

EROSIÓN EN ESTRIBOS DE PUENTES ALIVIADORES

Graciela Scacchi¹, Pablo Spalletti², José Daniel Brea², Mario Schreider¹ y Ramón Fuentes Aguilar³

Resumen:

En este trabajo se vuelcan parte de los esfuerzos realizados por investigadores de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral y del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua para estudiar la erosión junto a estribos de puentes aliviadores durante la última década en Argentina.

Por una parte, estudios experimentales demostraron que las erosiones locales en estribos de puentes aliviadores, cuando estos son de paredes verticales, dependen tanto de las condiciones iniciales del escurrimiento junto a él, como del proceso de redistribución de caudales que se produce durante su desarrollo. Este último fenómeno pudo ser adecuadamente evaluado mediante la incorporación del ancho del puente como variable fundamental en el análisis, la que caracteriza al proceso en su conjunto como un típico fenómeno en planta

Por otro lado, se describieron los procesos de erosión local por efecto de los vórtices de eje horizontal y vertical y de erosión por contracción, en estribos no verticales, de uso frecuente en puentes aliviadores. Mediante estudios en modelos físicos, se analizaron cómo es el flujo líquido y se describe la configuración del lecho tras el pasaje de crecidas, indicando la importancia relativa de los diferentes procesos erosivos.

Palabras clave: erosión, estribo, distribución de caudales

INTRODUCCIÓN

Las estadísticas demuestran que la principal causa de falla de puentes radica en inadecuados diseños de sus fundaciones, los cuales no tienen debidamente en cuenta los procesos erosivos que se desarrollan en torno a las mismas.

Los investigadores e ingenieros de numerosos países han dedicado enormes esfuerzos al análisis de los distintos mecanismos de erosión actuantes en sitios de puentes, siendo las erosiones por contracción y la local por pilas las que mayoritariamente han concentrado la atención de los especialistas. En lo que respecta a la erosión junto a los estribos del puente, si bien su desarrollo es más limitado, la mayoría de los estudios realizados se corresponden con puentes ubicados en un cauce principal, con muy pocas contribuciones que consideran canales de sección compuesta como un modo de contemplar las particularidades del flujo en el encuentro cauce - planicie (Melville 1995, Sturm y Janjua, 1993, Ettema 2003).

Los puentes aliviadores emplazados en valles de inundación, distantes de un cauce definido, han recibido una dedicación notoriamente menor. Esta situación, probablemente, ha sido el resultado de la concurrencia de dos factores: una menor relevancia económica, medida en términos de los costos de construcción asociados a este tipo de obras, y la existencia de un fenómeno que se presenta como de mayor complejidad, en función de las características del problema. En efecto, la conjunción “terraplén – puente aliviador”, y la particular configuración de la corriente tanto en la zona de aproximación, aguas arriba del puente, como en la sección misma de éste, brindan al caso de referencia características particulares. La física involucrada en el problema, al tiempo que incrementa el número de variables que intervienen, exige que, para su adecuada representación en laboratorio, se cuente con dispositivos de experimentación de grandes dimensiones, habitualmente no disponibles.

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral – Santa Fe – Argentina. E-mail: gscacchi@fich1.unl.edu.ar

² Programa de Hidráulica Fluvial - Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua Argentina. E-mail: pspallet@ina.gov.ar

³ Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia (IM2) - Santiago - Chile. E-mail: rfuen004@zim2.codelco

Artículo recibido el 3 de octubre de 2003, recibido en forma revisada el 26 de noviembre de 2004 y aceptado para su publicación el 14 de diciembre de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las “Instrucciones para autores”. En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

La importancia económica de la región litoral fluvial de Argentina, y la presencia en ella de grandes ríos de llanura como el Paraná, imponen un marco de referencia al estudio de los procesos erosivos en puentes aliviadores poco habitual en la bibliografía. Sobre este particular se destacan los esfuerzos desarrollados en la última década por investigadores de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, y del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina. Estos grupos han trabajado en forma independiente con enfoques diferenciados pero atendiendo a una misma necesidad.

Las experiencias que a continuación se exponen, son claros ejemplos de los avances logrados y muestran distintas facetas del problema que son abordadas con metodologías diferentes, acordes en cada caso a los objetivos perseguidos, pero que tienen en común el interés por avanzar en el conocimiento de la erosión local en estribos.

La optimización de los trabajos de investigación en desarrollo, la profundización en el entendimiento del fenómeno en estudio, y la necesidad de traducir ese mayor conocimiento en criterios de diseño factibles de extrapolar a la práctica profesional, exige redoblar los esfuerzos hasta aquí realizados. Con este objetivo se encuentra en ejecución un Proyecto de Investigación en Red titulado "Desarrollo de metodologías para el diseño hidráulico de estructuras viales" financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica Tecnológica de la República Argentina, el cual establece vínculos de cooperación, no sólo, entre los grupos aquí señalados, sino también con otros equipos de trabajos interesados en el tema. Este hecho señala la importancia y proyección que la temática analizada tiene tanto en el ámbito de la investigación científica como en el campo de las aplicaciones tecnológicas de la República Argentina.

EXPERIENCIA RECOGIDA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS HÍDRICAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL, SANTA FE. INTERACCIÓN ENTRE LA EROSIÓN LOCAL Y LA DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES.

Si bien existen en la literatura enfoques que pretendieron resolver el problema de la erosión en estribos mediante una analogía con la erosión local en pilas, desarrollos posteriores han demos-

trado la complejidad de los procesos erosivos junto al estribo y la necesidad de profundizar el conocimiento de las vinculaciones que existen entre la configuración del flujo y la erosión local resultante (Ettema, 2003). En este sentido puede afirmarse que a pesar de la gran expansión experimentada por las temáticas referidas que se percibe en la literatura afín, los mecanismos que gobiernan la interacción entre el flujo, fundación y lecho no están enteramente comprendidos. Ello, probablemente, radica en la compleja característica que presenta el flujo interviniente en el proceso erosivo.

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

Los trabajos de Schreider et al. (1996,1998, 2000) y Scacchi et al., (2002) evaluaron la interacción que existe entre el fenómeno de redistribución de caudal y la magnitud resultante de la erosión por contracción.

En los desarrollos que presentan a continuación se estudia el fenómeno desde la óptica de la erosión local junto al estribo, evaluando la influencia recíproca que existe entre las modificaciones que se producen en la hidráulica de la sección y la respuesta erosiva asociada a ella.

Enfoque Metodológico

Si se interpreta que el terraplén de aproximación a un puente en valle de inundación se configura como un estribo largo (Kandasamy, 1989) resulta posible adoptar la relación funcional propuesta por Melville (1992) como expresión básica cuyo ajuste resultaría del desarrollo experimental:

$$\frac{y_e}{B} = 2,3057 \cdot \left(\frac{U}{\sqrt{g \cdot B}} \right) - 0,0315 \quad (1)$$

Del análisis de la ecuación [1] surge que la profundidad de erosión es una función de las

características de la corriente aguas arriba, esto es su profundidad, h_a , y velocidad, U_a ; de la forma del estribo, K_s , y su orientación, θ y de las características del sedimento (tamaño característico, d_s y desvío geométrico, σ_g). De acuerdo a ello la profundidad de erosión local en el caso de estribos largos resultaría independiente del ancho de la sección del puente. Esta consideración resulta válida si se acepta que la presencia del estribo y su terraplén de aproximación no provoca efectos apreciables en la contracción del flujo, con lo cual es posible aislar ambos fenómenos y evaluar en forma separada la erosión local junto al estribo.

En el caso de puentes aliviadores Schreider et al., (1998, 2000) demostraron la interacción existente entre la erosión por contracción y por estribo, lo cual se explica en la redistribución transversal de caudales originada en la sección del puente como consecuencia del desarrollo de la fosa de socavación local. Esta situación permite postular que dicho proceso también se ve reflejado en las profundizaciones esperables junto al estribo influyéndose, por lo tanto, recíprocamente. De este modo resulta necesario incorporar al análisis de erosión local una variable característica de la sección de paso, en este caso el ancho de la brecha B (sección de escurrimiento contraída coincidente con la traza del puente aliviador).

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

Estas observaciones guiaron la elección de las variables a considerar para el estudio de las erosiones locales en estribos; el análisis dimensional que a partir de ellas se realizó y la formulación de las relaciones complementarias que evaluaron el proceso de redistribución de caudales.

Se plantea entonces que la máxima profundidad de erosión junto a un estribo prismático, orientado normal al flujo, puede expresarse mediante una función del siguiente tipo:

$$y_e = f_1(B, h, U, g) \quad [2]$$

Donde y_e es la máxima profundidad de erosión local en un estribo; B es el ancho de la brecha o semi - sección del puente; h , U son el tirante y la velocidad iniciales evaluados en la sección de la brecha y g es la aceleración de la gravedad. La no consideración en [2] del material del lecho se basa en el supuesto que el mismo es uniforme y lo suficientemente pequeño en relación al obstáculo para no influir en el fenómeno (Melville y Coleman, 2000). Se recuerda que la erosión junto a estribos largos es independiente de la longitud del mismo (L).

Si se aplica análisis dimensional a [2], se arriba a la siguiente expresión:

$$\frac{y_e}{B} = f_2\left(\frac{h}{B}, \frac{U^2}{gB}\right) \quad [3]$$

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

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

$$\frac{Q_{hf}}{Q_{hi}} = f_3(y_e, B, h) \quad [4]$$

Esto es, en forma adimensional:

$$\frac{Q_{hf}}{Q_{hi}} = f_4\left(\frac{y_e}{B}, \frac{h}{B}\right) \quad [5]$$

donde:

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

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

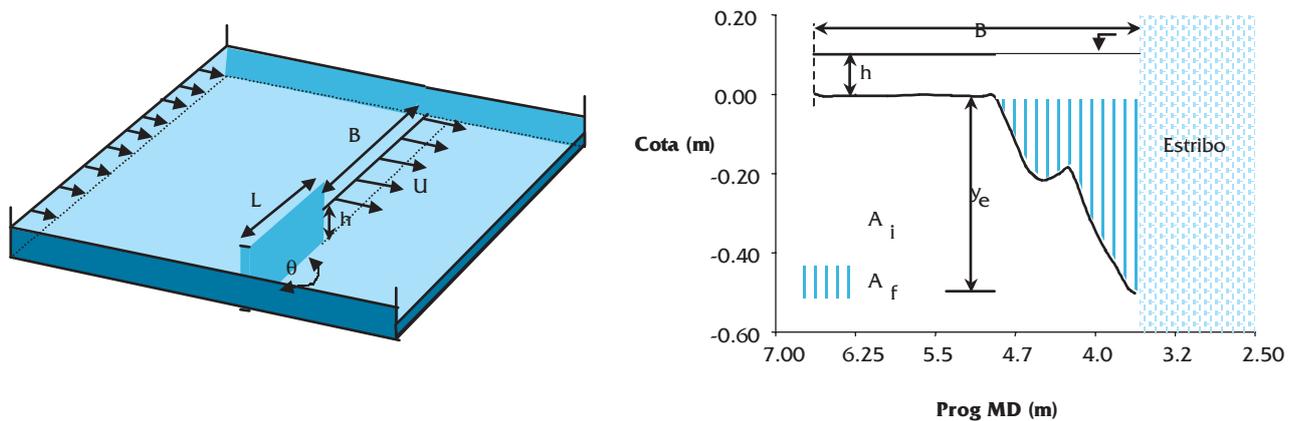


Figura 1. definición de las principales variables geométricas e hidráulicas

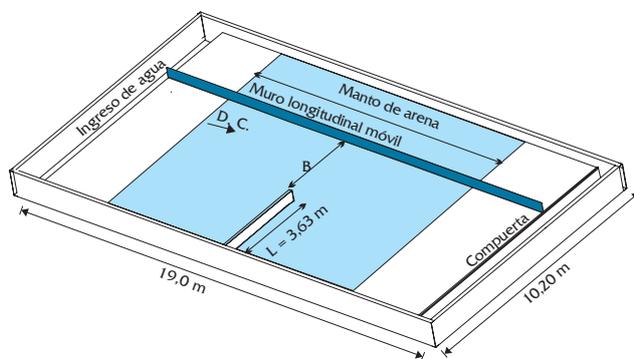


Figura 2. Croquis y vista general del cuenco de experimentación

Se destaca de la comparación de las expresiones [3] y [5] una dependencia recíproca o retroalimentación entre los parámetros representativos del escurrimiento y la socavación resultante.

Se desarrolló, entonces, una serie de experiencias de laboratorio que tuvo por finalidad sustentar la elección de las variables geométricas e hidráulicas que gobiernan el fenómeno de erosión en estribos y verificar el grado de representatividad de las formulaciones propuestas.

Diseño Experimental. Dispositivos de Ensayos

Las experiencias de laboratorio debieron reproducir la particular configuración del flujo en el entorno de un puente aliviador, el cual forma parte de un terraplén vial interpuesto en una planicie inundable. En este tipo de situaciones la topografía es bastante simple, con niveles del terreno relativamente uniformes y sin la presencia de un cauce menor. La simpleza de la descripción altimétrica del terreno contrasta con una morfología en planta complicada, debiendo en consecuencia prestarse especial atención a las perturbaciones que este hecho introduce en la con-

figuración del flujo resultante. En efecto la presencia de anchos de escurrimientos muy importantes en la aproximación, con tirantes y velocidades de pequeña magnitud, se contraponen con las velocidades altas y anchos reducidos que caracterizan al escurrimiento en las secciones de paso en los puentes aliviadores

Las dimensiones en planta del sistema y las modificaciones espaciales de las variables hidráulicas señala a esta configuración en un tipo especial de erosión en estribo, que requiere de un esquema de análisis propio y de condiciones específicas de experimentación, que reflejen adecuadamente los procesos que se verifican en las situaciones de campo.

Se consideró, en consecuencia, indispensable el empleo de un canal de experimentación de grandes dimensiones, en cual se pudieran representar las características principales del escurrimiento en valle de inundación. El canal utilizado 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 (Figura 2).

El cuenco se implementó de modo tal que en el sector central se ubica un lecho de arena uniforme ($d_{50} = 1.0$ mm) que tiene una longitud de 9,63 m, un espesor de 0,60 m y un desarrollo transversal coincidente con el del cuenco. A 10 metros de la sección de entrada, en el recinto con fondo móvil, se materializó un cierre parcial de 3,63 metros de longitud, mediante una pared de mampostería de 0,12 m de espesor, quedando definido de este modo un estribo prismático de pared vertical. Su origen se ubicó en la margen derecha del cuenco (Figura 2). La longitud del estribo en combinación con los tirantes circunstantes 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 brechas, manteniendo la longitud del estribo invariable, (Figura 2).

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

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

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

En cada ensayo se determinaron:

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

2. Ensayos con fondo móvil: en esta etapa se permitió que se desarrollara la fosa de socavación local y luego se midieron los parámetros representativos del escurrimiento en la sección erosionada. Los ensayos repitieron las mismas combinaciones de anchos de brecha – caudales específicos que en la etapa anterior.

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

En cada una de los ensayos se registraron:

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

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

La Tabla 1 resumen los principales parámetros de las experiencias realizadas.

Resultados Obtenidos

El análisis de los resultados verificó la existencia de un fenómeno de redistribución transversal del flujo en la sección de la brecha con el desarrollo de la fosa de erosión local. Se ha encontrado que las derivaciones de caudal al sector comprometido por la erosión en estribo fueron

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

Serie	Ensayo	B (m)	Q (m³/s)	q (m²/s)	h (m)	Serie	Ensayo	B (m)	Q (m³/s)	q (m²/s)	h (m)
I	I ₁	1,5	0,541	0,0286	0,0960	III	III ₁	1,5	0,066	0,0438	0,1070
	I ₂	2,0	0,058	0,0291	0,0986		III ₂	2,0	0,086	0,0430	0,1095
	I ₃	3,0	0,086	0,0288	0,1000		III ₃	3,0	0,133	0,0444	0,1130
	I ₄	3,5	0,102	0,0292	0,1035		III ₄	3,5	0,158	0,0451	0,1160
	I ₅	4,0	0,115	0,0288	0,1050		III ₅	4,0	0,185	0,0463	0,1210
	I ₆	5,0	0,162	0,0325	0,1130	IV	IV ₁	1,5	0,081	0,0535	0,1150
II	II ₁	2,0	0,074	0,0368	0,1050		IV ₂	2,0	0,102	0,0508	0,1160
	II ₂	3,0	0,106	0,0355	0,1065		IV ₃	3,0	0,158	0,0526	0,1180
	II ₃	3,5	0,122	0,0350	0,1090		IV ₄	3,5	0,178	0,0508	0,1220
	II ₄	4,0	0,143	0,0360	0,1120	V	V ₁	1,5	0,090	0,0601	0,1215
	II ₅	5,0	0,196	0,0391	0,1200		V ₂	2,0	0,119	0,0593	0,1230
					V ₃		3,0	0,181	0,0603	0,1248	

* B referido como sección de brecha, corresponde a la semisección de esta, ya que se trabajó con un solo estribo

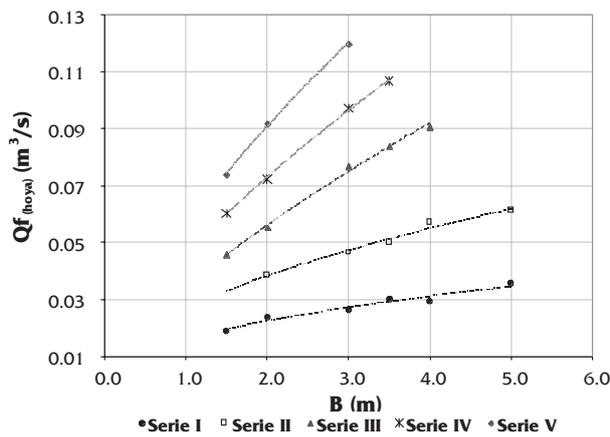


Figura 3. Caudal que escurre por el sector de la sección afectado por la hoya de erosión local próxima al equilibrio

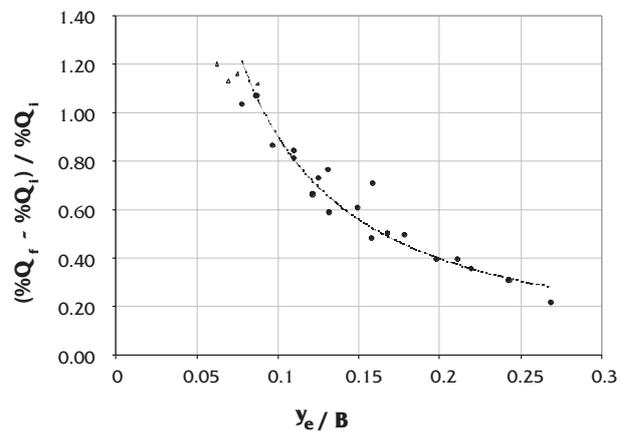


Figura 4. Relación entre la variación del caudal que escurre en la zona de erosión local y la máxima profundidad relevada

mayores en la medida que se consideraron valores de “B” más grandes, ante las mismas condiciones iniciales del escurrimiento, esto es “q” y “h”. Estos resultados se presentan en la figura 3, en la que se han representado el caudal que escurre por el sector de la sección afectado por la erosión local, una vez desarrollada la erosión local, en función del ancho de la brecha.

Se ha ratificado el concepto fundamental planteado en relación a la dependencia que existe entre la redistribución de caudales verificada en la sección y el desarrollo mismo de las erosiones locales, representado por la relación funcional [5]. Este hecho se ha puesto en evidencia en la figura 4, en la que se han representado las variaciones que ha sufrido el porcentaje de caudal que escurre

en la parte de la sección afectada por la socavación junto al estribo, respecto del inicial en dicha zona, en función de la máxima profundidad de erosión medida, adimensionalizada con el ancho de la brecha “ye / B”. Donde el valor de la ordenada se calculó como el cociente de la diferencia entre los porcentajes de caudal medidos en el sector afectado por la hoya de erosión al final e inicio del proceso y el porcentaje medido en la situación inicial $(\%Q_f - \%Q_i) / \%Q_i$. La agrupación de los puntos entorno a una tendencia definida demuestran lo dicho.

Un análisis de las condiciones extremas que surgen de la figura 4 indica una buena tendencia de la misma para valores grandes del parámetro “ye / B”. En efecto, cuando el ancho de la brecha

tiende al ancho de la hoya de erosión, el incremento de caudal debiera tender a cero, ya que no hay posibilidad de redistribución de caudales en la sección. En el otro extremo para valores de “ y_e / B ” pequeños, los que se corresponden con anchos de sección importantes, la curva muestra una tendencia creciente, siendo apenas perceptible un cambio de tendencia para los tres experimentos en los que se combinaron las brechas más amplias con las menores profundidades de erosión, (Fig. 4). Se debe señalar aquí la necesidad de desarrollar ensayos adicionales con anchos mayores a los contemplados en el presente estudio, con el propósito de encontrar un ancho límite “ $B_{límite}$ ” superado el cual ya no se produzcan incrementos significativos del caudal aportado a la hoya, bajo las mismas condiciones iniciales del flujo.

Los resultados experimentales permitieron verificar parcialmente la relación funcional [3], lo cual pone de manifiesto la necesidad de incorporar en el análisis a la geometría de la brecha. La figura 5 muestra la expresión que vincula la máxima profundidad de erosión en el estribo, adimensionalizada con el ancho de la sección, con el número de Froude de la brecha. El buen ajuste de los datos valida el enfoque metodológico que sustenta la presente investigación. La ecuación de mejor ajuste tuvo la siguiente forma:

$$\frac{y_e}{B} = 2.3057 \left(\frac{U}{\sqrt{gB}} \right) - 0.031 \pm \quad [6]$$

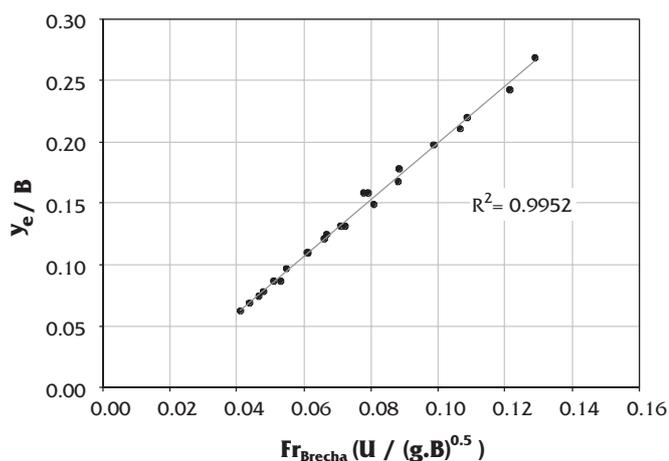


Figura 5. Máxima profundidad de erosión en función del número de Froude de la brecha.

La no consideración del grupo adimensional que representa al tirante en las expresiones finales

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

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

EXPERIENCIA RECOGIDA EN EL INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA, EZEIZA. ESTRIBOS NO VERTICALES.

La erosión en puentes durante el paso de las crecidas, es consecuencia del flujo complejo que impone la presencia de este tipo de obras, que genera una contracción de la corriente e interpone elementos como pilas y estribos, que motivan cambios adicionales al escurrimiento. Los cambios en la morfología del río en las cercanías de un puente, son función de las condiciones geométricas y morfológicas del cauce y del valle de inundación, de la localización en planta y ancho del puente, y de las características de las pilas y estribos.

En Argentina, la presencia de grandes ríos de llanura, hace que haya un importante número de puentes en sus valles de inundación. En general sus estribos están conformados por terraplenes (tipo spill-through o no verticales) recubiertos por distintas clases de mantas de protección. Se analiza aquí la forma en que se desarrolla el flujo en torno a estas estructuras, los parámetros que inciden en el desarrollo de la erosión en sus cercanías y se avanza sobre los criterios para la cuantificación de la socavación.

Enfoque Histórico

Con el fin de estudiar este tipo de problemas, en general se lo ha simplificado de manera tal de obtener expresiones matemáticas sencillas de carácter empírico para estimar la erosión máxima. Para ello, en primer término se distinguen dos componentes, que sumadas dan la erosión total esperable. Una es la generalizada y la otra es la local, que se desarrolla en torno a los elementos que se interponen a la corriente.

La erosión general puede considerarse como la superposición, por un lado, de los descensos del lecho en un tramo de río de gran longitud debidos a un cambio en las condiciones hidro-sedimentológicas medias, cuyo tiempo de desarrollo es muy prolongado; y por otro, de la erosión por contracción, que puede definirse como la remoción de material del lecho como consecuencia de la contracción del flujo que imponen los estribos en conjunto con los terraplenes que avanzan dentro de los valles de los ríos, siendo su escala de tiempo diferente a la local, ya que requiere mayor tiempo para su desarrollo (FHA, 2001).

La erosión local, tanto en pilas como en estribos, es aquella causada por los vórtices inducidos por las obstrucciones interpuestas en el flujo. En particular, el desarrollo de la erosión local por estribos se superpone con la zona donde se presentan las mayores aceleraciones convectivas debidas a la contracción del flujo, siendo los vórtices que actúan como agentes erosivos, generados también por los cambios en las condiciones de escurrimiento.

La curvatura del flujo en la zona de aproximación al estribo causa una corriente secundaria que forma un vórtice horizontal principal, similar al que se desarrolla en una curva de un río y que a su vez induce un vórtice secundario pero de menor poder erosivo (Hoffmans, 1997). Aguas abajo del estribo se presenta una zona de separación en correspondencia con la zona de desaceleración en la que las líneas de escurrimiento comienzan a ser divergentes, desarrollándose allí un tren de vórtices verticales que divide al flujo principal de una zona de aguas muertas.

En las metodologías de cálculo, las socavaciones máximas se obtienen a partir de la simplificación de superponer linealmente los valores calculados de las erosiones generalizadas por contracción del flujo y de las locales, a pesar de ser procesos que presentan diferentes escalas de tiempo (FHA, 2001).

El análisis de la erosión por contracción puede realizarse a partir de metodologías que tienen en cuenta la velocidad de inicio de movimiento o la tensión de corte crítica, mientras que el efecto de los vórtices responsables de las erosiones locales presenta mayores dificultades, habiendo para su estimación una gran variedad de expresiones empíricas. Entre las ecuaciones de mayor difusión para la estimación de la erosión local máxima están entre otras las de:

- Froehlich (1989), para lecho vivo basada en 170 ensayos de laboratorio (Richardson, 2002) y para aguas claras basada en 164 ensayos.
- Melville (1992), cuyas expresiones corresponden a una envolvente de las socavaciones registradas en los ensayos de laboratorio compilados por el autor para diferentes condiciones hidráulicas y geométricas. Define un factor de corrección que depende de la forma del estribo.
- Lim (1997), da expresiones para aguas claras y lecho vivo.
- Kothyari; Ranga Raju (2001), dan expresiones para obtener las dimensiones de una pila análoga con la misma socavación que la del estribo, para las mismas condiciones hidráulicas.

Si bien las expresiones para la estimación de la erosión local en estribos se basan en criterios diferentes de agrupamiento de datos básicos, en general se obtuvieron a partir de la misma información compilada de ensayos de laboratorio en canales rectangulares. La mayor parte de los resultados correspondieron a estribos de pared vertical, habiendo adicionalmente algunos ensayos para estribos conformados por paredes verticales con muros guía (wing wall) y unos pocos para estribos de sobrepaso o no verticales (spill-through). En los casos de estribo vertical, el vórtice principal, de eje horizontal, es el que tiene mayor incidencia en el desarrollo de los procesos erosivos y del valor de la socavación máxima.

Con el fin de unificar los datos, todos los autores utilizaron los coeficientes de forma dados por Melville (Melville, 1992), cuyos valores para los estribos no verticales están basados en las experiencias de laboratorio disponibles. En particular los estudios más citados en la bibliografía son los de Tey (1984): 6 ensayos con aguas claras,

material uniforme y talud 1:1; Wong (1982): 16 ensayos con aguas claras, material no uniforme y taludes 1.5:1 y 1:1; y Liu (1961): 6 ensayos con lecho vivo, material uniforme y taludes 1:1. Los coeficientes de forma K_s recomendados por Melville son de 0.6 para talud 1:0.5, de 0.5 para talud 1:1 y de 0.45 para talud 1:1.5.

En los últimos 10 años las nuevas experiencias de laboratorio relativas a estribos apuntaron al estudio de erosión en estribos localizados en canales de sección compuesta, a la evolución temporal de los procesos erosivos y a la visualización del desarrollo de vórtices. En estos estudios, al incorporar nuevas variables, y en la búsqueda por parte de los autores de obtener resultados generalizables, los estribos estudiados estuvieron en general conformados por muros verticales, eliminando así, las variables relacionadas con la forma de la estructura.

Limitaciones de las expresiones de cálculo

Los máximos valores de erosión local en estribos observados en estudios de laboratorio, exceden los valores observados en este tipo de obras. Los distintos procesos de socavación que pueden ocurrir en estribos de puentes, así como los factores de escala y condiciones de similitud de los modelos físicos comprometen la posibilidad de realizar una modelación del fenómeno que sea representativa.

Los métodos desarrollados para la estimación de las máximas socavaciones se basan en criterios conservativos, siendo la excesiva sobreestimación de la profundidad de erosión, consecuencia de las limitaciones de los datos experimentales que conforman la base de las expresiones de predicción.

Prácticamente la totalidad de los ensayos de laboratorio fueron realizados sobre canales rectangulares, y gran parte de ellos corresponden a la situación de aguas claras, para relaciones de U/U_c (velocidad media relativa a la velocidad de inicio del movimiento) cercanas a 1, para la cual la socavación es máxima. Trabajando con aguas claras, algunos investigadores (Lim, 1997; Sturm, 1994) no consideraron los efectos de la contracción, a pesar que la interceptación del escurrimiento, a pesar que la interceptación del escurrimiento que impone el estribo puede ejercer una aceleración convectiva del flujo que trae aparejada velocidades superiores a la de inicio del movimiento en la cercanía de la obra y que generan erosiones adicionales a las producidas por los vórtices, so-

breestimando de esta manera la erosión local por estribo. Por otro lado, en condiciones de prototipo, la crecida de diseño siempre ocurre bajo condiciones de lecho vivo.

Como una dificultad adicional, debe mencionarse que los cambios en el lecho debidos al avance de los procesos erosivos inducen cambios en el patrón del flujo en correspondencia con el puente, y por lo tanto en los parámetros de cálculo (Scacchi, 2002). La zona en donde se producen los vórtices inducidos por el estribo coincide con la de mayor concentración de líneas de corriente, haciendo muy difícil discriminar entre erosión local y por contracción, lo que limita la posibilidad de representar adecuadamente en modelo físico el patrón de flujo de prototipo a medida que el fenómeno se desarrolla.

Conscientes de las dificultades en la aplicación de las fórmulas de predicción de erosión al diseño de estribos de puentes, en Estados Unidos se han intentado desarrollar metodologías basadas en datos de campo. En este sentido se tiene la formulación del HIRE, obtenida de datos de campo en el Mississippi (FHA, 2001; Richardson, 2002), y en la que los autores indican como válida sólo para casos y condiciones hidráulicas similares a los de los datos recopilados, lo que limita notoriamente su campo de aplicación.

Estribos no verticales

Existe poca información acerca de las características del flujo en torno a un estribo con configuración compleja de la zona de aproximación del escurrimiento, el valle de inundación, la localización del estribo respecto al cauce principal, así como las características propias del elemento. Por ello, previo a la determinación de relaciones predictivas debe estudiarse cómo se desarrolla el escurrimiento. Esto es especialmente necesario en estribos situados en planicies de inundación (Ettema, 2003).

La erosión local se debe a la remoción del material del pie de los estribos como consecuencia de la acción de vórtices horizontales y verticales. Los primeros, llamados vórtices principales, se originan por el apilamiento de agua frente a la obstrucción, con la consiguiente aceleración del flujo alrededor de la misma. A medida que la profundidad de la erosión avanza, la fuerza del vórtice se reduce, disminuyendo de esta manera la tasa de transporte de sedimentos hacia fuera de la fosa.

Los vórtices verticales disminuyen rápidamente su intensidad con la distancia hacia aguas abajo de la obstrucción, motivando la presencia de depósitos de material.

En los estribos con taludes protegidos, el patrón de flujo está influenciado por los ángulos y la geometría de los terraplenes en la dirección longitudinal y normal al eje del puente. La configuración geométrica de este tipo de estructuras, reduce el efecto del flujo descendente generador de los vórtices horizontales y en consecuencia su acción erosiva. En la bibliografía específica (Hoffmans, 1997) se indica que para taludes con pendientes menores a 1:10, la erosión por contracción será dominante frente a la debida al tren de vórtices aguas abajo del punto de separación del flujo en el estribo.

Asimismo otros autores (Melville, 1995), basándose en los resultados de las experiencias de laboratorio, sobre las que se han indicado sus limitaciones en apartados anteriores, afirman que para estribos largos, en los que el flujo interceptado por el estribo y el terraplén de aproximación es importante, la erosión es independiente de la forma del estribo, y la envolvente de la socavación máxima definida por su formulación es sólo función del tirante en la zona de aproximación. Lo erróneo de esta afirmación se debe a la imposibilidad de separar en los ensayos los efectos debidos a los vórtices, de los de contracción del flujo, y en esta situación el efecto de la concentración de filetes líquidos en las cercanías del estribo es dominante en el fenómeno.

Ensayos de laboratorio sobre estribos no verticales

Los vórtices debidos al flujo tridimensional en torno estribos no verticales, así como sus efectos en la erosión local fueron observados en un modelo a fondo móvil desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua de Argentina (Spalletti, 1998). En la figura 6 se presenta una vista desde aguas abajo del estribo, una vez finalizado uno de los ensayos.

En dicha figura se observa la erosión local en la pila, la socavación al pie del estribo y el depósito de sedimento aguas abajo de las estructuras. Resulta de especial interés en la imagen, la identificación de los fenómenos asociados a los vórtices inducidos por la presencia del estribo. Es así que se distingue por un lado el desarrollo de un proceso erosivo en la zona del pie aguas abajo del eje

del puente (A), debido a la contracción del flujo, a los vórtices originados por el grupo de pilas cercano al estribo y a la separación del flujo que impone la presencia del mismo.



Figura 6.-Modelo físico a fondo móvil.

Por otro lado, en el tramo medio del talud protegido que conforma el estribo, se aprecia un sector totalmente libre de material suelto (B), en contraposición con el resto del terraplén, lo que pone de manifiesto que el vórtice horizontal se localiza, en este caso en que el terraplén tiene una pendiente 1:4, sobre la cara protegida del talud, y por consiguiente su desarrollo no tiene efecto en la erosión del cauce. En estos ensayos no se observó una profundización localizada del cauce al pie del terraplén en la cara de aguas arriba del estribo.

También en el Laboratorio de Hidráulica del INA, se realizaron ensayos en un canal a fondo móvil para estudiar el comportamiento frente a la acción de corrientes, de estribos protegidos con distintos tipos de coberturas, siendo la pendiente de los taludes de 1:2 (Loschacoff, 2001).

Las experiencias se llevaron a cabo en un canal de 33 metros de largo y 2,5 metros de ancho, con un fondo horizontal de arena de $d_{50}=0.34$ mm. Se estudiaron estribos protegidos con colchones de alambre rellenos de piedra, bloques de hormigón unidos a geotextil y bloques de hormigón intertrabados en una dirección. Los ensayos se realizaron con un caudal de $0,300$ m³/s y un tirante de 20 cm, y la duración de los mismos fue de 6 horas.

En la totalidad de las situaciones analizadas se pudo ver que el vórtice de eje horizontal que se desarrolla en la cara de aguas arriba del estribo, gran responsable de los fenómenos erosivos en los casos en que el estribo está conformado por un muro vertical, se localiza principalmente sobre las mantas de protección, reduciéndose notablemente su efecto en la socavación del material granular al pie de la estructura.

Las mayores erosiones se observaron a la altura del eje del estribo y aguas abajo de dicha posición, siendo consecuencia en parte a la contracción del escurrimiento, y en parte a los vórtices verticales que se generan por separación del flujo en el borde de aguas arriba de la nariz del estribo, y que disminuyen rápidamente su intensidad y su poder erosivo, con la distancia hacia aguas abajo de la obstrucción. Los valores de erosión registrados se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Máxima erosión registrada en cada ensayo.

	Erosión Máxima [cm]	Erosión Máxima al Pie de la Protección - Cara de Aguas Arriba del Estribo [cm]
E1-Colchonetas de alambre rellenos de piedra	33	12.5
E2-Bloques de hormigón unidos a geotextil	39	9
E3-Bloques de hormigón intertrabados	31.5	10

Se observa que a diferencia de los estribos verticales, en los que la posición del punto de mayor erosión cuando su longitud no es muy grande, se sitúa frente al paramento de aguas arriba de la estructura (Bateman, 2002), en los casos ensayados la profundización máxima del lecho en esta zona oscila entre un 23 y un 38 % de la socavación máxima.



Figura 7. Modelo físico – Estribo protegido con colchonetas de alambre rellenas con piedras.

En la figura 7 se presenta una vista desde aguas arriba con la configuración final del lecho para el ensayo E1, en el cual el punto de máxima erosión se localizó al pie de la manta, unos 20 centímetros aguas abajo del eje del estribo. La deformación de las protecciones al acompañar los cambios del lecho, hace que cambie asimismo la configuración del estribo, y por ello las condiciones del flujo en su entorno. En la figura se observa que la manta presenta un cambio notorio de pendiente en el borde de aguas arriba de la nariz del estribo, que coincide con la zona de velocidades altas debidas al efecto de contracción del escurrimiento.

Esta discontinuidad favorece la separación del flujo y el desarrollo de remolinos de eje vertical cuyo efecto se superpone a la erosión por contracción y es en parte responsable de la posición de la fosa de erosión. La socavación máxima se localiza inmediatamente aguas abajo de la discontinuidad de la manta.

En la figura 8 también se presenta una vista desde aguas arriba, pero en este caso para el ensayo E2, en el que la máxima erosión se situó aproximadamente en el eje del estribo. Del mismo modo que en el caso anterior, la protección acompañó las profundizaciones del lecho, pero al tener estas mantas mayor flexibilidad, las deformaciones observadas fueron mayores que las del ensayo E1 y el cambio de pendiente en el extremo de aguas arriba, más abrupto. La separación del flujo en la discontinuidad hace que la profundización máxima del lecho se presente inmediatamente aguas abajo de la discontinuidad de la manta, del mismo modo que para el caso anterior. En el ensayo E2, al ser mayor la deformación de la manta, el valor final de erosión máxima también fue mayor al del ensayo E1.



Figura 8. Modelo físico – Estribo protegido con bloques de hormigón adheridos a geotextil.

En la figura 9 se presenta la vista desde aguas arriba, para el ensayo E3. En este caso la máxima erosión se ubicó 50 centímetros aguas abajo del eje del estribo. El tipo de protección ensayada en este caso tiene una rigidez mayor y no acompañó del mismo modo que en las experiencias anteriores las deformaciones del lecho al pie. La separación del flujo en el borde de aguas arriba de la estructura fue la correspondiente a la configuración original del estribo y el valor final de erosión máxima fue menor que en los dos ensayos anteriores. En la figura 9 también puede apreciarse que en correspondencia con la zona de mayor profundización del lecho, se produjo la rotura de la manta, con pérdida de varios de los bloques intertrabados, como consecuencia del descalce de la base de este tipo de protecciones, caracterizadas por la imposibilidad de acompañar deformaciones.



Figura 9.- Modelo físico – Estribo protegido con bloques intertrabados.

Cálculo de la socavación máxima

Para la evaluación de la erosión en las cercanías de los estribos, la fuerte interrelación entre el flujo convergente de aproximación y los torbellinos generados por la afectación local que la presencia de la estructura impone al escurrimiento, dificulta la generalización del cálculo, debiéndose tener en cuenta tanto las características geométricas del lecho y los estribos, como las condiciones del flujo de aproximación al puente.

Desde el punto de vista de la geometría del estribo, no es posible comparar el comportamiento de una estructura con taludes, con el de un estribo vertical, pues el desarrollo de los vórtices, su intensidad y el patrón de escurrimiento en torno al mismo son totalmente diferentes, siendo por lo tanto también distinto el mecanismo de erosión. A pesar de ello, los métodos de predicción en su intento de ser aplicables en forma generalizada, incluyen todos estos efectos en un único factor de forma. Si se desearan aplicar las técnicas habituales de superposición de efectos y obtener estimaciones mediante expresiones empíricas sencillas, las mismas deberían obtenerse a partir de estudios que tengan en cuenta las características de este tipo de estructuras y las condiciones del flujo en su entorno y su zona de aproximación.

Los fenómenos de contracción y vorticidad tienen diferentes escalas de tiempo, por lo que a medida que avanzan las socavaciones, la importancia relativa de cada uno de ellos va variando hasta llegar a la condición final. En puentes localizados en planicies de inundación, caracterizados en general por presentar estribos con taludes protegidos, al desarrollarse los remolinos, al menos parcialmente, sobre las mantas de protección, tal como se ha presentado en los ensayos desarrollados en el Laboratorio de Hidráulica, su importan-

cia relativa es menos significativa en el desarrollo de la socavación, siendo su influencia aún menor a medida que pasa el tiempo de ensayo.

Para la estimación de la erosión máxima en las cercanías de estribos con taludes protegidos, en puentes localizados en valles de inundación, el método de cálculo que se adapta mejor a los procesos erosivos observados, consiste en la aplicación de un modelo morfológico.

Si la erosión local no es despreciable, se tendrá un sistema dinámico complejo en el que gradualmente se va alcanzando la situación de equilibrio final, al mismo tiempo que el flujo se va acomodando a las condiciones variables del lecho en la zona del puente. A medida que las erosiones crecen, la influencia de los remolinos va perdiendo entidad. La situación de equilibrio final se alcanzará cuando termine de desarrollarse la erosión por contracción, a la que eventualmente podría llegar a superponerse una erosión local, siempre y cuando los vórtices en esta última condición tengan suficiente intensidad para producir socavaciones en el lecho.

Dadas las dificultades enunciadas para estimar la erosión en estribos debidas al efecto de los vórtices, con la consecuente incertidumbre para el diseño de puentes, organismos de referencia como la Federal Highway Administration de Estados Unidos, a través de su Circular HEC-18 (FHA, 2001) indica por un lado, que las fundaciones de los estribos pueden realizarse a menores profundidades que las dadas por las fórmulas de predicción, siempre y cuando se realice una adecuada protección o se construya un muro guía, y por otro, que debe tenerse especial atención con los procesos erosivos que pueden generar los vórtices de eje vertical en el espaldón de aguas abajo del estribo.

CONCLUSIONES

Los desarrollos llevados a cabo por los dos grupos de investigación referidos permiten extraer las siguientes conclusiones:

Experiencia recogida por la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

- Se ha ratificado la existencia de un fenómeno de redistribución de caudales en la sección del puente, dependiente del ancho de la brecha.

Se verificaron caudales que escurren por el sector afectado por la erosión local, al final del ensayo, mayores en la medida que aumentó el valor de B .

- Las erosiones locales estudiadas responden a las condiciones iniciales del flujo junto al estribo y a la transferencia lateral de caudal a la hoya, representada por el ancho B . Este parámetro en estrecha interrelación con la profundidad de erosión gobiernan la redistribución de caudales lo cual prueba la interdependencia que existe entre ambos mecanismos representada por las relaciones funcionales [3] y [5], y representada en la figura 4.
- La dependencia del número de Froude de la brecha $U/(g.B)^{0.5}$ demostrada por las erosiones junto al estribo pone de manifiesto el dominio de la configuración en planta por sobre la dimensión vertical.
- Mas allá del muy buen ajuste obtenido a partir de los resultados experimentales, el elemento central que surge como resultado de este estudio, es el reordenamiento de las variables involucradas, redefiniéndose las ecuaciones de estribo largo a situaciones de puentes en valles de inundación. Las restricciones experimentales que inevitablemente debe afrontar todo trabajo de laboratorio, no habilita a la ecuación [6] como una expresión de cálculo de aplicación generalizada, pero si 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.

Experiencia recogida en el Instituto Nacional del Agua

- Se han presentado las características principales del flujo en torno a estribos no verticales, con el objeto de determinar la influencia que tienen los distintos fenómenos que ocurren en sus cercanías, en los procesos erosivos. Se han discriminado los fenómenos de contracción del flujo y sus correspondientes aceleraciones convectivas en cercanías del estribo, de aquellos asociados a los vórtices, tanto de eje horizontal como vertical, inducidos respectivamente por el apilamiento del agua y la separación del flujo que impone la presencia de la estructura.

- Se han enumerado algunas de las principales formulaciones para la predicción de la erosión máxima, poniéndose de manifiesto las limitaciones que presentan como consecuencia de las condiciones a partir de las cuales fueron desarrolladas, siendo de difícil aplicación en estribos no verticales localizados en valles de inundación.
- En base a ensayos en modelos físicos de estribos no verticales llevados a cabo en el Laboratorio de Hidráulica del INA, se ha observado que los vórtices principales de eje horizontal tienen una importante parte de su desarrollo sobre superficies protegidas. En estos casos la configuración final del lecho se alcanza en forma progresiva, siendo la contracción del flujo en las cercanías de los estribos, el disparador del fenómeno progresivo de redistribución de caudales por profundización del lecho en la sección del puente.
- Para estimar la configuración final del lecho, en ciertos casos puede despreciarse el término correspondiente a la erosión local por estribos, a partir de lo observado en los ensayos de laboratorio para estribos no verticales con pendientes del orden de 1:2 o más tendidos.

Consideración final

- El juicio crítico a las herramientas de cálculo disponibles y el interés por profundizar en el conocimiento de los mecanismos involucrados en el fenómeno de erosión local en estribos de puentes aliviadores, si bien desde perspectivas diferentes, han sido los motores que propulsaron los distintos desarrollos aquí presentados.

La importancia y proyección que la temática analizada tiene, tanto en el ámbito de la investigación científica como en el campo de las aplicaciones tecnológicas, exige redoblar los esfuerzos hasta aquí realizados. Con este objetivo, se ha creado un Proyecto de Investigación en Red, financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica Tecnológica de la República Argentina, estableciéndose de este modo vínculos de cooperación, no solo entre los grupos aquí señalados, sino también con otros equipos de trabajo interesados en el tema. El desafío será entonces, sobre la base de las experiencias acumuladas, generar una estrategia de estudio en conjunto que permita en un futuro inmediato consolidar el conocimiento del fenómeno de erosión local en planicies inundables.

Dicha tarea permitirá identificar las metodologías de cálculo más confiables para ser extrapolables a la práctica profesional en relación con estos ambientes fluviales.

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f :	Área del sector de la sección transversal correspondiente al ancho de la hoya de erosión, al final del proceso erosivo.
A_i :	Área del sector de la sección transversal correspondiente al ancho de la hoya de erosión, al inicio del proceso erosivo.
B :	Ancho de la brecha.
d_s :	Diámetro medio del material del lecho.
Fr_{Brecha} :	Número de Froude de la brecha ($Fr_{Brecha} = U / (g B)^{0.5}$).
g :	Aceleración de la gravedad.
h :	Profundidad del escurrimiento en la sección de la brecha
h_a :	Profundidad del escurrimiento en la sección de aproximación
K_G :	Factor de corrección que tiene en cuenta la forma del Canal.
K_s :	Factor de corrección que tiene en cuenta la forma del estribo.
L :	Longitud del estribo.
Q :	Caudal total.
q :	Caudal unitario en la sección de la brecha
Q_f :	Caudal total que escurre, al final del proceso erosivo, por el sector afectado por la hoya de erosión local.
Q_i :	Caudal total que escurre, al inicio del proceso erosivo, por el sector afectado por la hoya de erosión local.
U :	Velocidad media del flujo normal a la sección de la brecha.
U_a :	Velocidad media del flujo normal a la sección de aproximación.
y_e :	Erosión local junto al estribo.
θ :	Ángulo de inclinación del flujo principal respecto de la alineación del estribo.
σ_g :	Desvío geométrico de la granulometría del material del lecho.
$\%Q_i$:	Porcentaje de caudal que escurre por el sector ocupado por la hoya de erosión local, al inicio del proceso erosivo.
$\%Q_f$:	Porcentaje de caudal que escurre por el sector ocupado por la hoya de erosión local, al final del proceso erosivo.

REFERENCIAS

- BATEMAN, A.; BERTRAM, A.; ROCA, M. (2002). "Estudio Experimental de la Erosión Local en Estribos de Puente". XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – La Habana. Cuba.
- ETTEMA, R.; NAKATO, T.; MUSTE, M. (2003). "An Overview of Scour Types and Scour-Estimation Difficulties Faced at bridge Abutments". Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium. Iowa. United States.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (2001). "Evaluating Scour at Bridges". Hydraulic Engineering Circular N° 18.
- HOFFMANS, G. J. C. M. AND VERHEIJ, H. J. (1997). "Scour Manual". Editorial Balkema.
- KANDASAMY, J. K. (1989) "Abutments scour." Report N° 458, School of Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 278 p. s, Inc., New York, U.S.A.
- KOTHYARI, U.C.; RANGA RAJU K.G. (2001). "Scour Around Spur Dikes and Bridge Abutments". Journal of Hydraulic Research, Vol. 39, No. 4.
- KWAN, T. F. (1988) "A study of abutment scour." Report N° 451, School of Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand, 461 p.
- LIM, S.Y. (1997). "Equilibrium Clear-Water Scour Around an Abutment". Journal of Hydraulic Engineering, March 1997.
- LOSCHACOFF, C.S.; BUSQUETS, M.; BREA, J.D. (2001). "Estudio en Modelo Físico del Comportamiento de Diferentes Tipos de Protecciones de Márgenes frente a la Acción de las Corrientes". Informe LHA-INA 208-01-2001.
- MELVILLE, B.W. (1992). "Local Scour at Bridge Abutments" Paper and Discussion. Journal of Hydraulic Engineering, April 1992.
- MELVILLE, B.W. (1995). "Bridge Abutments Scour in Compound Channels." Journal of Hydraulic Engineering, A.S.C.E., 121 (12). pp. 863 – 868.
- MELVILLE, B.W. Y COLEMAN, S.E. (2000) "Bridge Scour." Water Resources Publications, LLC.
- RICHARDSON E.V. (2002). "United States Practice for Bridge Scour Analysis".
- SCACCHI, G.; MARTÍN VIDE, J.P. Y SCHREIDER, M. (2002) "Flow depth effect on the discharge distribution at bridge sites." Proceedings of the International Conference on Fluvial hydraulics, River Flow 2002. Vol. 2, pp. 1047 – 1052.
- SCHREIDER, M.; ZANARDI, L.; SCACCHI, G.; FRANCO, F. (1998) "Erosión por contracción y por estribo en puentes aliviadores en valle de inundación." Revista Ingeniería del agua. Vol. 5 . N° 2. Madrid, España, pp. 23 – 34.

- SCHREIDER, M.; SCACCHI, G.; FRANCO, F. Y ROMANO, C. (2000) "Incidencia del ancho del puente en la interacción entre la erosión por contracción y por estribo." Anales del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Vol. I. Córdoba, Argentina, pp. 359 – 368.
- SPALLETTI, P.; BREA, J.D. (1998). "Estudio en Modelo Físico de los Estribos de los Puentes de la Conexión Física Rosario-Victoria – Etapa de Calibración y Ensayos a Fondo Móvil". Informes LHA-INA 171-01-98 y 171-02-98.
- STURM, T.W.; JANJUA, N.S. (1994). "Clear-Water Scour Around Abutments in Floodplains". Journal of Hydraulic Engineering, August 1994.

