

EROSIÓN EN ESTRIBOS DE PUENTES ALIVIADORES Y SU INTERACCIÓN CON LA DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES

*Graciela Scacchi, *Mario Schreider y **Ramón Fuentes Aguilar

*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral – Santa Fe – Argentina. E-mail: gscacchi@fich1.unl.edu.ar
**Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia (IM2) – Santiago - Chile. E-mail: rfuen004@im2.codelco.cl

RESUMEN

En este trabajo se analizan, en forma experimental, los procesos erosivos que tienen lugar junto a estribos de puentes aliviadores, insertos en vías de comunicación que atraviesan planicies inundables, de características semejantes a las del río Paraná. Los antecedentes inmediatos del tema han sugerido que la presencia de tales erosiones origina una redistribución transversal del flujo en la sección de emplazamiento del puente. Ello ha dado lugar a la hipótesis central de la presente investigación, la cual postula que la redistribución de caudales interactúa con el desarrollo de la erosión local junto al estribo, proceso que se encuentra gobernado por las condiciones del escurrimiento en dicha zona, al inicio del proceso, y el ancho del puente involucrado.

El buen ajuste logrado por los datos experimentales a las relaciones funcionales propuestas ratifica las hipótesis de partida. Se ha demostrado con ello que las erosiones locales en estribos de puentes aliviadores dependen tanto de las condiciones iniciales del escurrimiento junto a él, como del proceso de redistribución de caudales durante su desarrollo. Este último fenómeno pudo ser evaluado adecuadamente a través de la incorporación del ancho del puente, variable que caracteriza al proceso en su conjunto como un típico fenómeno en planta.

ABSTRACT

This paper analyses, in an experimental way, the scour processes those take place close to the abutments of the relief bridges, placed in roads crossing flood plains, whose main characteristics are like to the ones of Paraná river valley. The immediate background on this subject have suggested that the presence of such scours produce a discharge redistribution across the section where the bridge is placed. This fact has been the basis of the main hypothesis of the present research, which proposes that the discharge redistribution interacts with the local abutment scour. This process would depend on the flow conditions in such area at the beginning of the process and the width of the bridge involved.

The good fitting achieved by experimental data to the functional relations proposed ratifies the starting hypothesis. It has been demonstrated that the local scours in relief bridges abutments depend on the initial flow conditions, velocity and depth adjacent to the abutment, as well as on the process of flow redistribution that take place according the scour hole is been developed. This last phenomenon was suitable evaluated by the incorporation of the bridge width, variable that characterizes the process, as a whole, as a typical plan phenomenon.

INTRODUCCIÓN

La información provista por la literatura especializada y la experiencia surgida del estudio de casos en la región del litoral fluvial argentino, permiten afirmar que los mayores daños en las estructuras de puentes, y aun su destrucción total o parcial, ocurren durante el pasaje de las crecidas de los ríos. En efecto, si bien existen varias razones que explican las fallas de los puentes, se reconoce a la erosión del lecho y márgenes del río como la causa primordial de la destrucción de obras de sobrepaso.

Si bien a nivel mundial se ha progresado mucho en el estudio de los mecanismos de erosión en puentes, la realidad marca que las obras aún hoy siguen fallando debido principalmente a los procesos erosivos. La situación se explica por una suma de factores: criterios inadecuados en el diseño, limitaciones del conocimiento y restricciones en la transferencia de los resultados de las investigaciones al campo de los ingenieros proyectistas.

En lo que hace a las limitaciones del conocimiento se han reconocido (Melville, 1995; Sheppard et al., 2000) las dificultades y riesgos que involucra la aplicación a situaciones de prototipo, de expresiones de cálculo desarrolladas en canales de laboratorio, en general de reducidas dimensiones. Este problema adquiere mayor relevancia a la hora de analizar los procesos erosivos en puentes emplazados en valles de inundación.

En efecto, el importante desarrollo vial en las planicies aluviales de grandes ríos de llanura, exige el adecuado dimensionamiento de estructuras de sobrepaso que reduzcan los efectos de obstrucción al libre escurrimiento de las aguas, producidos por el terraplén vial. En este caso se combina un flujo de aproximación, aguas arriba del puente, que tiene un ancho importante y tirante y velocidad relativamente bajos, con un escurrimiento fuertemente contraído caracterizado por estructuras del flujo tridimensionales muy marcadas en la sección de paso del puente.

Esta configuración plantea el predominio de las dimensiones en planta por sobre la vertical, lo que condiciona los desarrollos experimentales. De este modo los canales o cuencos de experimentación a emplear para estos fines deben contar con anchos importantes, del orden de magnitud de su longitud, como requisito indispensable para una adecuada representación de los fenómenos en estudio. Dispositivos de ensayos de estas características no resultan habituales en los laboratorios de hidráulica y ello puede explicar en parte el menor desarrollo que ha tenido este aspecto de las erosiones en puentes a lo largo de los años. El desconocimiento de la mecánica de los procesos y la falta de herramientas de cálculo apropiadas para este tipo de problemas no solo se traduce en riesgos potenciales de falla de los puentes aliviadores, sino que en oportunidades da lugar a la adopción de coeficientes de seguridad marcadamente altos, lo que se traduce en diseños costosos e ineficientes.

Las evidencias de campo recopiladas durante las crecidas extraordinarias del río Paraná en los años 1983 y 1992, sumadas a los estudios experimentales desarrollados en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional de Litoral, pusieron en evidencia que, en el caso de secciones de puentes emplazadas en valles de inundación con fuerte contracción del flujo de aproximación, se produce una redistribución transversal de caudales en la medida que se desarrollan los mecanismos de erosión local y por contracción.

Los trabajos de Schreider et al. (1996,1998, 2000) y Scacchi et al., (2002) evaluaron la interacción que existe entre el fenómeno de redistribución de caudal y la magnitud resultante de la erosión por contracción. En este trabajo se estudia el fenómeno desde la óptica de la erosión local junto al estribo, evaluando la influencia recíproca que existe entre las modificaciones que se producen en la hidráulica de la sección y la respuesta erosiva asociada a ella.

OBJETIVO

El objetivo general que persigue el desarrollo del presente trabajo consiste en analizar, en forma experimental, el fenómeno de erosión local junto a los estribos de puentes emplazados sobre planicies inundables, describiendo el modo en que los procesos de redistribución lateral de caudales, que tienen lugar en la sección a partir del desarrollo de la erosión misma, repercuten en los valores finales de las socavaciones esperables.

ENFOQUE METODOLÓGICO

Si se interpreta que el terraplén de aproximación a un puente aliviador en valle de inundación se configura como un estribo largo (Kandasamy, 1989) y se considera la interacción existente entre la erosión por contracción y por estribo en tales circunstancias (Schreider et al. 1998, 2000), la máxima profundidad de erosión en los mismos puede considerarse determinada por los siguientes grupos de variables (Fig. 1):

1. Variables que describen la sección de paso

- Ancho de la brecha: B

2. Variables que describen el estribo:

- Longitud: L
- Espesor E
- Angulo de ataque: θ
- Forma del estribo: K_s

3. Variables que describen el fluido

- Densidad: ρ
- Viscosidad cinemática: ν

4. Variables que describen el escurrimiento en la sección de la brecha (situación inicial)

- Profundidad: h
- Velocidad del flujo: U
- Aceleración de la gravedad: g

5. Parámetros que describen el material del lecho

- Diámetro característico: d_s
- Densidad: ρ_s
- Desvío standard: σ_g

6. Tiempo: t

Un aspecto a señalar es la definición espacial de las variables del escurrimiento. En general los autores que han trabajado estas temáticas ubican a las mismas en una sección de aproximación aguas arriba del puente. Si bien ello, desde el punto de vista experimental, no involucra demasiadas complicaciones, el análisis de situaciones reales con múltiples puentes aliviadores ha puesto de manifiesto que, a igualdad de las condiciones del flujo de aproximación, las erosiones resultantes fueron significativamente diferentes en virtud de las condiciones locales imperantes junto al estribo. Ello justifica la consideración de los grupos de variables 1 y 4 en la sección del puente y no aguas arriba.

De este modo la profundidad de erosión local se puede expresar mediante una relación

funcional del tipo:

$$y_e = f_1(B, L, E, \theta, K_s, \rho, \nu, h, U, g, d_s, \rho_s, \sigma_g, t) \quad [1]$$

Si se aplica análisis dimensional al grupo de variables constitutivas de la relación funcional [1], estableciendo como variables de repetición B, ρ, U se obtiene la siguiente expresión adimensional:

$$\frac{y_e}{B} = f_2 \left(\frac{L}{B}, \frac{E}{B}, \theta, K_s, \frac{U \cdot B}{\nu}, \frac{h}{B}, \frac{U^2}{g \cdot B}, \frac{d_s}{B}, \frac{\rho_s}{\rho}, \sigma_g, \frac{U \cdot t}{B} \right) \quad [2]$$

$\uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow$
 (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11)

El elevado número de grupos adimensionales en [2] impone la necesidad de eliminar algunos de ellos de modo tal de simplificar el problema y facilitar la verificación experimental. En función de ello se ha decidido no contemplar en este análisis experimental la influencia de los grupos (1), (2), (3), (4), (5), (8), (9), (10) y (11).

Las razones para no considerar estos grupos adimensionales se pueden sintetizar en las siguientes:

- (1) L/B : para el caso de estribos largos (objeto de interés de este estudio) se ha demostrado que la erosión local es independiente de la longitud (L) de los mismos.
- (2) 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 este.
- (3) θ : el ángulo de ataque del escurrimiento se mantuvo constante durante todo el desarrollo de la experimentación.
- (4) K_s : la forma del estribo no se modificó.
- (5) $U \cdot B / \nu$: se considera que es escasa la influencia de los efectos viscosos en los fenómenos de erosión local.
- (8) d_s/B : se ha demostrado la baja incidencia de este parámetro cuando su tamaño es despreciable en relación al obstáculo (Melville y Coleman, 2000). Además para la totalidad de los ensayos realizados este parámetro resulta una constante.
- (9) ρ_s / ρ : la relación de densidades se mantuvo constante para todos los ensayos y es la misma en laboratorio y en prototipo (arena /agua).
- (10) σ_g : el sedimento empleado para la realización de los ensayos fue arena uniforme.
- (11) $U \cdot t / B$: el análisis a desarrollar solo considera las profundidades de erosión correspondiente a situaciones finales de equilibrio, por lo que el tiempo no resulta una variable relevante.

De este modo la expresión [2] se reduce a:

$$\frac{y_e}{B} = f_3 \left(\frac{h}{B}, \frac{U^2}{g \cdot B} \right) \quad [3]$$

Donde “ y_e ” es la máxima profundidad de erosión local en el estribo (Fig. 1).

La incorporación del ancho de brecha “B” como longitud de referencia se ha hecho sobre la hipótesis de la importancia del proceso erosivo como fenómeno en planta. Surge de este modo una forma del número de Froude, en donde el tamaño del sistema está representado por la dimensión horizontal (número de Froude de la brecha).

Por otro lado se propone incorporar en el estudio de la erosión local en estribos de puentes aliviadores la variación que sufre la distribución de caudales en la sección del puente, producto del mismo desarrollo de la fosa de socavación local, la que de acuerdo a las evidencias experimentales anteriores presenta una dependencia del tipo:

$$\frac{Q_{hf}}{Q_{hi}} = f_4(y_e, B, h) \tag{4}$$

Esto es, en forma adimensional:

$$\frac{Q_{hf}}{Q_{hi}} = f_5\left(\frac{y_e}{B}, \frac{h}{B}\right) \tag{5}$$

donde:

Q_{hf} : caudal que escurre en el sector de la sección transversal correspondiente al ancho de la hoya de erosión, al final del proceso erosivo, (A_f , Fig. 1).

Q_{hi} : caudal que escurre en el sector de la sección transversal correspondiente al ancho de la hoya de erosión, al comienzo del proceso erosivo, (A_i , Fig. 1).

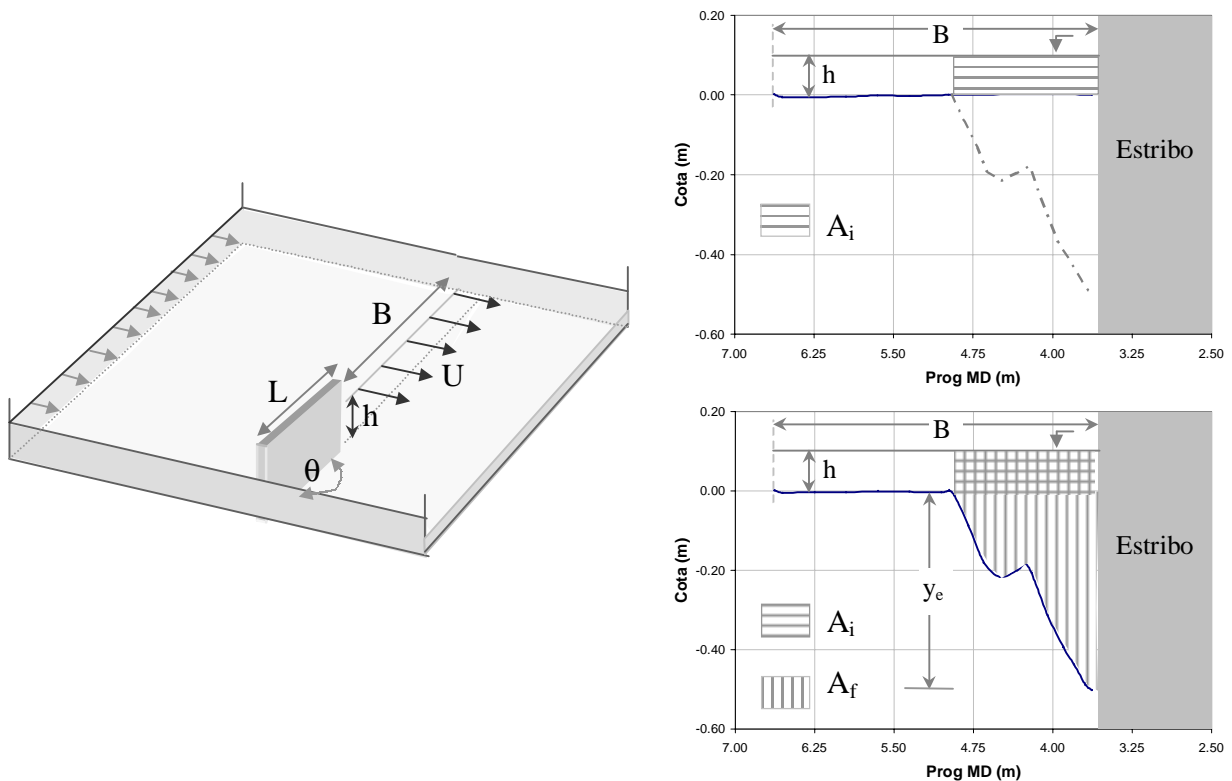


Figura 1: definición de las principales variables geométricas e hidráulicas

El enfoque metodológico planteado en este estudio condujo a la realización de una secuencia experimental que tuvo por finalidad sustentar la elección de las variables geométricas e hidráulicas que gobiernan el fenómeno de erosión en estribos y ajustar las relaciones funcionales propuestas

De la comparación de las expresiones [3] y [5] se advierte una dependencia recíproca o retroalimentación entre los parámetros representativos del escurrimiento y la socavación resultante. El análisis de los resultados arrojados por las experiencias de laboratorio permitirán encontrar el modo y la secuencia en que estas expresiones deben relacionarse para que, como producto final, se obtenga una profundidad de erosión local mediante una expresión de cálculo que valore, de una manera indirecta, el efecto que sobre la socavación final resultante habrá de tener la incorporación extra de caudal en la zona de influencia del estribo, acorde se desarrolla el proceso erosivo.

DISEÑO EXPERIMENTAL – DISPOSITIVOS DE ENSAYOS

En función de los objetivos planteados en este estudio las experiencias de laboratorio debieron reproducir la particular configuración del flujo en el entorno de un puente aliviador, el cual forma parte de un terraplén vial interpuesto en una planicie inundable. Se consideró para ello indispensable el empleo de un canal de experimentación de grandes dimensiones, (Fig. 2), en cual se pudieran representar las características principales del escurrimiento en valle de inundación, con importantes frentes de avance y tirantes y velocidades pequeñas.

El canal utilizado para los ensayos pertenece a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas y se encuentra ubicado en la nave principal de su Laboratorio de Hidráulica. Tiene una longitud de 19 m, un ancho total de 10,20 m y permite ensayar tirantes del escurrimiento no perturbado de hasta aproximadamente 0,15 m. (Fig. 2-a).

El cuenco se implementó de modo tal que posee un sector inicial a fondo fijo de 4,15 m de desarrollo. A partir de allí se ubica un lecho de arena uniforme que tiene una longitud de 9,63 m, un espesor de 0,60 m y un desarrollo transversal coincidente con el del cuenco. La parte final está conformada por otro sector de lecho rígido con iguales características que el de ingreso, y una extensión de 5.2 m (Fig. 2-b).

Con el fin que tanto el trecho de entrada como el de salida posean una superficie de igual rugosidad que la correspondiente al fondo erosionable, en situación de iniciación de movimiento, se adhirió a la carpeta de cemento una película de la misma arena utilizada para el relleno del sector erosionable, fijada mediante adhesivo sintético resistente al agua.

A 10 metros de la sección de entrada, en el recinto con fondo móvil, se materializó un cierre parcial de 3,63 metros de longitud, mediante una pared de mampostería de 0,12 m de espesor, quedando definido de este modo un estribo prismático de pared vertical. Su origen se ubicó en la margen derecha del cuenco (Fig. 2). La longitud del estribo en combinación con los tirantes circunstantes aseguraron relaciones de " L/h " > 25 , típicas de estribos largos.

Mediante un muro metálico longitudinal móvil, paralelo a las paredes del cuenco, se representaron distintos anchos de brechas, manteniendo la longitud del estribo invariable, (Fig. 2-c).

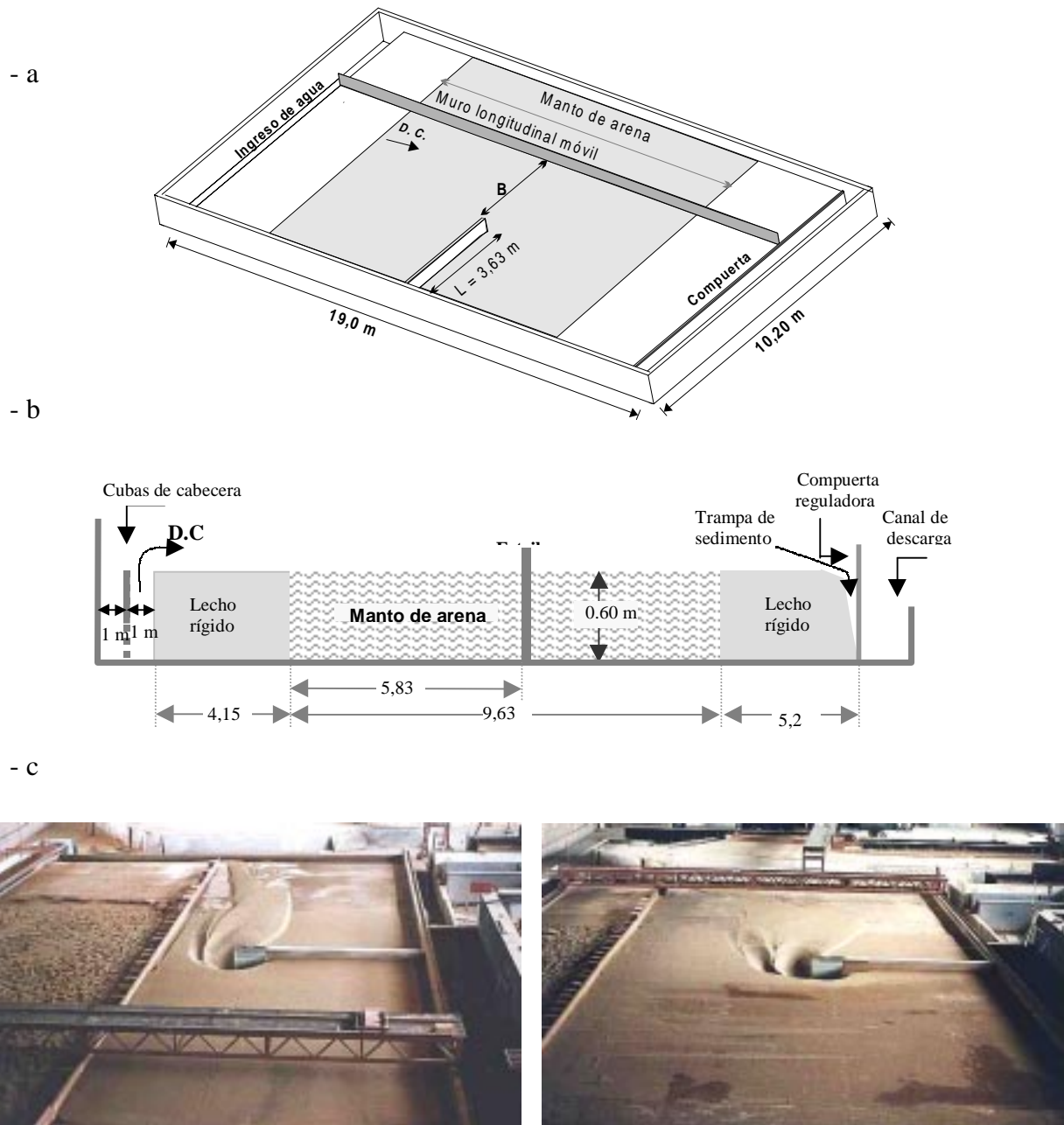


Figura 2: Croquis, corte longitudinal y vista general del cuenco de experimentación

Las secuencia de ensayos diseñada contempló la realización de cinco series de experiencias, cada una de ellas identificada por tener un único valor de caudal específico inicial “ q ” y tirantes aproximadamente constantes (ambos en la sección estrechada), de modo tal que las erosiones finales resultantes sean comparables. Cada “ q ” fue ensayado con cinco amplitudes de brechas “ B ” cubriendo un rango de variación para este parámetro de aproximadamente 300%. Se buscó así identificar como influye el ancho de la sección en el proceso de redistribución de caudales que se verifica en la misma, y como ello a su vez repercute en el desarrollo de la erosión junto al estribo.

En la Tabla 1 se resumen los principales parámetros que definieron a cada una de las experiencias realizadas.

Tabla 1: Parámetros característicos de los ensayos realizados. Sección de la Brecha.

Serie	Ensayo	B (m)	Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	h (m)	y _e (m)
I	I ₁	1,5	0,54111	0,02861	0,0960	0,237
	I ₂	2,0	0,05830	0,02915	0,0986	0,250
	I ₃	3,0	0,08640	0,02880	0,1000	0,260
	I ₄	3,5	0,10208	0,02917	0,1035	0,272
	I ₅	4,0	0,11535	0,02884	0,1050	0,275
	I ₆	5,0	0,16225	0,03245	0,1130	0,310
II	II ₁	2,0	0,07354	0,03677	0,1050	0,317
	II ₂	3,0	0,10638	0,03546	0,1065	0,330
	II ₃	3,5	0,12235	0,03496	0,1090	0,338
	II ₄	4,0	0,14295	0,03574	0,1120	0,348
	II ₅	5,0	0,19565	0,03913	0,1200	0,373
III	III ₁	1,5	0,06574	0,04383	0,1070	0,316
	III ₂	2,0	0,08594	0,04297	0,1095	0,356
	III ₃	3,0	0,13320	0,04440	0,1130	0,394
	III ₄	3,5	0,15768	0,04505	0,1160	0,425
	III ₅	4,0	0,18523	0,04631	0,1210	0,440
IV	IV ₁	1,5	0,08075	0,05352	0,1150	0,364
	IV ₂	2,0	0,10163	0,05082	0,1160	0,395
	IV ₃	3,0	0,15780	0,05260	0,1180	0,448
	IV ₄	3,5	0,17787	0,05082	0,1220	0,458
V	V ₁	1,5	0,09011	0,06007	0,1215	0,403
	V ₂	2,0	0,11850	0,05925	0,1230	0,439
	V ₃	3,0	0,18100	0,06033	0,1248	0,502

Cada una de las configuraciones del cuenco, asociada a un caudal específico determinado, se ensayó en forma desdoblada en las dos condiciones siguientes:

- 1) Ensayos con fondo fijo: Esta etapa tuvo por finalidad registrar detalladamente los parámetros característicos del flujo, previos al desarrollo de la socavación, tarea imposible de realizar en un lecho erosionable debido a la rápida evolución que presenta la erosión al inicio del proceso. Para el cumplimiento de esta tarea el cuenco de experimentación presentó un fondo homogéneo en toda su longitud, materializado por una carpeta de cemento, sobre cuya superficie se pegó una capa con el mismo sedimento utilizado para los ensayos con lecho móvil.

En cada ensayo se determinaron:

- Distribuciones de caudales en una sección representativa del flujo de aproximación.
- Distribuciones de caudales en la sección de la brecha.
- Perfiles longitudinales del pelo de agua.
- Niveles del agua en las inmediaciones del estribo.

- 2) Ensayos con fondo móvil: en esta etapa se permitió que se desarrollara la fosa de socavación local y luego se midieron los parámetros representativos del escurrimiento en la

sección erosionada. Los ensayos repitieron las mismas combinaciones de anchos de brecha – caudales específicos que en la etapa anterior.

Desde el punto de vista del aporte de material del lecho a la zona de estudio todas las experiencias reprodujeron condiciones de agua clara, y la duración de las mismas fue de 24 hs., tiempo para el cual se ha demostrado que el proceso de erosión local ha alcanzado un desarrollo cercano al 80 % (Kwan, 1988; Kouchakzadeh y Townsend, 1997; Schreider et al., 1998).

En cada una de los ensayos se registraron:

- Perfiles de velocidades en la sección de la brecha: Estas se tomaron en verticales cuyo número y espaciamiento fueron función del ancho de la brecha y tamaño de la hoya de erosión local junto al estribo.
- Batimetría del lecho: una vez finalizado el ensayo, con el cuenco sin agua, se realizó un pormenorizado relevamiento del fondo en la zona del estribo

La medición de los niveles líquidos y del fondo se realizaron mediante limnímetros provistos de punta y vernier. La determinación de las velocidades del escurrimiento se efectuaron con un Velocímetro Acústico Doppler (ADV).

RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis de los resultados verificó la existencia de un fenómeno de redistribución transversal del flujo en la sección de la brecha con el desarrollo de la fosa de erosión local. Se ha encontrado que las derivaciones de caudal al sector comprometido por la erosión en estribo fueron mayores en la medida que se consideraron valores de “ B ” más grandes, ante las mismas condiciones iniciales del escurrimiento, esto es “ q ” y “ h ”.

Se ha ratificado el concepto fundamental planteado en relación a la dependencia que existe entre la redistribución de caudales verificada en la sección y el desarrollo mismo de las erosiones locales, representado por la relación funcional [5]. Este hecho se ha puesto en evidencia en la figura 3, en la que se han representado las variaciones que ha sufrido el porcentaje de caudal en la zona ocupada por la socavación junto al estribo, respecto del inicial en dicha zona, en función de la máxima profundidad de erosión medida, adimensionalizada con el ancho de la brecha “ y_e / B ”. La agrupación de los puntos entorno a una tendencia definida demuestran lo dicho.

Un análisis de las condiciones extremas que surgen de la figura 3 indica una buena tendencia de la misma para valores grandes del parámetro “ y_e / B ”. En efecto, cuando el ancho de la brecha tiende al ancho de la hoya de erosión, el incremento de caudal debiera tender a cero, ya que no hay posibilidad de redistribución de caudales en la sección. En el otro extremo para valores de “ y_e / B ” pequeños, los que se corresponden con anchos de sección importantes, la curva muestra una tendencia creciente, siendo apenas perceptible un cambio de tendencia para los tres experimentos en los que se combinaron las brechas más amplias con las menores profundidades de erosión, (Fig. 3). Se debe señalar aquí la necesidad de desarrollar ensayos adicionales con anchos mayores a los contemplados en el presente estudio, con el propósito de encontrar un ancho límite “ $B_{límite}$ ” superado el cual ya no se produzcan incrementos significativos del caudal aportado a la hoya, bajo las mismas condiciones iniciales del flujo.

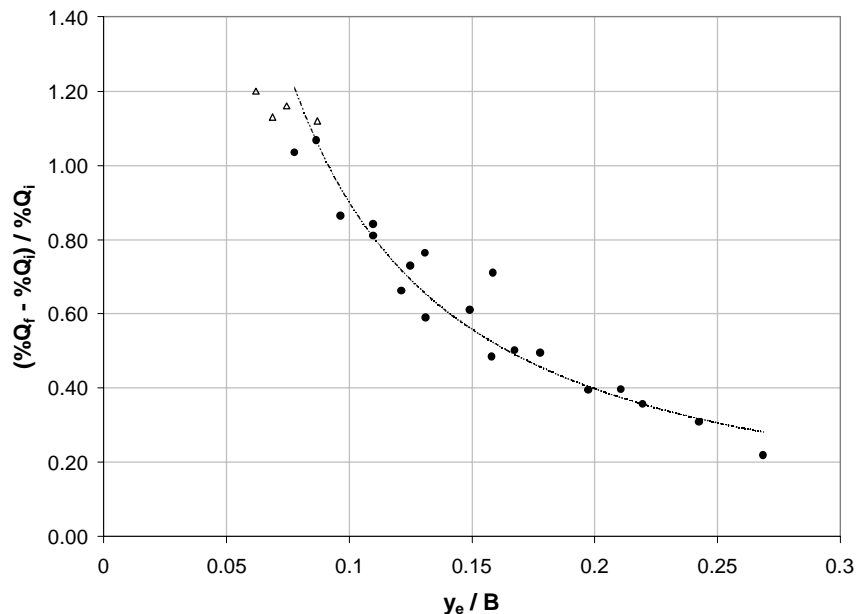


Figura 3.- Relación entre la variación del caudal que escurre en la zona de erosión local y la máxima profundidad relevada

Los resultados experimentales permitieron verificar parcialmente la relación funcional [3], lo cual pone de manifiesto la necesidad de incorporar en el análisis a la geometría de la brecha. La figura 4 muestra la expresión que vincula la máxima profundidad de erosión en el estribo, adimensionalizada con el ancho de la sección, con el número de Froude de la brecha. El buen ajuste de los datos valida el enfoque metodológico que sustenta la presente investigación. La ecuación de mejor ajuste tuvo la siguiente forma:

$$\frac{y_e}{B} = 2.3057 \left(\frac{U}{\sqrt{g B}} \right) - 0.0315 \tag{6}$$

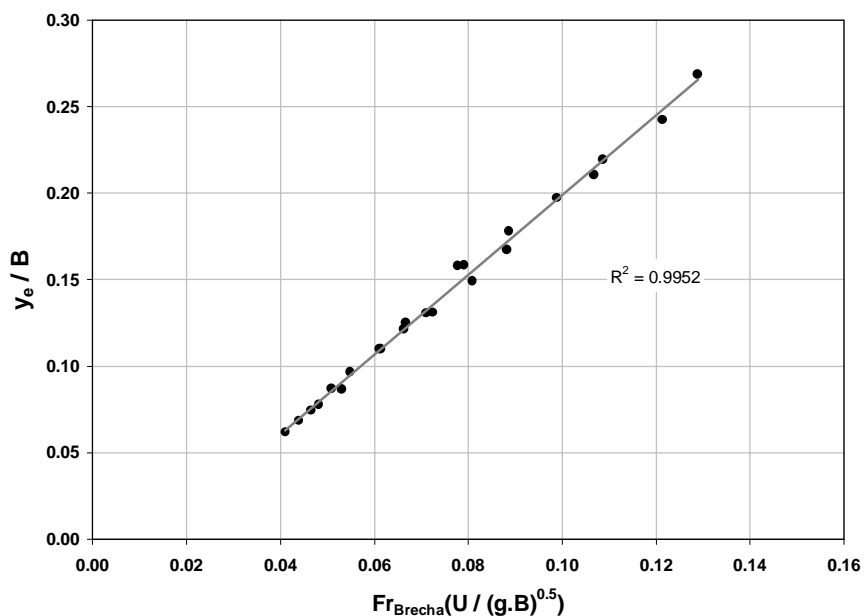


Figura 4.- Máxima profundidad de erosión en función del número de Froude de la brecha.

La no consideración del grupo adimensional que representa al tirante en las expresiones finales resultantes del ajuste experimental obtenido [6], obedece a las pequeñas variaciones que este parámetro tuvo para los distintos ensayos considerados. Si bien Scacchi et al. (2002) demostró que para el caso de estribos intermedios la influencia de este parámetro en el proceso de redistribución de caudales era de menor importancia que el efecto de la geometría de la hoya, se considera que la generalización de una expresión de cálculo de erosión en estribos de puentes aliviadores, que no incluya el tirante como variable representativa del fenómeno, requiere de experimentación adicional que involucre una variación significativa de este parámetro en relación a diferentes anchos de brechas, típicos de este tipo de puentes.

Se concluye así que, para el rango de las variables consideradas en el presente estudio, las erosiones junto al estribo responden en forma directa a las condiciones iniciales del flujo en las inmediaciones del mismo, específicamente a la velocidad de la corriente, y al ancho de la brecha. Esta última variable representa el fenómeno de incorporación de caudal a la hoya, el cual en conjunto con la profundidad de erosión, retroalimenta el proceso de redistribución de caudales.

CONCLUSIONES

Más allá del muy buen ajuste obtenido a partir de los resultados experimentales, el elemento central que surge como resultado de este estudio, es el reordenamiento de las variables involucradas. En efecto, la incorporación del ancho como variable representativa del proceso de transferencia lateral de caudales, redefine la aplicación de las ecuaciones de estribo largo a situaciones de puentes en valles de inundación. Las restricciones experimentales que inevitablemente debe afrontar todo trabajo de laboratorio, no habilita a la ecuación [6] como una expresión de cálculo de aplicación generalizada, pero sí brinda una relación funcional que, más allá de su posible perfeccionamiento, puede ser considerada hoy un avance en la descripción del fenómeno de erosión local en estribos de puentes aliviadores.

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

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f :	Área del sector de la sección transversal correspondiente al ancho de la hoya de erosión, al final del proceso erosivo.
A_i :	Área del sector de la sección transversal correspondiente al ancho de la hoya de erosión, al inicio del proceso erosivo.
B :	Ancho de la brecha.
d_s :	Diámetro medio del material del lecho.
E :	Espesor del estribo (dimensión en el sentido de la corriente).
Fr_{Brecha} :	Número de Froude de la brecha ($Fr_{Brecha} = U / (g B)^{0,5}$).
g :	Aceleración de la gravedad.
h :	Profundidad del escurrimiento en la sección de la brecha
K_S :	Factor de corrección que tiene en cuenta la forma del estribo.
L :	Longitud del estribo.
Q :	Caudal total.

q:	Caudal unitario en la sección de la brecha
Q _f :	Caudal total que escurre, al final del proceso erosivo, por el sector afectado por la hoya de erosión local.
Q _i :	Caudal total que escurre, al inicio del proceso erosivo, por el sector afectado por la hoya de erosión local.
t:	Tiempo.
U:	Velocidad media del flujo normal a la sección de la brecha.
y _e :	Erosión local junto al estribo.
γ _s :	Peso específico del material del lecho.
v:	Viscosidad cinemática del agua.
θ:	Ángulo de inclinación del flujo principal respecto de la alineación del estribo.
ρ:	Densidad del fluido.
ρ _s :	Densidad del sedimento.
σ _g :	Desvío geométrico de la granulometría del material del lecho.
τ _c :	Tensión de corte crítica del material del lecho.
% Q _i :	Porcentaje de caudal que escurre por el sector ocupado por la hoya de erosión local, al inicio del proceso erosivo.
% Q _f :	Porcentaje de caudal que escurre por el sector ocupado por la hoya de erosión local, al final del proceso erosivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Kandasamy, J. K.** (1989) "Abutments scour." Report N° 458, School of Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 278 p. s, Inc., New York, U.S.A.
- Kouchakzadeh, S. y Townsend, R.D.** (1997) "Maximum scour depth at bridge abutments terminating in the flood plain zone". Canadian Journal of Civil Engineering. 24. pp. 996 – 1006.
- Kwan, T. F.** (1988) "A study of abutment scour." Report N° 451, School of Engineering. The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 461 p.
- Melville, B.W.** (1995) "Bridge abutment scour in compound channels." Journal of Hydraulic Engineering, A.S.C.E., 121 (12). pp. 863 – 868.
- Melville, B.W. y Coleman, S.E.** (2000) "Bridge Scour." Water Resources Publications, LLC.
- Scacchi, G.; Martín Vide, J.P. y Schreider, M.** (2002) "Flow depth effect on the discharge distribution at bridge sites." Proceedings of the International Conference on Fluvial hydraulics, River Flow 2002. Vol. 2, pp. 1047 – 1052.
- Schreider, M.; Zanardi, L.; Scacchi, G.; Franco, F.** (1998) "Erosión por contracción y por estribo en puentes aliviadores en valle de inundación." Revista Ingeniería del agua. Vol. 5 . N° 2. Madrid, España, pp. 23 – 34.
- Schreider, M.; Scacchi, G.; Franco, F. y Romano, C.** (2000) "Incidencia del ancho del puente en la interacción entre la erosión por contracción y por estribo." Anales del XIX

Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Vol. I. Córdoba, Argentina, pp. 359 – 368.

Sheppard, M.; Pritsivelis, A. y Glasser, T. (2000) “Method for obtaining prototype local scour depths from physical model test.” Proceedings of the Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management. ASCE, Minneapolis.(C.D.)