

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EFFECTO DE LA COMPACTACION DEL LECHO SOBRE LA SOCAVACION
ALREDEDOR DE UN CILINDRO EN SUELO COHESIVO**

OSCAR LINK L.¹
KAI KLISCHIES N.²

RESUMEN

Se presentan ensayos de socavación alrededor de una cepa de puente hincada en lecho cohesivo a fin de investigar el efecto de la compactación del lecho sobre la socavación. Los ensayos se realizaron en una canaleta de 26 m de largo, 2 m de ancho y 0.74 m de profundidad del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica Ambiental de la Universidad de Concepción. El sedimento se obtuvo del estero Coliumo, ubicado en la Cordillera de la Costa y corresponde a una mezcla de arena con arcilla caolinítica. En los ensayos, la velocidad media del escurrimiento fue igual al 95% de la velocidad crítica correspondiente al d_{50} de la fracción gruesa y se varió la humedad y energía de compactación. La fosa de socavación se midió en forma no intrusiva con un distanciómetro láser posicionado mediante motores paso a paso ubicados en el interior de la cepa. Los resultados muestran que el mecanismo de socavación dominante (terrones, agregados de partículas y partículas) cambia con la humedad de compactación. La profundidad máxima de socavación generalmente se encuentra aguas abajo de la cepa, a diferencia de lo que ocurre típicamente en arenas puras, con magnitudes que varían entre un 10 y 58% de la socavación del mismo suelo, pero libre de finos. Para una misma energía de compactación, la profundidad máxima de socavación decrece con la humedad hasta valores de aproximadamente 2.5 veces la humedad Proctor. Con humedades mayores el lecho se comporta como un fluido, disipando gran parte de la energía de compactación por fricción, sin reordenar sus partículas, lo que causa un aumento de la profundidad de socavación con la humedad.

¹ Profesor Asociado, Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - mail: olink@udec.cl

² Ingeniero Civil, MSc, Wasserbau Ltda. - mail: kaiklischies@wasserbau.cl

1. INTRODUCCIÓN

La socavación de puentes en arcillas y limos (lechos cohesivos) o en mezclas de arena con arcilla ha sido poco estudiada. Una de las razones radica en la alta complejidad de los mecanismos de socavación en arcillas debido a efectos electromagnéticos y a la presencia de fuerzas electrostáticas (Partheniades, 2009). La investigación en el tema se ha focalizado en diversos aspectos, desde los mecanismos de socavación hasta el campo de flujo turbulento, pero no ha abordado el efecto de la compactación del lecho que se espera sea de primer orden. Por lo anterior, actualmente no se dispone de conocimientos suficientes para estimar la socavación en lechos cohesivos de manera razonable. Las pocas fórmulas disponibles difieren en varios órdenes de magnitud.

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).

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 compactación 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.

2. INSTALACION EXPERIMENTAL Y TECNICA DE MEDICION

Los ensayos se realizaron en un canal rectangular de 26 m de largo, 1.5 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 $2 \times 1.5 \times 0.3 \text{ m}^3$ 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 1 muestra un esquema de la instalación experimental.

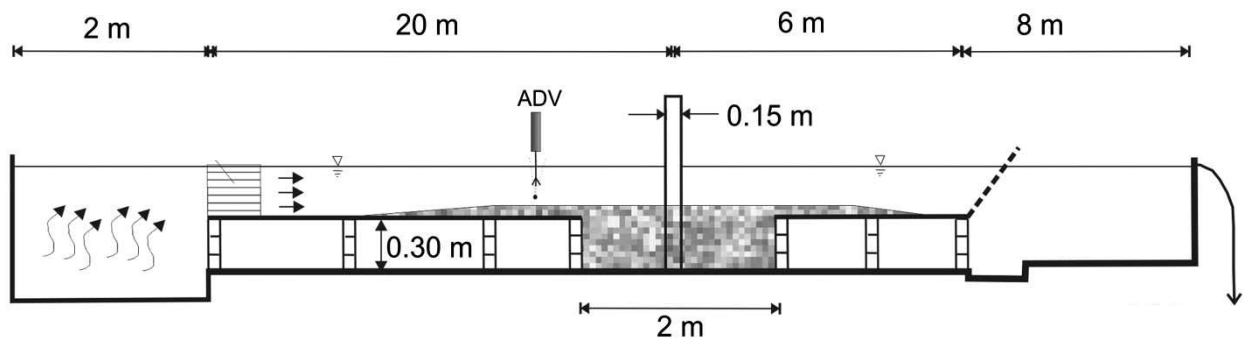


Figura 1. Diseño experimental, esquema de la instalación

2.1 TECNICA DE MEDICION

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 $\pm 0.4 \text{ mm}$ 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 $\pm 0.02 \text{ mm}$, 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 2.

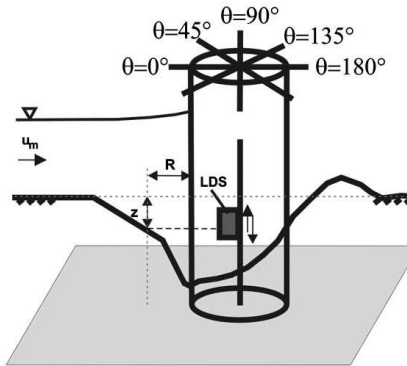


Figura 2. Instalación experimental y esquema de medición

2.2. CARACTERÍSTICAS DEL SEDIMENTO UTILIZADO

El sedimento utilizado en los ensayos de socavación corresponde al estero Coliumo en Ruta a Dichato. Se escogió este suelo como representativo de los sedimentos fluviales presentes en gran parte de la Cordillera de la Costa de Chile. El suelo fue remodelado para las experiencias de laboratorio. La Tabla 1 muestra los parámetros relevantes del sedimento utilizado.

Tabla 1.- Características de los sedimentos utilizados

Propiedad	Valor
Contenido de arena (%)	72.0
d_{50} de la fracción gruesa (mm)	0.237
Uniformidad de la fracción gruesa	1.84
U_{cr} de la fracción gruesa (m/s)	0.315
Mineral de arcilla dominante	caolinita
Gravedad específica de los sólidos (Gs)	2.64
Diámetro medio (d_{50})	0.07 mm
Límite líquido (%)	18.7
Límite plástico (%)	10.6

Antes de los ensayos, el sedimento fue secado y remodelado, de manera que quedara una mezcla de polvo homogéneo. El material se depositó en el canal, en capas de 5 cm de espesor. Cada capa se compactó aplicando hasta 500 golpes con un peso de 4.51 kg y 0.1 m de diámetro en la base, que se dejó caer desde una altura de 0.6 m. Esto se repitió hasta contar con un estrato de suelo de 15 cm de espesor. Sobre la superficie del lecho, se sacaron 5 mm de suelo y se alisó con una llana. Posteriormente, el canal se llenó lentamente con agua y se mantuvo por 72 hrs, a fin de hidratar el suelo. Se sacaron seis muestras para determinar el peso específico y la humedad de compactación. La figura 3 muestra las curvas de densidad correspondientes al sedimento del estero Coliumo.

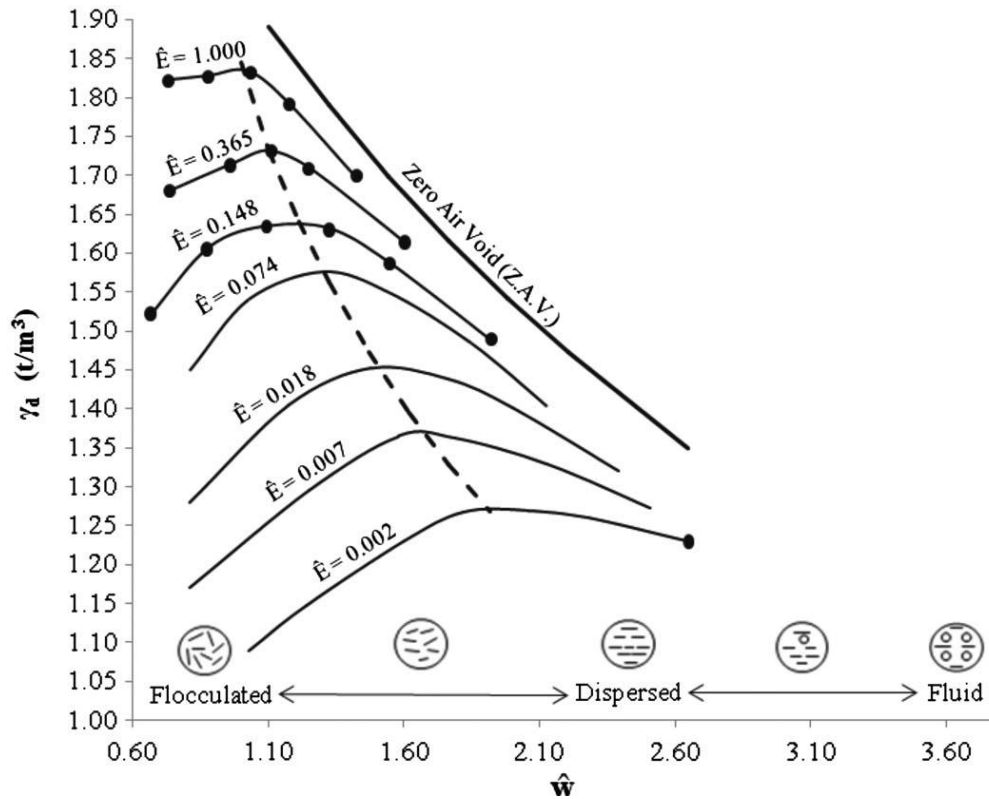


Figura 3. Curvas de densidad correspondientes al sedimento del estero Coliumo

En la figura, corresponde γ_d al peso específico seco del suelo, y \hat{w} a la humedad de compactación dividida por la humedad óptima determinada en el ensayo Proctor. \hat{E} es la energía de compactación dividida por la energía de compactación del ensayo Proctor. Nótese que el peso específico del sedimento varía poco con la energía de compactación.

2.3 CONDICIONES HIDRAULICAS

Los ensayos de socavación se realizaron con una duración de 40 hrs, hasta alcanzar una condición avanzada de socavación. La velocidad media fue igual al 95% de la crítica correspondiente a la fracción gruesa. La velocidad de transporte incipiente se determinó por inspección visual, y se contrastó con el criterio de Shields. Las velocidades del escurrimiento utilizadas fueron de 0.24 m/s en sedimento Coliumo y la profundidad de 22.5 cm.

3. RESULTADOS

Los resultados corresponden a un total de 14 ensayos, con compactación desde 0 a 500 golpes, y contenidos de humedad de 12.45 a 46.3%. En lo sucesivo la energía de compactación se expresa en forma adimensional, dividida por la energía correspondiente al ensayo Proctor. Así mismo, la humedad de compactación se presenta dividida por la humedad óptima de compactación. La profundidad máxima de socavación varió de 10 a 58% de aquella esperada en arena pura con el mismo diámetro medio.

3.1 MECANISMOS DE SOCAVACIÓN OBSERVADOS

La figura 4 muestra fotografías de la fosa de socavación desarrollada con humedades de compactación iguales a 0.96, 2.02, 2.60 y 3.40 veces la humedad óptima.

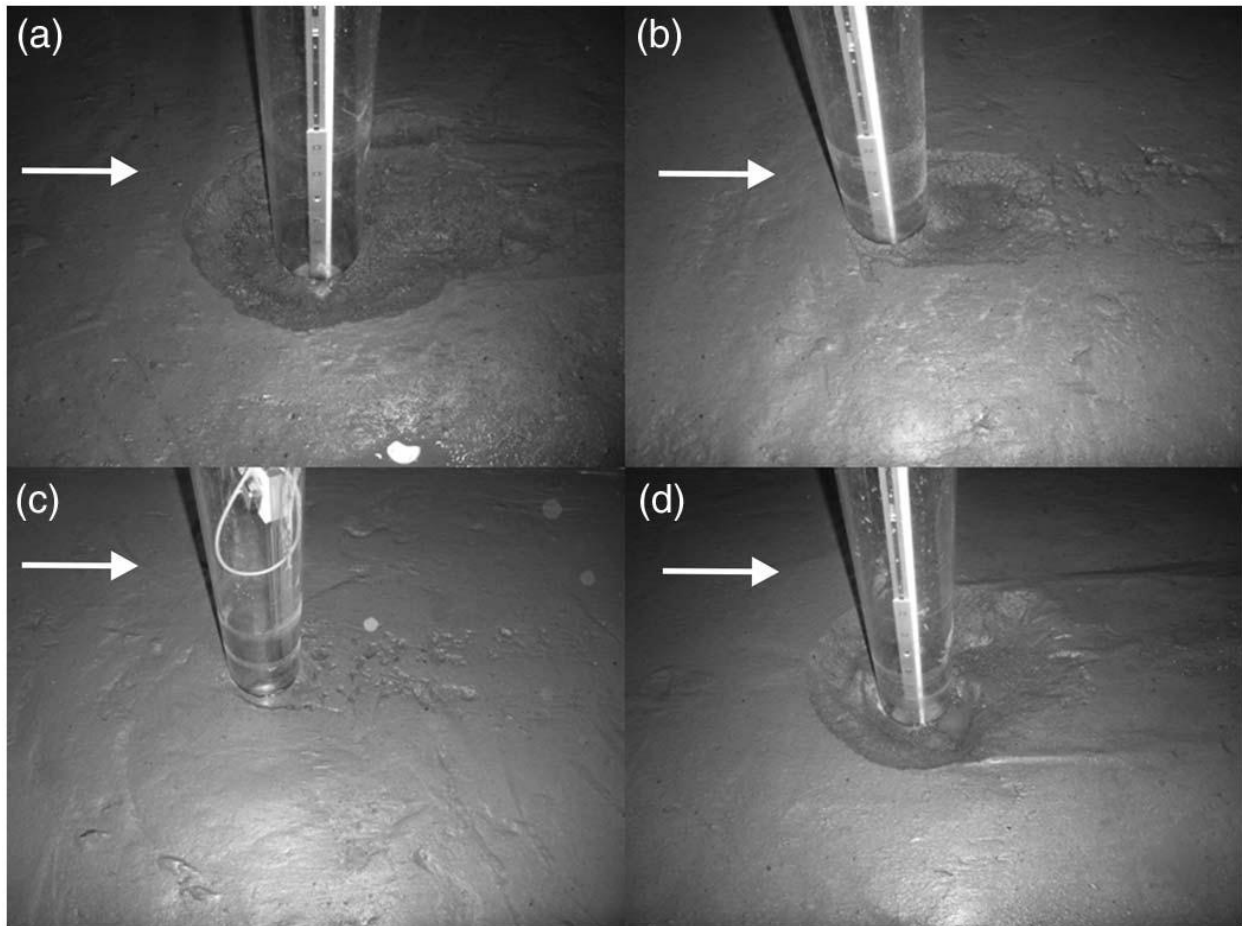


Figura 4. Fosa de socavación con humedades de compactación iguales a 0.96, 2.02, 2.60 y 3.40 veces la humedad óptima

El mecanismo dominante cambió gradualmente en la medida que aumentaba la humedad, desde terrones, agregados, y partícula a partícula. Para valores bajos y altos de la humedad, la forma de

la fosa resultó similar a aquella típicamente observada en arenas. Sin embargo, para valores intermedios de la humedad, la fosa presentó una geometría irregular, perdiendo la simetría típica. En todos los casos se observó una capacidad muy moderada de socavación del vórtice de herradura, a diferencia de lo que ocurre en suelos libres de finos.

3.2 EFECTO DE LA COMPACTACIÓN

La figura 5 muestra los resultados para lechos con energías de compactación entre 0 y 1 y humedades de compactación entre 0.92 y 3.40. \hat{Z} es la profundidad de socavación medida en el lecho cohesivo dividida por la profundidad de socavación esperada en el mismo lecho pero libre de finos.

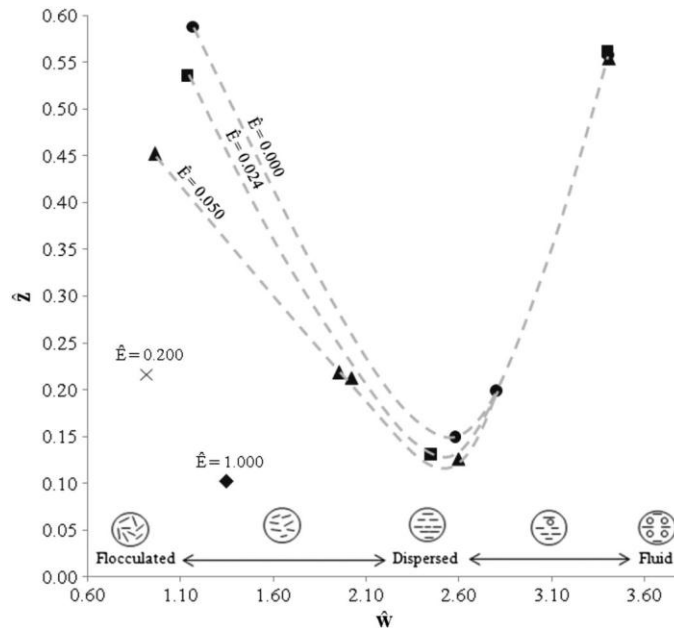


Figura 5. Variación de la profundidad de socavación con la energía y humedad de compactación

Se observa que la socavación disminuye con la energía de compactación siempre y cuando la humedad sea menor a 2.5 veces la humedad Proctor. Para humedades mayores, la socavación se independiza de la energía de compactación y aumenta con la humedad. La profundidad de socavación varía entre un 10 y 58% de la esperada en el mismo suelo pero libre de finos, según la ecuación de Richardson y Davis (2001).

CONCLUSION

En el presente artículo se presentaron ensayos de socavación alrededor de una cepa de puente hincada en lecho cohesivo a fin de investigar el efecto de la compactación del lecho sobre la socavación.

Los resultados muestran que el mecanismo de socavación dominante (terrones, agregados de partículas y partículas) cambia con la humedad de compactación. La profundidad máxima de socavación generalmente se encuentra aguas abajo de la cepa, a diferencia de lo que ocurre típicamente en arenas puras, con magnitudes que varían entre un 10 y 58% de la socavación del mismo suelo, pero libre de finos.

Para una misma energía de compactación, la profundidad máxima de socavación decrece con la humedad hasta valores de aproximadamente 2.5 veces la humedad Proctor. Con humedades mayores el lecho se comporta como un fluido, disipando gran parte de la energía de compactación por fricción, sin reordenar sus partículas, lo que causa un aumento de la profundidad de socavación con la humedad.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados son parte del proyecto fondecyt iniciación 11080126 titulado Scour at a Cohesive Sediment Embedded Bridge Pier: Laboratory and Numerical Experiments.

REFERENCIAS

- Ansari, S., U. Kothyari 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 (1999) 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.
- 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.
- 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.