



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**MEDICIÓN DE LA SOCAVACIÓN ALREDEDOR DE UN CILINDRO EN
ESCURRIMIENTO SUPERCRÍTICO EN LABORATORIO**

POR

Benjamín Enrique Durán Astudillo

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Oscar Link Lazo
Maricarmen Guerra Paris

Profesional Supervisor
Rodrigo Silva Muñoz

Enero 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Benjamin Enrique Durán Astudillo Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

El estudio de la socavación local en régimen supercrítico es crucial para comprender y mitigar los riesgos asociados con la erosión en ambientes fluviales de alta energía. El presente trabajo tiene como objetivo medir la socavación alrededor de un cilindro en régimen supercrítico en laboratorio.

Se diseñó y construyó una compuerta, que actúa como obstructor de flujo, permitiendo generar régimen supercrítico en un canal sin pendiente. Se determinaron las condiciones necesarias de apertura de compuerta, nivel de agua inicial del canal y caudal necesarios para generar el patrón de flujo detached hydraulic jump.

Se analizó un caso específico, donde la zona de estudio consta de un lecho de sedimentos con $d_{50} = 14.5$ mm y en el centro se encuentra un cilindro de plexiglás de 15 cm de diámetro. El ensayo se realizó en condiciones de aguas claras. Tuvo duración de 6 horas con un caudal constante $Q = 69$ l/s, la velocidad media $u = 1.15$ m/s, número de Froude $F = 1.76$, $u/u_c = 0.764$ y $h/D = 0.025$. El patrón de flujo obtenido corresponde al detached hydraulic jump y un número de Strouhal asociado al derrame inverso de $St = 0.026$.

Se midió la profundidad máxima de socavación en 3 planos x-z $\theta = -30^\circ$, 0° y 30° , además del perfil longitudinal del lecho y la superficie libre en $\theta = 0^\circ$ al término del ensayo. En los primeros instantes del ensayo se pudo observar cómo rápidamente se empezó a formar la fosa de socavación, inicialmente empezando por los lados del cilindro, para luego extenderse hacia la cara aguas arriba, hasta llegar al equilibrio.

Se obtuvieron los perfiles transversales de la fosa de socavación y la curva de socavación máxima versus el tiempo. Los resultados de las mediciones muestran una socavación máxima final de $z_{max} = 2.89$ cm en $\theta = -30^\circ$, $z_{max} = 2.35$ cm en $\theta = 0^\circ$ y $z_{max} = 2.78$ cm en $\theta = 30^\circ$.

Finalmente se concluye que es posible generar régimen supercrítico en laboratorio haciendo uso de una compuerta para acelerar el flujo, pudiendo replicar el patrón de flujo detached hydraulic jump. Además, para el caso de estudio, se encontró que la ecuación de Sheppard no estima correctamente la socavación máxima de la fosa.

ABSTRACT

The study of local scour in supercritical flow is crucial for understanding and mitigating risks associated with erosion in high-energy river environments. This research aims to measure scour around a cylinder in supercritical flow in the laboratory.

A gate was designed and constructed to act as a flow obstruction, allowing the generation of supercritical flow in a slopeless channel. The necessary conditions for gate opening, initial water level in the channel, and discharge were determined to generate the detached hydraulic jump flow pattern.

A specific case was analyzed, where the study area consists of a sediment bed with $d_{50}=14.5$ mm, and a plexiglass cylinder with a diameter of 15 cm is located in the center. The test was conducted under clear water conditions, lasting for 6 hours with a constant discharge $Q=69$ l/s, mean velocity $u=1.15$ m/s, Froude number $F=1.76$, $u/u_c=0.764$, and $h/D=0.025$. The obtained flow pattern corresponds to the detached hydraulic jump, with a Strouhal number associated with reverse spillage of $St=0.026$.

The maximum scour depth was measured at three x-z planes $\theta= -30^\circ$, 0° , and 30° , along with the longitudinal bed profile and free surface at $\theta=0^\circ$ at the end of the test. In the early moments of the test, it was observed how the scour hole quickly began to form, initially starting from the sides of the cylinder and then extending towards the upstream face until reaching equilibrium.

Transverse profiles of the scour hole and the curve of maximum scour versus time were obtained. Measurement results show a final maximum scour of $z_{max} = 2.89$ cm at $\theta= -30^\circ$, $z_{max} = 2.35$ cm at $\theta= 0^\circ$, and $z_{max} = 2.78$ cm at $\theta= 30^\circ$.

Finally, it is concluded that it is possible to generate supercritical flow in the laboratory using a gate to accelerate the flow, replicating the detached hydraulic jump flow pattern. Additionally, for the case study, it was found that the Sheppard equation does not correctly estimate the maximum scour depth.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el financiamiento a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo ANID, por el financiamiento otorgado a la presente memoria de título mediante el proyecto FONDECYT 1221341.

Agradezco la colaboración del Dr. Oscar Link y de la Dra. Maricarmen Guerra por la guía y consejos brindados, así como al Sr. René Iribarren por su apoyo continuo en el laboratorio; sin él, esta memoria no hubiera sido posible.

Finalmente agradecer a mi familia y amigos por su amor y apoyo incondicional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Motivación	10
1.2 Objetivo general	11
1.3 Objetivos específicos.....	11
1.4 Metodología de trabajo.....	11
1.5 Principales resultados y conclusiones	11
1.6 Organización de documento.....	12
CAPITULO 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2.1 Introducción	13
2.2 Regímenes de flujo en ríos y canales	13
2.3 Número de Froude, régimen supercrítico y subcrítico	14
2.4 Interacción entre flujo supercrítico y un obstáculo	14
2.5 Velocidad crítica, condiciones de agua clara y lecho vivo.....	17
2.6 Régimen supercrítico en laboratorio (compuerta y energía específica)	18
2.7 Conclusiones	19
CAPITULO 3 MATERIALES Y METODOS.....	20
3.1 Introducción	20
3.2 Instalación experimental y sedimento	20
3.3 Control de descarga y profundidad de flujo	21
3.4 Técnicas de medición	22
3.5 Procesamiento de serie experimental	23
3.6 Conclusiones	25
CAPITULO 4 RESULTADOS	26
4.1 Introducción	26

4.2 Diseño y construcción de la instalación experimental	26
4.3 Perfiles de socavación y curvas de socavación versus el tiempo	31
4.4 Conclusiones	35
CAPITULO 5 CONCLUSIONES	36
REFERENCIAS	38
ANEXOS	40
ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Formato de datos medidos por el láser.....	24
Tabla 4.1 Propiedades del sedimento.....	28
Tabla 4.2 Resumen del ensayo.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Relación profundidad velocidad para cuatro regímenes de flujo en canales abiertos (Chow, 1994).....	13
Figura 2.2 Estructuras características del flujo subcrítico alrededor de un cilindro (Roulund, 2005).	14
Figura 2.3 De arriba a abajo: esquema (vistas laterales), fotografía y fotografía aerodinámica cercana al lecho de un flujo tipo separación (a) y un flujo tipo ruptura (b).	15
Figura 2.4 Patrones de flujo aguas arriba de una cimentación emergente rectangular en flujo supercrítico: (izquierda) Detached Hydraulic Jump y (derecha) Wall Jet Pattern (Riviere et al. 2017).	16
Figura 2.5 Patrones de flujo clasificados en función de $(F, h/R)$ (Riviere et al. 2017).	16
Figura 2.6 Variación de la profundidad de socavación local con la intensidad del flujo (Melville, 2008).....	17
Figura 2.7 Compuerta y sus respectivas profundidades alternas (Moglen, 2015).	19
Figura 3.1 Esquema de la instalación experimental.	20
Figura 3.2 Zona de estudio vista lateral (izquierda) y frontal (derecha).	22
Figura 3.3 Esquema del cilindro y ángulos de medición.	23
Figura 3.4 Curva de calibración	24
Figura 4.1 Fotografías de la compuerta tomadas desde aguas debajo del canal.	27
Figura 4.2 Curva granulométrica del sedimento.	27
Figura 4.3 Experimentos en wall-jet-like bow wave (sin relleno) y detached hydraulic jump (relleno). La curva que separa ambos patrones es la propuesta por Vouillat et al. (2016).....	29
Figura 4.4 Secuencia cuadro por cuadro del derrame inverso.	30
Figura 4.5 Vista frontal aérea (izquierda) y vista posterior (derecha).....	30
Figura 4.6 Perfiles de la fosa de socavación para instantes finales del ensayo.	32
Figura 4.7 Fotografía lateral (a), frontal (b) y posterior (c) de la fosa de socavación. Sedimento utilizado (d).	33
Figura 4.8 Curvas de socavación máxima versus tiempo para los planos x-z $\theta=-30^\circ, 0^\circ$ y 30°	34
Figura 4.9 Perfil longitudinal en plano x-z $\theta= 0^\circ$	35

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La socavación local en ríos es el proceso mediante el cual ocurre la erosión del lecho en una región espacialmente acotada, generalmente alrededor de obstáculos naturales o estructuras artificiales, como puentes o pilotes. Este fenómeno es causado por la acción del flujo de agua, que puede tener una velocidad y fuerza suficientes para desplazar y transportar partículas del lecho del río. La socavación local puede tener graves consecuencias para la integridad estructural y la estabilidad de los pilares o estribos de los puentes.

Por lo anterior, este fenómeno ha sido ampliamente estudiado para régimen subcrítico, lo que ha permitido desarrollar guías para el diseño de puentes, como la HEC-18 en los EE. UU y Nueva Zelanda, DWA-M529 en Alemania y el Manual de carreteras del Ministerio de Obras Públicas en Chile. Sin embargo, para régimen supercrítico o torrente, no se ha estudiado tan extensivamente por lo que existe incertidumbre a la hora de estimar la socavación local máxima en distintos casos.

Los flujos supercríticos pueden llegar a ocurrir en calles urbanas inundadas, pasos de peces, tsunamis, canales costeros y ríos de montaña. La ocurrencia de flujos supercríticos en los ríos se define por altas pendientes longitudinales ($>1\%$) y/o ondas de crecidas rápidas (Link, 2019).

Un ejemplo de un flujo supercrítico que causó el colapso de un puente producto de la socavación local fue el provocado por el ciclón Gamède en el puente Rivière Saint Etienne, en la isla de La Reunión en el año 2007. Este puente, que conectaba una carretera con un tráfico de 65.000 vehículos diarios, al colapsar modificó la ruta del transporte terrestre produciendo grandes pérdidas económicas. Es por esto que el estudio de la socavación local en régimen supercrítico es fundamental para el diseño seguro.

1.2 Objetivo general

Medir la socavación alrededor de un cilindro en régimen supercrítico en laboratorio.

1.3 Objetivos específicos

- 1) Diseñar una instalación experimental que permita medir socavación alrededor de un obstáculo en régimen supercrítico
- 2) Construir y probar la instalación experimental
- 3) Medir la evolución de la socavación alrededor de un obstáculo en régimen supercrítico

1.4 Metodología de trabajo

En primera instancia se realizó una revisión bibliográfica para poder entender el problema, los avances que se han logrado hasta el momento e identificar los vacíos de conocimiento. Se realizaron mantenciones a las instalaciones, equipos para la medición y se compraron los materiales necesarios para los ensayos (compuerta y sedimentos). Se construyó la compuerta y se llevaron a cabo numerosos ensayos preliminares para determinar las condiciones adecuadas de operación. Se planteó un caso de estudio y se realizaron mediciones tanto de la fosa de socavación como de la variación de la socavación máxima en el tiempo.

1.5 Principales resultados y conclusiones

Los principales resultados de esta memoria de título son generar un flujo supercrítico en laboratorio utilizando una compuerta, medir las curvas de socavación máxima en el tiempo y los perfiles de la fosa de socavación.

1.6 Organización de documento

El presente documento cuenta con cinco capítulos. En el primero se realiza la introducción al tema, la hipótesis y objetivos. El capítulo 2 consiste en el planteamiento del problema, la revisión bibliográfica de los estudios previos y entrega de conceptos importantes. En el capítulo 3 se describen las instalaciones, equipos y materiales utilizados, además de la metodología empleada en el ensayo. En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos, mientras que el capítulo 5 contiene las principales conclusiones obtenidas a partir de los resultados.

CAPITULO 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta la revisión bibliográfica, principalmente de investigaciones acerca de la interacción de los flujos con obstáculos y los diferentes análisis de socavación que se han realizado para régimen supercrítico.

2.2 Regímenes de flujo en ríos y canales

En los ríos y canales abiertos se pueden dar distintos regímenes de flujo, que dependerán de los efectos de la viscosidad del agua y de la gravedad sobre el flujo.

Por un lado, se tiene los efectos de la gravedad que se ven representados por el número de Froude (Flujo subcrítico o supercrítico), mientras que los efectos de la viscosidad en relación a la inercia pueden representarse con el número de Reynolds (Flujo laminar o turbulento).

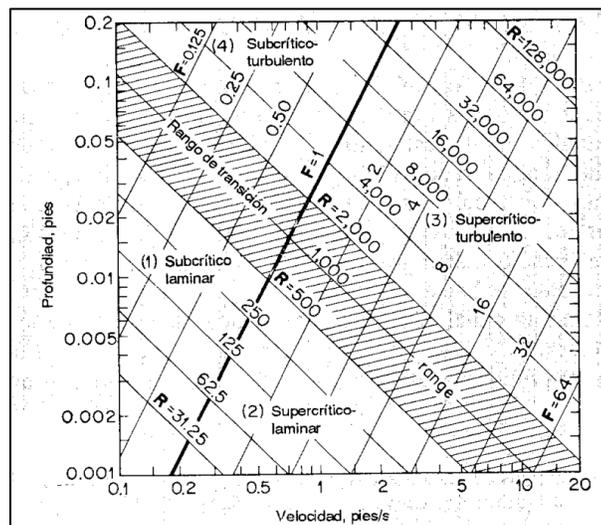


Figura 2.1 Relación profundidad velocidad para cuatro regímenes de flujo en canales abiertos (Chow, 1994).

2.3 Número de Froude, régimen supercrítico y subcrítico

El número de Froude (F) es un número adimensional utilizado en hidrodinámica para caracterizar el comportamiento de un flujo. Este se define como la relación entre la velocidad del flujo y la velocidad de propagación de las ondas en la superficie del agua. Para una sección rectangular se calcula como:

$$F = \frac{v}{\sqrt{g * h}}$$

donde v es la velocidad del flujo, g es la aceleración debida a la gravedad y h es la profundidad característica del flujo.

Si $F < 1$ se tiene un flujo en régimen subcrítico, mientras que si $F > 1$ se tiene un flujo en régimen supercrítico. Para $F = 1$ es un flujo crítico.

2.4 Interacción entre flujo supercrítico y un obstáculo

Si se tiene un obstáculo en un flujo con régimen supercrítico, aguas arriba del obstáculo se podrán observar dos estructuras de flujo principales: un resalto hidráulico en la región cercana a la superficie libre y un vórtice de herradura en la región cercana al fondo. La figura 2.2 muestra la hidrodinámica de un flujo subcrítico alrededor de un cilindro.

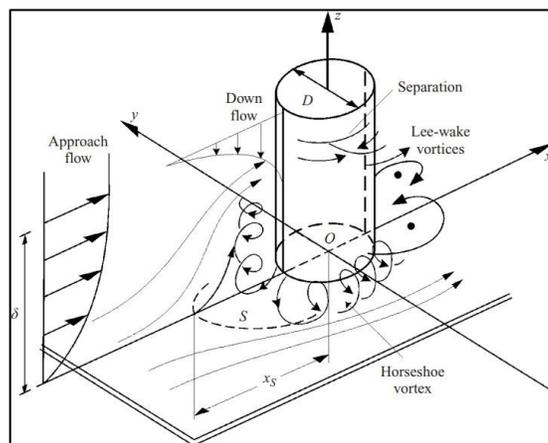


Figura 2.2 Estructuras características del flujo subcrítico alrededor de un cilindro (Roulund, 2005).

A medida que el flujo entrante se acerca al obstáculo, el gradiente de presión adverso entre el flujo aguas arriba y el flujo en el obstáculo conduce a una separación de la capa límite en la región cercana al fondo. En consecuencia, se observa una estructura de vórtice de herradura en la punta del obstáculo en su lado aguas arriba (Riviere, 2010).

Por otro lado, los resaltos hidráulicos son transiciones repentinas de régimen supercrítico a regímenes subcríticos en flujos en canales abiertos. Este fenómeno se caracteriza por su alta complejidad, con grandes fluctuaciones turbulentas, arrastre de aire intenso y disipación de energía significativa, (Macián, 2020)

Mignot y Riviere (2010) caracterizaron la interacción entre el flujo supercrítico y un obstáculo de sección rectangular, encontrando que los parámetros que afectan las estructuras de flujo son el número de Froude (F) y la relación entre la profundidad del flujo y el ancho del obstáculo (h/D). Para números de Reynolds altos (régimen turbulento), la longitud de despegue del resalto hidráulico excede a la del vórtice en herradura; este tipo de flujo se denomina "breaking type". Por el contrario, para números de Reynolds más bajos (régimen laminar), la longitud de desprendimiento del vórtice en herradura supera a la del resalto hidráulico, y el tipo de flujo se denomina "separation type".

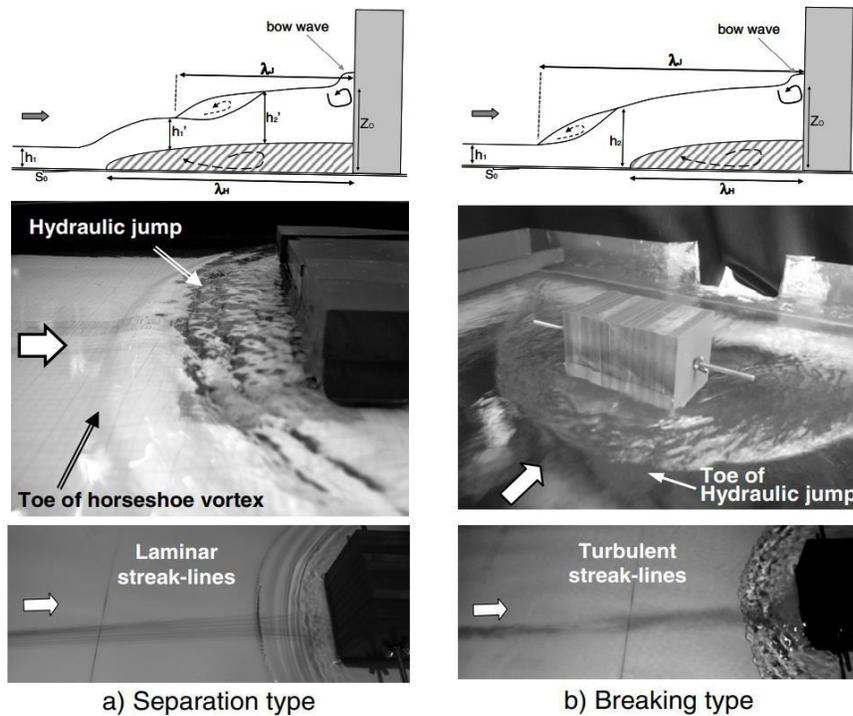


Figura 2.3 De arriba a abajo: esquema (vistas laterales), fotografía y fotografía aerodinámica cercana al lecho de un flujo tipo separación (a) y un flujo tipo ruptura (b).

Riviere et al. (2017) detallaron que un flujo de canal abierto supercrítico puede sortear un obstáculo emergente identificando dos patrones de flujo distintos: detached hydraulic jump y el wall-jet-like bow wave. Ellos describieron estos dos tipos de patrones de flujo, y además evaluaron las condiciones para las cuales se produce cada uno de estos, los cuales dependen del número de Froude aguas arriba y de la relación entre la profundidad del flujo y el ancho del obstáculo.

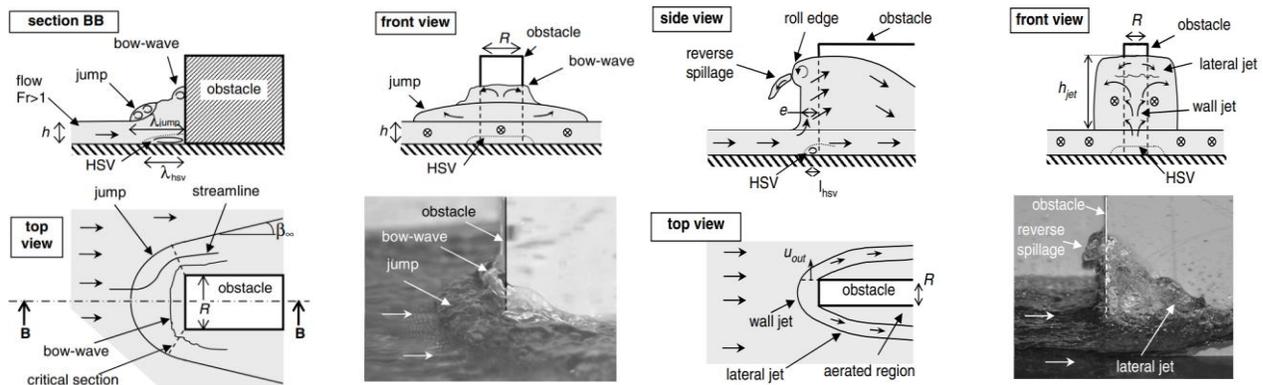


Figura 2.4 Patrones de flujo aguas arriba de una cimentación emergente rectangular en flujo supercrítico: (izquierda) Detached Hydraulic Jump y (derecha) Wall Jet Pattern (Riviere et al. 2017).

En la figura 2.5 se tiene los ensayos realizados para poder caracterizar la aparición de los patrones de flujo mencionados anteriormente. Estos ensayos fueron realizados en dos instalaciones diferentes, para distintos números de Froude y razones entre altura de flujo y diámetro del obstáculo. La curva que separa estos dos patrones de flujo corresponde a la ecuación $h/R > 2/(C * F^2)$, donde $C = 1.1$.

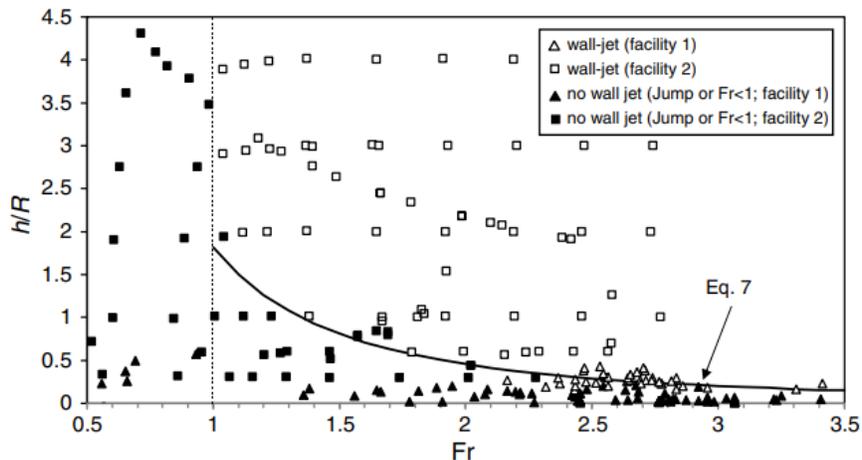


Figura 2.5 Patrones de flujo clasificados en función de (F, h/R) (Riviere et al. 2017).

2.5 Velocidad crítica, condiciones de agua clara y lecho vivo

La velocidad crítica es la velocidad mínima que debe tener un flujo de agua para comenzar a transportar partículas de sedimento en el lecho de un río, canal o cuerpo de agua. Esta depende de varios factores, como por ejemplo el tamaño y la forma de las partículas de sedimento, la densidad y viscosidad del agua, y la pendiente del lecho del canal. Algunos métodos para estimar la velocidad crítica asociada a un sedimento son los propuestos por Hjulström (1935), Shields (1936) o Kramer (1935).

Cuando la relación entre la velocidad crítica y la velocidad media del flujo $v/v_c < 1$ se tiene condiciones de agua clara (Clear water conditions). Si $v/v_c > 1$, se tienen condiciones de lecho vivo (Live bed conditions). La figura 2.6 muestra la variación de la profundidad de socavación local con respecto a la razón v/v_c . Se puede observar que para sedimentos uniformes la socavación será máxima en el punto $v/v_c = 1$, denominado “threshold peak”.

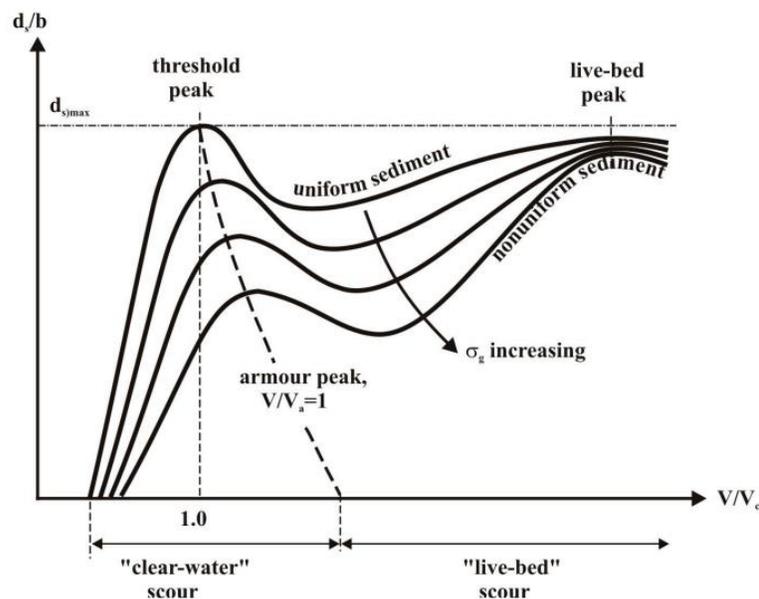


Figura 2.6 Variación de la profundidad de socavación local con la intensidad del flujo (Melville, 2008).

Mignot et al. (2016) analizaron la socavación producida alrededor de un obstáculo de sección rectangular en régimen supercrítico para condiciones de agua clara. El flujo supercrítico fue generado con una pendiente de 6.7%. Así pudieron detallar cómo la socavación se inicia en los lados del obstáculo y migra hacia su cara aguas arriba donde la profundidad de la socavación continúa

aumentando con el tiempo. Esto hace que el resalto hidráulico se desplace aguas abajo, acercándose al obstáculo con un efecto insignificante en la topografía del lecho.

Por otra parte, Roux et al. (2022) analizaron la máxima profundidad de socavación para ambos patrones de flujo (Wall jet like bow wave y Detached hydraulic jump) en condiciones de lecho vivo. Los ensayos se realizaron en un canal con una pendiente fija de 1.7 % y que contaba con un silo que permitía el suministro continuo de sedimento desde aguas arriba del canal. Los resultados hallados arrojaron que no había diferencias importantes en la profundidad máxima de socavación entre estos dos tipos de patrones de flujo y que además las profundidades de socavación medidas fueron de magnitud comparable y siguieron tendencias similares con parámetros de control como en los flujos subcríticos. Finalmente concluyeron que las fórmulas de socavación para pilares en flujo subcrítico logran una buena precisión en la predicción de la profundidad máxima de socavación en pilares en flujos supercríticos.

2.6 Régimen supercrítico en laboratorio (compuerta y energía específica)

En los estudios mencionados anteriormente, se lograba tener régimen supercrítico en laboratorio debido a que los canales en los cuales se llevaron a cabo los ensayos poseían pendientes lo suficientemente altas para que con las capacidades de las bombas disponibles se pudiera producir este tipo de régimen.

De forma alternativa también se puede lograr un flujo en régimen supercrítico en laboratorio haciendo uso de una compuerta. La función de la compuerta es actuar como un obstructor del flujo, lo cual bajo ciertas condiciones impondrá régimen subcrítico aguas arriba de esta y régimen supercrítico aguas abajo.

Para la figura 2.7 si se asume que no hay pérdida de energía producida por la compuerta ni por el roce contra el fondo, a partir de la ecuación de continuidad o conservación de masa se tiene que:

$$\frac{Q}{B} = q = v_1 * y_1 = v_2 * y_2 \quad (1)$$

donde, Q es el caudal, B el ancho del río o canal, q caudal específico, v es velocidad del flujo e y la profundidad del flujo. Luego, por conservación de la energía específica se tiene que:

$$\frac{q^2}{2gy_1^2} + y_1 = \frac{q^2}{2gy_2^2} + y_2 \quad (2)$$

$$y_2 = \frac{2y_1}{-1 + \sqrt{1 + \frac{8gy_1^3}{q^2}}} \quad (3)$$

De esta forma conociendo la altura aguas arriba de la compuerta se puede estimar la altura aguas abajo.

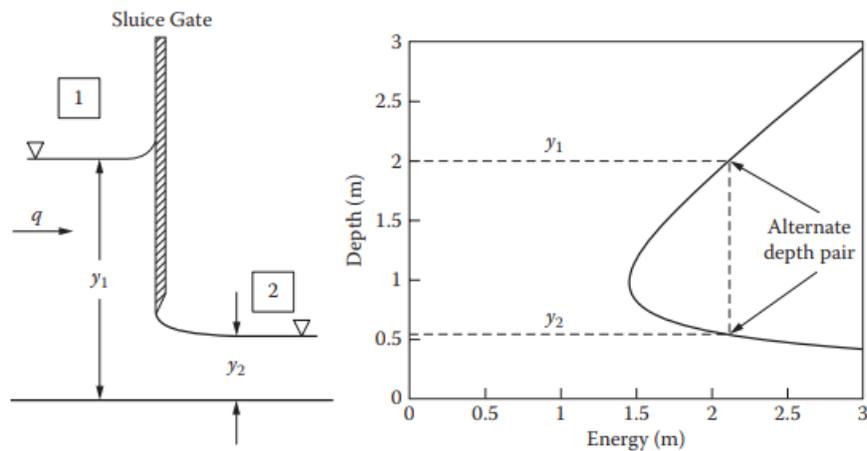


Figura 2.7 Compuerta y sus respectivas profundidades alternas (Moglen, 2015).

2.7 Conclusiones

Como conclusión se tiene que el fenómeno de socavación local en régimen supercrítico ha sido estudiado en mayor extensión recientemente, lo que ha permitido identificar dos patrones de flujo que describen cómo un flujo en régimen supercrítico puede sortear un obstáculo emergente y las condiciones que determinan la aparición de una forma u otra. Sin embargo, persisten incógnitas en torno a la hidrodinámica de este complejo proceso. Asimismo, se identifica un área para la innovación en las técnicas de medición empleadas en laboratorio para el estudio de la socavación local en régimen supercrítico.

CAPITULO 3 MATERIALES Y METODOS

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta las especificaciones de la instalación en las que se desarrollaron los ensayos, así como el procedimiento y las técnicas de medición para la fosa de socavación.

3.2 Instalación experimental y sedimento

Los experimentos tuvieron lugar en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Concepción (UdeC, Concepción, Chile), en un canal de sección rectangular sin pendiente de 26 m de largo, 1.5 m de ancho y profundidad de 0.74 m. 20 m aguas abajo de la entrada del canal se encuentra montado un cilindro de plexiglás con un diámetro $D = 0.15$ m en medio de un nicho de sedimentos de una longitud de 2 m, un ancho de 1.4 m y una profundidad de 0.3 m. Aguas arriba del cilindro se construyó la compuerta que permitió generar el régimen supercrítico. La figura 3.1 muestra un esquema de la instalación experimental.

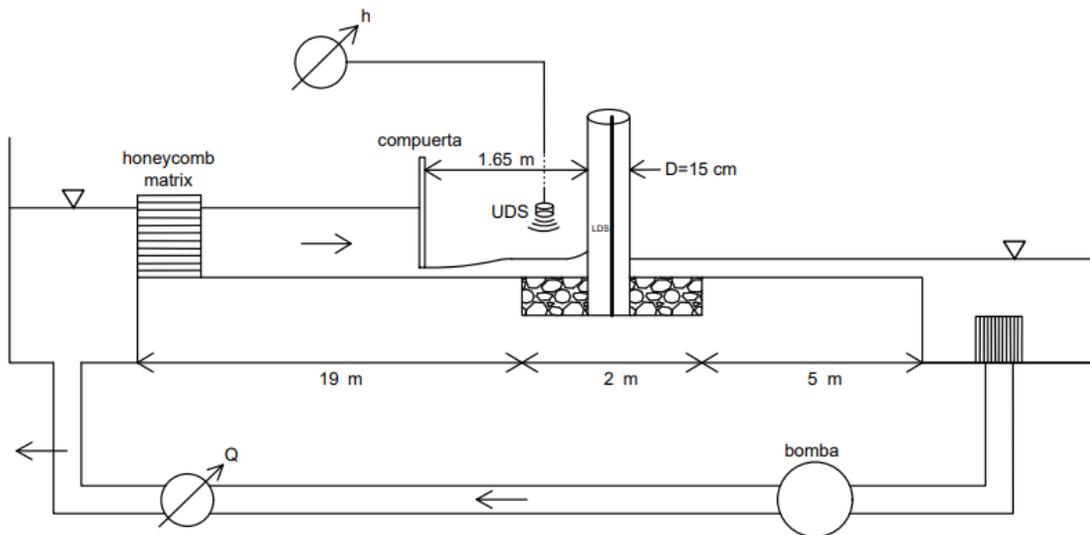


Figura 3.1 Esquema de la instalación experimental.

Para el diseño de la compuerta se tuvo en consideración la ubicación de esta respecto al cilindro y el lecho de sedimentos, así como la apertura desde del fondo. En primer lugar, se ubicó la compuerta a varios metros de distancia del lecho de sedimentos. Allí se pudo observar que, si bien se producía régimen supercrítico, debido a las pérdidas de energía provocadas por el roce con el fondo y las

paredes el flujo llegaba a la zona de estudio en régimen subcrítico. En caso contrario se tenía que la compuerta no podía quedar tan cerca del lecho de sedimentos, para que el flujo supercrítico pudiera desarrollarse y que no golpeará directamente el lecho de sedimentos.

Otro factor que afecta la velocidad y altura del flujo es la apertura de la compuerta. Esta fue determinada por ensayo y error, eligiendo la apertura que mejor se adaptaba al caso de estudio.

Para seleccionar el sedimento con el diámetro necesario para el ensayo se utilizó como una primera aproximación el diagrama de Hjulström que representa gráficamente las velocidades críticas de erosión, transporte y depositación de diferentes tamaños de partículas de sedimentos en función de la velocidad del agua. Así permite evaluar si un flujo de agua específico tiene suficiente energía para erosionar, transportar o depositar partículas de sedimento de un tamaño dado. Esto fue verificado posteriormente en un ensayo preliminar mediante inspección visual donde se fue aumentando el caudal paulatinamente hasta encontrar la velocidad crítica del sedimento basándose en el criterio de Kramer, donde se halló que el diagrama de Hjulström entrega una buena aproximación.

3.3 Control de descarga y profundidad de flujo

El canal descrito anteriormente cuenta con un sistema de recirculación, el cual consiste de una bomba con una capacidad máxima de bombeo de 95 l/s y un sistema de válvulas que permite el almacenamiento, recirculación o desagüe del agua del sistema. El caudal entregado por la bomba es medido por un flujómetro instalado en el circuito, con una precisión $\pm 1\%$. La bomba puede ser operada manualmente o controlado a través de un PLC entregándole el hidrograma deseado.

Para el caso de estudio, la operación de la bomba fue realizada de manera manual, incrementando el caudal de paulatinamente para que el agua se empiece acumular aguas arriba de la compuerta y que el resalto hidráulico vaya siendo desplazado aguas abajo hasta rebasar la ubicación del cilindro, para luego mantener un caudal constante $Q = 69 \text{ l/s}$.

La altura del flujo h aguas abajo de la compuerta fue medida mediante un sensor de distancia ultrasónico (Ultrasonic distance sensor, UDS) con una precisión de $\pm 0.1 \text{ mm}$. Como el ancho canal b es conocido la velocidad del flujo se calculó como $u = Q/(bh)$. La figura 3.2 muestra fotos de la

zona de estudio, donde se puede apreciar la posición del sensor de distancia ultrasónico a 45 cm aguas arriba del cilindro y centrado transversalmente.



Figura 3.2 Zona de estudio vista lateral (izquierda) y frontal (derecha).

3.4 Técnicas de medición

La fosa de socavación alrededor del cilindro fue medida con un sensor de distancia laser (Laser distance sensor, LDS) con una exactitud de ± 0.40 mm y una frecuencia de muestreo de 70 Hz. El láser se encuentra con 50° de inclinación con respecto a la horizontal de modo que la refracción del cilindro no afecte las mediciones como lo describen Link et al. (2013). El láser de medición es controlado a través de dos motores paso a paso. El primer motor controla el movimiento vertical con una precisión de $\pm 1/50$ mm, mientras que el segundo controla el movimiento en la dirección azimutal con una precisión de $\pm 1/100^\circ$. Link et al. 2019 describen que la aplicación de LDS está restringida a condiciones cercanas al agua clara y con baja turbidez.

Las mediciones fueron realizadas en la cara aguas arribas del cilindro y en los ángulos $\theta = -30^\circ$, 0° y 30° en el plano azimutal como se puede apreciar en la figura 3.3, creando así tres perfiles. Además, verticalmente se midió cada 2 mm y el tiempo entre ciclos fue el menor posible de acuerdo a la capacidad de los motores.

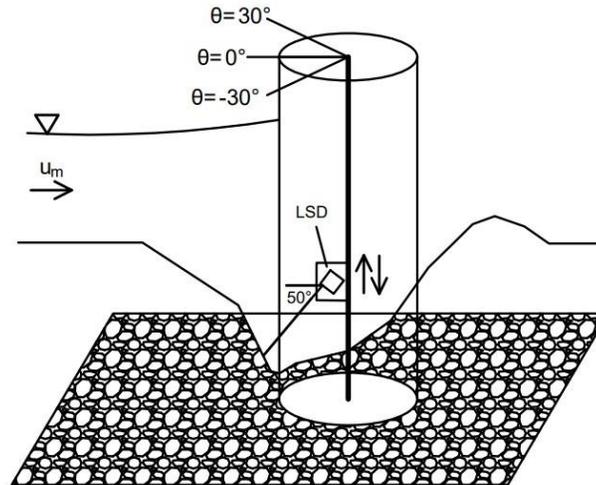


Figura 3.3 Esquema del cilindro y ángulos de medición.

3.5 Procesamiento de serie experimental

Las distancias medidas por el láser (LSD) son registradas y transmitidas a un computador a través de un dispositivo DAQ multifunción de National instruments. Los datos recogidos son entregados en formato bloc de nota, donde cada archivo corresponde a un ciclo de barrido del láser. La tabla 3.1 muestra un ejemplo del formato de los datos.

Dentro las series de datos se encontrarán mediciones erróneas. Debido a la turbulencia del flujo, las oscilaciones y desplazamiento del sedimento o el ángulo en el cual rebota el láser el instrumento no es capaz de medir correctamente arrojando valores negativos. Estos datos fueron eliminados de las series, y rellenados mediante el promedio de las mediciones contiguas en el caso de que éstas existan.

Tabla 3.1 Formato de datos medidos por el láser

Z (cm)	x (mm)	°	t (s)
0	2.75	-30	294.11
0.2	0.86	-30	294.11
-0.5	5.32	-30	294.11
-1	7.96	-30	294.11
-1.5	-12.28	-30	294.11
0	-4.12	0	312.52
0.2	-6.23	0	312.52
-0.5	-11.93	0	312.52
0	2.46	30	324.69
0.2	0.42	30	324.69
-0.5	4.49	30	324.69
-1	7.52	30	324.69
-1.5	-12.18	30	324.69

Luego, se utilizó una curva de calibración para asegurar la exactitud de los datos medidos por el láser y la realidad. Esta curva se elaboró realizando una medición de control con el láser en varios puntos y luego midiendo manualmente la distancia real en los mismos puntos, obteniendo la ecuación de la figura 3.4 $y = 0.9604x + 4.7789$ con un R^2 de 0.99, donde x corresponde a la medición del láser e y a la medición calibrada.

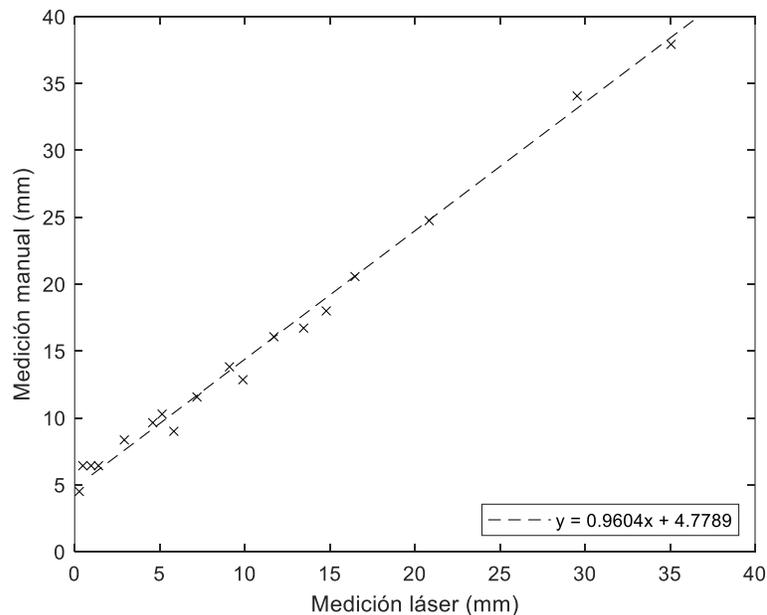


Figura 3.4 Curva de calibración

Todas las operaciones relacionadas con los datos fueron realizadas con un script hecho en Matlab para luego graficar cada una de las curvas y perfiles de socavación que se encuentran en la sección de resultados.

3.6 Conclusiones

Se presentó la instalación experimental, junto con las consideraciones para el diseño de la compuerta. Se detallaron los instrumentos encargados de realizar las mediciones de caudal y altura del flujo, así como su precisión. También se proporcionaron detalles sobre el criterio utilizado para seleccionar el sedimento y las técnicas de medición empleadas para la fosa de socavación. Finalmente, se explica el procesamiento de la serie experimental.

CAPITULO 4 RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se entregarán los principales resultados obtenidos. Se describe el diseño y la construcción de la compuerta, junto con las propiedades del sedimento. Luego, se detalla el caso de estudio, incluido el patrón de flujo logrado. Finalmente se presentan los perfiles de socavación y las curvas de socavación en el tiempo.

4.2 Diseño y construcción de la instalación experimental

Las dimensiones de la compuerta son 0.9 m de alto y 1.5 m de largo. Fue asegurada al canal mediante perfiles ángulo de aluminio y tarugos. Además, se utilizó silicona para sellar cualquier imperfección entre la compuerta y la pared del canal que permitiera la infiltración de agua.

La compuerta se encuentra ubicada a 1.65 m del cilindro de plexiglás, donde se observó que el flujo llega en régimen supercrítico a la zona de estudio y que además el resalto hidráulico se ubica aguas abajo de esta.

Se pudo observar a través de los diversos ensayos que una apertura de compuerta de 30 mm no era capaz de producir régimen supercrítico aguas debajo de la compuerta, mientras que para una apertura de 15 mm se observó interferencia del fondo sobre el flujo. Debido a estas razones se decidió que la apertura que mejor aceleraba el flujo correspondía a 19 mm.

El material utilizado para la confección de la compuerta es madera terciada, de un espesor de 20 mm. Es un material fácil de maniobrar debido a que es liviano, fácil de modificar y que cumple con la función para la cual se necesita. Transversalmente se le instalaron dos refuerzos de madera, para que resista de mejor forma la presión hidrostática del agua cuando esta se empieza a acumular aguas arriba.



Figura 4.1 Fotografías de la compuerta tomadas desde aguas debajo del canal.

A partir de la posición y apertura de la compuerta, se obtuvo el rango de velocidades que se podían alcanzar variando el caudal. Se utilizó el diagrama de Hjulström para tener una aproximación del diámetro característico del sedimento. Así, el sedimento seleccionado corresponde a piedra ágata, un tipo de canto rodado que se puede encontrar en los ríos del valle central de Chile y que comúnmente es utilizada como piedra decorativa. Por el tamaño, forma y procedencia se asemeja proporcionalmente a los sedimentos que se podrían encontrar en ríos con régimen supercrítico. La curva granulométrica de la figura 4.2 se obtuvo promediando las mediciones del largo y ancho de 100 piedras.

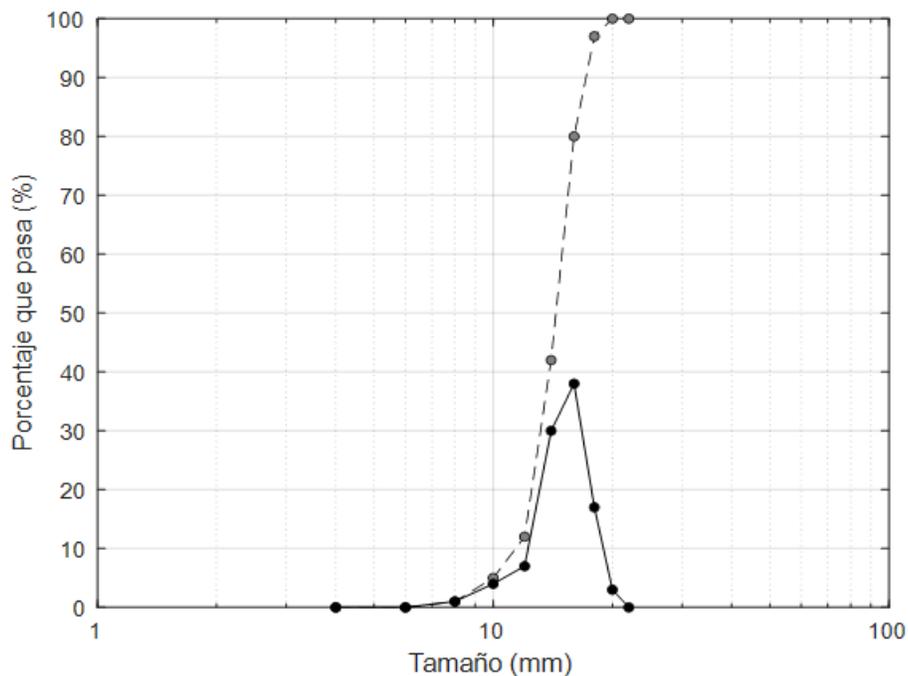


Figura 4.2 Curva granulométrica del sedimento.

Los diámetros característicos del sedimento d_{16} , d_{50} y d_{84} son 12.5 mm, 14.5 mm y 16.5 mm respectivamente. La desviación estándar del tamaño del sedimento $\sigma = (d_{84}/d_{16})^{1/2} = 1.15 < 1.4$ por lo que el sedimento es uniforme y no existe un efecto de acorazamiento del lecho. La clasificación del sedimento según la escala de Wentworth es grava media a gruesa.

Tabla 4.1 Propiedades del sedimento

Propiedad	Cantidad
Densidad ρ_s ($kg\ m^{-3}$)	2650
Diámetro característico d_{84} (mm)	12.5
Diámetro característico d_{50} (mm)	14.5
Diámetro característico d_{16} (mm)	19.6
Desviación estándar del tamaño de los sedimentos σ (-)	1.16
Velocidad crítica u_c ($m\ s^{-1}$) (Según Hjulström)	1.5

Una vez seleccionado el sedimento y bajo las condiciones descritas en la tabla 4.2 se llevó a cabo el ensayo del caso de estudio. Este tuvo en concreto una duración de 6 horas, con un caudal constante de 69 l/s, número de Froude de 1.76 y una razón $u/u_c = 0.764$.

Tabla 4.2 Resumen del ensayo

Duración (hr)	6
Caudal constante Q (l/s)	69
Altura del escurrimiento h (cm)	4.3
Velocidad media u_m ($m\ s^{-1}$)	1.146
Número de Froude	1.76
h/D	0.287
u/u_c	0.764

En la figura 4.3 se tiene la clasificación de los ensayos realizados por Roux et al. (2022) en triángulo, Jain and Fischer (1980) en diamante y el ensayo actual en cuadrado. La curva de la gráfica que separa los dos patrones $h/D = 3.33/F^4$ es la propuesta por Vouaillat et al. (2016) y el patrón de flujo observado corresponde al detached hydraulic jump (DHJ). Como $h/D = 0.278$ y $F = 1.76$ en este caso el ensayo se encuentra en la zona cercana a la transición entre ambos patrones de flujo.

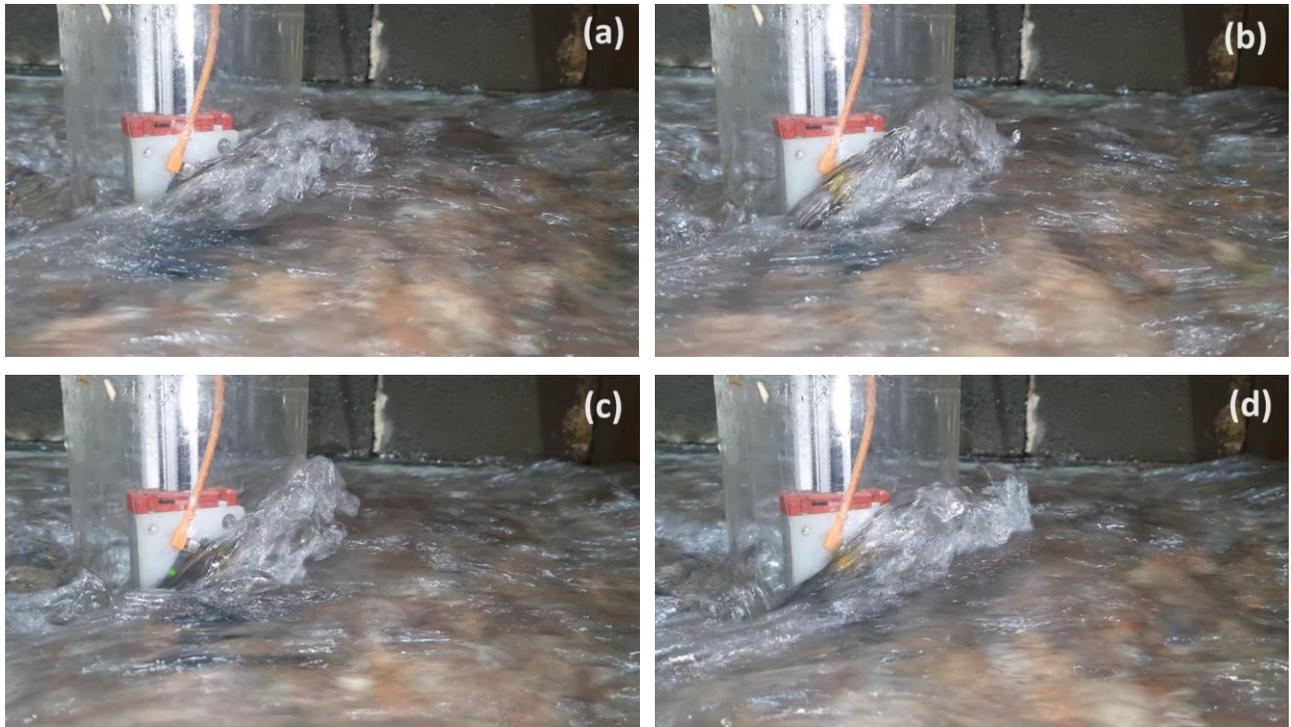


Figura 4.4 Secuencia cuadro por cuadro del derrame inverso.

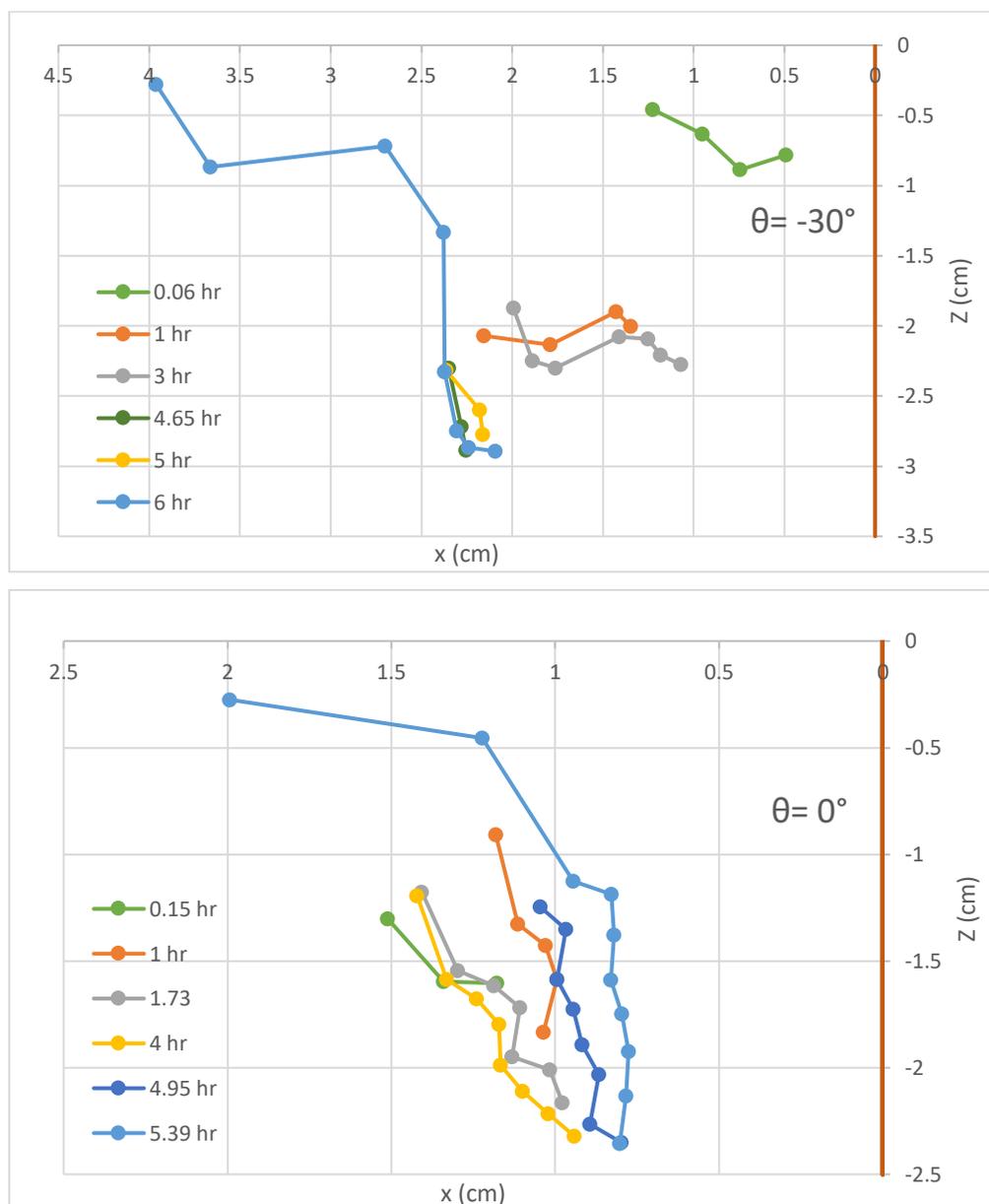
En la figura 4.5 se tiene a la izquierda la vista frontal aérea donde se puede apreciar el derrame inverso y de manera sutil se pueden ver como las líneas de corriente se ven afectadas por la presencia del obstáculo. La imagen de la derecha muestra una vista desde la parte posterior del cilindro donde se puede observar cómo se junta nuevamente el flujo una vez sorteado el obstáculo.



Figura 4.5 Vista frontal aérea (izquierda) y vista posterior (derecha).

4.3 Perfiles de socavación y curvas de socavación versus el tiempo

En la figura 4.6 se tienen la evolución de la fosa de socavación en distintos instantes de tiempo para los 3 planos x-z (a) $\theta = -30^\circ$, (b) $\theta = 0^\circ$ y (c) $\theta = 30^\circ$. En los tres gráficos el eje $x = 0$ cm representa la ubicación del cilindro. Se puede observar que para (a), (b) y (c) las líneas de los perfiles a veces se van cruzando. Esto se debe a que el sedimento en la fosa está en constante movimiento, oscilando, rotando y siendo finalmente arrastrado en todo momento, lo que refleja lo dinámico que es el proceso de socavación local.



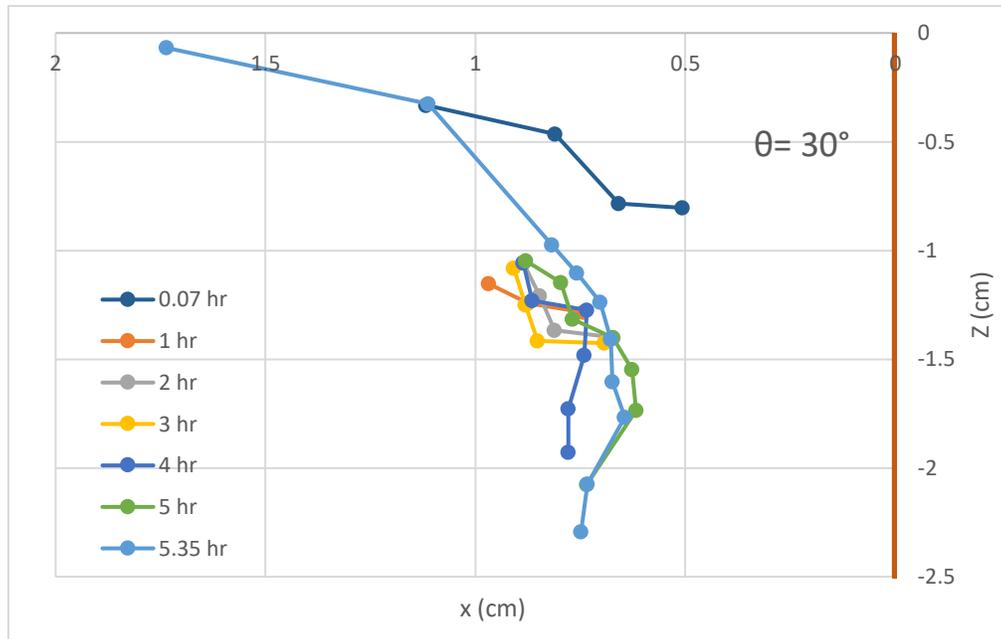


Figura 4.6 Perfiles de la fosa de socavación para instantes finales del ensayo.

En la figura 4.7 se tienen fotografías de la fosa de socavación desde (a) vista lateral, (b) vista frontal y (c) una vista posterior.

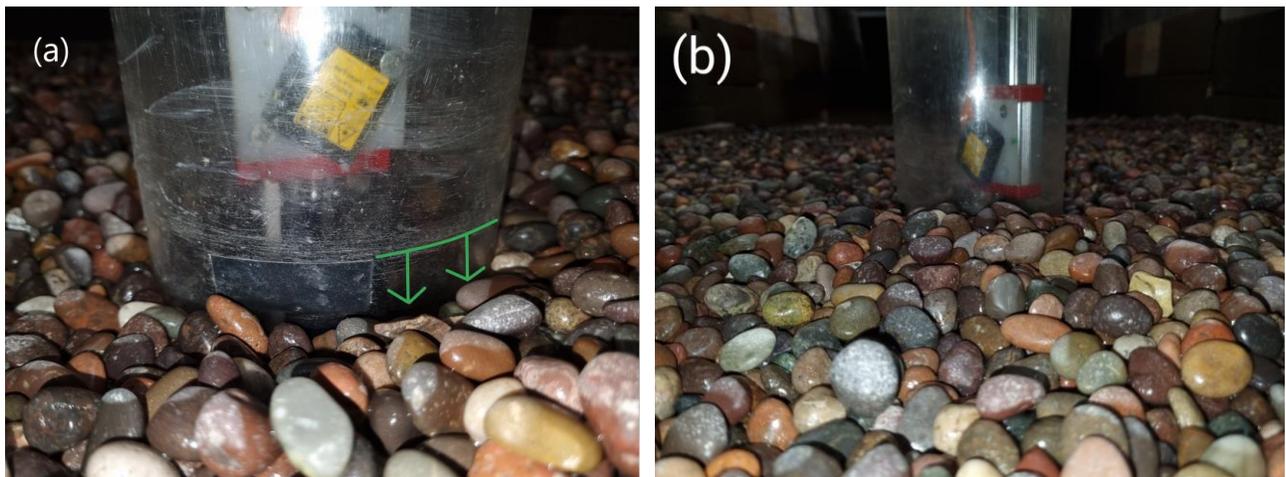




Figura 4.7 Fotografía lateral (a), frontal (b) y posterior (c) de la fosa de socavación. Sedimento utilizado (d).

En la figura 4.8 se pueden apreciar las curvas de socavación máxima versus el tiempo para los planos azimutal $\theta = -30^\circ$, 0° y 30° . Se tiene que para las gráficas (a), (b) y (c) en los instantes iniciales la fosa de socavación rápidamente se empieza a formar, para luego ir aumentando de forma paulatina hasta llegar a un equilibrio. Durante el ensayo se pudo observar que la socavación comienza a ocurrir primero en los costados del cilindro, para luego extenderse hacia la cara aguas arriba.

En el gráfico (a) para $\theta = -30^\circ$ se tiene que la curva tiene saltos discretos, que corresponden con las dimensiones del sedimento. Entre las 1.5 hr y 2 hr ocurrió un aumento y disminución de la socavación máxima. Esto pudo ocurrir porque si bien se tiene condiciones de aguas claras, esto no significa que una que otra partícula de sedimento no puedan ser arrastradas de forma esporádica e ingresar a la fosa de socavación. Luego la máxima profundidad de socavación obtenida es de $z_{max} = 2.89$ cm. Respecto al gráfico (b) que corresponde a $\theta = 0^\circ$ se tiene una curva que sigue una tendencia clara, pero que presenta un intervalo de un poco más de una hora donde no se tomaron correctamente las mediciones. A pesar de eso se tiene que la socavación máxima alcanzada al término del experimento es de $z_{max} = 2.35$ cm. En el gráfico (c) que corresponde a $\theta = 30^\circ$ se tiene que durante la mayoría del ensayo la socavación medida fue menos que en su contraparte $\theta = -30^\circ$, pero que finalmente llega a $z_{max} = 2.78$ cm el cual es casi idéntico.

De manera comparativa, si se utiliza la ecuación de Sheppard-Melville (Sheppard et al., 2014) para calcular la socavación máxima se tiene que un $z_{max} = 13.3$ cm, lo cual representa una sobreestimación con un error porcentual de 82.3 %.

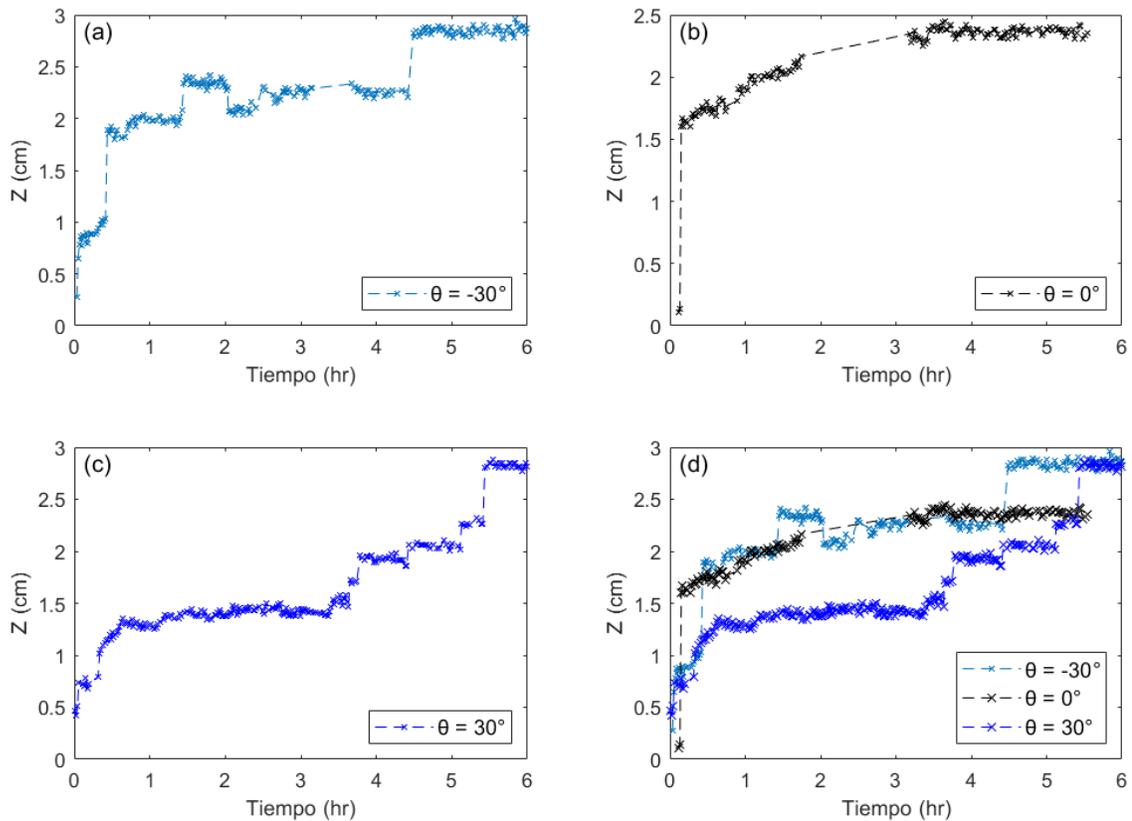


Figura 4.8 Curvas de socavación máxima versus tiempo para los planos x-z $\theta = -30^\circ$, 0° y 30° .

En la figura 4.9 se puede ver el perfil longitudinal del ensayo para el plano $\theta = 0^\circ$. Este se confeccionó en los instantes finales del ensayo utilizando el sensor de distancia UDS para medir la superficie libre del agua. Al finalizar el ensayo se procedió a drenar el agua del canal y medir la cota del lecho en los mismos puntos. Los puntos cercanos a la cepa, y que corresponden a la fosa de socavación fueron obtenidos a partir de las mediciones del láser. Se puede observar el aumento progresivo de la cota de agua a medida que se acerca al cilindro. En la cara frontal del cilindro se tiene una variación constante de la superficie libre producto del derrame inverso, por lo que la medición corresponde a un promedio de lo observado.

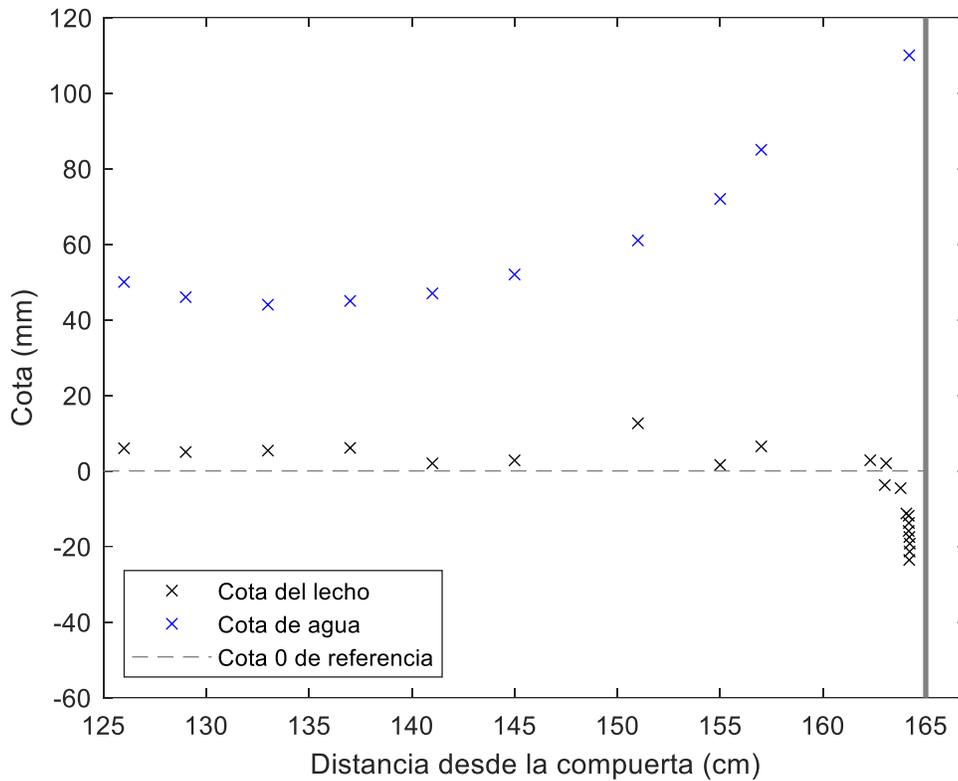


Figura 4.9 Perfil longitudinal en plano x-z $\theta=0^\circ$.

4.4 Conclusiones

En este capítulo se han presentado los resultados asociados a los objetivos planteados. La compuerta diseñada logró generar régimen supercrítico, obteniendo el patrón de flujo detached hydraulic jump. Se caracterizó además el derrame inverso, analizando la frecuencia de sus oscilaciones. Respecto a la medición de la fosa de socavación se tiene que el láser en general midió correctamente a excepción de los puntos en la parte superior de la fosa y en las proximidades del cilindro, donde no logró realizar las mediciones con precisión. Este podría atribuirse al ángulo de inclinación en el cual se encuentra ubicado el láser. Para futuros ensayos, se sugiere variar este ángulo con el objetivo de mejorar la cobertura y precisión de las mediciones.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES

Se realizó la mantención tanto del canal del laboratorio, como de todos los dispositivos utilizados para medir socavación alrededor de un cilindro de plexiglás de diámetro de 15 cm.

Se diseñó y fabricó una instalación experimental que permitió generar régimen supercrítico en un canal sin pendiente, utilizando una compuerta como obstructor de flujo. Se determinaron las dimensiones, posición longitudinal y apertura de esta, llegando a la conclusión que una distancia de 1.65 m del cilindro y una apertura de 19 mm es la configuración que mejor funciona para el caso de estudio.

Se probaron diversas combinaciones de altura inicial de agua y caudal que permitieran generar régimen supercrítico, logrando obtener el patrón de flujo de detached hydraulic jump y bajo ciertas condiciones, también se pudo observar el patrón wall jet like bow wave.

Se llevó a cabo un ensayo en condiciones de agua clara que tuvo una duración de 6 horas. El diámetro característico del sedimento fue $d_{50} = 14.5$ mm, con una razón entre la velocidad del flujo y la velocidad crítica del sedimento $u/u_c = 0.764$ y un número de Froude $F = 1.67$. El cociente entre el diámetro del obstáculo y la altura del flujo fue $h/D = 0.025$, lo cual corresponde al patrón de flujo detached hydraulic jump, lo cual coincide a lo observado durante el ensayo.

Además, se observó el derrame inverso, el cual tenía una frecuencia aproximada $f = 4$ Hz y un número de Strouhal $St = 0.523$. En la figura 2.4 Riviere et al. (2017) muestra que no hay derrame inverso en el caso del detached hydraulic jump. Pero Martínez (2023) si lo observó en las simulaciones numéricas realizadas en *OpenFoam*.

Se midió la geometría de la fosa de socavación en tres planos x-z ubicado en $\theta = -30^\circ, 0^\circ$ y 30° . Se graficaron los perfiles en distintos instantes de tiempo, pudiendo observar la dinámica que es evolución de la fosa de socavación.

Se midió la evolución temporal de z_{max} para los tres planos mencionados anteriormente, obteniendo así una socavación máxima $z_{max}= 2.89$ cm, 2.35 cm y 2.78 cm para $\theta= -30^\circ$, 0° y 30° respectivamente.

Finalmente se tiene que la ecuación de Sheppard-Melville no fue capaz predecir correctamente la socavación máxima para el caso de estudio, sobreestimando el valor con un error porcentual de 82.3%

REFERENCIAS

- Basile, Pedro A. (2018). Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales. 1ª Ed., Rosario: UNR Editora. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario. ISBN 978-987-702-257-5.
- CHOW, Ven Te. Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill, 1994
- Jain, S. C., & Fischer, E. E. (1980). Scour around bridge piers at high flow velocities. *Journal of the Hydraulics Division*, 106(11), 1827-1842.
- Link, O; Mignot, E; Roux, S; Camenen, B; Escauriaza, C; Chauchat, J; Brevis, W; Manfreda, S. (2019). Scour at Bridge Foundations in Supercritical Flows: An Analysis of Knowledge Gaps. *Water* 11, no. 8: 1656. <https://doi.org/10.3390/w11081656>.
- Link, O; García, M; Pizarro, A; Alcayaga, H; Palma, S. (2020). Local Scour and Sediment Deposition at Bridge Piers during Floods. *Journal of Hydraulic Engineering* 146, no. 3: 1. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001696](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001696).
- Macián, J; Bayón, A; Gargía, R; Lopez, P. A; Vallés, F. (2020). Characterization of Structural Properties in High Reynolds Hydraulic Jump Based on CFD and Physical Modeling Approaches. *Journal of Hydraulic Engineering*, Volume 146 Issue 12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001820](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001820).
- Martínez, B. (2023). Análisis del flujo alrededor de cepas de puente en escurrimiento supercrítico mediante simulaciones numéricas. Universidad de Concepción.
- Melville, Bruce W. (2008): The Physics of Local Scour at Bridge Piers. In: Sekiguchi, Hideo (Hg.): *Proceeding's 4th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-4)*. November 5-7, 2008, Tokyo, Japan. Tokyo: The Japanese Geotechnical Society. S. 28-40.
- Mignot, E; Rivière, N. (2010). Bow-wave-like hydraulic jump and horseshoe vortex around an obstacle in a supercritical open channel flow. *Phys. Fluids* 22, 117105. <https://doi.org/10.1063/1.3505013>.
- Moglen, E. (2015). *Fundamental of open channel flows*. Taylor & Francis Group.
- Nagel, T (2018). Numerical study of multi-scale flow-sediment-structure interactions using a multiphase approach. *Fluid mechanics [physics.class-ph]*. Université Grenoble Alpes. English. ffNNT : 2018GREAI050ff. fftel-01920495f.

- Riviere, N; Vouaillat, G; Launay, G; Mignot, E. (2017). Emerging Obstacles in Supercritical Open-Channel Flows: Detached Hydraulic Jump versus Wall-Jet-Like Bow Wave. *Journal of Hydraulic Engineering* 143, no. 7: 1. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001291](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001291).
- Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., & Michelsen, J. A. (2005). Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics*, 534, 351-401. <https://doi.org/10.1017/s0022112005004507>
- Roux, S; Link, O; Riviere, N; Mignot, E. (2022). Live-bed pier scour in supercritical open-channel flows. *Journal of Hydraulic Research* 60, no. 4: 675-685. <https://doi.org/10.1080/00221686.2022.2041499>.
- Sheppard, D., B. Melville, and H. Demir. (2014). "Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers." *J. Hydraul. Eng.* 140 (1): 14–23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-79000000800](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-79000000800)
- Vouaillat, G., Rivière, N., Launay, G., & Mignot, E. (2016). Supercritical flow around an emerged obstacle: hydraulic jump or wall-jet-like bow-wave? Proceedings of the 4th IAHR Europe congress, Liège, Belgium, 27-29 July.

ANEXOS

ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ODS-13 : Acción por el clima.
- ODS-14 : Vida Submarina.
- ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
<p>ODS-9. Industria, innovación e infraestructura: El estudio de la socavación local en régimen supercrítico contribuye a diseñar estructuras más resistentes y duraderas, promoviendo así el desarrollo sostenible de la infraestructura de los puentes. Además, El desarrollo de técnicas y tecnologías para prevenir o gestionar la socavación puede contribuir a soluciones innovadoras que se alinean con el ODS-9.</p> <p>Por último, reducir la vulnerabilidad de estas estructuras frente a eventos extremos fortalece la capacidad de las comunidades para resistir y recuperarse, promoviendo la resiliencia, un aspecto clave del desarrollo sostenible.</p>

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Benjamin Duran Astudillo
Título de la memoria : Medición de la socavación alrededor de un cilindro en escurrimiento supercrítico en laboratorio

Fecha de la presentación oral :

Profesor(es) Guía : Oscar Link Lazo, Maricarmen Guerra Paris
Profesor(es) Revisor(es) : Rodrigo Silva Muñoz
Concepto :
Calificación :

Resumen

Se diseñó y construyó una compuerta, que actúa como obstructor de flujo, permitiendo generar régimen supercrítico en un canal sin pendiente. Se determinaron las condiciones necesarias de apertura de compuerta, nivel de agua inicial del canal y caudal necesarios para generar el patrón de flujo detached hydraulic jump.

Se analizó un caso específico, donde la zona de estudio consta de un lecho de sedimentos con $d_{50} = 14.5$ mm y en el centro se encuentra un cilindro de plexiglás de 15 cm de diámetro. El ensayo se realizó en condiciones de aguas claras. Tuvo duración de 6 horas con un caudal constante $Q = 69$ l/s, la velocidad media $u = 1.15$ m/s, número de Froude $F = 1.76$, $u/u_c = 0.764$ y $h/D = 0.025$. El patrón de flujo obtenido corresponde al detached hydraulic jump y un número de Strouhal asociado al derrame inverso de $St = 0.026$.

Se midió la profundidad máxima de socavación en 3 planos x-y $\theta = -30^\circ, 0^\circ$ y 30° , además del perfil longitudinal del lecho y la superficie libre en $\theta = 0^\circ$ al término del ensayo. En los primeros instantes del ensayo se pudo observar cómo rápidamente se empezó a formar la fosa de socavación, inicialmente empezando por los lados del cilindro, para luego extenderse hacia la cara aguas arriba, hasta llegar al equilibrio. Se obtuvieron los perfiles transversales de la fosa de socavación y la curva de socavación máxima versus el tiempo. Los resultados de las mediciones muestran una socavación máxima final de $z_{max} = 2.89$ cm en $\theta = -30^\circ$, $z_{max} = 2.35$ en $\theta = 0^\circ$ y $z_{max} = 2.78$ en $\theta = 30^\circ$.

Finalmente se concluye que es posible generar régimen supercrítico en laboratorio haciendo uso de una compuerta para acelerar el flujo, pudiendo replicar el patrón de flujo detached hydraulic jump. Además, para el caso de estudio, se encontró que la ecuación de Sheppard no estima correctamente la socavación máxima de la fosa.