



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería -Programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería con Mención  
en Ingeniería Civil

**Physical scale modelling of scour around bridge piers**  
**(Modelación física a escala de la socavación local en cepas  
de puente)**

Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería con  
mención en Ingeniería Civil

SEBASTIÁN ESTEBAN HENRÍQUEZ PÉREZ  
CONCEPCIÓN-CHILE  
2017

Profesor Guía: Oscar Link Lazo  
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción

---

## ABSTRACT

La socavación local en cepas de puentes ocurre principalmente durante crecidas fluviales y es la principal causa de colapso de puentes alrededor del mundo, trayendo consigo pérdidas en infraestructura y riesgo para la población. Las fórmulas existentes de socavación proveen resultados significativamente distintos entre sí y su aplicación se limita a unas pocas idealizadas geometrías de cepas y configuraciones de grupos de cepas, introduciendo importantes incertidumbres en el diseño de puentes.

En este trabajo, se investigó la viabilidad de las técnicas de modelación física para la cuantificación de la socavación en cepas de puentes causada por ondas de crecida. Se propusieron parámetros adimensionales para representar las características del flujo, del sedimento y de la cepa, para una correcta modelación física a escala. La confiabilidad de dichos parámetros fue evaluada a través de 17 experimentos de laboratorio, los cuales se llevaron a cabo en tres diferentes canales, de diferentes anchos y profundidades, utilizando cinco sedimentos diferentes. Los experimentos cubrieron la condición de aguas claras y de lecho vivo, así como las condiciones de caudal constante y caudal variable, realizando hidrogramas de limitada duración.

Los resultados muestran que el proceso de socavación está controlado por el trabajo adimensional efectivo del flujo y el diámetro adimensional de la partícula. Se demostró que la escala de tiempo depende del diámetro de la cepa, la densidad relativa del sedimento, el tamaño del sedimento y la velocidad del flujo. En casos muy específicos, fue posible alcanzar perfecta similitud entre el modelo y el prototipo, obteniendo idéntica socavación en ambos casos, confirmando las escalas derivadas teóricamente. Sin embargo, comúnmente el tamaño relativo de la cepa respecto al sedimento es distorsionado en el modelo y el prototipo, introduciendo con ello efectos de escala en el modelo de socavación, los cuales, evaluando los resultados obtenidos, se consideraron más bien pequeños y aceptables. Finalmente, se demostró la viabilidad de las técnicas de modelación física propuestas para la cuantificación de socavación local en cepas de puente en aplicaciones prácticas.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) por financiar la investigación mediante el FONDECYT 1150997 *Bridge pier scour under flood waves*, ya que su ayuda facilitó la realización de esta investigación.

Adicionalmente, el autor desea agradecer a su profesor guía, Óscar Link, por su constante apoyo en el transcurso de la investigación, tanto en asuntos de índole teórica como en cuestiones netamente prácticas relativas a la experimentación. En la misma línea, se agradece a don René Iribarren, laboratorista del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de Concepción, por su constante asistencia y disposición a ayudar al autor en la materialización de los experimentos propuestos.



**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

Abstract.....	ii
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Figuras.....	vii
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación.....	1
1.2. Hipótesis .....	3
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general .....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Metodología de trabajo.....	4
1.5. Estructura del informe .....	4
<b>CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES TEÓRICOS .....</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción.....	5
2.2. Variables explicativas del fenómeno .....	5
2.3. Modelación a escala: beneficios y dificultades.....	6
2.4. Conclusiones .....	7
<b>CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>8</b>
3.1. Introducción.....	8
3.2. Análisis dimensional.....	8
3.2.1. Similitud .....	9
3.3. Instalación experimental y técnicas de medición .....	12
3.3.1. Sedimentos .....	14
3.4. Series experimentales .....	14
3.5. Conclusiones .....	18

CAPÍTULO 4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
4.1.	Introducción.....	19
4.2.	Parámetro adimensional representando al flujo.....	19
4.3.	Parámetros adimensionales representando el sedimento.....	20
4.4.	Escala temporal.....	22
4.5.	Efectos de escala en modelos con distorsión del parámetro $D/d_s$ .....	23
4.6.	Discusión de los resultados.....	24
4.7.	Conclusiones.....	26
CAPÍTULO 5	CONCLUSIONES.....	28
5.1.	Conclusiones.....	28
REFERENCIAS	.....	29



**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 3.1. Características de los sedimentos utilizados en experimentación .....	14
Tabla 3.2. Series experimentales .....	16
Tabla 4.1. Propiedades de los materiales ligeros.....	25



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Causas de colapso de puentes en el mundo, adaptado de Brandimarte <i>et al.</i> , (2012)...	1
Figura 1.2. Cepas de puentes con geometrías complejas en los ríos a) Bueno (40°19.783', 72°59.414'), b) Diguillín (36°38.042', 72°11.621'), c) Biobío (37°36.041, 72°16.836'), d) Ñuble (36°34.589', 72°12.631'), y e) Llollelhue (40°9.991', 72°53.629).....	2
Figura 3.1. Hidrogramas (arriba) y correspondientes $W^*$ (abajo) para los experimentos de las series S1 (izquierda), S2 en condición de aguas claras (centro) y S2 en condición de lecho vivo (derecha). .....	15
Figura 4.1. Profundidad de socavación adimensional $Z^*$ sobre el trabajo efectivo del flujo $W^*$ , para los experimentos de la serie S1.....	19
Figura 4.2. Profundidad de socavación relativa $Z^*$ sobre el tiempo $t$ (arriba) y sobre $W^*$ (abajo), para los experimentos S2-1 y S2-2 en condición de aguas claras (izq.) y para los experimentos S2-3 y S2-4 en condición de lecho vivo (der.).....	20
Figura 4.3. Profundidad de socavación relativa $Z^*$ sobre $W^*$ (abajo), para los experimentos de la serie S3. ....	21
Figura 4.4. Escala temporal calculada según ecuación 3.12 vs escala temporal observada. La línea gris continua indica un perfecto ajuste. ....	22
Figura 4.5. Profundidad relativa de socavación $Z^*$ sobre el diámetro de la cepa respecto al sedimento $D/d_s$ para los experimentos S5-1 y S5-2 (con $D^*=9$ y $W^*=3000$ ), S4-1 y S5-3 (con $D^*=20$ y $W^*=3000$ ), y S3-1 y S3-3 (con $D^*=40$ y $W^*=10000$ ). ....	23

**NOMENCLATURA**

D	: Diámetro de cepa
D*	: Diámetro adimensional de la partícula
$d_s$	: Diámetro del sedimento
$Fr_*$	: Froude de la partícula
$Fr_d$	: Froude densimétrico de la partícula
g	: Aceleración de gravedad
h	: Altura o profundidad de agua
$\rho_w$	: Densidad del fluido
$\rho_s$	: Densidad del sedimento
$\rho'$	: Densidad relativa
$\sigma$	: Coeficiente de dispersión granulométrica
Q	: Caudal
$Re_*$	: Reynolds de la partícula
u	: Velocidad media del escurrimiento
$u_c$	: Velocidad crítica (velocidad media con la cual el sedimento comienza a moverse)
$\nu$	: Viscosidad cinemática
$\mu$	: Viscosidad dinámica
$W^*$	: Trabajo adimensional efectivo
z	: Profundidad de socavación



## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación

La socavación local en cepas de puente ocurre principalmente durante las ondas de crecida (Hager y Unger, 2010; López *et al.*, 2014; Link *et al.*, 2017), y es la principal causa de colapso de puentes alrededor del mundo (Briaud *et al.*, 2007; Lu *et al.*, 2010; Prendergast y Gavin, 2014) trayendo consigo importantes pérdidas económicas, y poniendo a la población en riesgo. Al mismo tiempo, un importante número de puentes son parte de las llamadas *lifelines*, y, por lo tanto, son muy importantes para mantener la conectividad después de desastres naturales. Además, se espera que el cambio climático incremente las intensidades de las tormentas, y con eso, la magnitud de las crecidas fluviales, aumentando el riesgo de fallas de puentes debido a socavación (Wright *et al.*, 2012). La Figura 1.1 muestra, en base a una amplia recolección de datos de falla de puentes en todo el mundo, que la socavación causada por crecidas fluviales son las responsables del 60% de los colapsos de puentes en el mundo.

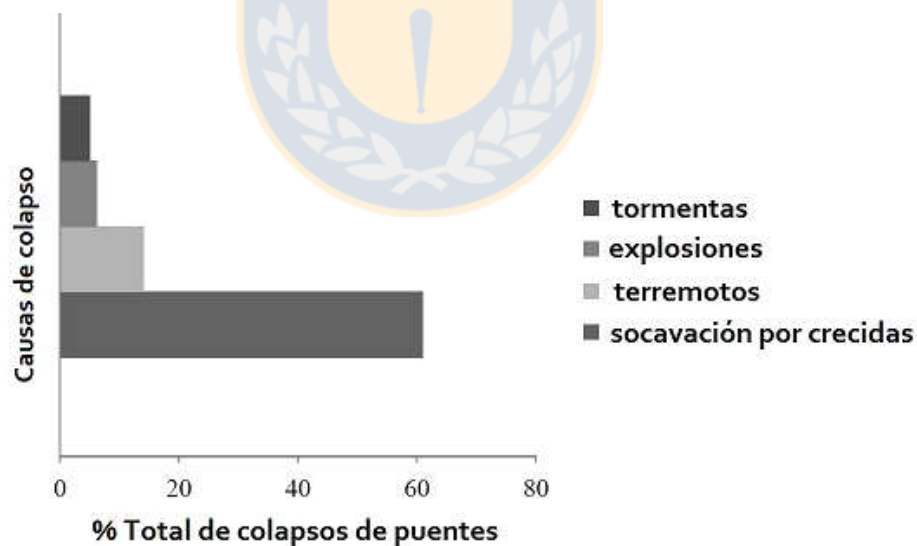


Figura 1.1. Causas de colapso de puentes en el mundo, adaptado de Brandimarte *et al.*, (2012)

Los métodos de cálculo de socavación existentes se han formulado a partir de experiencias de laboratorio. Un problema de estas fórmulas es que entregan resultados con mucha dispersión unas respecto a otras (Sheppard *et al.*, 2014). Además, estas solo permiten estimar la socavación para

algunas geometrías idealizadas de cepas (Coleman, 2005; Kothyari y Kumar, 2012; Moreno *et al.*, 2016) y para las configuraciones más básicas de grupos de cepas (Ataie-Ashtiani y Beheshti, 2006; Amini *et al.*, 2011). Todo lo anterior genera finalmente importantes incertezas en el diseño hidráulico de puentes (Briaud *et al.*, 2013; Johnsons *et al.*, 2015), especialmente para aquellos que cuentan con geometrías y/o configuraciones de cepas complejas, tales como los mostrados en la Figura 1.2.

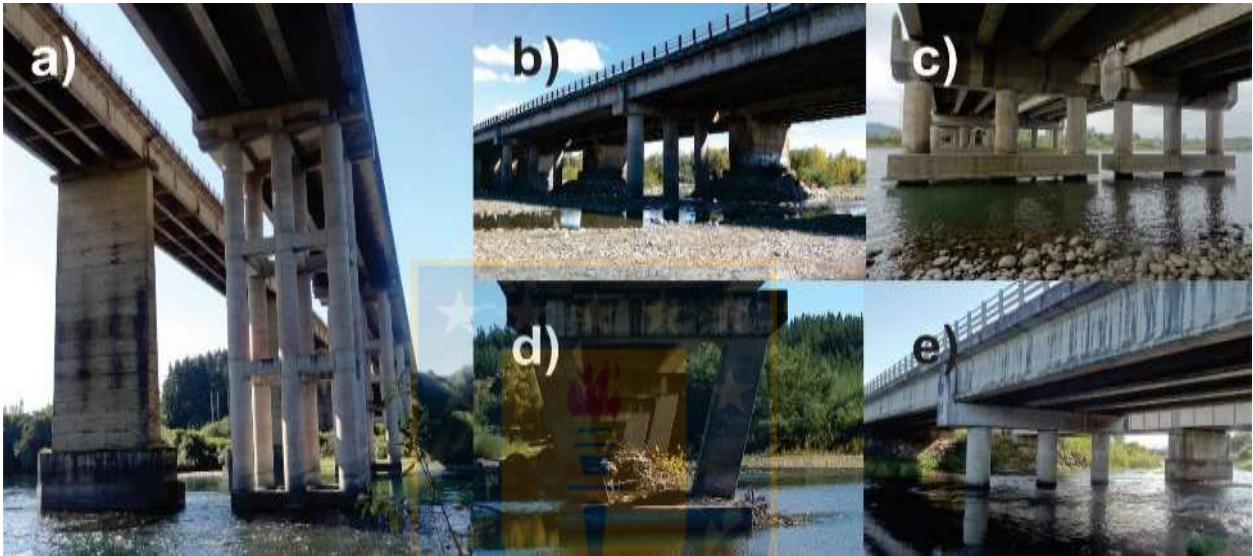


Figura 1.2. Cepas de puentes con geometrías complejas en los ríos a) Bueno ( $40^{\circ}19.783'$ ,  $72^{\circ}59.414'$ ), b) Diguillín ( $36^{\circ}38.042'$ ,  $72^{\circ}11.621'$ ), c) Biobío ( $37^{\circ}36.041'$ ,  $72^{\circ}16.836'$ ), d) Ñuble ( $36^{\circ}34.589'$ ,  $72^{\circ}12.631'$ ), y e) Llolelhue ( $40^{\circ}9.991'$ ,  $72^{\circ}53.629'$ ).

Por lo tanto, es de suma importancia generar criterios de escalamiento adecuados para la estimación de socavación mediante modelación física a escala, debido a la importante información que esta entrega respecto de los procesos que controlan el fenómeno a escala real.

Actualmente existen interrogantes abiertas para los modeladores respecto a la escalabilidad de las variables que controlan la socavación. ¿Cómo se debe escalar el sedimento y las ondas de crecida para que nuestros modelos presenten una idéntica socavación a la de la naturaleza?, ¿Cuál será la escala temporal entre modelo y naturaleza, y de qué variables depende ésta?, ¿En qué casos aparecerán efectos de escala y en cuáles no?, ¿Serán éstos despreciables? Esta investigación busca responder dichas interrogantes.

## 1.2. Hipótesis

Los parámetros que controlan la socavación, y que permiten escalar el fenómeno, son el trabajo adimensional efectivo del flujo,  $W^*$ , el diámetro adimensional del sedimento,  $D^*$ , y el tamaño relativo de la cepa respecto al sedimento  $D/d_s$ .

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Encontrar criterios teóricos de escalabilidad de la socavación local en cepas de puente bajo crecidas fluviales, que permita la correcta modelación a escala del fenómeno.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- a) Deducir criterios de escalabilidad, a partir de la aplicación del análisis dimensional al caso de socavación local alrededor de cepas de puente.
- b) Desarrollar una instalación experimental apta para la realización de experimentos de socavación a distintas escalas geométricas.
- c) Diseñar series experimentales que permitan evaluar los criterios de escalabilidad propuestos.
- d) Conducir las series experimentales en concordancia con lo diseñado.
- e) Determinar la calidad de los criterios de escalabilidad propuestos, sobre la base de los resultados experimentales.

#### **1.4. Metodología de trabajo**

Las tareas que se desarrollaron se dividen en cuatro etapas: (i) revisión del estado del arte, (ii) análisis teórico del problema, (iii) desarrollo de la instalación experimental y (iv) experimentación y análisis de resultados. La primera etapa consistió en la revisión de literatura especializada relacionada con el fenómeno de estudio y el problema de escalabilidad de sedimentos, lo que sirvió de base para escoger las variables físicas que controlan la socavación. Luego, se aplicó el análisis dimensional al caso de socavación local, con el fin de obtener un set de parámetros adimensionales que sirva como criterio de escalamiento de la socavación local. A partir de dicho análisis dimensional, se obtuvo una escala para el flujo, una escala del sedimento y una escala geométrica. Definidas las escalas teóricas para la modelación de la socavación, se desarrollaron las condiciones experimentales necesarias para evaluar su veracidad. Esto implicó la elección de los sedimentos, las dimensiones de los canales utilizados, y el diseño experimental de ensayos, tanto en régimen permanente como impermanente. Finalmente, se llevaron a cabo cinco series experimentales para evaluar la capacidad de los criterios teóricos propuestos.

#### **1.5. Estructura del informe**

El presente informe se estructura en cinco capítulos. En el segundo capítulo se presentan algunos de los parámetros adimensionales más estudiados en la literatura y la manera en que estos influyen sobre la socavación. En el tercer capítulo se desarrolla el análisis dimensional y se propone un criterio teórico de escalabilidad, se describen las instalaciones experimentales utilizadas, las técnicas de medición y las condiciones hidráulicas de los experimentos a realizar. El cuarto capítulo compara y discute los resultados obtenidos en las cinco series experimentales realizadas. Finalmente, el capítulo cinco resume las principales conclusiones del presente estudio.

## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES TEÓRICOS

### 2.1. Introducción

El presente capítulo comienza presentando las principales variables que controlan el fenómeno, resumiendo las tendencias funcionales más importantes entre estas y la socavación local. Finalmente, se aborda la modelación como herramienta útil para mejorar el diseño de hidráulico de puentes, al mismo tiempo que se presentan las principales dificultades que tiene su correcta realización.

### 2.2. Variables explicativas del fenómeno

La socavación local en cepas de puente involucra complejas interacciones entre el flujo tridimensional y el sedimento del lecho del río alrededor de la cepa (Link *et al.*, 2012, Link *et al.*, 2016). Raudkivi (1986) presentó las tendencias funcionales de la socavación. En cepas alineadas con el flujo, con sedimentos uniformes, la profundidad de socavación relativa,  $Z^*=z/D$  ( $z$  es la socavación máxima alrededor de la cepa y  $D$  es el diámetro de la cepa) principalmente depende de la intensidad de flujo,  $I=u/u_c$ , donde  $u$  es la velocidad promedio del flujo, y  $u_c$  es la velocidad crítica para la iniciación del movimiento de partículas sobre el lecho; la profundidad relativa del flujo,  $H^*=h/D$ , con  $h$  la profundidad del flujo, y del tamaño relativo de la cepa respecto al sedimento,  $D/d_s$ . El efecto de la intensidad de flujo sobre la socavación fue recientemente investigado por Ettmer *et al.*, (2015), destacando las diferencias en la socavación producida bajo condición de aguas claras, lecho vivo con formas de fondo, y transporte en suspensión. Melville y Coleman (1997) establecieron la distinción entre cepas anchas y angostas, de acuerdo a la profundidad relativa del flujo respecto a la cepa,  $h/D$ , encontrando efectos despreciables para  $h/D > 1.4$ . Lee y Sturm (2009) mostraron que la socavación depende fuertemente del tamaño relativo de la cepa respecto del sedimento, alcanzando un máximo para  $D/d_s=25$ , y disminuyendo con el aumento de  $D/d_s$  hasta en un 150% cuando  $D/d_s=400$ . En la misma línea, usando argumentos de escalabilidad, Cheng *et al.*, (2016) mostró que los parámetros en las fórmulas de socavación que consideran  $Z^*$

como una función exponencial del tiempo, dependen fuertemente de  $D/d_s$ . Por otro lado, Melville y Chiew (1999) estudiaron la escala temporal de la socavación local en cepas de puente, mostrando que la profundidad de socavación después del 10% del tiempo para alcanzar el equilibrio es entre un 50% y un 80% de la profundidad de socavación de equilibrio, dependiendo de la intensidad de flujo. Ettema *et al.*, (1998, 2006) analizaron los efectos de escala en la socavación, concluyendo que el uso de canales de laboratorio para la cuantificación de la profundidad de socavación es limitada, debido a que los efectos de escala producen profundidades de socavación  $Z^*$  más grandes en laboratorio que en las cepas reales.

### 2.3. Modelación a escala: beneficios y dificultades

Los modelos a escala de ríos con lecho móvil proveen información valiosa acerca de los procesos que ocurren en sus prototipos reales, la cual puede ser muy difícil de obtener mediante mediciones de campo, o con técnicas matemáticas. (Thélusmond *et al.*, 2013, Gorrick y Rodríguez 2014). La similitud entre el prototipo real, y el modelo, se basa en equiparar parámetros adimensionales del flujo y del transporte de sedimentos, preservando así consistentemente las razones entre las fuerzas dominantes (Yalin, 1971). Sin embargo, mantener similitud entre los modelos a escala de laboratorio y los ríos más grandes que estos representan es muy complejo de lograr a cabalidad, por lo que típicamente aparecen indeseables efectos de escala. La estimación de como los efectos de escala afectan cualitativa y cuantitativamente los resultados del modelo, y si estos pueden o no ser despreciados, es un actual desafío para los modeladores de laboratorio (Heller, 2011, Tafaranjouruz y Gaudio, 2012). Además, el diseño de experimentos de socavación debe mejorar, para que, a partir de ellos, se pueda obtener información y resultados más cuantitativos (Shen 1990).

Los modelos a escala de socavación local poseen un gran inconveniente, ya que el escalamiento geométrico del sedimento es posible solamente si el comportamiento hidráulico de la pared es similar en el modelo y la naturaleza. Esta condición es satisfecha solo para sedimentos muy gruesos en la naturaleza, por ejemplo, tomando una escala geométrica de 1:20, el escalamiento geométrico del sedimento requeriría partículas más gruesas que 200 mm. Para sedimentos más finos que 200 mm, la pared del modelo a escala estaría en régimen hidráulico de transición liso-rugoso, mientras

la pared del prototipo natural estaría en régimen rugoso. Más aún, la cohesión tiene efectos importantes sobre la socavación (Link *et al.*, 2013), y luego, considerando una escala geométrica de 1:20, los sedimentos de la naturaleza estarán restringidos a ser siempre más grandes que 1 mm para evitar fuerzas cohesivas en los sedimentos escalados del modelo. Una posible manera de abordar esta problemática es escalar sedimentos de acuerdo a una ley de escalamiento apropiada, distinta de la escala geométrica. Desafortunadamente, los típicos modelos hechos en base a escala de Froude no necesariamente simulan los esfuerzos de tracción y la erosión de los sedimentos de forma precisa, ya que el escalamiento de Froude no recoge las fuerzas viscosas del fenómeno.

## 2.4. Conclusiones

La relevancia de la socavación local en el diseño hidráulico de puentes, y la tendencia al aumento de las magnitudes de las crecidas, exigen mejoras en los actuales métodos de cálculo de socavación. Por lo tanto, es de especial interés encontrar una efectiva solución a las distintas dificultades actuales de la modelación a escala, para que esta provea mejor y mayor cantidad de información cuantitativa de la socavación local. Además, las relaciones presentadas entre la socavación y las variables que la controlan, permite a los modeladores físicos abordar el problema de una mejor manera, atendiendo con mayor énfasis aquellas variables ante las cuales la socavación presenta mayor sensibilidad.



## CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. Introducción

En el presente capítulo se presentan las escalas teóricas propuestas, y su derivación a partir de la aplicación del análisis dimensional. Luego, se describen las instalaciones experimentales, las técnicas de medición y los sedimentos utilizados en la experimentación. Finalmente, se resumen las series experimentales realizadas.

### 3.2. Análisis dimensional

La profundidad de socavación alrededor de una cepa cilíndrica de puente, en un lecho formado por sedimento homogéneo, depende de variables que caracterizan al fluido, al flujo, al sedimento, y a la cepa. En forma funcional:

$$f(\mu, \rho, u_{ef}, h, g, d_s, \rho_s, D, t, z) = 0, \quad (3.1)$$

donde  $f$  es una función,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido;  $\rho$  la densidad del fluido;  $u_{ef}$  la velocidad efectiva del flujo;  $h$  la profundidad del flujo en la región no perturbada;  $g$  la aceleración de gravedad;  $d_s$  el diámetro representativo de las partículas de sedimento;  $\rho_s$  la densidad de las partículas de sedimento,  $D$  el diámetro de la cepa;  $t$  el tiempo, y  $z$  la profundidad de socavación. Para el caso particular de socavación alrededor de un cilindro, la velocidad efectiva del flujo,  $u_{ef}$ , corresponde a la velocidad excedente sobre la condición de socavación incipiente  $u_{ef} = u - u_{cs}$ , con  $u$  la velocidad del flujo promedio en la sección, y  $u_{cs}$  la velocidad crítica para la socavación incipiente. De acuerdo al teorema II de Buckingham, el set inicial de diez variables independientes puede reducirse a uno formado por siete parámetros adimensionales. Tomando  $\rho$ ,  $u_{ef}$ , y  $d_s$  como variables repetitivas, se obtiene:



$$f\left(\text{Re}', \text{Fr}', \rho', \frac{h}{d_s}, \frac{D}{d_s}, \frac{u_{\text{ef}} t}{d_s}, \frac{z}{d_s}\right) = 0, \quad (3.2)$$

donde  $\text{Re}' = (u_{\text{ef}} d_s) / \nu$  es el número de Reynolds efectivo de la partícula;  $\text{Fr}' = u_{\text{ef}} / (g d_s)^{0.5}$  es el número de Froude efectivo de la partícula,  $\rho' = (\rho_s - \rho) / \rho$  es la densidad relativa;  $h/d_s$  es la profundidad relativa del flujo,  $D/d_s$  es el tamaño relativo de la cepa respecto al sedimento,  $u_{\text{ef}} t/d_s$  es un parámetro de impermanencia, y  $z/d_s$  es la profundidad de socavación relativa al tamaño del sedimento. Una combinación adecuada de los adimensionales de la ecuación 3.1 conduce a lo siguiente:

$$f\left(D^*, \text{Fr}_d, \rho', \hat{h}, \frac{D}{d_s}, U^*, Z^*\right) = 0 \quad (3.3)$$

donde  $D^* = (\text{Re}'^2 / (\text{Fr}'^2 / \rho'))^{1/3} = ((\rho' g / \nu^2)^{1/3} d_s)$  es el diámetro adimensional de la partícula, representando la movilidad de los sedimentos,  $\text{Fr}_d = \text{Fr}' (\rho')^{-0.5} = u_{\text{ef}} / (\rho' g d_s)^{0.5}$  es el número de Froude densimétrico efectivo, representando la capacidad del flujo para producir socavación,  $U^* = 2(u_{\text{ef}} t/d_s)(D/d_s)^{-2} = u_{\text{ef}} t / (D^2/d_s) = u_{\text{ef}} t / Z_R$  es un parámetro de impermanencia del flujo, con  $Z_R = D^2/d_s$  una longitud de referencia;  $\hat{h} = (h/d_s)(D/d_s)^{-1} = h/D$  es la profundidad relativa del flujo, y  $Z^* = (z/d_s)(D/d_s)^{-1} = z/D$  es la profundidad de socavación normalizada.

### 3.2.1. Similitud

Una similitud completa entre la naturaleza y el modelo debería estar dada solamente si todos los adimensionales de la ecuación 3.3 son consistentes en ambos casos. Sin embargo, existen dificultades para encontrar sedimentos que satisfagan dicha restricción cuando se trabaja con agua a temperatura ambiente, ya que los sedimentos del modelo son, típicamente, más ligeros y más gruesos que los sedimentos del prototipo (Bettess, 1990).

Resultados recientes encontrados en Pizarro *et al.*, (2017) y Link *et al.*, (2017), sugieren que el trabajo adimensional efectivo del flujo sobre el sedimento que rodea la cepa de puente rescata los

efectos de la densidad relativa  $\rho'$ , del parámetro de impermanencia  $U^*$ , y del número de Froude efectivo  $Fr_d$ , permitiendo superar las dificultades que existen para alcanzar la similitud perfecta de acuerdo a la ecuación 3.3. El trabajo adimensional del flujo se define como:

$$W^* = Fr_d^3 U^* = Fr_d^3 \frac{u_{ef} t}{(D^2 / 2d_s)} = \int_0^{t_{end}} Fr_d^3 \frac{u_{ef}}{(D^2 / 2d_s)} dt . \quad (3.4)$$

Por otro lado, si el análisis se limita a casos en que  $\hat{h} > 1,5$ , como típicamente ocurre durante crecidas fluviales,  $Z^*$  se vuelve independiente de la profundidad relativa del flujo (Raudkivi, 1986; Melville, 1997). Asumiendo que los efectos de  $\rho'$  están bien capturados por  $W^*$  y  $D^*$ , se tiene, aproximadamente que, para  $Z^*$ :

$$Z^* \cong f \left( W^*, D^*, \frac{D}{d_s} \right) \quad (3.5)$$

De acuerdo a la ecuación 3.5, la similitud en la socavación local es alcanzada cuando los tres parámetros que controlan el fenómeno son idénticos en el modelo y el prototipo, teniéndose la siguiente relación:

$$\lambda_{Z^*} = \lambda_{W^*} = \lambda_{D^*} = \lambda_{D/d_s} = 1. \quad (3.6)$$

donde

$$\lambda_{Z^*} = Z_m^* / Z_p^* ; \lambda_{W^*} = W_m^* / W_p^* ; \lambda_{D^*} = D_m^* / D_p^* \text{ y } \lambda_{D/d_s} = (D/d_s)_m / (D/d_s)_p \quad (3.7)$$

donde los subíndices  $m$  y  $p$  corresponden a modelo y prototipo respectivamente. La escala temporal entre el modelo y el prototipo,  $\lambda_t = t_m / t_p$  se obtiene imponiendo  $\lambda_{W^*} = 1$ :

$$W_m^* = W_p^* \Rightarrow \int_0^{t_p} Fr_{d,p}^3 \frac{u_{ef,p}}{(D_p^2 / 2d_{s,p})} dt = \int_0^{t_m} Fr_{d,m}^3 \frac{u_{ef,m}}{(D_m^2 / 2d_{s,m})} dt. \quad (3.8)$$

Considerando un caudal constante:

$$\left( \frac{u_{ef,p}}{\sqrt{\rho'_p g d_{s,p}}} \right)^3 \frac{u_{ef,p}}{(D_p^2 / 2d_{s,p})} t_p = \left( \frac{u_{ef,m}}{\sqrt{\rho'_m g d_{s,m}}} \right)^3 \frac{u_{ef,m}}{(D_m^2 / 2d_{s,m})} t_m, \quad (3.9)$$

$$\frac{t_m}{t_p} = \lambda_t = \left( \frac{u_{ef,p}}{\sqrt{\rho'_p g d_{s,p}}} * \frac{\sqrt{\rho'_m g d_{s,m}}}{u_{ef,m}} \right)^3 \frac{u_{ef,p}}{(D_p^2 / 2d_{s,p})} \frac{(D_m^2 / 2d_{s,m})}{u_{ef,m}}, \quad (3.10)$$

$$\lambda_t = \left( \frac{u_{ef,p}}{u_{ef,m}} \right)^4 \left( \frac{D_m}{D_p} \right)^2 \left( \frac{\rho'_m}{\rho'_p} \right)^{3/2} \left( \frac{d_{s,m}}{d_{s,p}} \right)^{1/2} = \lambda_{u_{ef}}^{-4} \lambda_D^2 \lambda_{\rho'}^{3/2} \lambda_{d_s}^{1/2} \quad (3.11)$$

Análogamente, la escala de velocidad se obtiene como:

$$\lambda_{u_{ef}} = \lambda_D^{1/2} \lambda_{\rho'}^{3/8} \lambda_{d_s}^{1/8} \lambda_t^{-1/4} \quad (3.12)$$

Si el modelo y el prototipo tienen el mismo sedimento, se tiene que:

$$\lambda_{u_{ef}} = \lambda_D^{1/2} \lambda_t^{-1/4} \quad (3.13)$$

La validez de las ecuaciones 3.5 y 3.11, así como también los efectos de escala que surgen al distorsionar  $D/d_s$  en los modelos, será investigada a través de experimentos de laboratorio, los cuales se presentan más adelante.

### 3.3. Instalación experimental y técnicas de medición

Los experimentos fueron llevados a cabo dentro de tres diferentes canales, de diferentes anchos, permitiendo así el uso de cepas con distintos diámetros, con el objetivo de representar modelos que posean similitud entre sí. Los diferentes canales utilizados y técnicas de medición empleadas fueron los siguientes:

- Canal 1:

Consta de un canal rectangular, de 26 m de largo, 1.4 m de ancho y 0.74 m de profundidad, con un cilindro de plexiglás de 0.15 m de diámetro ubicado en el centro de una cama de sedimento de 2 m, situada 20 m aguas abajo de la entrada del canal. La socavación fue medida de forma no intrusiva, desde dentro de la cepa, con un sensor láser de distancia, como documentó Link *et al.* (2013). La capacidad de la bomba utilizada es de 110 l/s, la cual fue controlada con un variador de frecuencia manejado a través de un controlador lógico programable, capaz de reproducir cualquier forma de hidrograma deseado (ver Link *et al.*, 2017 para más detalles). La profundidad del flujo fue fijada a través de la posición de una compuerta vertical ubicada a la salida del canal, y fue medida con una precisión de  $\pm 0.1$  mm usando un sensor ultrasónico de distancia, ubicado 1.5 m aguas arriba del cilindro (10 veces el diámetro de la cepa) para asegurar que el gradiente de presiones adverso causado por el obstáculo no afectara el campo de flujo en la sección de medición.

- Canal 2:

Consta de un canal rectangular basculante, de 6.0 m de largo, 0.4 m de ancho y 0.4 m de alto, con un cilindro Technyl A® de diámetro 0.046 m, montado en el medio de una cama de sedimento de 0.6 m de largo, ubicada 4 m aguas abajo de la entrada del canal. La socavación fue monitoreada con una cámara de video tipo *snake*, de 7 mm de diámetro, la cual penetró la superficie libre menos de 1 cm, y registró de forma continua la posición del lecho sobre una graduación ubicada en la parte frontal de la cepa, con una precisión de 0.5 mm. La resolución de la cámara fue de 640x480 pixeles, y las imágenes fueron capturadas con una frecuencia que varió desde los 0.2 Hz al inicio de los experimentos, hasta los 0.002 Hz, a medida que se alcanzaba la socavación equilibrio. La

capacidad de la bomba utilizada es de 130 l/s, y fue controlada por variador de frecuencia manejado a través de un controlador lógico programable, permitiendo reproducir cualquier hidrograma deseado, al igual que en el Canal 1. Adicionalmente, un sistema de recirculación del sedimento fue utilizado para los experimentos con lecho vivo. La capacidad de la bomba de sedimento es de 20 l/s. El flujo agua-sedimento fue controlado por un flujómetro ultrasónico y ajustado manualmente mediante una válvula hasta que las condiciones de equilibrio en el transporte de sedimentos fuera alcanzada, es decir, que no ocurriera depositación ni erosión del lecho. La profundidad del lecho fue fijada a través de la posición de la compuerta vertical ubicada al final del canal, y medida con una precisión de  $\pm 0.1$  mm usando un sensor ultrasónico de distancia, ubicado 1.0 m aguas arriba de la cepa ( $> 10$  veces el diámetro de la cepa) para asegurar que el gradiente de presiones adverso causado por el obstáculo no afectara el campo de flujo en la sección de medición.

- Canal 3:

Consta de un canal horizontal de 8.0 m de largo, 0.3 m de ancho y 0.6 m de profundidad. Un cilindro de HDPE de 0.03 m de diámetro fue montado en el medio de la cama de sedimentos de 1.2 m de largo y 12 cm de profundidad, ubicada a 4.5 m aguas abajo de la entrada del canal. La socavación fue medida con un medidor de punto, con una precisión de  $\pm 0.1$  mm y con una frecuencia que varió desde 0.017 Hz al comienzo de los experimentos, hasta los  $2.7 \cdot 10^{-4}$  Hz, cuando se alcanzaba el equilibrio en la socavación, tal como es descrito en Meyering y Ettmer (2010). El sistema de recirculación permitió usar solo caudales constantes, con una bomba de 50 l/s de capacidad. La profundidad del flujo fue fijada a través de la posición de la compuerta vertical de salida del canal, y fue medida con una precisión de  $\pm 0.1$  mm, usando un medidor de punto ubicado 2 m aguas arriba de la cepa, lugar donde el flujo se mantenía imperturbado.

El Canal 1 y el Canal 2 están ubicados en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Concepción, Chile, mientras que el Canal 3 está ubicado en el Instituto Leichtweiß de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Técnica de Braunschweig, Alemania.

### 3.3.1. Sedimentos

En la experimentación se utilizaron seis diferentes sedimentos, en términos de tamaño y densidad. La siguiente Tabla muestra las propiedades de cada material utilizado:

Tabla 3.1. Características de los sedimentos utilizados en experimentación

<b>Material</b>	$d_s$ [mm]	$\sigma_g$ [-]	$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$FF$ [-]	$D^*$ [-]
<b>Arena 1</b>	0,36	1,45	2650	0,70	9
<b>Arena 2</b>	0,74	1,18	2650	0,70	18
<b>Arena 3</b>	0,80	1,30	2650	0,70	21
<b>Arena 4</b>	1,60	1,29	2650	0,70	40
<b>Acetal</b>	2,60	1,00	1390	0,71	41
<b>Poliestireno</b>	2,74	1,05	1040	0,75	20

La tabla anterior muestra el diámetro, la dispersión granulométrica, la densidad, el factor de forma y el diámetro adimensional sedimentológico de los seis sedimentos utilizados, de los cuales cuatro corresponden a arenas naturales de distinto diámetro, mientras los restantes dos corresponden a distintos tipos de materiales sintéticos ligeros.

### 3.4. Series experimentales

Se llevaron a cabo 17 experimentos, clasificados en cinco series, los cuales fueron realizados para testear la confiabilidad de las ecuaciones 3.5 y 3.11, y para cuantificar los posibles efectos de escala en modelos donde se distorsiona el parámetro  $D/d_s$ .

La serie S1 incluyó experimentos con caudal variable, recreando hidrogramas de forma sinusoidal para testear la confiabilidad del trabajo adimensional del flujo,  $W^*$ , como predictor del  $Z^*$  causado por una onda de crecida, sobre un material dado, representando así la escala del flujo en problemas de socavación local.

La segunda serie, S2, incluyó experimentos con caudal variable, en los cuales se recrearon hidrogramas con forma sinusoidal, con similares valores de  $W^*$ , utilizando diferentes sedimentos, pero de similar  $D^*$ . Esta serie buscó probar la capacidad de  $D^*$  para representar las características del sedimento en problemas de socavación local, tanto en condición de aguas claras, como en lecho vivo.

La Figura 3.1 muestra los hidrogramas, y sus correspondientes trabajos adimensionales efectivos  $W^*$  sobre el tiempo, para las series S1 y S2.

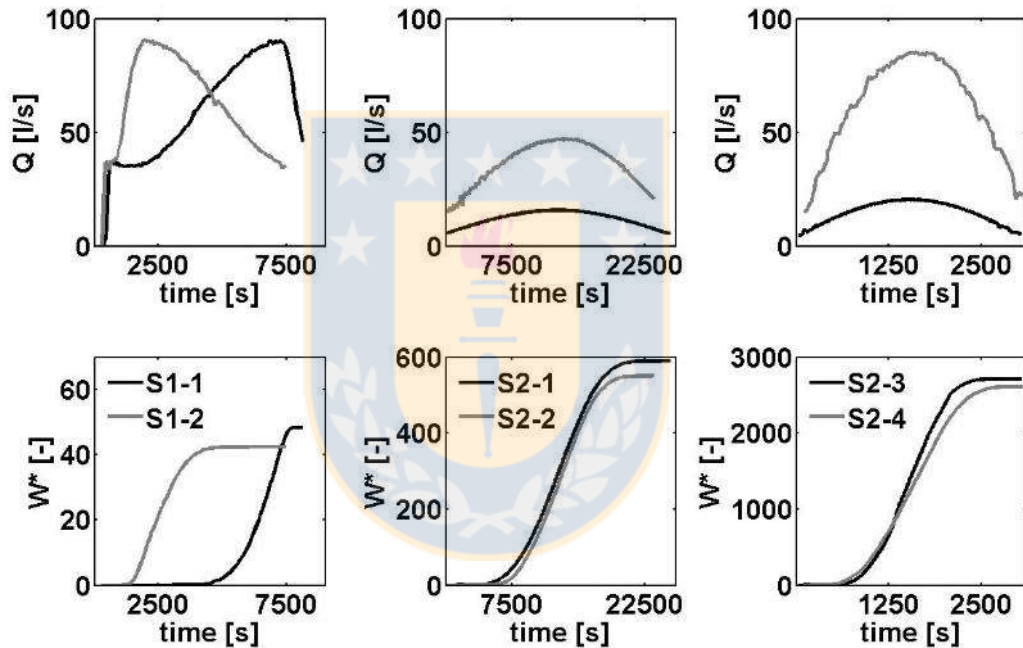


Figura 3.1. Hidrogramas (arriba) y correspondientes  $W^*$  (abajo) para los experimentos de las series S1 (izquierda), S2 en condición de aguas claras (centro) y S2 en condición de lecho vivo (derecha)

Por otro lado, la serie S3 incluyó experimentos con caudal constante, llevados a cabo hasta etapas avanzadas de socavación, alcanzando así elevados valores de  $W^*$  sobre diferentes sedimentos de similar  $D^*$ . Esta serie buscó probar la confiabilidad de la ecuación 3.5 para modelar condiciones cercanas a la socavación de equilibrio.

La siguiente serie, S4, incluyó experimentos adicionales con caudal constante, utilizando diferentes intensidades de flujo. Esta serie buscó comparar la profundidad de socavación en sedimentos con similar  $D^*$ , pero de diferentes tamaños y densidades, teniendo con eso diferentes  $\rho'$  y  $D/d_s$ , lo cual permitió evaluar la escala del tiempo derivada teóricamente.

Finalmente, la serie S5 incluyó experimentos adicionales con caudal constante, utilizando sedimentos de similar  $D^*$ , pero diferentes relaciones de  $D/d_s$ . Esta serie buscó analizar los efectos de escala del parámetro  $D/d_s$  sobre la socavación  $Z^*$ . La Tabla 3.2 muestra las condiciones hidráulicas de las series experimentales descritas anteriormente.

Tabla 3.2. Series experimentales

Series	Exp.	Canal	Sedimento	$u_B$ [ms <sup>-1</sup> ]	$h_B$ [cm]	$u_p$ [ms <sup>-1</sup> ]	$t_p$ [min]	Duración [min]	$u_p/u_c$ [-]
S1	1	Canal 1	Arena 1	0.120	21.0	0.290	100	120	0.91
S1	2	Canal 1	Arena 1	0.120	21.0	0.290	20	120	0.91
S2	1	Canal 2	Arena 2	0.150	9.2	0.270	190	390	0.82
S2	2	Canal 1	Poliestireno	0.038	30.0	0.110	190	390	0.84
S2	3	Canal 2	Arena 2	0.150	9.2	0.420	25	50	1.27
S2	4	Canal 1	Poliestireno	0.038	30.0	0.170	25	50	1.39
S3	1	Canal 3	Arena 4	0.320	10.0	0.320	-	1440	1.00
S3	2	Canal 3	Acetal	0.210	10.0	0.210	-	1440	1.04
S3	3	Canal 2	Arena 2	0.260	9.2	0.260	-	1368	0.80
S3	4	Canal 1	Poliestireno	0.100	30.0	0.100	-	1351	0.80
S4	1	Canal 2	Arena 2	0.330	9.2	0.330	-	1444	1.00
S4	2	Canal 2	Arena 2	0.200	9.2	0.200	-	2988	0.60
S4	3	Canal 1	Poliestireno	0.125	30.0	0.125	-	1483	1.00
S4	4	Canal 1	Poliestireno	0.075	30.0	0.075	-	2321	0.60
S5	1	Canal 2	Arena 1	0.210	7.5	0.210	-	1350	0.91
S5	2	Canal 1	Arena 1	0.290	23.0	0.290	-	5172	0.87
S5	3	Canal 3	Poliestireno	0.110	7.2	0.110	-	190	1.00



Continuación Tabla 3.2

Series	Exp.	Canal	Sedimento	$W^*_{final}$ [-]	$D^*$ [-]	$D/d_s$ [-]	$Z^*_{final}$ [-]
S1	1	Canal 1	Arena 1	42.1	9	417	0.48
S1	2	Canal 1	Arena 1	40.1	9	417	0.47
S2	1	Canal 2	Arena 2	602	18	62	1.25
S2	2	Canal 1	Poliestireno	613	20	56	1.24
S2	3	Canal 2	Arena 2	2446	18	62	1.67
S2	4	Canal 1	Poliestireno	2271	20	56	1.60
S3	1	Canal 3	Arena 4	52946	40	19	1.67
S3	2	Canal 3	Acetal	72780	41	12	1.67
S3	3	Canal 2	Arena 2	4422	18	62	1.53
S3	4	Canal 1	Poliestireno	3907	20	56	1.52
S4	1	Canal 2	Arena 2	36002	18	62	2.10
S4	2	Canal 2	Arena 2	119	18	62	1.12
S4	3	Canal 1	Poliestireno	21705	20	56	1.76
S4	4	Canal 1	Poliestireno	419	20	56	1.15
S5	1	Canal 2	Arena 1	10000	9	139	1.35
S5	2	Canal 1	Arena 1	10000	9	417	1.40
S5	3	Canal 3	Poliestireno	7686	20	17	1.52

En la tabla anterior se muestra el canal y el sedimento que se utilizó en cada experimento. Además, se presentan la velocidad,  $u$ , profundidad,  $h$ , y duración de cada experimento, donde los subíndices “B” y “p” representan las condiciones base y peak de aquellos experimentos realizados con caudal variable. Además, se presentan los parámetros adimensionales de interés, correspondientes al trabajo adimensional del flujo al final de cada experimento,  $W^*_{final}$ , el diámetro adimensional del sedimento,  $D^*$ , el tamaño relativo de la cepa respecto al sedimento,  $D/d_s$  y la socavación adimensional al final de cada experimento,  $Z^*_{final}$ .

### 3.5. Conclusiones

La aplicación del análisis dimensional al caso de socavación local permitió encontrar tres parámetros adimensionales que fueron propuestos como escalas teóricas de escalabilidad de la socavación local. Adicionalmente, de la escala propuesta para el flujo,  $W^*$ , se derivó una escala temporal que permitiría conocer la razón de tiempo entre modelo y prototipo natural, para el caso de caudal constante.

Por otro lado, se describieron las tres instalaciones experimentales donde se realizaron todos los experimentos. Se presentaron las técnicas de medición del flujo y de la socavación para cada caso. Se describieron los seis distintos sedimentos utilizados en experimentación. Finalmente, se detallaron las series experimentales diseñadas, describiendo además el objetivo por el que cada una de ellas fue diseñada.



## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Introducción

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos de cada serie experimental. Se evalúa con ello la aptitud de las escalas del flujo, del sedimento y temporal propuestas y derivadas teóricamente. Además, se discuten los efectos de escala que se desprenden de los modelos donde se distorsiona el parámetro  $D/d_s$ . Finalmente, se discuten los resultados obtenidos.

### 4.2. Parámetro adimensional representando al flujo

De acuerdo a la ecuación 3.5 , el flujo es representado por el trabajo adimensional del flujo  $W^*$ . Para evaluar dicho parámetro en el escalamiento de la socavación, se comparó la profundidad de socavación en el Canal 1 con la Arena 1, producida por dos diferentes hidrogramas, pero con el mismo valor de  $W^*$ . La Figura 4.1 muestra la profundidad de socavación adimensional  $Z^*$  sobre el trabajo adimensional del flujo,  $W^*$ , para los experimentos de la serie S1.

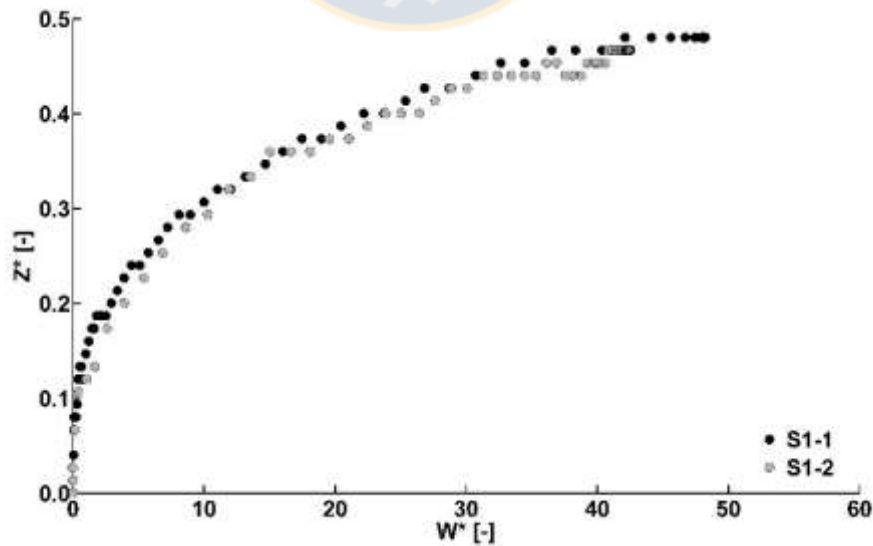


Figura 4.1. Profundidad de socavación adimensional  $Z^*$  sobre el trabajo efectivo del flujo  $W^*$ , para los experimentos de la serie S1

En la Figura 4.1 se observa que los dos hidrogramas de los experimentos S1-1 y S1-2 produjeron la misma profundidad de socavación relativa  $Z^*$ , para valores dados de  $W^*$ , demostrando así la unicidad de la relación entre ambas variables. Con lo anterior se demuestra que  $W^*$  es un parámetro apropiado para representar al flujo en el fenómeno de socavación local.

### 4.3. Parámetros adimensionales representando el sedimento

El parámetro propuesto para representar al sedimento en problemas de socavación local,  $D^*$ , fue testeado a través de los experimentos de la serie S2, bajo condición de aguas claras (experimentos S2-1 y S2-2), y bajo condición de lecho vivo (experimentos S2-3 y S2-4). Se alcanzó perfecta similitud entre sistemas en experimentos S2-1 y S2-3 (Canal 1, Arena 1) y S2-2 y S2-4 (Canal 2 y Poliestireno), es decir, se tuvo que  $\lambda_{Z^*} = \lambda_{W^*} = \lambda_{D^*} = \lambda_{D/d_s} = 1$ , mientras que la escala geométrica fue  $\lambda_g = 1:3$ . Ambos sedimentos, Arena 1 y Poliestireno tienen valores similares del diámetro adimensional de la partícula,  $D^* = 18$  y  $20$ , respectivamente. Los hidrogramas de la serie S2 fueron diseñados para producir el mismo trabajo efectivo a través del tiempo. La Figura 4.2 muestra la profundidad de socavación relativa  $Z^*$  sobre el tiempo  $t$ , así como también  $Z^*$  sobre  $W^*$ , para los pares de experimentos realizados en condición de aguas claras y lecho vivo.

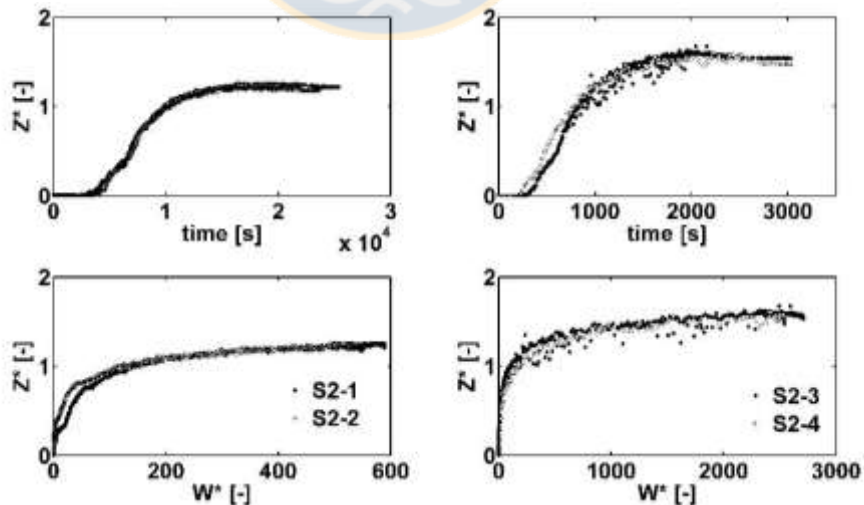


Figura 4.2. Profundidad de socavación relativa  $Z^*$  sobre el tiempo  $t$  (arriba) y sobre  $W^*$  (abajo), para los experimentos S2-1 y S2-2 en condición de aguas claras (izq.) y para los experimentos S2-3 y S2-4 en condición de lecho vivo (der.)

En los experimentos con condición de lecho vivo, la intensidad de flujo alcanzó un valor máximo de 1.3, dando lugar a la aparición de formas de fondo. A partir de la Figura 4.2 se evidencia que la similitud del proceso de socavación se obtiene cuando los parámetros que controlan el fenómeno (ecuación 3.5) son similares en el modelo y el prototipo. A continuación, la Figura 4.3 muestra la profundidad de socavación adimensional sobre el trabajo adimensional efectivo del flujo, para los experimentos de la serie S3. Estos experimentos fueron llevados a cabo bajo caudal constante, hasta alcanzar etapas avanzadas de socavación. Los experimentos S3-1 y S3-2 fueron realizados con Arena 3 ( $D^*=21$ ) y Poliestireno ( $D^*=20$ ) respectivamente, mientras que los experimentos S3-3 y S3-4 fueron realizados con Arena 4 y Acetal, ambos con idéntico valor de  $D^*=20$ .

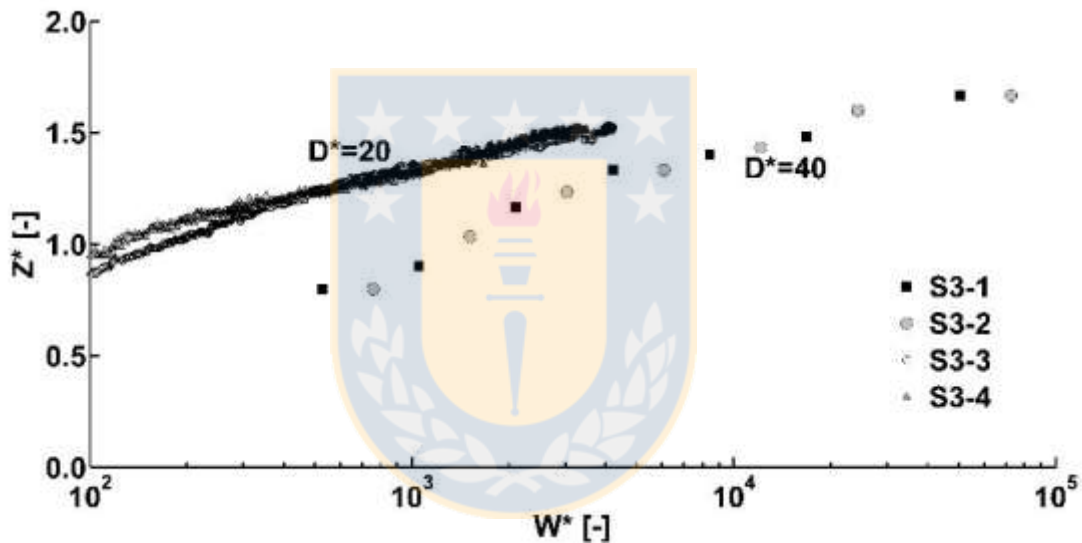


Figura 4.3. Profundidad de socavación relativa  $Z^*$  sobre  $W^*$  (abajo), para los experimentos de la serie S3

En la Figura 4.3 se observa que se alcanzó la similitud en la profundidad de socavación relativa,  $Z^*$  en todos los experimentos de la serie S3 en los cuales existieron diferentes hidrogramas, cepas y sedimentos, pero en los cuales se logró que  $\lambda_{W^*} = \lambda_{D^*} = \lambda_{D/d_s} = 1$ . Con lo anterior se confirma la confiabilidad del diámetro adimensional de la partícula,  $D^*$ , como un parámetro apropiado para representar al sedimento en el escalamiento de problemas de socavación local alrededor de cepas de puente.

#### 4.4. Escala temporal

La escala de tiempo fue calculada con la ecuación 3.12 para pares de experimentos realizados bajo caudal constante y con sedimentos de igual  $D^*$ , pero de diferentes tamaños y densidades, así como también con diferentes intensidades de flujo y diámetros de cepas. Los pares de experimentos comparados fueron: S3-3 con S4-3, S3-3 con S3-4, S3-3 con S4-4, S4-1 con S4-3, S4-1 con S3-4, S4-1 con S4-4, S4-2 con S4-3, S4-2 con S3-4, y S4-2 con S4-4. La escala de tiempo calculada con la ecuación 3.12 fue comparada con la escala de tiempo observada en cada par de experimentos comparados, tal como muestra la Figura 4.4.

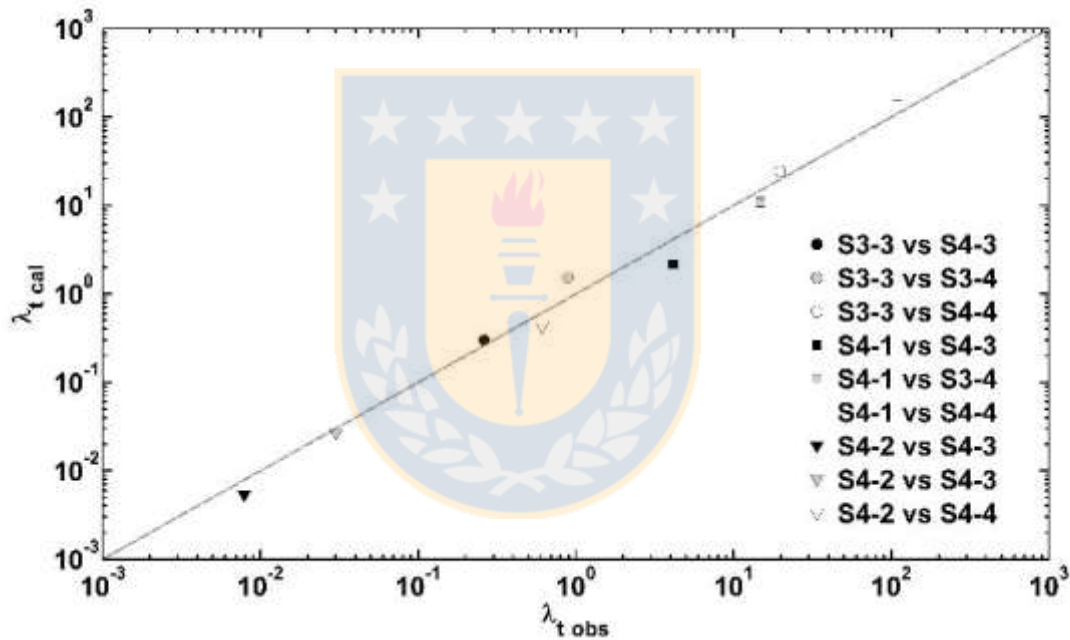


Figura 4.4. Escala temporal calculada según ecuación 3.12 vs escala temporal observada. La línea gris continua indica un perfecto ajuste

En la Figura 4.4 se observa un muy buen ajuste entre los resultados de la ecuación 3.12 y las escalas de tiempo observadas. El coeficiente de determinación entre las escalas de tiempo observadas y calculadas fue  $R^2=0.99$ , mientras que el error promedio porcentual de las escalas calculadas fue 35%. Los resultados experimentales obtenidos validan la escala de tiempo determinada teóricamente,  $\lambda_t$ , como una escala útil para estimar la duración de los experimentos de laboratorio, y así generar modelación precisa del fenómeno de socavación.

#### 4.5. Efectos de escala en modelos con distorsión del parámetro $D/d_s$

En los casos analizados anteriormente, se alcanzó una perfecta similitud de las escalas que controlan el fenómeno de socavación local, acorde a la ecuación 3.5, donde se mantuvo las relaciones  $\lambda_{Z^*} = \lambda_{W^*} = \lambda_{D^*} = \lambda_{D/d_s} = 1$ , entre los experimentos comparados. Dicha condición no es usual, ya que para evitar efectos de contracción sobre la socavación alrededor de cepas puente, el ancho relativo del canal respecto al tamaño de la cepa está restringido a valores de  $B/D > 8$  (Istiarto, 2001), razón por la cual los anchos más comunes de los canales de laboratorio limitan el diámetro máximo de las cepas utilizadas en los modelos, generando así valores menores de  $D/d_s$  en los modelos que en los prototipos, o sea,  $\lambda_{D^*} \neq 1$ . Los efectos de  $D/d_s$  sobre la profundidad de socavación han sido ampliamente estudiados por Lee y Sturm (2009), y por Sheppard *et al.*, (2004 y 2014). La Figura 4.5 muestra la profundidad relativa de socavación  $Z^*$  sobre el tamaño relativo de la cepa respecto al sedimento,  $D/d_s$ , para tres grupos de sedimentos con similar  $W^*$  y  $D^*$ .

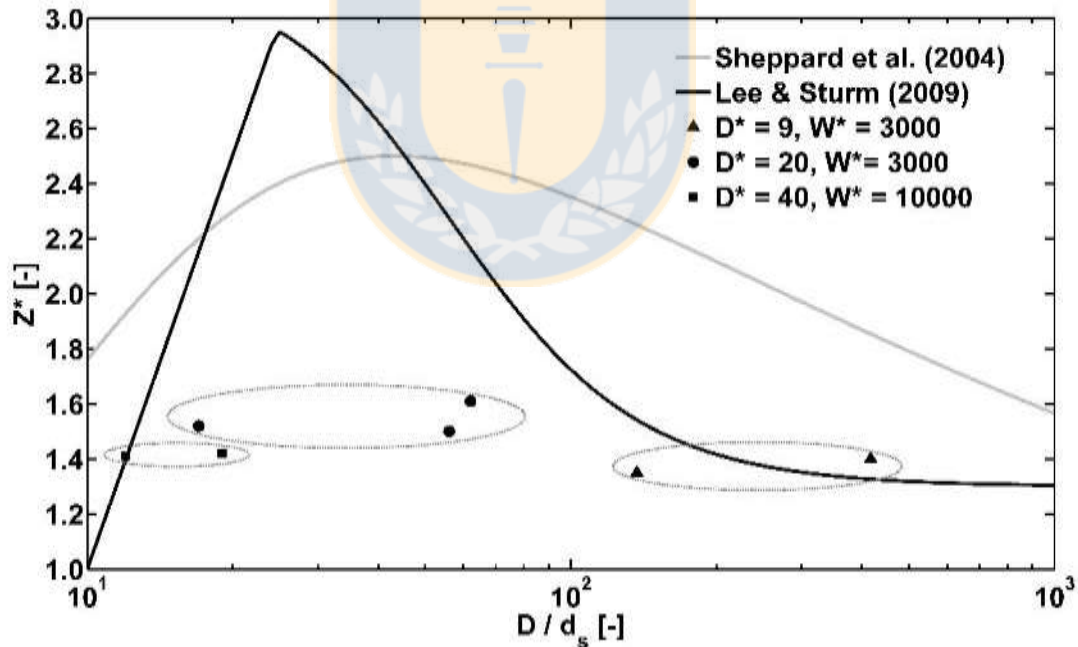


Figura 4.5. Profundidad relativa de socavación  $Z^*$  sobre el diámetro de la cepa respecto al sedimento  $D/d_s$  para los experimentos S5-1 y S5-2 (con  $D^*9$  y  $W^*=3000$ ), S4-1 y S5-3 (con  $D^*=20$  y  $W^*=3000$ ), y S3-1 y S3-3 (con  $D^*=40$  y  $W^*=10000$ )

En la Figura 4.5, las líneas continuas corresponden a las curvas propuestas por Sheppard *et al.*, (2004) y Lee y Sturm (2009) para la profundidad de socavación de equilibrio, es decir,  $W^* \rightarrow \infty$ . En la figura presentada se observa que el efecto del parámetro  $D/d_s$  sobre  $Z^*$  toma menor importancia en experimentos con similar  $W^*$  y  $D^*$ . Dicho efecto es ostensiblemente menor a los efectos reportados previamente para el caso de socavación de equilibrio por Sheppard *et al.*, (2004) y Lee y Sturm (2009). En los experimentos presentados, los efectos de  $D/d_s$  sobre la socavación  $Z^*$  fueron bien capturados por los parámetros  $W^*$  y  $D^*$ , permitiendo una buena precisión en la predicción de la socavación en modelos que poseen distorsión del parámetro  $D/d_s$ . En los experimentos mostrados en la Figura 4.5 se generaron errores porcentuales menores al 7%, lo cual se considera muy aceptable para la evaluación de socavación en modelos físicos a escala, especialmente considerando que las fórmulas existentes actualmente estiman socavaciones que difieren en factores incluso cercanos a 5 (Sheppard *et al.*, 2014), para las mismas distorsiones del parámetro  $D/d_s$ .

#### 4.6. Discusión de los resultados

Se propusieron parámetros adimensionales para representar al flujo, al sedimento y a la cepa en el fenómeno de socavación local alrededor de cepas de puente, y la idoneidad de dichos parámetros para realizar modelación física a escala del fenómeno fue investigada a través de experimentación. El análisis realizado estuvo restringido a casos con  $\hat{h} > 1,5$  y  $B/D > 8$ , lo que representa la mayoría de los de eventos de crecida ocurridos en ríos naturales. Por otro lado, los experimentos abarcaron condiciones de aguas claras y de lecho vivo, así como también los casos de caudal constante y caudal variable. Los parámetros que controlaron el fenómeno fueron el trabajo adimensional efectivo del flujo,  $W^*$ ; el diámetro adimensional de la partícula  $D^*$ , y el diámetro relativo de la cepa respecto al sedimento,  $D/d_s$ .

El escalamiento de  $W^*$  desde los prototipos a los modelos no es trivial, ya que una crecida en ríos naturales produce enormes cantidades de  $W^*$ , usualmente con intensidades de flujo  $I$  muy altas, las cuales corresponden a los caudales máximos de las crecidas (Ettema *et al.*, 2015). Para alcanzar similitud en la socavación es importante que la condición de transporte de sedimentos sea la misma



en el modelo y el prototipo, y con eso, la intensidad de flujo  $I$  estará restringida a estar en similares rangos en ambos casos, es decir,  $I < 1.0$  para condición de aguas claras,  $1.0 \leq I < 4.0$  para lecho vivo con formas de fondo, e  $I \geq 4.0$  para transporte en suspensión.

Los sedimentos más típicos disponibles para modelación son, usualmente, materiales ligeros, de mayor tamaño que sus sedimentos aluvionales equivalentes, tal como se muestra en la Tabla 4.1 (adaptada de Bettess, 1990):

Tabla 4.1. Propiedades de los materiales ligeros

Material	$d_s$	Gravedad específica [-]	$D^*$ [-]	Arena equivalente
	[mm]			[mm]
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	2.3-3.0	1.22	30-39	1.18-1.53
Baquelita	0.35-4.0	1.30-1.45	5-66	0.2-2.59
Carbón	0.1-40.0	1.37-1.61	1.5-726	0.06-28.70
Agregado ligero	1.0-3.0	1.70	19-57	0.75-2.25
Plexiglás	0.3-1.0	1.18-1.19	3.6-12.3	0.14-0.49
Resinas poliamídicas (Nylon)	0.1-5.0	1.16	1.2-58.1	0.05-2.30
Poliestireno	0.5-3.2	1.035-1.05	3.5-25.2	0.14-1.00
PVC	1.5-4.0	1.670	16.7-53.9	0.66-2.13
Aserrín tratado con asfalto	0.6-1.0	1.05	4.7-7.9	0.19-0.31
Arena de Loira	0.63-2.25	1.50	10.7-38.2	0.42-1.51
Cáscaras de Nuez	0.15-0.41	1.33	2.2-6.1	0.09-0.24
Madera granulada	0.8	1.10	7.9	0.31

En la tabla anterior se observa que los materiales ligeros disponibles cubren un amplio rango de valores de  $D^*$ , pudiendo representar una gran variedad de sedimentos aluviales: desde arenas finas hasta gravas, así como también son capaces de representar paredes hidráulicamente lisas ( $D^* < 9$ ), en transición liso-rugoso ( $9 \leq D^* < 55$ ), y paredes hidráulicamente rugosas ( $D^* > 55$ ), convirtiéndose así en buenas alternativas para la modelación física a escala de la socavación local en cepas de puente.

Los experimentos con distorsión en el parámetro  $D/d_s$  mostraron efectos de escala despreciables sobre  $Z^*$ , comparados con los reportados en investigaciones previas (Lee y Sturm, 2009; Sheppard *et al.*, 2004 y 2014), ya que los parámetros trabajo efectivo del flujo,  $W^*$ , y diámetro adimensional

de la partícula,  $D^*$ , capturaron una importante parte de los efectos de  $\rho'$ ,  $U^*$ ,  $Fr_d$  y  $D/d_s$  sobre la profundidad de socavación relativa,  $Z^*$ . Por consecuencia, si se cumple que  $\lambda_{W^*} = \lambda_{D^*} = 1$ , se esperaría que los modelos con distorsión de  $D/d_s$  mantengan una alta precisión en la estimación de la profundidad de socavación de los prototipos, con errores esperables menores al 10%, y, por lo tanto, estos sean modelos aceptables para la simulación a escala del fenómeno. Usualmente, los errores en los modelos a escala de socavación aparecen debido a diversos efectos combinados, tales como la aparición de diferencias en la temperatura del agua, o las diferentes formas y distribución de los tamaños de las partículas entre prototipo y modelo. Sin embargo, los resultados presentados mostraron que la predicción de la socavación a través de modelos físicos a escala es más confiable y precisa que la comúnmente obtenida a través de la aplicación de las fórmulas de socavación existentes.

Una importante complicación, relacionada con el tiempo necesario para alcanzar la socavación de equilibrio, surge en experimentos donde el modelo posee las mismas arenas aluviales que en el río prototipo, como ha ocurrido típicamente en aquellos experimentos llevados a cabo para desarrollar las actuales fórmulas de socavación (Simarro *et al.*, 2011; Ettema *et al.*, 2006). Una definición apropiada para la condición de socavación de equilibrio puede ser obtenida en términos del trabajo efectivo del flujo, considerando  $W^* \rightarrow \infty$ . En ese sentido, las fórmulas de socavación existentes fueron desarrolladas en base a experimentos con distorsiones en  $W^*$ , lo que implica la aparición de importantes efectos de escala sobre  $Z^*$ . Lo anterior explicaría, en parte, los efectos de escala observados y las discrepancias existentes entre las diferentes fórmulas de socavación y los respectivos casos prototipos en la naturaleza.

#### 4.7. Conclusiones

A través de las series experimentales llevadas a cabo se logró validar la idoneidad de las escalas propuestas para la modelación a escala del fenómeno. Se verificó que el trabajo adimensional efectivo del flujo y el diámetro adimensional de la partícula son adecuados parámetros para rescatar las características del flujo y el sedimento respectivamente, en el fenómeno de socavación local. Por su parte, los modelos donde existe distorsión del parámetro  $D/d_s$ , pero similitud de las escalas

propuestas para el flujo y el sedimento, demostraron tener efectos de escala despreciables en comparación con los efectos reportados en investigaciones previas. Finalmente, se muestra un listado de materiales ligeros alternativos, que potencialmente pueden ser usados en la modelación física de socavación local, sobre todo considerando los amplios rangos de materiales aluviales equivalentes que estos cubren.



## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

### 5.1. Conclusiones

La idoneidad de los adimensionales propuestos para realizar modelación física de la socavación local a escala, fue investigada a través de 17 experimentos realizados en instalaciones experimentales que constan de diferentes canales, distintas cepas y distintos sedimentos. Se analizó la socavación local bajo condición de aguas claras y lecho vivo, así como también bajo las condiciones de caudal constante y caudal variable.

Los parámetros adimensionales que representan el sistema compuesto por el flujo, el sedimento, y la cepa, fueron derivados teóricamente a partir de la aplicación del análisis dimensional. Estos parámetros se denominan: trabajo adimensional efectivo del flujo,  $W^*$ ; diámetro adimensional de la partícula,  $D^*$ ; y el tamaño relativo de la cepa respecto al sedimento,  $D/d_s$ . Adicionalmente, se derivó una escala de tiempo, para la cual se verificó a través de los experimentos observados que escala con el diámetro de la cepa, la densidad relativa del sedimento, el tamaño del sedimento y la velocidad efectiva del flujo.

Los resultados experimentales mostraron que en los casos donde se alcanzó perfecta similitud entre el modelo y el prototipo, se obtuvo idéntica socavación, confirmando las escalas derivadas teóricamente.

En la mayoría de las situaciones, el tamaño relativo de la cepa respecto al sedimento  $D/d_s$  es distorsionado en los modelos, lo cual usualmente conlleva efectos de escala en las socavaciones modeladas. No obstante, se demostró que dichos efectos son pequeños y menores que los errores asociados a los resultados obtenidos a través de las fórmulas de socavación existentes.

Finalmente, se acepta la hipótesis propuesta, la cual indica que los tres parámetros que controlan el fenómeno de socavación local en cepas de puente, y que, por ende, permiten escalar el fenómeno, son el trabajo adimensional del flujo,  $W^*$ , el diámetro adimensional del sedimento,  $D^*$ , y el tamaño relativo de la cepa respecto al sedimento,  $D/d_s$ .

---

## REFERENCIAS

Amini, A., B. Melville, T. M. Ali, y A. Ghazali (2011) Clear-Water Local Scour around Pile Groups in Shallow-Water Flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, **138(2)**. 177-185.

Apsilidis, N., P. Diplas, C. L. Dancey, y P. Bouratsis (2015) Time-resolved flow dynamics y Reynolds number effects at a wall–cylinder junction. **Journal of Fluid Mechanics**, **776**. 475-511.

Bagnold, R. A. (1966) An approach to the sediment transport problem from general physics. **U.S. Geological Survey Professional Paper**. 422-I.

Ataie-Ashtiani, B., y A. A. Beheshti (2006) Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour at Pile Groups. **Journal of Hydraulic Engineering**, **132(10)**. 1100-1104.

Bettess, R. (1990) **Survey of lightweight sediments for use in mobile-bed physical models, in Movable Bed Physical Models**, **312(1)**. 115-123.

Brandimarte, L., Paron, P. y Di Baldassarre, G. (2012) Bridge pier scour: A review of processes, measurements y estimates. **Environmental Engineering y Management Journal**, **11(5)**. 975-989.

Briaud, J. L., L. Brandimarte, J. Wang, y P. D'Odorico (2007) Probability of Scour Depth Exceedance Owing to Hydrologic Uncertainty, **Georisk**, **1(2)**. 77-88.

Chen, Q., M. Qi, Q. Zhong, y D. Li (2017) Experimental study on the multimodal dynamics of the turbulent horseshoe vortex system around a circular cylinder. **Physics of Fluids** **29(1)**. 015106.

Cheng, N. S., Y.-M. Chiew, y X. Chen (2016) Scaling Analysis of Pier-Scouring Processes. **Journal of Engineering Mechanics**, **142(8)**. 1-6

Coleman, S. E. (2005) Clearwater Local Scour at Complex Piers. **Journal of Hydraulic Engineering**, **131(4)**. 330-334.

Dargahi, B. (1989) The turbulent flow field around a circular cylinder. **Experiments in Fluids**, **8**, 1—12.

Dargahi, B. (1990) Controlling mechanism of local scouring. **Journal of Hydraulic Engineering**, **116(10)**, 1197-1214.

Devenport, W. J., y R. L. Simpson (1990) Time-dependent y time-averaged turbulence structure near the nose of a wing-body junction. **Journal of Fluid Mechanics**, **210**, 23-55.

Escauriaza, C., y F. Sotiropoulos (2011a) Lagrangian model of bed-load transport in turbulent junction flows. **Journal of Fluid Mechanics**, **666**, 36-76.

Escauriaza, C., y F. Sotiropoulos (2011b) Initial stages of erosion y bed form development in a turbulent flow around a cylindrical pier. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, **116**, 1-24.

Ettema, R., B. Melville, y B. Barkdoll (1998) Scale Effect in Pier-Scour Experiments. **Journal of Hydraulic Engineering**, **124(6)**, 639–642.

Ettema, R., G. Kirkil, y M. Muste (2006) Similitude of Large-Scale Turbulence in Experiments on Local Scour at Cylinders. **Journal of Hydraulic Engineering**, **132(1)**, 33–40.

Ettmer, B., F. Orth, y O. Link (2015) Live-bed scour at bridge piers in a lightweight Polystyrene bed. **Journal of Hydraulic Engineering**, **141(9)**, 1-10.

Gorrick, S. y J. F. Rodríguez (2014) Scaling Of Sediment Dynamics in a Laboratory Model of a Sand-Bed Stream. **Journal of Hydro-Environment Research**, **8(2)**, 77-87.

Hager, W., y J. Unger (2010) Bridge Pier Scour under Flood Waves. **Journal of Hydraulic Engineering**, **136(10)**, 842–847.

Heller, V. (2011) Scale Effects in Physical Hydraulic Engineering Models. **Journal of Hydraulic Research**, **49(3)**. 293-306.

Heller, V. (2017) Self-similarity y Reynolds number invariance in Froude modelling. **Journal of Hydraulic Research**, **55(3)**. 293-309.

Istiarto, I. (2001) **Flow around a cylinder in a scoured bed channel**. PhD Thesis. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Johnson, P. A., P. E. Clopper, L. W. Zevenbergen, y P. F. Lagasse (2015) Quantifying Uncertainty y Reliability in Bridge Scour Estimations. **Journal of Hydraulic Engineering**, **141(7)**. 1-9.

Kothyari, U. C., y A. Kumar (2012) Temporal Variation of Scour around Circular Compound Piers. **Journal of Hydraulic Engineering**, **138(11)**. 945-957.

Lee, S. O., y T. Sturm (2009) Effect of Sediment Size Scaling on Physical Modeling of Bridge Pier Scour. **Journal of Hydraulic Engineering**, **135(10)**. 793–802.

Link, O., C. González, M. Maldonado, y C. Escauriaza (2012) Coherent Structure Dynamics y Sediment Particle Motion around a Cylindrical Pier in Developing Scour Holes. **Acta Geophysica**, **60(6)**. 1689–1719.

Link, O., K. Klischies, G. Montalva, y S. Dey (2013) Effects of bed compaction on scour at a bridge pier in sandy clay mixtures. **Journal of Hydraulic Engineering** **139(9)**. 1013-1019.

Link, O., C. Castillo, A. Pizarro, A. Rojas, B. Ettmer, C. Escauriaza, y S. Manfreda (2017) A Model of Bridge Pier Scour during Flood Waves. **Journal of Hydraulic Research**, **55(3)**. 310-323.

López, G., L. Teixeira, M. Ortega-Sánchez, y G. Simarro (2014) Estimating Final Scour Depth under Clear-Water Flood Waves. **Journal of Hydraulic Engineering**, **140(3)**. 328–332.

Lu, J. Y., Z. Shi, J. H. Hong, J. J. Lee, y R. Raikar (2010) Temporal Variation of Scour Depth at Non-Uniform Cylindrical Piers. **Journal of Hydraulic Engineering**, **137(1)**. 45-56.

Melville, B., y Y.-M. Chiew (1999) Time Scale for Local Scour at Bridge Piers. **Journal of Hydraulic Engineering**, **125(1)**. 59-65.

Melville, B. (1997) Pier y abutment scour: integrated approach. **Journal of Hydraulic Engineering**, **123(2)**. 125-136.

Meyering, H., y B. Ettmer (2010) Substitution of natural river bed material by artificial granulate in physical models for bridge pier scour investigations. **Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow**. 1215-1221. Braunschweig. Alemania. Septiembre.

Moreno, M., R., Maia, y L. Couto (2016) Prediction of Equilibrium Local Scour Depth at Complex Bridge Piers. **Journal of Hydraulic Engineering**, **142(11)**. 1-13.

Pizarro, A., B. Ettmer, S. Manfreda, A. Rojas, y O. Link (2017) Dimensionless, Effective Flow Work for Estimation of Pier Scour caused by Flood Waves. **Journal of Hydraulic Engineering**, **143(7)**. 1-7.

Prendergast, L. J., y K. Gavin (2014) A Review of Bridge Scour Monitoring Techniques. **Journal of Rock Mechanics y Geotechnical Engineering**, **6(2)**. 138-149.

Raudkivi, A. (1986) Functional Trends of Scour at Bridge Piers. **Journal of Hydraulic Engineering**, **112(1)**. 1-13.

Shen, H.W. (1990) **Movable Bed Physical Models**. 312, Springer Science y Business Media.

Sheppard, D. M., M. Odeh, y T. Glasser (2004) Large scale clear-water local pier scour experiments. **Journal of Hydraulic Engineering**, **130(10)**. 957-963.



---

Sheppard, M., B. Melville, y H. Demir (2014) Evaluation of Existing Equations for Local Scour at Bridge Piers. **Journal of Hydraulic Engineering**, **140(1)**. 14-23.

Simarro, G., C. Fael, y A. Cardoso (2011) Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies. **Journal of Hydraulic Engineering**, **137(9)**. 1089-1093.

Thélusmond, J., L. Chevalier, y B. DeVantier (2013) The use of plastic media in a movable bed model to study sedimentary processes in rivers. **International Journal of Hydrology Science y Technology**, **3(2)**. 93-110.

Wright, L., P. Chinowsky, K. Strzepek, R. Jones, R. Streeter, J.B. Smith, J.-M. Mayotte, A. Powell, L. Jantarasami, y W. Perkins (2012) Estimated Effects of Climate Change on Flood Vulnerability of US Bridges. **Mitigation y Adaptation Strategies for Global Change**, **17(8)**. 939-955.

Yalin M. S., y J. W. Kamphuis (1971) Theory of Dimensions y Spurious Correlation. **Journal of Hydraulic Research**, **9(2)**. 249-265.

