

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA HIDRAULICA

SOCAVACIÓN A LA SALIDA DE UN PUENTE CAJÓN DOBLE

GUSTAVO REY H.¹
OSCAR LINK L.²

RESUMEN

Los puentes cajón encuentran amplia aplicación en Chile. Corresponden a puentes menores similares a alcantarillas de sección rectangular y pueden tener uno, dos o múltiples vanos. La literatura especializada prácticamente no aporta antecedentes relativos al cálculo de la socavación de estos puentes, lo que motiva la presente investigación. Se presentan resultados obtenidos en una instalación experimental de un puente cajón doble dentro de un canal de 26x1.85x0.74 m ubicado en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Concepción. El puente cajón tuvo dimensiones de 0.5x0.525x0.25 m. Los ensayos se realizaron con arena uniforme ($d_{50}= 0.36$ mm), velocidad y profundidad media del escurrimiento iguales a 0.42 m/s y 20 cm. El régimen de flujo fue subcrítico, con un número de Froude igual a 0.3. Se observó que la forma de fosa de socavación aguas abajo es alargada, con un ancho y largo de 1.6 y 3.5 veces el ancho del puente cajón, respectivamente. Se observó además, la formación de 2 regiones de socavación a lo largo de los ejes de los muros laterales del puente, con profundidades mucho mayores que en el resto de la fosa. La profundidad máxima de socavación fue de 9.1 cm y se ubicó en una de las regiones mencionadas. La formación de las regiones de socavación se explica por las corrientes secundarias del flujo.

¹Ingeniero de Proyectos, Parés y Álvarez Ingenieros Asociados Ltda. – mail: gustavo.rey@pyaing.cl

²Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – mail: olink@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

En la última década se observa en Chile la tendencia a construir puentes menores (con longitudes hasta 40 m) similares a alcantarillas de sección rectangular, denominados “puentes cajón”. La socavación en este tipo de estructuras no está bien documentada, pese a que existen casos en que se ha detectado socavación aguas abajo de éstos, lo que ha generado incluso la pérdida de serviciabilidad de la estructura. Usualmente, la socavación se trata como aquella producida por un chorro a la salida de un radier. Para este caso, Hoffmans y Verheij (1997), así como el Manual de Carreteras (MOP, 2012) recomiendan utilizar la relación de Bormann y Julien (1991). Dietz (1969) propuso una relación para estimar la socavación de gradas seguidas de un radier, la que puede adaptarse al caso del puente cajón considerando una altura de grada igual a cero.

La hidráulica en un puente cajón corresponde al caso de una alcantarilla con múltiples vanos. Presenta un flujo rápidamente variado en las transiciones de entrada y salida, y gradualmente variado en su interior. Los puentes cajón se construyen con pendiente nula, por lo que el flujo es subcrítico.

A continuación se presentan resultados obtenidos en una instalación experimental con el objetivo de caracterizar la socavación de un puente cajón doble, identificando los mecanismos de socavación que controlan el proceso.

2. METODOLOGÍA

2.1 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación experimental construyó en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de Concepción. El puente cajón doble se construyó de hormigón y las dimensiones elegidas fueron un ancho de vano de 25 cm, espesor de muro de 2.5 cm, altura de 25 cm y ancho de tablero de 50 cm. La Figura 1 muestra las dimensiones en cm del puente cajón experimental.

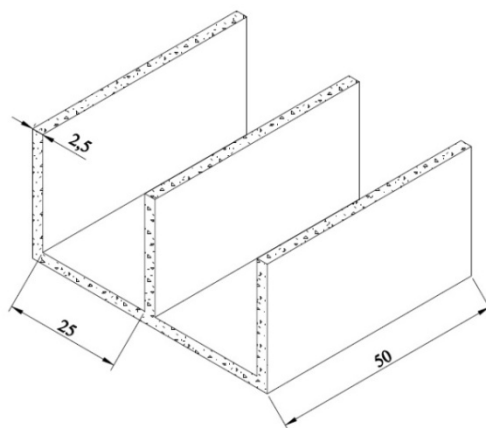


Figura 1. Vista isométrica del puente cajón (dimensiones en cm).

El puente cajón se instaló en un canal con largo de 26 m, 1.85 m de ancho y 0.74 m de profundidad, el cual se encuentra conectado a un circuito de recirculación que incluye un sumidero y un aquietador de corriente. Aguas arriba del puente cajón, se fabricó una transición gradual de doble curvatura para pasar del ancho del canal al ancho del puente cajón. El largo de la transición fue de 2.5 m. Después de la transición se construyó un canal de largo 1.5 m aproximadamente, el cual se cubrió con sedimento para los ensayos con suministro de sedimento desde aguas arriba y con gravilla de 0.75 pulgadas para los ensayos en condición de aguas claras; esto es, sin suministro de sedimento desde aguas arriba. Aguas abajo del puente cajón se colocó el lecho de sedimento con un espesor de 10 cm, ancho de 1.5 m y largo de 2.45 m. La transición a la salida es súbita, con muros rectos perpendiculares al flujo. Finalmente, aguas abajo de la sección de medición se encuentra una compuerta que permite regular la profundidad del flujo. La Figura 2 muestra un esquema del canal del laboratorio.

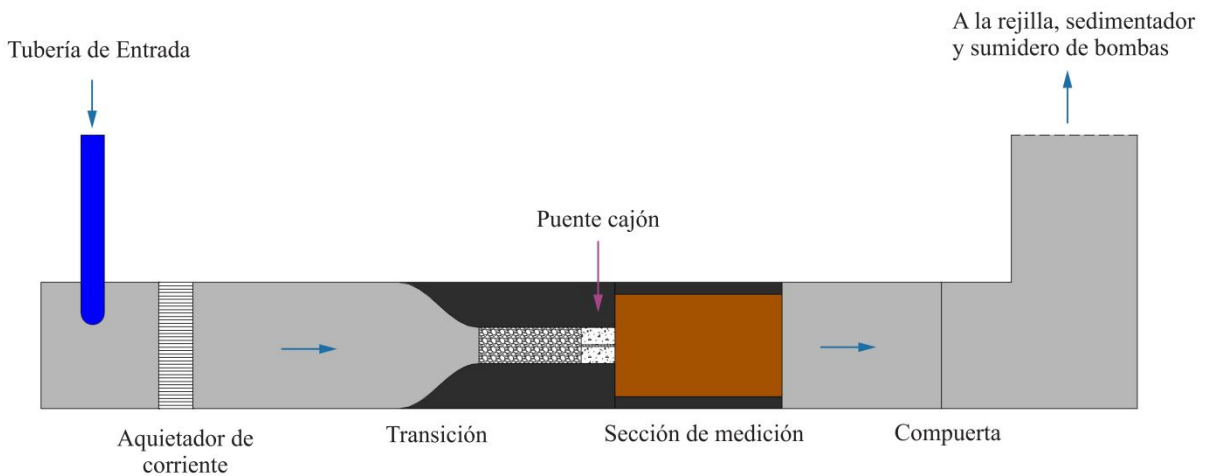


Figura 2. Esquema de la instalación experimental.

2.2 PROPIEDADES DEL SEDIMENTO UTILIZADO

Se utilizó arena Carampangue, que corresponde a una arena media sin finos. El material es granular, sin cohesión. Las propiedades sedimentológicas relevantes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades sedimentológicas arena Carampangue.

Propiedad		Arena Carampangue
Granulometría	D ₈₄ (mm)	0.59
	D ₅₀ (mm)	0.36
	D ₁₆ (mm)	0.28
	σ_g	1.45
Densidad de sólidos	G _s	2.59

2.3 TÉCNICAS DE MEDICIÓN

La profundidad del flujo fue controlada mediante una compuerta ubicada al final del canal y medida en la sección del puente cajón con un sensor de profundidad ultrasónico. El caudal pasante se midió con un flujómetro. Para medir las profundidades de socavación se empleó un limnómetro montado en 2 rieles nivelados como se muestra en la Figura 3a. El limnómetro consiste de un tornillo sin fin con una aguja adherida en su parte inferior. La Figura 3b muestra la instalación experimental.

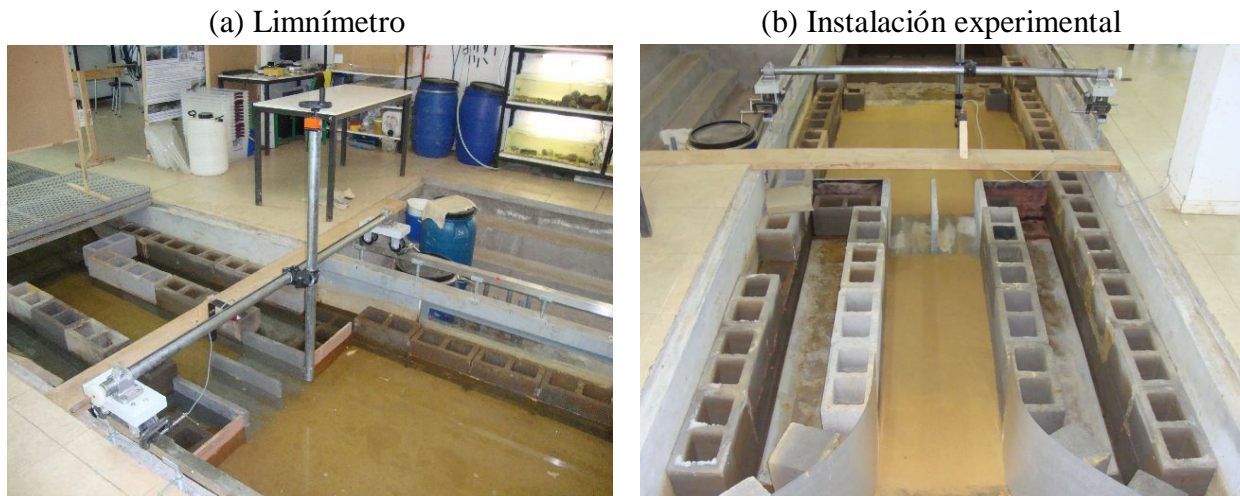


Figura 3. Limnómetro e instalación experimental.

2.4 CONDICIONES HIDRÁULICAS

Los ensayos de socavación se realizaron con flujo subcrítico. Se eligió una profundidad de 20 cm para todos los ensayos realizados, variando el caudal entre 18.6 L/s y 74 L/s. Se llevaron a cabo tres series experimentales.

La primera serie consistió en ensayos para identificar la velocidad de inicio de la socavación a la entrada y salida del puente cajón, por lo que se colocó sedimento aguas arriba del puente cajón. La segunda serie consistió en ensayos con suministro de sedimento desde aguas arriba, a fin de observar la socavación en condición de transporte generalizado. Finalmente, en la tercera serie de ensayos se midieron todas las variables de interés para caracterizar la fosa de socavación.

3. RESULTADOS

3.1 ENSAYOS PRELIMINARES

La primera serie de ensayos se realizó con caudales entre 18.6 L/s y 34.5 L/s. Se observó que la velocidad de inicio de socavación para la fosa aguas arriba fue de 0.19 m/s y para aguas abajo de 0.34 m/s. La velocidad crítica de inicio de movimiento (U_c) de acuerdo al criterio de Shields es de 32 cm/s; considerando un d_{50} de 0.36 mm, un G_s de 2.59, una viscosidad cinemática (ν) de

$1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y una profundidad de flujo de 20 cm. A partir de lo anterior se concluye que la fosa de socavación aguas abajo de un puente cajón se inicia al mismo tiempo que el transporte incipiente. La Figura 4 muestra las fosa de socavación aguas arriba y aguas abajo para un caudal de 34.5 L/s, con una velocidad media de 0.34 m/s.

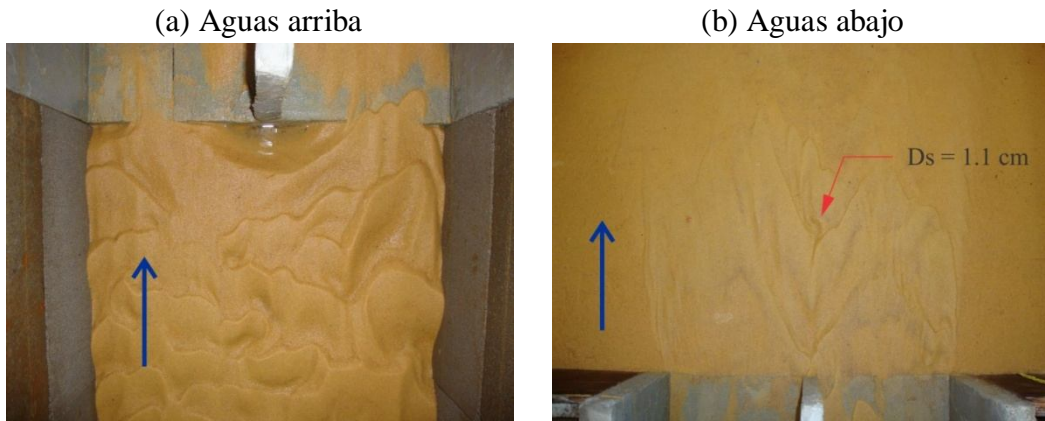


Figura 4. Fosas de socavación para un caudal de 34.5 L/s.

La segunda serie de ensayos se realizó para caudales de 39.4 L/s, 41.9 L/s y 44.4 L/s. Se observó que a mayor caudal, mayor es la socavación alcanzada y que el sedimento atraviesa el puente cajón rápidamente depositándose en la fosa de socavación. Se observó que las fosas de socavación fueron cubiertas parcialmente con formas del lecho, por lo que las profundidades alcanzadas en la fosa de socavación son menores a las que se alcanzarían en condición de aguas claras. La Figura 5 muestra las fosas de socavación aguas abajo para los caudales de 39.4 L/s y 41.9 L/s, con velocidades medias de 0.39 m/s y 0.42 m/s respectivamente.

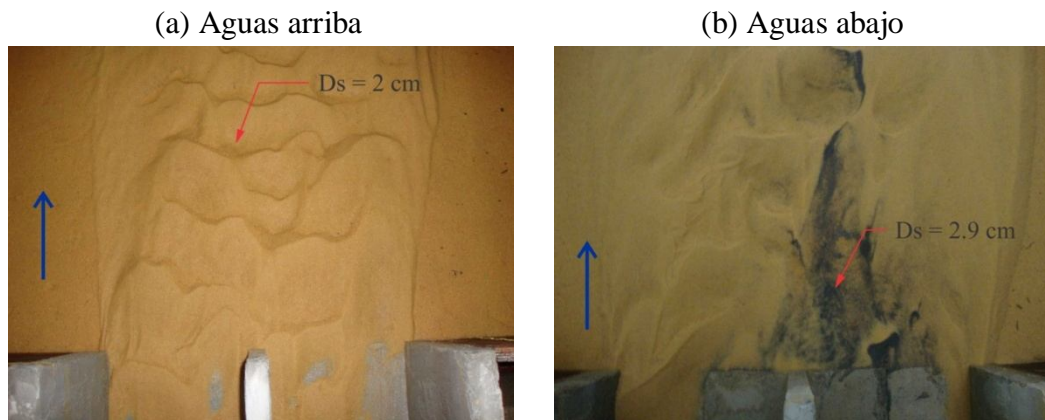


Figura 5. Fosas de socavación para caudales de 39.4 L/s y 41.9 L/s.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA FOSA DE SOCAVACIÓN

La tercera serie de ensayos se realizó en condición de aguas claras. Se consideró como condición de trabajo un caudal de 41.9 L/s, una altura de flujo de 20 cm y una velocidad media de 0.42 m/s. La duración del ensayo fue de 26 horas y se llegó a la condición de equilibrio. Se estudió las

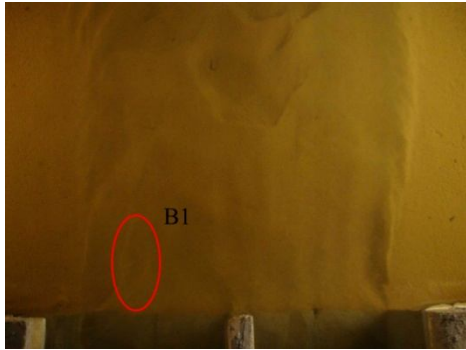
(a) T = 1 hora



(b) T = 3 horas



(c) T = 5.5 horas



(d) T = 10 horas



(e) T = 14.5 horas



(f) T = 21 horas



(g) T = 26 horas



(h) T = 26 horas



Figura 6. Desarrollo en el tiempo de la fosa de socavación.

etapas del desarrollo de la fosa de socavación, la evolución de la longitud y el ancho a lo largo del tiempo, y las características geométricas de la fosa de equilibrio. La Figura 6 muestra el desarrollo de la fosa de socavación en el tiempo hasta alcanzar la condición de equilibrio.

En la Figura 6 se puede observar que en las primeras 5.5 horas la fosa de socavación es relativamente plana desarrollándose 3 regiones de socavación, con profundidades levemente mayores al resto de la fosa (regiones A, B y B1). La región A aparece a la hora de iniciado el ensayo, la región B a las tres horas de iniciado el ensayo y la región B1 a las 5.5 hr de iniciado el ensayo. En las siguientes horas esas regiones se desarrollan notablemente hasta que a las 26 hr de iniciado el ensayo cubren la totalidad de la fosa de socavación.

La Figura 7 muestra la evolución del largo y el ancho de la fosa de socavación con el tiempo. Se observa que el ancho de la fosa de socavación es aproximadamente constante a lo largo del tiempo y que a las 5 hr de iniciado el ensayo el ancho se estabiliza en torno a 80 cm, aumentando muy levemente después. El largo de la fosa de socavación aumenta rápidamente durante las primeras 3.5 hr, alcanzando un valor de 137 cm. En las 22.5 h siguientes el desarrollo es más paulatino, hasta alcanzar la dimensión final de 182 cm.

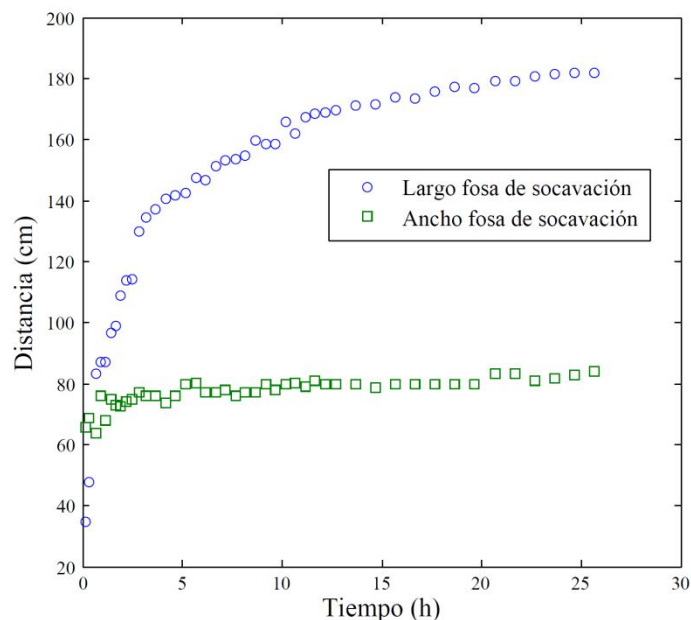


Figura 7. Evolución del largo y el ancho con el tiempo.

Finalmente, la Figura 8 muestra la topografía de la fosa de socavación en la condición de equilibrio y la Figura 9 la vista en planta, con la ubicación de las profundidades máximas de socavación. Se observa en esta última que el largo de la fosa es de 182 cm y su ancho de 84 cm. La profundidad de socavación máxima alcanzada fue de 9.3 cm y se ubicó en la región B. La profundidad de socavación máxima en la región B1 fue de 4.6 cm y en la región A de 4.7 cm. La altura máxima de depositación (Hm) fue de 4.9 cm y se ubicó al final de la fosa de socavación.

Se observa en las Figuras 6, 8 y 9 que la fosa se inclina hacia la derecha, mirando hacia aguas abajo, lo cual quedaría explicado por el efecto Coandă. Se realizaron más ensayos, que no se

muestran en este trabajo, en que la fosa de socavación se inclinaba tanto hacia la derecha como a la izquierda.

El efecto Coandă es la tendencia de un chorro a adherirse a una superficie cercana. French (1970) menciona que cualquier perturbación aleatoria que desvíe el chorro provoca a su vez perturbaciones en el flujo de recirculación y el chorro se adhiere a una de las paredes laterales. Por lo anterior, se sugiere que la fosa de socavación aguas abajo del puente cajón es simétrica pero inestable, propensa a inclinarse hacia una dirección.

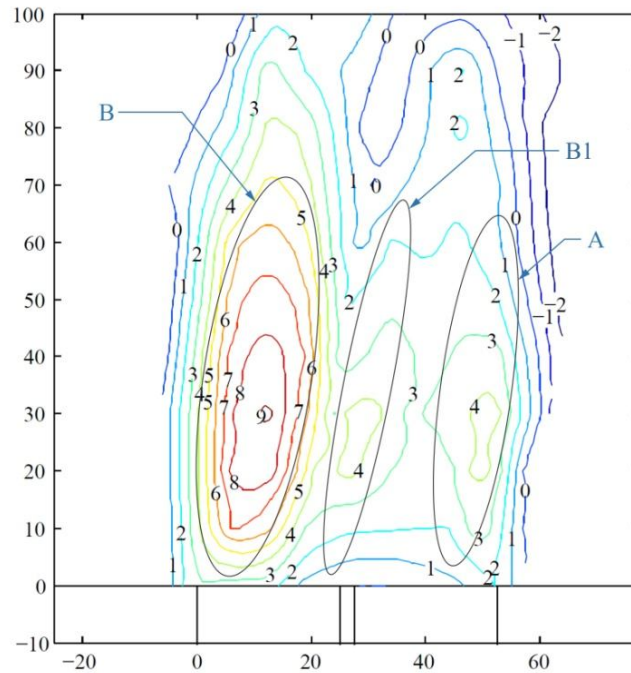


Figura 8. Topografía de la fosa de socavación (curvas de nivel cada 1 cm).

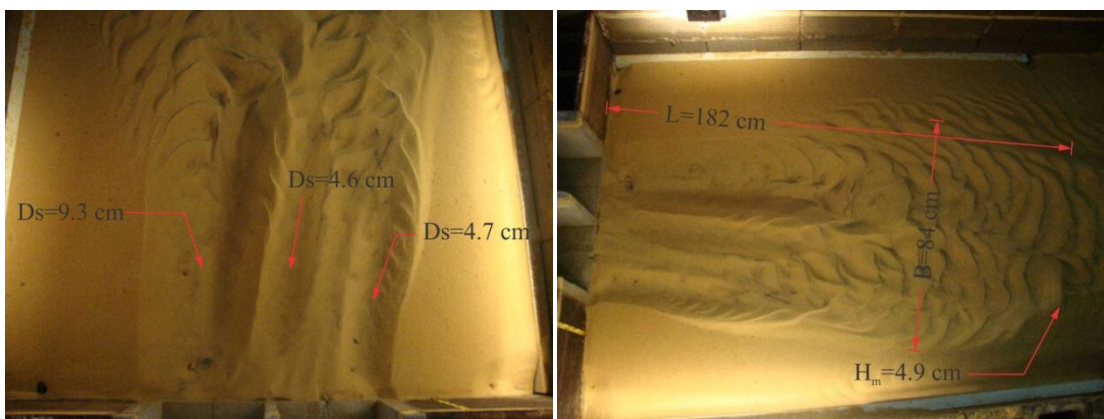


Figura 9. Longitudes características de la fosa de socavación de equilibrio.

3.3 MECANISMOS DE SOCAVACIÓN

Nezu (2005) describió las estructuras de flujo para canales rectangulares en que la razón ancho-profundidad es menor a cinco. Para ese caso, el flujo ya no puede ser considerado bidimensional y las corrientes secundarias no son despreciables. La Figura 10 (a) muestra esquemáticamente las estructuras de flujo transversales para una canal de razón ancho-profundidad menor a 5. Se observa una corriente secundaria a lo largo de la bisectriz dirigida hacia la esquina inferior de la sección rectangular. En la esquina, parte del flujo asciende a lo largo del muro lateral hacia la superficie libre, mientras que la otra parte se dirige hacia el centro del cauce por el fondo. Nezu y Rodi (1985) midieron el campo de velocidad en un canal abierto con una razón ancho-profundidad de 2 ($B/h=2.0$). El régimen de flujo era subcrítico. La Figura 10 (b) muestra sus resultados, los cuales son similares a lo mostrado en la Figura 10 (a).

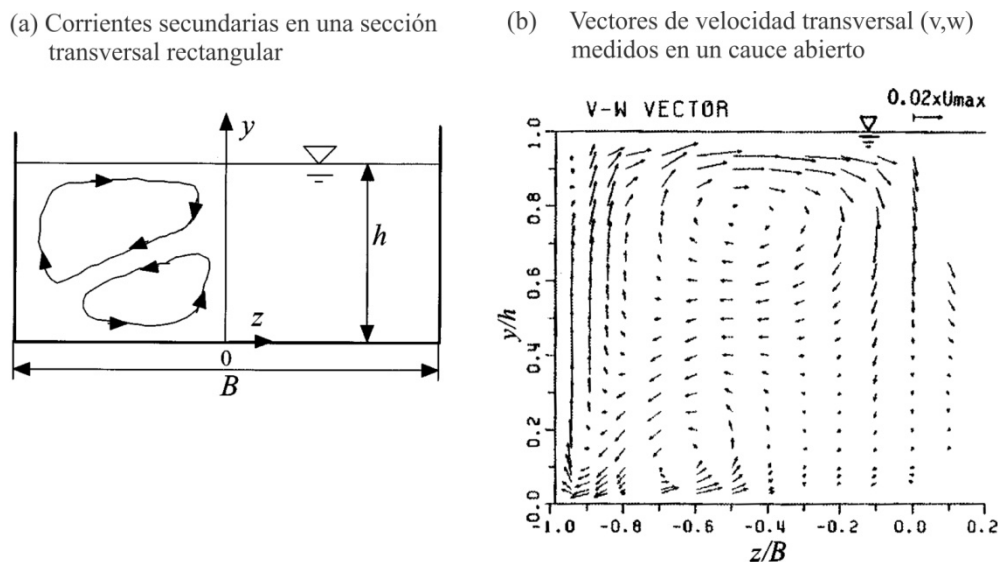


Figura 10. Campo de velocidades para un canal rectangular: (a) esquemático (Nezu, 2005), (b) medido (Nezu y Rodi, 1985).

El canal de aproximación al puente cajón experimental tiene una razón ancho-profundidad de dos, al igual que el caso que estudió Nezu, por lo que la estructura del flujo al llegar al puente cajón debiera ser similar. Sin embargo, en la sección del puente cajón se tiene el efecto del muro central el cual puede alterar la estructura del flujo.

Para observar las estructuras de flujo en el puente cajón se inyectó tinta a los costados de los muros laterales y del muro central. Se observó que en las esquinas de los muros laterales el flujo se subdivide efectivamente en dos subceldas tal como propone Nezu (2005). En el muro central se observó que el flujo es ascendente, sin una componente que se dirija hacia el centro del cajón. Lo anterior explicaría que la socavación a la salida del muro central sea menor que a la salida de los muros laterales.

En consecuencia, la socavación a los costados del puente cajón es mayor porque la componente secundaria del flujo que va por el fondo del canal ejerce un esfuerzo de corte adicional. En cambio, a la salida del muro central el flujo es principalmente ascendente por lo que el esfuerzo

de corte es menor, y por ende también la socavación. La Figura 11 muestra un esquema del flujo propuesto en base a las observaciones realizadas.

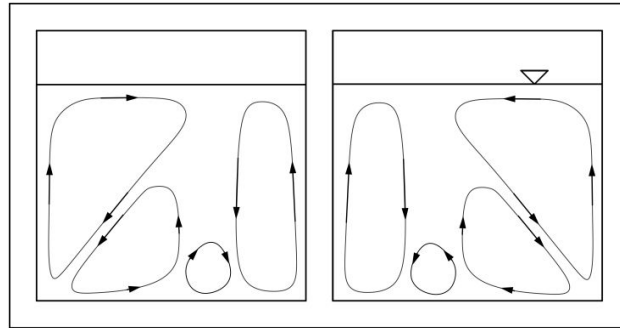


Figura 11. Esquema propuesto para las corrientes secundarias en un puente cajón doble.

4. CONCLUSIONES

A partir del presente trabajo se puede concluir que la forma de la fosa de socavación para un puente cajón doble es alargada, con un ancho y largo de 1.6 y 3.5 veces el ancho del puente cajón respectivamente. Además, la fosa presenta dos regiones de socavación a lo largo de los ejes de los muros laterales del puente cajón, con profundidades mucho mayores que en el resto de la fosa. El tiempo para lograr la condición de equilibrio es del orden de 26 horas, mucho mayor a lo propuesto para alcantarillas por Abt et al (1987) quien plantea que el tiempo de equilibrio estaría en torno a 316 minutos (5.25 horas). La estructura de flujo es marcadamente tridimensional e influye en la forma de la fosa de socavación, explicando la formación de las dos regiones de socavación encontradas.

Se postula como hipótesis explicativa de la geometría de la fosa de socavación aguas abajo del puente cajón, la existencia del efecto Coandă. Esta hipótesis deberá ser verificada mediante ensayos específicos que pretendemos desarrollar en el futuro cercano.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a INNOVA BÍO BÍO por el financiamiento a través de la línea para apoyar la realización de tesis de pre y post grado 2012.

REFERENCIAS

Abt, S., Ruff, J., Doehring, F., y C. Donell (1987) Influence of culvert shape on outlet scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(3).393-400.

Bormann, N., y P. Julien (1991) Scour downstream of grade-control structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(5).579-594.

Dietz, J. W. (1969) Kolkbildung in FeinenoderLeichterSohlmaterialienbeiStrömendemAbfluss. Mitteilungen des Theodor RehbockFluBbaulaboratorium.UniversitätFridericiana Karlsruhe. Germany.

French, J., y W. Guntheroth (1970) An explanation of asymmetric upper extremity blood pressures in supra-avalvular aortic stenosis: the coandă effect. Journal of the American Heart Association, 42(7).31-36.

Hoffmans, G., y H. Verheij (1997) Scour Manual.A.A. Balkema. Rotterdam.

MOP (2012) Manual de Carreteras. Ministerio de Obras Públicas de Chile. Santiago.

Nezu, I. (2005) Open-channel flow turbulence and its research prospect in the 21st century.Journal of Hydraulic Engineering, 131(4).229-246.

Nezu, I., y W. Rodi (1985) Experimental study on secondary currents in open channel flow. Proceedings 21th International Association for Hydro-Environment Engineering and Research Congress.Melbourne. Australia. Agosto.