'Ipotesi di Esistenza di una Situazione Finale di Equilibrio". *Idrotecnica*. Vol. 16, No. 3, 135-141.
- Melville, B.W. and Chiew, Y.M.** (1999). "Time Scale for local scour at bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol 125, No 1, pp 59-65.
- Melville, B. W., and Coleman, S. E.** (2000). *Bridge scour*. Water Resources Publications, LLC, Colorado.
- Melville, B.W. and Southerland, A.J.** (1988). "Design Method for local scour at bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 114, No 10, pp 1210-1226.
- Mia, F. and Nago H.** (2003). "Design Method of Time-Dependent Local Scour at Circular Bridge Pier". *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 129, No. 6, 420-427.
- Oliveto, G. and Hager, W.H.** (2002). "Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour". *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol 128, No 9, p 811-820.
- Richardson and Davis** (1993). *HEC N° 18: Evaluating scour at bridges*. Washington D.C.: U.S. Department of Transport, Federal Highway Administration. U.S.A.
- Shen, H.W.; Schneider, V.R. and Karaki, S.S.** (1969). "Local Scour Around Bridge Piers". *Journal of Hydraulics Division*. ASCE. Vol. 95, No. HY6.
- Simarro G; Fael, C.M.S. and Cardoso A.H.** (2011). "Estimating Equilibrium Scour Depth at Cylindrical Piers in Experimental Studies". *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 139, No. 9, 1089-1093.
- Sumer, B.M.; Christiansen, N. and Fredsoe, J.** (1992). "Time Scale of Scour Around a Vertical Pile". *Proceedings Second International Offshore and Polar Engineering Conference*. San Francisco, California. 308-315.
- Yanmaz, A.M. and Altinbilek, H.D.** (1991). "Study of Time Dependent Local Scour Around Bridge Piers". *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 117, No. 10, 1247-1268.