



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



## **SOCAVACIÓN PRODUCIDA POR TSUNAMIS ALREDEDOR DE EDIFICIOS**

POR

**Joaquín Alonso Sabat Arriagada**

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

Profesor Asociado  
Rafael Aránguiz

Agosto 2023  
Concepción (Chile)

© 2023 Joaquín Alonso Sabat Arriagada

© 2022 Joaquín Alonso Sabat Arriagada

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación fue financiada parcialmente por el proyecto FONDECYT N°1210496.

También agradecer al Dr. Oscar Link y al Dr. Rafael Aránguiz por su constante guía y colaboración, y al Sr. René Iribarren por su permanente ayuda durante el montaje del experimento.

## RESUMEN

Los Tsunamis se producen producto de una perturbación sobre el lecho marino, lo cual genera una serie de ondas gravitacionales que se transmiten en el océano, alcanzando altura y velocidad de un elevado poder destructivo. Sin embargo, el daño producto de la transmisión de fuerzas al impactar con una estructura, corresponde sólo a una fracción del daño total, y se ha desarrollado en extenso, modelos que permitan cuantificar el impacto de la socavación que pueden producir estos fenómenos. Sin embargo, no se ha establecido en detalle cómo es la socavación que producen.

Si bien los modelos de ola solitaria no alcanzan a replicar con precisión los efectos de un Tsunami, se usó un modelo de laboratorio de ola larga, generada por un programador lógico controlable, el cual permite replicar cualquier hidrograma deseado, modificando tanto el caudal como la abertura de la compuerta para controlar la profundidad de la columna de agua.

Se analizó un caso de estudio correspondiente a las costas de Valparaíso, considerando un periodo característico de las olas de la zona. Se consideró una estructura costera rectangular que recibe el impacto de lleno de la ola antes de su rompimiento, y se estudió la socavación producida durante la fase de crecida de la onda del Tsunami.

Los resultados muestran que la profundidad de socavación máxima se alcanzó antes de la mitad de la duración total de la crecida de la profundidad, y fue más de 3 veces superior a la profundidad socavación final obtenida hacia el fin de dicha crecida. Se establece un claro impacto pese a haber considerado un sedimento de carácter extremadamente conservador, corroborando la necesidad de invertir y desarrollar medidas de prevención ante estos eventos.

## **ABSTRACT**

Tsunamis occur due to a disturbance on the seafloor, generating a series of gravitational waves that propagate through the ocean, reaching significant height and speed with high destructive potential. However, the damage resulting from the transmission of forces upon impacting a structure represents only a fraction of the total damage. Extensive models have been developed to quantify the impact of erosion that these phenomena can induce. However, the detailed nature of the erosion produced has not been fully established.

While solitary wave models fail to accurately replicate the effects of a tsunami, a long-wave model generated by a programmable logic controller was employed. This model allows for the replication of any desired hydrograph, modifying both the flow rate and the gate aperture to control the depth of the water column.

A case study was analyzed along the coasts of Valparaíso, characterized by a typical period for the region. A rectangular coastal structure was considered, directly impacted by the wave before its breaking point, and the erosion during the flow surge of the tsunami was studied.

The results indicate that the maximum depth of erosion was reached before halfway through the total duration of the flow surge, and it was more than three times greater than the final depth of erosion obtained toward the end of the surge. A clear impact is established, despite considering an extremely conservative sediment, underscoring the imperative need to invest in and develop preventative measures against these events.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|  |    |
|--|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....                              | 1  |
| 1.1 Motivación.....  | 1  |
| 1.2 Objetivo general .....                                 | 1  |
| 1.3 Objetivos específicos .....                            | 2  |
| 1.4 Metodología de trabajo.....                            | 2  |
| 1.5 Principales resultados y conclusiones.....             | 2  |
| 1.6 Organización de la memoria.....                        | 3  |
| CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES TEÓRICOS .....                    | 4  |
| 2.1 Introducción.....                                      | 4  |
| 2.2 Hidrodinámica de un Tsunami .....                      | 4  |
| 2.3 Experimentos de laboratorio.....                       | 5  |
| 2.4 Socavación producto de movimientos de agua.....        | 6  |
| 2.5 Experimentos a escala; dificultades y beneficios ..... | 6  |
| 2.6 Tsunamis vs otros eventos de inundación .....          | 7  |
| 2.7 Conclusiones.....                                      | 7  |
| CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS .....                     | 8  |
| 3.1 Introducción.....                                      | 8  |
| 3.2 Definición del caso de estudio.....                    | 8  |
| 3.3 Instalación experimental.....                          | 10 |
| 3.4 Técnicas de medición .....                             | 10 |
| 3.5 Teoría de similitud.....                               | 12 |
| 3.6 Experimentación.....                                   | 16 |
| 3.7 Conclusión .....                                       | 16 |

---

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 4: RESULTADOS .....                    | 17 |
| 4.1    Parámetros obtenidos por el modelo ..... | 17 |
| 4.2    Socavación en el modelo .....            | 18 |
| 4.3    Conclusiones.....                        | 19 |
| CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....                   | 20 |
| REFERENCIAS .....                               | 21 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 Estimación de los parámetros del Tsunami vs la magnitud del sismo (Pelinovsky, 2005) | 4  |
| Figura 2.2 Montaje experimental en un canal rectangular (Moris et al, 2021)                     | 5  |
| Figura 2.3 Diagrama de altura y caudal sobre el tiempo para un Tsunami.                         | 7  |
| Figura 3.1 Curvas de altura, caudal y velocidad sobre el tiempo para el caso de estudio.        | 8  |
| Figura 3.2 Esquema de la instalación experimental   | 10 |
| Figura 3.3 Instalación de cámaras y sus respectivos ángulos de visión                           | 11 |
| Figura 3.4 Interfaz de usuario del software que controla el PLC                                 | 12 |
| Figura 3.5 Profundidad de socavación sobre intensidad de flujo (Ettmer et al, 2015).            | 14 |
| Figura 3.6 Adimensional de Shields para el caso de estudio y el modelo                          | 15 |
| Figura 3.7 Sistema para evitar la socavación previa al ensayo                                   | 16 |

**ÍNDICE DE TABLAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabla 3.1 Caracterización de los sedimentos para modelo y prototipo..... | 15 |
| Tabla 4.1 Resumen de los valores de interés obtenidos .....              | 19 |
| Tabla 4.2 De-escalado del modelo a la realidad.....                      | 19 |

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación

En el ámbito de los desastres naturales, los tsunamis representan un fenómeno de particular gravedad y relevancia. Estos eventos se definen como series de olas gravitacionales superficiales, principalmente generadas por movimientos sísmicos. Además de su origen sísmico, pueden producirse por deslizamientos submarinos, y por explosiones submarinas. Un aspecto esencial en la investigación de los tsunamis es el análisis de los mecanismos de falla estructural que desencadena su impacto. Estos mecanismos, que incluyen fuerzas hidrodinámicas e hidrostáticas, impactos por el flujo de depósitos, distribución de material inflamable e inflamación, y socavación (FEMA, 2012), están en el centro de nuestro entendimiento de cómo los tsunamis afectan las estructuras costeras. Este estudio se enfocará particularmente en la socavación, definida como la remoción o desplazamiento de suelo causado por el movimiento de fluidos, y su relevancia en la gestión del riesgo costero.

La razón fundamental para investigar los tsunamis reside en la gravedad de su amenaza para las poblaciones costeras en todo el mundo. El caso emblemático del Tsunami del Océano Índico de 2004, que resultó en una pérdida trágica de 350,000 vidas y daños estimados en 4.5 mil millones de dólares (Athukorala y Resosudarmo, 2005). Llevándolo al plano local, en Chile, país de carácter sísmico, el reciente tsunami de 2010 dejó 124 muertos (Fritz *et al.*, 2011) y pérdidas económicas del orden de los 30 mil millones de dólares (Khew *et al.*, 2015). Complementando lo anterior, se espera un crecimiento de la altura del nivel del mar (Kopp *et al.*, 2014) Por lo tanto, el estudio de la socavación producida por un tsunami alrededor de una estructura rectangular se presenta como un tema relevante para la comprensión y la gestión del riesgo costero.

### 1.2 Objetivo general

Caracterizar la socavación máxima producida por un Tsunami alrededor de una estructura durante la fase de crecida de la profundidad.

### **1.3 Objetivos específicos**

1. Diseñar un experimento de laboratorio.
2. Implementar técnicas de medición.
3. Caracterizar la socavación producida alrededor de la estructura.

### **1.4 Metodología de trabajo**

En el desarrollo de esta memoria se contempla una revisión del estado del arte de los elementos y ecuaciones gobernantes de un Tsunami y de la socavación alrededor de una estructura. Se define un caso de estudio, el cual es llevado a escala aplicando la teoría de similitud. Posteriormente se analizarán los resultados obtenidos para caracterizar la socavación.

### **1.5 Principales resultados y conclusiones**

Se logra materializar un modelo físico capaz de medir socavación con una precisión de 2.5mm, replicando un Tsunami que arrastra un caudal de hasta  $33\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Se obtuvieron curvas de altura, caudal, y velocidad tanto para el caso prototipo como para el modelo, y se llevaron a cabo ensayos que muestran que, incluso para un modelo de carácter conservador, se producen fosas de socavación de tamaño considerable, lo que reafirma la necesidad de seguir evaluando estos estudios, siendo capaces de generar una socavación de más de 2.5 veces el ancho de la cepa instalada dentro del canal. La socavación final es mucho menor a la máxima, debido a la depositación del sedimento en suspensión producto de la disminución de las velocidades del flujo hacia el fin de la crecida de la profundidad del Tsunami.

## **1.6 Organización de la memoria**

Se presentan cinco capítulos, el primero de ellos es introductorio donde se presenta la motivación del estudio de la socavación que puede producir un Tsunami, considerando el contexto nacional y antecedentes. El segundo capítulo se enfoca en los antecedentes teóricos requeridos para este trabajo, y presenta una revisión bibliográfica de las ecuaciones gobernantes tanto para la modelación física de un Tsunami, como un análisis general de los fenómenos involucrados, y experimentos previos relevantes. En el tercer capítulo se describe la metodología de trabajo, para la cual se presentan los criterios necesarios para realizar un escalado de las dimensiones reales al modelo, así como el caso prototipo que representa el problema, imponiendo condiciones de borde, y elaborando en los detalles de las instalaciones experimentales, así como de las técnicas y herramientas de medición. En el cuarto capítulo se analizan y describen los resultados obtenidos mediante la presentación de gráficos de caudal, altura, y velocidades del flujo obtenido, y cómo estos parámetros se comparan al modelo teórico deseado. En el quinto y último capítulo se presentan las principales, y se proponen futuras líneas de investigación.

## CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES TEÓRICOS

### 2.1 Introducción

Esta sección tiene como objetivo elaborar el marco teórico requerido, abarcando desde los fundamentos sobre un Tsunami, hasta experimentos previos que han cimentado las nociones que se tienen hoy en día respecto a los procesos involucrados en este fenómeno.

### 2.2 Hidrodinámica de un Tsunami

Un Tsunami está compuesto por una crecida de la ola, hasta que alcanza una velocidad nula en el mismo instante que alcanza su altura máxima, mientras que el otro ocurre en dirección inversa, durante la fase recesión de la profundidad, no necesariamente igual en su forma al hidrograma producido durante la fase de crecida. Como se estableció con anterioridad, existen distintos tipos de Tsunami: los generados por deslizamientos, los producidos por explosiones submarinas, y los generados por movimientos sísmicos. Es posible establecer correlaciones, por ejemplo, entre la magnitud de un sismo y los parámetros esenciales del Tsunami; su radio efectivo y su desplazamiento de agua (Pelinovsky, 2006), relación presentada en la figura 2.1.

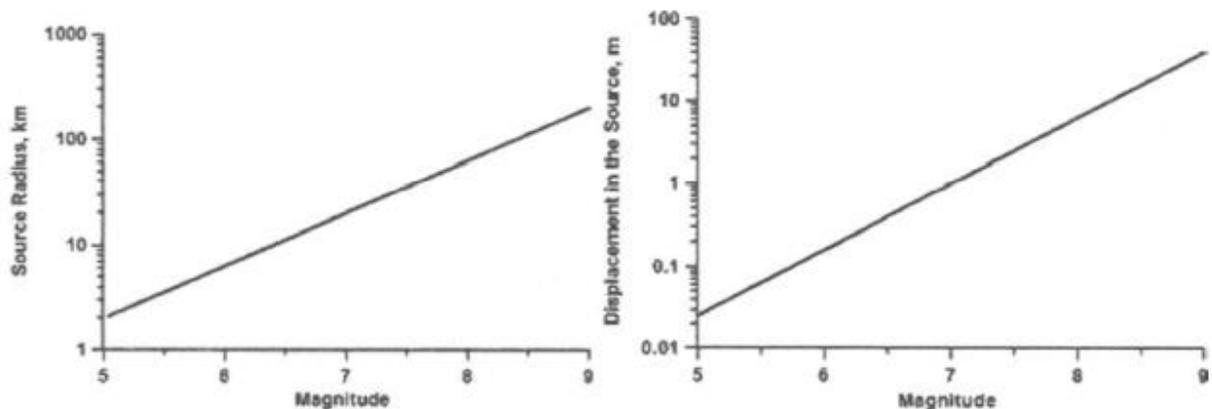


Figura 2.1 Estimación de los parámetros del Tsunami vs la magnitud del sismo (Pelinovsky, 2005)

Los tsunamis se caracterizan por ser olas largas. Se denomina ola larga a las perturbaciones en la superficie del agua que tienen una longitud de onda significativamente mayor a las ondas cortas. Se caracterizan por tener periodos, es decir, el tiempo que se demora de cresta a cresta de una ola a otra, más prolongados, y siendo capaces de abarcar distancias considerables.

### 2.3 Experimentos de laboratorio

Previamente, se ha utilizado la modelación de un Tsunami trabajando en canales rectangulares, con algunas limitaciones. La mayoría de los experimentos que dan lugar a las fórmulas empíricas existentes, se basan en modelos de una ola única, a diferencia de casos reales, en donde se tienen múltiples olas, lo cual no es apropiado y puede derivar en errores de un orden de magnitud espacial y temporal (Madsen *et al.*, 2008).

Se ha experimentado previamente con la reducción de carga producto de un Tsunami en edificios, como muestra la figura 2.2, evaluando el efecto de una distribución de edificios rectangulares en los niveles de inundación, momento del flujo y en la velocidad máxima a través de la costa, obteniéndose que dichas propiedades hidrodinámicas presentan valores superiores a los que se tendrían sobre una superficie descubierta (Moris *et al.*, 2021).

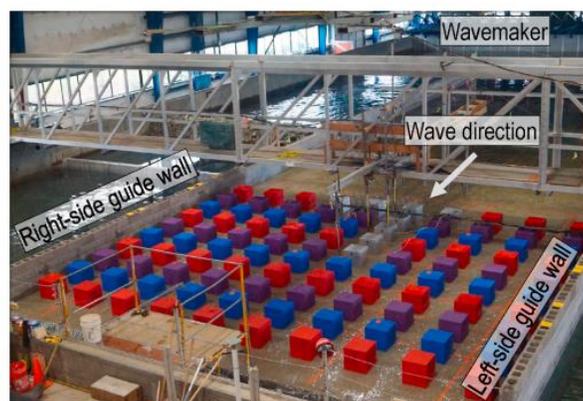


Figura 2.2 Montaje experimental en un canal rectangular (Moris et al, 2021)

## 2.4 Socavación producto de movimientos de agua

Se han realizado estudios sobre la socavación alrededor de los pilares de un puente, en los cuales se han propuesto fórmulas que permitan su estimación (Zanke *et al.*, 2011, Zanke, 1982, y Sumer *et al.*, 1992), sin embargo, el uso de estas fórmulas no es aplicable a un Tsunami, debido a la complejidad de las condiciones hidrodinámicas. Por otra parte, estudios acerca de la erosión costera, indican que la profundidad de socavación es menor que el valor de corriente constante y es causada por la acción repetida de las olas. (Sumer y Fredsoe, 2002).

Se ha establecido que la profundidad de socavación aumenta frente al cilindro tanto en condiciones subcríticas como supercríticas con un incremento en la profundidad y velocidad del flujo. La estela de vórtice es más fuerte en el flujo supercrítico que en el flujo subcrítico. La forma geométrica del cilindro emergente (rectangular vs cilíndrico) también afectaría la profundidad de erosión (Dissanayaka y Tanaka, 2023).

## 2.5 Experimentos a escala; dificultades y beneficios

Estudios de eventos anteriores, indican que la socavación producida por un Tsunami juega un papel mayor en las fallas estructurales. Las primeras investigaciones empíricas en torno a la socavación se basaron en experimentos de laboratorio con un cilindro, delgado y una ola singular, indican que la presión de poros resulta clave en el proceso (Yeh *et al.*, 2001; Tonkin *et al.*, 2003; Moronkeji *et al.*, 2007), dado que, durante la retirada del agua, el gradiente de presión vertical alrededor del cilindro disminuye la carga dentro de la tierra y ocurre licuación temporal del suelo, la cual depende de los áridos que compongan el suelo. Por ejemplo, la grava se ve afectada mayormente por velocidades de flujo muy altas, lo que se traduce en altos esfuerzos de corte, mientras que la arena experimenta una socavación rápida durante la retirada del agua, producto del gradiente de la presión de poros (Tonkin *et al.*, 2003). La socavación máxima podría ser hasta 5 veces mayor que la socavación final, debido a la continuidad del proceso durante varios minutos. (Yeh *et al.*, 2001).

## 2.6 Tsunamis vs otros eventos de inundación

Los Tsunamis, al igual que una crecida de un río, pueden expresarse como un flujo de agua sobre el tiempo, es decir, un hidrograma. Sin embargo, son fundamentalmente distintos, pues, a diferencia de un río, un Tsunami no alcanza su altura máxima en el instante que tiene su caudal máximo. La figura 2.4 muestra una representación gráfica del proceso durante la fase de inundación.

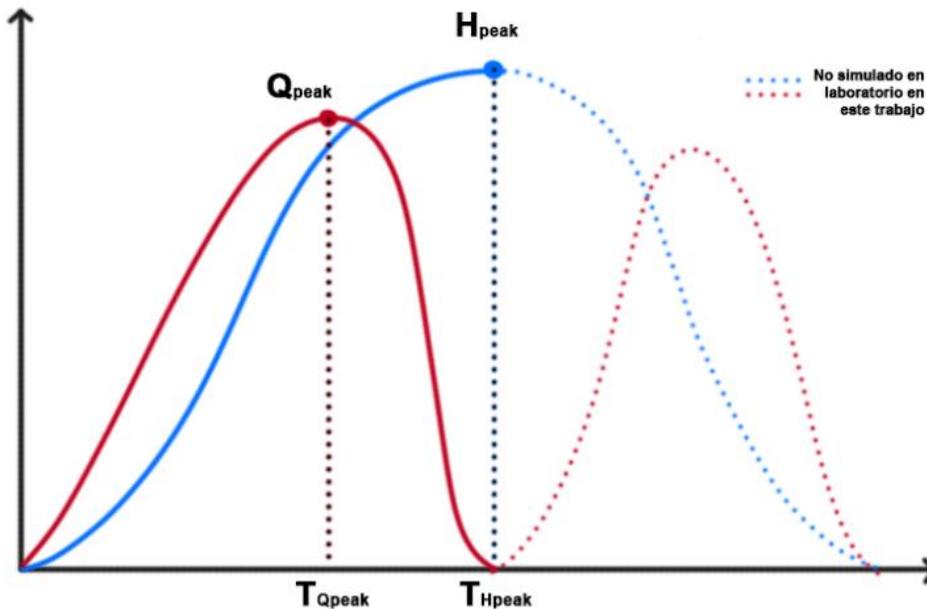


Figura 2.3 Diagrama de altura y caudal sobre el tiempo para un Tsunami.

## 2.7 Conclusiones

Se ha presentado una revisión actualizada del estado del arte tanto de los factores que diferencian un Tsunami de otros movimientos de agua, así como experimentos que estudian la socavación tanto en aguas abiertas como en canales cerrados a escala, con paredes hidráulicas que no se encontrarían en mar abierto.

## CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Introducción

Durante el desarrollo de este capítulo se discute, elabora y profundiza en cuál fue la metodología adoptada para alcanzar los objetivos, así como describir las instalaciones experimentales, técnicas de medición, y el proceso de escalado para materializar el caso prototipo en el canal basculante.

### 3.2 Definición del caso de estudio

El caso de estudio corresponde a un Tsunami típico en las costas de Valparaíso cuyo caudal máximo es de  $33\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , y posee una altura de 10m en su peak, con un periodo de 30min, y un sedimento de densidad de cuarzo,  $2.65\text{ ton}/\text{m}^3$  y un diámetro representativo de 8.2mm. Se presentan las curvas de altura, caudal y velocidad media de la ola para el caso de estudio en la figura 3.1 a continuación.

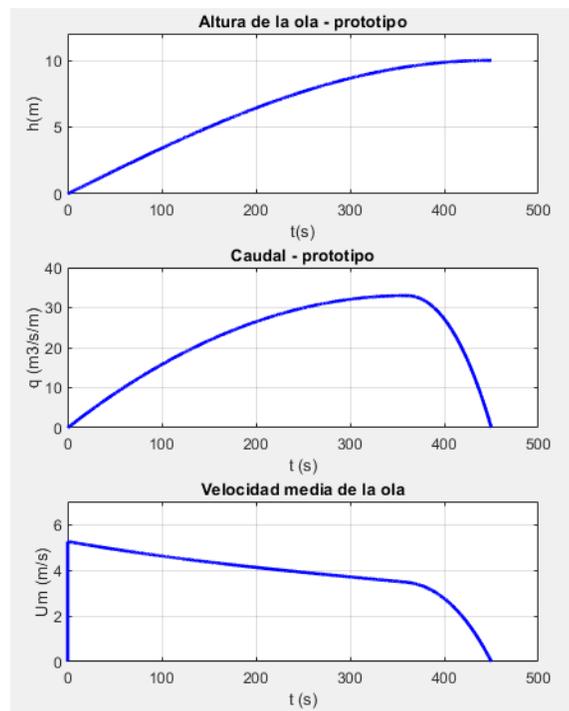


Figura 3.1 Curvas de altura, caudal y velocidad sobre el tiempo para el caso de estudio.

Para la determinación de los parámetros establecidos en la figura 3.1, se generaron escenarios estocásticos, y se llegó a las fórmulas a continuación, que permiten establecer el hidrograma asociado a un determinado evento y una curva de la altura de la columna de agua sobre el tiempo, con un caudal y una altura máximos establecidos, y un período que depende de la bahía en la que ocurre el fenómeno. Dicho hidrograma se divide en dos tramos, uno parabólico y otro cúbico, los cuales van desde el inicio del fenómeno hasta el caudal peak, y desde el caudal peak hasta que se alcanza la altura máxima respectivamente. Para efectos de simplicidad, se presentan algunas fórmulas como variables auxiliares.

$$a1 = -Q_{max}/(k^2 * T_m^2); \quad (3.1)$$

$$b1 = 2 * Q_{max}/(k * T_m); \quad (3.2)$$

$$a2 = (Q_{max}/T_m^3) * (1 - 2 * k)/(k^4 - 2 * k^3 + k^2); \quad (3.3)$$

$$b2 = ((3 * k^2 - 1)/(1 - 2 * k)) * T_m * a_2; \quad (3.4)$$

$$c2 = ((-3 * k^2 + 2 * k)/(1 - 2 * k)) * T_m^2 * a_2; \quad (3.5)$$

$$q1 = a_1 * t_1^2 + b_1 * t_1; \quad (3.6)$$

$$q2 = a_2 * t_2^3 + b_2 * t_2^2 + c_2 * t_2; \quad (3.7)$$

En donde  $Q_{max}$  corresponde al caudal máximo del Tsunami,  $T_m$  es el tiempo del periodo a simular, correspondiente a un cuarto del periodo del Tsunami, es decir, el instante en el que se alcanza la altura máxima,  $k=0.8$  es la fracción del periodo en la que ocurre el caudal máximo respecto a la altura máxima,  $t_1$  corresponde al intervalo temporal entre que comienza el evento hasta que se alcanza el caudal peak, y  $t_2$  abarca desde dicho punto hasta que se alcanza la altura peak.

La selección del diámetro corresponde a un modelo conservador, dado que se elige un sedimento de tamaño medio cercano a 4 veces el diámetro máximo de sedimento en el sector urbano de la zona y una profundidad de 2.5 veces el diámetro de la estructura, que posee 3.5m de ancho. Bajo este estrato de sedimento, se encuentra un lecho rígido, incapaz de socavar, estableciendo un límite en la profundidad de socavación que se pudiese presentar.

### 3.3 Instalación experimental

Se utilizó un canal rectangular, de 6.0 m de largo, 0.4 m de ancho y 0.4 m de alto, con una estructura rectangular de acrílico transparente, de 4cm de ancho montado en el medio de un lecho de sedimento de 0.6 m de largo y 10.5cm de profundidad, ubicado 4 m aguas abajo de la entrada del canal. El agua es bombeada al canal alcanzando un caudal máximo de hasta 17 l/s, dicha bomba siendo controlada por un programador lógico controlable (PLC), y, además, se cuenta con una bomba para la recirculación de sedimentos, con una capacidad de hasta 8 l/s, que permite el suministro de sedimento. Un esquema del montaje experimental puede verse en la figura 3.2.

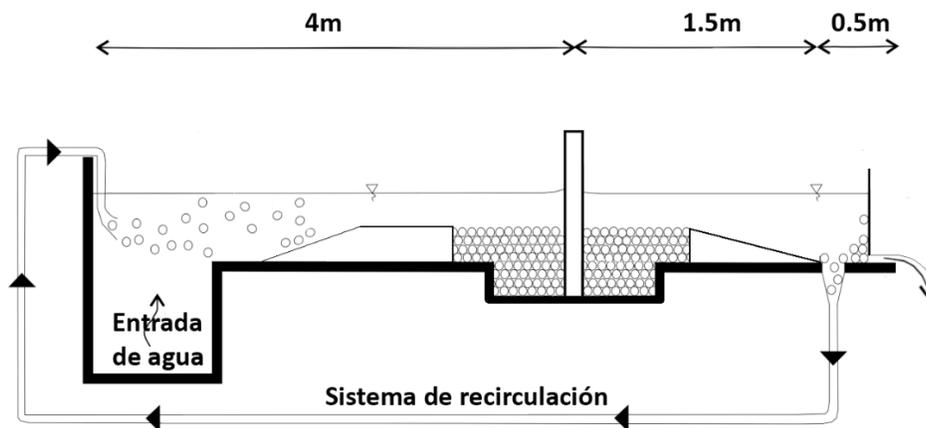


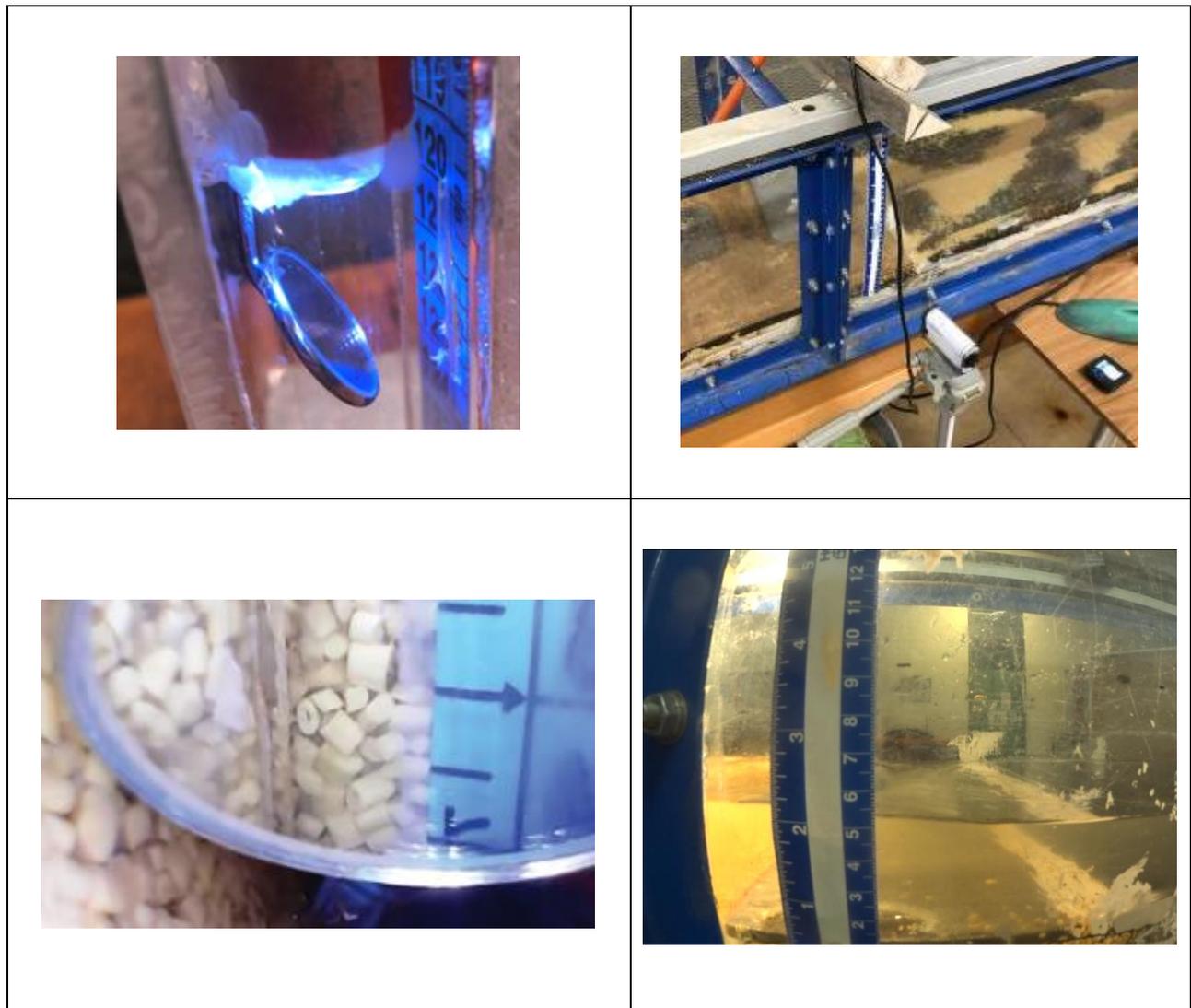
Figura 3.2 Esquema de la instalación experimental

Al final del canal, se encuentra una compuerta, cuya apertura también es regulada mediante el PLC, con una precisión de 2mm. La compuerta regula la profundidad de la columna de agua dentro del canal.

### 3.4 Técnicas de medición

La socavación fue monitoreada con una cámara de video tipo snake, de 1.5 mm de diámetro, la cual se introdujo por dentro de la estructura y registró de forma continua la posición del lecho sobre una graduación ubicada en la parte frontal de la cepa mediante un espejo instalado frente a la cámara, midiendo la socavación con una precisión de 0.5 mm. La resolución de la cámara fue de 640x480

pixeles, y las imágenes fueron captadas a una frecuencia de 30Hz. Por otra parte, la altura de la columna de agua fue medida mediante una segunda cámara, instalada en el exterior del canal, registrando con una frecuencia de 50Hz y una resolución de 13.5Mp. La instalación de las cámaras y sus respectivos ángulos de visión, puede verse en la figura 3.3.



**Figura 3.3** Instalación de cámaras y sus respectivos ángulos de visión

Para medir el caudal, se utilizó un flujómetro ultrasónico marca VETO, el cual consta de una frecuencia de hasta 5000Hz, y un error del 0.5% del caudal. Para controlar su flujo sobre el tiempo se utilizó un PLC, el cual se maneja mediante un software que permite registrar datos de frecuencia de la bomba, caudal, tiempo, temperatura, y abertura de la compuerta con una frecuencia de hasta 100Hz. El PLC permite que se le asigne un hidrograma de entrada en el cual se especifica un caudal de entrada

y una altura de la compuerta para cada instante temporal. Mediante una conversión de frecuencia de la bomba a caudal, esta se ajusta iterativamente sobre el tiempo, aumentando su frecuencia si el caudal registrado es menor que el deseado, o disminuyéndola en caso contrario. Estos parámetros se controlan mediante un software cuya interfaz del sistema está adjunta en la figura 3.4.



Figura 3.4 Interfaz de usuario del software que controla el PLC

### 3.5 Teoría de similitud

La similitud en experimentos hidráulicos se basa principalmente en la similitud de Froude. El número de Froude es un parámetro adimensional que representa la razón entre las fuerzas inerciales y másicas de un fluido. Está definido como:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gH}} \tag{3.8}$$

En donde  $u$  representa la velocidad media del flujo,  $g$  la aceleración de gravedad, y  $H$  la altura de la columna de agua. Este parámetro se utiliza para caracterizar un flujo de agua como supercrítico, y

subcrítico, dependiendo si el número de Froude es superior o inferior a 1, respectivamente. En el caso del régimen subcrítico, las fuerzas inerciales son sobrepasadas en importancia por las gravitacionales; en el flujo se tienen velocidades y pendientes bajas, pero las profundidades de la lámina del agua, por el contrario, son mayores que las que se presentan en el flujo supercrítico. Para este tipo de flujo un aumento en la energía se traduce en un aumento en la profundidad de la lámina de agua.

Por otra parte, en régimen supercrítico, las fuerzas inerciales presentan una influencia mucho mayor que las fuerzas gravitacionales. Además de esto, el flujo se presenta a velocidades y pendientes altas, y a profundidades más pequeñas. Cuando existe un flujo de este tipo en un canal un aumento en la cantidad de energía provoca una disminución de la profundidad de la lámina de agua

$$Fr_m = Fr_p ; \frac{u_m}{\sqrt{gH_m}} = \frac{u_p}{\sqrt{gH_p}} \quad (3.9)$$

Lo cual permite establecer una relación de escala, basado en la razón

$$\frac{H_m}{H_p} = \lambda_v \quad (3.10)$$

Paralelamente, la razón de escalas de duración de los eventos está dadas por

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda_v} \quad (3.11)$$

En donde los subíndices m y p indican modelo y prototipo, respectivamente, H es la altura de la columna de agua, g la aceleración de gravedad, y u la velocidad media del flujo. Este no es el único ajuste que realizar en experimentos de socavación donde predominan efectos máxicos e inerciales, ya que es necesario establecer similitud del tipo de transporte del sedimento. Esto se logra equiparando el adimensional de Shields entre el modelo y el prototipo. Además, para alcanzar la similitud de la socavación, es necesario establecer una razón entre el adimensional de Shields para prototipo y modelo, es decir;

$$\frac{u_{cp}}{u_p} = \frac{u_{cm}}{u_m} \tag{3.12}$$

En donde la velocidad media del flujo está dada por la relación

$$u_m = \frac{Q}{bh} \tag{3.13}$$

En donde Q es el caudal, y b el ancho del canal. Paralelamente, la velocidad crítica del sedimento fue estimada según la fórmula propuesta por Zanke, 1977

$$u_c = 1.4 * \sqrt{\rho'gd_s} + 10.5v/d_s \tag{3.14}$$

En donde  $\rho'$  corresponde a la densidad relativa del sedimento, g la aceleración de gravedad, v la viscosidad cinemática del agua, y  $d_s$  el diámetro representativo del sedimento.

La similitud del transporte de sedimentos se alcanza cuando el adimensional de Shields en prototipo y modelo presenta valores dentro del mismo rango: mayor que el umbral para el inicio del transporte o menor que el umbral siguiente. Ettmer et al, 2015, establece los rangos para cada tipo de transporte de sedimentos, como muestra la Figura 3.5.

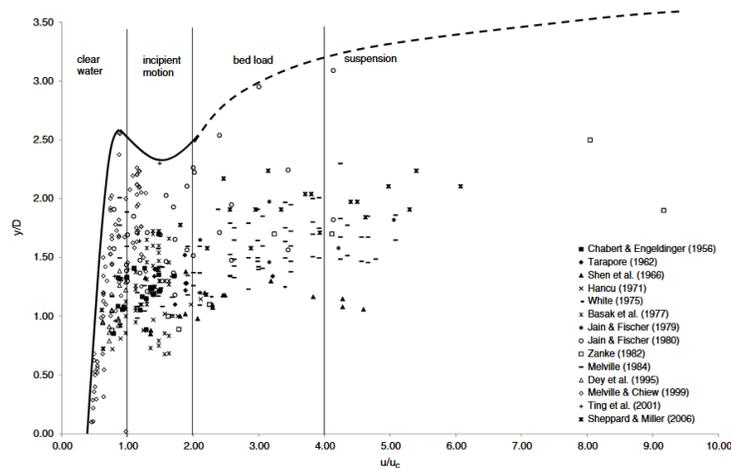


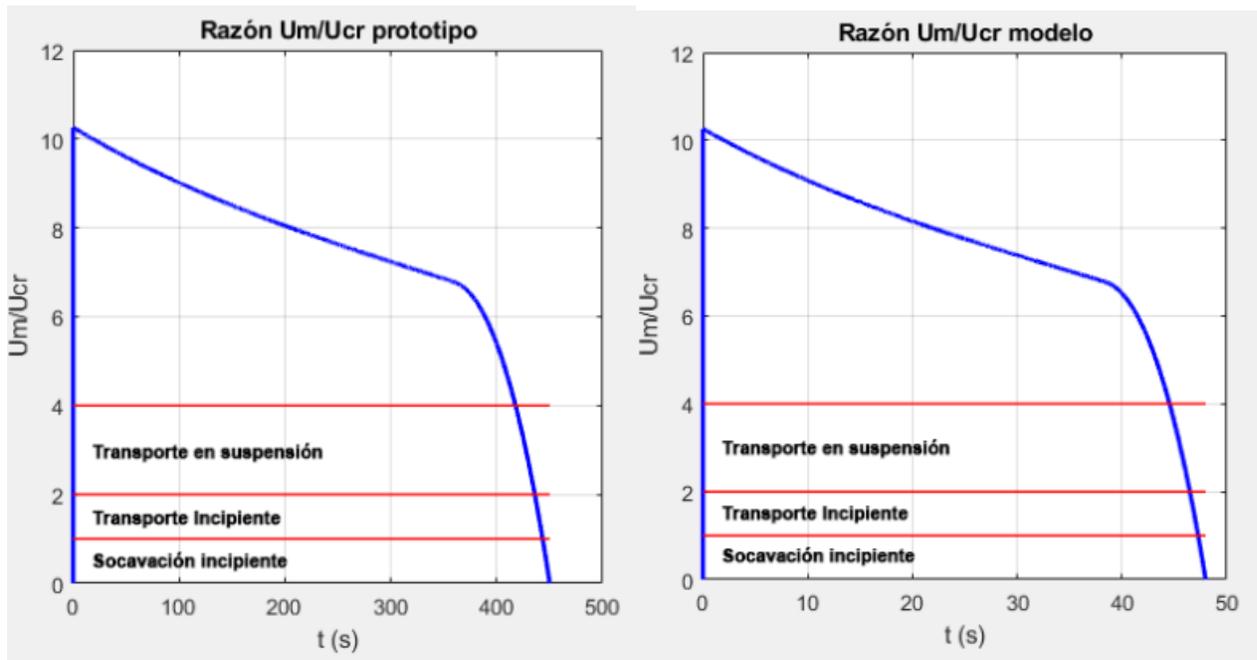
Figura 3.5 Profundidad de socavación sobre intensidad de flujo (Ettmer et al, 2015).

Tras aplicar la ecuación 3.8 considerando la capacidad máxima de la bomba y las condiciones del caso de estudio establecidas, se determinó  $\lambda=1:88$  y  $\lambda_t=1:9.38$ . Para alcanzar la similitud del sedimento, usando la ecuación 3.12, se varió el diámetro y densidad en función de los sedimentos disponibles, ante lo cual se determinó un sedimento de 2mm de diámetro y una densidad de  $1.058 \text{ t/m}^3$ . En la tabla 3.1 se tiene el contraste entre las condiciones de prototipo y modelo.

**Tabla 3.1 Caracterización de los sedimentos para modelo y prototipo**

| Ítem                           | Modelo | Prototipo |
|--------------------------------|--------|-----------|
| $\rho \text{ (t/m}^3\text{)}$  | 1.058  | 2.65      |
| $\rho' \text{ (t/m}^3\text{)}$ | 0.58   | 1.65      |
| d50 (m)                        | 0.002  | 0.0082    |

Así, para estas condiciones, se tiene una condición de similitud entre la razón de la velocidad media del flujo con la velocidad crítica del sedimento determinada por la formula 3.13. La figura 3.6 demuestra, de manera gráfica, la similitud exacta para ambos escenarios, en donde con las líneas rojas se muestran los umbrales superiores e inferiores de cada tipo de transporte de sedimento, los cuales provienen de la figura 3.5



**Figura 3.6 Adimensional de Shields para el caso de estudio y el modelo**

### 3.6 Experimentación

Pese a lo anterior, el modelo consta de algunas limitaciones. La más notoria, es el caudal mínimo requerido por el flujómetro para operar con precisión, establecido en 4L/s. Este grado de sensibilidad implica una modificación en la aproximación al problema. Para ello, se propuso trabajar con dicho caudal mínimo circulando dentro del sistema, para posteriormente incorporar el hidrograma deseado, con el lecho de sedimento recubierto por una tapa, como se ve en la figura 3.6, con el fin de evitar socavación local producto del caudal circulante. Dicha tapa es retirada en el momento que se ingrese el hidrograma.



Figura 3.7 Sistema para evitar la socavación previa al ensayo

### 3.7 Conclusión

Para un escalamiento apropiado del modelo, no basta solamente con escalar las variables hidrodinámicas de los fenómenos, sino que es fundamental y necesario encontrar similitud del transporte de sedimentos, la cual se logra llevando el modelo a razones de intensidad de flujo dentro del mismo umbral que el prototipo. Pese a que los modelos de onda singular escalados carezcan de precisión debido a las distorsiones inherentes del escalado, al llevar a cabo un modelo conservador, permite destacar la importancia del estudio de los fenómenos de socavación local, que para el ojo común pasan desapercibidos con respecto al impacto de la ola. La selección de un sedimento adecuado que no considere fuerzas de cohesión es fundamental para la escala replicable en las condiciones disponibles.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS

Durante esta sección se presentan los resultados que permiten caracterizar la socavación, además de el de-escalamiento de la socavación desde el modelo al caso de estudio.

### 4.1 Parámetros obtenidos por el modelo

En la figura 4.1 se presenta las variaciones de los parámetros considerados relevantes para el modelo sobre el tiempo; la altura de la ola, el adimensional de Shields, el caudal, y el número de Froude.

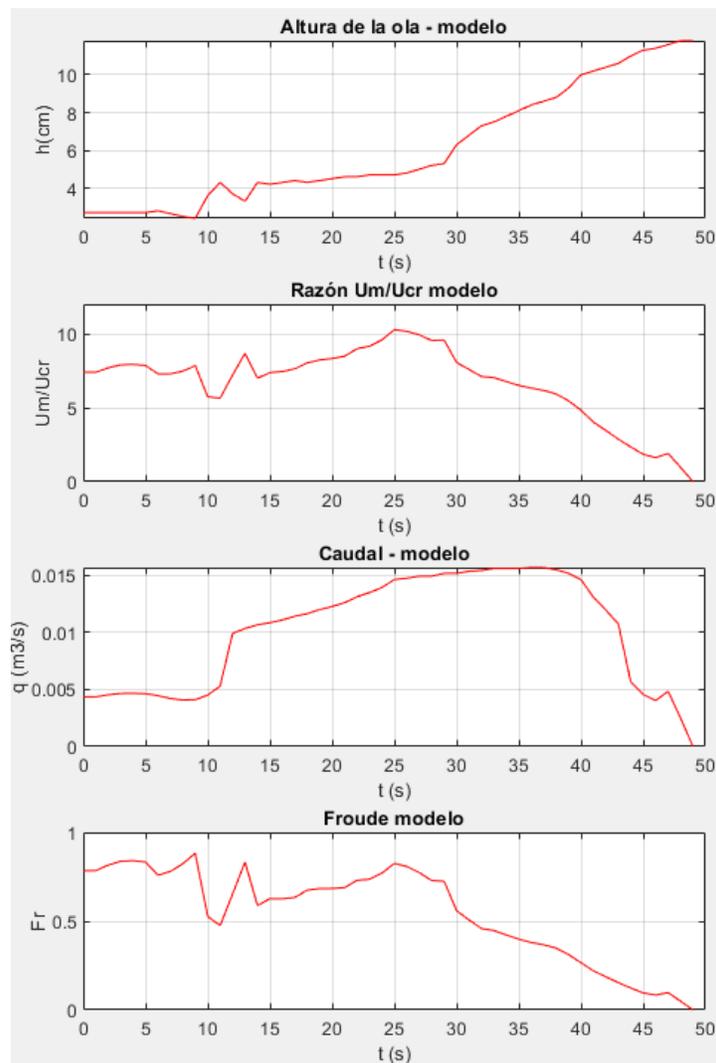


Figura 4.1 Variables que afectan la socavación en el modelo sobre el tiempo.

Se puede apreciar un flujo subcrítico durante todo el ensayo, mientras que el caso de estudio presenta un tramo supercrítico en el inicio del ensayo, debido a los bajos valores de profundidad de la columna de agua obtenidos de la aproximación numérica. Un análisis en profundidad del adimensional de Shields evidencia que se ajustó a lo deseado, estando en el mismo umbral de transporte de sedimentos durante 44 de los 48 segundos de duración del evento, es decir, presentando el mismo tipo de transporte al caso de estudio en ese tramo.

#### 4.2 Socavación en el modelo

La socavación producida a nivel local en la cepa se ve caracterizada en la figura 4.2, en conjunto a una curva de predicción basada en los datos experimentales.

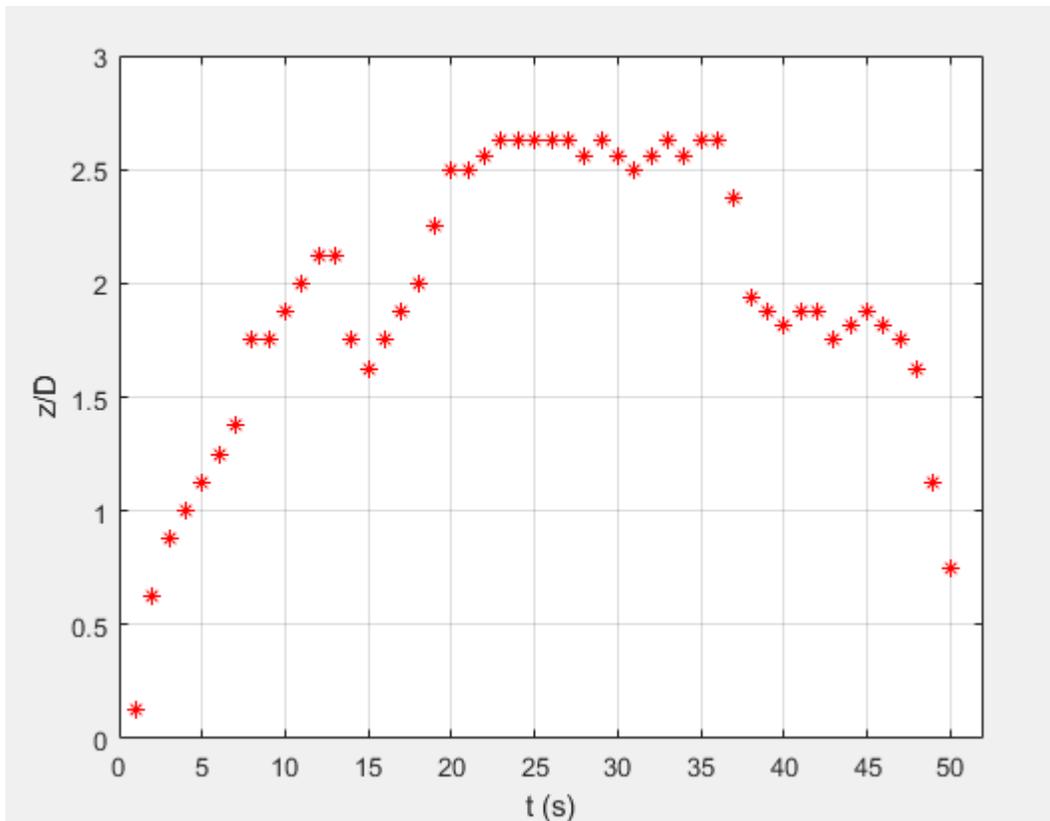


Figura 4.2 Socavación producida durante el ensayo

Se puede apreciar que la socavación máxima se alcanza al segundo 23 del evento en donde alcanza el límite de profundidad del canal, siendo la socavación final un 28.57% de la misma, encontrándose

flujo subcrítico en ese instante, con un caudal de 13.49L/s y una profundidad de la columna de agua de 3.3cm. En la tabla 4.1 se presentan los valores de caudal, altura de columna de agua, y número de Froude para los instantes de caudal máximo, altura máxima, socavación máxima y socavación final.

**Tabla 4.1 Resumen de los valores de interés obtenidos**

| t (s)            | Q (L/s) | h (cm) | z (cm) | Fr   |
|------------------|---------|--------|--------|------|
| t (Q máx) = 36   | 15.69   | 8.4    | 10.5   | 0.38 |
| t (h máx) = 48   | 0       | 11.8   | 6.5    | 0    |
| t (z final) = 50 | 0       | 11.8   | 3      | 0    |
| t (z máx) = 23   | 9.16    | 3.3    | 10.5   | 0.73 |

Con los resultados obtenidos del experimento, utilizando la escala obtenida en la sección 3.5, se llevan los parámetros esenciales del modelo a escala real, datos compilados en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2 De-escalado del modelo a la realidad**

| Ítem                        | Modelo | Escala real |
|-----------------------------|--------|-------------|
| Q máx (m <sup>3</sup> /s/m) | 0.039  | 32.38       |
| H máx (m)                   | 0.118  | 10.37       |
| z máx (m)                   | 0.105  | 9.23        |
| z final (m)                 | 0.03   | 2.64        |

### 4.3 Conclusiones

En este capítulo se han presentado los resultados de llevar el modelo deseado a la realidad. Se logra apreciar que, pese a las condiciones conservadoras que rodean el experimento, se presenta un grado de socavación considerable, de 2.63 veces el ancho de la estructura, y que alcanza una socavación máxima del 350% de la final, el equivalente a más de 9 metros de profundidad.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Se ha realizado una revisión en extenso del estado del arte de los experimentos de modelación de un Tsunami, estudiando tanto eventos de carga, como de socavación. Se diseñó un experimento en escala 1:88 en función de lograr similitud del transporte de sedimentos. Se estableció una técnica de medición no-intrusiva, capaz de medir la socavación durante todo el ensayo sin perturbar el flujo del agua. Se observa una socavación máxima equivalente a 3.5 veces la final durante la fase de crecida de la altura de la columna de agua, en un modelo que presenta similitud del transporte de sedimento durante casi el 90% de su duración al caso de estudio. Esto se da en un contexto en el existe un tope de socavación máxima, por lo que los efectos podrían ser aún mayores bajo condiciones distintas, especialmente considerando que esto ocurre exclusivamente durante la fase de inundación del evento, sin considerar la recesión de la ola.

En futuras investigaciones se propone estudiar el efecto de la duración del evento. Si bien se consideró un período característico de la zona de estudio, no es el único que presenta la bahía, por lo que se propone realizar estudios considerando un espectro más amplio de valores, tales como máximos o mínimos dependientes de temporada en una zona y evaluar la diferencia del comportamiento de la socavación.

**REFERENCIAS**

Berberović, E., Van Hinsberg, N. P., Jakirlić, S., & Tropea, C. (2009). Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution. *Physical Review E*, 79(3). <https://doi.org/10.1103/physreve.79.036306>

Fritz, H.M., Petroff, C.M., Catalán, P.A., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., Weiss, R., Barrientos, S.E., Meneses, G., Valderas-Bermejo, C., (2011). Field survey of the 27 february 2010 Chile tsunami. *Pure Appl. Geophys.* 168, 1989–2010.

Kopp, R.E., Horton, R.M., Little, C.M., Mitrovica, J.X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D., Strauss, B.H., Tebaldi, C., (2014). Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's future* 2, 383–406.

Pelinovsky E. (2006) *Hydrodynamics of Tsunami Waves*. In: Grue J., Trulsen K. (eds) *Waves in Geophysical Fluids*. CISM International Centre for Mechanical Sciences, vol 489. Springer, Vienna.

J. P. Moris, A. B. Kennedy, and J. J. Westerink. (2021). Tsunami wave run-up load reduction inside a building array, *Coastal Engineering*, 103910.

Sumer, B.M.; Fredsøe, J.; Christiansen, N.. (1992). Scour around vertical pile in waves. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 118, 15–31.

Sumer, B. y Fredsoe, Jorgen. (2002). *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. 10.1142/4942.

Zanke, U.C.E.; Hsu, T.W.; Roland, A.; Link, O., (2011); Diab, R. Equilibrium scour depths around piles in noncohesive sediments under currents and waves. *Coast. Eng.* 58, 986–991

Athukorala, P.c., Resosudarmo, B.P., (2005). The Indian Ocean Tsunami: Economic impact, disaster management, and lessons. *Asian Econ. Pap.* 4, 1–39.

Madsen, P. A., Fuhrman, D. R., and Schäffer, H. A. (2008). On the solitary wave paradigm for tsunamis, *J. Geophys. Res.*, 113, C12012, <http://doi.org/10.1029/2008JC004932>.

Tonkin, S., Yeh, H., Kato, F., Sato, S. (2003). Tsunami scour around a cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 496, 165-192. <http://doi.org/10.1017/S0022112003006402>

Moronkeji, A. (2007). Physical modelling of tsunami induced sediment transport and scour, in: *Proceedings of the 2007 Earthquake Engineering Symposium for Young researchers*, Seattle, Washington, USA, 8–12.

Yeh, H., Kato, F. & Sato, S. (2001). Tsunami scour mechanisms around a cylinder. In *Tsunami research at the end of a critical decade* (ed. G. T. Hebenstreit), pp. 3346. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer.

Zanke, U. *Neuer Ansatz zur Berechnung des Transportbeginns von Sedimenten unter Strömungseinfluß* (In German); Mitt. des Franzius-Institut, Technical Univ.: Hannover, Germany, 1977.

Ettmer, B., Orth, F., & Link, O. (2015). Live-Bed Scour at Bridge Piers in a Lightweight Polystyrene Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(9), 04015017. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.00

K.D.C.R. Dissanayaka & Norio Tanaka (2023): Scour around the single emergent cylinder due to subcritical and supercritical approach flow conditions, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, DOI: 10.1080/09715010.2023.2212632

FEMA. (2012). FEMA P-646: Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis. Extraído de <https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/14708>

McGovern, D. J., Todd, D., Rossetto, T., Whitehouse, R. J. S., Monaghan, J., & Gomes, E. (2019). Experimental observations of tsunami induced scour at onshore structures. *Coastal Engineering*, 152.

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

**Departamento** : Departamento de Ingeniería Civil  
**Carrera** : Ingeniería Civil  
**Nombre del memorista** : Joaquín Alonso Sabat Arriagada  
**Título de la memoria** : Socavación producida por tsunamis alrededor de edificios

**Fecha de la presentación oral** :

**Profesor(es) Guía** : Oscar Link Lazo  
**Profesor(es) Revisor(es)** :  
**Concepto** :  
**Calificación** :

**Resumen**

Eventos como el Tsunami del Océano Indico en 2004, el Tsunami de Chile en 2010, y el de Japón en 2011, han dejado en evidencia la necesidad de estudiar y desarrollar infraestructura de resguardo y medidas de prevención. La complejidad hidrodinámica de un Tsunami respecto de una otros movimientos de agua, se traduce en que la experimentación de ola solitaria no sea apropiada para el análisis. Este trabajo propone un modelo de onda larga, centrado en un escalado apropiado de los sedimentos, considerando un escenario altamente conservador, replicando el impacto de una ola previo a su rompimiento, centrándose en la fase de inundación del evento. Se observó que la socavación final fue más de 3 veces la final, alcanzando 2.63 veces el ancho de la estructura. Se observa, potencialmente, un efecto devastador para las estructuras costeras de mayor exposición, reafirmando la necesidad de seguir desarrollando medidas de prevención ante estos eventos.