

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

**EFFECTO DE LA SEPARACIÓN DE PILAS EN EL DIMENSIONADO DE
ENROCADOS DE PROTECCIÓN PARA PILAS COMPLEJAS**

Christian Chreties, Gonzalo Simarro y Luis Teixeira

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Universidad de la República, Uruguay.

Instituto de Ciencias del Mar (ICM-CSIC), Barcelona, España.

chreties@fing.edu.uy, simarro@icm.csic.es, luistei@fing.edu.uy.

RESUMEN:

En este trabajo se analiza experimentalmente, para pilas complejas, la influencia de la separación de las pilas del grupo en el diseño de protecciones de enrocado, evaluándose el papel del “efecto grupo” en el dimensionado del tamaño (peso) de los elementos de la protección, así como en el dimensionado de su extensión en planta, para un rango de separaciones de pilas usuales en la práctica. La campaña experimental se basó en un análisis dimensional de las variables que intervienen en el problema del diseño de protección de enrocado, efectuándose un total de 52 ensayos. Se estudiaron 3 modelos de grupo de pila cuya configuración se compone de 2 pilas en la dirección normal al flujo y 3 pilas en la dirección del flujo, todas de igual diámetro, ubicadas sin esviaje respecto a la dirección del flujo, variando de un modelo a otro únicamente la separación entre ejes relativa al diámetro de pila ($I=l/d$: 2,3 y 4). Los resultados muestran que, si bien la profundidad de erosión asociada al grupo puede aumentar hasta un 25% respecto al caso de la pila individual de igual diámetro (para las separaciones estudiadas), la influencia de la separación en el diseño de protección es despreciable, tanto para el tamaño de enrocado como para la extensión del manto cuando $I \geq 2$. Adicionalmente, en base a los resultados experimentales, se determinaron las formulaciones para el diseño de la protección (tamaño y extensión del manto) en los casos de grupo de pilas estudiado.

ABSTRACT:

In this paper we analyse a pile spacing influence on the riprap protection design for complex piers, by assessing the “group effect” role in riprap size (weight) and plan extension. The usual practice range of pile spacing was considered. Experimental campaign is based on a dimensional analysis background for complex pier riprap design, for which 52 experiments were conducted. Three, aligned to the flow, complex pier models were considered. The pile arrangement was kept invariant for all models (defined by the number of piles in flow direction (2) and orthogonal of flow (3)), varying just the axis pile spacing relating pile diameter ($I=l/d$: 2,3 y 4). The results show that although the “group effect” may be increase up to 25% the scour depth regarding the single pier problem, the influence of pile spacing in riprap design is essentially negligible for $I \geq 2$. Furthermore, based on the experimental results, design expressions for riprap size and matt extension were proposed.

PALABRAS CLAVES: Erosión local, Pilas Complejas, Medidas de Protección.

INTRODUCCIÓN

Razones hidráulicas, geotécnicas y económicas, llevan cada vez más a ser proyectadas y construidas fundaciones de pilas de puentes mediante pilas complejas, específicamente grupos de pilas (Coleman, 2005, Ataie-Ashtiani, 2006). Estos sistemas de fundación de puentes mediante pilas complejas se basan en descargar los esfuerzos de la estructura a través de pilares (“pier column”) apoyados en cabezales individuales (“pile cap”) que distribuyen la carga en el terreno mediante un grupo de pilas. De manera semejante al caso de fundaciones mediante pilas individuales, la interacción del flujo con estas estructuras complejas da lugar a procesos de erosión localizada, que pueden provocar el fallo parcial o total de la estructura.

Las características del proceso erosivo en el caso de pilas complejas, varían de acuerdo a las dimensiones geométricas de las componentes de la estructura y a la posición relativa entre el pilar, el cabezal, y el grupo de pilas, con respecto al nivel del agua y del lecho original de sedimento. De acuerdo a Coleman (2005), pueden identificarse 5 configuraciones caracterizadas por la posición relativa de la estructura con el nivel de agua y el lecho de sedimento, que se presentan en la Figura 1. Desde el punto de vista erosivo, los casos III y IV son los que producen mayores profundidades de erosión debido a que en esa posición el cabezal se encuentra expuesto al flujo, comportándose en algún caso como pila aislada ancha. En el otro extremo (asumiendo que el diámetro de las pilas de grupo es inferior al diámetro del pilar), el caso V es el de menor erosión, ya que únicamente las pilas del grupo se exponen al flujo (Melville and Coleman, 2000). A su vez, es el que se utiliza más frecuentemente en la práctica, y es el analizado en este trabajo.

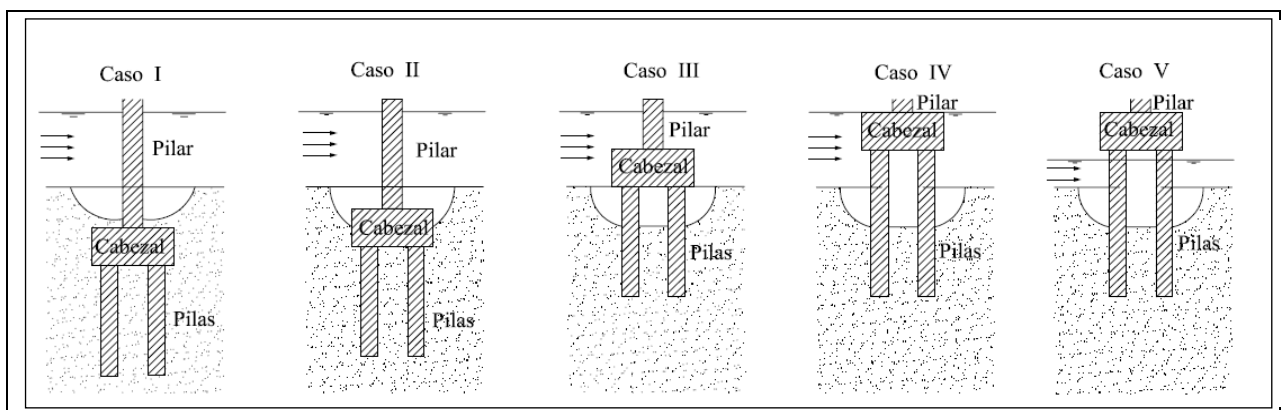


Figura 1.- Clasificación de configuraciones de acuerdo con Coleman (2005).

Desde el punto de vista físico, cuando un grupo de pilas está expuesto a la acción del flujo, se identifican dos patrones de socavación (Sumer and Fredsoe, 2002): a) el fenómeno de erosión local alrededor de cada pila individual, y b) un fenómeno de erosión global que afecta a toda el área alrededor del grupo, que se manifiesta como un descenso general del nivel del lecho alrededor del grupo. De esta manera, puede entenderse la socavación asociada al grupo de pilas como la integración de dos fenómenos, uno de carácter individual y localizado alrededor de cada pila y otro de carácter global asociado al grupo de pilas como una única estructura (“efecto grupo”). La importancia relativa de un fenómeno u otro está asociada a la configuración geométrica del grupo de pilas, y especialmente a la separación entre pilas relativa al diámetro, definida a través del parámetro adimensional $\Gamma = l/d$, siendo l la distancia entre centros de pila y d el diámetro de las mismas. En tal sentido, los datos experimentales reportados por Hannah (1978), Salim abd Jones (1998), Sumer and Fredsoe (2002) y Ataie-Ashtiani (2006) indican que el efecto de grupo tiende a ser despreciable para $\Gamma > 3$. Elliot and Baker (1985) indican que este límite es aproximadamente $\Gamma = 7$. Concretamente, los resultados presentados por Ataie-Ashtiani (2006) muestran que para valores de $\Gamma = 2$, la profundidad de erosión asociada a grupo es al menos un 25% superior a la

profundidad asociada a una pila individual de igual diámetro, lo que muestra la importancia del fenómeno de grupo al menos respecto a la profundidad de erosión.

Contrariamente a lo que sucede para el caso de pilas simples, donde se ha venido investigando y publicando resultados desde los años 1950 (Melville and Coleman, 2000), el conocimiento sobre pilas complejas y grupos de pilas es comparativamente menor. Esto ocurre por un lado, debido a la complejidad del proceso sinérgico asociado a estas estructuras compuestas que se agrega a la propia complejidad del fenómeno erosivo. Por otro lado, debido a que su utilización práctica, ha cobrado mayor importancia en los últimos años. El trabajo pionero en materia de erosión alrededor de grupos es el de Hannah (1978), mientras que la gran mayoría de los trabajos restantes fueron desarrollados en los últimos 15 años: p.e.: Richardose and Davis (2001), Sumer and Fredsoe (2002), Coleman (2005), Sheppard (2005), Ataie-Ashtiani (2006). Respecto al diseño de protección en grupos de pilas, es aún menor el conocimiento, pudiendo citarse los trabajos de Vittal (1994), Zarrati (2006), Chreties et al. (2010) y Simarro et al. (2011), siendo solamente los últimos dos asociados a protecciones mediante enrocado.

Asumiendo que es posible identificar, en el caso de grupos de pilas, los mismos mecanismos de fallo de enrocados de protección correspondientes a pilas individuales, se identifican, además de la degradación del lecho por erosión general, cuatro mecanismos básicos de falla: 1) de corte, 2) de borde, 3) por tubificación y 4) por formas de fondo. Los primeros tres corresponden a modos de fallo asociados al régimen de aguas claras, mientras que el último (desestabilización por formas de fondo) se agrega para el caso del régimen de lecho vivo. El fallo por corte ocurre cuando los elementos del enrocado tienen un peso (tamaño) insuficiente para resistir la tensión de corte provocada por el flujo y por lo tanto, son arrastrados por la corriente hacia aguas abajo. La falla de borde ocurre cuando los elementos del enrocado caen dentro del foso de erosión desarrollado alrededor de la protección, estando directamente vinculado a la extensión en planta de la propia protección (manto). El tercer modo de fallo ocurre por falta de gradación entre el diámetro del enrocado y el diámetro del material del lecho, provocando el “lavado” del material del lecho entre las piezas de enrocado. Este modo de fallo puede evitarse colocando filtros entre el sedimento del lecho y el enrocado de protección. El cuarto modo de fallo ocurre cuando los elementos de la protección se desestabilizan y mueven debido al pasaje de las formas de fondo a través del enrocado. Esto último ocurre solamente en algunos casos bajo lecho vivo y puede evitarse colocando la protección de enrocado por debajo de la cota mínima esperable de las formas de fondo.

En consecuencia, el dimensionado del tamaño de enrocado se realiza estudiando el peso (tamaño) necesario de los elementos de la protección de forma de evitar el fallo de corte. Por su parte, el diseño en planta del enrocado se realiza estudiando la extensión mínima que ocupará la protección de manera de evitar el fallo de borde. Las formulaciones de dimensionado de enrocado (tamaño y extensión) son normalmente determinadas y validadas en base a estudios experimentales, debido a la complejidad del problema, estudiándose en forma independiente la resistencia de la protección ante cada uno de los modos de fallo.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es estudiar experimentalmente la influencia de la separación de pilas (L) en el dimensionado de protecciones de enrocado para grupos de pilas. Específicamente, se pretende determinar el papel del “efecto de grupo” en el dimensionado del tamaño (peso) de los elementos de la protección, así como en el dimensionado de su extensión en planta, para un rango de separaciones usuales en la práctica ingenieril. Se pretende como agregado, obtener formulaciones de diseño de enrocado para grupo de pilas.

ANÁLISIS DIMENSIONAL Y METODOLOGÍA

Fue realizado en primer término un análisis dimensional de las variables que intervienen en el fenómeno de erosión alrededor del grupo de pilas, así como en el dimensionado del tamaño de protección y extensión en planta de la misma. En base a ello se estableció el plan de ensayos para cumplir con el objetivo planteado.

Para el caso de grupos de pilas sin proteger, tres parámetros adimensionales se agregan a los utilizados en el caso de la pila individual, para cuantificar la profundidad de erosión de equilibrio: la separación entre pilas relativa al diámetro de pila (Γ), el número de pilas en la dirección del flujo (n) y el número de pilas en la dirección perpendicular al flujo (m). En la Figura 2 se presenta la configuración de grupo de pilas utilizada en este trabajo, que se ubica sin formar ángulo de esviaje con la dirección del flujo. En caso que exista esviaje entre la dirección de flujo y el grupo de pilas, se deberá incorporar el ángulo de esviaje en el análisis.

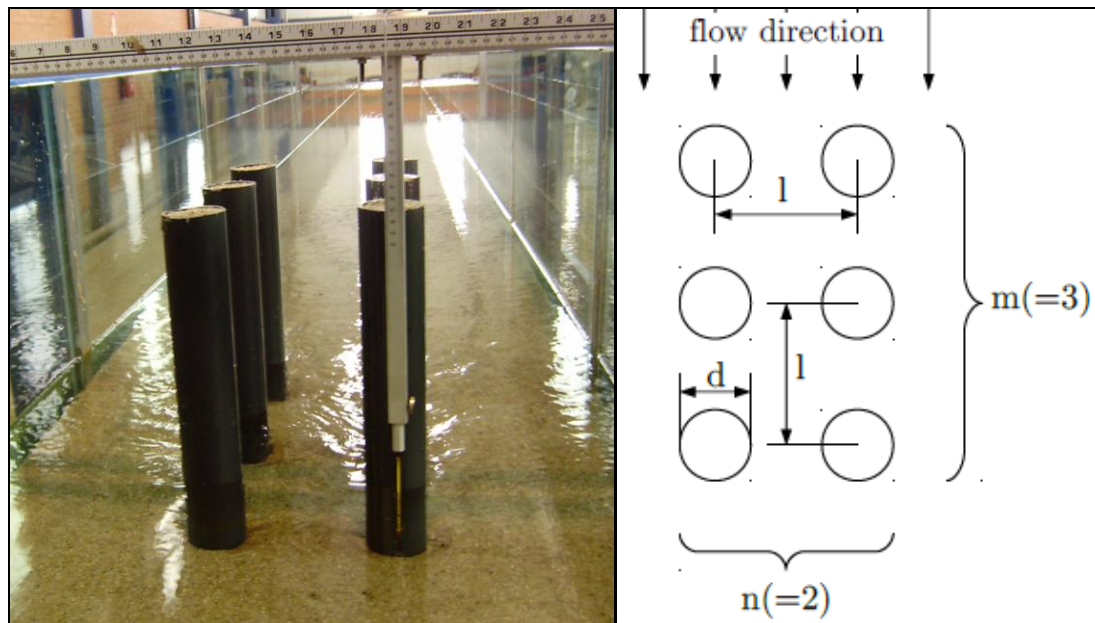


Figura 1.- Configuración de grupo de pilas $\Gamma=l/d$

Asumiendo que los efectos viscosos alrededor del grupo de pilas son despreciables, la profundidad de erosión de equilibrio puede escribirse como una función de:

$$d_{se} = f(u, h, \rho, \rho_s, d_{50}, d, b, g, n, m, \Gamma), \quad [1]$$

donde f debe entenderse como “función de”, u y h son respectivamente la velocidad media y el calado del flujo en la zona no-perturbada, b el ancho del canal, g la aceleración de la gravedad, d_{50} el tamaño medio del sedimento del lecho, ρ y ρ_s las densidades del agua y del sedimento del lecho. Aplicando análisis dimensional sobre la Ec. [1] puede obtenerse la Ec. [2].

$$\frac{d_{se}}{d} = f\left(\frac{h}{d}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{d_{50}}{d}, \frac{d}{b}, \frac{u^2}{gd}, n, m, \Gamma\right), \quad [2]$$

Realizando un desarrollo análogo para: A) el tamaño requerido de enrocado de protección d_{r50} , y B) el ancho de protección w (tomado desde el borde de pila hacia fuera en forma constante) y asumiendo que se mantienen constantes durante los ensayos los grupos adimensionales: d/b , d_{50}/d , y ρ_s/ρ , así como el número y configuración del grupo ($n=2$ y $m=3$) se obtienen las Ec. [3] y [4].

$$\frac{d_{r50}}{d} = f\left(\frac{h}{d}, \frac{u^2}{gd}, \Gamma\right), \quad [3]$$

y

$$\frac{w}{d} = f\left(\frac{h}{d}, \frac{u^2}{gd}, \Gamma\right), \quad [4]$$

En forma equivalente, es posible sustituir en Eq. [4] el grupo u^2/gd (representante de la velocidad de flujo) por la intensidad de flujo $I = u/u_c$, donde u_c es la velocidad crítica de inicio de movimiento del sedimento en el lecho (Cardoso et al., 2010). Así

$$\frac{w}{d} = f\left(\frac{h}{d}, I, \Gamma\right). \quad [5]$$

Cabe aclarar que en las Ec. [4] y [5] se asume que el fallo por borde no depende del tamaño de los elementos de enrocado (Cardoso et al., 2010).

En base a las Ec. [3] y Ec. [5], se planifica el procedimiento experimental para el grupo de pilas indicado en la Figura 2 y diferentes separaciones entre pilas $2 \leq \Gamma \leq 4$.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de hidráulica fluvial de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad de Castilla-La Mancha, España. Se utilizó un canal de pendiente variable de 30 m. de longitud, 0.75 m. de ancho y 0.60 m. de altura de trabajo especialmente diseñado para estudios de erosión local en estructuras fluviales. En la parte central del canal (20 m. aguas abajo del comienzo del mismo), donde se ubica la estructura a estudiar, la profundidad del canal es mayor a los efectos de analizar el fenómeno de erosión local. Dicha instalación está equipada con un sistema de alimentación y recirculación de caudal líquido y sólido controlado por un PLC central.

El caudal circulante en el canal es medido por medio de caudalímetros electromagnéticos situados en las tuberías de aducción de agua al canal y por medio de un vertedero triangular ubicado aguas abajo del canal. El error medio en la medida del caudal circulante es 1.1%.

La profundidad de flujo en el canal es controlada por medio de una compuerta rebatible ubicada al final del canal y su medida (al igual que la de profundidad de erosión) se efectúa utilizando limnómetros de precisión, cuyo error es de 0.1 mm.

El lecho del canal está constituido por una capa de sedimento de arena de cuarzo cuya densidad es $\rho_s = 2.650 \text{ kg/m}^3$, no cohesivo, de 1.65 mm. de tamaño medio y dispersión granulométrica $\sigma_g = 1.16$, por lo cual puede considerarse sedimento de granulometría uniforme ($\sigma_g < 1.3$).

Los grupos de pilas utilizados fueron construidos en PVC y rellenos de cemento a efectos de asegurar la estabilidad estructural de la pieza. El diámetro individual de cada pila es 6.3 cm., el número de pilas en dirección al flujo fue siempre $n=2$ y el número de pilas ortogonales al flujo fue siempre $m=3$, tal como se presenta en la figura 2.

Se realizaron dos tipos de ensayos: A) ensayos de dimensionado del tamaño de enrocado y B) ensayos de dimensionado de extensión de manto de enrocado.

A) Ensayos para diseño de tamaño de enrocado

Los ensayos tipo A) se realizaron siguiendo la Eq [3], para lo cual se consideraron cuatro tamaños diferentes de enrocado (d_{r50}): 1.65 (arena), 5.0, 7.0 y 11.1 mm. Para cada tamaño (d_{r50}), se fijó el calado del ensayo (h/d) variando entre 1.5 y 4, y se fue aumentando el caudal circulante hasta observar inicio de movimiento en torno al grupo de pilas. Dicho caudal junto con el calado de ensayo son las condiciones de flujo ($Fr_d^2 = u^2/gd$, h/d) correspondientes al fallo por corte para el d_{r50} ensayado. Este procedimiento fue repetido a cada modelo de grupo variando la separación de pilas (I). Los valores de separación $I = l/d$ considerados son 2, 3 y 4 (el efecto de grupo es no-despreciable en el proceso erosivo, de acuerdo a Ataie-Ashtiani, 2006, además de ser los valores usuales en la práctica profesional).

A efectos de evitar el fallo por borde, fue cubierto todo el canal con el enrocado correspondiente a cada ensayo. El espesor de enrocado fue tres veces el tamaño medio del mismo (Chiew, 1995). A los efectos de evitar el fallo por tubificación, fue interpuesto un filtro sintético flexible (malla sintética) entre el material del lecho y el enrocado en toda la zona de trabajo. Todos los ensayos para la determinación de diámetro medio de enrocado (d_{r50}) se realizaron en condiciones de aguas claras, por lo que se descarta el fallo asociado al pasaje de formas de fondo. En estas condiciones se realizaron un total de 37 ensayos de tipo A.

B) Ensayos para diseño de la extensión del manto de enrocado

Los ensayos tipo B) se realizaron siguiendo la Ec [5] y aplicando la metodología propuesta en Chreties et al. (2010), i.e. se fijó la intensidad de flujo en $I=1.3$. En este caso, se consideró (h/d) variando entre 1.5 y 2.5 y dos valores de separación de pilas (I): 2 y 3. El tamaño medio de enrocado de protección utilizado fue $d_{r50} = 16 \text{ mm}$, ya que el mismo asegura un peso suficiente para evitar el fallo por corte. Al igual que en los ensayos de tipo A, se implementó un filtro sintético flexible entre el material del lecho y el enrocado de protección a efectos de evitar el fallo por tubificación. En estas condiciones se realizaron un total de 15 ensayos de tipo B.

Si bien los ensayos tipo B) se realizan en condiciones de lecho vivo ($I=1.3$), el efecto del pasaje de formas de fondo a través de la estructura y su protección no tiene incidencia significativa en la profundidad de erosión de equilibrio ni en el diseño de la extensión del manto de protección (Chreties et al. 2010).

□

RESULTADOS

Siguiendo la Ec. [3], en la figura 3 se presentan los resultados de $Fr_d^2 = u^2/gd$, correspondientes al inicio de movimiento alrededor de cada grupo de pilas, para los 4 diferentes tamaño de enrocado estudiado y para los diferentes valores de h/d .

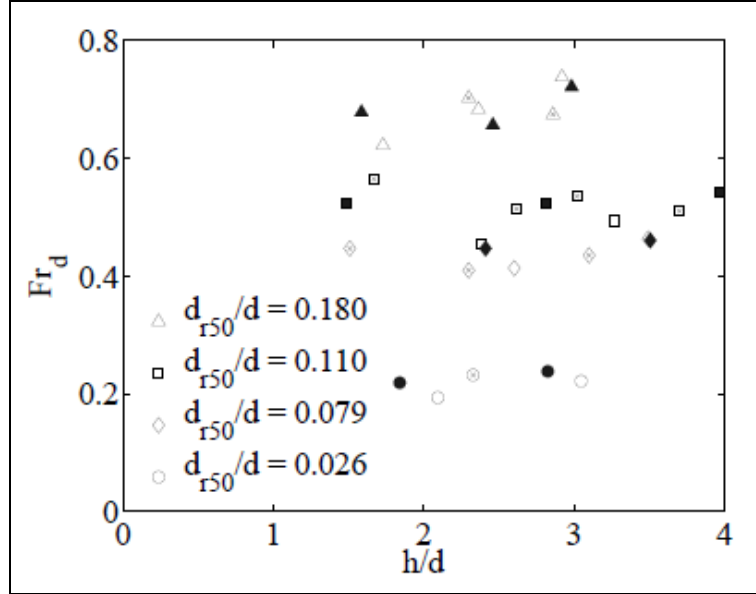


Figura 3.- Influencia de la separación entre pilas (I) y del calado relativo (h/d) en el dimensionado del tamaño medio de enrocado (d_{r50}/d). $I=2$ (blancos), $I=3$ (cruces), $I=4$ (negros).

Como se desprende de la Figura 3, Fr_d depende claramente de d_{r50}/d , pero no depende significativamente ni de h/d (para el rango estudiado) ni de I , incluso para $I=2$, donde para el análisis de profundidad de erosión sin protección (Ataie-Ashtiani, 2006) el efecto de grupo provoca un aumento de al menos un 25 % respecto a la pila individual de igual diámetro. De acuerdo a estos resultados, la influencia de la separación entre pilas para $I \geq 2$ resulta despreciable en la práctica.

Adicionalmente los resultados experimentales encontrados permiten establecer la relación correspondiente a la Ec. [3] (diseño de tamaño de enrocado) para el rango de valores estudiado:

$$\frac{d_{r50}}{d} = 0.42 Fr_d^{1.68}, \quad [6]$$

para $1.5 \leq h/d \leq 4$ y $2 \leq I \leq 4$.

Por su parte, en la Tabla 1 y Figura 4, se presentan los resultados obtenidos para dimensionado de extensión de enrocado (w), para diferentes valores de h/d y I , siguiendo la Ec. [5]. Como se desprende de los resultados presentados, los valores de extensión de enrocado (w) encontrados, no presentan una dependencia significativa en relación a h/d y I . En efecto las diferencias máximas encontradas para las diferentes separaciones entre pilas son de 1 cm., que corresponde al paso incremental en la extensión de la protección mínimo posible de acuerdo al tamaño medio de enrocado (16 mm.). De acuerdo a estos resultados, la influencia de la separación entre pilas para $I \geq 2$ resulta despreciable.

Tabla 1. - Resultados experimentales para dimensionado del ancho de la protección w/d . Se indican solo ensayos límites: w/d mínimo que no falla y máximo que falla en cada h/d y Γ .

Γ	h/d	w/d	Resultado
3	1.5	0.95	No falla
3	1.5	0.79	falla
3	2	1.11	No falla
3	2	0.95	falla
3	2.5	1.11	No falla
3	2.5	0.95	falla
2	1.5	0.95	no falla
2	1.5	0.79	falla
2	2.5	0.95	no falla
2	2.5	0.79	falla

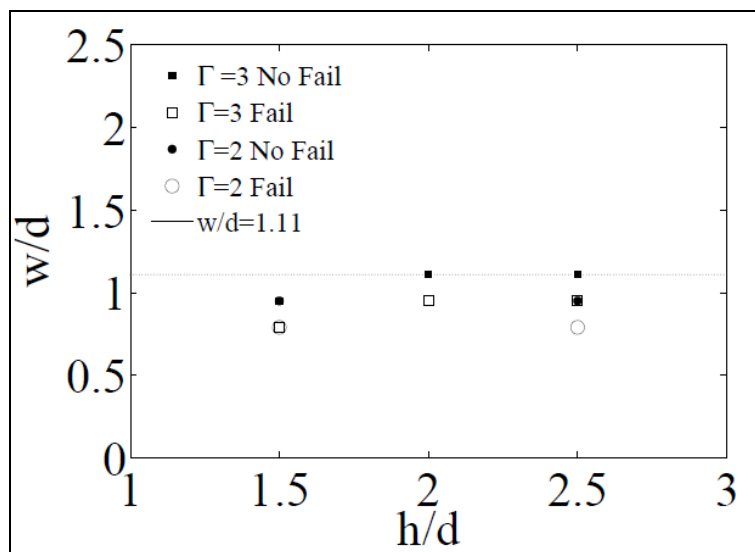


Figura 4.- Influencia de la separación entre pilas (Γ) y del calado relativo (h/d) en el dimensionado de la extensión del manto de enrocado (w/d). Se indican solamente los ensayos límites: w/d mínimo que no falla y máximo que falla en cada h/d y Γ .

Al igual que para el caso de diseño de tamaño de enrocado, los resultados experimentales encontrados para el diseño de extensión del manto permiten establecer la relación correspondiente a la Ec. [5] para el rango de valores estudiado:

$$\frac{w}{d} = 1.1, \quad [7]$$

para $1.5 \leq h/d \leq 2.5$ y $2 \leq \Gamma \leq 3$.

CONCLUSIONES

Se estudió experimentalmente la influencia de la separación entre pilas (i.e., el “efecto de grupo”) sobre el dimensionado del enrocado de protección, para el caso de pilas complejas donde solamente el grupo de pilas se encuentra expuesto al flujo.

Para las configuraciones de grupo de pilas estudiadas ($I=2, 3$ y 4) el tamaño medio de los elementos de la protección (d_{r50}) requerido para evitar el fallo por corte depende esencialmente del diámetro de pila (d) y del número de Froude de pila (Fr_d), siendo despreciable la dependencia de la separación I . A su vez, la extensión del manto requerida para evitar el fallo de borde (w) queda caracterizada únicamente por el diámetro de la pila, siendo despreciable el efecto de la separación I . En ambos casos, la influencia del calado relativo es poco significativa, especialmente para valores de $h/d > 1.5$, lo que es coincidente con lo presentado en la literatura para protección en pilas individuales y por Melville (1997) en relación a profundidad de erosión.

Adicionalmente, los ensayos experimentales permitieron establecer una formulación para el diseño del tamaño de los elementos de protección de enrocado así como una formulación para el dimensionado de la extensión de enrocado, la que en concordancia con la conclusión anterior resulta independiente de la separación entre pilas, para el rango de variación de los grupos adimensionales establecido en los ensayos.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de Christian Chreties fue desarrollado en el marco del programa de movilidad de investigadores de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) del Uruguay. Gonzalo Simarro es investigador del programa Ramón y Cajal del MICINN. Los autores quieren agradecer también a Eduardo Díaz por su ayuda en la preparación de los experimentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ataie-Ashtiani, B. and Beheshti, A. A. (2006). "Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 10, October 2006, pp. 1100-1104.

Cardoso, A. H., Simarro, G., Fael, C., Le Doucen, O. and Scheleiss, A. (2010). "Toe protection for spill-through and vertical-wall abutments". *Journal of Hydraulic Research*. Doi: 10.1080/00221686.2010.492106.

Chiew, Y. M. (1995). "Mechanics of riprap failure at bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 9, September 1995, pp. 635-643.

Chreties, C.; Simarro, G. and Teixeira, L. (2010). "Enrocado de protección para grupos de pilas: dimensionado en planta y propuesta adimensional alternativa". *Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR-LAD*, Punta del Este, Uruguay.

Coleman, S (2005). "Clearwater local scour at complex piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 4, April 2005, pp. 330-334.

Elliott, K. R. and Baker, C. J. (1985). "Effect of pier spacing on scour around bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 7, 1105-1109.

Hannah, C. R. (1978). "Scour at pile groups." Research Report no. 78, 3. University of Canterbury.

Melville, B. W. (1997). "Pier and abutment scour: integrated approach". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 2, February 1997, pp. 125-136.

Melville, B.W. and Coleman, E. (2000). *Bridge Scour*. Addison-Wesley Pub.Co., Reading, Mass.

Richardson, E, and Davis, S. (2001). Evaluating scour at bridges. Federal Highway Administration (FHWA), Washington, D.C.

Salim, M. and Jones, J. S. (1998). "Scour around exposed pile foundations". Compilation of Conference Scour Papers 1991-1998, ASCE Reston, VA.

Sheppard, D. M. (2005). Bridge Scour Manual. Florida Department of Transportation.

Simarro, G., Chreties, C, and Teixeira, L (2011). "Riprap size for pile groups" *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 12, 1676-1679.

Sumer, B. M. and Fredsoe, J. (2002). The Mechanics of Scour in the Marine Environment. Advanced Series on Ocean Engineering. Vol. 17. Word Scientific, Singapore.

Vittal, N., Kothyari, U. C., and Hagghat, M. (1994). "Clear-water scour around bridge pier group." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 11, 1309-1318.

Zarrati, A. R., Nazariha, M., and Mashahir, M. B. (2006). "Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 2, 154-162.