

EROSIÓN POR CONTRACCIÓN Y POR ESTRIBO EN PUENTES ALIVIADORES EN VALLE DE INUNDACIÓN

Mario Schreider, Luis Zanardi, Graciela Scacchi, Felipe Franco¹

RESUMEN: En el presente trabajo se analiza, en forma experimental, la interrelación existente entre los distintos tipos de erosión que se producen en puentes aliviadores, y sus vinculaciones con los parámetros característicos del escurrimiento. A tales fines se llevó a cabo una secuencia de ensayos de laboratorio, destinados especialmente a evaluar las modificaciones que sufre la distribución de caudales como consecuencia del desarrollo de la erosión por estribo, y la incidencia que ello tiene sobre la erosión por contracción. Los resultados alcanzados demuestran que la reducción del porcentaje de caudal, en la zona no afectada por la hoya de erosión local, es función de la profundidad de socavación debida a la presencia del estribo. Sobre esta base se propone una secuencia de cálculo de las erosiones totales en un puente aliviador en valle de inundación, la cual reproduce adecuadamente valores medidos en prototipo durante la ocurrencia de una crecida extraordinaria.

INTRODUCCIÓN

La crecida del río Paraná (Argentina) que tuvo lugar en los años 1982/83, fue una de las más importantes de las que se haya tenido registro. La condición de extraordinaria de la misma se debió tanto a los caudales máximos alcanzados como a su duración. Fue precisamente este último hecho el que determinó un importante incremento del escurrimiento a través del valle

aluvial conforme el tiempo transcurría. En tales circunstancias, los puentes aliviadores construidos en la planicie de inundación adyacente a la ciudad de Santa Fe (Figura 1), debieron descargar caudales varias veces mayores que los que se correspondían con una situación de equilibrio de la sección de paso original. Ello determinó la ocurrencia de erosiones muy importantes que dieron lugar al colapso de varios de ellos.

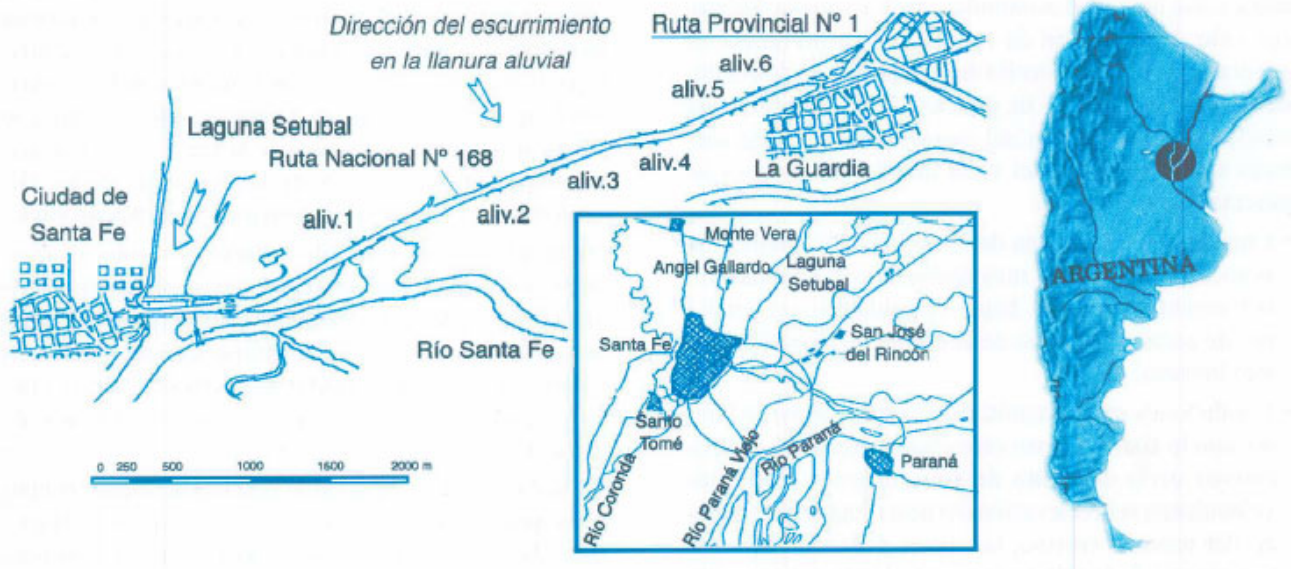


Figura 1. Ubicación geográfica

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral C.C. 217 - Ciudad Universitaria - 3000 - Santa Fe. Argentina.

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua Vol.5 Num.2 (junio 1998)*, páginas 21-32, recibido el **22 de diciembre de 1997** y aceptado para su publicación el **26 de marzo de 1998**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

Los datos de campo obtenidos durante esa crecida, brindaron las primeras evidencias acerca de la influencia que tiene el desarrollo de la socavación local por estribo sobre la distribución de caudales en la sección y, consecuentemente, sobre las profundidades de erosión asociadas al efecto de la contracción. Sobre esa base limitada, pero muy valiosa de datos de campo, se diseñó una secuencia de ensayos de laboratorio destinados a evaluar en forma más detallada la interacción entre ambos mecanismos de erosión y, especialmente, la vinculación de estos con las modificaciones que sufre la distribución de caudales durante el desarrollo del proceso erosivo. Se puso especial énfasis en identificar las diferencias entre el proceso físico que involucra la secuencia de cálculo sugerida habitualmente en la literatura (U.S. Department of Transportation, 1993), y el que se observó en los experimentos mencionados.

Los resultados alcanzados muestran la dependencia funcional que tiene la distribución de caudales respecto de la magnitud de la socavación local por estribo, y las modificaciones que, a raíz de ello, debieran introducirse en la secuencia de cálculo de las erosiones totales verificables en puentes aliviadores en valle de inundación.

EL PROBLEMA DE LOS PUENTES ALIVIADORES EN VALLE DE INUNDACIÓN

El desarrollo de rutas sobre una llanura inundable, exige la construcción de puentes aliviadores que posibiliten el normal escurrimiento a través del valle, en situaciones de creciente, y su retorno al cauce principal. Este es el caso en gran parte del valle aluvial del río Paraná, dominado por asentamientos poblacionales importantes sobre ambas márgenes de ese curso, y con una intensa actividad económica que los vincula. En este contexto, la necesidad de reducir costos privilegia en general un mayor desarrollo de terraplenes en desmedro de mayores longitudes de puentes. Esto determina una configuración particular del escurrimiento, en los sectores comprometidos del valle inundable, con las siguientes características:

- Condiciones en la zona de aproximación: Frentes de avance de la corriente muy anchos, profundidades relativamente pequeñas, bajas velocidades con tensiones de corte por debajo de la crítica de iniciación del movimiento.
- Condiciones en la sección del puente: Ancho reducido, con lo cual se tienen estrechamientos muy significativos de la corriente de aproximación, con altas velocidades, sobre elevación del pelo de agua al comienzo del proceso erosivo, tensiones de corte elevadas, por encima de la crítica de iniciación de movimiento. Importantes tasas de transporte de sedimentos debido al incremento de la capacidad de arrastre de la corriente en la zona de emplazamiento del puente. Presencia de mecanismos erosivos locales (estribos y pilas de puentes), que aportan sedimento a la corriente en forma superpuesta al proporcionado por el efecto de contracción que determina el estrechamiento.

El esquema erosivo descrito en la sección de un puente aliviador en valle de inundación, es un proceso de erosión con agua clara, es decir sin aportes de sedimentos desde aguas arriba. Ello determina que las erosiones esperables, para una condición de corriente dada, sean las máximas posibles. Los mecanismos que condicionan el fenómeno analizado, involucran dos acciones principales que determinan las máximas erosiones esperables en la sección del puente aliviador:

- Reducciones muy significativas del ancho de escurrimiento en la sección del puente, lo cual origina la erosión por contracción, como resultado de la diferencia entre la capacidad de transporte entre la sección estrechada y el aporte de sedimentos proveniente de aguas arriba (Laursen, 1960).
- La interferencia que provoca en el flujo la presencia del terraplén, obligando a bruscos cambios de dirección de la corriente, con la consecuente aceleración del flujo y creación de vórtices que remueven material alrededor del obstáculo (Dongol, 1994). En este análisis no se consideró el efecto de pilas, ya que en puentes aliviadores de pequeñas dimensiones, constituyen tabiques delgados bien alineados con la corriente.

La Ruta Nacional N° 168 que une las ciudades de Santa Fe y Paraná (Argentina), constituye un claro ejemplo de la situación aquí planteada. En la *Figura 1* se observa la traza de la ruta en un tramo de 5 km próximos a la ciudad de Santa Fe. Al momento de la crecida extraordinaria de los años 1982/83, el tramo presentado en *Figura 1* disponía de 6 aliviadores con una luz total de aproximadamente 350 m, a través de los cuales debía escurrir un caudal con una sección de aproximación uniforme de 5 km de ancho, 3 m de profundidad y una velocidad media de 0,30 m/s. Las condiciones señaladas muestran una muy importante contracción del escurrimiento, como consecuencia de la interferencia de grandes longitudes de terraplén. Como resultado de ello, se verificaron, durante el pasaje de la crecida extraordinaria, importantes erosiones en las secciones de los aliviadores que motivaron la destrucción de dos de ellos. De la información relevada durante el evento mencionado, se seleccionaron los datos correspondientes al aliviador N° 4, destruido por la crecida (*Figura 1*), dado que en él se verificaron las máximas socavaciones, con valores extremos que superaron el estrato cohesivo (de un espesor de entre 4 y 6 m) que recubre el manto de arena del valle aluvial.

En la *Figura 2* se presenta la sección de escurrimiento correspondiente al aliviador N° 4 al comienzo de la crecida (diciembre, 1982) y en coincidencia con el pico de la misma (Julio, 1983), con un caudal aforado en la sección de 1204 m³/seg. La sección final muestra erosiones muy importantes del orden de 10 m respecto de la cota de lecho inicial. La información hidráulica y batimétrica relevada hasta el mismo momento del pico de la crecida, permitió aplicar a esta situación particular las metodologías convencionales de cálculo sugeridas en la literatura (U.S. Department of Transportation, 1993).

Se estuvo, de este modo, en condiciones de contrastar los valores de cálculo con una situación adecuadamente relevada en prototipo.

A los fines de estimar la erosión por contracción se aplicó la metodología propuesta por Lischtvan Lebediev (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1984), desarrollada para lechos de arena:

$$h_s = \left[\frac{q}{C_c \beta 0,68 d_m^{0,28}} \right]^{\frac{1}{1+x}} \quad (1)$$

donde, h_s : profundidad de equilibrio; q : caudal específico; C_c : coeficiente de contracción; β : coeficiente que depende de la frecuencia de las crecidas; d_m : diámetro medio del sedimento; x : coeficiente variable en función de d_m .

Se empleó como información de partida, la sección relevada en diciembre de 1982, la distribución de caudales observada en esa fecha y el caudal total medido en julio de 1983. Los valores resultantes del cálculo se presentan en la *Figura 2*.

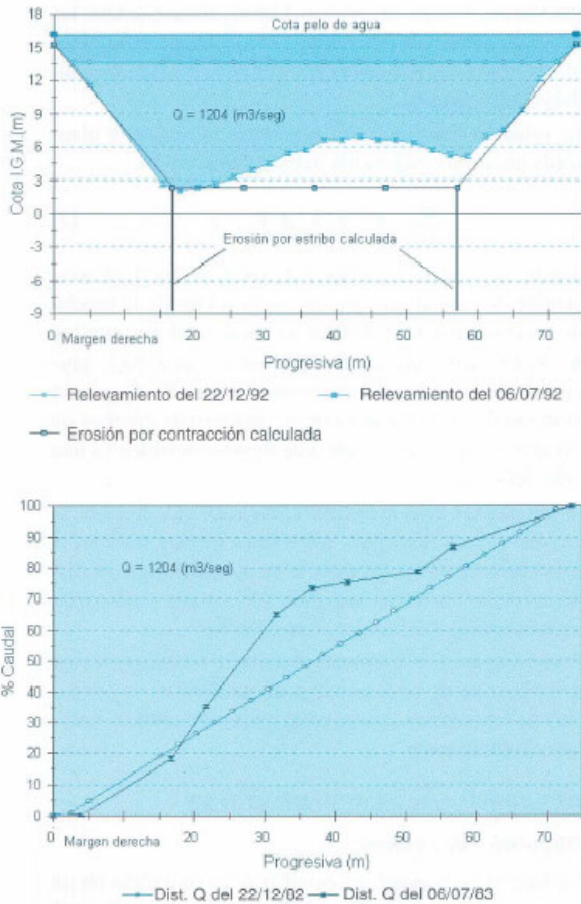


Figura 2. Puente aliviador N°4. Ruta Nacional 168

- a) Erosiones medidas y calculadas
- b) Distribuciones de caudales, crecida 1982/83

El efecto de erosión por estribo fue estimado a partir de la fórmula de Richardson *et al.* (1990), desarrollada para estribos largos (relación longitud del estribo L , profundidad h_1 mayor que 25), la cual se ajusta, en este

aspecto, a los cierres que los terraplenes carreteros producen en valles de inundación, como en el caso descripto de la Ruta Nacional N° 168:

$$y_e = 4h_1 Fr_1^{0,33} \quad (2)$$

donde, y_e : erosión en el estribo; h_1 : profundidad del escurrimiento en el tubo de corriente adyacente al estribo. Fr_1 : número de Froude en el tubo de corriente adyacente al estribo.

Si bien esta ecuación fue desarrollada para erosión con transporte de sedimentos, su uso es aconsejado por el U.S. Department of Transportation (1993), aún en el caso de erosión con agua clara, para aquellas situaciones de estribos largos, donde la longitud del mismo deja de ser un parámetro significativo. Los resultados se presentan en *Figura 2*.

La comparación de los valores calculados con los observados durante la crecida 1982/83, muestran una serie de discrepancias que van más allá del posible grado de ajuste de las ecuaciones empleadas. Surgen, a partir de aquí, una serie de consideraciones que se pueden resumir del siguiente modo:

- La magnitud de la erosión por contracción calculada se aproxima a las máximas erosiones observadas, sobreestimando en forma importante las profundidades de erosión medidas en el sector central de la sección.
- Las distribuciones de caudales medidas reflejan la influencia que la geometría de la sección tiene sobre la conformación de las mismas. En efecto, la sección inicial de profundidad constante a todo lo ancho, se corresponde con una distribución de caudales uniforme. En tanto las modificaciones impuestas a la sección, por los mecanismos erosivos actuantes, determinaron una distribución final, luego de producida la erosión, que difiere significativamente de la inicial considerada para el cálculo.
- La adición de la erosión por estribo a partir de la cota de erosión por contracción, arrojó erosiones totales calculadas que casi duplican las máximas observadas en la sección.

Estos hechos hicieron surgir dudas acerca de la validez de la secuencia de cálculo, habitualmente empleada, para la consideración de los distintos mecanismos de erosión que actúan en un puente aliviador en valle de inundación, particularmente en lo que refiere a:

- La evolución temporal de los procesos de socavación por contracción y por estribo.
- La influencia que tiene el desarrollo de las hoyas de erosión por estribo, sobre la distribución de caudales en la sección.
- El modo en que la redistribución de caudales en la sección afecta la erosión por contracción esperable fuera de las áreas de desarrollo de las hoyas de socavación local.

LA INFLUENCIA DE LA EROSIÓN POR ESTRIBO SOBRE LA REDISTRIBUCIÓN DE CAUDALES

Las distintas formulaciones para el cálculo de la erosión en estrechamientos de cauces (Lischtván y Lebediev, Juárez y Rico, 1984, Laursen, 1963, Blench, 1969), coinciden en señalar al caudal específico, q , como la variable determinante del escurrimiento en el proceso erosivo. En condiciones de erosión con agua clara, la profundidad media en la sección contraída, h_s , responde a la siguiente relación funcional (U.S. Department of Transportation, 1993)

$$h_s = \phi(Q, d_{50}, B) \quad (3)$$

donde, Q : caudal total en la sección del puente, d_{50} : mediana de la distribución de tamaños del sedimento del lecho; B : ancho de la sección contraída.

Las ecuaciones derivadas de la relación funcional (3) (Laursen, 1963), brindan la profundidad media en la sección, y sólo describen la geometría de la misma en el caso de una distribución uniforme de caudales. Esta condición raramente se da en la naturaleza, donde ya sea por las condiciones de aproximación del escurrimiento, por la geometría misma de la sección, o por el efecto concurrente de ambas causas, los caudales específicos varían a lo ancho de la sección y consecuentemente las erosiones esperables en la misma.

Conocida o adecuadamente estimada la distribución de caudales en la sección del puente, la relación funcional (3) se reduce a:

$$h_{s_i} = \phi(q_i, d_{50i}) \quad (4)$$

en la cual el subíndice i identifica la vertical de la sección transversal donde se está evaluando la erosión por contracción. La distribución de caudales en el puente puede ser fácilmente determinada a partir de metodologías que se basan en las ecuaciones del flujo uniforme, bajo el supuesto de invariabilidad del coeficiente de conducción ($I^{1/2}/n$) (Shearman, 1987).

Un aspecto central del análisis lo constituye la evolución temporal de la distribución de caudales. El hecho que el escurrimiento en el valle de inundación posea, aún en condiciones de crecidas extremas, tensiones de corte por debajo de la crítica, limita el problema de la erosión a la sección misma del puente y a los efectos aguas abajo producto de la contracción de la vena líquida. De este modo, es posible pensar que si no existen modificaciones en las condiciones del escurrimiento aguas arriba, la distribución de caudales del flujo de aproximación se podrá suponer constante durante todo el proceso. A nivel de la sección del puente, en cambio, el rápido desarrollo de los procesos de erosión local (Schreider *et al.*, 1996) producen modificaciones en la geometría de la sección que podrían afectar la distribución de caudales y, consecuentemente, variar la magnitud esperable de la erosión por contracción, respecto de la que resultaría de aplicar las formulaciones habituales de cálculo sin tener en cuenta adecuadamente este hecho.

En general, la metodología de cálculo propuesta para la evaluación de erosión en puentes (U.S. Department of Transportation, 1993), presupone el desarrollo de la

erosión por contracción en forma previa e independiente, con lo cual se descarta cualquier influencia que el desarrollo de las erosiones locales podría tener sobre la distribución de caudales actuante, y por ende sobre la erosión por estrechamiento. Esta consideración implica, como se mencionó en el punto anterior, una cierta contradicción con los datos de campo presentados en la *Figura 2*, en donde resulta apreciable la modificación sufrida en la distribución de caudales como consecuencia del desarrollo de las hoyas de socavación.

En síntesis, sobre la base de las explicaciones brindadas, la hipótesis de partida del presente trabajo se puede formular en los siguientes términos: En el caso de puentes aliviadores en valle de inundación, caracterizados por fuertes estrechamientos e importantes erosiones locales asociadas a la presencia de estribos, la distribución inicial de caudales en la sección del puente se modifica en virtud del desarrollo de la hoya de socavación, reduciendo, para igual caudal total, el porcentaje que escurre por la parte de la sección no afectada por el fenómeno erosivo del estribo. Como consecuencia, las máximas erosiones esperables a causa del estrechamiento, estarían condicionadas por la redistribución de caudales antes aludida.

La relación funcional que involucra la hipótesis planteada puede ser expresada del siguiente modo:

$$\frac{\%Q}{\%Q_0} = \phi_2(h_1, y_e, B_e, n_e) \quad (5)$$

donde, B_e ancho de la hoya de socavación; $\%Q$: porcentaje de caudal que escurre en el sector de la brecha no afectado por las hoyas de erosión local por estribo, $B - B_e$, luego de finalizado el proceso erosivo; $\%Q_0$: porcentaje de caudal que escurre en el ancho $B - B_e$, previo al inicio del proceso erosivo; n_e : número de estribos en los que se verifica erosión. Las demás variables ya han sido definidas.

No se incluye aquí la relación funcional que describe la erosión por estribo, pues a los fines de este trabajo, la socavación local es un dato, o se considera que se disponen de las formulaciones matemáticas apropiadas para su estimación, (Schreider *et al.*, 1996).

Para comprobar la hipótesis planteada, y hallar la forma de la función ϕ_2 , se desarrollaron una serie de experiencias de laboratorio, cuyos principales aspectos se señalan a continuación.

DESARROLLOS EXPERIMENTALES

Dispositivo de ensayos

La fase experimental del estudio se llevó a cabo en un cuenco de ensayos de 22 m de largo, 10 m de ancho y 1 m de profundidad (*Figura 3*), que posee el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. El cuenco presenta un sector de ingreso a fondo fijo de 6,5 m de desarrollo. A partir de allí se ubica el lecho móvil con una extensión longitudinal de

11 m, un ancho igual al del cuenco y un espesor de 0,5 m. La parte final está conformada por otro sector a fondo fijo de características similares al de ingreso, en cuyo extremo de aguas abajo se encuentra una trampa de sedimentos previo a la compuerta de regulación de niveles que se extiende a todo lo ancho del cuenco. La sección que define el estrechamiento se ubicó a 12,5 m del cuenco (Figure 3). La conformación de la estructura de cierre metálicos de geometría prismática. Los módulos fueron dispuestos en el cuenco de manera de generar una brecha única centrada de 3 m de ancho, sin pilas intermedias y con estribos de pared vertical. (Figura 4).

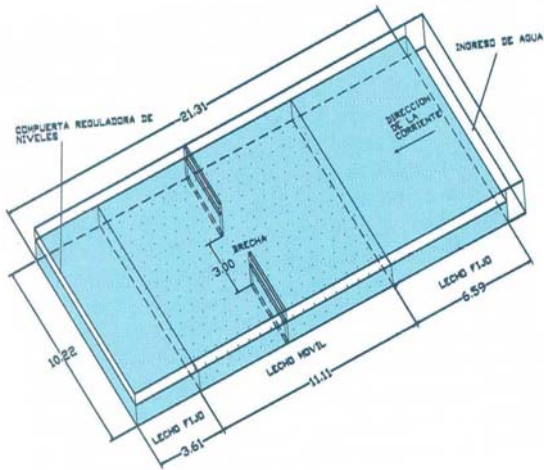


Figura 3. Esquema del cuenco de ensayos

Secuencia de experimentos

Ensayos preparatorios

Se comenzó llevando a cabo un par de ensayos preparatorios cuyo propósito fue lograr una primera visualización de la acción conjunta de los mecanismos actuantes, que complementarían los datos de campo descripto al analizar el problema de los puentes aliviadores en valle de inundación. Los parámetros hidráulicos y sedimentológicos característicos de los ensayos fueron los siguientes:

	Ensayo 1	Ensayo 2
Ancho Brecha(m)	3,0	2,5
Prog. sección transversal (m)	4,0 – 7,0	0,0 – 2,5
Cantidad de estribos	2	1
Q(m ³ /s)	0,180	0,220
d ₅₀ (mm)	0,40	0,55
(τ ₀ /τ _{cr}) _{aprox.}	0,57	0,55
(τ ₀ /τ _{cr}) _{brecha}	5	5

Durante la realización de los experimentos, paralelamente al seguimiento de la evolución de las erosiones, se efectuaron mediciones de velocidad por la vorticidad producida por la presencia del estribo. Estas mediciones, secuenciales durante los experimentos, permitieron evaluar los cambios que podían ocurrir en la

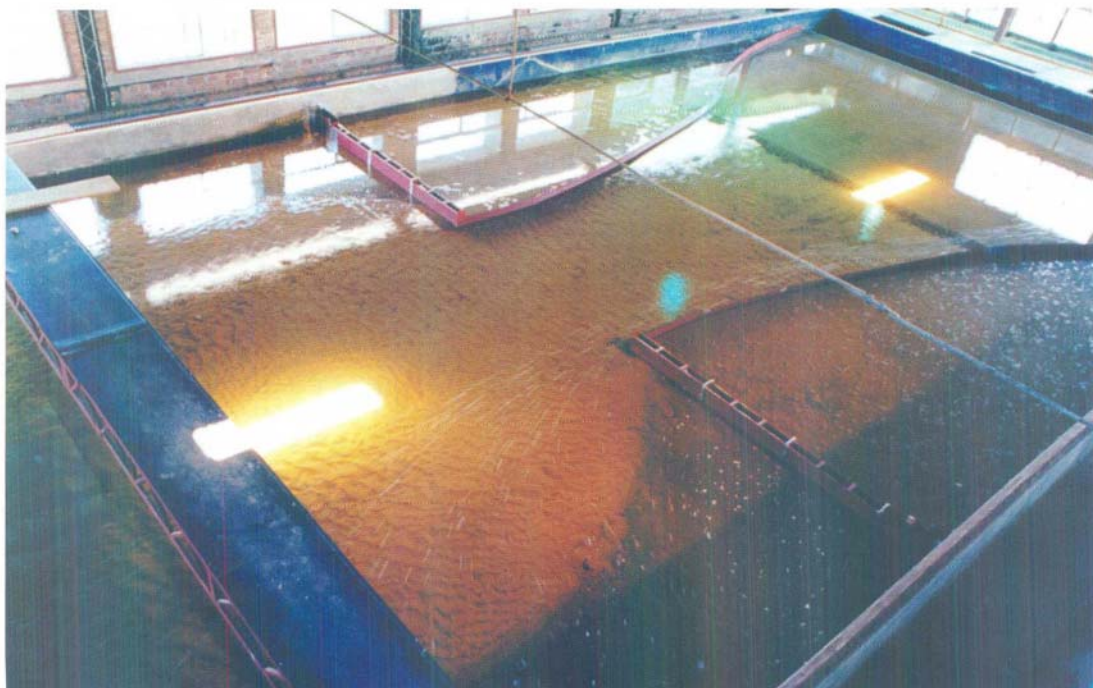


Figure 4. Vista general del cuenco

distribución de caudales como consecuencia del desarrollo del proceso erosivo. En ambos casos el ancho de la brecha fue siempre tal que asegurara que el desarrollo de la fosa de erosión local no interfiriera totalmente su ancho. En razón de ello, en el segundo de los ensayos preliminares, con menor ancho de brecha, la misma se ubicó sobre un costado del cuenco, de manera de configurar un único estribo. Las Figuras 5 y 6, muestran los resultados alcanzados. En particular, son apreciables las modificaciones sufridas por las curvas de distribución de caudales a lo largo del proceso. Estas primeras evidencias experimentales, guiaron el diseño de los ensayos posteriores, cuyas principales características se describen a continuación.

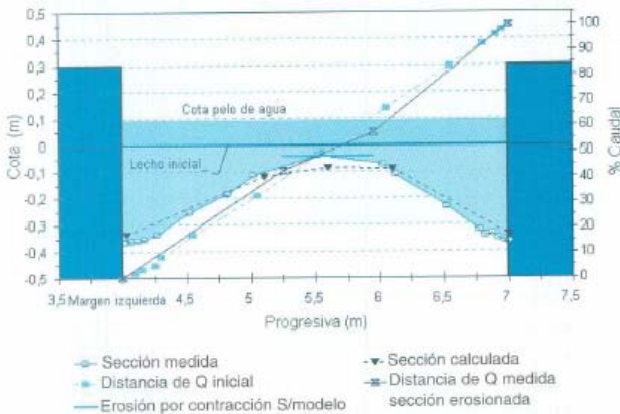


Figura 5. Ensayo preparatorio N°1. Sección final de erosión y curvas de distribución de caudal

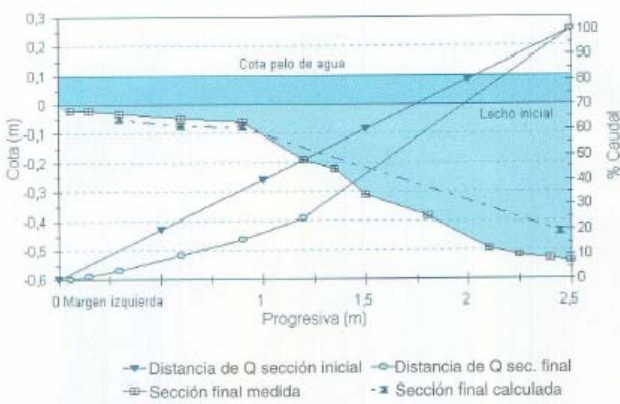


Figura 6. Ensayo preparatorio N°2. Sección final de erosión y curvas de distribución de caudal

Inclusión de muros de guía

En función de los objetivos planteados, se planificó una secuencia experimental en donde los parámetros hidráulicos y sedimentológicos se mantuvieron constantes, modificándose solamente la geometría en planta del flujo de aproximación, de modo de impedir la ocurrencia de erosión local en uno o los dos estribos. Los parámetros básicos que permanecieron constantes a lo largo de la serie de ensayos fueron los siguientes:

- Ubicación en planta de la sección de cierre
- Ancho ($B = 3 \text{ m}$) de la brecha considerada

- Ubicación de la brecha en la sección transversal
- Granulometría ($d_{50} = 0,25 \text{ mm}$) del material del lecho
- Relación altura - caudal en la sección de control aguas abajo
- Caudal de ensayo ($Q = 0,180 \text{ m}^3/\text{s}$) para la obtención del estado de equilibrio sedimentológico

Con estas condiciones de partida se llevaron a cabo tres secuencias de ensayos.

Colocación de dos muros de guía

Esta secuencia de ensayos tuvo como objetivo evaluar los parámetros hidráulicos y las erosiones ocurridas en la sección de la brecha, debidas únicamente al aumento de la capacidad de transporte, producida por la reducción del ancho. Para ello fue necesario construir una transición gradual entre la sección de ingreso al cuenco y la sección de la brecha. El diseño de la transición se hizo de acuerdo a las sugerencias dadas por Chow (1959). El dispositivo de ensayo se puede apreciar en Figura 4. El tiempo de la experiencia fue de 48 horas. Durante el desarrollo del experimento se relevo, en distintos momentos de tiempo, la evolución de los niveles del lecho en la sección de la brecha. Para la condición final de equilibrio se midió con detalle la morfología del lecho en toda el área a fondo móvil, efectuándose paralelamente determinaciones de las distribuciones de caudales que se verificaban en la sección de la brecha y en diferentes secciones transversales ubicadas aguas arriba y abajo del estrechamiento.

Colocación de un único muro de guía

Para este ensayo se quitó uno de los muros de guía, de modo de provocar la erosión local en un único estribo (Figura 7). Se pretendió, por un lado, conocer como se modificaba la geometría de la sección final de erosión respecto del ensayo anterior y por otro, determinar como el desarrollo de la hoya de erosión local influía sobre el porcentaje de caudal que escurría por el metro central de la brecha, no afectado por la socavación del estribo. Esto último requirió conocer la relación de los parámetros de la corriente con la morfología del lecho, situación difícil de relevar adecuadamente durante el proceso normal de conformación de la hoya de erosión. En efecto, el acelerado desarrollo de la socavación local por estribo, dificultaba asociar los porcentajes de caudal medido con las profundidades de erosión local observadas. Por dicho motivo se decidió llevar a cabo una secuencia de ensayos con caudales crecientes desde un límite inferior, sin efecto apreciable de erosiones locales, hasta un máximo equivalente al caudal de diseño adoptado para el ensayo con dos muros guías. Cada uno de los caudales se dejó escurrir el tiempo suficiente para asegurar condiciones de equilibrio de los parámetros hidráulicos. En lo que se refiere al desarrollo de la hoya de erosión por estribo, el tiempo de ensayo en cada escalón de caudal, si bien no aseguraba el equilibrio de la profundidad de erosión, ésta presentó variaciones poco significativas (inferiores a 5 mm)



Figura 7. Ensayo con un muro guía

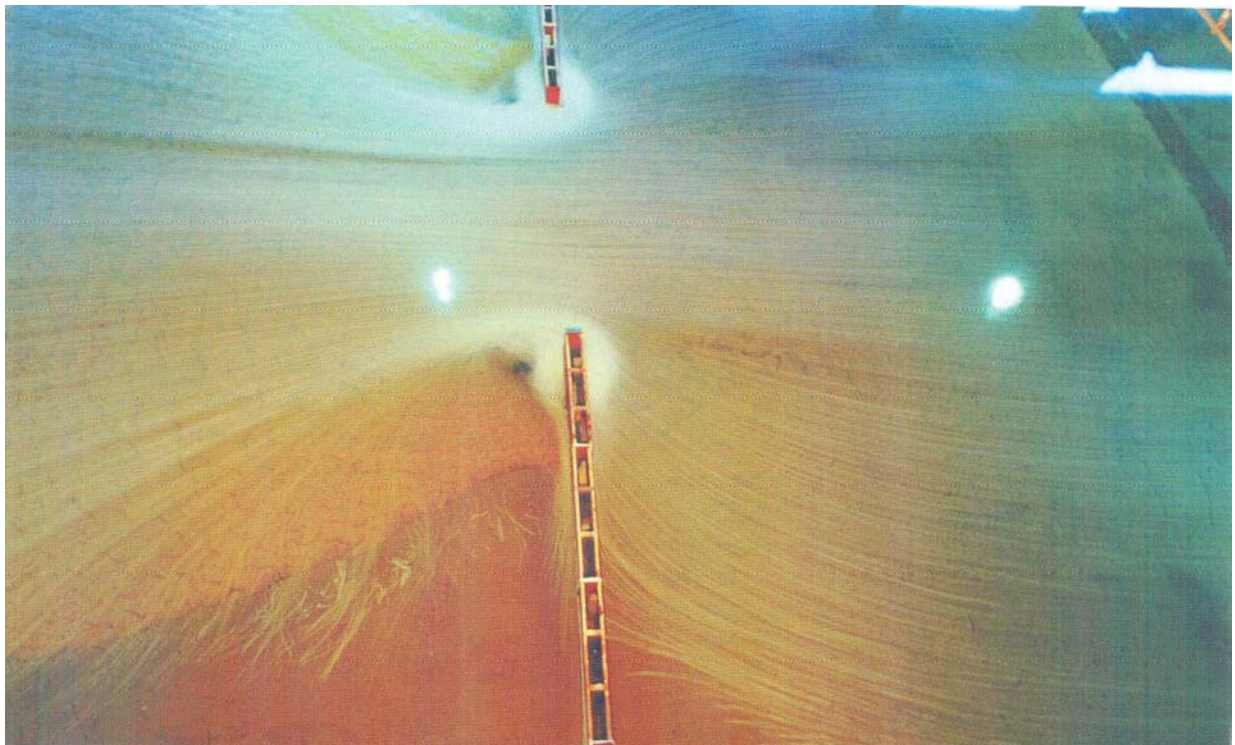


Figura 8: Ensayo sin muros guía

durante el tiempo de medición de los parámetros hidráulicos. En promedio los tiempos de las corridas para cada caudal oscilaron entre 3 y 4 horas. El máximo caudal ($Q = 0,180 \text{ m}^3/\text{s}$), se dejó escurrir hasta el momento en que no se apreciaron variaciones impor-

tantes de la profundidad de erosión, lo cual requirió un tiempo total de 30 horas, que se puede considerar apropiado (Kandasamy, 1989, Shreider *et al.*, 1996). La secuencia de caudales empleados fue la siguiente:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= 0,048 \text{ m}^3/\text{s} & Q_2 &= 0,079 \text{ m}^3/\text{s} \\
 Q_3 &= 0,095 \text{ m}^3/\text{s} & Q_4 &= 0,115 \text{ m}^3/\text{s} \\
 Q_5 &= 0,140 \text{ m}^3/\text{s} & Q_6 &= 0,180 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Al final del intervalo de aplicación de cada uno de estos caudales se determinó:

- La profundidad máxima en la hoya de erosión asociada al estribo,
- El perfil transversal de la sección de la brecha,
- El caudal que escurrió por la brecha fuera de la hoya de erosión.

Para la situación final equilibrio, con el máximo caudal, se llevaron a cabo idénticas mediciones que las señaladas en el ensayo con dos muros guía.

Ensayo sin muros guía

La remoción de las dos márgenes guía (Figura 8), determinó una geometría similar a la de la primera corrida de la etapa preparatoria. Sin embargo, su objetivo en esta circunstancia se encuadró como una continuidad de los aspectos analizados en la secuencia de ensayos con un muro guía. El hecho de contar con dos estribos permitió concebir al experimento como una maximización de los efectos locales respecto de la condición anterior, y como la situación diametralmente opuesta a la observada en el ensayo con dos muros guía. Para lograr una buena comparación con la situación anterior, se repitió la misma secuencia de ensayos. Esto es: iguales escalones de caudal, caudal máximo, tiempo total de la experimentación, grilla de relevamientos y densidad y ubicación de las secciones de medición de parámetros hidráulicos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los experimentos realizados han permitido evaluar los dos efectos principales planteados en los objetivos del presente trabajo. Esto es, la modificación de la geometría de la sección de erosión en función de la presencia o no de los muros de aproximación, y los cambios en la distribución de caudales, y consecuentemente en las erosiones por contracción, asociados al desarrollo de las socavaciones locales en los estribos. De aquí ha resultado un ajuste empírico de la relación funcional (5) que permite una primera estimación de las modificaciones que sufren las distribuciones de caudales en la brecha como consecuencia de este proceso. Sobre esta base y una vez analizadas las discrepancias entre los valores observados y los resultantes de los modelos de cálculo, se ha propuesto un procedimiento a seguir para evaluar las erosiones totales en la sección de emplazamiento de un puente aliviador con marcado estrechamiento del escurrimiento de aproximación. En lo que sigue se analizan estos aspectos.

Modificación de la geometría de la sección de erosión

En la Figura 9 se reproducen las secciones finales de erosión en la brecha para las tres situaciones ensaya-



Figura 9. Secciones finales de erosión

das. Resulta evidente de la comparación de resultados, que en la medida que una mayor parte de la sección se encuentra afectada por la erosión por estribo, la magnitud de la erosión en el sector central de la sección (efecto de contracción) se torna progresivamente decreciente. En este sentido, la máxima erosión en el centro de la brecha, de aproximadamente 11 cm para la situación con dos muros guías, se redujo a la mitad cuando se permitió la erosión de un estribo, y a un 25% de la primera cuando se retiraron ambos muros guías. Los parámetros hidráulicos y sedimentológicos característicos de los ensayos fueron los mismos. Los resultados de la Figura 9 constituyen una evidencia importante acerca de la interrelación que existe entre ambos tipos de erosión, sugiriendo la inconveniencia de considerar a dichos procesos en forma independiente, lo cual conduce a la clásica suma lineal de efectos.

Respecto de la secuencia de ocurrencia de los dos mecanismos de erosión considerados, en la Figura 10 se presenta la curva de evolución temporal de la erosión por contracción correspondiente a la corrida con dos muros guía, y la curva de evolución de la erosión por estribo correspondiente al experimento preparatorio 1. En ambos casos el caudal fue el mismo. Los resultados muestran la mayor tasa de crecimiento del fenómeno de erosión local, que rápidamente adquiere valores próximos al de

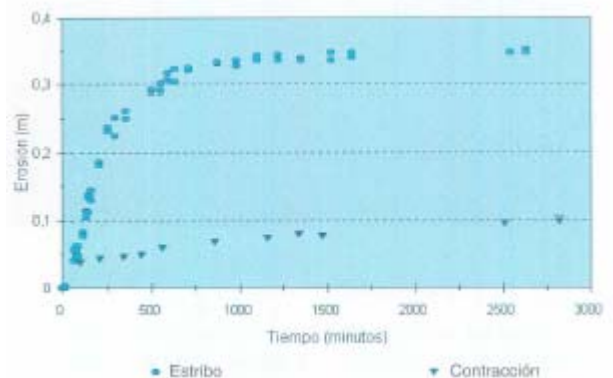


Figura 10. Evolución temporal de las erosiones por contracción y por estribo

equilibrio, en tanto que la erosión por contracción presenta una tasa de variación que conduce a tiempos, próximos a la condición de equilibrio, significativamente mayores. (Schreider *et al.*, 1996, Dongol, 1994).

La evolución mostrada en la *Figura 10*, sumada a los resultados de la *Figura 9*, permiten suponer que existe un condicionante en el desarrollo de la erosión por contracción, que estaría dado por la magnitud alcanzada por la erosión por estribo. Esta vinculación debiera verse reflejada en el proceso de cálculo de las socavaciones totales esperables en un puente aliviador en valle de inundación.

Modificación de la distribución de caudales

La reducción de las profundidades de erosión fuera de las hoyas de socavación provocada por los estribos, se relaciona a una disminución del caudal específico actuante. Para estudiar este efecto de redistribución de caudales y sus consecuencias sobre las profundidades de erosión, se partió de la situación mas conocida y fácilmente reproducible por las formulaciones y herramientas de modelación habitualmente disponibles. Esto es, la condición de erosión con la presencia de los dos muros guía (*Figura 4*). En tal circunstancia sólo tiene lugar el mecanismo de erosión por contracción, cuya magnitud fue estimada a través de un modelo cuasibidimensional por tubos de corriente (Molinas, 1994). En la *Figura 11* se reproduce el lecho en la sección de la brecha para la condición inicial del ensayo y para la situación final de equilibrio. Se observa que las erosiones calculadas ajustan adecuadamente los valores observados tanto a nivel de la sección del estrechamiento (*Figura 11*), como en un perfil longitudinal por el eje del cuenco (*Figura 12*). Se han incluido en esta última figura los resultados de un modelo de balance (Prendes *et al*, 1992), en el cual la distribución de caudales se ha estimado en base a la geometría de la sección para la situación inicial sin erosión (Shearman, 1987). Los resultados obtenidos subestiman a los observados.

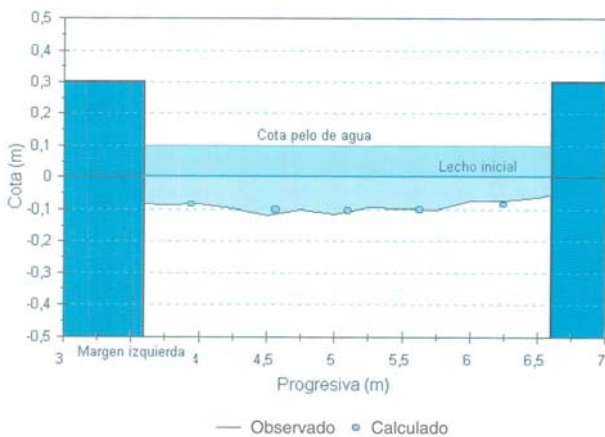


Figura 11. Ensayo con muros guía. Erosiones medidas y calculadas

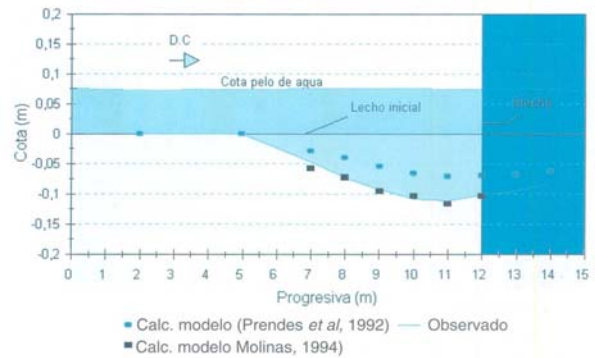


Figura 12. Ensayos con muros guía. Perfil longitudinal del eje del cuenco. Erosiones medidas y calculadas

En la *Figura 13* se presenta la curva de distribución de caudales medida y las calculadas: por el modelo matemático (Molinas, 1994), y a partir de la geometría de la sección inicial (ecuación de Manning). Los resultados muestran que el grado de ajuste de los valores observados de erosión se vincula estrechamente con la correcta reproducción de la distribución de caudales medida.

El modelo matemático por tubos de corriente (Molinas, 1994), se aplicó luego al ensayo sin muros guía (*Figura 8*). La sección de erosión obtenida en este caso (*Figura 14*) resultó similar a la calculada con igual modelo para los datos del ensayo con dos muros guía (*Figura 11*). Ello podría deberse a que si bien el modelo lleva a cabo una estimación de las erosiones locales, lo hace en forma desacoplada del cálculo de erosiones por incremento de la capacidad de transporte. Esto es, no considera que la presencia de las hoyas de socavación por estribo puedan alterar la distribución de caudales en la sección de la brecha. Lo dicho queda evidenciado en la *Figura 14* donde se superponen las distribuciones de caudales calculadas por el modelo, para tres tubos de corriente, en uno y otro caso.

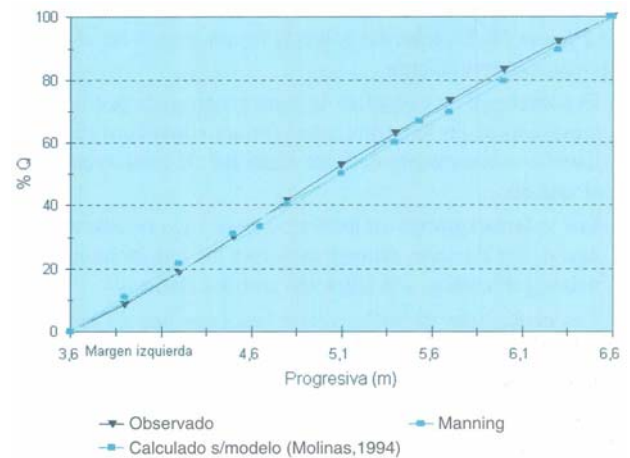


Figura 13 Ensayo con dos muros guía. Distribuciones de caudal.

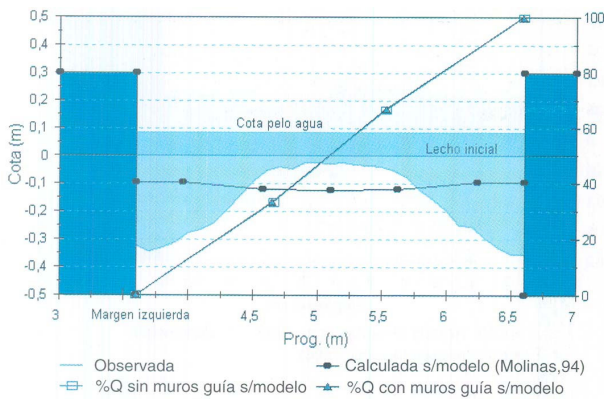


Figura 14. Ensayo con muros guía. Erosiones medidas y calculadas. Curvas de distribución de caudal

Las evidencias experimentales y computes presentados, muestran la vinculación que existe entre los dos elementos de análisis planteados en ese trabajo. Esto es la redistribución de caudales debida a la presencia de la erosión por estribo, y la consecuente reducción de la erosión por contracción como consecuencia de aquella.

Ajuste experimental de la relación de redistribución de caudales

La definición de la forma de la función (5) se llevó a cabo empleando los resultados experimentales presentados. Como se mencionara, en el desarrollo de las experiencias se mantuvo constante el ancho B, de la brecha, con lo que la relación funcional se puede expresar como:

$$\frac{\%Q}{\%Q_0} = \phi_3(h_1, y_e, B_e, n_e) \text{ para } B = cte. \quad (7)$$

Es sabido que el ancho de la hoya de socavación, B_e , es función de su máxima profundidad, con lo que la expresión anterior se puede reducir a:

$$\frac{\%Q}{\%Q_0} = \phi_4(h_1, y_e, n_e) \text{ para } B = cte. \quad (8)$$

El ajuste experimental de la relación (8) se presenta en la Figura 15. En relación con esta figura surgen las siguientes observaciones:

- El porcentaje de caudal en la zona no afectada por la erosión local, presenta una reducción aproximadamente lineal con el aumento de la profundidad de erosión en el estribo.
- Los valores agrupan su tendencia según se considere uno o dos estribos, correspondiendo las reducciones más significativas a la situación con dos estribos.
- Las ecuaciones de mejor ajuste en cada una de las situaciones consideradas fueron las siguientes:

Un estribo:

$$\frac{\%Q}{\%Q_0} = -0,104 \frac{(h_1 + y_e)}{h_1} + 1,128; \quad R^2 = 0,92 \quad (9)$$

Dos estribos:

$$\frac{\%Q}{\%Q_0} = -0,114 \frac{(h_1 + y_e)}{h_1} + 1,135; \quad R^2 = 0,82 \quad (10)$$

Las ecuaciones (9) y (10) pueden ser reunidas en una única expresión a condición de incluir el numero de estribos, n_e , como una variable

$$\frac{\%Q}{\%Q_0} = -0,104n_e^{0,147} \frac{(h_1 + y_e)}{h_1} + 1,132 \quad (11)$$

La constante 1,132 resulta del promedio de las constantes de las ecuaciones (9) y (10).

Las limitaciones del desarrollo experimental realizado, sumado al interés de demostrar una tendencia de comportamiento del fenómeno, aconsejaron efectuar un ajuste a la totalidad de los datos considerados. La ecuación de mejor ajuste obtenida en este caso fue la siguiente:

$$\frac{\%Q}{\%Q_0} = -0,1173 \frac{(h_1 + y_e)}{h_1} + 1,147; \quad R^2 = 0,82 \quad (12)$$

Los resultados presentados en la Figura 15 ponen de manifiesto la dependencia que tiene la distribución de caudales en la sección de la brecha, respecto de la profundidad de erosión local por estribo. En efecto, se ha podido determinar, a partir de la experimentación, que para las máximas socavaciones locales observadas, el porcentaje de caudal que escurre en el sector central de la brecha, no afectada por la presencia de la hoya de erosión, es aproximadamente la mitad del que se verificó al comienzo del proceso de erosión.

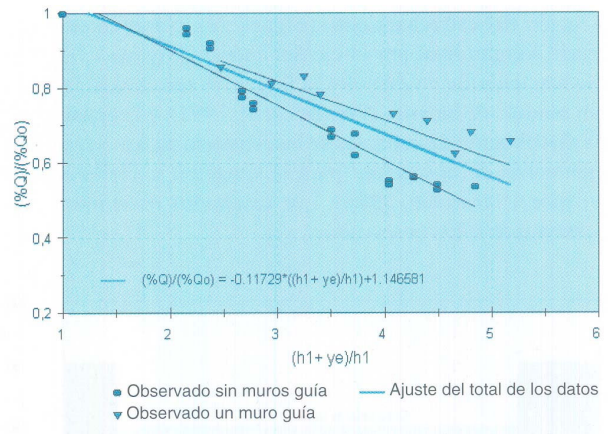


Figura 15. Relación de redistribución de caudales

Secuencia de cálculo propuesta

Se ha demostrado experimentalmente que en contracciones significativas, como las que se verifican en los sitios de emplazamientos de puentes aliviadores en valle de inundación, la magnitud de la erosión por contracción se encuentra condicionada por el desarrollo de la socavación por estribo. Se desprende de aquí, que no parecería aconsejable aplicar las metodologías de cálculo señaladas en la literatura (U.S. Department of Transportation,

1993) que proponen una secuencia en la cual se evalúa primeramente la erosión por contracción, y luego la socavación local, desarrollada a partir de la primera. Este último esquema fue el que se aplicó al caso del puente aliviador 4 (Figura 2), habiéndose ya señalado la importante sobreestimación de los valores de erosión calculados, con respecto a los efectivamente medidos.

El análisis efectuado a partir de los resultados experimentales presentados, sumado a las evidencias de campo mencionadas, estarían mostrando una secuencia de desarrollo del proceso erosivo distinta de la considerada comúnmente en la literatura. Sobre esta base se propone un procedimiento de cálculo que contemple las particulares condiciones que involucra la evolución de las erosiones en un puente aliviador caracterizado por una significativa contracción del escurrimiento. El mismo contempla los siguientes pasos:

- Cálculo de los parámetros hidráulicos, correspondientes al caudal de diseño, característicos de la sección de emplazamiento del puente y del escurrimiento de aproximación, para la situación inicial sin erosión.
- Cálculo de la erosión por estribo en base a los parámetros hidráulicos obtenidos en (a).
- Delimitación de la hoya de erosión por estribo, considerando un ancho B_e igual a 2,7 veces la profundidad de socavación calculada en (b) (U.S. Department of Transportation, 1993).
- Con la profundidad en la sección del estrechamiento adyacente al estribo h_1 calculada en (a), y la socavación por estribo h_e , calculada en (b), se obtiene a partir de una relación funcional como la planteada en Figura 15, el porcentaje de reducción de caudal que escurre en la zona central del estrechamiento no afectada por las hoyas de erosión.
- Con el nuevo caudal obtenido en (d) se calcula la erosión por contracción en el sector de la brecha no afectada por la influencia de los estribos.

El procedimiento de cálculo propuesto se aplicó a las erosiones observadas durante la crecida de 1982/83 en el aliviador 4 de la Ruta Nacional N° 168. El hecho de que la relación entre la luz del puente B , y el ancho de la hoya de erosión por estribo B_e , a nivel de la cota de erosión por contracción, fuera semejante a la observada en los experimentos de laboratorio, permitió el empleo de la curva de ajuste brindada por la ecuación 12 (Figura 15). Las ecuaciones para estimar la erosión por contracción y por estribo, fueron las mismas que se emplearon en la aplicación del procedimiento convencional y cuyos resultados se presentan en la Figura 2. Los resultados obtenidos a partir de la secuencia de cálculo propuesta se presentan en la Figura 16. La distribución inicial de caudales medida, resultó prácticamente uniforme (Figura 2), lo cual permitió aplicar el coeficiente de reducción directamente al caudal específico q , considerado constante a lo ancho de la sección al comienzo de la erosión. Los valores calculados ajustan adecuadamente las erosiones medidas en la sección del puente (Figura 16).

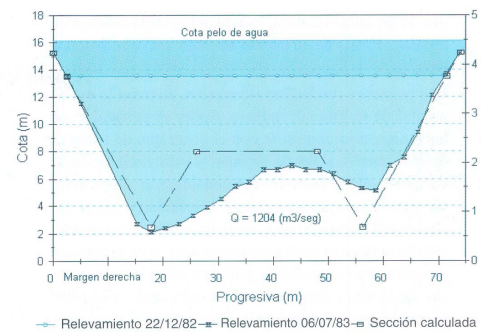


Figura 16. Aplicación de la secuencia de cálculo propuesta al puente aliviador N°4, Ruta Nacional 168.

CONCLUSIONES

- La aplicación de la secuencia habitual de cálculo sugerida en la literatura (U.S. Department of Transportation, 1993), a la estimación de las erosiones totales en un puente aliviador del valle de inundación del río Paraná (Argentina), arrojó valores notoriamente superiores a los máximos observados durante la crecida extraordinaria de los años 1982/83.
- Las mediciones de caudal efectuadas en la sección de los puentes aliviadores de la Ruta Nacional N° 168 durante el desarrollo de la crecida de 1982/83, brindaron una primera evidencia sobre la influencia que tiene la evolución de la sección de erosión sobre la distribución de caudales en la misma (Figura 2).
- El desarrollo de las experiencias de laboratorio realizadas, con motivo de este trabajo, permitieron corroborar parcialmente la hipótesis de partida. Al respecto, se puso en evidencia la dependencia funcional que existe entre la redistribución de caudales en la sección, el tamaño de la hoya de socavación local y el número de estribos en que se verificó erosión.
- El ajuste de los datos experimental mostró una reducción aproximadamente lineal del porcentaje de caudal que escurre en el sector central de la brecha, no afectado por las hoyas de erosión, con el aumento de la profundidad de socavación por estribo (Figura 15).
- La influencia observada de la erosión local por estribo sobre la distribución de caudales en la totalidad de la sección, sugirió una modificación de la secuencia habitual de cálculo señalada en la bibliografía especializada (U.S. Department of Transportation, 1993). La secuencia propuesta mostró un buen ajuste de las erosiones calculadas en su aplicación a los datos de campo relevados en el Puente Aliviador N° 4 de la Ruta Nacional N° 168 durante la crecida extraordinaria 1982/83 (Figura 16).
- La comparación de los resultados de Figura 16 con los que se presentan en Figura 2, pone en evidencia que la adición lineal de las erosiones por contracción y por estribo, puede conducir a importantes sobreestimaciones de las cotas finales

de socavación en la sección de emplazamiento de un puente aliviador en valle de inundación.

7. Los primeros resultados alcanzados alientan la continuidad de la línea de trabajo. Sobre el particular se hace necesario continuar con el programa de ensayos de laboratorio, a fin de evaluar la influencia de otras variables cuyo efecto no fue considerado a este nivel del estudio, como por ejemplo la relación entre el ancho de la brecha y el de la hoya de erosión. Asimismo, resulta necesario profundizar el marco conceptual que describe el proceso físico, para lo cual se hace necesario mediciones detalladas de la estructura tridimensional del escurrimiento en las proximidades del estribo. Por último, se desea resaltar la importancia de contar con más y mejores mediciones de campo, especialmente durante crecidas extraordinarias. Los datos así obtenidos conformarían una base de información que convertirían al prototipo en el mejor laboratorio que podría disponer un estudio experimental, como el aquí propuesto.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Litoral quien financió, por medio de los Cursos de Acción para la Investigación y Desarrollo (CAI+D), el Proyecto de Investigación en el marco del cual se desarrolló este trabajo. Al Ingeniero Mario L. Amsler, por su revisión crítica del manuscrito original

LISTA DE SIMBOLOS

- B : Ancho de la sección contraída
 B_e : Ancho de la hoya de socavación
 C_c : Coeficiente de contracción
 d_m : Diámetro medio de sedimento (mm)
 d_{50} : Mediana de la distribución de tamaños del sedimento del lecho
 Fr_l : Número de Froude en el tubo de corriente adyacente al estribo
 h_s : Profundidad de equilibrio
 h_l : Profundidad del escurrimiento en el tubo de corriente adyacente al estribo
 I : Pendiente de energía
 n : Coeficiente de rugosidad de Manning
 n_c : Número de estribos en los que se verifica erosión
 Q : Caudal total en la sección del puente
 $\%Q$: Porcentaje de caudal que escurre en el sector de la brecha no afectado por las hoyas de erosión local por estribo, $B - B_e$ luego de finalizado el proceso erosivo.
 $\%Q$: Porcentaje de caudal que escurre en el ancho $B - B_e$, previo al inicio de proceso erosivo
 q : Caudal específico
 x : Coeficiente variable en función de d_m
 y_e : Erosión en el estribo
 β : Coeficiente que depende de la frecuencia de las crecidas.

- τ_v : Tensión de corte de fondo
 τ_c : Tensión de corte crítica

REFERENCIAS

- Blench, T., (1969) Mobile-bed fluviology. University of Alberta Press, Canada, 168 p.
 Chow, V.T., (1959) Open Channel Hydraulic. McGraw-Hill Book Company, New York, 680 p.
 Dongol, D. M. S., (1994) Local scour at bridge abutment. Report N° 544, Department of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, 410 p.
 Juarez Badillo, E. y Rico Rodriguez, A., (1984) Mecánica de Suelos. Tomo III, *Flujo de Agua en Suelos*, Editorial Limusa, 414 p.
 Kandasamy, J.K., (1989) Abutment scour. School of Engineering Report N° 458, University of Auckland, Auckland, 278 p.
 Laursen, E. M., (1960) Scour at bridge crossings, Proceedings ASCE 86 (HY 2). pp. 39 - 54.
 Laursen, E. M., (1963) Analysis of relief bridges scour, ASCE, Journal of the Hydraulics Division, vol. 89, HY 3, pp. 93-118.
 Molinas, A., (1994) Bridge stream tube model for alluvial river simulation (BRISTARS). User Manual. National Cooperative Highway Research Program, Project N° HR15-11A, Transportation Research Board, Washington, D.C., 82 p.
 Prendes, H., Amsler, M.L., Schreider, M.I., Huespe, J., Cian, C. y Lima, D., (1992) Metodología para calcular el volumen sedimentado en un paso de navegación, Anales de XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena, Vol. 3, pp. 195-205.
 Richardson, E.V., Simons, D.B. y Julien, P., (1990) Highway in the river environment. FHWA-HI -90-016, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. 549 p.
 Schreider, M., Zanardi, L., Scacchi, G. y Franco, F., (1996) Interacción entre la erosión por contracción y por estribo en puentes aliviadores en valle de inundación – Estudio experimental, Anales del XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Guayaquil, Vol 4, pp. 363 - 374.
 Shearman, J.O., (1987) Bridge waterways analysis model for mainframe and microcomputers. WSPRO/ HY-7, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 177 p.
 U.S. Department of Transportation, (1993) Hydraulic Engineering Circular, N° 18, Evaluating scour at bridges. 2° Edition. Report N° FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 132 p.