

## **ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA PREDECIR LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS COMPLEJAS**

**María Teresita Pilán, Jimena Trejo Chazarreta, Francisco José Pece Azar,  
Mónica Teresa Mattar, Luis Alejandro Olmos**

Instituto de Recursos Hídricos, FCEyT-UNSE. Av. Belgrano (S) 1912, (G4200ABT) Santiago del Estero, Argentina.  
Telefax: (54-385) 450 9563. E-mail: tpilan@unse.edu.ar

### **RESUMEN**

La principal causa del proceso de socavación en la fundación de un puente, es la obstrucción al flujo producida por los elementos estructurales pilas y estribos, los que provocan un aumento en la intensidad del flujo a su alrededor lo suficientemente fuerte para remover el material del lecho. Los sistemas de vórtices que se desarrollan en el flujo terminan moldeando una fosa de socavación alrededor de cada elemento estructural. El éxito del diseño hidráulico de un puente reside en poder predecir la profundidad de socavación para las condiciones definidas de manera de realizar una fundación protegida de la socavación. En este sentido muchas son las metodologías propuestas y los estudios al respecto con sus correspondiente recomendaciones para pilas simples. Debido a que los grandes puentes están fundados sobre pilas complejas, no es adecuado tratar estos elementos estructurales de manera similar a una pila simple. Una pila compleja se define como un conjunto de tres elementos, columna, pila cabezal y grupo de pilotes. El objetivo del presente trabajo es analizar dos metodologías para predecir la socavación producida por pilas complejas en condición de agua clara, compararlas y contrastarlas con datos recopilados de la bibliografía.

### **ABSTRACT**

Local scour occurs at the bridge site when the local flow field near de bridge pier or abutments is strong enough to remove bed material. The obstruction to the flow caused by the bridge fiundations is of primari importance in the scour process. The vortexes systems that are developed in the flow modeling a scour hole around each structural element. The success of the hydraulic bridge design is to predict the scour depth for the defined conditions for carrying out a protected foundation from the scour. There are many methodologies for predicting scour at simple piles. Because the big bridges are founded on complex piles, it is not adapted to treat these structural elements in a similar way to a simple pile. A complex pile is defined as a group of three elements, column, pile caps and piles group. The goal of the present work is to analyze two methodologies for predicting the complex piles scour depth in condition of clear water, to compare and contrast them with gathered data from the bibliography.

### **INTRODUCCIÓN**

Cuando una pila esta inmersa en una corriente, modifica las condiciones del flujo en los alrededores de la misma. Aguas arriba de una pila el flujo pierde velocidad, aumentando la presión de estancamiento y generando un gradiente de presión el cual es responsable del flujo descendente. Este flujo impacta en el lecho produciendo un surco al pie de la pila sobre la base del cual, se inicia la fosa de socavación. El desarrollo de la fosa alrededor de la pila avanza mientras las partículas son removidas y transportadas fuera de la misma por el vórtice en herradura. El flujo descendente y dicho vórtice son los principales responsables de la socavación producida por la presencia de pilas (Melville & Coleman, 2000). Los vórtices en estela que surgen de la separación del flujo a ambos lados de la pila, son trasladados por el flujo principal hacia aguas abajo y actúan como aspiradoras, succionando el sedimento del lecho.

Una correcta interpretación de los procesos erosivos se ve reflejada en ecuaciones que permitan predecir la profundidad de equilibrio de socavación para las características en juego con una buena eficiencia. En este sentido, en trabajos anteriores (Farias, 2004), se presenta un análisis comparativo de las metodologías actuales para la predicción de la profundidad de socavación en pilas simples. Sin embargo las fundaciones de los grandes puentes se realizan sobre pilas de formas complejas, o simplemente pilas complejas, lo cual a priori requiere un análisis diferenciado.

En el marco de este trabajo se entenderá por pila compleja a la estructura formada por tres componentes: columna; pila cabezal y pilotes, siguiendo la definición de Sheppard (2003) y las convenciones de fundación sobre pilotes caso IV (Melville y Coleman 2000). La cuantificación de la socavación asociada a tales estructuras requiere de metodologías que en su concepción contemplen el efecto sobre el flujo y por lo tanto sobre el fondo que las mismas producen.

## **OBJETIVO**

El objetivo del presente trabajo es analizar dos metodologías para predecir la socavación producida por pilas complejas en condición de agua clara, compararlas y contrastarlas con datos recopilados de la bibliografía.

## **METODOLOGÍAS**

A partir de los resultados de las experiencias desarrolladas en la Universidad de Florida y en la FHWA, Sheppard (2003) desarrollo una metodología para predecir la socavación producida por pilas complejas con el formato general que se esquematiza en la Figura 1.

Bajo la hipótesis que la socavación local total en el equilibrio producida por una pila compleja se puede estimar como la suma de la socavación producida por cada componente de la misma y que a los fines de los cálculos, cada componente puede ser reemplazada por una pila simple de sección circular con un diámetro efectivo  $a^*$  el que dependerá de la forma, del tamaño, de la ubicación y de la orientación de cada componente con respecto al flujo, se presenta una metodología para evaluar la socavación producida por una pila compleja. La eficiente representación del diámetro efectivo de cada componente de la pila compleja sobre la forma el tamaño y la ubicación de cada una de las mismas, se ha alcanzado en forma empírica, a través de numerosos experimentos desarrollados por J. Sterling Jones en la FHWA y por Max Sheppard en los laboratorios de la Universidad de Florida (Sheppard, 2003).

Para determinar la profundidad de socavación local con esta metodología se debe contar con la siguiente información de partida: profundidades de la socavación general y por contracción. Dimensiones externas de todas las componentes de las pilas incluyendo sus posiciones relativas con respecto al lecho del cauce no socavado. Propiedades de los sedimentos: densidad, diámetro medio, distribución granulométrica. Propiedades del agua : densidad y viscosidad dinámica. Nivel del agua, y velocidad del flujo a una profundidad media en una sección inmediatamente aguas arriba de la estructura. El procedimiento de cálculo propuesto por dicho investigador se explica a continuación.

1. Se divide la pila en sus componentes. Es importante notar que  $h_0$  es el tirante inicial antes de producirse la socavación general y la socavación por contracción.
2. Se estima la profundidad de socavación general y por contracción y se determina el nuevo tirante :  $h_1 = h_0 + h_{sg} + h_{sc}$

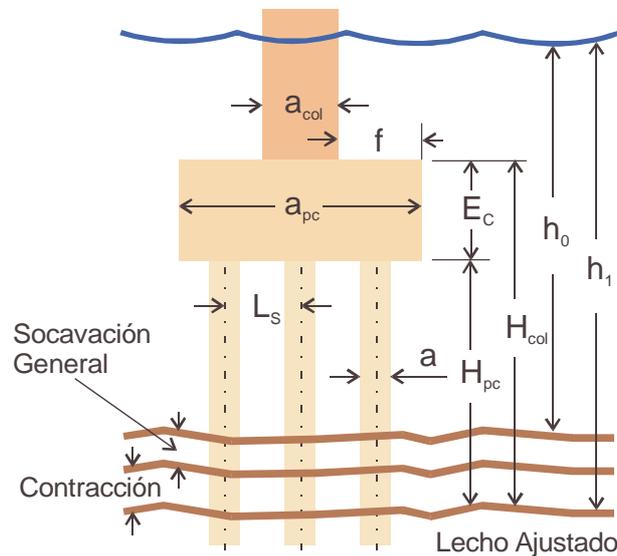


Figura 1.- Esquema de definición de Pila Compleja

3. Se estima la Velocidad Crítica a una profundidad promedio. La misma se calculará para cada elemento, variando el tirante en función de los ajustes del lecho que se realicen.

$$V_c = 2.5 \cdot u_{*c} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{2.7 \cdot z_0}\right) \quad (1)$$

Donde  $u_{*c}$  es la velocidad de corte crítica y  $z_0$  parámetro que depende del número del Reynolds del grano crítico.

4. Se evalúa la profundidad de socavación local debido a la columna :  $d_{s(col)}$ . Para ello se debe calcular el parámetro  $h_{1(max)}$ . El mismo establece un límite en el tirante para el cálculo de la socavación producida por el elemento columna.

$$h_{1(max)} = \begin{cases} h_1 & \text{Para } h_1 \leq 2.5 \cdot a_{col} \\ 2.5 \cdot a_{col} & \text{Para } h_1 > 2.5 \cdot a_{col} \end{cases} \quad (2)$$

Se determina el coeficiente de esviaje,  $K_\alpha$ , el cual depende de la dirección del flujo y la orientación de la columna.

$$K_\alpha = \left[ \frac{a_{col} \cdot \cos(\alpha) + L_{col} \cdot \text{sen}(\alpha)}{a_{col}} \right]^{0.65} \quad (3)$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de esviaje,  $L_{col}$  la longitud de la columna en la dirección del flujo y  $a_{col}$  el ancho, o la longitud transversal al flujo. Con estos parámetros, se calcula el diámetro efectivo para el elemento columna con la siguiente expresión :

$$a_{col}^* = K_{\alpha} \cdot a_{col} \cdot \exp \left\{ \begin{array}{l} -0.71 - 0.59 \cdot \left( \frac{f}{a_{col}} \right)^2 + 0.265 \cdot \left( \frac{f}{a_{col}} \right)^{2.5} \\ -0.29 \cdot \left( \frac{f}{a_{col}} \right)^{0.5} - 1.73 \cdot \left( \frac{H_{col}}{h_{1(máx)}} \right) - 2.8 \cdot \left( \frac{H_{col}}{h_{1(máx)}} \right)^2 \end{array} \right. \quad (4)$$

Donde  $f$  es la distancia entre el extremo de la columna y el borde de la pila cabezal y  $H_{col}$  la altura desde el lecho ajustado hasta la parte inferior de la columna. Si la relación  $H_{col} / h_{1(máx)}$  es mayor que 1, se debe adoptar el valor 1. Esto permite eliminar la influencia de este elemento en función del límite establecido para el tirante en la ecuación (2).

En el factor de forma se tiene presente la influencia de la forma de la columna y el ángulo de esviaje. Esta expresión es válida para todos los elementos.

$$K_s \equiv \begin{cases} 1 & \text{para columnas circulares ó de aristas redondeadas.} \\ 0.90 + 0.66 \cdot \left( \alpha - \frac{\pi}{4} \right)^4 & \text{para columnas de aristas rectas.} \end{cases} \quad (5)$$

Con el diámetro efectivo, es decir el diámetro que ahora representa al elemento columna de la pila compleja, se calcula la profundidad de socavación.

$$\frac{d_{s(col)}}{a_{col}^*} = 2.5 K_s f_1 \left( \frac{h_0}{a^*} \right) f_2 \left( \frac{V}{V_c} \right) f_3 \left( \frac{a^*}{d} \right) \quad (6)$$

Las funciones que aparecen en la ecuación (5) son las resultantes de una serie de ajustes que los investigadores involucrados en el desarrollo de esta metodología han actualizado en función de los resultados experimentales. La última versión es la que se presenta a continuación.

$$f_1 \left( \frac{h_0}{a^*} \right) = \tanh \left[ \left( \frac{h_0}{a^*} \right)^{0.4} \right] \quad (7a)$$

$$f_2 \left( \frac{V}{V_c} \right) = 1 - 1.75 \left[ \ln \left( \frac{V}{V_c} \right) \right]^2 \quad (7b)$$

$$f_3 \left( \frac{a^*}{d} \right) = \left[ \frac{a^*/d}{0.4 \cdot (a^*/d)^{1.2} + 10.6 \cdot (a^*/d)^{-0.13}} \right] \quad (7c)$$

##### 5. Se evalúa la profundidad de socavación local debido al elemento Pila Cabezal: $d_{s(pc)}$

En primer lugar se debe ajustar el tirante al descenso del lecho producido por la socavación del elemento columna. Luego, con este nuevo tirante, se ajusta la velocidad de aproximación.

$$h_2 = h_1 + \frac{d_{s(col)}}{2} \quad (8)$$

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{h_1}{h_2} \quad (9)$$

Se determina el tirante máximo  $h_{2(máx)}$  en función del ancho de la pila cabezal,  $a_{pc}$  empleando la ecuación (2). Se calcula el factor de esviaje con la ecuación (3) y con estos nuevos parámetros

se determina el diámetro efectivo representativo del elemento pila cabezal con la siguiente ecuación:

$$a_{pc}^* = K_a \cdot a_{pc} \cdot \exp \left[ -2.7 + 0.5 \cdot \ln \left( \frac{E_{cp}}{h_{2(m\acute{a}x)}} \right) - 2.8 \left( \frac{H_{pc}}{h_{2(m\acute{a}x)}} \right) + 1.76 \left( -\frac{H_{pc}}{h_{2(m\acute{a}x)}} \right) \right] \quad (10)$$

A partir de las ecuaciones (6) y (7) se calcula la socavación producida por el elemento pila cabezal.

**6.** Se evalúa la profundidad de socavación local debido al Grupo de Pilotes:  $d_{s(pg)}$

En primer lugar se determinan los coeficientes que involucran el número de pilotes en la dirección del flujo  $K_m$ , y el espacio entre pilotes  $K_{sp}$ .

$$K_m \equiv \begin{cases} f_1(m) \cdot f_2 \cdot \left( \frac{L_s}{a} \right) & \text{para un ángulo de inclinación } \alpha \leq 3^\circ \\ 1 & \text{para } \alpha > 3^\circ. \end{cases} \quad (11)$$

Donde  $L_s$  es la separación entre pilotes y  $a$  el ancho o diámetro del mismo.

$$f_1 \equiv \begin{cases} 0.875 + 0.125 \cdot m & 1 \leq m \leq 5 \\ 1.5 & 5 < m \end{cases} \quad (12)$$

En función de la relación  $(L_s/a)$ , se calcula  $f_2$ . Si  $(L_s/a)$  varía entre 1 y 3,  $f_2 = a_0 + a_1(L_s/a)$ , si  $(L_s/a)$  varía entre 3 y 10,  $f_2 = a_2 + a_3(L_s/a)$ . Los valores de  $a_0, a_1, a_3$  se calculan en función de  $f_1$ . Las relaciones para calcular los mismos son:

$$a_0 = -0.5 + 1.5 \cdot \left( \frac{1}{f_1} \right) \quad (13a)$$

$$a_1 = 0.5 - 0.5 \cdot \left( \frac{1}{f_1} \right) \quad (13b)$$

$$a_2 = 1.429 - 0.429 \cdot \left( \frac{1}{f_1} \right) \quad (13c)$$

$$a_3 = -0.143 + 0.143 \cdot \left( \frac{1}{f_1} \right) \quad (13d)$$

Para calcular el factor en función de la separación de los pilotes,  $K_{sp}$  se debe determinar el ancho proyectado de los pilotes  $W_p$ . Este ancho es la suma de las proyecciones no superpuestas de los pilotes situados en las dos primeras filas y en la primera columna sobre un plano vertical normal al flujo.

$$K_{sp} = 1 - \frac{4}{3} \cdot \left( 1 - \frac{W_{pi}}{W_p} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{(L_s/a)^{0.6}} \right) \quad (14)$$

donde  $W_{pi}$  es el ancho proyectado de un pilote simple. Con estos parámetros se calcula un diámetro equivalente aproximado  $a_{Ap}^*$ .

$$a^*_{Ap} \approx \sqrt{\frac{W_p \cdot K_m \cdot H_{pg}}{5}} \quad (15)$$

Con  $a_{Ap}^*$  se calcula  $h_{3(máx)}$  según ecuación (2). Teniendo el tirante límite,  $h_{3(máx)}$  y la altura del grupo de pilotes,  $H_{pg}$  se calcula el coeficiente que tiene en cuenta la altura del grupo de pilotes en relación al lecho:  $K_h$ .

$$K_h = 3.08 \cdot \left( \frac{H_{pg}}{h_{3(máx)}} \right) - 5.23 \cdot \left( \frac{H_{pg}}{h_{3(máx)}} \right)^2 + 5.25 \cdot \left( \frac{H_{pg}}{h_{3(máx)}} \right)^3 - 2.1 \cdot \left( \frac{H_{pg}}{h_{3(máx)}} \right)^4 \quad (16)$$

Al igual que en los casos anteriores, si la relación altura de grupo de pilotes altura máxima de tirante es mayor que la unidad, se adopta el valor unitario.

Conocidos los factores  $K_m$ ,  $K_{sp}$ ,  $K_h$  y  $W_p$ , se determina el diámetro efectivo  $a^*$ .

$$a^* = K_m \cdot K_{sp} \cdot K_h \cdot W_p \quad (17)$$

Si el valor absoluto de la relación  $(a^* - a_{Ap}^*)/a^*$  x100 es superior al diez por ciento, entonces se realiza un proceso iterativo a partir del valor de  $a^*$ . Con el diámetro efectivo, y el factor de forma se calcula la socavación debida al grupo de pilotes con las ecuaciones (6) y (7).

La socavación producida por la presencia de la pila compleja será la suma de las socavaciones calculadas para cada elemento, es decir:  $d_s = d_{s(col)} + d_{s(pc)} + d_{s(pg)}$

El caso IV presenta dos opciones, una columna con un cajón de fundación y una pila compleja con el nivel del agua a la altura de la parte superior de la pila cabezal. En el presente trabajo se referirá a este último esquema. En el mismo, los tres elementos estructurales definidos para la pila compleja están expuestos al flujo. La forma de evaluar la socavación producida una configuración definida como caso IV es a partir de la fórmula de Melville (Melville & Coleman, 2000) cuya expresión es la siguiente:

$$d_{se} = K_I K_d K_{ha} K_\alpha K_F \quad (18)$$

donde:  $K_I$  : Factor que está en función de la intensidad del flujo;  $K_d$  : factor que está en función del tamaño del sedimento;  $K_{ha}$  : factor que depende de la relación entre la profundidad del flujo y el ancho de la pila,  $K_\alpha$  : factor que depende del ángulo de ataque de la corriente o esviaje;  $K_F$  : factor que depende de la forma de la pila.

El diámetro equivalente ( $a^*$ ) de la pila compleja, en esta metodología se asume que es igual al ancho de la pila cabezal.

En el tiempo  $t_0 = 0$ , el elemento expuesto al flujo de la pila compleja es la columna. La pila cabezal y por supuesto los pilotes están a una cierta profundidad del lecho. Si se traza un plano por la parte superior de la pila cabezal y se asume ese punto como cero, se define un nuevo sistema de referencia. Las distancias hacia el terreno natural serán positivas. A medida que el proceso erosivo avance, esa distancia tenderá a cero, es decir, quedará “destapada” la

parte superior de la pila cabezal. Al continuar el proceso erosivo, esta distancia  $Y$  será negativa.

Bajo este nuevo sistema de referencia, Melville y Raudkivi (1996) (Bridge Scour, 2000), propusieron para  $a^*$  una expresión en función de  $h_0$ ,  $Y$ ,  $a_{pc}$ ,  $a_{col}$ , válida para los casos definidos como II y III. Coleman (2005) emplea variables semejantes para calcular un diámetro equivalente para pilas complejas.

El centro de atención está en la interacción de  $Y$  y el diámetro equivalente. Si la pila compleja está por debajo del cauce, el elemento columna es el responsable de producir la socavación. A medida que la pila cabezal se “introduce” al flujo, el diámetro equivalente debe aumentar. Este aumento deberá alcanzar un máximo cuando toda la pila y parte de los pilotes estén obstruyendo al flujo.

Para Coleman, evaluar la socavación producida por una pila compleja es analizar la relación  $a^* = f(Y)$ . Una vez calculado  $a^*$ , con la ecuación (18) se determina  $d_s$ .

Por lo dicho, una vez definida la configuración de la pila, el diámetro efectivo será el diámetro o ancho de la columna  $a_{col}$ , si  $Y \geq a_{col}$ . Cuando  $Y_T \leq Y \leq 0$ ,  $a^*$  se calcula con la ecuación (19), para  $Y = (-h_0)$ , con la ecuación (20). Cuando  $Y \leq (-h_0 - E_c)$ ,  $a^* = a_{pg}$ , donde  $a_{pg}$  es la separación entre los extremos de los pilotes en la dirección normal al flujo.

$$a^* = a_{col} \cdot \left( \frac{a_{col}}{a_{pc}} \right)^{\left\{ \left( \frac{a_{col}}{a_{pc}} \right)^3 + 0.1 - \left[ 0.47 \cdot (0.75 - Y/a_{col})^{0.5} \right] \right\}} \quad (19)$$

$$a^* = \left[ \frac{0.52 \cdot E_c \cdot a_{pc} + (h_0 - 0.52 \cdot E_c) \cdot a_{pg}}{h_0} \right] \quad (20)$$

La variable  $Y_T$  es la distancia a partir de la cual los pilotes se encuentran expuestos al flujo. Coleman (2005) demostró experimentalmente que entre los rangos de sus expresiones, el diámetro equivalente aumenta en forma lineal con el aumento de la exposición de la pila cabezal  $E_c$ . (19) y disminuye para valores menores a  $Y_T$ ,  $E_c$  (20).

La ecuación (19) se ha verificado para  $0.1 \leq a_{col}/a_{pc} \leq 0.85$  y para  $E_c \leq 3a_{col}$  y la ecuación (20) para  $0.15 < E_c/a_{pc} \leq 0.5$ , (Coleman, 2005). Estas expresiones deben ser verificadas para diferentes rangos de configuraciones.

El punto más débil de las ecuaciones presentadas para evaluar  $a^*$ , es la distancia  $Y_T$  para la cual la socavación ya no recibe la influencia de la variación de la exposición al flujo de la pila cabezal. El límite inferior máximo es  $-E_c$ , es decir el espesor de la pila cabezal y el superior cero. A fin de simplificar, se propone trabajar con  $Y_T = -E_c/2$ . De acuerdo a las consideraciones presentadas por diferentes investigadores, es necesario realizar un análisis experimental de  $Y_T$  en función de la relación  $a_{col}/a_{bc}$ , espesor de la viga cabezal y longitud de la misma.

Melville y Raudkivi (1996) definen el diámetro efectivo de una pila compleja con los pilotes enterrados como una función del tirante de aproximación, el ancho de la pila cabezal y la altura de la pila cabezal expuesta al flujo. Este caso se define como Caso III. Melville y Coleman (2000), definen el diámetro equivalente de una pila compleja expuesta al flujo como el ancho de la pila cabezal. Este caso se define como caso IV.

Como la metodología propuesta por Coleman busca establecer un único diámetro equivalente para la pila compleja, a diferencia con el criterio de separación de elementos, se incluyen en los cálculos las estimaciones de la socavación a partir de calcular el diámetro efectivo con las ecuaciones propuestas por dichos investigadores (Bridge Scour, 2000).

## ANÁLISIS COMPARATIVO

Para aplicar ambas metodologías se ha seleccionado cinco pilas complejas. Los datos geométricos de las mismas se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Datos de pilas complejas

Orden	h [m]	d <sub>50</sub> [mm]	V [m/s]	a <sub>col</sub> [m]	H <sub>col</sub> [m]	f [m]	L <sub>col</sub> [m]	a <sub>pc</sub> [m]	L <sub>pc</sub> [m]	Ec [m]	n	m	a [m]
1	0.31	1.00	0.42	0.15	0.18	0.08	0.15	0.31	0.91	0.06	3	8	0.03
2	0.33	0.84	0.34	0.10	0.08	0.05	0.40	0.19	0.48	0.08	3	8	0.02
3	0.60	0.84	0.38	0.03	0.06	0.05	0.31	0.12	0.36	0.06	2	4	0.02
4	2.70	11.00	2.80	0.50	1.00	0.75	5.20	2.00	6.03	1.00	2	4	0.40
5	0.31	1.00	0.42	0.23	0.24	0.04	0.23	0.31	0.91	0.06	3	8	0.03

En la Tabla 2 se presenta los valores de socavación con las dos metodologías analizadas y con la variante de calcular el diámetro efectivo empleando las expresiones de Melville & Raukivi y Melville & Coleman.

En base a la bondad de predicción de la ecuación de Sheppard para una pila simple (Farias et al, 2005) se toma como valor de comparación los de esta metodología. La pila 3 es una experiencia a escala realizada por Coleman (2005) de un caso de estudio presentado por Melville y Coleman (2000). La aplicación del método de Coleman al caso real predice una profundidad un 25 % superior a la de referencia. Se hace notar que la socavación calculada por el procedimiento de Sheppard es del orden de los milímetros. Esto se debe aparentemente al hecho que las dimensiones son muy pequeñas, y esta ecuación estaría fuera de rango en cuanto a sus parámetros de calibración. En relación a M&R y M&C, salvo para la pila 4, sobrestima hasta el doble de la profundidad de referencia.

**Tabla 2:** Profundidad de Socavación calculada

Orden	Sheppard	M&C	M&R	Coleman
1	0.14	0.70	0.63	0.47
2	0.12	0.38	0.29	0.25
3	4.E-04	0.25	0.11	0.15
4	1.03	3.00	2.18	4.08
5	1.06	0.70	0.68	0.54

## CONCLUSIONES PRELIMINARES

La asimilación de una pila compleja a un único diámetro equivalente en función de la exposición de la pila cabezal al flujo permite un tratamiento más simple de la problemática que nos ocupa. El énfasis se debe poner en desarrollar corridas experimentales que permitan calibrar las ecuaciones propuestas para el cálculo de un único diámetro efectivo y si es pertinente, optimizarlas.

Esta configuración equivalente parecería inducir a cálculos de la profundidad de socavación mayor que la que se obtiene separando la pila compleja en sus componentes. Las experiencias de Sheppard avalan esta última metodología

Se considera necesario realizar experiencias en laboratorio en el sentido de Coleman para aumentar los puntos experimentales y contribuir a una mejor estimación de  $a^*$  en función de la profundidad  $Y$ .

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Melville, B. W., Coleman, S.E.** (2000): *Bridge Scour. Water Resources Publications, LLC, Colorado, U.S.A*

**Sheppard, M.** (2003): "Scour at Complex Piers", *Report FDOT: BC354 RPWO 35, UF: 4910 45-04-799*.

**Coleman, S.E.** (2005): "Clearwater Local Scour at Complex Piers", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 4, pp 330-334*.

**Farias, H.D., Pilán, M.T., Olmos, L.A., Pece, F.J., Trejo, J.S.** (2005): "Análisis Comparativo y verificación Experimental de Métodos para la Predicción de la Socavación Local en Pilas de Puentes", *Memorias XX Congreso Nacional del Agua, Vol. I, pp. 447*.