

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

DESARROLLO ESPACIO-TEMPORAL DE LA FOSA DE SOCAVACIÓN ALREDEDOR DE UNA CEPA DE PUENTE

**MARÍA MALDONADO S.¹
OSCAR LINK L.²**

RESUMEN

La socavación local alrededor de cepas es una de las causas principales de falla de puente, por lo que resulta útil obtener información detallada del proceso y los parámetros que la controlan. Si bien existen varias ecuaciones empíricas que entregan recomendaciones de diseño para cepas de puentes en suelos no cohesivos, se detecta una falta de información para sedimentos cohesivos. Por lo anterior, en este trabajo se presenta una caracterización del desarrollo de la socavación producida alrededor de un cilindro en un lecho compuesto por sedimento fluvial con cohesión. Se desarrolló una instalación experimental capaz de medir la socavación basada en un mecanismo no intrusivo y de alta precisión. Se montó un cilindro experimental con un distanciómetro láser en su interior que registró el radio de socavación para una profundidad, dirección y tiempo determinado. El cilindro se instaló en un canal de gran tamaño, a fin de disminuir los efectos de escala. Los resultados obtenidos mostraron claras diferencias entre la fosa que se produce en arena y aquella que se produce en sedimento con cohesión, tanto en la variación temporal de la fosa como en la profundidad máxima alcanzada. Los resultados obtenidos aportan información relevante para el diseño de obras hidráulicas fundadas en lechos móviles con cohesión.

¹Tesista, Magister en Cs. de la Ing., Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – mail: marimaldonado@udec.cl

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

1. INTRODUCCIÓN

La socavación local esperada alrededor de una cepa condiciona el diseño hidráulico de puentes, por lo que numerosos estudios se han enfocado en determinar los parámetros que la controlan. Es sabido que la socavación local es causada principalmente por la formación de vórtices de herradura que van erosionando el lecho y que provocan el deslizamiento de las paredes de la fosa cuando ésta aumenta de tamaño, y vórtices de estela que interactúan con los de herradura, aumentando el poder erosivo del flujo (Richardson y Davis, 2001). Kirkil *et al.* (2008), mediante visualizaciones en laboratorio y *large-eddy simulations* (LES), investigaron las estructuras turbulentas coherentes en la fosa de socavación alrededor de un cilindro, destacando que al pie del cilindro se forma un sistema de vórtices del tipo herradura con diferentes intensidades, y que los vórtices de estela para el caso del cilindro comienzan a generarse a los lados de la cepa, desplazándose en una dirección relativamente paralela al flujo. La Figura 1 esquematiza el campo de flujo alrededor de un cilindro.

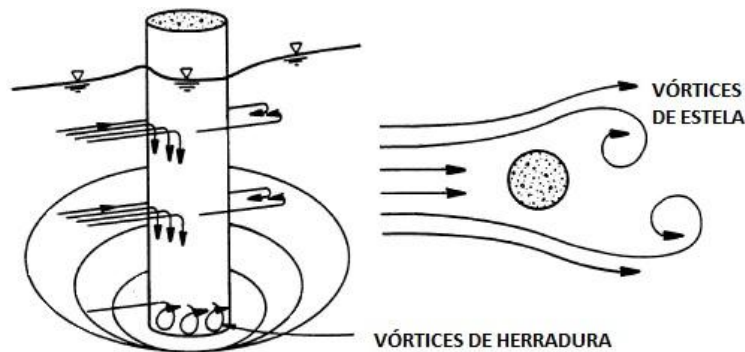


Figura 1 Formación de vórtices alrededor de una pila (Richardson y Davis, 2001)

Los primeros estudios de socavación se enfocaron en cuantificar la profundidad máxima de la fosa en arena. Este parámetro es fundamental para el diseño de fundaciones directas e indirectas ya que puede producir asentamientos diferenciales y/o quitar capacidad resistente por fricción al pilote. En ese contexto, Melville y Sutherland (1988) mostraron que la socavación máxima es hasta 2.5 veces el diámetro de la cepa y concluyeron que para suelos no cohesivos el ángulo medio del talud de la fosa coincide con el ángulo de reposo del sedimento. Posterior a estas investigaciones se desarrollaron fórmulas empíricas con capacidad predictiva, destacando la de Richardson y Davis (2001), comúnmente conocida como HEC-18 y recomendada por el US-FHWA para determinar la socavación alrededor de cepas, y la desarrollada por Melville y Coleman (2000), que es usada en Nueva Zelanda para el diseño de cepas de puentes, así como aquella por Zanke *et al.* (2011). Más recientemente, se han realizado avances en el estudio de la socavación que permitieron que las investigaciones no se limiten sólo a determinar su valor máximo, sino que también caractericen su variación temporal (e.g., Yanmaz and Altinbilek, 1991; Kothiyari *et al.*, 1992; Oliveto y Hager, 2002) y la geometría de la fosa de socavación (Yanmaz y Köse, 2007; Link 2008; Gobert *et al.*, 2010). Las últimas investigaciones han analizado la fosa de socavación con más detalle y concluyen que, tanto para arena fina como para arena gruesa y grava, la socavación inicialmente es mayor hacia los lados de la cepa, debido a que la separación del flujo provoca las aceleraciones máximas en ese lugar, pero finalmente se hace máxima justo delante de ella (Link *et al.*, 2008; Link, 2008; Diab *et al.*, 2010).

Por otro lado, se detecta una cantidad notablemente menor de investigaciones sobre sedimentos cohesivos, probablemente debido a la mayor complejidad que significa trabajar con este tipo de sedimentos, dadas sus características físico-químicas, fuerzas internas y capacidad de formar flóculos (Partheniades, 2009). Ting *et al.* (2001) realizaron experimentos de socavación alrededor de pilas circulares con tres tipos de arcillas, determinando que la profundidad máxima final esperada es similar a la de un suelo granular en condiciones análogas. Además, plantearon un modelo hiperbólico para predecir la socavación en suelos arcillosos usando el método SRICOS, basado en el mecanismo propuesto por Briaud *et al.* (1999) y denominado *erosion function apparatus* (EFA), el cual permite medir la tasa de erosión para una determinada tensión de corte. Ansari *et al.* (2002) desarrollaron estudios sobre la influencia de la cohesión en la socavación alrededor de cepas de puentes en mezclas de arena con varios contenidos de arcilla (entre 5% y 60%), mediante ensayos en un canal experimental. Concluyeron que, contrario a lo indicado por Ting *et al.* (2001), para sedimentos de alta plasticidad, la socavación final disminuye con el aumento del contenido de arcilla y de la cohesión, y que aumenta a mayor ángulo de fricción interna. El mismo estudio recalca la importancia del contenido de humedad, mencionando que la profundidad de socavación es mayor cuando el contenido de humedad sobrepasa a la humedad de saturación. Más recientemente, Debnath y Chaudhuri (2010) reforzaron las conclusiones de Ansari *et al.* (2002), destacando la influencia que tienen la cohesión y el contenido de arcilla en la socavación. A pesar de que no existe consenso respecto del efecto de la cohesión sobre la profundidad máxima de socavación, los autores concuerdan en que el proceso de socavación en suelos cohesivos es más lento y que la pendiente de la fosa es mayor que en arena (Molinas *et al.*, 1999; Ting *et al.*, 2001; Ansari *et al.*, 2002).

No obstante lo anterior, es importante aclarar que la mayoría de los estudios de socavación en sedimento cohesivo se basan en ensayos realizados con sedimentos con gran contenido de arcilla y mezclas artificiales preparadas en laboratorio. Por ello, el efecto de la cohesión de un sedimento natural sobre la socavación local ha sido hasta la fecha un tema poco tratado y poco comprendido en cuanto a los mecanismos que lo controlan, lo que motiva el presente estudio. En particular, esta materia resulta relevante para el caso chileno ya que concierne a obras hidráulicas emplazadas en cauces de la Cordillera de la Costa, dado que ahí existen sedimentos con cohesión. En este contexto cabe señalar que el Manual de Carreteras, publicado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2002), entrega recomendaciones de diseño para cepas de puentes en suelos granulares.

2. EXPERIMENTACIÓN

Se montó una instalación experimental en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica y Ambiental del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción.

Instalación experimental

Los ensayos se realizaron en un canal rectangular de 26 m de largo, 2 m de ancho y 0.74 m de profundidad, que se encuentra conectado a un circuito de recirculación que incluye un sumidero y un aquietador de corrientes, permitiendo simular el flujo de un río. En el canal se construyó un área de trabajo de $2 \times 2 \times 0.3 \text{ m}^3$ ubicada 20 m aguas abajo de la entrada del canal, en la cual se

instaló un cilindro de plexiglás de 15 cm de diámetro con un distanciómetro láser en su interior que permite registrar la socavación sin alterar el lecho ni el flujo. Para evitar la instalación de sedimento en todo el canal, fuera del área de trabajo se elevó el nivel del fondo en 0.3 m con losetas apoyadas sobre ladrillos. A fin de evitar flujos secundarios, las paredes de la sección de trabajo se aislaron con material absorbente. La Figura 2 muestra un esquema de la instalación experimental.

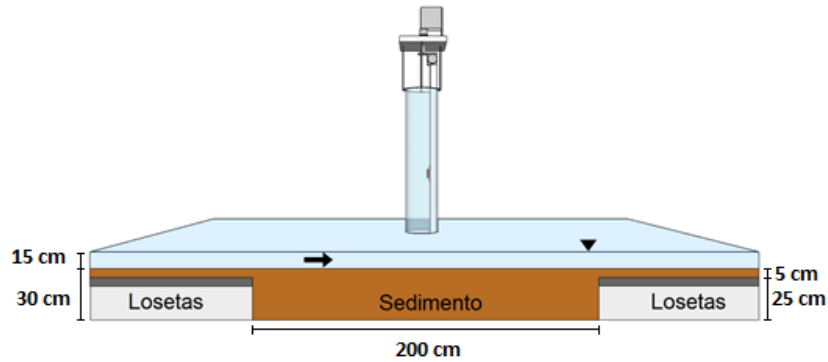


Figura 2 Instalación experimental, esquemático.

Técnica de medición

La profundidad del flujo fue controlada mediante una compuerta ubicada al final del canal y medida con sensores de distancia por ultrasonido (UDS). El perfil de velocidades fue medido con un velocímetro acústico Doppler (ADV). La fosa de socavación fue medida con una precisión de ± 0.4 mm mediante un distanciómetro láser (LDS) con una frecuencia de 70 Hz, ubicado en el interior del cilindro. El distanciómetro puede moverse en sentido vertical mediante un motor con una precisión de ± 0.02 mm, permitiendo la medición de perfiles verticales en la fosa de socavación. El eje vertical es girado por un segundo motor con una precisión de $\pm 0.01^\circ$, de manera que pueden registrarse perfiles verticales en diferentes direcciones azimutales. Las mediciones del LDS son administradas mediante un sistema de adquisición de datos en tiempo real. Se registran la profundidad de la fosa y la distancia radial desde el centro del cilindro, el ángulo azimutal y el tiempo, como se indica en la Figura 3.

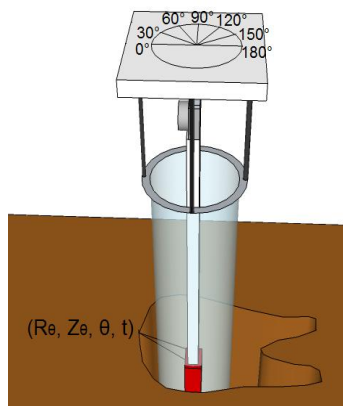


Figura 3 Instalación experimental y esquema de medición

Características del sedimento utilizado

El sedimento utilizado en los ensayos de socavación corresponde al estero Chaimávida, un tributario del río Andalién ubicado en el sector del mismo nombre, en el camino Concepción-Florida. Se escogió este suelo como representativo de los sedimentos fluviales presentes en gran parte de la Cordillera de la Costa, para ver el efecto de la fracción cohesiva sobre la socavación. El suelo contiene tanto partículas gruesas como finas y fue remodelado para las experiencias de laboratorio. El suelo remodelado es representativo de un caso real, ya que al materializar una cepa de puente se debe remover el suelo de fundación. Sin embargo, para observar las diferencias entre la geometría de la fosa del sedimento del estero Chaimávida con las de un sedimento granular, se realizaron ensayos similares utilizando una arena fina. Ambos sedimentos se caracterizaron mediante ensayos estándar de mecánica de suelos. La Tabla 1 muestra los parámetros relevantes.

Tabla 1 Características de los sedimentos utilizados

Nombre	Chaimávida	Arena fina
Peso específico seco <i>in situ</i> (γ_d)	1.51 T/m ³	1.45 T/m ³
Gravedad específica de los sólidos (Gs)	2.58	2.56
Diámetro medio (d_{50})	0.07 mm	0.3 mm
Ángulo de fricción interna (ϕ)	24.6°	25.1°
Límite líquido (LL)	47.5%	-
Índice de plasticidad (IP)	13.7%	-
Cohesión	0.056 kg/cm ²	-
Humedad óptima de compactación	8.4%	-

Condiciones hidráulicas

Los ensayos de socavación se realizaron a una velocidad levemente menor a la del transporte incipiente. Para el sedimento Chaimávida, la velocidad de transporte incipiente se determinó por inspección visual, mientras que en arena fina se determinó con el criterio de Shields. Las velocidades del escurrimiento utilizadas fueron de 0.24 m/s en sedimento Chaimávida y de 0.22 m/s en arena fina. En ambos casos la altura del escurrimiento fue de 22.5 cm.

3. RESULTADOS

La Figura 4 muestra fotografías de la fosa de socavación en sedimento Chaimávida y arena fina. El volumen socavado en el caso cohesivo es bastante menor que en el caso granular; y además, las zonas donde se presentan las mayores profundidades de socavación son distintas a las observadas en la arena. En el sedimento del estero Chaimávida no se produjo socavación aguas arriba del cilindro. A diferencia del caso granular en donde aguas abajo se produce una zona de depositación, en el sedimento Chaimávida se observó una leve socavación. Destaca además, que en la zona de socavación para el sedimento cohesivo las partículas sobre la superficie de la fosa poseen un mayor diámetro que en las zonas del lecho donde no se presenta socavación, sugiriendo que las partículas más finas entraron en suspensión.



Figura 4 Superior: socavación en arena después de 30 horas. Inferior: socavación en sedimento del estero Chaimávida, después de 60 horas

La Figura 5 presenta la profundidad máxima de socavación en los diferentes planos, para cinco tiempos, $t = 1, 2, 6, 13$ y 20 horas.

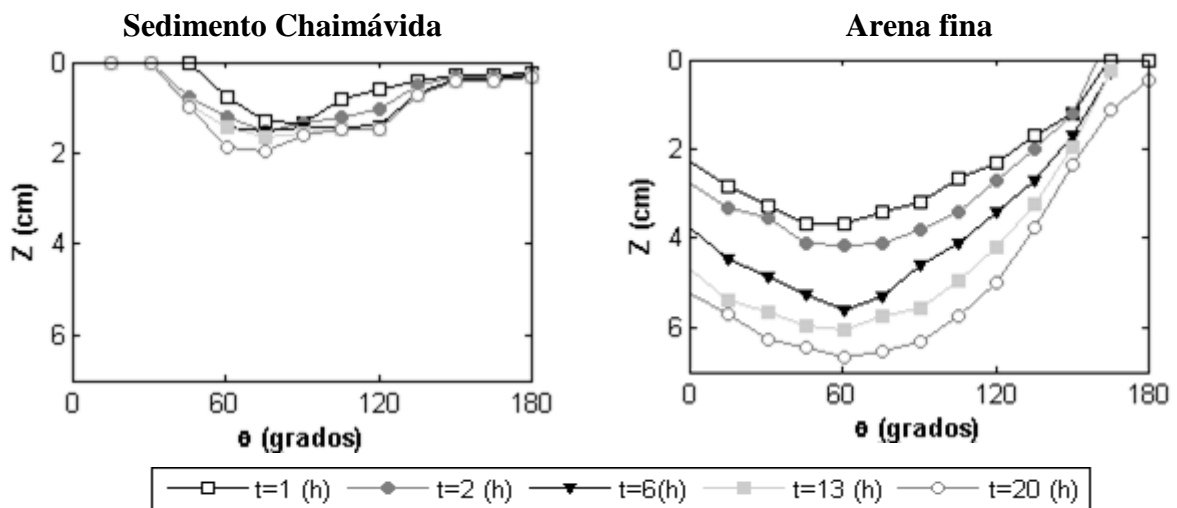


Figura 5 Profundidad máxima de socavación para los distintos ángulos de medición

En ambos sedimentos la socavación máxima se observó a los costados de la cepa.

Profundidad máxima en los diferentes planos

La evolución temporal de las profundidades máximas normalizadas para ambos sedimentos se presenta en la Figura 6. Para normalizar, se dividieron las profundidades por la profundidad máxima de cada sedimento. La figura indica que en ambos casos la tasa de socavación es mayor al comienzo del experimento. Se observa que las mayores profundidades se registran en los lados de la cepa, lo que se debe a que en ese lugar se producen las mayores aceleraciones del flujo y, en consecuencia, la mayor tensión de corte aplicada sobre el sedimento. En el caso granular, la socavación aguas arriba es casi igual que la observada en los lados del cilindro.

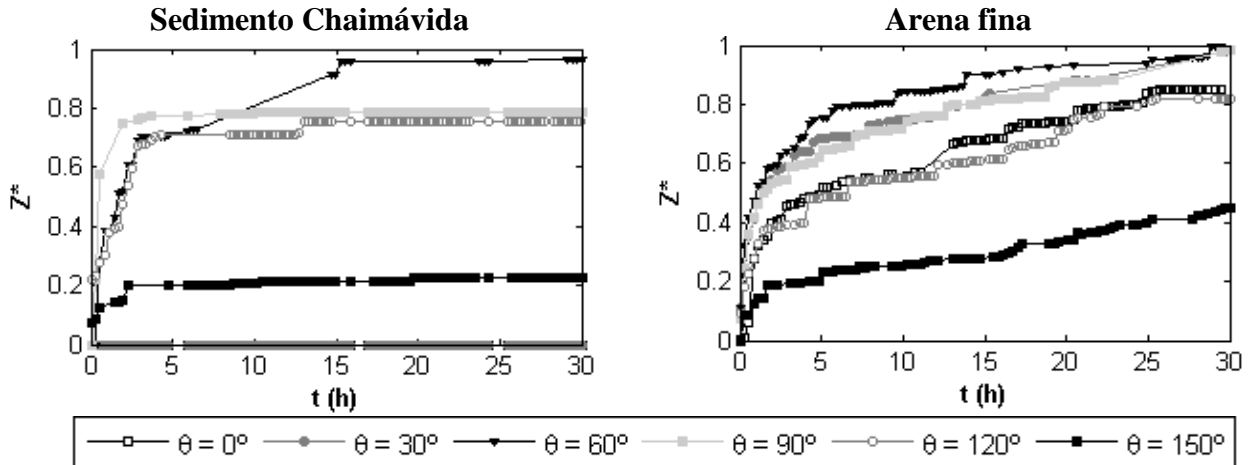


Figura 6 Profundidad máxima normalizada en el tiempo, para seis perfiles

Distancia radial máxima en los diferentes planos

En la Figura 7 se presentan las distancias radiales máximas normalizadas sobre el tiempo, para los perfiles entre 0 y 90° . Para normalizar, se dividieron las distancias radiales por la distancia radial máxima de cada sedimento.

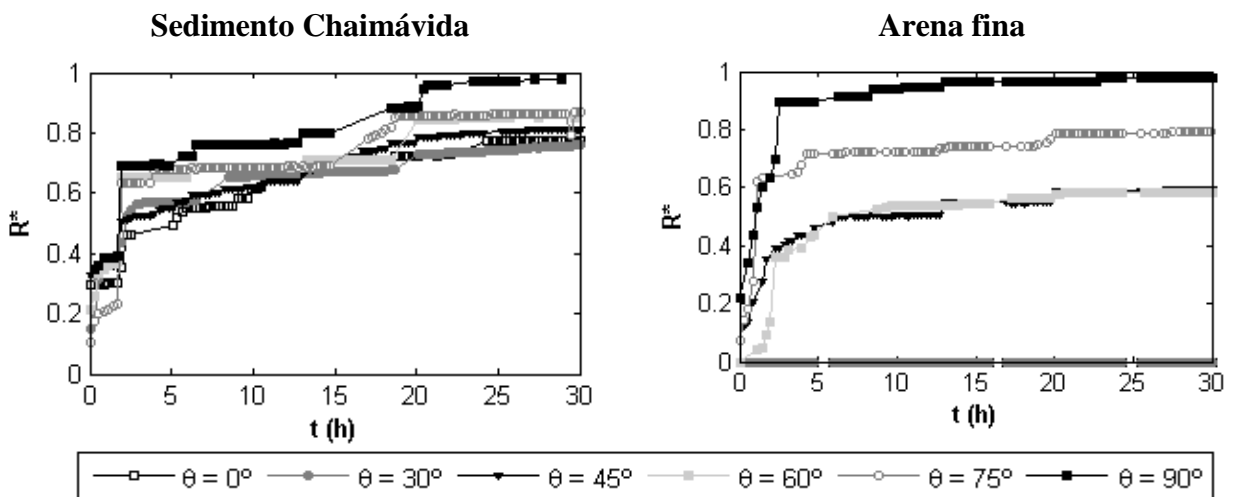


Figura 7 Distancia radial máxima normalizada en el tiempo para seis perfiles

En el sedimento cohesivo, no se observan grandes diferencias en distancia radial en el tiempo. La distancia radial máxima de la fosa se mantiene relativamente constante en el sedimento Chaimávida por efecto de la cohesión, que impide deslizamientos del talud socavado.

Topografía de la fosa de socavación

La Figura 8 muestra la topografía medida de la fosa de socavación. La profundidad de socavación corresponde a la variable Z positivo y es equivalente a la elevación negativa del terreno.

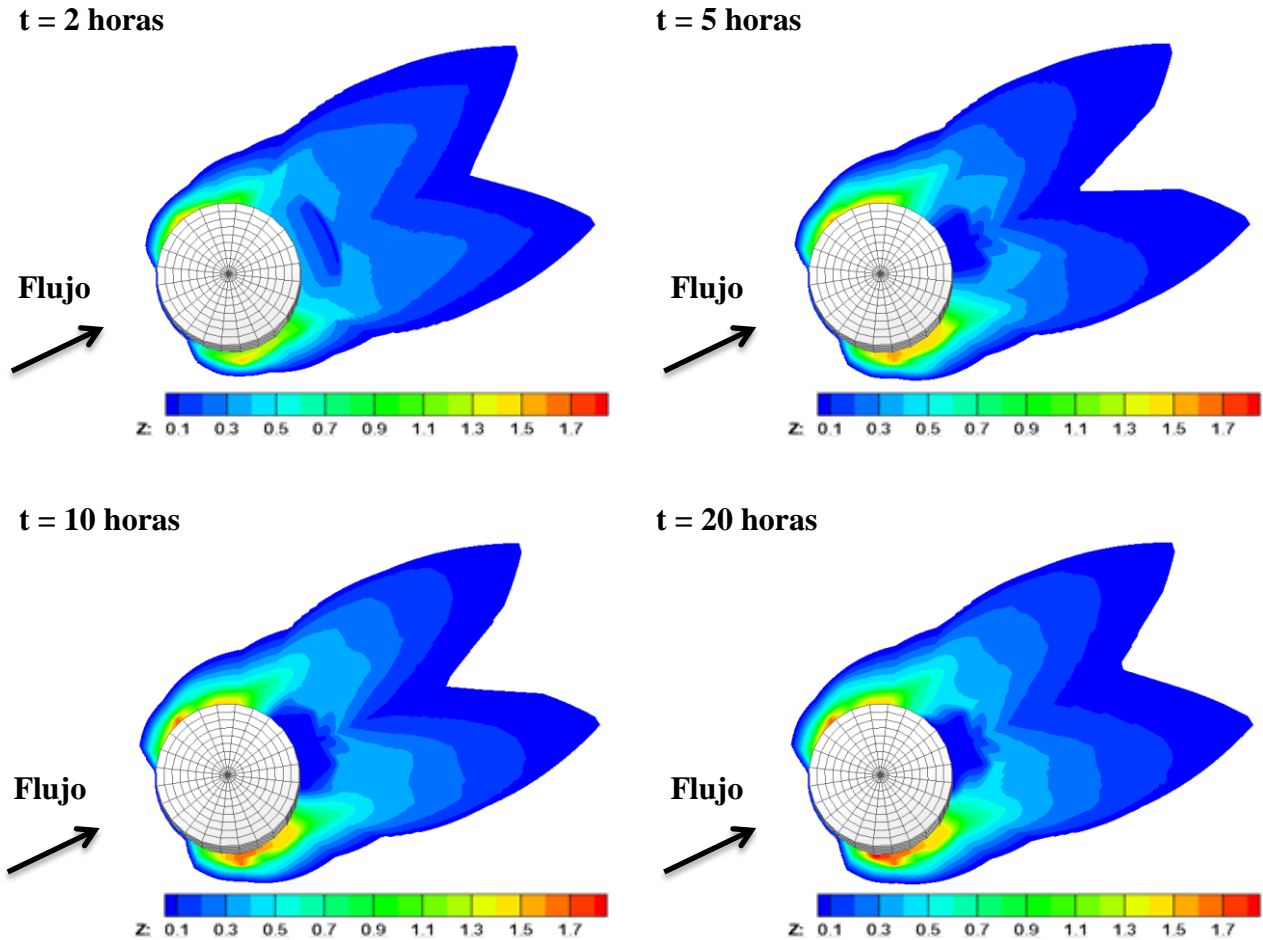


Figura 8 Desarrollo de la fosa para $t = 2, 5, 10$ y 20 horas

El primer indicio de socavación se observa dentro de la primera hora de medición, aproximadamente 5 cm aguas abajo de la parte posterior del cilindro. El sedimento más fino entra en suspensión y deja las partículas más gruesas expuestas a la acción de la corriente. A la segunda hora de experimentación se comienza a observar una leve socavación en los 90° , desde donde se comienza a propagar hacia atrás y hacia adelante, alcanzando en la tercera hora una socavación que va desde el ángulo 30° hasta el 180° , exceptuando la zona de 5 cm de largo sin socavar justo detrás de la cepa. Entre los 30° y los 60° , la socavación comienza después del inicio

del experimento, y posee una menor distancia radial. La profundidad de la fosa es mayor a la que se aprecia en la parte posterior de la cepa.

Los perfiles de la fosa de socavación para cinco tiempos representativos se presentan en la Figura 9.

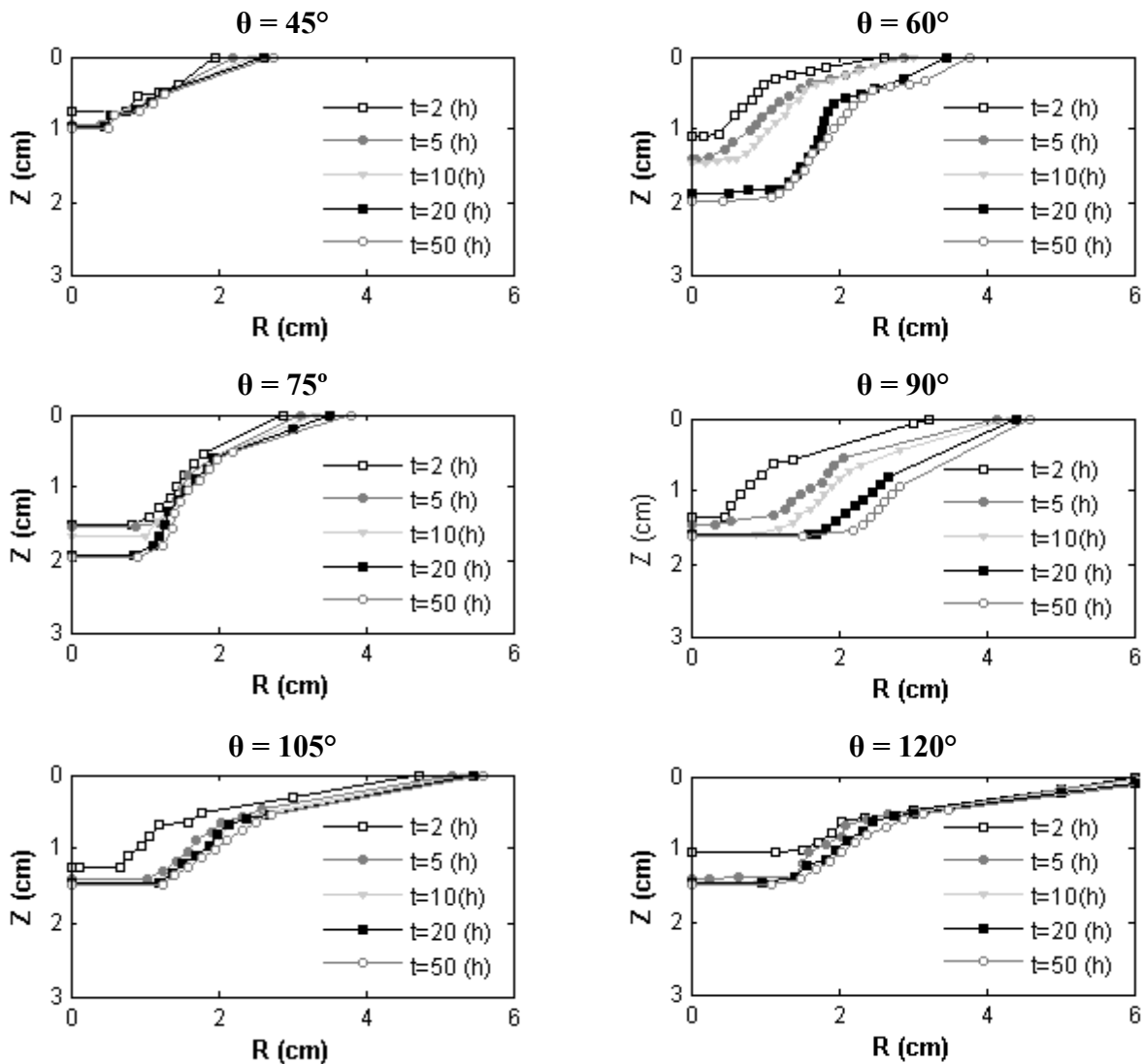


Figura 9 Perfiles transversales para $t = 2, 5, 10, 20$ y 50 horas

Se observa una gran diferencia en la relación distancia radial/profundidad al comparar la fosa desde los 90° hacia aguas abajo versus los 90° aguas arriba. Se aprecia una pendiente mayor al ángulo de reposo del sedimento del estero Chaimávida, lo que sugiere el efecto de la cohesión en el talud vertical en esa zona.

4. CONCLUSIÓN

Se desarrolló una instalación experimental que permitió medir con alta precisión el desarrollo espacio-temporal de una fosa de socavación alrededor de un cilindro hincado en sedimento Chaimávida y en arena fina.

Se observaron diferencias importantes entre la socavación en sedimento Chaimávida y arena fina, especialmente en cuanto a la magnitud y ubicación de la profundidad y distancia radial máxima, volumen socavado y velocidad de socavación, como se observa en la Figuras 4, 5, 6 y 7. Para el sedimento Chaimávida se observa socavación aguas abajo y no aguas arriba del cilindro, de forma inversa a lo que se observa en la arena fina. En el sedimento Chaimávida el volumen socavado es bastante menor que en arena y su distancia máxima radial se mantiene relativamente constante, atribuyéndole a esto el efecto de la cohesión.

Los ensayos presentados corresponden a sólo un sedimento con cohesión y se enmarcan en el desarrollo de una serie de experimentos planificados con el fin de generalizar las características descritas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) por el financiamiento a través del proyecto FONDECYT 11080126, y a INNOVA BÍO BÍO por el financiamiento a través de la línea para apoyar la realización de tesis de pre y post grado 2011.

REFERENCIAS

Ansari, S., U. Kothiyari y K. Ranga Raju (2002) Influence of cohesion on scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 40(6). 719-729.

Briaud, J., F. Ting, H. Chen, R. Gudavalli, S. Perugu y G. Wei (1999a) SRICOS: Prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(4). 237-246.

Debnath, K. y S. Chaudhuri (2010) Bridge pier scour in clay-sand mixed sediments at near-threshold velocity for sand. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(9). 597-609.

Diab, R., O. Link y U. Zanke (2010) Geometry of developing and equilibrium scour holes at bridge piers in gravel. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 37(4). 544-552.

Gobert, C., O. Link, M. Manhart y U. Zanke (2010) Discussion of coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole by G. Kirkil, S. G. Constaninescu and R. Ettema. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(1). 82-84.

Kirkil, G., S. G. Constantinescu y R. Ettema (2008) Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(5). 572-587.

Kothyari, U., R. Garde y K. Ranga Raju (1992) Temporal variation of scour around circular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(8). 1091-1106.

Link, O. (2008) Medición del desarrollo espacio-temporal de la socavación local alrededor de un cilindro hincado en un lecho de arena gruesa. *Ingeniería Hidráulica en México*, 23(2). 59-74.

Link, O., F. Pflieger y U. Zanke (2008) Characteristics of developing scour-holes at a sand-embedded cylinder. *International Journal of Sediment Research*, 23(3). 268-276.

Melville, B. y S. Coleman (2000) *Bridge Scour*. Water Resources Publication. Fort Collins, Colorado.

Melville, B. y A. Sutherland (1988) Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10). 1210-1226.

Molinas, A. S. Jones y M. Hosny (1999) Effects of cohesive material properties on local scour around piers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. No. 1690, pp. 164-174.

MOP (2002). *Manual de Carreteras: Edición de Junio del año 2002*. Ministerio de Obras Públicas de Chile.

Oliveto, G. y W. Hager (2002) Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9). 811-820.

Partheniades, E. (2009) *Cohesive Sediments in Open Channels: Properties, Transport, and Applications*. Butterworth-Heinemann. Burlington.

Richardson, E. y S. Davis (2001) *Evaluating Scour at Bridges*. 4th Edition. HEC-18. Federal Highway Administration, U.S, Department of Transportation, Washington D.C.

Ting, F., J. Briaud, H. Chen, R. Gudavalli, S. Perugu y G. Wei (2001) Flume tests for scour in clay at circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(11). 969-978.

Yanmaz, A. y H. Altinbilek (1991) Study of time-dependent local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(19). 1247-1268.

Yanmaz, A. M. y O. Köse (2007) Surface characteristics of scouring at bridge elements. *Turkish Journal of Engineering Environmental Science*, 31(2). pp. 127-134.

Zanke, U., T. Hsu, A. Roland, O. Link, R. Diab (2011). Equilibrium scour depth around piles in noncohesive sediments under currents and waves. *Coastal Engineering*. 58(10). pp 986-991.