

Dimensiones en planta de una protección de estribo y erosiones resultantes

• Marcela L. Reynares* • Mario I. Schreider • Graciela B. Scacchi •
Universidad Nacional del Litoral, Argentina

*Autor de correspondencia

Resumen

Reynares, M. L., Schreider, M. I., & Scacchi, G. B. (noviembre-diciembre, 2014). Dimensiones en planta de una protección de estribo y erosiones resultantes. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 83-101.

Las protecciones flexibles son un recurso ingenieril ampliamente utilizado para contrarrestar los procesos erosivos locales que se desarrollan en torno a los estribos de puentes. En la literatura especializada se ha puesto énfasis en determinar el espesor adecuado de los elementos que constituyen el revestimiento. Sin embargo, son limitados los estudios que refieren a las dimensiones en planta mínimas requeridas y su influencia sobre las máximas profundidades de erosión. En este trabajo se analiza de manera experimental la incidencia que la extensión de una protección flexible colocada junto a un estribo de un puente aliviador tiene tanto sobre las máximas profundidades de erosión resultantes como sobre la geometría de las hoyas de socavación desarrolladas. La experimentación fue realizada en un canal de grandes dimensiones, capaz de representar de forma adecuada las particulares condiciones del flujo en las inmediaciones de un puente aliviador. Se ensayaron diferentes tamaños de protección flexible y anchos del escurrimiento en la sección del puente, manteniendo constante la geometría del estribo y las condiciones hidráulicas, estas últimas evaluadas en término del tirante y velocidad media del flujo junto al estribo. Los resultados obtenidos demostraron que las máximas profundidades de erosión son independientes del ancho de la protección, pero la posición de las mismas y la geometría que adquiere la hoya de erosión están fuertemente gobernadas por esas características del revestimiento. Asimismo, se ha comprobado que los volúmenes removidos se encuentran muy influenciados por la proporción de sección de paso del puente que está protegida.

Palabras clave: estribo, protecciones flexibles, erosión local.

Introducción

La colocación de protecciones flexibles junto a pilas y estribos de puentes son herramientas de la ingeniería cuyo uso ha tenido una creciente aceptación en los últimos tiempos como medida

Abstract

Reynares, M. L., Schreider, M. I., & Scacchi, G. B. (November-December, 2014). Plan Dimensions of an Abutment Revetment and its Resulting Scours. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(6), 83-101.

Flexible revetments are often used in Engineering as countermeasures to reduce local scour at bridge location. This kind of countermeasure do not avoid that the scour hole occurs, In fact, the revetments only move the scour hole beyond the outer limit of the blanket. An experimental study of scour processes related to the vertical-wall abutments protected with articulated mats which were placed in a river flood plain is reported in this paper. The purpose of this study was to determine the influence of apron width related to the maximum scour depth, the shape and volume of the scour hole, and its location. The experiments were carried out in a wide channel, which was able to suitably represent the conditions of the flow around of a relief bridge, keeping constant the geometry of the abutment and the hydraulic conditions. The results show that the maximum scour depths do not change respect to the observed one, when the abutment was not protected. The Froude number where the characteristic dimension is the bridge width remains as a representative parameter. The scour hole was deflected further away from the abutment, a distance proportional to the width of the protection, changing its shape. The scour hole was more elongate and therefore its volume increased in relation to the same experiment but without protection.

Keywords: Abutment, flexible revetment, local scour.

Recibido: 22/04/13

Aceptado: 25/04/14

para contrarrestar los procesos erosivos locales que se desarrollan en las inmediaciones de estas estructuras.

En general, en la literatura, las dimensiones en planta de una protección se asocian con las erosiones esperables junto a un estribo no

protegido o a la profundidad del flujo en las proximidades de la estructura. Sin embargo, es dable considerar que dicha erosión podría modificarse tanto en profundidad como en ubicación por la misma presencia de la protección y, aún más, que exista una relación entre las dimensiones de la protección y la configuración geométrica de la hoya de erosión resultante.

El presente estudio se enmarca en una investigación de mayor alcance sobre los procesos erosivos desarrollados en torno a estribos largos protegidos en valles de inundación, aspecto aún no resuelto por completo en la bibliografía especializada.

Enfoque metodológico

Del análisis de antecedentes bibliográficos surgen dos aspectos que se consideran claves a la hora de estudiar los procesos de erosión junto a un estribo largo protegido.

En primer lugar, la presencia de la protección junto a un estribo impide que tengan lugar profundizaciones del lecho en las inmediaciones del mismo, pero promueve el desarrollo de erosiones en sectores del canal que no se veían afectados para la situación sin protección (Reynares, Roca-Collell, Scacchi, & Schreider, 2005; Melville, Van Ballegooy, Coleman, & Barkdoll, 2006a y 2006b; Morales, Ettema, & Barkdoll, 2008; Cardoso & Fael, 2009). En particular, Melville *et al.* (2006a y b) llevaron a cabo un estudio experimental donde ensayaron protecciones constituidas por riprap y por bloques de concreto unidos con cables (CTB) en estribos ataludados intermedios, situados en valles de inundación de secciones compuestas. Los autores propusieron una expresión mediante la cual se obtiene la extensión del delantal en función de la erosión (y_E), evaluando la estabilidad del material de relleno del estribo. Una continuación de este trabajo fue presentado por Morales *et al.* (2008), quienes incorporaron una serie adicional de experimentos, mediante la cual comprobaron que resulta adecuado adoptar

un ancho de protección igual a dos veces el tirante en el valle de inundación. Por su parte, Cardoso y Fael (2009) estudiaron el diseño de mantos de riprap en torno a estribos de pared vertical bajo condiciones de agua clara. Los experimentos se hicieron en un canal de sección rectangular con distintas longitudes de estribos y configuraciones de riprap. Los autores sugieren una nueva ecuación para la evaluación de la extensión W , que depende de la relación entre la longitud del estribo y la profundidad del flujo, relación que en sus experimentos siempre fue menor de 9.42. Finalmente, Reynares *et al.* (2005) han puesto de manifiesto que la ubicación y geometría de la hoya de socavación se modifica para igual ancho de brecha (B), conforme cambia el ancho (W) de una protección rígida apoyada en el lecho.

En segundo lugar, Scacchi, Schreider y Fuentes (2005) demostraron que en la sección de emplazamiento de puentes aliviadores existe una interacción entre el desarrollo de las erosiones locales junto al estribo y la distribución transversal de caudales en dicha sección. Este proceso resulta directamente dependiente del semi-ancho del puente, definido como "Brecha", por lo que la máxima profundidad de erosión en un puente aliviador puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$\frac{y_E}{B} = 2.3057 Fr_B - 0.0315 \quad (1)$$

F_{rB} : $V/(g.B)^{0.5}$ (denominado número de Froude de la brecha).

V : velocidad inicial del flujo en la sección del puente.

B : semi-ancho del puente o "Brecha".

Sobre la base de tales premisas surge entonces la necesidad de considerar en el presente estudio como variables determinantes de los procesos mencionados a B y aquellas que definen las dimensiones en planta de la protección.

La profundidad de erosión junto al estribo protegido (y_{EP}) puede ser expresada mediante una relación funcional del tipo:

$$y_{EP} = f_1(B, L, E, \theta, K_{Sh}, W, W_L, D_n, \rho_p, h, V, g, d_s, \rho_s, \sigma_g, \rho, \nu, t) \quad (2)$$

donde B es el ancho de la brecha (semi-sección del puente); L , la longitud del estribo (sentido transversal al escurrimiento); E , el espesor del estribo (sentido del escurrimiento); θ , el ángulo respecto del flujo; K_{Sh} , el factor por forma del estribo; W , la extensión de la protección en el sentido transversal a la dirección principal del escurrimiento; W_L , la extensión de la protección en el sentido longitudinal a la dirección principal del escurrimiento; D_n , el espesor de la protección; ρ_p , la densidad de la protección; h , la profundidad del escurrimiento; V , la velocidad media del flujo; g , la aceleración de la gravedad; d_s , el diámetro característico del sedimento; ρ_s , la densidad del sedimento; σ_g , el desvío estándar; ρ , la densidad del fluido; ν , la viscosidad cinemática, y t es el tiempo.

Si a estas variables se les aplica un análisis adimensional, considerando como variables fundamentales B , ρ , V , se obtiene la siguiente expresión adimensional:

$$\frac{y_{EP}}{B} = f_2\left(\frac{L}{B}, \frac{E}{B}, \theta, K_{Sh}, \frac{W}{B}, \frac{W_L}{B}, \frac{D_n}{B}, \frac{\rho_p}{\rho}, \frac{h}{B}, \frac{V^2}{Bg}, \frac{d_s}{B}, \frac{\rho_s}{\rho}, \sigma_g, \frac{VB}{\nu}, \frac{Vt}{B}\right) \quad (3)$$

Del análisis adimensional surge que la erosión local junto al estribo protegido adimensionalizado por el ancho de la brecha es una función de 15 grupos adimensionales que reflejan la incidencia de las variables en juego. Sin embargo, un análisis de la preponderancia que esos distintos grupos tienen, o el hecho de que determinados parámetros fueron considerados constantes a lo largo de toda la secuencia experimental, permite reducir la cantidad de grupos a considerar, simplificando

el análisis del problema y facilitando la verificación experimental. A continuación se fundamenta la razón por la cual no fue considerado cada uno de los grupos eliminados:

L/B : se ha demostrado que para el caso de estribos largos, la erosión local es independiente de la longitud del mismo.

E/B : su influencia se considera despreciable, ya que los torbellinos verticales en el borde de ataque del estribo son mayores que el espesor (E) de éste.

θ : el ángulo de ataque del escurrimiento se mantuvo constante durante todas las experimentaciones.

K_{Sh} : la forma del estribo no se modificó.

D_n/B : el espesor de la protección no se modificó a lo largo de la experimentación, ya que su estudio no es objeto de este trabajo.

ρ_p/ρ : la relación de densidades se mantuvo constante, pues la protección utilizada fue siempre la misma.

h/B : este parámetro presentó variaciones pequeñas en el desarrollo experimental propuesto.

d_s/B : distintos autores coinciden en señalar la baja influencia de este parámetro en los procesos de erosión local cuando su tamaño es despreciable en relación con el obstáculo. En el presente estudio, d_s se mantuvo constante, determinando un valor de $L/d_s = 3\ 650$.

ρ_s/ρ : la relación de densidades resultó constante para todos los ensayos (arena/agua).

σ_g : el sedimento empleado para la realización de los ensayos fue arena uniforme.

$U.B/\nu$: se considera que es escasa la influencia de los efectos viscosos en los fenómenos de erosión local.

$U.t/B$: sólo se consideraron las profundidades de erosión correspondiente a situaciones próximas al equilibrio, por lo que el tiempo no resulta una variable relevante.

De este modo, la expresión anterior queda reducida a:

$$\frac{y_{EP}}{B} = f_3\left(\frac{W}{B}, \frac{W_L}{B}, \frac{V^2}{Bg}\right) \quad (4)$$

El análisis de los resultados obtenidos de las experiencias de laboratorio permitirá evaluar la dependencia existente entre las variables adimensionales presentadas en la relación funcional (4), e identificar la importancia relativa de cada una de ellas en el fenómeno en estudio.

Objetivos

El objetivo general que persigue el desarrollo del presente trabajo consiste en evaluar la incidencia que sobre las erosiones resultantes junto a un estribo largo protegido tienen la extensión de la cubierta y el ancho del puente, con el propósito de profundizar la comprensión de los mecanismos actuantes y brindar orientaciones generales para el diseño en planta del revestimiento.

El cumplimiento del objetivo general conlleva al establecimiento de los siguientes objetivos particulares:

- Determinar patrones de comportamiento de las erosiones observadas acordes con las variaciones de las geometrías en planta de la protección para un puente de ancho constante.
- Determinar las modificaciones sufridas por esos patrones de erosión ante cambios en el ancho del puente para iguales condiciones hidráulicas y de las características de la protección adoptada.

- Desarrollar lineamientos para el diseño del ancho de la protección.

Diseño experimental

Las características que presenta el escurrimiento en un puente aliviador determinó la necesidad de contar con un particular dispositivo experimental que permitiera representar de manera adecuada los fenómenos intervinientes.

Se contó para ello con un canal de ensayos de 18.50 m de largo, 7.65 m de ancho y 0.90 m de profundidad, que posee el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) en su Nave I (figura 1a).

El canal posee un tramo de ingreso a fondo fijo de 3.50 m de longitud, luego del cual se desarrolla un sector con lecho móvil de 11 m de longitud, un ancho igual al del canal y 0.60 m de espesor. El tramo final está conformado por otro sector rígido de 3.50 m de longitud (figura 1b).

El sector a fondo móvil se materializó colocando arena uniforme de 1 mm de diámetro medio, con un peso específico de 2 650 kg/m³ y un desvío estándar $\sigma_g = 1.3$. Las características señaladas del material empleado se mantuvieron constantes durante todo el desarrollo experimental.

Tanto al tramo inicial como al final con fondo rígido se les adhirió una delgada capa

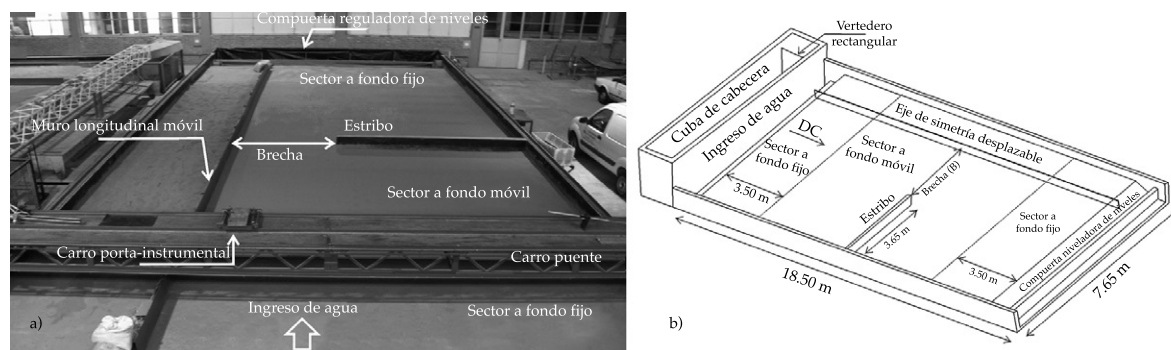


Figura 1. (a) Vista general y (b) croquis del canal de ensayos.

conformada por igual material que el del lecho móvil, con el fin de mantener una rugosidad superficial semejante en todo el recorrido del flujo.

A 8.50 m aguas abajo de la sección de entrada, en el sector a fondo móvil, se encuentra materializado un cierre parcial de 3.65 metros de extensión, con origen en la margen derecha del cuenco, configurando así un estribo prismático de pared vertical y 0.12 m de espesor. En todos los casos, la relación L / h fue mayor a 25, asegurando con ello la condición de estribo largo (figura 1).

Mediante el uso de un muro longitudinal móvil se modificó el ancho de la sección, manteniendo fija la longitud del estribo de acuerdo con los objetivos planteados en el presente trabajo. En adelante, el ancho de la sección de paso será denominado como brecha (B) y se estará refiriendo al semi-ancho del puente. Así, la pared móvil, opuesta al estribo, se constituye en un eje de simetría, no sólo desde el punto de vista geométrico sino también en cuanto al fenómeno en estudio, lo que permitió trabajar con un solo estribo.

En el extremo de aguas abajo del canal existe una trampa de sedimentos que retiene el material que pueda ser arrastrado por la corriente. Luego de la misma se encuentra una compuerta reguladora de niveles de eje vertical.

El canal cuenta con una serie de drenes ubicados debajo del manto de arena, apoyados en el fondo, mediante los cuales es posible desagotarlo sin afectar la morfología del lecho resultante.

En cuanto al sistema de protección utilizado en la experimentación, de todas las opciones disponibles en el mercado se buscó aquella que cumpliera con determinadas características constructivas y operativas, a fin de poder facilitar y agilizar la puesta a punto de cada experimento. Se priorizaron los siguientes requerimientos: integridad en todo momento (por lo que no debían poseer componentes metálicos o degradables), buena flexibilidad, permeabilidad, y colocación rápida y sencilla. Las protecciones de bloques de concreto adheridos a geotextil cumplían con todos los requerimientos, por lo que se constituyó en el revestimiento más apropiado para los experimentos planteados (figura 2).

Las protecciones utilizadas fueron suministradas por una empresa que se dedica al diseño y construcción de revestimientos flexibles. Fueron confeccionadas especialmente para este dispositivo experimental, ya que la altura del bloque fue determinada a partir de la expresión de Pilarczyk (1997), considerando las condiciones hidráulicas junto al estribo. Las protecciones fueron suministradas en paños de 1.00 m de largo y 0.50 m de ancho. Los bloques

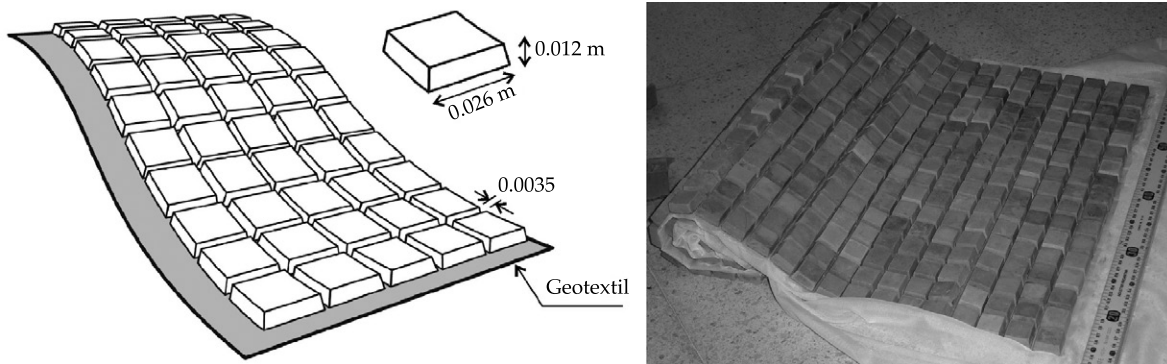


Figura 2. Mantas de bloques de concreto adheridos a geotextil usadas en los experimentos.

que componen las mantas son prismas tronco piramidal de base cuadrada, con lados de 0.026 metros, un espesor de 0.012 m y se encuentran separados entre sí a una distancia media de 0.003 m (figura 2).

A fin de validar la hipótesis de partida traducida en la relación funcional (4), se diseñó una secuencia de experimentos de laboratorio. Su desarrollo permitió evaluar el grado de representatividad de los parámetros seleccionados y visualizar los mecanismos actuantes responsables del proceso.

A modo de referencia, se consideraron los experimentos de Scacchi *et al.* (2005). En función de ello se adoptó un caudal específico $q = 0.036 \text{ m}^2/\text{s}$, el cual se mantuvo constante para toda la secuencia experimental desarrollada. Este caudal específico permitió, por un lado, el diseño de experimentos con una variación significativa del ancho del canal y, por otro, utilizar caudales totales compatibles con la capacidad de bombeo del sistema.

Se experimentaron distintos anchos de brecha B , logrados con el desplazamiento del muro longitudinal móvil (figura 1a y b). En consecuencia, se diseñaron series de ensayos en las que, sobre la base de un valor de B constante, se variaron las dimensiones de la protección.

El diseño en planta de la protección consideró las siguientes dimensiones (figura 3):

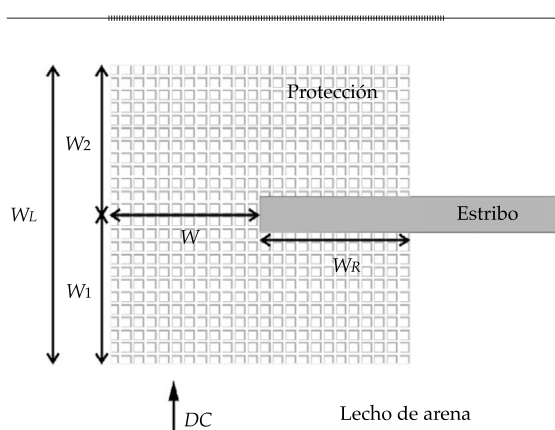


Figura 3. Esquema de las dimensiones en planta de la protección.

- W : distancia medida desde el extremo del estribo en sentido transversal a la corriente.
- W_L : longitud total de la protección en sentido del escurrimiento ($W_L = W_1 + W_2$).
- W_1 : longitud de la protección en dirección hacia aguas arriba, medida desde el eje del estribo.
- W_2 : longitud de la protección en dirección hacia aguas abajo, medida desde el eje del estribo.
- W_R : sobreaño de protección medido desde el extremo del estribo en dirección hacia el margen.

Todos los experimentos se desarrollaron en condición de agua clara, esto es, sin aporte de sedimentos desde agua arriba, tal como ocurre en los puentes aliviadores emplazados en valles de inundación. De este modo, la ausencia de formas de fondo tanto en la hoya como en la zona contraída permitió una mayor precisión al momento de relevar la geometría del fondo resultante.

El tiempo de duración de los ensayos fue de 24 horas, suficiente para desarrollar más del 80% de la máxima profundidad de erosión local en la situación de estribo no protegido (Schreider, Zanardi, Scacchi, & Franco, 1998).

Las extensiones W_1 , W_2 y W_R adoptaron el valor de 0.50 m, determinado a partir de una serie de experimentos mediante los cuales se analizó la influencia de la magnitud de dichas extensiones sobre las erosiones locales resultantes (Reynares, Schreider, & Scacchi, 2010).

Con el fin de validar la hipótesis de partida presentada en la relación funcional (4), se consideraron tres (3) anchos de brecha (B), los que identificaron a cada una de las series de ensayos. Para cada serie se hizo un ensayo de referencia, donde se dejó desarrollar la hoya de erosión para el estribo sin protección, y cuatro (4) experimentos más, donde en cada uno de ellos se consideró un ancho de protección W diferente. El caudal total debió ser modificado en cada serie para mantener constante el caudal específico adoptado ($q_m = 0.036 \text{ m}^2/\text{s}$).

Los valores de B y W adoptados fueron:

- B : 2, 3 y 4 metros.
- W : 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00 metros.

En el cuadro 1 se presentan los ensayos realizados; se puede observar la combinación de anchos de brecha (B) y de protección (W) considerados.

En ninguna de las situaciones previstas en la experimentación, el sector protegido superó el 50% del ancho de la brecha, por lo que en todos los ensayos existió una porción de la sección de paso que no se vio afectada por procesos erosivos.

En cada uno de los ensayos se midieron perfiles de velocidades (en sus tres componentes) en las siguientes secciones transversales:

1. Sección de la brecha coincidente con la cara de aguas arriba del estribo.
2. Sección coincidente con las máximas profundidades de erosión observadas.

Las velocidades del escurrimiento fueron medidas con un velocímetro acústico Doppler (ADV).

Una vez finalizado cada ensayo y desagotado el canal, se realizó un relevamiento topográfico de detalle del lecho, para lo cual se realizaron numerosos perfiles transversales en la zona afectada por los procesos erosivos, con el objetivo de poder reproducir la geometría final de la hoya de erosión y la protección deformada.

En cada uno de los experimentos se realizó un exhaustivo registro fotográfico de la configuración inicial y final del lecho por medio de una cámara digital de alta resolución, ubicada mediante un trípode en posiciones previamente seleccionadas. Esta herramienta fue de vital importancia para hacer análisis comparativos cualitativos de las distintas situaciones ensayadas.

Análisis de resultados

Los resultados alcanzados muestran que la presencia de la protección no evita la

Cuadro 1. Condiciones geométricas e hidráulicas ensayadas en la secuencia experimental realizada.

Serie y ensayo número		Ancho de la brecha (B)	Ancho de protección (W)	Caudal total (Q) Tirante medio (h)
Serie 1	E_1	4 m	Sin protección	$Q = 0.144 \text{ m}^3/\text{s}$ $h = 0.120 \text{ m}$
	E_2	4 m	0.25 m	
	E_3	4 m	0.50 m	
	E_4	4 m	0.75 m	
	E_5	4 m	1.00 m	
Serie 2	E_6	3 m	Sin protección	$Q = 0.108 \text{ m}^3/\text{s}$ $h = 0.115 \text{ m}$
	E_7	3 m	0.25 m	
	E_8	3 m	0.50 m	
	E_9	3 m	0.75 m	
	E_{10}	3 m	1.00 m	
Serie 3	E_{11}	2 m	Sin protección	$Q = 0.072 \text{ m}^3/\text{s}$ $h = 0.110 \text{ m}$
	E_{12}	2 m	0.25 m	
	E_{13}	2 m	0.50 m	
	E_{14}	2 m	0.75 m	
	E_{15}	2 m	1.00 m	

formación de la hoya de erosión sino que la aleja del estribo. Esto ya ha sido observado en la bibliografía especializada, tal como fue detallado en el enfoque metodológico.

A continuación se presenta el análisis de las máximas profundidades alcanzadas en la hoya de erosión y la ubicación que las mismas tienen en relación con el sitio de emplazamiento del estribo y las dimensiones de la protección colocada.

Magnitud de las máximas profundidades de la hoya de erosión

Para analizar el comportamiento de las máximas erosiones observadas en relación con el ancho de la protección se elaboró la figura 4, donde se vincularon las máximas profundidades de erosión relevadas adimensionalizadas con el ancho de la brecha (y_{EP}/B) versus el porcentaje de sección de paso protegido (W/B).

Las máximas profundizaciones prácticamente no tuvieron variación para los distintos anchos de protección considerados en cada una de las series de ensayo (figura 4). Por el contrario, sí fue evidente la dependencia

respecto del ancho de la brecha B , pudiéndose observar las variaciones de la profundidad de erosión para los distintos valores dados a este parámetro.

En la figura 5 se contrastan las máximas erosiones observadas en la hoya en cada uno de los ensayos realizados con el valor calculado para esas condiciones por la ecuación (1). Los resultados muestran el buen ajuste de la expresión propuesta, con errores que, salvo en un solo dato, son menores al 10%.

La figura 5 estaría indicando que la ecuación (1) (Scacchi et al., 2005) resulta una herramienta válida para estimar las máximas erosiones que se producen en la hoya. Ello estaría ratificando al número de Froude de la brecha (F_{rB}) como un parámetro representativo del fenómeno en estudio a la hora de evaluar las máximas profundidades de erosión, con independencia del lugar donde se producen.

Ubicación de las máximas profundidades de la hoya de erosión

Si bien la magnitud de las máximas erosiones no parecería verse influenciada por los distintos

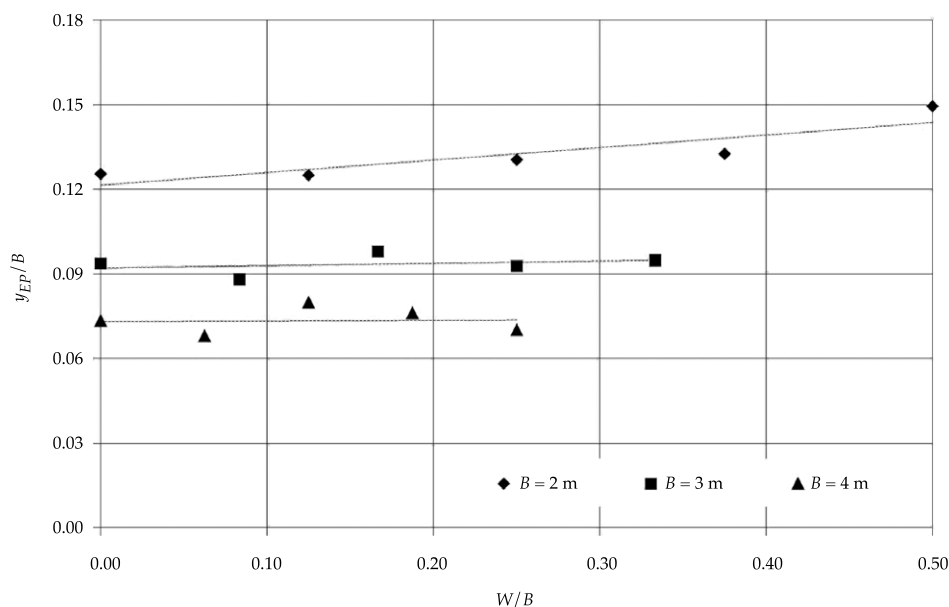


Figura 4. Máximas erosiones observadas en la hoya.

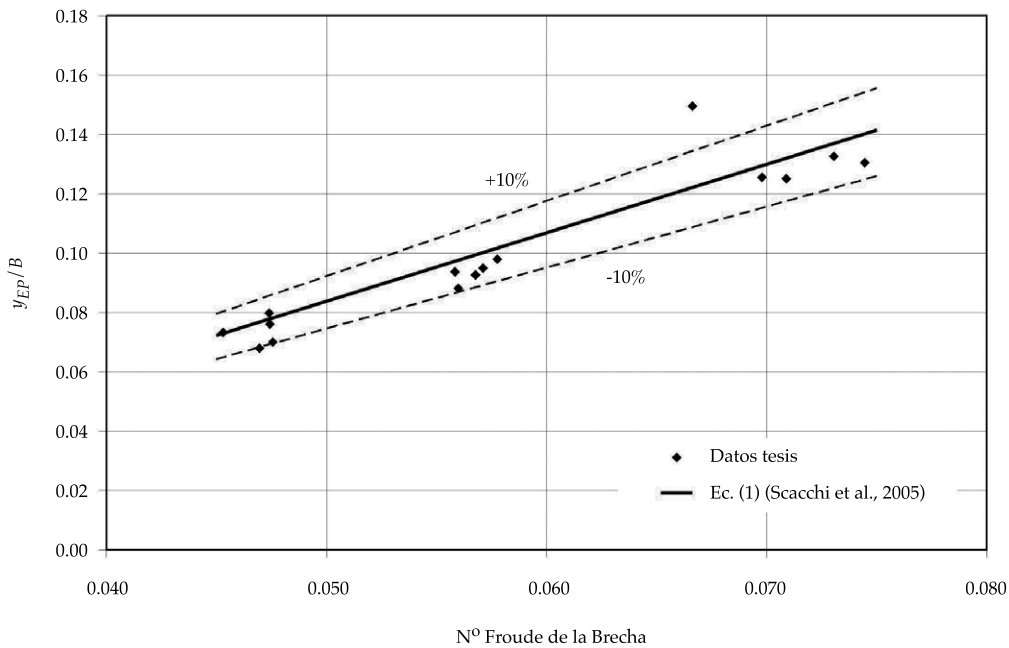


Figura 5. Máxima profundidad de erosión en función del número de Froude de la brecha.

anchos de protección, su posición sí resulta dependiente de W . En efecto, la presencia de la protección induce un desplazamiento de la hoya de erosión y , por lo tanto, de las mayores profundidades respecto de su posición típica en un estribo no protegido.

Los relevamientos de detalle que se realizaron al finalizar cada una de las experiencias de laboratorio permitieron contar de manera precisa con la configuración adquirida por el lecho en las inmediaciones del estribo y su protección. Información mediante la cual fue posible reconstruir cada una de las hoyas de erosión resultante, con el fin de caracterizarlas geoméricamente.

En la figura 6 se reproduce la topografía del lecho erosionado para cada uno de los ensayos realizados. La figura ha sido agrupada de modo que cada columna reproduce los resultados correspondientes a un dado ancho de brecha (B) y los diferentes anchos de protección ensayados (W). En tanto, las filas se agrupan en función de cada valor del W considerado. La mencionada figura permite apreciar cómo las máximas profundidades de erosión modifican

su posición en función del ancho de protección W y de brecha B considerados.

En efecto, para un ancho de brecha determinado se puede observar claramente cómo las máximas profundidades de erosión se alejan del estribo en la medida que la protección fue más ancha. Este efecto fue menos notable para la brecha mayor ($B = 4$ m) y más significativo para la menos ancha ($B = 2$ m).

Las distancias desde el extremo del estribo al punto donde se ubicó dicha profundidad fueron medidas en cada una de las experiencias e identificadas con la letra R (figura 7).

Las distancias dy y dx definen las componentes de R paralela y transversal a la alineación del estribo (figura 7). La distancia R y sus componentes se representaron en la figura 8, adimensionalizadas con el ancho de la brecha (B), en función del ancho relativo ocupado por la protección (W/B).

La figura 8 pone de manifiesto un comportamiento singular del desplazamiento de las máximas profundidades de erosión en la dirección de la corriente (dx), conforme se

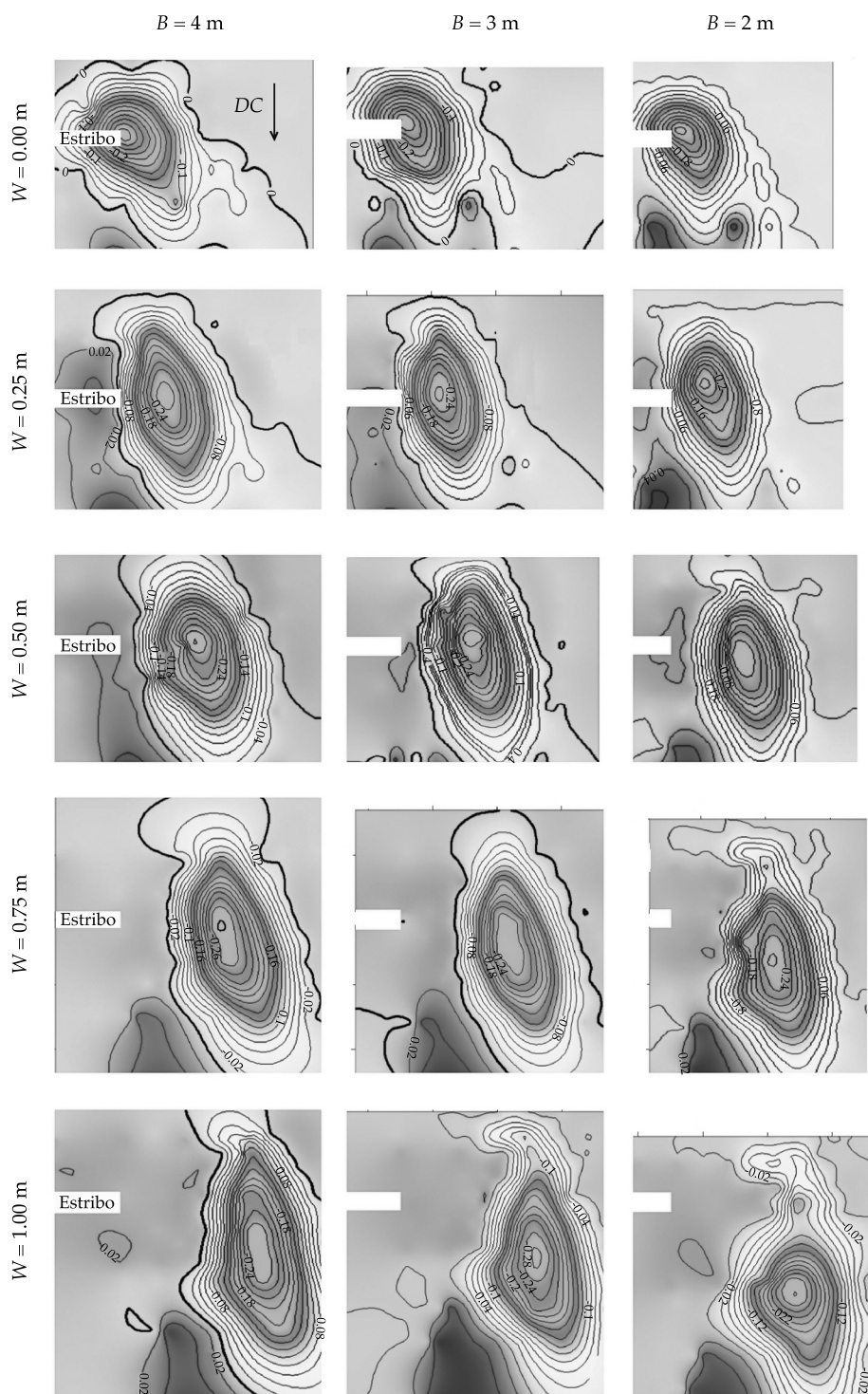


Figura 6. Topografía del lecho resultante para los ensayos realizados.

incrementa la relación W/B . En efecto, para valores de esa relación menores a 0.20, el desplazamiento de la hoja en el sentido de

la corriente es prácticamente despreciable, posicionándose las máximas socavaciones en la traza de la sección del estribo. En

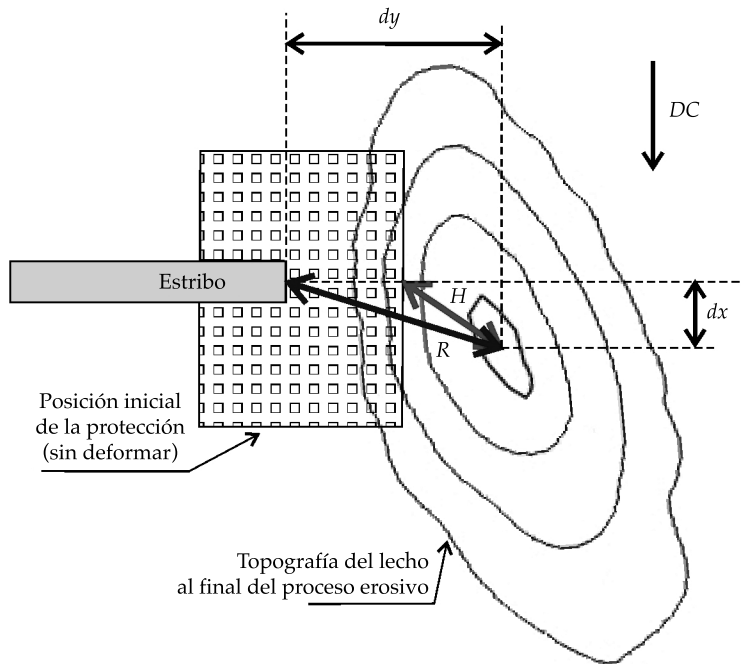


Figura 7. Esquema de definición de las distancias R y H .

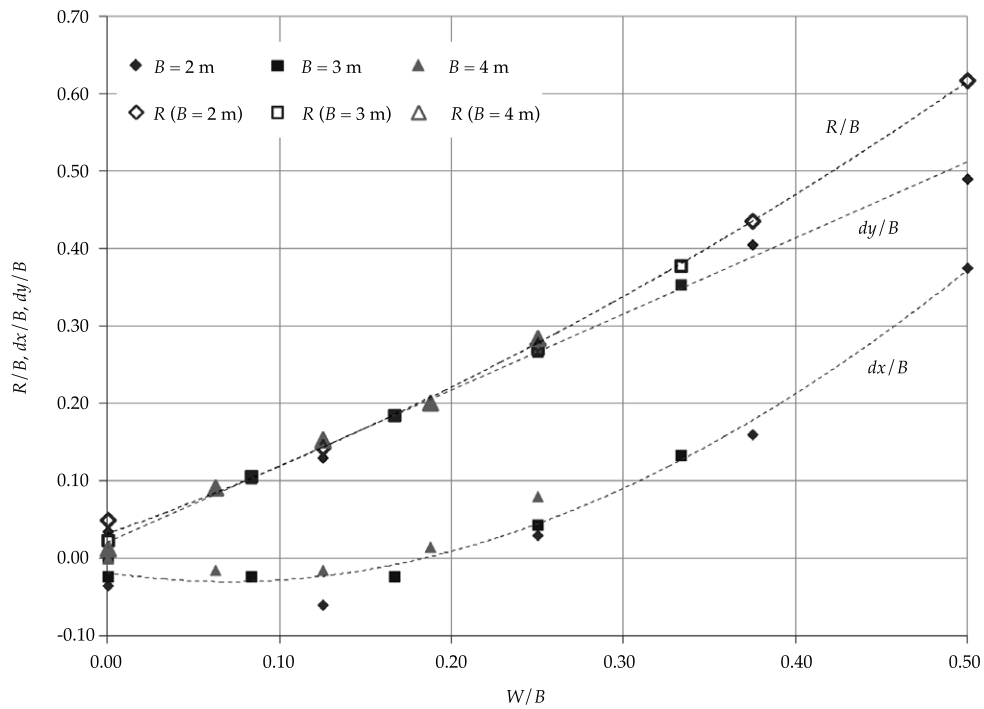


Figura 8. Variación de las distancias R , dx y dy , en función de la fracción del ancho de la brecha que se encuentra protegido.

tales circunstancias coinciden las máximas profundidades de erosión observadas en la sección de la brecha con las máximas absolutas verificadas en el ensayo.

Para valores de $W/B > 0.20$, la distancia dx se incrementa de forma significativa, evidenciando un corrimiento hacia aguas abajo del ápice de la hoya, tal como se observa en la figura 6 para la columna de $B = 2$ m. Por su parte, el desplazamiento lateral de las máximas erosiones presenta un comportamiento único cualquiera sea el valor de W/B . Es decir, las mayores profundidades de erosión se desplazan linealmente con el incremento del ancho de la protección.

En la figura 9 se analiza el comportamiento de la distancia entre el punto de máxima erosión y el extremo de la protección en su posición inicial, previa al desarrollo de las socavaciones (H , en la figura 7). Dicho análisis obedece al interés de descontar el ancho de la protección de los desplazamientos observados, definiendo para ello un sistema de referencia

móvil, cuyo origen en x coincide con el sistema de referencia fijo, pero el de y se sitúa a una distancia variable W , medida desde el extremo del estribo.

La distancia de la máxima profundidad de erosión sobre la protección resultó dependiente de la porción del ancho de brecha que se encuentra protegida. Cuando las relaciones de W/B fueron menores a 0.20, la distancia H se mantuvo prácticamente invariable y con valores próximos a cero. Ello se visualiza en la figura 9, donde la distancia adimensional H/B adquirió valores menores a 0.05 para dicho rango de W/B . Los valores resultantes estarían indicando que, para anchos de protección pequeños, en relación con la sección de escurrimiento, las máximas profundidades de erosión se ubican en las proximidades de la sección del estribo, con un comportamiento erosivo que puede aproximarse a la de la situación del estribo sin protección.

En aquellas situaciones donde el ancho protegido respecto del total de la brecha fue

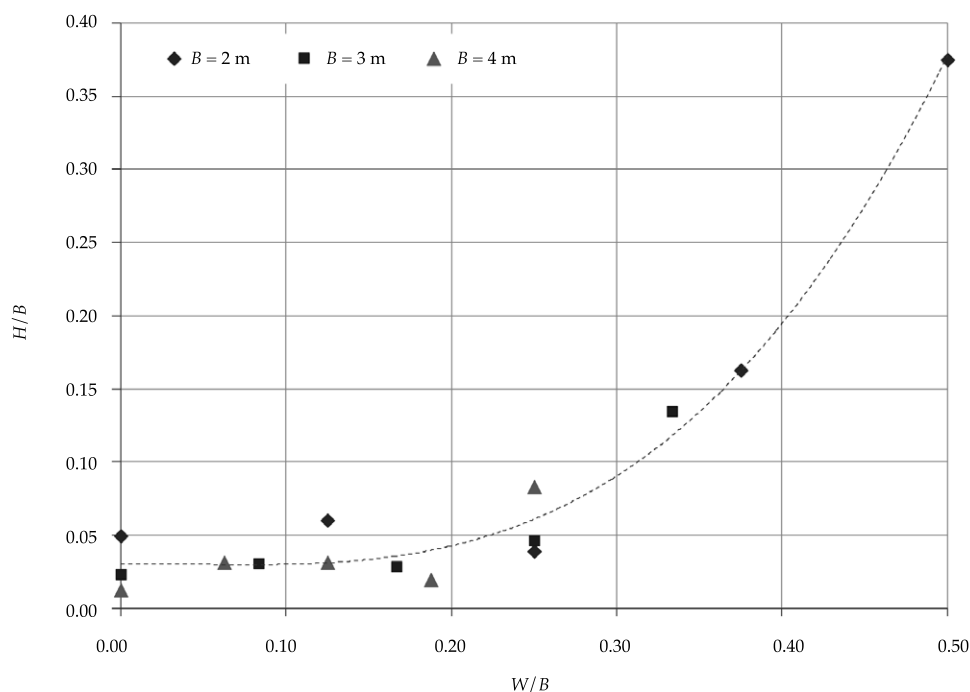


Figura 9. Variación de la distancia H , en función de la fracción del ancho de la brecha que se encuentra protegido.

significativo (valores grandes de W/B), la distancia H se incrementa de modo considerable. La figura 9 demuestra que cuando W/B fue mayor que 0.30, H se modifica de manera significativa ante pequeños incrementos de W/B , generando desplazamientos importantes de la máxima profundidad de erosión hacia aguas abajo.

Al observar el comportamiento de la distancia adimensional H/B , en función del ancho de la brecha, se puede apreciar cómo a medida que ésta es más ancha, esas distancias tienden a ser pequeñas y aproximadamente constantes, aun para el mayor valor de W . El efecto contrario se advierte cuando las secciones de escurrimiento disminuyen, observándose las mayores variaciones de H/B , lo que indica un distanciamiento de las máximas erosiones respecto del eje del estribo.

Geometría de la hoya de erosión y volumen erosionado

Los resultados obtenidos (figura 6) muestran que el distanciamiento de las máximas erosiones

respecto de la sección de emplazamiento del estribo fue acompañado por un incremento en las longitudes de las hoyas en el sentido principal del escurrimiento.

La típica forma cónica que adquieren las hoyas de erosión junto a un estribo no protegido se ve afectada al incorporar la protección. Este aspecto fue analizado por medio de la introducción del factor de forma F , el cual se determinó para cada uno de los experimentos como la relación entre el tamaño de los ejes longitudinal (a) y transversal (b) del área en planta de la hoya de erosión en estudio, esto es $F = a/b$ (figura 10). Con los valores calculados del coeficiente de forma se confeccionó la figura 10, en la cual en abscisas se presenta la relación W/B y en ordenadas la relación F/F_0 , donde F_0 corresponde a la geometría de la hoya del ensayo de referencia que sirvió para contraste en cada una de las series.

La figura 10 muestra cómo a medida que la protección se agranda en proporción al ancho total de la brecha, se incrementa la elongación de la zona erosionada, tendiendo a un valor

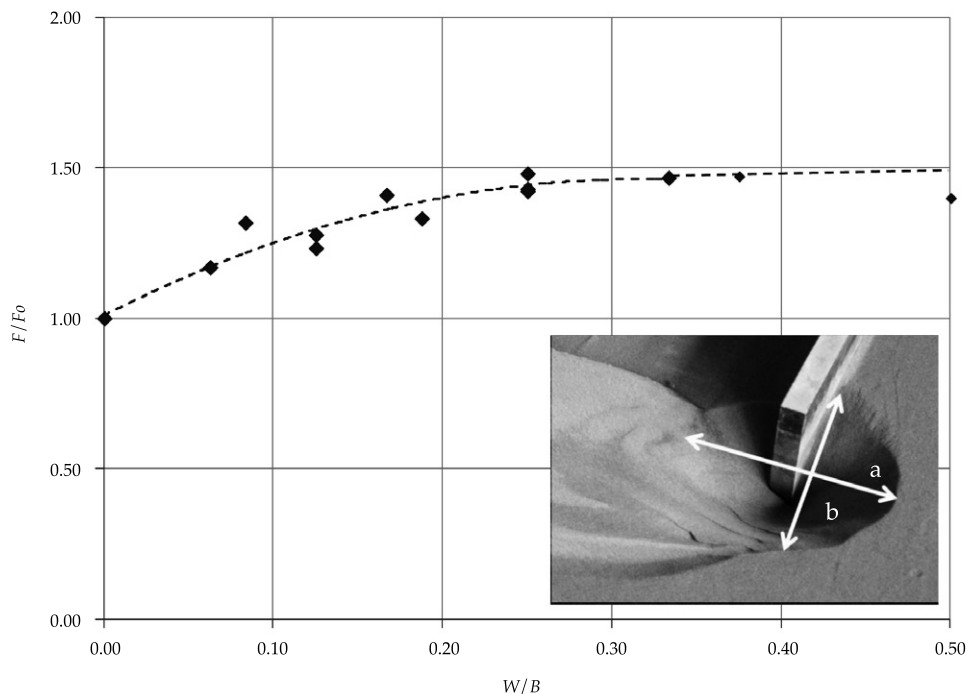


Figura 10. Variación del coeficiente de forma F , en función de la fracción del ancho de la brecha que se encuentra protegido.

próximo a 1.50 para las mayores relaciones de W/B .

En consecuencia, surge la interrogante de si esa mayor elongación de la hoja se debe a un incremento de su longitud, una reducción de su ancho o un efecto concurrente de ambos factores. Para este análisis se elaboró la figura 11, en donde se presentan los valores de los ejes longitudinales (a) y transversales (b) de las hojas de erosión adimensionalizados con el ancho de la brecha (B), en función de la relación W/B .

Las magnitudes que adquirieron los anchos adimensionales de las hojas de erosión (b/B) resultaron no tener variaciones significativas respecto de W/B , cuando B se mantuvo constante. Por el contrario, las longitudes adimensionales (a/B) se vieron afectadas por esta proporción. En efecto, de la observación de la figura 11 surge que para el rango de W/B ensayados en cada serie, los incrementos de las longitudes a/B de las hojas fueron mayores

del 85%, con un valor notablemente superior a los verificados en las hojas de referencia.

En resumen, si a medida que el ancho de la protección crece para un dado B , las máximas profundidades de erosión se mantienen, los anchos son semejantes y las extensiones de las hojas se incrementan; en tales circunstancias, los volúmenes erosionados deberían mostrar una tendencia creciente. Con ese fin fueron calculados los volúmenes removidos en cada una de las experiencias realizadas y representados en la figura 12, en función del ancho de la protección.

En dicha figura se observa cómo los datos se agrupan por series de ensayos, en función del ancho de brecha B , pero con una tendencia creciente en todos los casos. El hecho de que las máximas profundidades de erosión se comporten de acuerdo con lo señalado por Scacchi *et al.* (2005), esto es, con una tendencia creciente ante el aumento del ancho de la brecha B y que la longitud a de la hoja crezca

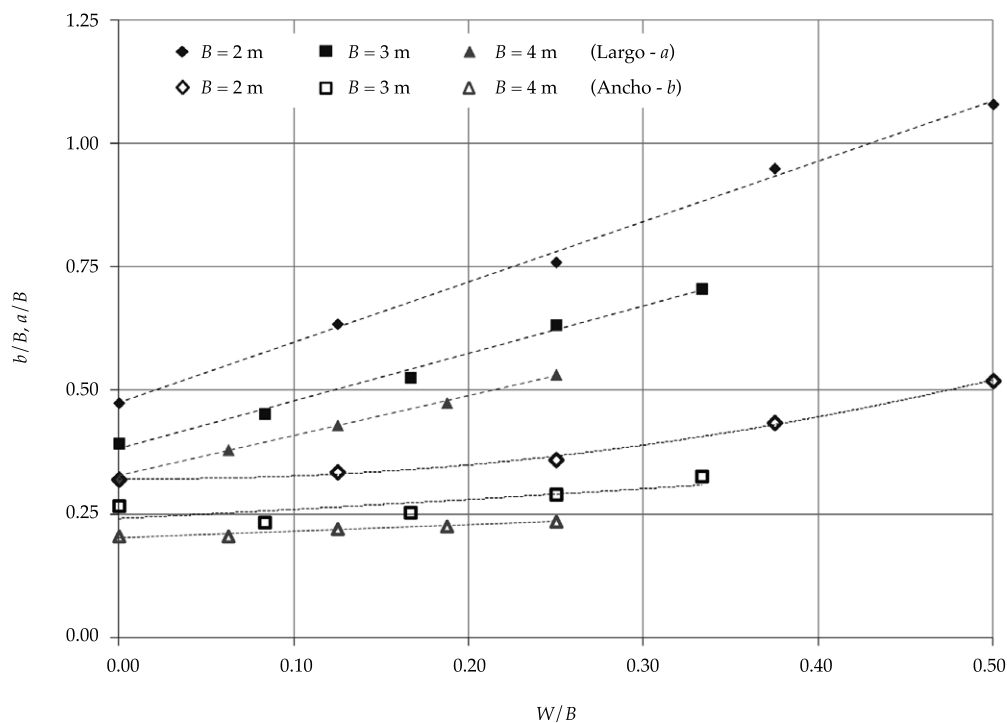


Figura 11. Variación del ancho y la longitud de la hoja de erosión en función de la fracción del ancho de la brecha que se encuentra protegido.

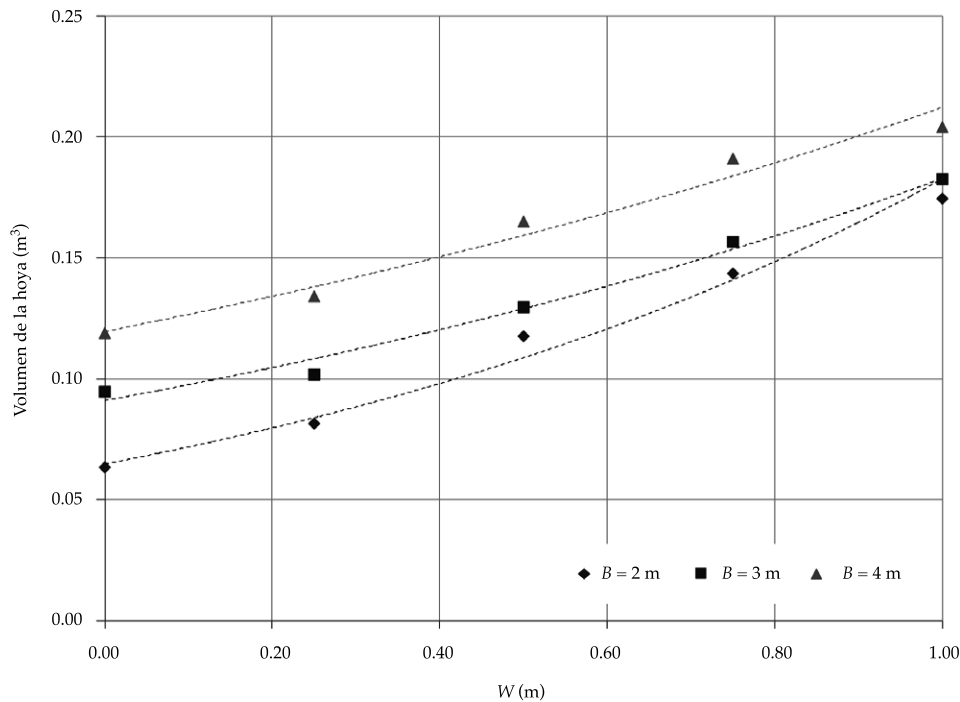


Figura 12. Variación del volumen de la hoya en función del ancho de la protección W para cada ancho de brecha ensayado.

en función del incremento de W para un dado valor de B , permite suponer una dependencia del volumen erosionado de los parámetros antes señalados: B y W .

Para contrastar la afirmación precedente se elaboró la figura 13, donde se presentan los volúmenes erosionados adimensionalizados con el parámetro B^3 , en función de la relación W/B .

La figura 13 muestra que existe una tendencia creciente del volumen adimensional de la hoya de erosión a medida que la protección abarca una fracción mayor del ancho de la brecha. Los resultados se agrupan por cada ancho de brecha, con una tasa de crecimiento diferente según sea el valor que adopte B . En efecto, para el mayor ancho de brecha, $B = 4$ m, el volumen erosionado resultó tener las menores variaciones con respecto a W , verificándose en dicha circunstancia un incremento máximo del volumen de sedimento removido del 50%, mientras que si se consideran los resultados correspondientes a la brecha de 2 m, dicha variación fue del orden del 200%.

La dependencia de las dimensiones en planta de la hoya con la relación W/B (figura 11) y la adecuada representación que de la máxima profundidad de erosión hace el número de Froude de la brecha (figura 5), permite suponer que el volumen erosionado debiera ser función de una determinada combinación de los parámetros que ajustan las tres dimensiones que conforman el volumen de la hoya de erosión, a , b y y_{EP} .

El ajuste de los datos disponibles permitió elaborar la figura 14, en donde se observa cómo el volumen erosionado adimensional responde en forma exponencial al $Fr_B (W/B)^{0.1}$.

Resulta importante mencionar que el ajuste encontrado en la figura 14 fue realizado considerando constante la longitud de la protección W_L ; por lo tanto, la incorporación de una longitud de protección variable podría modificar la relación funcional representada.

De este modo, las variables adimensionales referidas en la relación funcional (4) $Fr_B, W_L/B$ y W/B representan de forma adecuada el proceso erosivo asociado con la presencia de un estribo

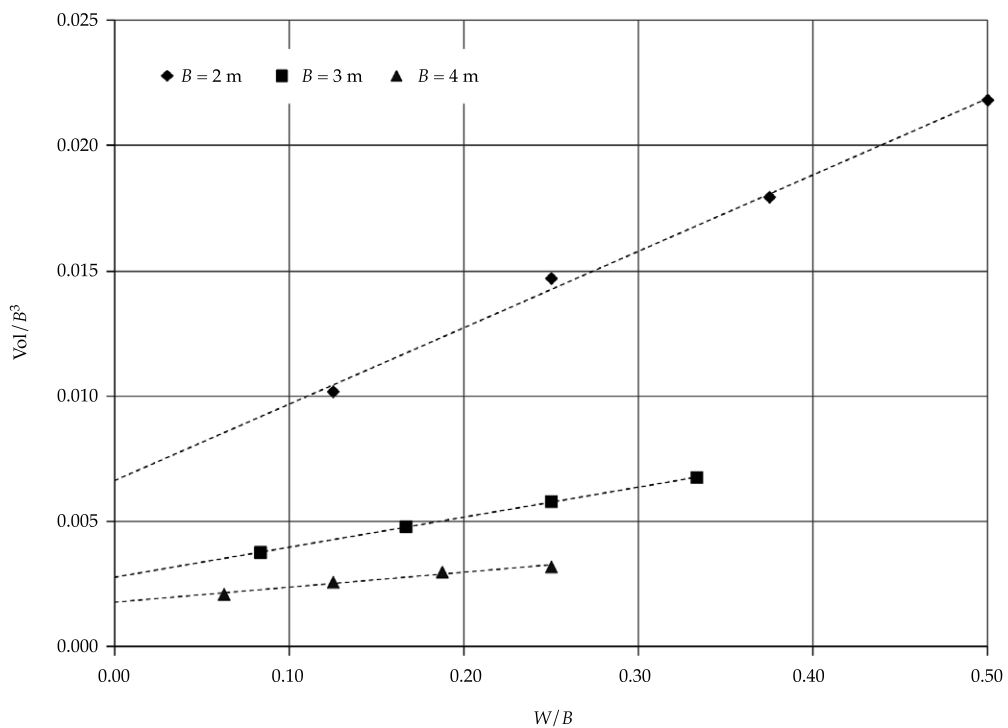


Figura 13. Variación del volumen de sedimento removido adimensional, en función de la fracción del ancho de la brecha que se encuentra protegido, W/B .

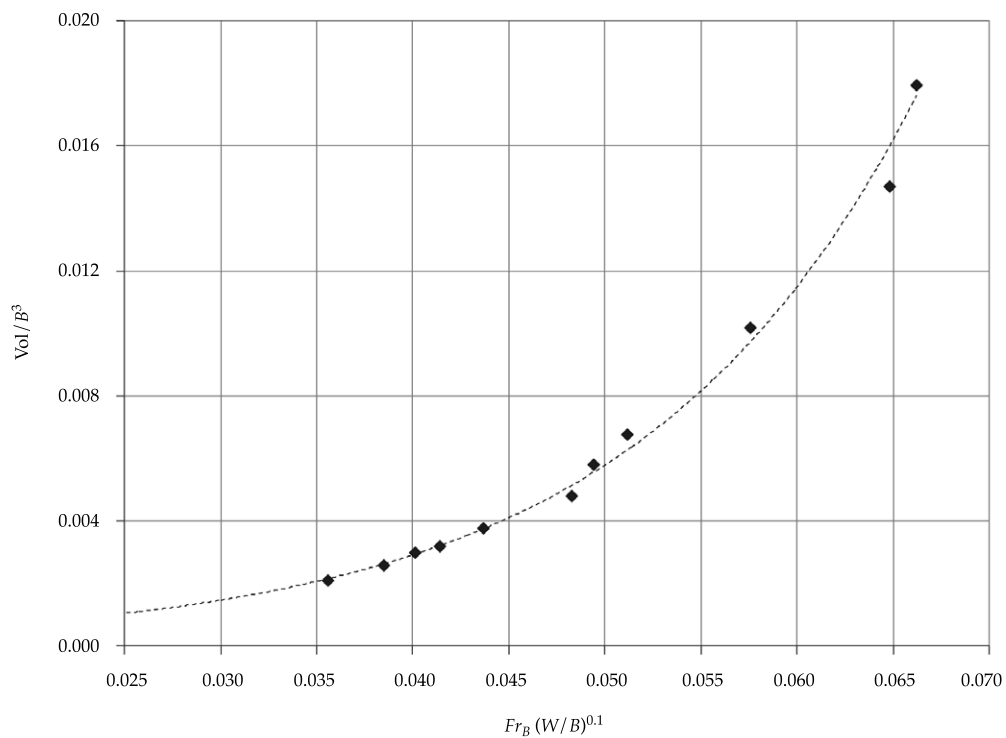


Figura 14. Variación del volumen adimensional erosionado Vol/B^3 como una función de las variables independientes Fr_B y W/B .

protegido, pero no en términos de su máxima profundidad sino del volumen erosionado.

En síntesis, en función del análisis realizado sobre las máximas profundidades de erosión observadas y la geometría, ubicación y volumen de la hoya de erosión resultante, se puede señalar que:

1. La máxima profundidad de la hoya de erosión no tuvo variación significativa cuando se consideraron distintos anchos de protección W , para un dado ancho de la brecha B .
2. El número de Froude de la brecha es un parámetro representativo del fenómeno, aun cuando se coloca una protección del lecho junto al estribo largo, por lo que se deduce que las máximas profundidades de erosión pueden ser estimadas correctamente por medio de expresiones como la sugerida por Scacchi *et al.* (2005) (figura 5).
3. La posición de la máxima profundidad de erosión está fuertemente gobernada por el ancho de la protección (figuras 6 a 9). Para valores de W/B menores a 0.20, las mismas se ubicaron en las inmediaciones de la sección de emplazamiento del estribo, mientras que para valores de W/B mayores a 0.20, las máximas profundidades se alejan de la traza del eje del estribo, desplazándose hacia aguas abajo.
4. Las hoyas de erosión aumentan su longitud en mayor medida que su ancho cuando se consideran protecciones más extensas, generando fosas más elongadas en relación con la situación de referencia, donde no estaba presente la protección (figuras 10 y 11).
5. Los volúmenes erosionados aumentan de manera exponencial, llegando a alcanzar incrementos que prácticamente triplicaron el volumen de la situación sin protección para un ancho de brecha $B = 2$ m, cuando se ensayó el mayor ancho de protección de esa serie, $W = 1.00$ m (figura 12).

6. El volumen erosionado adimensional responde incrementándose en forma exponencial a medida que $Fr_B W/B^{0.1}$ aumenta (figura 14). Se resalta que el ajuste encontrado fue realizado considerando constante la longitud de la protección W_L , por lo tanto la incorporación de una longitud de protección variable podría arrojar como resultado un nuevo ajuste a la relación funcional propuesta.

Conclusiones

- Los resultados alcanzados muestran que las profundidades máximas de erosión obtenidas para distintos anchos de protección fueron semejantes y muy próximas al valor testigo del ensayo $E_{R'}$ por lo que continúan dependiendo del ancho de puente considerado.
- En el 80% de los experimentos, la máxima profundidad se ubicó en las inmediaciones del eje del estribo. Sin embargo, el sector erosionado se desplazó de manera proporcional al ancho de la protección, desarrollándose en el extremo lateral de la misma y, en consecuencia, afectando zonas antes no comprometidas por los procesos erosivos.
- Cuando las protecciones de lecho estuvieron presentes junto al estribo, el número de Froude de la brecha continuó siendo un parámetro representativo del fenómeno. Este hecho sugiere que las máximas profundidades de erosión pueden ser estimadas correctamente por medio de expresiones como la sugerida por Scacchi *et al.* (2005).
- Cuando en los experimentos se consideraron protecciones más extensas, las hoyas de erosión aumentaron su longitud en mayor medida que su ancho, generando fosas más elongadas respecto de la relevada en la situación de referencia, esto es, cuando la protección no estaba presente.

- Los volúmenes erosionados aumentaron de manera exponencial cuando se consideraron anchos de protección mayores. La forma adimensional del volumen mostró un adecuado ajuste cuando se le vinculó con una combinación de las variables Fr_B y W/B . Se recuerda que el mismo fue realizado considerando constante la longitud de la protección W_L ; por lo tanto, la incorporación de una longitud de protección variable podría arrojar como resultado un nuevo ajuste de la relación funcional propuesta.
- En relación con la conclusión anterior, se puede señalar por último que las tres variables adimensionales referidas en la relación funcional (4) Fr_B , W_L/B y W/B representan de forma adecuada el proceso erosivo asociado a la presencia de un estribo largo protegido, pero no en términos de su máxima profundidad sino del volumen erosionado.

Es necesario remarcar que todo lo aquí señalado está restringido por el rango de los experimentos realizados. En este sentido, las conclusiones que aquí se presentan de ningún modo habilitan una extrapolación cuantitativa a prototipo alguno, ni constituyen una regla general de aplicación. Sí pretenden contribuir con la comprensión de los procesos físicos involucrados. En este sentido, los resultados encontrados en el marco del presente trabajo permiten recomendar que al momento del diseño ingenieril de puentes debería contemplarse que en situaciones de estribos protegidos se desarrollen hoyas de erosión que podrían condicionar el diseño de sus fundaciones y sus protecciones, no sólo del mismo estribo sino también de algunas de sus pilas y protecciones correspondientes. La continuidad de las investigaciones en este tema, actualmente en desarrollo, permitirán sugerir metodologías de cálculo que contemplen los procesos físicos mencionados para lograr diseños de fundaciones de puentes aliviadores

en valles de inundación de grandes ríos de llanura cada vez más confiables y económicos.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional del Litoral, que financió, por medio de los Cursos de Acción para la Investigación (CAI+D), el proyecto de Investigación en el marco del cual se desarrolló este trabajo.

A la empresa CORIPA S. A., por el suministro de las mantas de bloques de concreto confeccionadas especialmente para este dispositivo experimental.

Al Sr. Sebastián Schmidt, por su apoyo técnico en la puesta a punto de los experimentos.

Referencias

- Cardoso, A. H., & Fael, C. (2009). Protecting Vertical-Wall Abutments with Riprap Mattresses. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 135(6), 457-465.
- Melville, B. W., Van Ballegooy, S., Coleman, S. E., & Barkdoll, B. (2006a). Countermeasure Toe Protection at Spill-Through Abutments. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132(3), 235-245.
- Melville, B. W., Van Ballegooy, S., Coleman, S. E., & Barkdoll, B. (2006b). Scour Countermeasures for Wing-Wall Abutments. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132(6), 563-574.
- Morales, R., Ettema, R., & Barkdoll, B. (2008). Large-Scale Flume Tests of Riprap-Apron Performance at a Bridge Abutment on a Floodplain. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 134(6), 800-809.
- Reynares, M. L., Roca-Collell, M., Scacchi, G. B., & Schreider, M. I. (2005). *Incidencia de las protecciones de estribo en el desarrollo de la erosión local*. XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina.
- Reynares, M. L., Schreider, M. I., & Scacchi, G. B. (2010). Consideraciones en el diseño de protecciones flexibles en torno a un estribo. *Revista Ingeniería del Agua*, 17(2), 154-170.
- Pilarczyk, K. W. (1997). Simplified Unification of Stability Formulae for Revetment. Chapter 4. In C. R. Thorne, S. R. Abt, F. B. J. Barends, S. T. Maynard & K. W. Pilarczyk (Eds.). *River, Coastal and Shoreline Protection*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Scacchi, G. B., Schreider, M. I., & Fuentes, R. (July-September, 2005). Abutment Scout at the Relief Bridge Placed in a Flood Plain. *Hydraulic Engineering in Mexico*, 20(3), 43-59.
- Schreider, M. I., Zanardi, L., Scacchi, G. B., & Franco, F. R. (1998). Erosión por contracción y por estribo en puentes aliviadores en valle de inundación. *Revista Ingeniería del Agua*, 5(2), 23-34.

Dirección institucional de los autores

Marcela L. Reynares

Mario I. Schreider

Graciela B. Scacchi

Laboratorio de Hidráulica
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Universidad Nacional del Litoral
Bv. Pellegrini 2750, 3000 Santa Fe, ARGENTINA
Teléfono: +54 (342) 4571 110
reynares@fich1.unl.edu.ar
mschreider@gmail.com
gscacchi@fich1.unl.edu.ar