

Erosión en estribos de puentes aliviadores ubicados en valles de inundación

Graciela Scacchi
Mario Schreider

Universidad Nacional del Litoral, Argentina

Ramón Fuentes

Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, Chile

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, en Argentina. 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, influyéndose recíprocamente. 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 el proceso en su conjunto como un típico fenómeno en planta.

Palabras clave: erosión, estribo, puente aliviador, valle de inundación, redistribución de caudales.

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 la temporada de las crecidas de los ríos. Si bien en el mundo se ha progresado mucho en el estudio de los mecanismos de erosión en puentes, la realidad muestra que las obras aún hoy siguen fallando, debido principalmente a los procesos erosivos.

En lo que se refiere a las limitaciones del conocimiento, se han reconocido 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 como consecuencia de la configuración particular del escurrimiento en tales circunstancias. En este caso se combinan un flujo de aproximación, aguas arriba del puente, que tiene un ancho importante y tirantes y velocidades relativamente bajos, con un escurrimiento fuertemente contraído, caracterizado por estructuras del flujo tridimensionales muy marcadas en la sección de paso del puente.

Esta situación plantea el predominio de las dimensiones en planta por sobre la vertical, hecho que debe ser considerado a la hora de estudiar los diferentes tipos

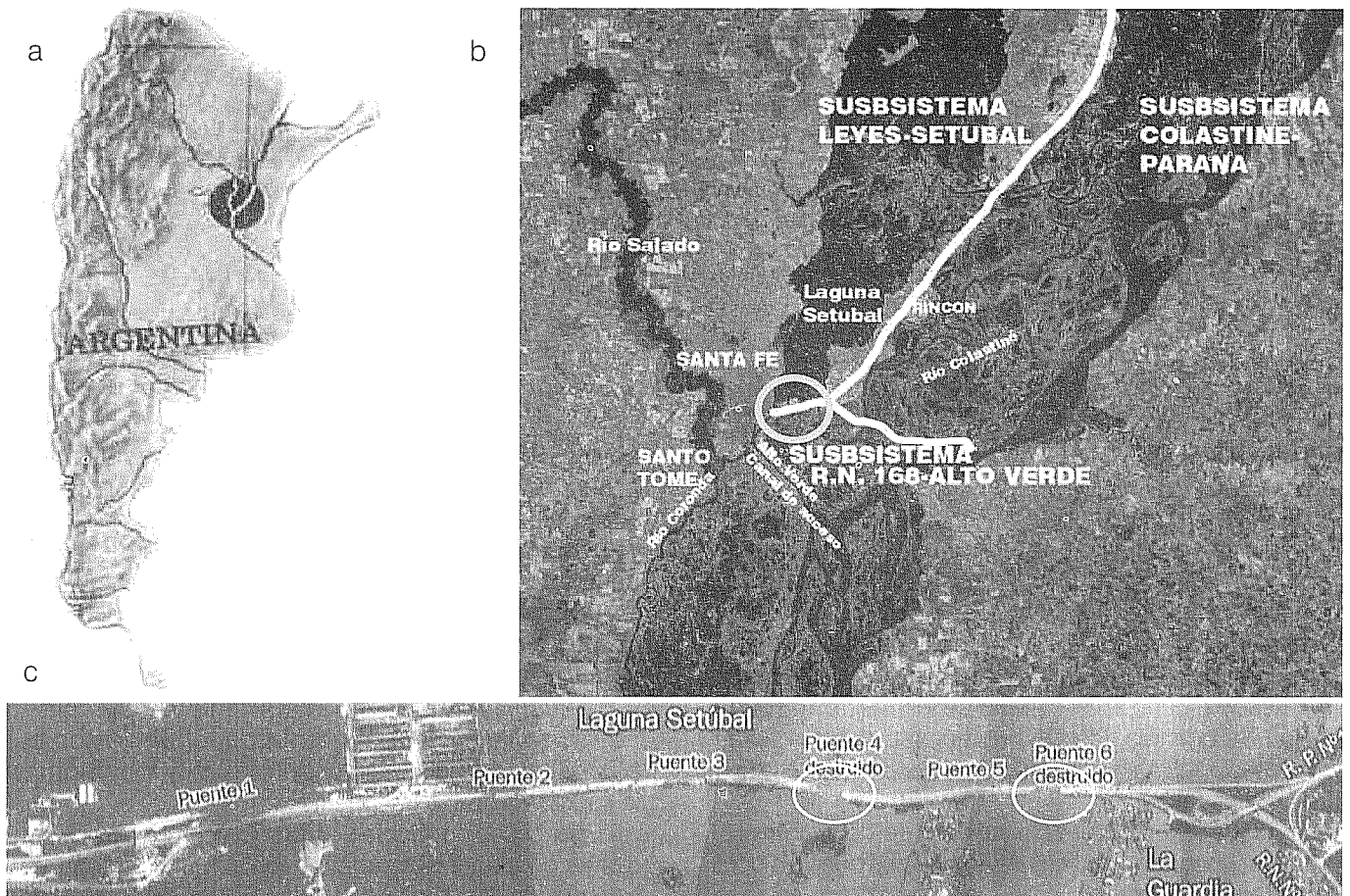
de erosión involucrados, condicionando así el diseño de los desarrollos experimentales. De este modo, los canales o cuencos de experimentación que se emplean para tales fines deben contar con anchos importantes, aproximadamente iguales a su longitud, como requisito indispensable para una adecuada representación de los fenómenos en estudio. Dispositivos experimentales con estas características no son comunes en los laboratorios de hidráulica, lo que 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 sólo se traduce en riesgos potenciales de falla de los puentes aliviadores, sino además 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, Argentina, en los

años 1983 y 1992 (ilustración 1), sumadas a los estudios experimentales desarrollados en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, Argentina, fueron muestra de que, en el caso de secciones de puentes emplazados en valles de inundación con fuerte contracción del flujo de aproximación, se produce una redistribución transversal de caudales conforme se van desarrollando los mecanismos de erosión local y por contracción.

Los trabajos de Schreider *et al.* (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, considerando la influencia recíproca que existe entre las modificaciones que se producen en la hidráulica de la sección y la respuesta erosiva asociada con ella. El estudio se hace, además, sobre la base de un análisis experimental.

Ilustración 1. Sistema fluvial río Paraná. Ruta Nacional 168 entre Santa Fe y La Guardia. Santa Fe, Argentina.



Enfoque metodológico

En el caso de puentes aliviadores para los que se interpreta que el terraplén de aproximación se configura como un estribo largo, Schreider *et al.* (1998, 2000) demostraron que se verifica un proceso de interacción entre la erosión por contracción y por estribo. En efecto, el desarrollo de la erosión local redistribuye el caudal en la sección, de modo tal que la socavación fuera de la zona afectada por la erosión local se atenúa en la medida en que la relación entre el ancho de la brecha y la profundidad de erosión (B/y_e) se reduce. En función de ello se consideró necesario incorporar en el análisis una variable característica de la sección de paso, como puede ser el ancho de la brecha o sección de escurrimiento contraída, coincidente con la traza del puente aliviador.

Otro aspecto importante es la definición espacial de las variables del escurrimiento. En general, los autores que han trabajado estos temas las ubican en una sección de aproximación aguas arriba del puente. Si bien desde el punto de vista experimental ello no involucra demasiadas complicaciones, el análisis de situaciones reales con múltiples puentes aliviadores ha puesto de manifiesto que, a igualdad de condiciones del flujo de aproximación, las erosiones resultantes fueron significativamente diferentes, en virtud de las condiciones locales imperantes junto al estribo. Ello llevó a considerar estas variables en la sección misma de emplazamiento del puente.

Con base en estas observaciones, la profundidad de erosión local puede expresarse mediante una relación funcional del tipo:

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

donde B es el ancho de la brecha o semi-sección del puente; L , la longitud del conjunto "terraplén de aproximación-estribo del puente"; E , el espesor del estribo; θ , el sesgo respecto del flujo; K_s tiene en cuenta la forma del estribo; ρ es la densidad del fluido; ν es la viscosidad cinemática del fluido; U , la velocidad; h , el tirante del escurrimiento, ambos evaluados en la sección de la brecha al inicio del proceso; g , la aceleración de la gravedad; d_s , el diámetro característico; ρ_s , la densidad del sedimento; σ_g , el desvío estándar geométrico del material del lecho, y t es el tiempo, como se observa en la ilustración 2.

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:

$$\frac{y_e}{B} = f_2 \left(\underbrace{\frac{L}{B}}_{(I)}, \underbrace{\frac{E}{B}}_{(II)}, \underbrace{\theta}_{(III)}, \underbrace{K_s}_{(IV)}, \underbrace{\frac{UB}{\nu}}_{(V)}, \underbrace{\frac{h}{B}}_{(VI)}, \underbrace{\frac{U^2}{gB}}_{(VII)}, \underbrace{\frac{d_s}{B}}_{(VIII)}, \underbrace{\frac{\rho_s}{\rho}}_{(IX)}, \underbrace{\sigma_g}_{(X)}, \underbrace{\frac{Ut}{B}}_{(XI)} \right) \quad (2)$$

El elevado número de grupos adimensionales en la ecuación (2) impone la necesidad de eliminar algunos de ellos para simplificar el problema y así facilitar la verificación experimental. Por tal razón se ha decidido no contemplar en este análisis experimental la influencia de los grupos (I), (II), (III), (IV), (V), (VIII), (IX), (X) y (XI). Los motivos para no considerar estos grupos adimensionales se pueden sintetizar de la siguiente manera:

- 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 (Kandasamy, 1989; Melville y Coleman, 2000).
- La influencia de los efectos viscosos (ν) en los fenómenos de erosión local se considera escasa.
- Las variables características del fluido, del sedimento y del estribo se mantuvieron constantes durante toda la secuencia experimental.
- Se analizan profundidades de erosión correspondientes a situaciones finales de equilibrio, por lo que el tiempo no resulta una variable relevante.

De este modo, la expresión (2) se reduce a:

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

donde y_e es la máxima profundidad de erosión local en el estribo (ilustración 2).

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. De este modo surge una forma del número de Froude, en donde el tamaño del sistema está representado por la dimensión horizontal (número de Froude de la brecha), identificado como grupo VII en la expresión (2).

Por otra parte, 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 que, de acuerdo con evidencias experimentales anteriores a este trabajo (Schreider *et al.*, 1998; Scacchi *et al.*, 2002), presenta una dependencia del tipo:

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

Esto es, en forma adimensional:

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

donde Q_{hf} , Q_{hi} son los caudales que escurren en la sección transversal correspondiente al ancho de la hoya de erosión, al final e inicio del proceso erosivo, respectivamente. En la ilustración 2, A_f , A_i son las secciones de escurrimiento asociadas con el ancho superficial de la hoya de erosión al final e inicio del proceso erosivo, respectivamente.

El enfoque metodológico planteado en este estudio condujo a la elaboración de una secuencia experimental que tuvo como finalidad sustentar la elección de las variables geométricas e hidráulicas, las cuales gobiernan

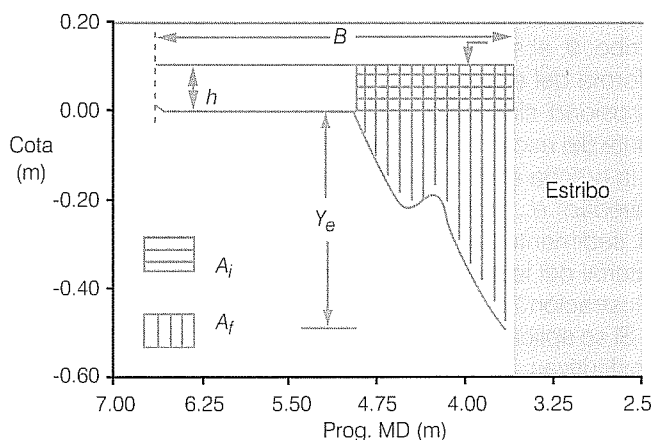
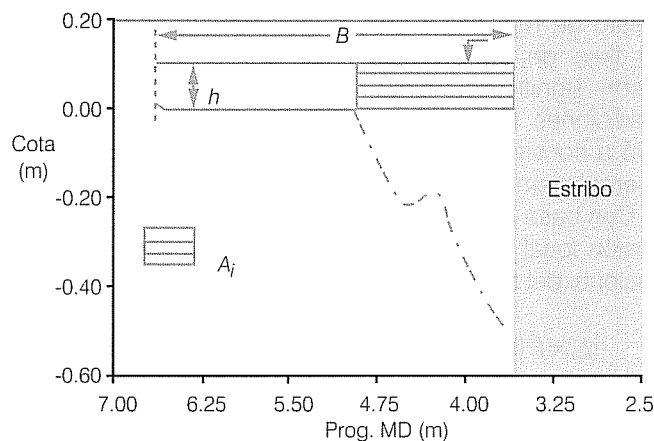
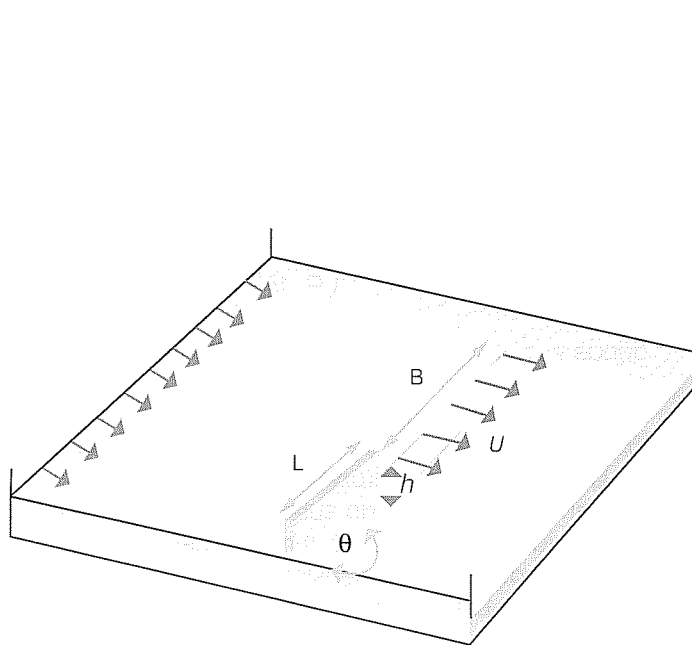
el fenómeno de erosión en estribos de puentes aliviadores, y ajustar las relaciones funcionales propuestas.

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 los experimentos de laboratorio permitió 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 local final resultante habrá de tener la incorporación extra de caudal en la zona de influencia del estribo, conforme 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

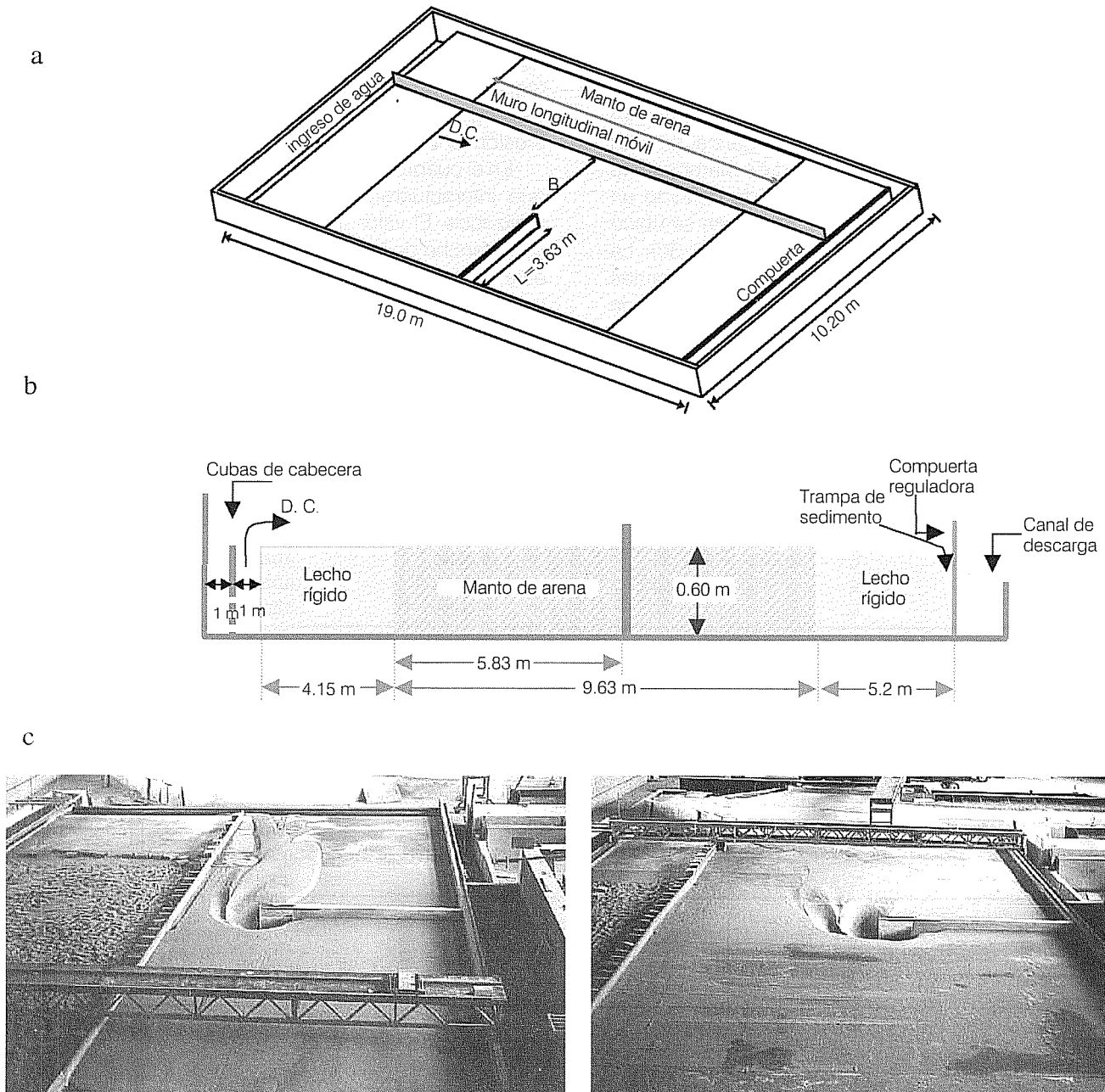
Ilustración 2. Definición de las principales variables geométricas e hidráulicas.



puente aliviador, el cual forma parte de un terraplén vial interpuesto en una planicie inundable. Para ello se consideró indispensable el empleo de un canal de experimentación de grandes dimensiones, en el cual se pudieran representar las características principales del escurrimiento en el 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 de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, y se encuentra ubicado en la nave principal de su Laboratorio de Hidráulica (ilustración 3). 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.

Ilustración 3. Croquis, corte longitudinal y vista general del cuenco de experimentación.



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 un desarrollo longitudinal de 5.2 m (ilustración 3a, 3b). Con el fin de que tanto el trecho de entrada como el de salida posean una superficie de rugosidad igual a 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 diez 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, con lo que quedó definido un estribo prismático de pared vertical. Su origen se ubicó en la margen derecha del cuenco (ilustración 3c). La longitud del estribo, en combinación con los tirantes actuantes, aseguraron relaciones de $L/h > 25$, típicas de

estribos largos (Kandasamy, 1989). Mediante un muro metálico longitudinal móvil, paralelo a las paredes del cuenco, se representaron distintos anchos de brecha, con lo que se mantuvo invariable la longitud del estribo (ilustración 3c).

Se llevaron a cabo cinco series de experimentos, cada uno con 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 son comparables. Cada q fue ensayada con cinco amplitudes de brechas B , con lo que se cubrió un rango de variación para este parámetro de aproximadamente 300%. Así se buscó identificar cómo influye el ancho de la sección en el proceso de redistribución de caudales que se verifica en la misma, y cómo ello, a su vez, repercute en el desarrollo de la erosión junto al estribo.

En el cuadro 1 se resumen los principales parámetros que interactuaron en cada uno de los experimentos realizados. El valor de B , al que se referirá en adelante como ancho de brecha o de puente, es el semiancho de éste, lo que significó trabajar con un solo estribo. Así, la pared móvil del canal, opuesta al estribo, constituyó

Cuadro 1. Parámetros característicos de los experimentos realizados. Sección de la brecha.

Serie	Ensayo	B (m)	Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	h (m)
I	I ₁	1.5	0.054111	0.02861	0.0960
	I ₂	2.0	0.05830	0.02915	0.0986
	I ₃	3.0	0.08640	0.02880	0.1000
	I ₄	3.5	0.10208	0.02917	0.1035
	I ₅	4.0	0.11535	0.02884	0.1050
	I ₆	5.0	0.16225	0.03245	0.1130
II	II ₁	2.0	0.07354	0.03677	0.1050
	II ₂	3.0	0.10638	0.03546	0.1065
	II ₃	3.5	0.12235	0.03496	0.1090
	II ₄	4.0	0.14295	0.03574	0.1120
	II ₅	5.0	0.19565	0.03913	0.1200
III	III ₁	1.5	0.06574	0.04383	0.1070
	III ₂	2.0	0.08594	0.04297	0.1095
	III ₃	3.0	0.13320	0.04440	0.1130
	III ₄	3.5	0.15768	0.04505	0.1160
	III ₅	4.0	0.18523	0.04631	0.1210
IV	IV ₁	1.5	0.08075	0.05352	0.1150
	IV ₂	2.0	0.10163	0.05082	0.1160
	IV ₃	3.0	0.15780	0.05260	0.1180
	IV ₄	3.5	0.17787	0.05082	0.1220
V	V ₁	1.5	0.09011	0.06007	0.1215
	V ₂	2.0	0.11850	0.05925	0.1230
	V ₃	3.0	0.18100	0.06033	0.1248

un eje de simetría, no sólo desde el punto de vista geométrico sino también en cuanto al fenómeno en estudio. Esto es, a modo de simplificación de las hipótesis de partida, se ha supuesto que las evidencias expuestas por los experimentos de laboratorio se darían de igual modo en la parte de la sección reflejada respecto del eje de simetría. Como consecuencia de ello, los resultados obtenidos no consideran la posibilidad de que, para el caso de secciones de escurrimiento lo suficientemente estrechas, la distribución del flujo pueda recibir la influencia superpuesta de las fosas localizadas junto a ambos estribos. De hecho, la secuencia de experimentos consideró fosas de erosión, cuyo ancho no alcanzó, en ningún caso, el total de la brecha considerada B ; es decir, que siempre existió una fracción de la semisección transversal que no fue afectada por la erosión local junto al estribo. La adopción del esquema experimental señalado se justifica bajo la necesidad de maximizar la cantidad de brechas a considerar, respetando la condición de estribo largo. Se permitió así un mejor manejo de las variables de interés en el marco de las limitaciones de tamaño y de caudales que impone el dispositivo experimental empleado para este estudio.

Cada configuración del cuenco, asociada con un caudal específico determinado, se ensayó en forma desdoblada en las dos condiciones siguientes:

1. *Ensayos con fondo fijo.* Éstos tuvieron como 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 etapa, el cuenco de experimentación presentó un fondo horizontal 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 uno de los experimentos se midieron velocidades y profundidades del escurrimiento en secciones representativas tanto del flujo de aproximación como del emplazamiento del estribo.

2. *Ensayos con fondo móvil.* En esta etapa se permitió que se desarrollaran las fosas de socavación local para luego medir los parámetros representativos del escurrimiento en la sección erosionada. En los ensayos se 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, todos los experimentos reprodujeron condiciones de agua clara y duraron 24 horas, 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 uno de los ensayos se registraron:

- Perfiles de velocidad en la sección de la brecha, que se midieron en verticales, cuyo número y espaciamiento fueron definidos en 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 realizó mediante limnímetros provistos de punta y vernier; las velocidades del escurrimiento se determinaron con un velocímetro acústico dopler (ADV) montado sobre un carro portainstrumental.

Análisis de resultados

Condiciones iniciales

Se ha planteado, al formular las hipótesis de partida, la importancia que tiene en el desarrollo de la erosión local la modificación que sufre la distribución de caudal en la zona de emplazamiento del puente, razón por la cual fue necesario conocer las condiciones de escurrimiento en dicha sección, previas al inicio del proceso erosivo.

En la ilustración 4 se presenta, a modo de ejemplo, la distribución transversal del flujo para la serie I de experiencias, obtenida a partir de las velocidades medidas en la etapa de ensayos a fondo fijo. Se han graficado los porcentajes de caudal acumulados como una función de la progresiva de la sección, adimensionalizada con el ancho de la misma B y expresada en forma porcentual. Las diferentes curvas que en ella se reproducen se corresponden con tres de los anchos ensayados. La ilustración 4, al igual que los resultados encontrados en las series restantes, pone de manifiesto el dominio de la geometría sobre la configuración de la corriente, esto es, distribuciones uniformes de caudales, en correspondencia con secciones de geometría uniforme. Asimismo, se puede comprobar la homogeneidad de las condiciones iniciales para cualquier caudal experimental.

En la ilustración 5 se han volcado las distribuciones de caudales específicos iniciales para las mismas

condiciones de ensayo que las correspondientes a la ilustración 4. Ambas figuras demuestran que en la parte mayoritaria de la sección, el caudal específico q se mantiene prácticamente constante, con sólo un pequeño sector de déficit inmediato al estribo, donde las distribuciones se apartan levemente de la lineal. Se destaca en la ilustración 5 que este sector no presentó diferencias significativas cuando se varió el ancho de escurrimiento, coincidiendo no sólo la forma de las curvas, sino también la porción de la sección influida por el mismo.

El comportamiento observado resulta trascendente a la hora de aplicar los procedimientos de cálculo a situaciones de campo, pues ratifica la posibilidad

de emplear la morfología inicial de la sección del puente como dato de entrada en la estimación de los parámetros iniciales del flujo próximo al estribo, sin que ello implique introducir errores de consideración.

Variación de la distribución de caudales

En este punto se analizan los resultados de las modificaciones causadas por el desarrollo de las erosiones junto al estribo sobre la configuración inicial del escurrimiento. Se ha prestado particular atención a la influencia que tiene el ancho de la sección B en dicho fenómeno, y puntualizado los caudales que en definitiva terminan actuando en la zona de emplazamiento del puente, afectada por la hoya de erosión local.

Entonces, si se consideran como variables determinantes de la erosión local junto a un estribo largo al caudal específico en un tubo de corriente adyacente al mismo, q , y a la profundidad del escurrimiento en dicho punto, h , tal como lo plantea la literatura clásica, se creyó interesante indagar el comportamiento que dichas variables tienen en relación con la existencia del foso de erosión local. En virtud de ello, a partir de los valores de velocidad medidos en la etapa de ensayos con fondo móvil (una vez desarrollada la erosión local), se ha estimado el caudal específico actuante en cada una de las verticales de medición consideradas en las diferentes experiencias. En las ilustraciones 6 a 8 se presentan las distribuciones transversales de este parámetro, correspondientes a las series I, III y V ($q \approx 0.030 \text{ m}^2/\text{s}$, $q \approx 0.045 \text{ m}^2/\text{s}$ y $q \approx 0.060 \text{ m}^2/\text{s}$). En el eje de las abscisas se volcaron las progresivas en las que fueron medidas las velocidades y para las que el valor de 3.63 m se corresponde con el extremo del estribo. Cada una de las figuras está constituida por un número de curvas equivalente al de los diversos anchos de brecha ensayados en esa serie. Resultados equivalentes fueron hallados para las series II y IV.

Como lo demuestran las ilustraciones 6, 7 y 8, ante la ocurrencia del proceso erosivo, el flujo se distribuye con particularidades notables y sustancialmente diferentes, ya sea que se trate de la porción de la sección de escurrimiento afectada por la erosión local junto al estribo, o de aquella en que los niveles del lecho no registraron tal influencia. Por una parte, en el tramo exterior a la fosa de socavación, el flujo actúa de un modo uniforme, dando lugar a caudales unitarios, cuyo valor fue menor en la medida en que el ancho total de la sección disminuyó. A modo de ejemplo, se comprueba en la ilustración 6 que en los experimentos de la serie I en los que se usaron las menores amplitudes ($B = 1.5\text{-}2.0 \text{ m}$), el caudal específico se redujo a valores tan pequeños

Ilustración 4. Distribución porcentual de caudales iniciales. Serie I.

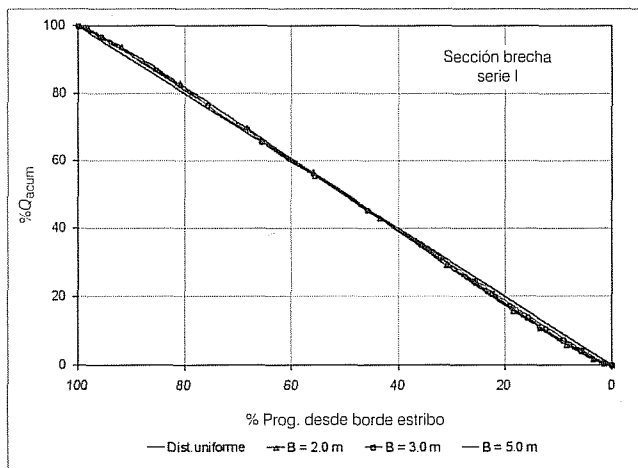


Ilustración 5. Distribución transversal de caudales específicos iniciales. Serie I.

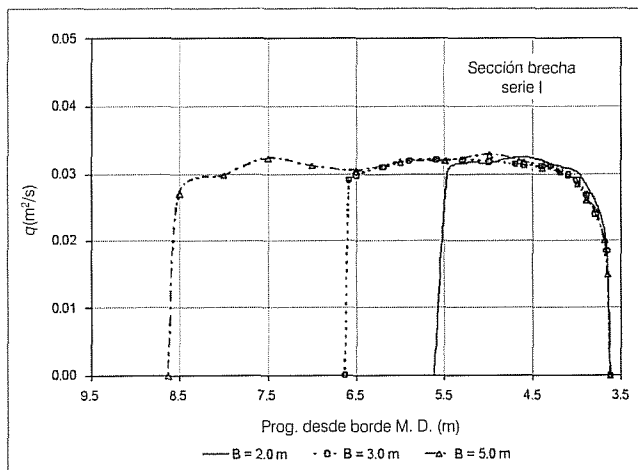
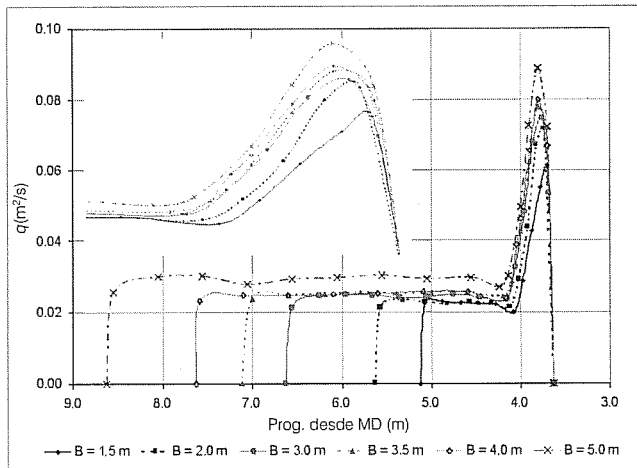
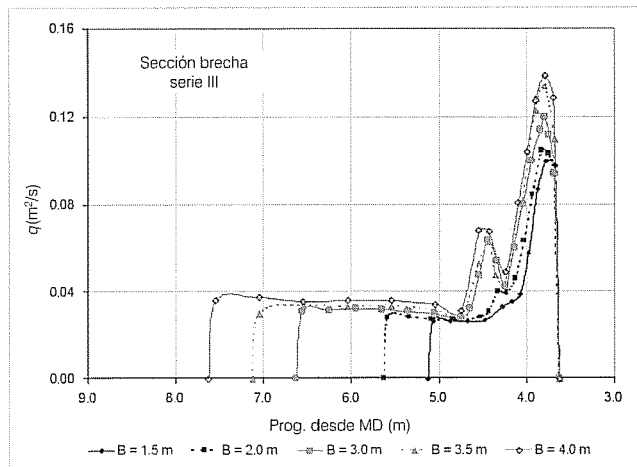
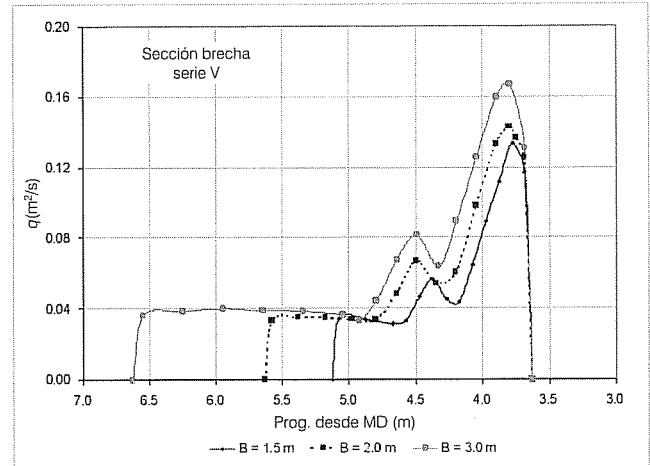


Ilustración 6. Distribución transversal de caudales específicos finales. Sección de la brecha, serie I.**Ilustración 7. Distribución transversal de caudales específicos finales. Sección de la brecha, serie III.**

como $0.0225 \text{ m}^2/\text{s}$, 25% inferiores a los existentes en este sector al comienzo del ensayo. En cambio, para la mayor de las aperturas, dicho parámetro tuvo un descenso de apenas 6% respecto de la condición inicial presentada en la ilustración 5. Esta tendencia ratifica lo demostrado por Schreider *et al.* (1998, 2000), quienes propusieron una función decreciente, constituida por una suma algebraica de funciones exponenciales entre la pérdida de caudal en esta zona y el ancho de la sección de escurrimiento relativo a la profundidad de erosión junto al estribo B/y_e .

En la porción de la sección que incluye la hoya de erosión local, la distribución lateral del flujo difirió notablemente de la descrita para el resto fuera de la

Ilustración 8. Distribución transversal de caudales específicos finales. Sección de la brecha, serie V.

misma. En efecto, en esta zona se produce un marcado incremento en el caudal específico respecto del relevado en ese mismo sector en las etapas iniciales del fenómeno. Las ilustraciones 6 a 8 muestran la existencia de un valor pico $q_{\text{máx}}$ próximo a la zona de máximas profundidades y cuya magnitud resultó cada vez mayor en la medida en que la brecha era más ancha para todos los experimentos realizados.

Este hecho brindó el primer indicio de que el caudal que escurre por la hoya de erosión local junto a un estribo largo será mayor en la medida en que el ancho total de la sección sea más grande, considerando siempre iguales condiciones hidráulicas iniciales en dicha zona.

Si bien todas las curvas de las ilustraciones 6, 7 y 8 presentan un patrón único de comportamiento, con una rama ascendente próxima al estribo y una descendente coincidente con el sector externo de la hoya de erosión, esta última presenta particularidades que merecen ser puntualizadas. Se distingue que para algunas de las configuraciones estudiadas aparece un segundo pico, cuya presencia pareciera ser función del caudal total que escurre en este sector de la sección.

Cuando los caudales específicos iniciales fueron pequeños, el caudal total no resultó suficiente para conformar un segundo vórtice con la intensidad como para provocar un efecto de concentración secundaria de caudales, aun para los mayores anchos ensayados (serie I, ilustración 6). En el otro extremo (serie V, ilustración 8), el caudal inicial tiene una magnitud tal que es capaz de promover el segundo pico, incluso para los anchos menores. La situación intermedia (serie III, ilustración 7) demuestra la necesidad de recibir aportes provenientes del sector no erosionado para conformar la distribución

bimodal de q en la zona afectada por la hoya de erosión. Así, resulta que el segundo pico no se aprecia para los anchos menores, pero sí para las brechas más grandes, en correspondencia con las máximas transferencias de caudal a la hoya para las condiciones hidráulicas iniciales dadas.

De no producirse trasvases laterales de caudales, las distribuciones de flujo descritas podrían justificarse sólo en el marcado incremento experimentado por la profundidad del escurrimiento junto al estribo, consecuencia directa de la erosión local desarrollada. Este hecho, por sí solo, desencadenaría un notable descenso de la componente normal de la velocidad en la zona excavada, lo cual no concuerda con los registros de velocidades obtenidos al final de los experimentos. Así lo demuestran las ilustraciones 9 y 10, referidas a dos de los experimentos de las series I y V. En ellas se puede observar que las velocidades en el sector no afectado por la hoya de erosión disminuyen significativamente respecto de las medidas para la condición inicial (ilustración 5), con reducciones que oscilaron entre el 22% ($B=1.5$ m) y el 12.5% ($B=5.0$ m) para la serie I. Si a ello se suma que los niveles del pelo de agua se reducen con el desarrollo de la erosión, resulta evidente la pérdida de caudal en la zona exterior a la hoya, el cual indudablemente se transfiere a la zona de erosión local, donde la sección de escurrimiento aumenta ostensiblemente y las velocidades, si bien decaen, alcanzan valores máximos, cuya magnitud resultó cercana a las medidas en el resto de la sección.

El análisis efectuado hasta aquí permite concluir que el incremento de caudal observado en el sector de la brecha afectado por la hoya de erosión local

es función de las condiciones iniciales del flujo en las inmediaciones del estribo y de la extensión de la sección estrechada B.

Con el propósito de sintetizar este aspecto particular del estudio se construyó la ilustración 11. En ella se representaron los valores de caudales totales que al final del proceso erosivo escurrían por el sector de la sección ocupado por la hoya de erosión local, en función del ancho total de la sección B. Cada punto corresponde a un experimento en particular y éstos se encuentran agrupados en función de la serie a la que pertenecen. Resulta evidente la influencia que sobre el agrupamiento de datos tiene el valor inicial de q , previo a la erosión. Se observa que las curvas correspondientes a los menores

Ilustración 10. Distribuciones transversales de velocidades al final del ensayo. Sección de la brecha. Serie V.

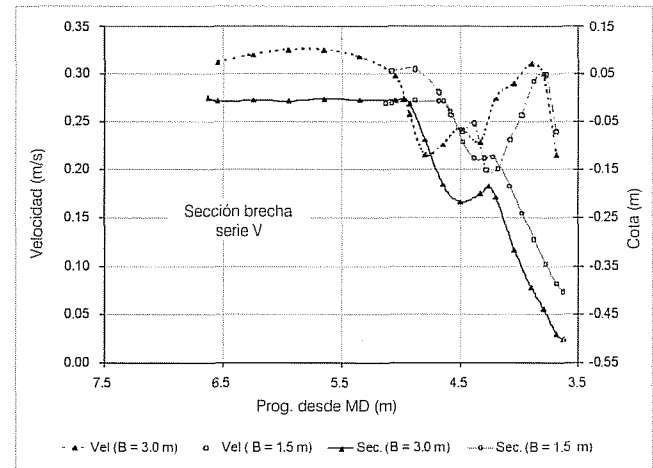


Ilustración 9. Distribuciones transversales de velocidades al final del ensayo. Sección de la brecha. Serie I:

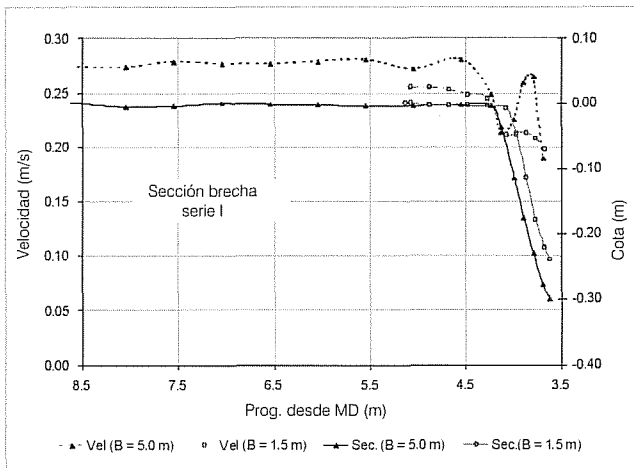
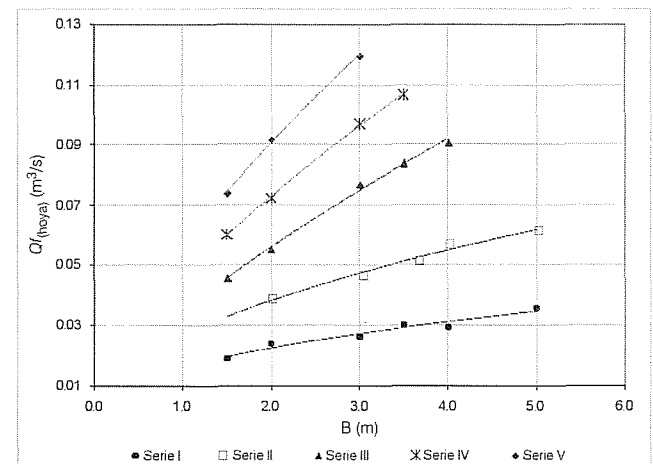


Ilustración 11. Caudales que escurren por el sector de la sección afectado por la erosión local, una vez desarrollada la misma.



caudales específicos (series I y II) presentan una pendiente suave y una tendencia hacia un valor límite de caudal final Q_f , conforme se van considerando las secciones que tuvieron mayor amplitud. Por el contrario, para los caudales específicos más elevados (series IV y V), la tasa de variación de Q_f con el ancho B resulta mayor y no se observa un amortiguamiento en la tasa de variación de los incrementos de caudal.

Si bien la ilustración 11 podría sugerir un comportamiento diferente de la variación de Q_f con B , según se esté ante un caudal específico inicial pequeño o grande, ello no necesariamente es así, y el no haber observado una estabilización del valor de Q_f para las series de experimentos que tuvieron los caudales unitarios más elevados podría deberse a las limitaciones de los dispositivos experimentales disponibles que no permitieron representar brechas suficientemente anchas, que pusieran en evidencia este hecho.

Lo anterior permite formular la hipótesis de que para un caudal inicial existiría un ancho límite (de carácter práctico) $B_{\text{límite}}$ más allá del cual, aunque se siga ensanchando la sección de la brecha, no habrá incrementos adicionales del valor de Q_f .

Así, se puede señalar que en circunstancias prácticas en las que haya aliviadores con estribos largos, se desarrollarán, junto a los mismos, hoyas de erosión local por las que escurrirán caudales al final del proceso erosivo, cuya magnitud dependerá de las condiciones iniciales del flujo y del ancho de la sección de escurrimiento si se mantienen constantes los restantes parámetros geométricos. Para un valor de velocidad junto

al estribo, este caudal Q_f será mayor cuanto más grande sea el ancho de la sección del puente, pero existirá una apertura límite por encima de la cual incrementos en el ancho de escurrimiento no implicarían aportes adicionales de caudal significativos a la zona de erosión.

Caracterización de las secciones de erosión

La conformación adquirida por el lecho en las inmediaciones del estribo fue relevada al final de los experimentos, una vez que el cuenco había drenado totalmente. A partir de estos datos se representaron perfiles transversales, en coincidencia con la traza demarcada por el borde aguas arriba del estribo, sección en la que se localizaron las máximas profundidades, como lo muestran las ilustraciones 12, 13 y 14, correspondientes a las series de experimentos I, III y V. Las ilustraciones muestran también que el proceso erosivo se encuentra íntimamente ligado con el ancho de la sección de escurrimiento. En relación con ello puede verse que, dentro de cada serie ($q_{\text{inicial}} \approx \text{constante}$), las dimensiones de las fosas de socavación aumentaron en la medida en que la amplitud de las brechas experimentales fue mayor. En este sentido, la ilustración 13 muestra los incrementos en las máximas profundidades de erosión de hasta un 40% cuando el tamaño de la brecha se incrementó de 1.5 a 4.0 m.

La consideración en conjunto de las ilustraciones 6, 7 y 8, con las 12, 13 y 14, permite relacionar la geometría de la sección final erosionada con la distribución

Ilustración 12. Configuración del lecho erosionado. Serie I.

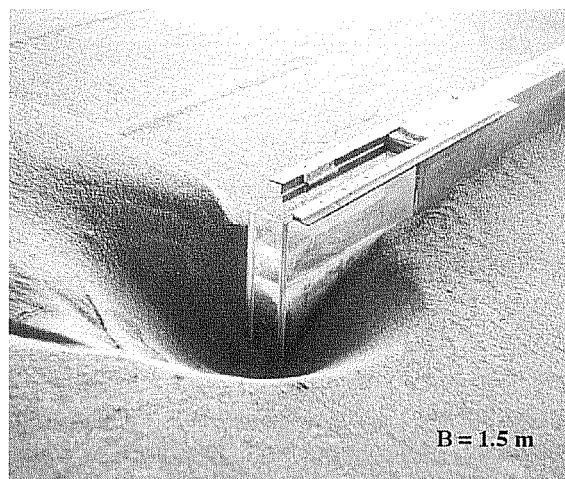
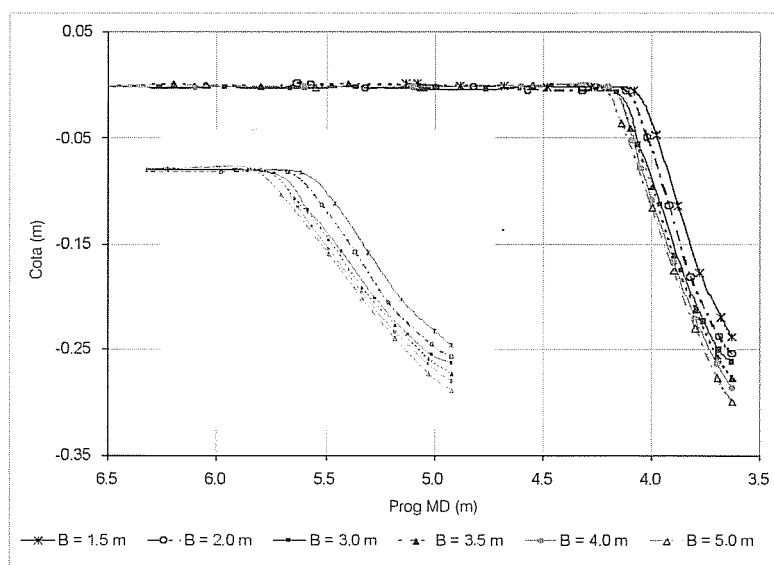


Ilustración 13. Configuración del lecho erosionado. Serie III.

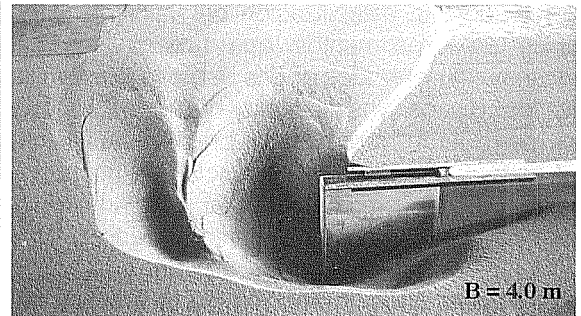
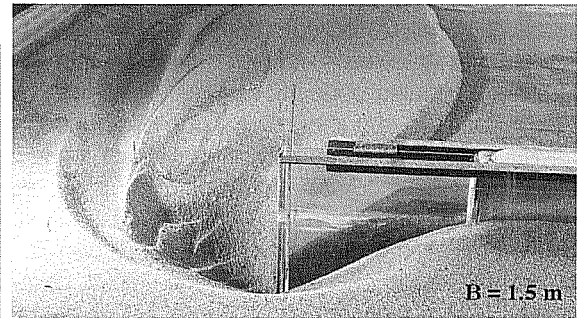
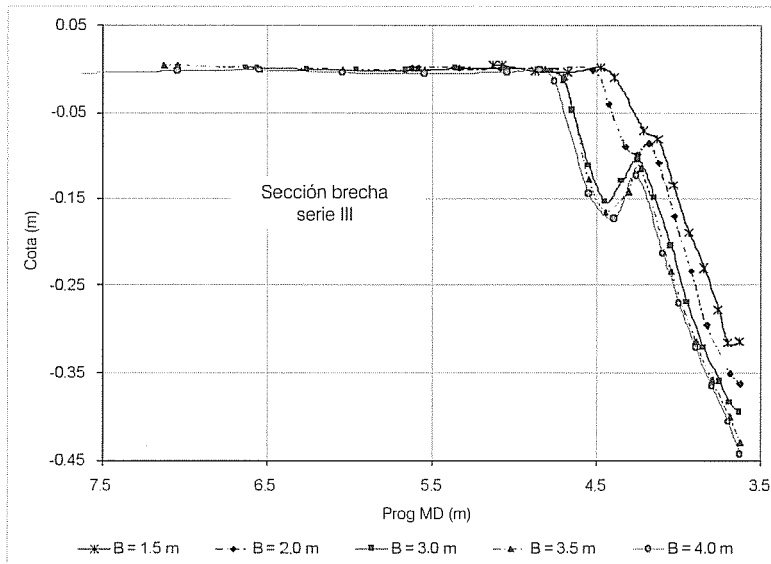
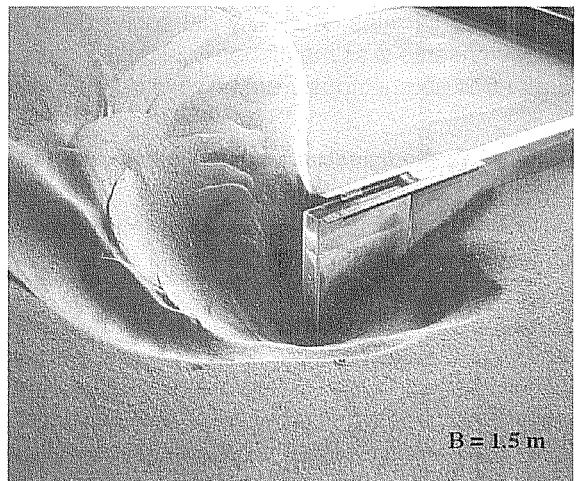
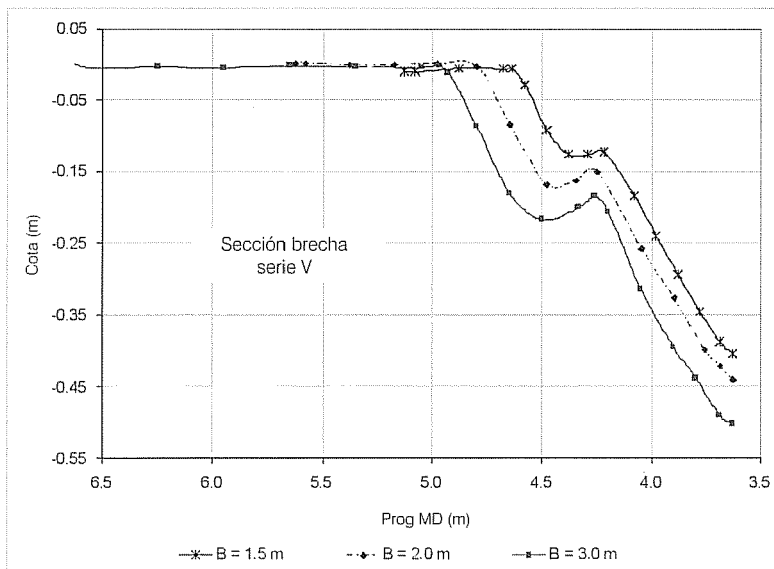


Ilustración 14. Configuración del lecho erosionado. Serie V.



transversal de caudales resultantes. Destaca cómo la presencia del segundo pico de caudales unitarios se asocia en una relación causa-efecto con el desarrollo del canal de erosión secundario, ubicado en la parte exterior

de la hoya, a continuación del canal primario. Estas dos cavidades son las que alojan a los vórtices principal y secundario, reconocidos como los principales agentes erosivos junto a los estribos de puentes.

Interacción entre la erosión y la redistribución de caudales

El cumplimiento de los objetivos planteados implica demostrar la existencia de una vinculación entre el incremento de caudal experimentado en la porción de la sección determinada por el ancho de la hoya de erosión y la erosión encontrada en la misma. De ser esto así, las socavaciones máximas relevadas deberían presentar un comportamiento, en relación con el ancho de la brecha, semejante al mostrado por la ilustración 11. La ilustración 15 sintetiza estos resultados.

La tendencia del conjunto de puntos representativos de cada experimento semeja la mostrada en la ilustración 11, lo que permite señalar la interdependencia propuesta a través de la expresión (5) como un hecho cierto.

Resta ahora definir la relación funcional que establezca tal correspondencia. Con este fin se construyó la ilustración 16, en la cual se volcaron las variaciones sufridas por el caudal en la porción de la sección de escurrimiento afectada por la erosión local, en función de la máxima profundidad de erosión adimensionalizada con el ancho de la brecha, esto es y_e/B . Las ordenadas se computaron como el cociente de la diferencia de porcentajes de caudales correspondientes a la zona de erosión local al final ($\%Q_f$) e inicio ($\%Q_i$) del proceso erosivo y el medido en la situación inicial ($\%Q_i$).

La disposición de los puntos ratifica el concepto fundamental planteado en relación con la dependencia existente entre la redistribución de caudales verificada en la sección y el desarrollo mismo de las erosiones locales.

Un análisis de las condiciones límite que surgen de la ilustración 16 indica una dependencia funcional coherente

Ilustración 15. Máximas profundidades de erosión medidas en cada una de las experiencias realizadas.

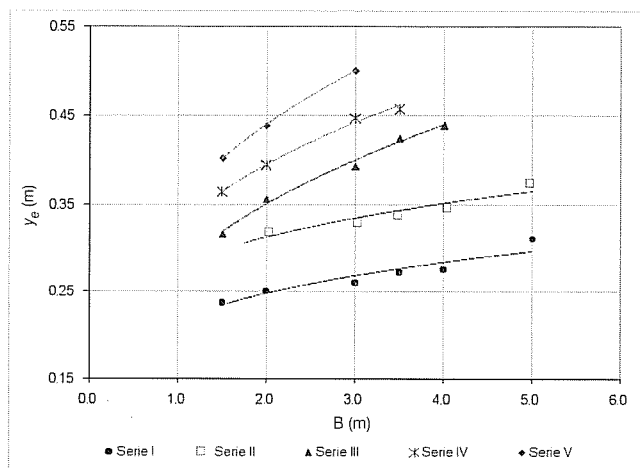
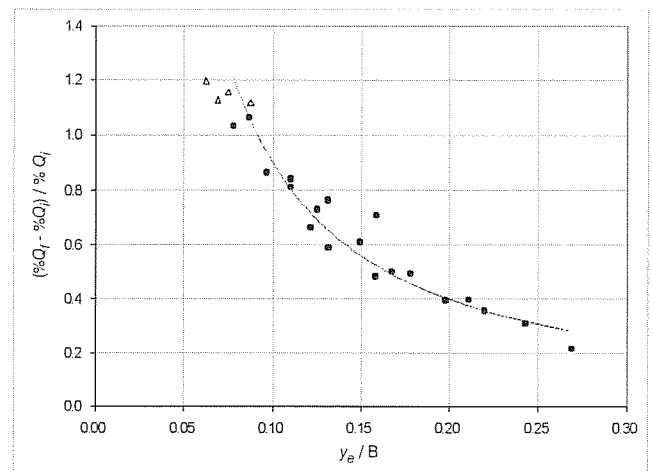


Ilustración 16. Relación entre la variación del caudal que escurre en la zona de erosión y la máxima profundidad relevada.



para valores extremos del parámetro y_e/B . En efecto, cuando la brecha es lo suficientemente angosta como para considerar que toda ella es hoya (y_e/B grande), el incremento de caudal debiera tender a cero, ya que no existe posibilidad alguna de redistribución lateral del flujo en la sección. En el otro extremo, para valores de y_e/B pequeños, asociados con anchos de sección importantes, la curva se muestra creciente, siendo apenas perceptible un cambio de tendencia para los cuatro experimentos que combinaron las brechas más amplias con las profundidades de erosión más pequeñas (ilustración 16). Se debe señalar aquí la necesidad de efectuar experimentos adicionales con anchos mayores a los empleados en el presente estudio, con el propósito de encontrar el valor límite $B_{\text{límite}}$ superado, el cual, ante el accionar de las mismas condiciones iniciales del flujo, ya no se producen incrementos significativos del caudal aportado a la zona de la hoya.

Relación funcional para el cálculo de la erosión local en estribos de puentes aliviadores. Parámetros adimensionales del escurrimiento determinantes del fenómeno

En el enfoque metodológico presentado se planteó la necesidad de incorporar en el análisis de los procesos erosivos en puentes aliviadores en valles de inundación a los parámetros del flujo evaluados junto al estribo, en contraposición con las metodologías clásicas que consideran decisivo en la génesis del fenómeno al escurrimiento definido por las condiciones del flujo en la sección de aproximación.

Sobre esta línea argumental se pretenden contrastar los resultados obtenidos a partir de la secuencia

experimental desarrollada, con las expresiones funcionales propuestas en la literatura y con la propia surgida de este estudio.

Con tales fines, en la ilustración 17 se han representado las erosiones locales máximas adimensionalizadas como una función del número de Froude del escurrimiento, evaluado en la sección de aproximación, tal como lo propone la teoría clásica. La disposición de puntos resultante no permite identificar una relación funcional definida, hecho que sugiere la inconveniencia de adoptar los parámetros del flujo en una sección ubicada aguas arriba —alejada del estrechamiento— como representativos de las erosiones locales en estribos de puentes aliviadores con fuertes contracciones del escurrimiento.

Los resultados mostrados en la ilustración 17 sugirieron continuar el análisis, vinculando las erosiones medidas con el número de Froude evaluado a partir de los parámetros hidráulicos en la sección de emplazamiento del estribo; es decir, con las velocidades y tirantes medidos en la brecha al inicio del proceso (etapa a fondo fijo). Los resultados se presentan en la ilustración 18. Puede verse cómo los puntos se agrupan en torno a posibles relaciones funcionales, pero parametrizadas en función del ancho B . Este comportamiento permite señalar que el fenómeno analizado no queda totalmente explicado a través de los efectos gravitacionales del flujo en las inmediaciones del estribo, sino que resta considerar una variable que describa la particular geometría que involucra la hidráulica definida por el conjunto terraplén-puente aliviador.

Tal como fue planteado en el enfoque metodológico, el proceso en estudio podría definirse como un fenómeno “en planta” y no en elevación, por lo que se recomienda considerar al ancho B en las variables típicas condicionantes del fenómeno.

Surge de este modo la ilustración 19, en la que se ha incorporado como parámetro determinante de las erosiones junto a los estribos de puentes aliviadores a la geometría del contorno, representada por B . De esta forma se relacionó la variable adimensional y_e/B con el número de Froude de la brecha (Fr_{brecha}) contenido en la expresión (3) y definido como:

$$Fr_{brecha} = \frac{U}{\sqrt{gB}} \quad (6)$$

donde U es la velocidad del flujo en la sección de la brecha al inicio del proceso de erosión y B es el ancho de la sección de la brecha.

La ilustración 19 permite ver cómo los diferentes agrupamientos de datos identificables en la ilustración

Ilustración 17. Máxima profundidad de erosión en función de los parámetros del flujo de aproximación.

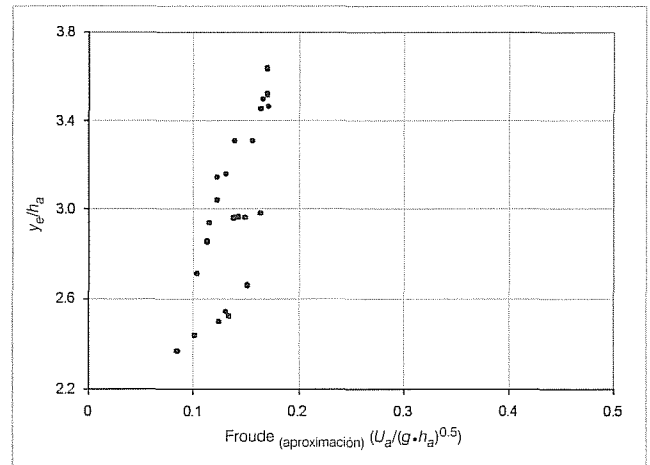
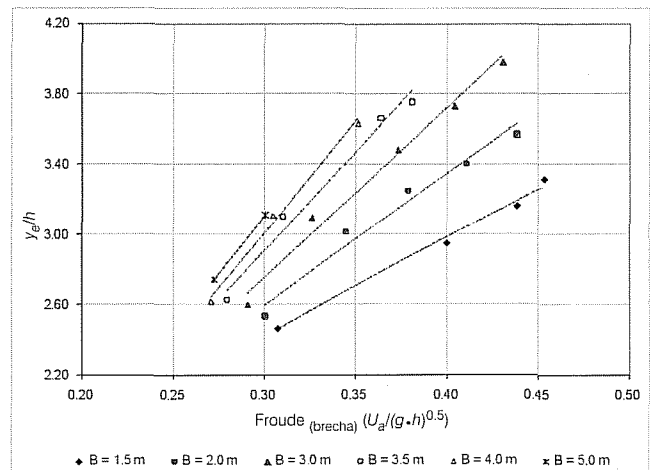


Ilustración 18. Máxima profundidad de erosión en función de los parámetros del flujo evaluados en la sección de la brecha.

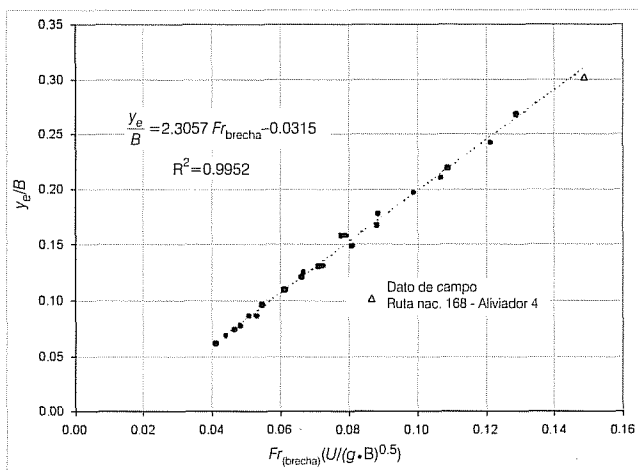


16 confluyen en una ley única de variación, válida para $0.03 < Fr_{brecha} < 0.16$ y expresada como:

$$\frac{y_e}{B} = 2.3057 Fr_{brecha} - 0.0315 \quad (7)$$

El ajuste logrado en la ilustración 19 define en forma experimental la relación funcional (3) y verifica las hipótesis de partida que le dieron origen. La no consideración del grupo adimensional que representa al tirante en las expresiones finales obedece a las pequeñas variaciones dadas a h en los distintos experimentos. Si

Ilustración 19. Máxima profundidad de erosión en función del número de Froude de la brecha (Fr_{brecha}).



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 para el 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 del mismo en relación con diferentes anchos de brechas, típicos de este tipo de puentes.

La posibilidad de contar con información confiable de los procesos erosivos observados durante la crecida extraordinaria del río Paraná ocurrida durante los años 1982-1983 permitió aplicar la metodología desarrollada en este trabajo a una situación de campo. Los datos hidráulicos y morfológicos levantados en el puente aliviador 4 de la Ruta Nacional 168 Santa Fe, Argentina (ilustración 1), empleados a tal efecto fueron los siguientes:

- Caudal (valor medio del periodo 17/06/83–06/07/83): 765 m³/s.
- Cota inicial del lecho: 12 m IGM.
- Tirante (valor medio del periodo 17/06/83–06/07/83): 3.70 m.
- Ancho del puente (2B): 74 m.

El valor de erosión calculada se presenta en la ilustración 19.

Los resultados obtenidos del diseño experimental propuesto, sumado al buen ajuste logrado con el único dato de campo que reunió la información necesaria para

la aplicación de la metodología, ponen en evidencia que las erosiones locales estudiadas son el producto de la acción conjunta del escurrimiento principal, caracterizado por sus condiciones junto al estribo al inicio del proceso, y de la transferencia lateral de caudal a la hoya, una vez desarrollada ésta. Se ha comprobado que dicha transferencia, para igual caudal específico y tirante inicial, depende del ancho de la brecha. Este parámetro, en estrecha interrelación con la profundidad de erosión, gobierna la redistribución de caudales, lo cual prueba la interdependencia que existe entre las relaciones funcionales (3) y (5).

Conclusiones

Si bien existieron limitaciones propias de cualquier diseño experimental, los resultados alcanzados permitieron verificar las hipótesis de partida y dieron lugar al conjunto de conclusiones que se exponen a continuación.

- Las distribuciones transversales de caudales registradas en la sección de la brecha durante la etapa a fondo fijo resultaron uniformes y se encontraron sólo pequeñas desviaciones de la distribución lineal en un reducido sector muy próximo al estribo. Ello responde a la configuración inicial de la sección, de forma rectangular, típica de puentes aliviadores emplazados sobre el valle de inundación sin un cauce definido.
- La distribución de caudales específicos, una vez generada la fosa de erosión junto al estribo, presentó características variables de acuerdo con el sector de la sección de la brecha que se considere. La porción exterior a la fosa de erosión local, si bien se redujo su valor inicial, se mantuvo constante en el ancho considerado. En cada serie de experimentos, las disminuciones observadas fueron mayores en la medida en que se ensayaron anchos de brecha de menor amplitud. En el interior de la fosa, el caudal específico se incrementó notablemente con respecto al de la condición inicial y se distinguió un valor pico cada vez mayor en la medida en que el ancho B de la sección aumentó, para igual q_{inicial} .
- El caudal absoluto que escurrió por las hoyas de erosión local al final del proceso erosivo dependió de las condiciones iniciales del flujo y del ancho de la sección estrechada. Para cada serie de experimentos, el caudal en este sector fue mayor en la medida en que se ensayaron brechas de mayor amplitud.

- Se ha planteado, con carácter de hipótesis, la existencia de un ancho límite $B_{\text{límite}}$, superado el cual, aumentos en el valor del mismo no implicarían incrementos adicionales en el caudal derivado hacia el sector de erosión local.
- Ante el accionar de las mismas variables hidráulicas iniciales (q , h) junto al estribo, se midieron fosas de socavación local, cuyas dimensiones aumentaron en la medida en que las experiencias contaron con anchos de brecha mayores.
- La forma de las hoyas de erosión dependió del caudal total que escurrió por las mismas, con lo que resulta evidente la correlación que existe entre la geometría de la sección final erosionada y la distribución de caudales existentes. Esto quedó demostrado por la simultaneidad verificada entre la existencia del surco de erosión secundario y la presencia del segundo pico de caudales unitarios evidenciado en las curvas de distribución transversal de dicho parámetro.
- La tendencia similar demostrada por las variaciones de las máximas profundidades de erosión y de los caudales que escurren por el sector erosionado, en función de las variaciones del ancho de la sección (ilustraciones 11 y 15), demuestran la interacción que existe entre el incremento de caudal que se da en la zona comprometida con la erosión local y las máximas socavaciones esperables en la misma.
- Se propuso una relación funcional entre la máxima profundidad de erosión en el estribo, adimensionalizada con el ancho de la sección, y el número de Froude de la brecha, la cual ajusta en forma experimental la expresión surgida del enfoque metodológico del presente trabajo. A partir de ella se concluye que, para el rango de las variables consideradas, 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.
- Son necesarios experimentos adicionales en un dispositivo tal que permita representar anchos mayores a los utilizados en el presente diseño experimental, con el objetivo de verificar la existencia del ancho límite $B_{\text{límite}}$ y una gama de tirantes h lo suficientemente amplia como para poder evaluar

la influencia de dicho parámetro, de manera que se pueda completar el análisis de todos los grupos adimensionales presentados en la expresión (3).

- Las restricciones experimentales que inevitablemente debe afrontar todo trabajo de laboratorio no habilita a la ecuación (7) 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.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional del Litoral que 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.

Recibido: 19/04/2004

Aprobado: 31/08/2004

Referencias

- KANDASAMY, J.K. *Abutments scour*. Report no. 458. Auckland, Nueva Zelanda: School of Engineering, The University of Auckland, 1989, 278 pp.
- KOUCHAKZADEH, S. y TOWNSEND, R.D. Maximum scour depth at bridge abutments terminating in the flood plain zone. *Canadian journal of civil engineering*. Vol. 24, 1997, pp. 996-1006.
- KWAN, T.F. *A study of abutment scour*. Report no. 451. Auckland, Nueva Zelanda: School of Engineering, The University of Auckland, 1988, 461 pp.
- MELVILLE, B.W. y COLEMAN, S.E. Bridge scour. *Water resources publications*. LLC, P.O. Box 260026, Highlands Ranch, Colorado 80163-0026, 2000.
- SCACCHI, G., MARTÍN-VIDE, J.P. y SCHREIDER, M. Flow depth effect on the discharge distribution at bridge sites. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*. Vol. 2, 2002. pp. 1047-1052.
- SCHREIDER, M., ZANARDI, L., SCACCHI, G. y FRANCO, F. Erosión por contracción y por estribo en puentes aliviadores en valle de inundación. *Ingeniería del agua*. Vol. 5, núm. 2, Madrid, 1998, pp. 23-34.
- SCHREIDER, M., SCACCHI, G., FRANCO, F. y ROMANO, C. 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, 2000, pp. 359-368.

Abstract

SCACCHI, G., SCHREIDER, M. & FUENTES, R. *Abutment scour at the relief bridge placed in a flood plain.* Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XX, no. 3, July-September, 2005, pp. 43-59.

This paper presents an experimental analysis of the scour processes that take place close to the abutments of relief bridges, placed in roads crossing flood plains, whose main characteristics are like the ones of the Paraná River Valley (Argentina). The immediate background on this subject has suggested that the presence of such scours produce a discharge redistribution across the section where the bridge is placed. This fact is the basis of the main hypothesis of the present research, which proposes that the discharge redistribution interacts with the local abutment scour. The good fitting achieved by experimental data to the functional relations proposed ratifies the initial hypotheses. It has been demonstrated that local scours in relief bridge abutments depend on initial flow conditions, velocity and depth adjacent to the abutment, as well as on the process of flow redistribution that takes place during their development. This last phenomenon was adequately evaluated by the incorporation of the bridge width, a variable that characterizes the whole process as a typical plant phenomenon.

Keywords: scour, abutment, relief bridges, flood plains, discharge redistribution.

Dirección institucional de los autores:

Graciela Scacchi
Mario Schreider

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas,
Universidad Nacional del Litoral,
Ciudad Universitaria-Ruta Nacional 168 km 472.4,
3000 Santa Fe, Argentina,
teléfono (54) 0342 457 5234,
fax: (54) 0342 457 5224,
gscachi@fich1.unl.edu.ar,
schreide@fich.unl.edu.ar

Ramón Fuentes-Aguilar

Asesor científico.
Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia,
Avenida del Valle 738,
Ciudad Empresarial, Huechuraba, Santiago, Chile,
teléfono (56) (2) 390 3987,
fax: (56) (2) 392 2312,
rfuen004@im2.codelco.cl