

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante: Luis Santana Oyarzo**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS DE LA  
CARGA HIDRAULICA EN EL COLAPSO DE  
TERRAPLENES DE ARENA**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el  
Título de Ingeniero Civil

**NÉSTOR FABIÁN GUTIÉRREZ MACHUCA**

**Concepción, Octubre 2015**

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	3
1. INTRODUCCION .....	4
1.1. Objetivos .....	5
1.1.1 Objetivo general .....	5
1.1.2 Objetivos específicos.....	5
2. METODOLOGIA .....	6
2.1. Terraplenes de arena y sistema de medición. ....	6
2.1.1. Materiales de ensayo .....	6
2.1.2. Construcción de terraplenes .....	7
2.1.3. Sistemas de medición. ....	8
2.2. Ensayos experimentales. ....	10
2.3. Tratamiento de la información. ....	12
3. RESULTADOS Y ANALISIS .....	13
3.1. Terraplenes de arena y sistema de medición. ....	13
3.2. Ensayos experimentales. ....	14
3.3. Mecanismo de falla. ....	16
3.4. Análisis de geometría. ....	17
3.5. Análisis de caudal de tubificación y carga hidráulica .....	18
3.6. Colapso del terraplén.....	20
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	23
REFERENCIAS .....	25
ANEXO A: .....	26
Códigos de software y protocolos de calibración. ....	26

ANEXO B: .....	33
Resultados.....	33

## INDICE DE FIGURAS

Figura n°1: Terraplenes de ensayo y medidas en centímetros.....	7
Figura n°2: Esquema de canal de ensayo y ubicación de sensores de distancia.....	8
Figura n°3: Etapas de fallas del terraplén y colapso.....	11
Figura n°4: Comparación entre Caudal de sistema de medición y Caudal medido a través de aforos volumétricos.....	13
Figura n°5: Cambios en talud aguas abajo durante ensayo experimental .....	17
Figura n°6: Relación entre carga hidráulica y caudal de tubificación .....	18
Figura n°7: Relación entre caudal de tubificación y geometría del terraplén .....	19
Figura n°8: Dinámica de caudal y carga hidráulica durante ensayo B/H=0.....	21
Figura n°9: Gráfico Geometría (B/H) vs Tiempo de Falla/Colapso .....	22

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla n°1: Análisis granulométrico previo a ensayos.....	6
Tabla n°2: Análisis granulométrico posterior a ensayos.....	7
Tabla n°3: Resumen de resultados de ensayos de terraplenes.....	14

## **EFFECTOS DE LA CARGA HIDRAULICA EN EL COLAPSO DE TERRAPLENES DE ARENA**

**Autor:** Néstor Fabián Gutiérrez Machuca

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: [nestorgutierrezmachuca@gmail.com](mailto:nestorgutierrezmachuca@gmail.com)

**Profesor Patrocinante:** Luis Santana Oyarzo

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: [lsantana@ubiobio.cl](mailto:lsantana@ubiobio.cl)

### **RESUMEN**

Los terraplenes son obras civiles utilizadas para elevar el nivel de un terreno y formar un plano de apoyo adecuado para hacer una obra, empleando material de tipo granular (grava o arena) para su construcción, que es el de más fácil obtención. Estas obras pueden ser de tipo permanente o provisorio.

Estos terraplenes, en general no se diseñan para tomar carga hidráulica. Lo anterior, puede originar fallas en la obra debido a la acción del agua e inclusive se puede llegar al colapso. Uno de los mecanismos de falla y/o colapso es el piping o tubificación, en el que aparecen flujos en el interior del terraplén (o caudal de tubificación) arrastrando el material fino.

Bajo este contexto, el presente Proyecto de Título tiene como objetivo analizar los efectos de la carga hidráulica en los terraplenes de arena. Para llevar a cabo este estudio, se realizaron ensayos experimentales que consistían en someter los terraplenes a carga hidráulica constante, para razones ancho de coronamiento y altura predefinida. La carga hidráulica, caudal (flujo de tubificación) y cambios en la geometría fueron registrados en el tiempo, desde el inicio del ensayo, hasta el colapso del terraplén.

El resultado más importante mostró que el caudal de tubificación fue la principal variable que genera la carga hidráulica sobre el colapso del terraplén.

Palabras Clave: Terraplén, colapso de terraplén, carga hidráulica, caudal de tubificación.

4708 Palabras Texto + 11 Figuras/Tablas\*250 + 1 Figuras/Tablas\* 500 = 7958 Palabras Totales

## HYDRAULIC LOAD EFFECTS IN THE SAND EMBANKMENTS COLLAPSE

**Author:** Néstor Fabián Gutiérrez Machuca

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

E-mail: [nestorgutierrezmachuca@gmail.com](mailto:nestorgutierrezmachuca@gmail.com)

**Advisor:** Luis Santana Oyarzo

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

E-mail: [lsantana@ubiobio.cl](mailto:lsantana@ubiobio.cl)

### ABSTRACT

The embankments are civil works used to raise land and form a plan of appropriate support to make a work using granular material (gravel or sand) for its construction, which is more readily available. These works can be permanent or temporary kind.

These embankments generally not designed to make hydraulic load. This can cause faults in the work due to the action of water and even you can reach the collapse. One of the failure/collapse mechanisms is the piping, where flows appear inside the fill (or piping flow) dragging removing fine material.

In this context, this Title project aims analyze the effects of hydraulic load in sand embankments. To carry out this study, experimental trials consisted of embankments subject to constant hydraulic charge, for reasons of crown width and height were conducted default. The hydraulic charge, flow rate (piping flow) and geometry changes were recorded in the time from the start of the trial, until the collapse of the embankment.

The most important result showed that the piping flow was the main variable that generates the hydraulic load on the embankment collapse.

Keywords: Embankment, embankment collapse, hydraulic load, piping flow.



## 1. INTRODUCCION

El terraplén es una obra civil destinada a rellenar un terreno para levantar su nivel y formar un plano de apoyo adecuado para hacer una obra, también se utilizan como defensa contra inundaciones. Los terraplenes se emplean en obras definitivas (presas, muros de embalses, caminos) y en obras provisionarias (Ramírez, 2014).

La arena es uno de los materiales de construcción de mayor abundancia, económico y de fácil abastecimiento. Por este motivo, se emplea bastante para la construcción de terraplenes.

Los terraplenes pueden colapsar debido a la acción de la carga hidráulica. Esto causa la destrucción de la obra y pérdida de su funcionalidad, lo que puede tener como resultados pérdidas de vidas humanas, materiales, y económicas, tal como sucedió en la falla de la represa Ralco (Reyne, 2013) y el colapso del terraplén sobre estero Minte (Vera, 2013).

Existen dos mecanismos de falla de terraplenes debido a la acción de la carga hidráulica: falla por erosión retrograda y falla por carga hidráulica (piping). La erosión retrograda consiste en el arrastre de material producido aguas abajo del terraplén, debido a que el nivel de carga hidráulica sobrepasa la cota del terraplén. La falla por carga hidráulica o piping, consiste en que aparecen pequeños flujos (o caudal de tubificación) en el interior del terraplén, debido a la infiltración de agua, generando arrastre de material haciendo que la obra falle y en algunos casos hasta colapse.

En la actualidad, hay estudios disponibles en los que se aborda el piping en los terraplenes de arena como el caso de la investigación realizada por García y Uchimura (2007). Sin embargo, en esos estudios no se realiza un análisis del colapso de terraplenes.

Debido a la importancia de los terraplenes en obras civiles, falta información y estudios disponibles, en este Proyecto de Título se busca entregar un análisis en que se relacione la carga hidráulica y la geometría de los terraplenes en la falla y/o colapso, para esto se realizaron ensayos experimentales en laboratorio, utilizando terraplenes de arena con distintas relaciones de ancho de coronamiento (B) y altura de terraplén (H), para un talud de razón horizontal: vertical (H:V) de 3:2, debido a que es el valor de uso más común en carreteras y caminos (MOP, 2013).

## **1.1. Objetivos**

### *1.1.1 Objetivo general*

- Analizar el efecto de la carga hidráulica en el colapso de terraplenes de arena a través de modelos experimentales con geometría dada y talud con razón H:V de 3:2.

### *1.1.2 Objetivos específicos*

- Habilitar terraplenes de arena con distinta geometría para ensayos experimentales.
- Realizar ensayos experimentales para obtener el mecanismo de falla por piping.
- Evaluar el colapso de los terraplenes de arena a través de los datos de carga hidráulica y geometría obtenidos en los ensayos experimentales.

## 2. METODOLOGIA

Para cumplir con el objetivo general propuesto se utilizaron 3 metodologías, donde cada una de ellas fue empleada para un objetivo específico.

### 2.1. Terraplenes de arena y sistema de medición.

Para la habilitación de los terraplenes de arena para ensayos experimentales, se construyeron terraplenes utilizando los materiales que se detallan más adelante en el punto 2.1.1, con las características geométricas y protocolo de construcción explicados en el punto 2.1.2.

Se empleó un sistema de medición, cuya finalidad era registrar la dinámica de la carga hidráulica y caudal durante el desarrollo de los ensayos. Este sistema de medición se detalla en el punto 2.1.3.

#### 2.1.1. Materiales de ensayo

En los ensayos de modelos se utilizó arena para la construcción de terraplenes, cuyo diámetro medio es 0.67 mm y su granulometría antes de realizar el experimento se muestra a continuación en la Tabla n°1.

**Tabla n°1: Análisis granulométrico previo a ensayos.**

Malla	Abertura(mm)	Peso (gr)	% Pasa
Nº4	4.75	0	100
Nº10	2	4.6	99.07
Nº20	0.85	74.2	84.11
Nº40	0.425	250.2	33.66
Nº60	0.25	151.9	3.02
Nº200	0.075	14.9	0.02

La tabla n°2 muestra la granulometría de la arena después del quinto ensayo experimental.

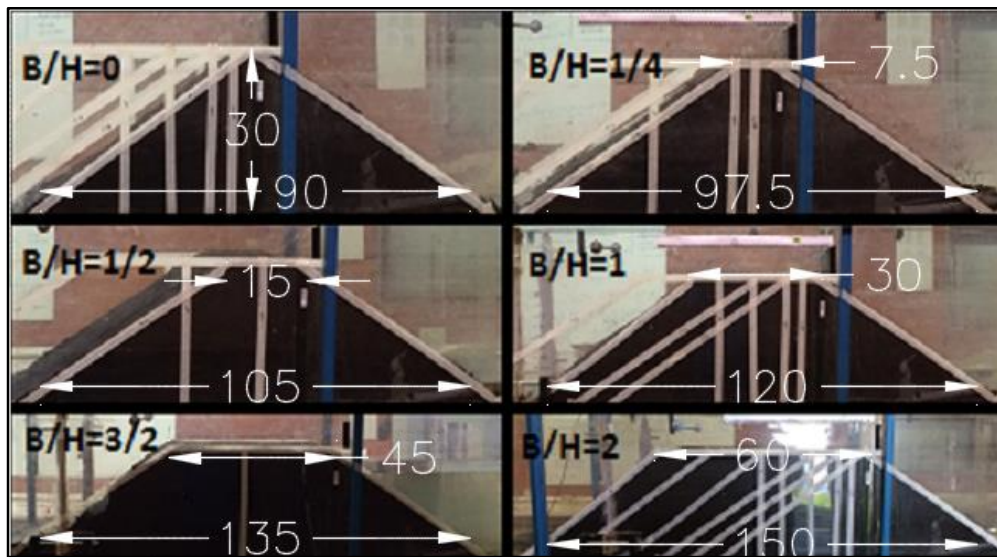
**Tabla n°2: Análisis granulométrico posterior a ensayos.**

Malla	Abertura(mm)	Peso (gr)	% Pasa
Nº4	4,75	0	100.000
Nº10	2	4.2	99.116
Nº20	0,85	87.4	80.716
Nº40	0,425	262.8	25.389
Nº60	0,25	107.9	2.674
Nº200	0,075	12.6	0.021

### 2.1.2. Construcción de terraplenes

Se construyeron los terraplenes mediante capas de 2 centímetros aproximadamente, saturando la arena y compactando de forma manual. Su ubicación fue entre S1 y S2, tal como se mostró en la Figura n°2. Se utiliza una relación de talud de  $H/V=3/2$ , debido a que corresponde a la máxima inclinación permitida para carreteras (MOP, 2013).

La Figura n°1 muestra los terraplenes de ensayo y sus medidas (en centímetros).

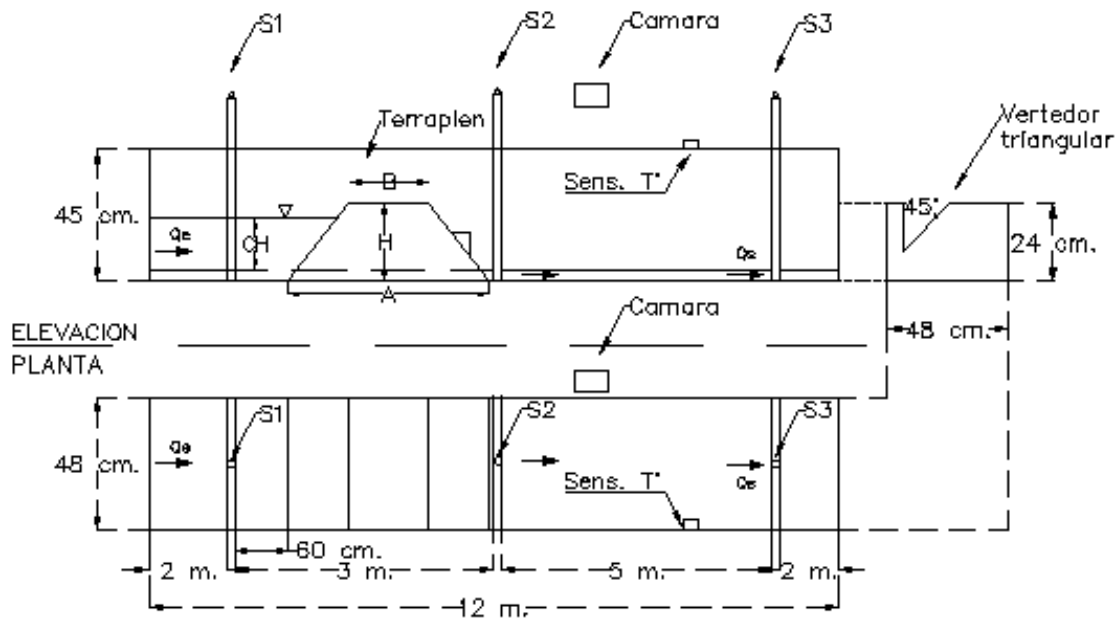


**Figura n°1: Terraplenes de ensayo y medidas en centímetros.**

### 2.1.3. Sistemas de medición.

La Figura n°2 muestra la disposición de las componentes principales del sistema de medición que son: sensores de distancia, sensor de temperatura, vertedor y cámara fotográfica, para medir: altura de escurrimiento, carga hidráulica, temperatura ambiente, caudal, registros fotográficos y videos de los ensayos.

Para regular la cantidad de agua que ingresa al canal se utiliza una válvula tipo llave, que llena un estanque rectangular de área  $2\text{ m}^2$ , cuya finalidad es hacer que el fluido ingrese al canal con la menor turbulencia posible.



**Figura n°2: Esquema de canal de ensayo y ubicación de sensores de distancia.**

**1. Sensores de distancia:** Se emplearon 3 módulos de sensores de distancia ultrasónico (PING))TM#28015 con un rango de medición de 0.02 a 3 metros y precisión 0.2 milímetros.

Estos sensores se conectan a un microcontrolador modelo Mega 2560 y ésta se conecta a un computador a través del puerto serial. Las mediciones pueden ser vistas en tiempo real mediante el software Arduino gracias a al programa AdHoc adjunto en el Anexo A.

Las ecuaciones (1), (2) y (3) muestran los resultados de las calibraciones realizadas en laboratorio según el protocolo definido en el Anexo A.

$$\text{Sensor 1: } y = -1.0004x + 703.34 \quad R^2 = 0.9997 \quad (1)$$

$$\text{Sensor 2: } y = -0.9989x + 692.9 \quad R^2 = 0.9996 \quad (2)$$

$$\text{Sensor 3: } y = -0.9737x + 754.05 \quad R^2 = 0.9996 \quad (3)$$

Donde x es la altura observada (mV), e y es la altura de escurrimiento (mm).

**2. Carga Hidráulica (CH):** Se calcula como la diferencia entre el registro del sensor de distancia 1 (S1) y el sensor de distancia 2 (S2).

**3. Vertedor:** Se empleó un vertedor triangular de acrílico con abertura de 45° elaborado en laboratorio. La ecuación (4) muestra el resultado de la calibración del vertedor, según protocolo definido en el Anexo A.

$$Q = 832.36h^3 + 123.91h^2 - 8.9877h + 0.1577 \quad R^2 = 0.9998 \quad (4)$$

Donde h es el registro entregado por el sensor de distancia 3 (S3) en (mm) y Q es el caudal medido por la curva de descarga.

**4. Caudal:** El caudal de salida (Qs) (Ver Figura n°2) es estimado por la ecuación número (4), en función de la carga hidráulica sobre el vertedor. También se realizaron aforos volumétricos del caudal de salida (mientras el fluido se encuentra en estado de régimen permanente) con una frecuencia de 15 minutos. Se asume que el caudal de salida (Qs), corresponde al caudal de tubificación si después de un determinado tiempo se logra el estado de régimen permanente, por lo tanto los valores iniciales no corresponden.

Observación: El caudal de salida corresponde al flujo que pasa a través del terraplén, que mientras se encuentra en estado de régimen permanente es igual al caudal de entrada (Qe).

**5. Temperatura Ambiente:** Se usó un sensor LM 35 con precisión de 0.05 °C, previamente calibrado y corrige los sensores de distancia en tiempo real, a través del programa Arduino adjunto en el Anexo A.

**6. Registro fotográfico y videos:** Se empleó una cámara de 8 MegaPíxeles de un teléfono celular iPhone 5S, donde los archivos de imagen se guardan en formato JPEG (.JPG) y los videos en formato .MOV. Los registros se tomaron con una frecuencia de 30 minutos y desde dos puntos: en forma transversal al terraplén a 3 metros de distancia (Punto A) y en 45 grados mostrando el avance del talud aguas abajo (Punto B). Estos registros se adjuntan en el anexo C.

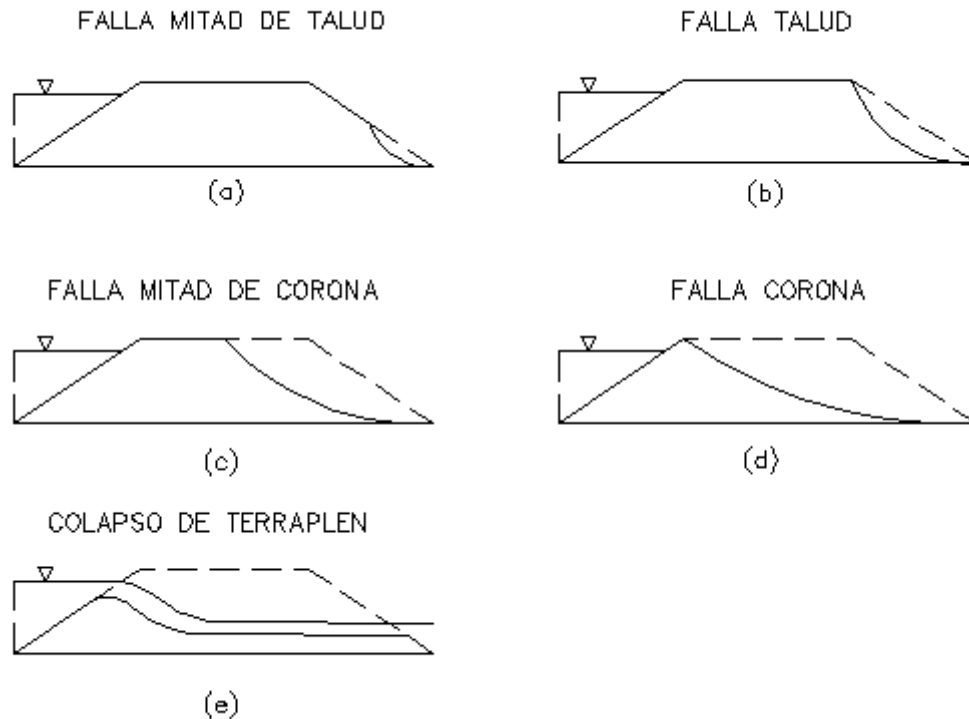
## 2.2. Ensayos experimentales.

Se realizan 6 ensayos de terraplenes de arena de acuerdo a la geometría mostrada en la Figura n°1, aplicando el siguiente protocolo para cada terraplén:

- Conectar el equipo de medición al computador.
- Encender el equipo de medición y se verifica que los sensores operen adecuadamente durante 5 minutos.
- Agregar agua en el sector aguas abajo del terraplén, para que de este modo los sensores de distancia entreguen lectura de valores reales.
- Abastecer al canal abriendo la válvula de alimentación de agua a tasa constante, hasta alcanzar un borde libre del 15%.
- Mantener el nivel de carga hidráulica constante, utilizando la válvula de ingreso de agua al canal.
- Medir caudal cada 15 minutos a través de aforo volumétrico.
- Se toma registros fotográficos cada 30 minutos, para registrar los cambios en la geometría del terraplén.
- Observar y tomar registro de tiempo en que ocurren las fallas que se muestran en la Figura n°3: falla de mitad del talud (a), falla de talud (b), falla de la mitad de corona (c), falla de corona (d) y colapso de terraplén (e).

En el terraplén de relación  $B/H=0$ , sólo es posible llegar a la etapa (d) de la Figura n°3, esto debido a que su ancho de coronamiento es 0.

- Se concluye el ensayo una vez que colapsa el terraplén y el flujo se estabilice.
- Guardar el registro en un archivo de texto (.txt).
- Desconectar el equipo de medición del computador.



**Figura n°3: Etapas de falla del terraplén y colapso.**

**Falla y colapso de los terraplenes de arena:** Mediante registros fotográficos desde los puntos A y B, se muestra la falla y el colapso del terraplén. La figura n°3 muestra la secuencia de fallas y colapso para distintas dimensiones de terraplén.



### 2.3. Tratamiento de la información.

Para evaluar el colapso de los terraplenes de arena, se procede a mostrar los resultados obtenidos durante cada ensayo, para su posterior análisis visto desde distintos puntos: geometría, tiempo de falla/colapso, caudal de tubificación y carga hidráulica.

**Resultados de ensayos:** Se presentan a través de una tabla en la que se muestran los tiempos de falla/colapso, niveles de carga hidráulica, caudal de tubificación y caudal peak durante el colapso pertenecientes a cada uno de los 6 terraplenes con distintas relaciones B/H. Posteriormente se hace una descripción general de la tabla, indicando datos de interés y realizando análisis comparativos entre los resultados de las variables medidas en las corridas experimentales.

**Análisis de geometría:** Utilizando los registros fotográficos obtenidos, se procede a comparar la geometría antes y después de la falla y/o colapso del terraplén. Se crea una figura de los cambios en la geometría del terraplén durante los ensayos experimentales.

**Análisis de caudal y carga hidráulica:** Con los registros de carga hidráulica y los caudales respectivos a cada nivel de carga de los ensayos, se relacionan ambas variables entre si y son mostradas en forma gráfica a través de una figura.

Luego se busca relación entre cada una de estas variables y la geometría del terraplén, mostrándolas en forma gráfica a través de figuras.

**Análisis de tiempo de falla/colapso:** Mediante los datos de tiempo de fallas, tiempo y duración de colapso, se busca si existe relación entre estas variables con la geometría y el nivel de carga hidráulica al cual es sometido el terraplén.

Finalmente, estas relaciones se presentan en forma gráfica a través de figuras.

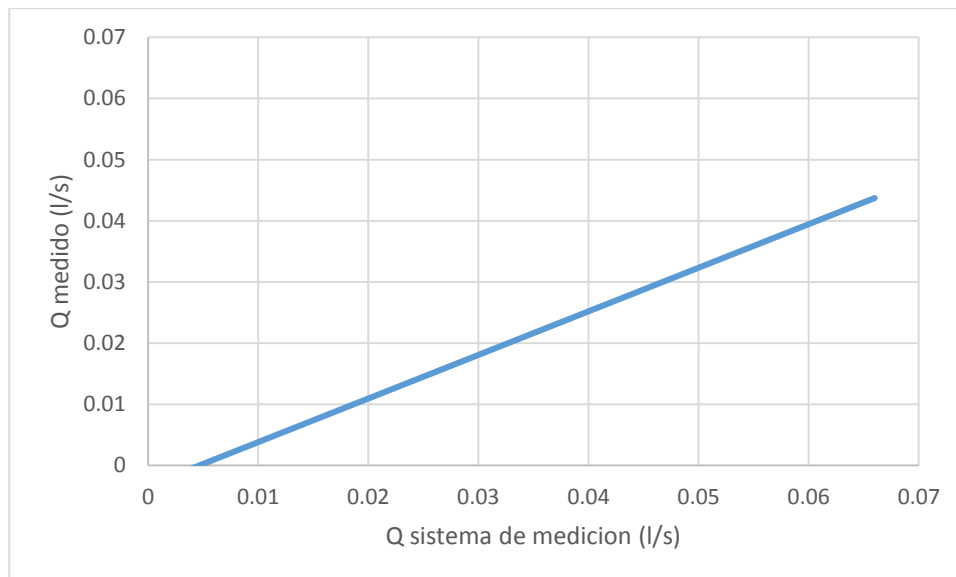
### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente Capítulo se muestran los resultados correspondientes a cada una de las metodologías planteadas en el Capítulo 2.

#### 3.1. Terraplenes de arena y sistema de medición.

Los terraplenes ensayados difieren en un 3% de los taludes indicados en la Figura n°1. Sin embargo estos no fueron considerados en el análisis posterior, considerando solo los valores nominales iniciales de 3/2.

Los ensayos experimentales fueron realizados a temperatura ambiente entre 8°C y 20°C. Además, la carga hidráulica registró una variación de  $\pm 2$  mm en todos los ensayos y  $\pm 0.05$  (l/s) en el caudal obtenido mediante la curva de descarga. Sin embargo, los valores obtenidos de la curva de descarga fueron diferentes a los obtenidos mediante aforos volumétricos mostrados en la Figura n°4.



**Figura n°4: Comparación entre Caudal de sistema de medición y Caudal medido a través de aforos volumétricos.**



Para cada terraplén, se aplicó un nivel de carga hidráulica entre 240 y 270 milímetros y los caudales de tubificación medidos mediante aforo volumétrico van de 0.017, para el terraplén de mayor relación B/H, hasta 0.039 ( $l/s$ ), para el terraplén de menor relación de geometría. Cabe destacar que para el ensayo de terraplén con relación B/H = 0 no se tiene registro del caudal de tubificación, esto debido a que no se alcanza el nivel de carga hidráulica establecido y además no se alcanzó estado de régimen permanente para realizar dicha medición.

Se puede observar que los tiempos de falla mitad de talud, talud, mitad de corona y corona y colapso, van en aumento a medida que la relación de geometría B/H de cada terraplén va aumentando. No se tiene registros de tiempo de colapso para el terraplén con relación B/H=2 porque este no alcanzó esta etapa debido a que solo alcanzó el caudal mínimo para arrastrar material (0.020  $l/s$ ). Para el terraplén de relación B/H=0, no se tiene registro de falla de mitad de corona y de corona, debido a que este terraplén no tiene esta componente y solo tiene los dos taludes conformándolo.

Los caudales peak alcanzados durante el colapso de cada terraplén van desde 3 a 5.5 ( $l/s$ ), esto no presenta relación con la geometría, debido a que en el terraplén con relación B/H=3/2 se alcanzó un nivel de carga hidráulica mayor que el de los otros ensayos, lo que afecta directamente aumentando el volumen de agua retenido por el terraplén antes de colapsar y por finalmente un caudal peak alto en comparación con los otros ensayos.

### 3.3. Mecanismo de falla.

En el video “Inicio Piping”, disponible en la carpeta 1.5 en el Anexo C, se muestra el mecanismo de falla por piping que se visualizó en el talud aguas debajo de los ensayos de terraplenes de arena.

En cada uno de los ensayos fue posible visualizar el mecanismo de falla por piping, este se manifestaba luego de unos segundos después del aumento de carga hidráulica (producido por el llenado del canal) a través de un humedecimiento en el pie del talud aguas abajo, donde este después se satura completamente y comienzan a aparecer los primeros flujos de tubificación a través del terraplén, arrastrando material del pie del talud aguas abajo y luego comience a desplazarse produciendo una extensión del mismo, lo que cambia la geometría del terraplén.

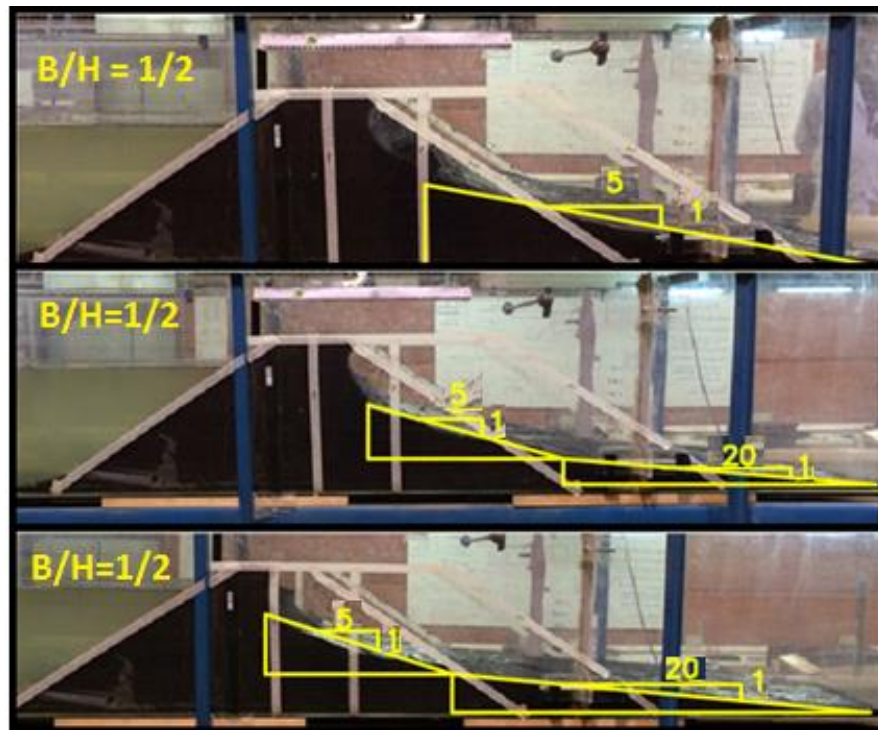
Una vez que falla el pie del talud, los flujos de tubificación continúan arrastrando material en el interior del terraplén, depositándolo aguas abajo del terraplén. Esto genera una pérdida de material en el resto del talud, haciendo que comiencen a aparecer grietas y luego falle completamente, creando una obstrucción de los canales generados por los flujos de tubificación e impidiendo el traslado de material por algunos momentos (Ver video “Piping aguas abajo”, disponible en la carpeta 0.5 del Anexo C). Esta situación termina cuando se satura completamente el material del talud que falló recientemente, haciendo que se comience a limpiar la superficie por la que circulan los canales para que posteriormente vuelvan a arrastrar material.

Se reanuda el arrastre de material debido a los flujos en el interior del terraplén, esto empieza a humedecer la superficie del coronamiento, donde más tarde se visualizan las primeras grietas. Al igual que en la falla del talud, en la corona del terraplén el material se desprende cuando se satura, creando una obstrucción de los canales producidos por los flujos de tubificación, los que vuelven a aparecer luego de limpiar lentamente la superficie del talud extendido. Esta situación se repite hasta que se logra la falla de la corona del terraplén, donde éste solo queda compuesto por dos taludes y los flujos de tubificación se originan en la intersección del nivel de carga hidráulica con el talud del terraplén (Ver video “Previo Colapso”, disponible en la carpeta 1 del Anexo C).

En el video “Ensayo 0”, disponible en la carpeta 0 del Anexo C, se encuentra registrado el ensayo en su totalidad, mostrando los eventos mencionados anteriormente a excepción de las fallas en el coronamiento del terraplén, puesto que el ensayo de relación  $B/H=0$  no posee esta componente.

### 3.4. Análisis de geometría.

La Figura n°5 muestra los cambios en la geometría del talud aguas abajo del terraplén, para un mismo ensayo.



**Figura n°5: Cambios en talud aguas abajo durante ensayo experimental.**

Durante todos los ensayos fue posible ver el mismo avance en la geometría del talud aguas abajo del terraplén, este consistía en un cambio de la razón horizontal: vertical que comenzaba en 3:2, pero luego producto del material arrastrado por los flujos al interior del terraplén, tiende a acercarse a 5:1.

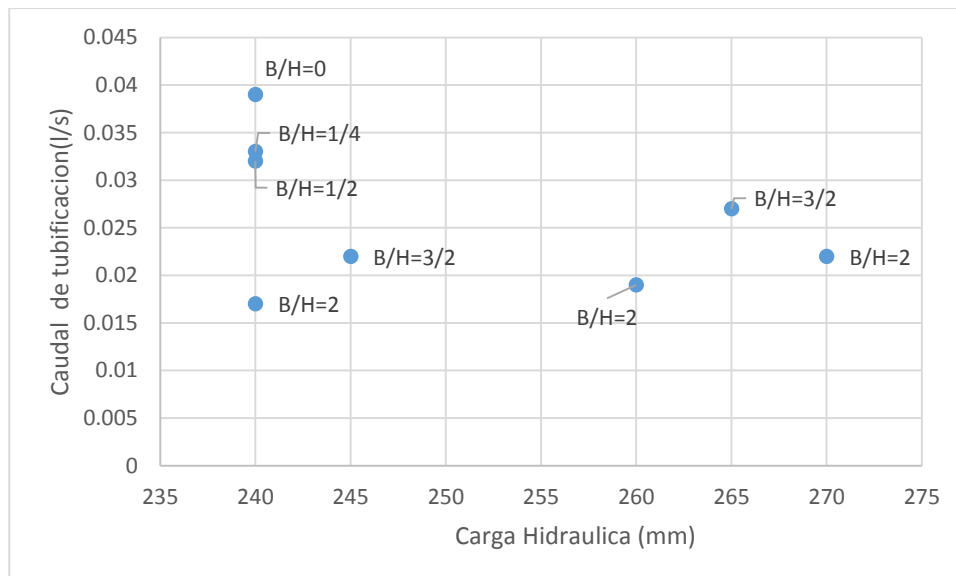
Luego, el talud aguas abajo del terraplén estaba compuesto por dos razones H:V. La primera 5:1, que correspondía al material que se arrastraba por los flujos a través del terraplén. La segunda razón de talud es 20:1, que corresponde al valor al cual tiende cuando el flujo esta sobre el terraplén.

Con el avance de los ensayos, se notó que al acercarse al momento de colapso del terraplén, el talud aguas abajo va tomando la razón 20:1 casi en su totalidad, a excepción del sector donde falla el terraplén, que corresponde a una zona de transición para que luego el material sea desplazado por los flujos de tubificación.

### 3.5. Análisis de caudal de tubificación y carga hidráulica

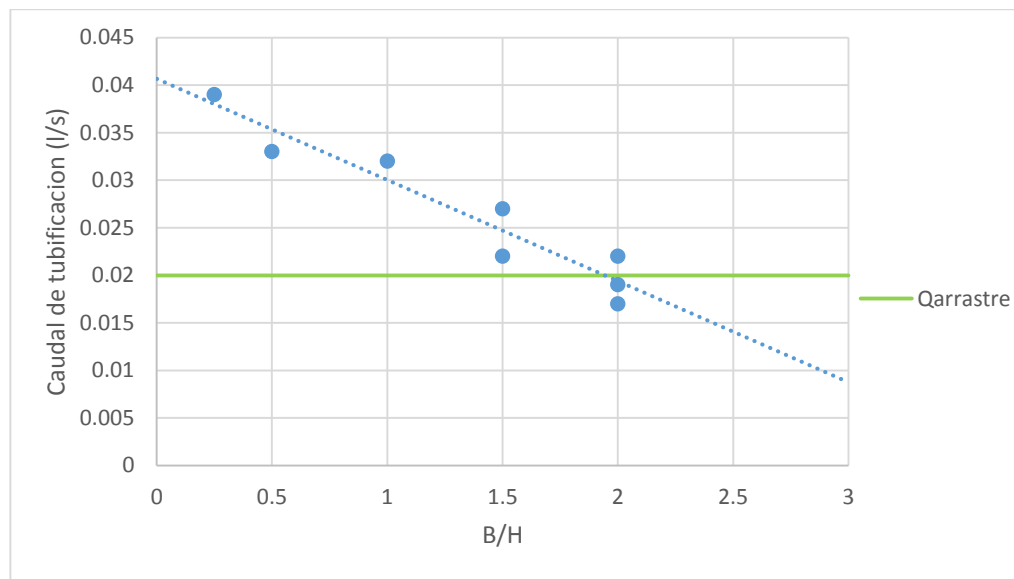
Finalmente, se puede asegurar que el caudal de tubificación es la variable que más influye en la ocurrencia del mecanismo de falla por piping, debido a que es el responsable del arrastre de material del terraplén, por lo tanto, si no se alcanza un caudal de tubificación capaz de arrastrar material, no se logra el mecanismo de falla.

La carga hidráulica es la responsable del aumento del caudal de tubificación, por lo tanto esta puede influir en el arrastre de material para generar fallas en el terraplén. La relación entre la carga hidráulica y el caudal de tubificación se muestra en forma gráfica a continuación en la figura n°6.



**Figura n°6: Relación entre carga hidráulica y caudal de tubificación.**

En esta figura se puede apreciar claramente que para un mismo ensayo de relación B/H, al aumentar el nivel de carga hidráulica aumenta el caudal de tubificación. Sin embargo, se puede ver que para un mismo nivel de carga hidráulica se alcanzan distintos caudales de tubificación, esto se debe a que cada uno de estos caudales se encuentra asociado a una relación B/H distinta, donde se tienen caudales más altos para el terraplén con menor relación de geometría, y para el terraplén con mayor relación B/H se tienen caudales menores. La Figura n°7 muestra la relación entre el caudal de tubificación y la geometría del terraplén.



**Figura n°7: Relación entre caudal de tubificación y geometría del terraplén.**

Se puede apreciar que las variables caudal de tubificación y geometría, se relacionan de forma inversa teniendo los caudales más bajos en el ensayo con relación B/H=2, donde se muestran 3 caudales, de los cuales solo el mayor (0.021 l/s) genera arrastre de material, pero este no alcanza a producir el colapso del terraplén, debido a que supera por poco al caudal mínimo que genera arrastre de material (Qarrastre) que es de 0.02 (l/s). De este modo, se puede asegurar que la relación B/H=3 recomendada por “Manual de carreteras” (MOP, 2013), alcanza un caudal de tubificación cercano a 0.01 (l/s) el que no genera arrastre de material y por lo tanto no alcanza el colapso del terraplén.



Debido a que la carga hidráulica fue medida como la diferencia entre la señal de los sensores aguas arriba (S1) y aguas abajo (S2), y la geometría del terraplén influye en el caudal de tubificación, se podría pensar que la carga hidráulica también se ve afectada por la geometría del terraplén. Sin embargo, los caudales de tubificación medidos son iguales o menores a 0.039 (l/s), lo que produce una variación de 0.5 milímetros en la altura de escurrimiento aguas abajo, que no se puede registrar por los sensores de distancia dado que presentan una variación de 2 mm.

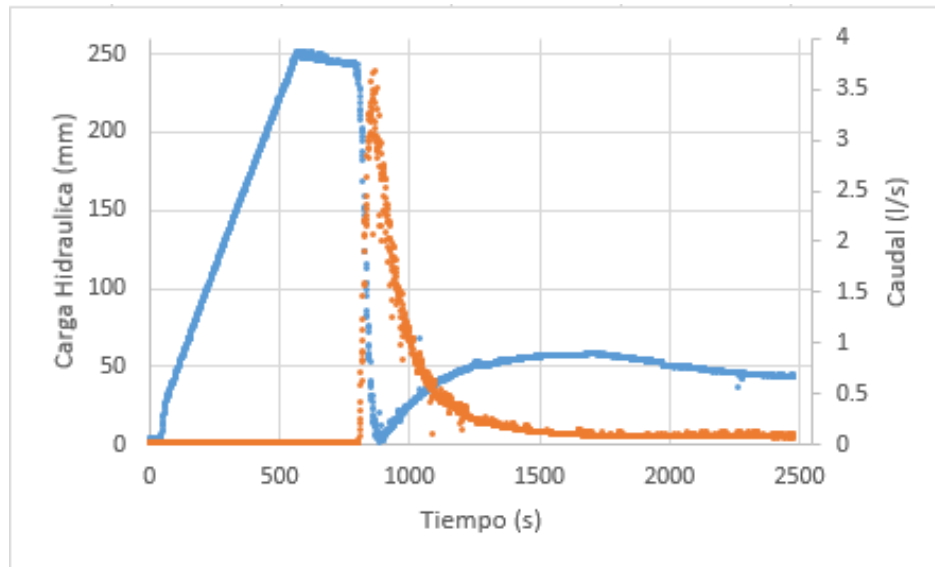
Para ensayos con misma geometría de terraplén y nivel de carga hidráulica, se midieron caudales de tubificación distintos donde la única medición que varió fue la temperatura ambiente que es una variable no analizada en este estudio.

### **3.6. Colapso del terraplén**

Una vez que el mecanismo de falla logra hacer que el terraplén solo este compuesto por dos taludes y el de aguas abajo se encuentra con flujo en su superficie debido a los canales formados por los flujos de tubificación, se arrastra el material del talud aguas arriba, creando una abertura por la cual el agua retenida hace ingreso al sector aguas abajo, entrando a gran velocidad, lo que provoca que aumente de tamaño la abertura y se arrastre gran parte del material que componía al terraplén, modificando totalmente su geometría y perdiendo totalmente su funcionalidad. Esta última etapa corresponde al colapso del terraplén. Este evento se encuentra registrado en los videos con nombre “Colapso”, disponibles en las carpetas 0.5, 1 y 1.5 del Anexo C.

La Figura n°8 muestra en forma gráfica la dinámica del caudal y carga hidráulica para el ensayo de terraplén con relación B/H=0, en esta es posible apreciar claramente el colapso del terraplén, que corresponde al instante cuando disminuye bruscamente la carga hidráulica y el caudal aumenta.

En el Anexo B se encuentran adjuntas las figuras correspondientes a los otros 5 ensayos y sus respectivas descripciones.



**Figura n°8: Dinámica del caudal y carga hidráulica durante ensayo B/H=0.**

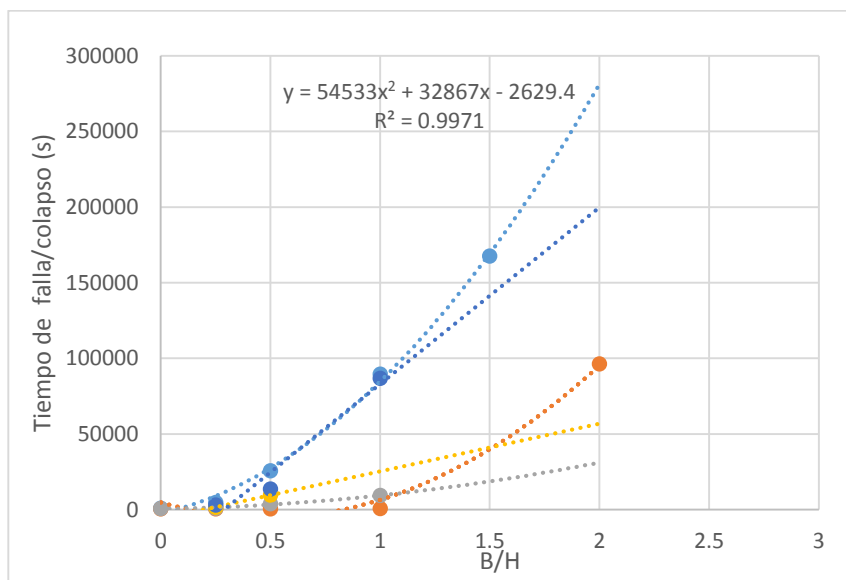
En la figura anterior se puede ver un aumento de la carga hidráulica hasta los 500 segundos, esto corresponde al tiempo en que se llenó el canal para lograr el borde libre de 15%. Luego se aprecia un descenso brusco de la carga hidráulica, y aumento de caudal, este instante corresponde al colapso del terraplén que en este caso inicia los 700 segundos prolongándose hasta los 1000 aproximadamente. A los 745 segundos, se alcanza el peak del colapso con un caudal que llega hasta los 3.7 (l/s). Más adelante es posible ver que la carga hidráulica llega a valores cercanos a 0, esto se debe a que el agua que se encontraba retenida por el terraplén antes del colapso, ya hizo ingreso al sector aguas abajo, alcanzando una altura similar a lo largo de todo el canal y haciendo que las señales de S1 y S2 sean muy parecidas, lo que provoca que su diferencia se acerque a 0.

Finalmente, se puede apreciar un aumento en la carga hidráulica, el que corresponde al momento en que el agua en el sector aguas arriba del terraplén ya no tiene la cota suficiente para sobrepasarlo, y comienza a ser retenida nuevamente lo que genera un descenso de la cota de agua en el sector aguas abajo y se traduce en un aumento de la carga hidráulica.

En este ensayo la temperatura ambiente tuvo un mínimo de 10°C y máximo de 11°C.

La duración del colapso del terraplén en cada ensayo es del orden de 300 segundos después de iniciado, por lo que es posible asumir que esta variable no se relaciona con la geometría (relación B/H) del terraplén, debido a que depende de la erosión retrograda producto del aumento de velocidad del flujo.

La Figura n°9 muestra en forma gráfica la relación entre los distintos tiempos de falla y colapso de terraplén, con la geometría (relación B/H). Además se les asocia una línea de tendencia, para conocer la función que mejor relacione la geometría con el colapso del terraplén.



**Figura n°9: Gráfico Geometría (B/H) vs Tiempo de Falla/Colapso.**

A través de esta figura se entiende que el tiempo de fallas y colapso, está directamente relacionado con la geometría del terraplén. Siendo que al aumentar la geometría, se alcanzara un mayor tiempo de falla y si el terraplén logra colapsar, tarda más. Además, es posible ver que para la relación B/H=2, no se alcanza el colapso del terraplén y solo alcanza la falla de mitad de talud. Con base en esto y lo mostrado en la Figura n°7, se puede concluir que para terraplén con relación B/H iguales o superiores a 2 no colapsan y solo presentan falla de la mitad del talud aguas abajo.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Finalmente, después de realizar el análisis de los efectos de la carga hidráulica en el colapso de terraplenes de arena, se concluye que:

- En la habilitación del sistema de medición para ensayos experimentales de terraplenes, dado la magnitud de los eventos, el método de medición de caudal con curva de descarga no tiene la precisión apta. Por lo que es más preciso utilizar aforos volumétricos.
- El caudal de tubificación es la variable más importante en el colapso de los terraplenes con mecanismo de falla por carga hidráulica, debido a que este flujo es el que origina el arrastre de material que provoca fallas y puede ocasionar el colapso del terraplén.
- La razón de talud 5:1 corresponde al valor que tiene el talud aguas abajo del terraplén cuando hay arrastre de material y la razón 20:1 es cuando hay flujos en la superficie del terraplén.
- La carga hidráulica es la responsable de generar el caudal de tubificación. Esto se debe a que al aumentar el nivel de carga hidráulica, el flujo o caudal de tubificación que circula dentro del terraplén también lo hace.
- La relación geométrica B/H de los terraplenes se relaciona de manera inversa con el caudal de tubificación, puesto que al tener una mayor relación B/H, se medían caudales de tubificaciones bajos. Como el caso de B/H=2, donde la carga hidráulica se aumentó hasta el punto de no dejar borde libre, y el caudal de tubificación solo supero por poco el caudal mínimo para generar arrastre de material.
- La geometría de los terraplenes se relaciona de manera directa con el tiempo de colapso o fallas, donde al aumentar B/H también aumenta el tiempo que este terraplén va a tardar en colapsar o sufrir alguna de las fallas. Por el contrario, la duración del colapso es independiente de la geometría del terraplén.

## **Recomendaciones**

Para estos ensayos se utilizaron únicamente terraplenes de arena con una relación de talud H:V=3:2. Debido a esto se recomienda lo siguiente para posteriores estudios:

- Utilizar otra relación de talud, para ver si se pueden aplicar las conclusiones de este estudio para todo tipo de terraplén.
- Tomar en cuenta el efecto de la temperatura del agua y ver si se relaciona con más variables dentro de los ensayos.
- Utilizar otro material para la construcción de los terraplenes, con el fin de comparar cómo influye en las variables que se midieron en este estudio.
- Tener un sistema de registro fotográfico que se encuentre programado y en una posición fija, con el fin de obtener registros continuos en el tiempo y desde una misma ubicación.
- Plantar alguna especie en el talud aguas abajo, con el fin de intentar evitar que se produzca el desplazamiento y así no ocurren las fallas que originan el colapso a largo plazo.

## REFERENCIAS

1. Vera, A. (2013). “*La tragedia del Estero Minte*”. Reportaje Canal 13.  
Disponible desde: <http://www.t13.cl/videos/reporteros/la-tragedia-del-estero-minte>  
Acceso Abril 2015.
2. Ramírez, P. (2014). “*Habilitan terraplén provisorio tras colapso de puente Chupallar Alto en región del Maule*”. Reportaje Radio Biobio.  
Disponible desde: <http://www.biobiochile.cl/2014/01/17/habilitan-terraplen-provisorio-tras-colapso-de-puente-chupallar-alto-en-region-del-maule.shtml>  
Acceso Septiembre 2015.
3. Reyne, M. (2013). “*Represas del Bio-Bio: Una década de incertidumbre y temor*”.  
Reportaje Radio Biobio.  
Disponible desde: <http://www.biobiochile.cl/2013/01/14/represas-del-bio-bio-una-decada-de-incertidumbre-y-temor.shtml>  
Acceso Septiembre 2015.
4. MOP. (2013). “*Manual de Carreteras Volumen n°3: Instrucciones y criterios de diseño*”.  
Dirección de vialidad, Gobierno de Chile. Chile.
5. García, E. Uchimura, T (2007). “*Estudio del mecanismo de falla de terraplenes debido a la infiltración de aguas lluvias mediante el monitoreo de presiones de poros y contenido de agua*”. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Disponible desde:  
<http://tuxchi.redalyc.org/articulo.oa?id=49615212>  
Acceso Julio 2015.
6. E. Verachtert, W. Maetens, M. Van Den Eeckhaut, J. Poesen, J. Deckers. (2011). “*Soil loss rates due to piping erosion*”. Disponible desde:  
<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2013/07/30/142877>  
Acceso Agosto 2015.

**ANEXO A:**  
**Códigos de software y protocolos de calibración.**

## Código de Arduino

```
#define PinAltura1 2
#define PinAltura2 4
#define PinAltura3 3
#define LargoMaxPulso 18000
//#define temp1 9
//#define temp2 13
#define temp3 1

void setup()
{
  analogReference(INTERNAL1V1);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(PinAltura1, OUTPUT);
  digitalWrite(PinAltura1, LOW);
  pinMode(PinAltura2, OUTPUT);
  digitalWrite(PinAltura2, LOW);
  pinMode(PinAltura3, OUTPUT);
  digitalWrite(PinAltura3, LOW);
}

void loop()
{
  int Nref =25;

  float suma1 = 0, suma2 = 0, suma3 = 0, num = 0, Dista1=0, Dista2=0, Dista3=0;
```



```
float duracion1 = 0, duracion2 = 0, duracion3 = 0, Distancia1 = 0, Distancia2 = 0, Distancia3 = 0;

float dura1 = 0, dura2= 0, dura3 = 0, Caudal = 0;

do

{

// suma1 = suma1 + analogRead(temp1);

// suma2 = suma2 + analogRead(temp2);

suma3 = suma3 + analogRead(temp3);

num = num + 1;

digitalWrite(PinAltura1,HIGH);

delayMicroseconds(5);

digitalWrite(PinAltura1,LOW);

delayMicroseconds(60);

pinMode(PinAltura1, INPUT);

duracion1 = pulseIn(PinAltura1, HIGH, LargoMaxPulso);

dura1 = dura1 + duracion1;

delayMicroseconds(200);

pinMode(PinAltura1, OUTPUT);

digitalWrite(PinAltura2,HIGH);

delayMicroseconds(5);

digitalWrite(PinAltura2,LOW);

delayMicroseconds(60);

pinMode(PinAltura2, INPUT);

duracion2 = pulseIn(PinAltura2, HIGH, LargoMaxPulso);

dura2 = dura2 + duracion2;
```

```

delayMicroseconds(200);

pinMode(PinAltura2, OUTPUT);

digitalWrite(PinAltura3,HIGH);

delayMicroseconds(5);

digitalWrite(PinAltura3,LOW);

delayMicroseconds(60);

pinMode(PinAltura3, INPUT);

    duracion3 = pulseIn(PinAltura3, HIGH, LargoMaxPulso);

    dura3 =dura3 + duracion3;

delayMicroseconds(200);

pinMode(PinAltura3, OUTPUT);

} while (num < Nref);

//float temperatura1 = (1100.0 * (suma1/Nref - 0.1566)/10.096)/1023.0;

// float temperatura2 = (1100.0 * (suma2/Nref + 0.5543)/10.635)/1023.0;

float temperatura3 = (1100.0 * suma3/Nref/10.0)/1023.0;

    Dista1 = 0.5*0.001*(331.5+0.6*temperatura3) * dura1/Nref+ 0.0; // En milímetros

    Dista2 = 0.5*0.001*(331.5+0.6*temperatura3) * dura2/Nref - 0.0; // En milímetros

    Dista3 = 0.5*0.001*(331.5+0.6*temperatura3) * dura3/Nref + 0.0; // En milímetros

Distancia1= (703.34 - Dista1)/1.0004;

Distancia2= (692.90 - Dista2)/0.9989;

Distancia3= (754.05 - Dista3)/0.9737;

    Caudal = 832.36*(Distancia3/1000)*(Distancia3/1000)*(Distancia3/1000) +
123.91*(Distancia3/1000)*(Distancia3/1000) - 8.9877*(Distancia3/1000) + 0.1577;

Serial.print(millis()/1000.0,1);

```

```
Serial.print('\t');  
// Serial.print(temperatura1,1);  
// Serial.print('\t');  
//Serial.print(temperatura2,2);  
//Serial.print('\t');  
Serial.print(temperatura3,2);  
Serial.print('\t');  
Serial.print(Distancia1,1);  
Serial.print('\t');  
Serial.print(Distancia2,1);  
Serial.print('\t');  
Serial.print(Distancia3,1);  
Serial.print('\t');  
Serial.println(Caudal,3);  
delay(602);  
}
```

## Calibración de equipo

- Calibración de sensores de distancia.

La calibración de los sensores de distancia se realizó para una pendiente  $J=0.01167$ , y consistió en los siguientes pasos:

- Abastecer de bajos niveles de agua al canal.
- Esperar a lo menos 5 minutos para que el agua en el canal alcance el estado de régimen permanente.
- Tomar una medición de la altura de escurrimiento, de forma manual, utilizando la regla ubicada al costado del sensor S2, el cual se tomara como referencia. Además se registra el tiempo en el que se alcanza dicha altura.
- Los pasos anteriores se realizan de forma iterativa, para distintas alturas de escurrimiento, las que van desde niveles bajos que son abastecidos por manguera, hasta los niveles más altos que se logran gracias al uso de bombas.
- Para cada medición manual, se tiene registro de las lecturas entregadas por los 3 sensores de distancia, las cuales se grafican para obtener la ecuación de calibración de cada uno de los sensores, entregando la lectura en milímetros.

- Calibración del vertedor.

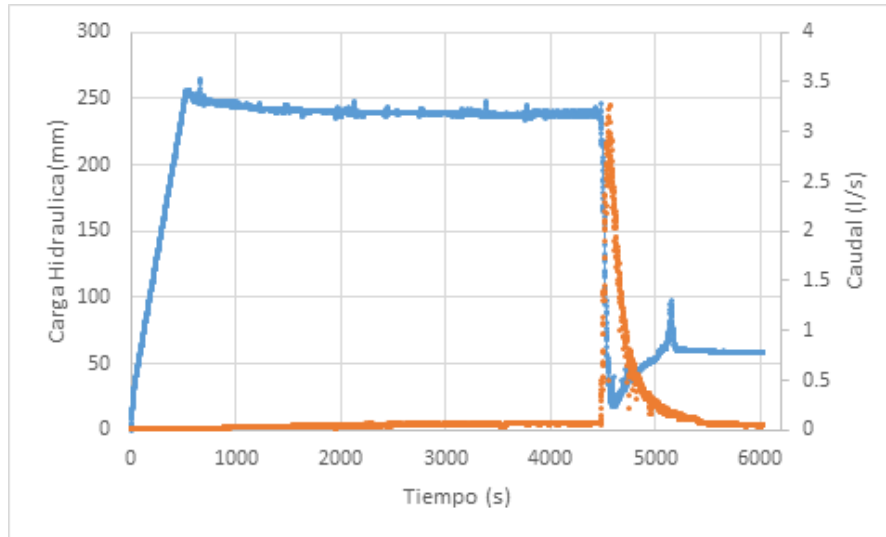
Para la calibración del vertedor triangular se realizaron los siguientes pasos:

- Abastecer de agua al canal, mediante la válvula de alimentación de agua.
- Esperar a lo menos 5 minutos para que el agua en el canal alcance estado de régimen permanente.
- Registrar altura de escurrimiento en el sensor S3 y tomar medición de caudal mediante un recipiente de volumen conocido y cronometro.
- Repetir los pasos anteriores, generando aumentos y descensos del nivel de agua abastecidos por manguera o por las bombas.
- Para cada altura de escurrimiento se tiene un caudal asociado, de esta forma se grafican los datos de las mediciones para obtener la curva de descarga del vertedor, que entrega el caudal que circula por el canal en litros/segundo.

## **ANEXO B:**

### **Resultados**

La Figura B1 muestra el desarrollo del ensayo para una relación geométrica  $B/H = 1/4$ .

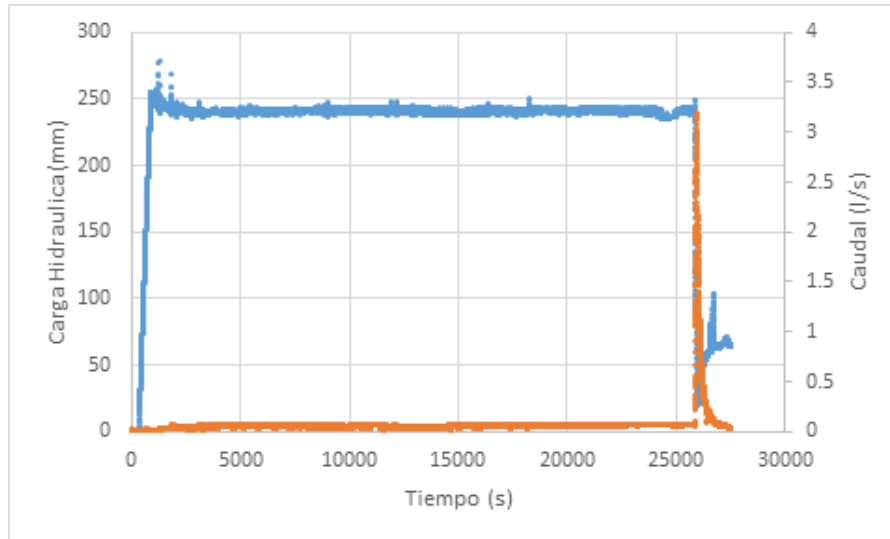


**Figura B1: Dinámica del caudal y carga hidráulica durante ensayo  $B/H=1/4$ .**

Para este ensayo el colapso del terraplén comenzó a los 5000 segundos del inicio del ensayo, prolongándose hasta 5300 segundos. El peak del colapso se alcanza en el segundo 5050, y el caudal máximo fue de 3.3 ( $l/s$ ).

El caudal de tubificación medido fue de 0.039 ( $l/s$ ) y se realizó a una temperatura ambiente con un mínimo de  $14^{\circ}C$  y un máximo de  $16^{\circ}C$ .

La Figura B2 muestra el desarrollo del ensayo para una relación geométrica  $B/H = 1/2$ .



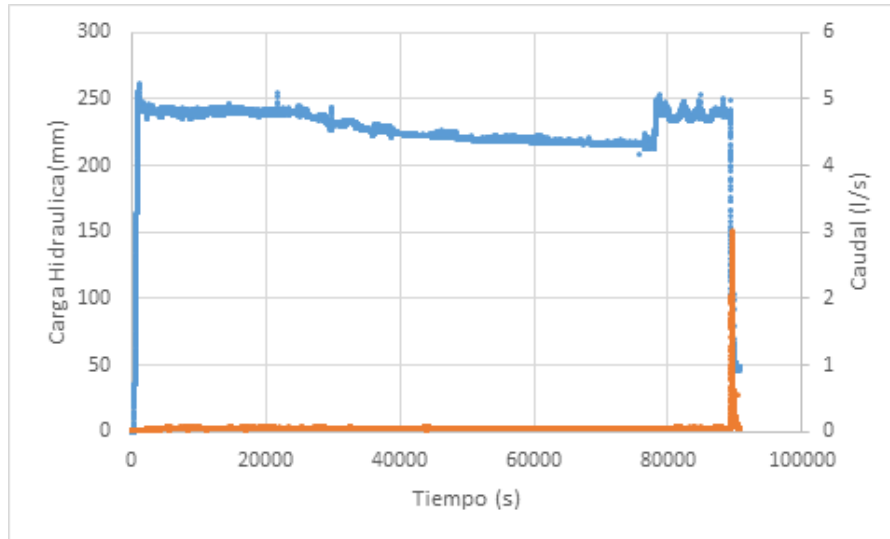
**Figura B2: Dinámica del caudal y carga hidráulica durante ensayo  $B/H=1/2$ .**

Para este ensayo el colapso del terraplén comenzó a los 25800 segundos del inicio del ensayo, prolongándose hasta 26100 segundos aproximadamente. El peak del colapso se alcanza en el segundo 25950, y el caudal máximo fue de 3.1 ( $l/s$ ).

En este ensayo, el caudal de tubificación medido fue de 0.033 ( $l/s$ ) y la temperatura ambiente tuvo un mínimo de 15°C y máximo de 16°C.



La Figura B3 muestra el desarrollo del ensayo para una relación geométrica  $B/H = 1$ .



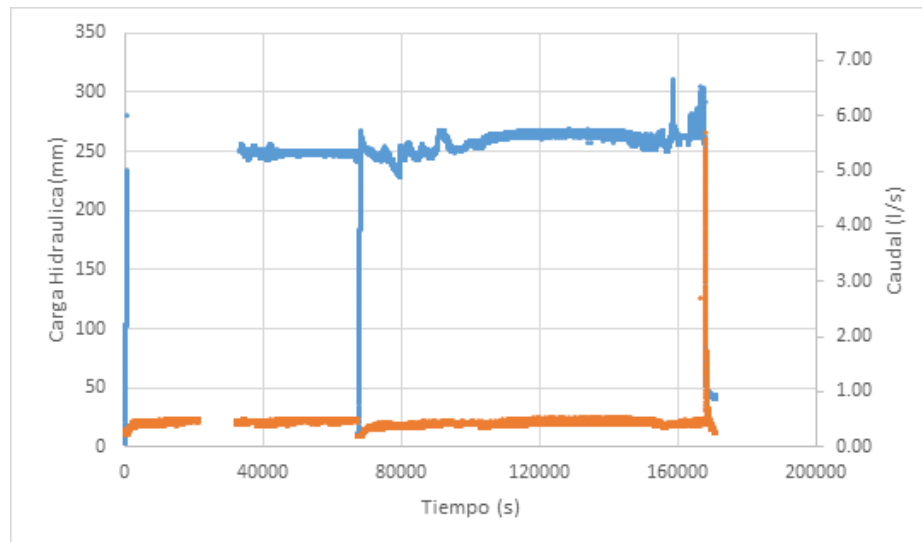
**Figura B3: Dinámica del caudal y carga hidráulica durante ensayo  $B/H=1$ .**

Se puede apreciar un descenso de la carga hidráulica entre los 30000 y 70000 segundos de ensayo. Esto se debe a que este tiempo corresponde a la noche, en la cual es difícil mantener el nivel de carga debido a que no se cuenta con una persona atenta para regularlo. El aumento de carga hidráulica cercano a los 80000 segundos, es debido a que ahí se llega a aumentar el nivel de carga hidráulica para mantener el 15% de borde libre.

Para este ensayo el colapso del terraplén comenzó a los 89400 segundos del inicio del ensayo, prolongándose hasta 89800 segundos aproximadamente. El peak del colapso se alcanza en el segundo 89500, y el caudal máximo fue de 3 ( $l/s$ ).

El caudal de tubificación medido fue de 0.032 ( $l/s$ ) y la temperatura ambiente tuvo un mínimo de  $12^{\circ}\text{C}$  y un máximo de  $16^{\circ}\text{C}$ .

La Figura B4 muestra el desarrollo del ensayo para una relación geométrica  $B/H = 3/2$ .



**Figura B4: Dinámica del caudal y carga hidráulica durante ensayo  $B/H=3/2$ .**

Se puede ver que en el comienzo del ensayo se alcanza el nivel de carga hidráulica, pero después no se tiene registro hasta antes del segundo 40000 aproximadamente. Esto se debe a que el sensor de distancia S1, presenta problemas y no arroja mediciones coherentes, por lo que dichos datos se omitieron.

Más adelante en el segundo 70000 aproximadamente, se puede apreciar un aumento de la carga hidráulica debido a que se había pausado el ensayo por algunos días y ese instante corresponde al momento en que se reanuda el ensayo y se agregó agua nuevamente al canal de ensayos.

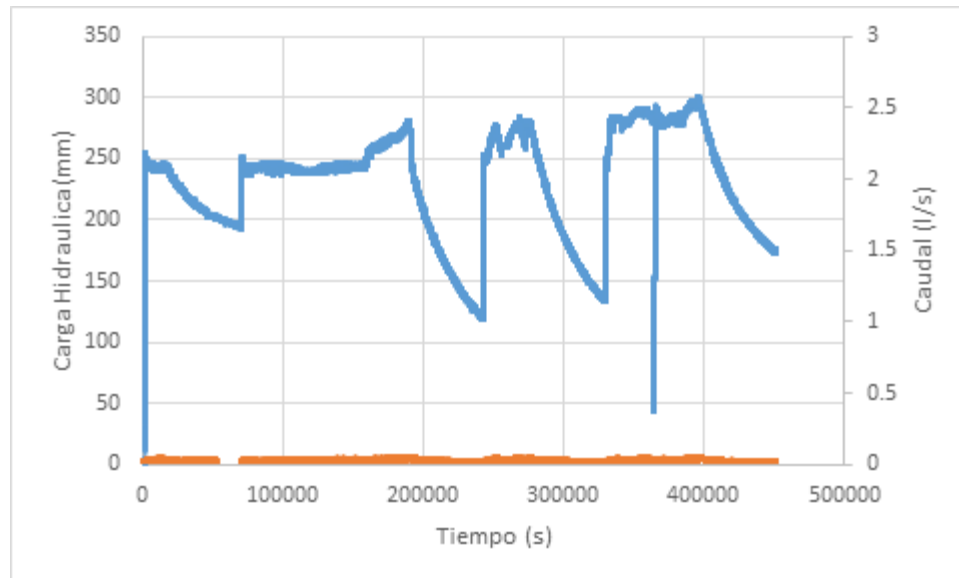
Desde el segundo 120000 en adelante se puede ver que la carga hidráulica aumentó, esto porque se disminuyó el borde libre, dejando solo un 10%.

En este ensayo el colapso del terraplén inicia a los 167800, y termina a los 168100 segundos aproximadamente. El peak del colapso se alcanzó a los 167850 segundos, y el caudal máximo fue de 5.5 (l/s).

En este ensayo debido a que se utilizaron dos niveles de carga hidráulica, se obtuvieron dos caudales de tubificación: 0.022 (l/s) para el nivel de carga con un borde libre de 15%, y 0.027 (l/s) para el que tenía un borde libre del 10%.

Este ensayo se realizó a una temperatura ambiente cuyo mínimo fueron 8°C y el máximo 20°C.

La Figura B5 muestra el desarrollo del ensayo para una relación geométrica  $B/H = 2$ .



**Figura B5: Dinámica del caudal y carga hidráulica durante ensayo  $B/H=2$ .**

Se distinguen 4 descensos del nivel de carga hidráulica, que corresponden a las noches y anteriormente ya se explicó el motivo de los descensos de carga. Además se registraron caudales muy bajos cuando se tenía baja temperatura, siendo esta una variable no analizada en este estudio, pero que juega un papel fundamental.

En este terraplén se aumentó la carga hidráulica al nivel de no dejar borde libre, en donde solo se alcanzó un caudal de tubificación que produjera un leve arrastre de material del terraplén. Es por esto que solo se alcanzó la falla de la mitad del talud aguas abajo y luego no se distinguió avance durante al menos 2 días. Debido a esto se asume que el terraplén con relación  $B/H=2$  o superior, no colapsa.

En este ensayo se utilizaron 3 niveles de carga hidráulica, obteniendo 3 caudales de tubificación: 0.017 ( $l/s$ ) para un borde libre de 15%, 0.019 para un 10% y 0.021 para un nivel de carga sin borde libre. Cabe destacar que fue posible observar que el caudal de 0.021 ( $l/s$ ), fue el único capaz de generar arrastre de partículas.

La temperatura ambiente tuvo un mínimo de  $6^{\circ}C$  y un máximo de  $16^{\circ}C$ .