

# ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS PROCESOS DE SOCACACIÓN LOCAL EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE PUENTES

Hector Daniel Farias

Instituto de Recursos Hídricos (IRHi-FCEyT-UNSE)

Av. Belgrano (S) 1912, (G4200ABT) Santiago del Estero, Argentina. E-mail: H.D.Farias@members.asce.org

## Introducción

La evolución de la profundidad de socavación local con el tiempo es un tema de singular importancia en la hidráulica de puentes. La mayor parte de las formulaciones disponibles para estimar la erosión local se refieren al valor de equilibrio de la misma, pero en muchos casos las duraciones de las crecidas son inferiores al tiempo necesario para alcanzar condiciones de equilibrio en la fosa de socavación, y por ello es de interés práctico estudiar el avance de la socavación con el tiempo.

## Objetivos del Estudio

El objetivo del presente estudio es el de analizar algunos conceptos referidos a la evolución en el tiempo de la profundidad de socavación local en elementos estructurales de puentes. En particular, se abordarán los siguientes puntos: (1) clasificación de las diferentes fases constitutivas del proceso de evolución temporal de la erosión local, en base a una justificación física de las características de comportamiento en cada fase y la correspondiente modelación matemática de la función de crecimiento; (2) definición de las escalas de tiempo involucradas en el proceso; (3) formulación de funciones generalizadas para describir el avance temporal de la socavación en el rango de interés práctico y contrastación con datos experimentales.

## Fases del proceso de socavación local

Si se considera la situación en que la tasa de transporte sólido en el flujo de aproximación al obstáculo sea nula y en condición límite (es decir, intensidad de flujo unitaria:  $\eta_v = V/V_c = 1$ ), puede adoptarse el criterio de Fuentes y Aguirre-Pe (1990) de caracterizar al proceso de erosión local dividido en tres lapsos diferentes: inicial, avanzado y asintótico. Este criterio es prácticamente coincidente con el expuesto por Cardoso y Bettess (1999), quienes denominan a las tres fases inicial, principal y de equilibrio.

En el primer lapso, puede suponerse que la tasa temporal de erosión depende únicamente del valor de la erosión y del tiempo, haciendo abstracción de las características físicas del fluido y del sedimento, y de la geometría del flujo y del obstáculo. En ese caso se tiene:

$$\Phi_1 [d(d_s)/dt, d_s, t] = 0$$

de donde (aplicando criterios básicos de análisis dimensional) se obtiene:

$[d(d_s)/dt] \propto (d_s / t)$ , e integrando:  $d_s = a_1 \cdot t^{a_2}$ , donde  $a_1$  y  $a_2$  son constantes. En virtud del razonamiento anterior, se encuentra que en esta zona la socavación crece potencialmente con el tiempo.

En el lapso de socavación avanzada las dimensiones de la fosa de erosión varían muy lentamente, ya que se está en una condición próxima al valor de equilibrio. Por lo tanto, puede suponerse que  $d_s \approx d_{se}$ , de donde:  $[d(d_s)/dt] \propto (d_{se}/t)$ . Al integrar esta ecuación se obtiene:  $d_s/d_{se} = b_1 \cdot \ln(t) + b_2$ . Es decir, en este lapso la evolución resulta logarítmica.

El lapso asintótico no está muy bien definido, debido a los problemas experimentales que se presentan al intentar medir con precisión los avances incrementales de la erosión local en esta instancia, ya que la condición final de equilibrio dependerá de la capacidad o no de unas cuantas partículas de sedimento de salir de la fosa de socavación. Por ello, el razonamiento siguiente resulta válido para el caso en que  $d \ll d_s$  (donde  $d = d_{50}$  es el tamaño mediano del sedimento). Para encontrar una relación funcional que describa este segmento de la evolución puede considerarse ahora que la variable independiente es la socavación residual  $(d_{se} - d_s)$ . Entonces, la función que mejor representa esta situación será:

$$\Phi_3 [d(d_{se} - d_s)/dt, (d_{se} - d_s), t] = 0, \text{ de donde: } (d_{se} - d_s) = \tilde{c}_1 \cdot t^{-\tilde{c}_2}, \text{ donde } \tilde{c}_1 \text{ y } \tilde{c}_2 \text{ son constantes.}$$

Sin embargo, si se adopta como válida la hipótesis de que la socavación final es independiente de como se desarrolla inicialmente el fenómeno, la relación funcional básica se define en términos de una escala de tiempos asociada a la asíntota,  $t_e$ , de la siguiente manera:

$$\Phi_3 [d(d_{se} - d_s)/dt, (d_{se} - d_s), t_e] = 0, \text{ a partir de la cual se obtiene: } (d_{se} - d_s) = \hat{c}_1 \cdot e^{-\hat{c}_2 \cdot (t/t_e)},$$

donde  $\hat{c}_1$  y  $\hat{c}_2$  son constantes. Es decir, si se divide miembro a miembro entre  $d_{se}$  se obtiene:

$$(d_s/d_{se}) = [1 - \hat{c}_1 \cdot e^{-\hat{c}_2 \cdot (t/t_e)}] \text{ (evolución exponencial).}$$

El razonamiento anterior demuestra que una función de tipo exponencial tiene una justificación matemática sólo para el lapso asintótico del proceso de socavación, mientras que el lapso inicial tiende a ser potencial y el lapso avanzado o principal es de tipo logarítmico.

La validación experimental de estas expresiones no resulta sencilla ante la carencia de abundantes experiencias de laboratorio que hayan permitido el desarrollo de los tres lapsos, ya que en la mayoría de los casos los ensayos se interrumpen antes de alcanzar la condición de equilibrio.

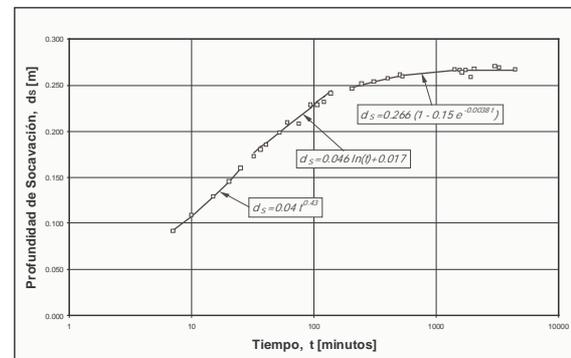


Fig.1.- Evolución de la Socavación en Estribos (datos de Cardoso y Bettess, test 13)

Sin embargo, a fin de ilustrar la existencia de estos tres lapsos, se han seleccionado experimentos de erosión en estribos y en pilas circulares. Para ello, se analizaron datos

publicados en la literatura que fueran el resultado de experimentos de socavación local en condiciones límites de agua clara (o sea, para valores de  $\eta_V = V/V_c$  cercanos a la unidad). En la Figura 1 se muestra el comportamiento de los datos de Cardoso y Bettess (1999, test 13) que muestran con claras evidencias la existencia de los tres lapsos en la evolución temporal de la socavación y las funciones matemáticas que describen de la mejor manera a cada uno de ellos.

**Escalas de Tiempo**

Para poder avanzar hacia la formulación de funciones generalizadas para describir la evolución temporal de la socavación local, es necesario analizar las escalas de tiempo intervinientes en el fenómeno. Las escalas de tiempo que intervienen en el proceso de socavación local son las asociadas a los tiempos cinemático ( $t_c$ ), gravitatorio ( $t_g$ ) y sedimentológico ( $t_s$ ) (Fuentes y Aguirre-Pe, 1990), los que se pueden representar con las ecuaciones:  $t_c = h/V$ ;  $t_g = V/g$ ;  $t_s = d/U_*$ , donde  $h$  es la profundidad del flujo de aproximación antes del obstáculo,  $V$  la velocidad promediada en la vertical del tubo de corriente incidente sobre el obstáculo,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $U_*$  la velocidad de cizallamiento. Hay una cuarta escala de tiempos asociada a los procesos viscosos (que podría estimarse en un principio con la relación  $t_v = d^2/\nu$ , donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido), pero la misma ha sido omitida ya que si se circunscribe el análisis a la condición crítica de inicio del transporte  $\eta_V = 1$ , es decir,  $U_* = U_{*c}$  esta escala ya no resulta independiente de la sedimentológica en virtud de la función de Shields,  $\tau_{*c} = \Phi_r(d_*)$ , donde  $\tau_{*c} = U_{*c}^2/(g \cdot \Delta \cdot d)$  y  $d_* = [(g \cdot \Delta / \nu^2)^{1/3} \cdot d]$ , con  $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$  (densidad relativa del sedimento sumergido).

La consideración de estas tres escalas de tiempo sienta las bases para enunciar las funciones generalizadas para describir el avance temporal de la socavación.

**Funciones generalizadas**

Teniendo en cuenta la existencia de los tres lapsos antes descritos, lo ideal sería poder disponer de una función única que los represente. Las propiedades de la misma deberían ser tales que sus predicciones se aproximen a una función potencial para valores bajos del tiempo, a una exponencial para valores muy altos y a una logarítmica para el rango intermedio. Sin embargo, no resulta sencillo encontrar una función de tales características. No obstante esta dificultad, desde el punto de vista práctico, interesan fundamentalmente los dos primeros lapsos, aspecto que fue priorizado por Fuentes y Aguirre-Pe (1990) al formular la siguiente ecuación general:

$d_s = k_0 \cdot \ln(1 + k_1 \cdot t^{k_2})$ , donde  $k_0$ ,  $k_1$  y  $k_2$  son constantes a ajustar con los datos experimentales.

Considerando la relación general resulta evidente la conveniencia de encontrar una versión adimensional de la misma. En un principio, podrían definirse las variables involucradas en forma adimensional de la siguiente manera:  $d_{s*} = d_s/d_{s*0}$ ;  $t_* = t/t_r$ , donde  $t_r$  es un "tiempo de referencia", que puede formularse en función de las escalas características:

$$\frac{t_r}{t_s} = \Psi_t \left( \frac{t_g}{t_c}, \frac{t_g}{t_s}, \frac{h}{L} \right)$$

expresión:  $t_g/t_c = Fr^2$ ,  $t_g/t_s = C_* \cdot \tau_{*c} \cdot \Delta$ , donde  $C_* = V/U_*$  es el coeficiente adimensional de resistencia al flujo de Chézy. La definición de  $t_r$  se hace habitualmente

en forma arbitraria y a conveniencia según la disponibilidad de datos para ajustar empíricamente los parámetros. En este estudio se adoptó:  $t_r = t|_{d_s/d_{s*0} = 0.90}$ . Entonces, la función generalizada para estimar el tiempo de referencia será:  $t_r/t_s = \Psi_t(Fr^2, h/L, t_g/t_s)$ , en la que la dependencia de  $(t_g/t_s)$  es relativamente débil.

Para la ecuación general adimensional se propone:

$$d_{s*} = \alpha_0 \cdot \ln(1 + \alpha_1 \cdot t_*^{\alpha_2})$$
 (Fuentes y Aguirre-Pe, 1990)

Los valores encontrados para las constantes involucradas en función de los datos disponibles fueron:  $\alpha_0 = 0.46$ ,  $\alpha_1 = 6.00$ ,  $\alpha_2 = 0.333$  (Figura 2).

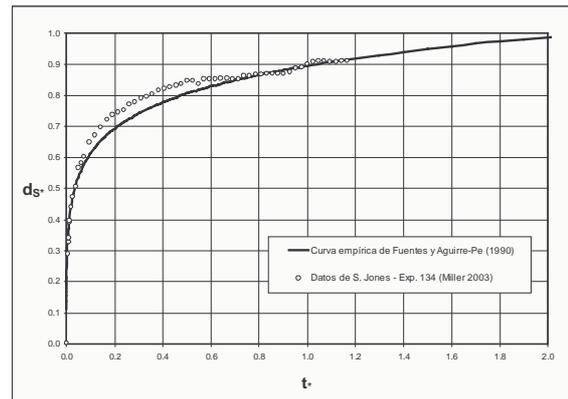


Fig. 2.- Comportamiento de la función generalizada.

**Conclusiones**

El proceso de erosión local se puede dividir en tres lapsos diferentes: inicial, avanzado y asintótico.

A partir de consideraciones sencillas se ha demostrado que las ecuaciones que describen a esos tres lapsos son de tipo potencial, logarítmico y exponencial, respectivamente.

Las escalas de tiempo que intervienen en el proceso de socavación local son las asociadas a los tiempos cinemático ( $t_c$ ), gravitatorio ( $t_g$ ) y sedimentológico ( $t_s$ ).

Es posible formular una ecuación empírica adimensional única para describir los dos primeros lapsos del proceso en forma conjunta y calibrar los coeficientes con datos experimentales asociados a la geometría del flujo y a las escalas temporales.

**Referencias Bibliográficas**

Ayala, L. y Niño, Y. (1988). "Evolución Temporal de la Socavación de equilibrio en Pilas de Sección Circular". *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*, Vol.1, No.2, Caracas, Venezuela.

Cardoso, A. H. and Bettess, R. (1999). "Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments". *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 125, No. 4, pp. 388-399.

Fuentes, R. y Aguirre-Pe, J. (1990). "Avance Temporal de la Socavación en Pilas Circulares". *XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, IAHR, Montevideo, Uruguay, pp. 1527-1536.

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., Texas, USA.

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

Miller, W. (2003). *Model for the time rate of local sediment scour at a cylindrical structure*. Ph.D. Dissertation, University of Florida, USA.