

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



Profesor Patrocinante: Luis Santana Oyarzo

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FALLA DEL TALUD
EN TERRAPLENES DE ARENA

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

DAVID JACOB ARRATIA CISTERNA

Concepción, Marzo 2016

AGRADECIMIENTOS

Mis primeros agradecimientos van dirigidos a Jehová Dios, quien hizo posible que yo pudiera estudiar esta carrera profesional dándome la inteligencia, y ha estado a mi lado guiándome y ayudándome fielmente durante estos largos años de universidad. Porque de él, y por él, y para él son todas las cosas, a él sea la Gloria por los siglos. Amén. (Romanos 11:36).

A mis padres, campesinos quienes con esfuerzo y sacrificio siempre han luchado para darme lo mejor en cuanto estuviera a su alcance, para que yo pudiera lograr un nivel de educación mas avanzado, muchas gracias por su apoyo incondicional.

Agradezco también a toda mi familia Arratia, partiendo por mis abuelos, tíos(as) y primos(as), quienes de una u otra forma han estado ahí para apoyarme y prestarme su ayuda cuando lo he necesitado. Especialmente a mi tía Sonia, y tío Isaac con quien he vivido estos años de universidad y he sido considerado como un hijo más para ellos.

Una mención especial a mi polola Daniela Villalobos, la persona que ha sabido entregarme su apoyo, ternura, cariño y amor incondicional durante estos años de estudio. Y también ha estado ahí entregándome la tranquilidad para terminar este proyecto de título en forma satisfactoria, muchas gracias amor.

Como no agradecer también a mis amigos de universidad: Bryan, Gabriel y Albert con quienes compartimos momentos de alegría, nervios, estrés y logros personales, gracias por su amistad.

Por último no puedo dejar de agradecer a mi profesor patrocinante Luis Santana, quien me ha guiado y colaborado en el desarrollo de este proyecto de título con compromiso y una excelente disposición, muchas gracias.

INDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCION.....	3
1.1. Objetivos.....	5
1.1.1. Objetivo general	5
1.1.2. Objetivos específicos.....	5
2. METODOLOGIA.....	6
2.1. Terraplenes de arena con sistema de medición.....	6
2.1.1. Material de ensayo.....	6
2.1.2. Construcción del terraplén.....	7
2.1.3. Disposiciones generales antes del ensayo experimental.....	8
2.1.4. Sistema de medición.....	8
2.2. Ensayos experimentales	11
2.2.1. Protocolo de ensayo.....	11
2.2.2. Seguimiento de la falla del talud	12
2.3. Comportamiento de falla del talud en terraplenes de arena.....	12
2.3.1. Geometría del talud	12
2.3.2. Flujo del medio poroso y carga hidráulica	13
2.3.3. Análisis temporal entre variables geométricas e hidráulicas.....	13
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS	14
3.1. Sistema de medición	14
3.2. Ensayos experimentales	14
3.2.1. Análisis cualitativo de la falla del talud.....	15
3.3. Análisis cuantitativo de la falla del talud.....	19
3.3.1. Análisis de geometría del talud	19

3.3.2. Comportamiento hidráulico del flujo del medio poroso.....	21
3.3.3. Análisis temporal entre variables geométricas e hidráulicas.....	24
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	26
4.1. Conclusiones	26
4.2. Recomendaciones	27
REFERENCIAS	28
ANEXO A	29
Protocolos de calibración y Códigos de software.....	29
ANEXO B	36
Resultados.....	36
ANEXO C	41
Registros de Videos, fotografías y corridas experimentales.....	41

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Terraplenes de ensayo habilitados, con sus medidas en centímetros.	7
Figura N° 2. Esquema del canal con sus componentes de medición y variables medidas.	8
Figura N° 3. Mecanismo de falla en talud de terraplenes.	16
Figura N° 4. Mecanismo de falla en terraplén de talud 4/1.	18
Figura N° 5. Falla en talud de terraplenes.	19
Figura N° 6. Falla en terraplén de talud 4/1.	20
Figura N° 7. Comportamiento del caudal y la carga hidráulica en terraplén con talud 2/1.	21
Figura N° 8. Tiempo medio para llegar al estado de régimen permanente respecto a los taludes predefinidos.	23
Figura N° 9. Relación entre variables geométricas e hidráulicas.	24

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Resultados registrados durante ensayos experimentales para taludes predefinidos. . 14

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FALLA DEL TALUD EN TERRAPLENES DE ARENA

Autor: David Jacob Arratía Cisterna

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

Correo electrónico: david.91.-@hotmail.com

Profesor patrocinante: Luis Santana Oyarzo

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

Correo electrónico: lsantana@ubiobio.cl

RESUMEN

El presente informe muestra la incidencia de la geometría en la falla del talud de terraplenes de arena, mediante ensayos experimentales llevados a cabo en un canal de laboratorio, a carga hidráulica constante.

Cuatro ensayos experimentales de terraplenes, con su talud H/V predefinido, fueron empleados para realizar un seguimiento y análisis del comportamiento de la falla del talud, a través de un sistema de medición implementado. Estos taludes predefinidos para cada terraplén son el 3/2, el 2/1, el 3/1 y el 4/1.

El principal resultado muestra que los terraplenes con talud menor a 3 presentaron el mecanismo de falla por tubificación (piping) de flujo disperso, provocando 3 taludes de falla y caudales en estado de régimen permanente mayores. Mientras que el terraplén con talud mayor a 3, presentó un mecanismo de falla por tubificación de flujo concentrado con socavación (más importante) y tubificación de flujo disperso, que provocaron 2 taludes de falla y un caudal en régimen permanente menor. El terraplén con talud igual a 3 no presentó falla durante el ensayo.

Del trabajo realizado se concluye que el terraplén con talud igual a 3 es un talud estable para la arena, y un talud de transición entre un tipo de mecanismo de falla a otro.

Palabras Claves: Terraplén, falla del Talud, carga hidráulica.

6792 Palabras texto + 8 Figuras/Tablas*250 + 2 Figuras/Tablas*500= 9792 Palabras Totales

EXPERIMENTAL STUDY SLOPE FAILURE IN THE SAND EMBANKMENTS

Author: David Jacob Arratia Cisterna

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

E-mail: david.91.-@hotmail.com

Advisor: Luis Santana Oyarzo

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

E-mail: lsantana@ubiobio.cl

ABSTRACT

This report shows the incidence of geometry, slope failure in sand embankments, through experimental tests conducted in a laboratory flume, at constant hydraulic load.

Four experimental tests of embankments, with its slope H/V preset, were employed to track and analyze the behavior of slope failure, through a measurement system implemented. These predefined for each embankment slopes are 3/2, 2/1, 3/1 and 4/1.

The main result shows that the embankments with fewer slopes to 3 showed the failure mechanism by tubificación (piping) dispersed flow, causing three slopes failure and flows in state higher steady state. While the embankment slope greater than 3, present a mechanism fails tubificación concentrate flow and scour tubificación dispersed flow, which caused 2 slopes failure and flow in less steady. Fill with slope equal to 3 not present during the test fails.

The work is concluded that the embankment with slope equal to 3 is a stable slope for sand, and a slope of transition from one type to another failure mechanism.

Keywords: Embankment, slope failure, hydraulic load.

1. INTRODUCCION

En Chile los terraplenes, son obras estructurales de importancia ingenieril de primer orden en el área de suelos, que en su concepción geométrica están constituidos por una corona, un núcleo, y sus taludes. Estos son fundamentales en presas de tierra, canales, obras de protección contra inundaciones, como en carreteras contra la acción de ríos, zonas urbanas, etc., y en defensa contra socavaciones. El colapso de estos influye directamente en la seguridad y el funcionamiento de estas estructuras (Li y Arroyo, 2011).

Es por ello que es de suma importancia el tipo de suelo con el que se construyen, generalmente en las obras de protección se utilizan materiales granulares como arena y grava, principalmente por su fácil manejo, y también por ser abundante, económico y fácil de obtener en comparación a otros tipos de suelo.

Los terraplenes, no son diseñados para tomar carga hidráulica a excepción de los que funcionan en embalses, por eso el estudio de los daños que provoca el agua en estas obras juega un rol importante, al generar aumento de los esfuerzos de corte en el talud de aguas abajo. Este aumento del esfuerzo de corte (ya que el agua fluye a través de los poros del suelo), ocasiona fuerzas mayores a la capacidad resistente del suelo, produciendo deslizamiento o desprendimiento del material que constituye el suelo, generando la tubificación o más conocido como piping (García y Uchimura, 2007). De acuerdo a lo anterior se produce la falla del talud que es el inicio del colapso del terraplén, ya que pierde estabilidad el talud al perder su geometría inicial, la cual genera la deformación del talud aguas abajo, luego el material es desplazado para finalmente colapsar la obra, perdiendo su funcionalidad, lo que a veces conlleva a consecuencias nefastas como producir pérdidas humanas y económicas, como ocurrió en la tragedia en el estero Minto (Schiessler, 2013).

Gutiérrez (2015) estudió el colapso de terraplenes de arena bajo los efectos de carga hidráulica constante, haciendo variar las relaciones de coronamiento (B)/altura (H) del terraplén a talud constante de uso común H/V igual a 3/2, sin embargo no se abordó la variable del talud y su incidencia en el colapso del terraplén. También es importante evaluar el comportamiento de la falla del talud para evitar el posterior colapso del terraplén.

Estos fundamentos hacen ver la importancia de los terraplenes en las obras civiles y la relevancia de hacer estudios sobre la falla del talud. Por ello este proyecto de título busca entregar un estudio de la incidencia de la geometría en la falla del talud de terraplenes de arena, mediante un análisis temporal y espacial. Para ello se realizaron ensayos experimentales de terraplenes de arena, realizados en un canal de laboratorio, utilizando una geometría de terraplén predefinida.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Evaluar la incidencia de la geometría en la falla del talud de terraplenes de arena, mediante ensayos experimentales a carga hidráulica constante.

1.1.2. Objetivos específicos

- Habilitar el sistema de medición de temperatura, caudal, altura, y geometría del talud para ensayos experimentales, con terraplenes de arena de talud predefinido.
- Realizar el seguimiento de la falla del talud mediante ensayos experimentales a carga hidráulica constante.
- Analizar el comportamiento espacial y temporal de la falla del talud a través de los datos registrados.

2. METODOLOGIA

En esta etapa con el fin de concebir el estudio propuesto, se emplearon metodologías, donde cada una de éstas, está vinculada a su objetivo definido (específico).

2.1. Terraplenes de arena con sistema de medición

Los terraplenes de arena propuestos y el sistema de medición dispuestos en los ensayos experimentales fueron sometidos a carga hidráulica constante. Los terraplenes fueron construidos con un cierto material, una geometría y disposiciones generales, que son explicados en los puntos 2.1.1 al 2.1.3. En cambio el sistema de medición propuesto para el seguimiento de variables como carga hidráulica, caudal, temperatura, etc., fue utilizado en un canal de laboratorio con el fin de registrar la falla del talud. El sistema de medición se especifica en el punto 2.1.4.

2.1.1. Material de ensayo

En todos los ensayos experimentales de los terraplenes se ocupó como material de construcción arena limpia tipo Biobío de color negro, con un coeficiente de uniformidad $C_u=1.7$ lo que indica que es una arena muy uniforme, y un coeficiente de curvatura $C_c=1.7$, por ende es una arena bien graduada. Además su diámetro medio fue de 0.67 mm según granulometría (Gutiérrez, 2015).

2.1.2. Construcción del terraplén

La Figura N° 1 muestra las dimensiones geométricas de los terraplenes con su talud H/V predefinido, dispuestos para los ensayos experimentales con sus medidas en centímetros, de su ancho en la base y altura nominal de todos los terraplenes. Fueron empleados taludes H/V de 3/2, 2/1, 3/1 y 4/1.

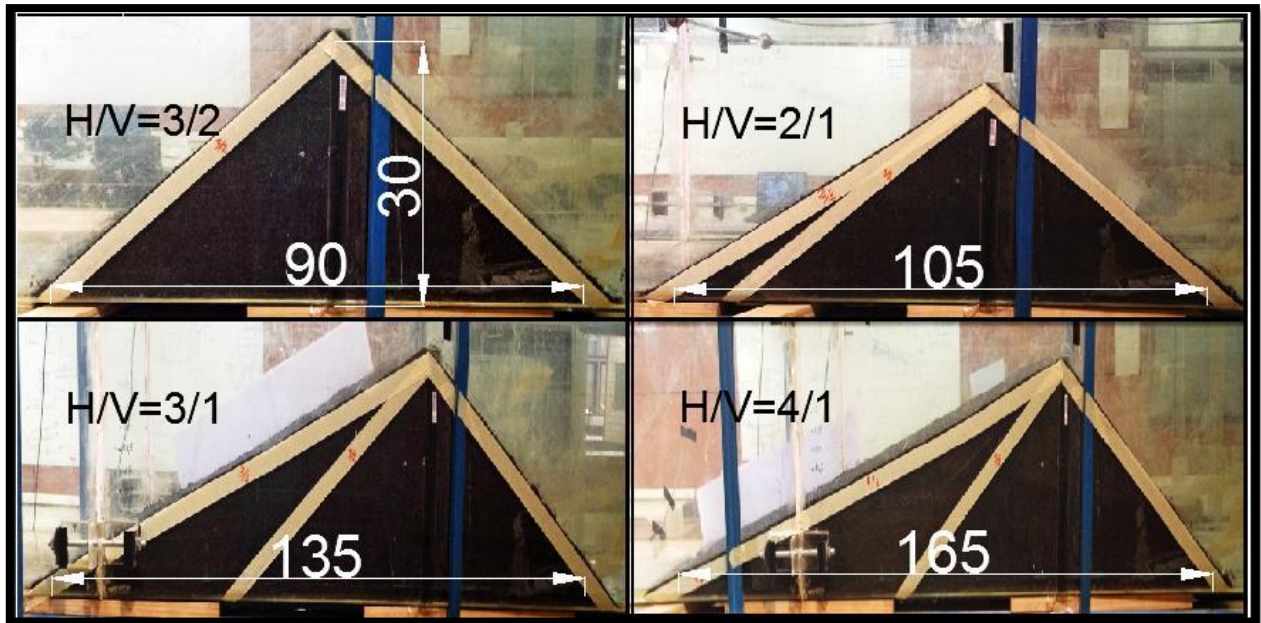


Figura N° 1. Terraplenes de ensayo habilitados, con sus medidas en centímetros.

La construcción de los terraplenes se realizó en un canal de laboratorio, donde la arena se saturó y se colocó en una serie de capas horizontales con un espesor de 2 centímetros, y cada una de estas se compactó con una varilla de apisonamiento manual para lograr una buena densificación, repitiendo este procedimiento hasta completar la altura del terraplén de 30 centímetros en todos ellos. Se utilizó una Corona del terraplén (B) nula, debido a que el estudio se focalizó en la falla del talud, en cuanto a la relación del talud horizontal/vertical (H/V) que se utilizó aguas arriba es de $3/2$, ya que concierne a la máxima inclinación permitida para carreteras (MOP, 2013), y el talud de aguas abajo, se fue cambiando partiendo del máximo permitido.

Los terraplenes de arena fueron construidos correctamente y discrepan en un 1.5% de los taludes teóricos, no obstante, esta diferencia no se consideró para el análisis, por lo que se tomaron en cuenta sólo los valores teóricos nominales.

2.1.3. Disposiciones generales antes del ensayo experimental

Antes de comenzar el ensayo experimental de cada terraplén se esperó al menos 24 horas con la arena saturada, y con agua en el canal aguas abajo del terraplén. El propósito de esperar al menos 24 horas es para que después de construido el terraplén, el agua que sobra dentro de este drene en forma natural. Y al verter agua, aguas abajo del terraplén es para romper la tensión capilar que está presente, por el vertedor dispuesto en el canal, manteniendo un gradiente hidráulico constante, es decir, un nivel de referencia inicial plano.

2.1.4. Sistema de medición

La Figura N° 2 muestra el esquema del canal de laboratorio con su sistema de medición empleado en los ensayos experimentales, con sus medidas respectivas y con el terraplén de ensayo habilitado. Se observa la disposición de los componentes principales del sistema de medición, que son: Sensores de distancia (SD) y temperatura (ST), cámaras (CamF, CamV) y vertedor triangular con abertura de 90°, para medir: alturas de escurrimiento de agua, temperaturas ambiente y de agua, registros fotográficos y videos de los ensayos, y caudal de salida respectivamente.

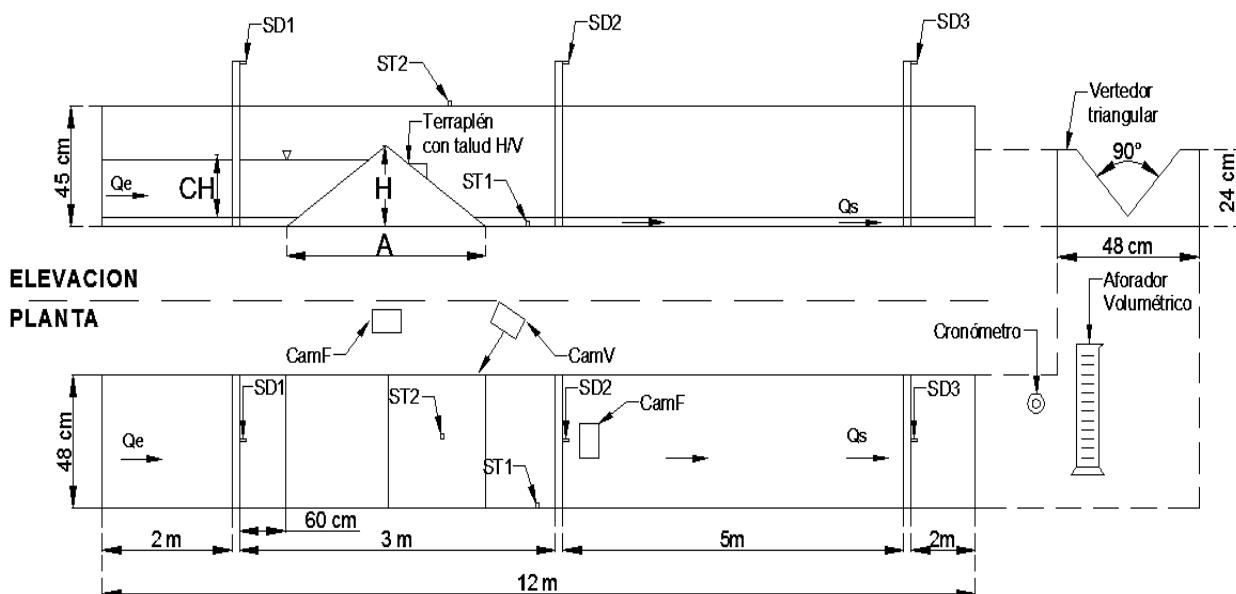


Figura N° 2. Esquema del canal con sus componentes de medición y variables medidas.

a) Componentes del sistema de medición

- **Sensores de distancia:** Se utilizaron 3 sensores de distancia (SD1, SD2 y SD3), como muestra la figura N° 2, que están ubicados antes del terraplén, al pie del talud y antes del vertedor triangular a la salida del canal. Estos son ultrasónicos de modelo PING)) TM#28015 con un nivel de medición de 0.02 a 3 metros y una precisión menor a 0.2 milímetros. Dichos sensores se conectan a microcontrolador modelo Mega 2560 y éste a su vez se conecta a un computador a través del puerto serial USB. Las mediciones pueden ser vistas en tiempo real mediante el Software Arduino, a través del programa correcto adjunto en el Anexo A.

Las ecuaciones (1), (2) y (3) se emplearon para cada sensor con el fin de estimar el nivel de agua o escurrimiento. Estas fueron obtenidas a través de la calibración de estos sensores realizadas en laboratorio según protocolo definido en el Anexo A.

$$\text{Sensor 1: } y = \frac{698.48-x}{0.9842} \quad R^2 = 1 \quad (1)$$

$$\text{Sensor 2: } y = \frac{688.58-x}{1.0010} \quad R^2 = 1 \quad (2)$$

$$\text{Sensor 3: } y = \frac{734.51-x}{0.9741} \quad R^2 = 0.9999 \quad (3)$$

Donde x es la altura observada en (mV) con un error estimado menor a 0.05 mV, e y es la altura de escurrimiento en (mm).

- **Videos y fotografías:** Se utilizó una cámara para fotografías que muestra la Figura N° 2 como CamF, esta es de 8 Megapíxeles de un teléfono celular iPhone 4S, donde estos archivos se guardaron en formato JPEG (.JPG). También una cámara para video que muestra la Figura N° 2 como CamV, de marca JVC modelo Optical 22x GR-AX730, donde se añadió un convertidor análogo-digital para que los registros se guardaran directamente al computador, y estos archivos se guardaron en formato (.mp4).

Los registros fotográficos se tomaron con una frecuencia aproximada de 30 minutos y desde dos puntos en los que se dispuso la cámara fotográfica como lo muestra el esquema del canal: en forma transversal al terraplén a 3 metros de distancia aproximadamente, mostrando el talud del terraplén aguas abajo y en forma transversal a la cara del talud de aguas abajo.

Los registros de video se tomaron a una distancia que varió entre 30 a 40 cm desde el canal, y entre 25 a 30 cm desde el pie del talud aguas abajo, enfocándose en el centro de este para ver los cambios producidos durante el ensayo. Los videos que se mencionan fueron modificados y guardados a una velocidad de reproducción de 64 veces (64x) más rápido de lo original.

Estos registros de videos y fotografías se adjuntan en el Anexo C.

- **Vertedor:** Se utilizó un vertedor triangular de acrílico con una abertura de 90° elaborado en el laboratorio

La ecuación (4) muestra el resultado de la calibración del vertedor, según protocolo definido en el Anexo A.

$$Q = -4495.10h^3 + 9886.70h^2 - 7255.60h + 1776.60 \quad R^2 = 0.9986 \quad (4)$$

Donde h es el registro entregado por el sensor tres (SD3) en (mm) y Q es el caudal medido por la curva de descarga en (l/s).

- **Temperatura:** Se usaron 2 sensores de temperatura LM 35 con precisión de 0.05 °C, uno dispuesto en el ambiente y el otro en el agua, ambos previamente calibrados. El sensor de ambiente corrige los sensores de distancia en tiempo real, a través del programa Arduino adjunto en el Anexo A.
- **Aforador y cronómetro:** Se utilizó un aforador de volumen conocido con una precisión menor a los 10 ml y un cronómetro con un error menor a 16 centésimas de segundo, con los cuales se midió el caudal de salida del canal durante los ensayos.

b) Variables medidas

- **Carga hidráulica (CH):** Se determina como la diferencia entre el sensor uno (SD1) y el sensor dos (SD2), por ende el canal se debió abastecer con agua para mantener constante dicha carga en cada ensayo, y la cantidad de agua que entra al canal se reguló en forma manual utilizando una válvula tipo llave que llena un estanque rectangular de 2 m² de área, cuyo propósito es concebir que el fluido ingrese al canal con la menor turbulencia posible, para que todo el ensayo sea llevado a cabo sin variación de las alturas de agua, para que sean tomadas por los sensores correctamente.
- **Caudal:** El caudal que genera el colapso del terraplén fue estimado a partir de la ecuación número (4) en función de la altura de escurrimiento sobre el vertedor, donde se relaciona la lectura obtenida por el sensor número tres (SD3).

En cambio el caudal de salida en estado de régimen permanente se obtiene mediante aforos volumétricos, ya que debido a la magnitud de los caudales, la ecuación (4) del vertedor no presenta la precisión necesaria. (Gutiérrez, 2015).

Nota: El caudal de salida es el flujo de agua que pasa a través del terraplén, y en estado de régimen permanente es igual al caudal de entrada (Qe).

2.2. Ensayos experimentales

Cuatro ensayos experimentales de terraplenes de arena con su talud H/V predefinido, fueron llevados a cabo para realizar el seguimiento de la falla del talud, modificando el protocolo definido por Gutiérrez (2015). La pendiente longitudinal del canal experimental se mantuvo constante e igual en todas las corridas experimentales.

2.2.1. Protocolo de ensayo

- ✓ Tener el terraplén de arena habilitado 24 horas antes del ensayo.
- ✓ Añadir agua, aguas abajo del terraplén de arena, para que así los sensores de altura entreguen lecturas sobre el umbral del vertedor.
- ✓ Conectar el equipo de medición (placa Arduino) al computador.
- ✓ Encender el equipo de medición y se verifica que los sensores se ejecuten apropiadamente durante un lapso de 5 minutos, así también tener dispuestas las cámaras del registro fotográfico y video.
- ✓ Iniciar la corrida experimental abriendo la válvula de alimentación de agua a tasa constante, hasta que alcance un borde libre del 15% de la altura del terraplén.
- ✓ Conservar la carga hidráulica constante, regulando la válvula de alimentación de agua al canal.
- ✓ Medir el caudal de salida del canal en el vertedor cada 15 minutos o menos a través de aforo volumétrico.
- ✓ Se toma registro continuo del talud durante el ensayo en formato video y cada 30 minutos en formato fotográfico.
- ✓ Registrar el tiempo en que ocurre la falla del talud aguas abajo.
- ✓ Termina el ensayo 7 horas posterior a la falla del talud u ocurre el colapso del terraplén.
- ✓ Guardar el registro de los datos de los sensores en un archivo texto (.txt), el video en formato (.mp4) y el de fotografías en formato (.JPG).
- ✓ Desconectar el equipo de medición del computador.
- ✓ Limpiar el canal de laboratorio.

Cabe añadir que las señales de salida de los sensores se conectan a una placa Arduino, y ésta se comunica a un computador donde las mediciones son observadas en tiempo real, luego son registradas y guardadas como datos para su posterior estudio. El código Arduino empleado para registrar las mediciones de sensores y vertedor triangular se encuentran adjuntos en el Anexo A.

Se entregan registros de tiempo, temperatura ambiente y de agua, nivel de escurrimiento de agua, caudal, y carga hidráulica (ver punto 2.1.4). Los valores obtenidos se muestran en forma tabulada (Tabla N° 1) para su análisis.

2.2.2. Seguimiento de la falla del talud

Mediante la observación durante los ensayos experimentales de los terraplenes de arena con sus distintos taludes y también a través de la revisión de las fotografías y videos registrados, se realiza un seguimiento de la falla del talud, describiendo en forma cualitativa su mecanismo de falla.

2.3. Comportamiento de falla del talud en terraplenes de arena.

Para analizar la falla del talud en los terraplenes de arena, se procede a mostrar los resultados obtenidos durante cada ensayo, para luego evaluar en forma cuantitativa el comportamiento espacial y temporal de la falla, identificando las siguientes categorías: geometría del talud, flujo del medio poroso con carga hidráulica y tiempos de falla. Para ello es empleada la forma gráfica para cada uno de los ensayos cruzando la información generada, mediante el uso de métodos de correlación de variables, observando el grado de asociación sistemática entre ellas y mostrando la línea de ajuste o tendencia.

2.3.1. Geometría del talud

Por medio de la disposición de papel milimetrado en la pared del canal, en el talud aguas abajo del terraplén en cada uno de los ensayos experimentales, se delineó la forma geométrica que adquiriría este luego de ocurrida la falla del talud. El cambio geométrico del talud se corroboró a través de los registros tomados en forma fotográfica y/o video.

Se muestran figuras de los registros fotográficos tomados en cada ensayo experimental, con los cambios de la geometría del talud.

2.3.2. Flujo del medio poroso y carga hidráulica

El flujo del medio poroso, que es el caudal medio que atraviesa el terraplén, se estima usando la ecuación de continuidad (5), para el volumen de control (V) aguas abajo del terraplén. La ecuación (5) es válida para el estado transiente y cuando el flujo del medio poroso tiende al valor del caudal aforado en régimen permanente, donde la altura del flujo $h(t)$ se hace constante e independiente del tiempo, así ΔV tiende a cero.

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_{mp} - Q_s \quad , \text{ donde } \Delta V = A h(t) \quad (5)$$

Dónde Q_s es el caudal de salida obtenido por los aforos volumétricos, Q_{mp} es el caudal del medio poroso obtenido por la ecuación, A es el área del canal aguas abajo del terraplén (volumen de control), $h(t)$ es la variación de altura de agua entregada por el sensor 2 (SD2), por lo tanto $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ es la variación del volumen de agua en el tiempo, aguas abajo del terraplén.

La carga hidráulica fue estimada por diferencia de nivel de agua $h(t)$, aguas arriba y aguas abajo del terraplén (ver punto 2.1.4).

El comportamiento del caudal de salida, del medio poroso y la carga hidráulica se muestra en forma gráfica en el tiempo.

2.3.3. Análisis temporal entre variables geométricas e hidráulicas

Los ensayos experimentales que se realizaron, se llevaron a cabo con distintos tiempos de llenado para alcanzar el nivel de carga hidráulica establecida, por ello no era factible analizar el tiempo de falla y su comportamiento en cada terraplén con su talud predefinido, ya que no poseían las mismas condiciones de ensayo. Por lo señalado anteriormente se hizo necesaria una razón adimensional entre el tiempo de falla (t_f) y el tiempo de llenado (t_{ll}) definida como $\frac{t_f}{t_{ll}}$, con el fin de establecer comparaciones entre los terraplenes de talud predefinido.

Se muestra en forma gráfica respecto a la geometría del talud predefinida, el comportamiento de la razón adimensional $\frac{t_f}{t_{ll}}$, los caudales de salida en el tiempo en que ocurre la falla, se llega al nivel de carga hidráulica y cuando alcanza el estado de régimen permanente, y se establecen relaciones entre estas variables.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el presente Capítulo se muestran los resultados obtenidos correspondientes a cada una de las metodologías planteadas en el capítulo 2, luego de realizados los ensayos experimentales.

3.1. Sistema de medición

Los ensayos experimentales, se llevaron a cabo con su sistema de medición habilitado funcionando sin presentar problema de ruido, en ninguno de los sensores ni componentes de medición.

En cuanto al nivel de carga hidráulica que se estableció a un 15% del borde libre del terraplén, en algunos ensayos por su largo tiempo de duración, fueron ensayados durante la noche, donde fue imposible mantener en forma constante la carga hidráulica, esto debido a que la válvula tipo llave que alimentaba el canal se operaba en forma manual, por ende no se mantuvo ese nivel en esos periodos de tiempo.

3.2. Ensayos experimentales

La Tabla N° 1 muestra los resultados del caudal de salida en estado régimen, de la carga hidráulica y de las temperaturas durante los ensayos experimentales de los terraplenes con talud predefinido.

Tabla N° 1. Resultados registrados durante ensayos experimentales para taludes predefinidos.

N°	H/V	C.H. (mm)	Caudal de salida en régimen Qs (l/s)	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura Agua (°C)	Rango térmico (°C)
1	3/2	248	0.0260	26 - 28	21 - 24	2 - 5
2	2/1	248	0.0211	19 - 27	19 - 22	1 - 5
3	3/1	248	0.0139	18 - 27	19 - 23	0 - 5
4	4/1	248	0.0150	15 - 26	17 - 22	0 - 5
5	4/1	248	0.0150	21 - 29	19 - 25	2 - 6

En la Tabla N° 1 se presenta el ensayo N° 5 que tiene la misma geometría del terraplén N°4, debido a que cuando se llevó a cabo el ensayo N°5 (el que se tomó como fallido primeramente), se registró una falla distinta a los otros terraplenes ensayados, y se pensó que había sido efecto de

un sismo que había ocurrido la noche anterior. Al repetir el ensayo, se observó el mismo mecanismo, por lo que el sismo no afectó la falla del talud del terraplén de arena.

La Tabla N° 1 muestra que el nivel de carga hidráulica en todos los ensayos experimentales se mantuvo en los 248 mm, con una variación menor a 2 mm (durante el día), equivalente al 15% del borde libre del terraplén.

Los caudales de salida en estado de régimen permanente después de la falla del talud, van desde los 0.0260 (l/s) a 0.0150 (l/s) para los taludes de 3/2 y 4/1 respectivamente, por ende se relacionan de forma inversamente proporcional.

El terraplén con talud H/V=3/1 es el que presenta menor caudal, ya que éste no presentó falla de talud, pero si llegó a un estado de régimen permanente.

En la Tabla N° 1 se presenta el rango térmico, que corresponde a la mínima y máxima diferencia entre la temperatura ambiente y del agua en cada uno de los ensayos experimentales. Este rango va desde los 0 (°C) a 6 (°C) durante la noche y el día respectivamente, y la moda fue de 5 (°C). Así también la temperatura ambiente varió entre los 15 (°C) a los 28 (°C), y la temperatura del agua entre los 17 (°C) a los 24 (°C) en los ensayos realizados.

3.2.1. Análisis cualitativo de la falla del talud

En el ensayo de los terraplenes de arena con talud 3/2 y 2/1, se observó el mecanismo de falla por tubificación de flujo disperso, en el terraplén con talud 3/1 no ocurrió la falla del talud, solo presentó un alto grado de saturación y flujo limpio continuo (sin arrastre de material), y en el terraplén con talud 4/1, el mecanismo de falla más importante, fue el de tubificación por flujo concentrado con socavación.

Para los terraplenes con talud H/V menor a 3, se produjo el mecanismo de falla por tubificación (piping) de flujo disperso, en cual el talud aguas abajo comenzó a saturarse paulatinamente a medida que se producía el llenado del canal por el aumento de la carga hidráulica, donde llegó un punto en que el nivel de saturación aumentó y aparecieron en el centro y los extremos del talud, como cárcavas que son producidas por la tubificación (Ver Figura N° 3), por ende rompió el nivel de saturación y el flujo empezó a aparecer a través del terraplén, tras el aumento de éste flujo el material al pie del talud fue arrastrado y desplazado a medida que la falla se generalizaba, hasta que el pie cedió completamente.

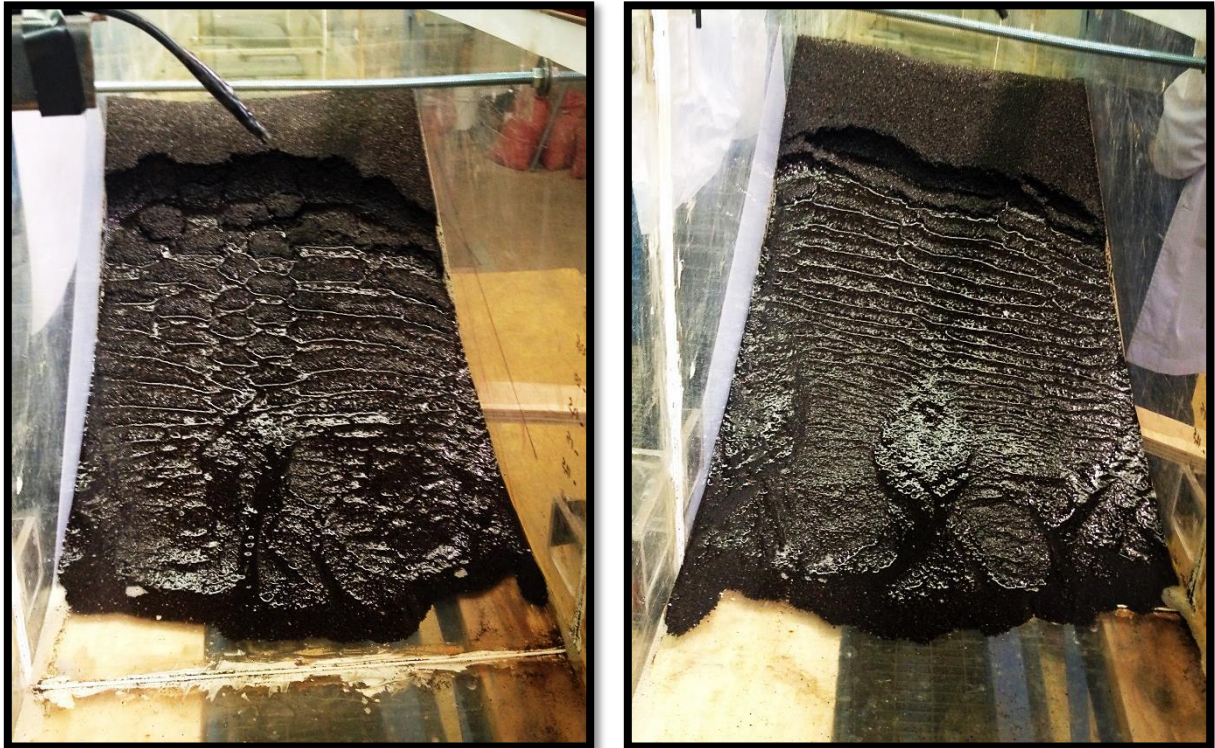
Luego el talud empezó a ceder material por la tubificación, y por el flujo subsuperficial provocado por el aumento progresivo de la carga hidráulica, arrastrando arena y depositándola

aguas abajo del talud, esto generó una pérdida de material del talud original, que prosiguió con la aparición de grietas en el talud no desplazado, que luego este material cayó por gravedad produciendo un impedimento a los canales generados por los flujos, obstruyendo el traslado de material por un pequeño lapso de tiempo. Esta obstrucción de traslado de material desaparece cuando el material emplazado recientemente, se satura y permite que el flujo de agua limpie la superficie con los canales de circulación, y se repita el proceso anterior cíclicamente. La condición descrita se verificó en el talud de falla, debido a que adoptó una forma de surcos transversales o camellones, como lo muestra la Figura N° 3.

Finalmente el talud original tomó la apariencia de 3 taludes de falla que se describen en el punto 3.3.1, hasta que ocurre el colapso del terraplén, en el caso del talud 3/2, porque el talud 2/1 no se ensayó hasta el colapso.

En los videos “3_2” y “2_1”, disponibles en las carpetas Talud3_2 y Talud2_1 respectivamente del Anexo C, se encuentran registrados los eventos mencionados anteriormente.

La Figura N° 3 muestra los terraplenes con talud menor a 3 con su mecanismo de falla, provocado por la tubificación de flujo disperso.



(a) (b)
Figura N° 3. Mecanismo de falla en talud de terraplenes.
(a) Talud 3/2, (b) Talud 2/1.

Respecto al terraplén con talud H/V mayor a 3, se produjo un mecanismo de falla de tubificación (piping) por flujo concentrado y socavación. Sin embargo luego de avanzada la falla en el talud, también se produjo tubificación por flujo disperso, en la zona superior media desde el pie del talud.

Al iniciar el llenado del canal para alcanzar el nivel de carga hidráulica predefinido, se distinguió que el talud presentó una saturación superior al 50 % de éste, sin generar ninguna falla o tubificación. Luego de avanzado el nivel de carga hidráulica y el nivel de saturación, presentó la aparición de un flujo a 1/4 del talud desde el pie (este flujo apareció en la unión suelo-canal del lado derecho mirando la cara del talud), debido a que el flujo de agua a través del terraplén no fue capaz de desplazar el material en el pie del talud como en los otros ensayos, este se concentró en un punto, provocando tubificación de flujo concentrado y socavación.

Cuando la carga hidráulica llegó a su nivel predefinido, la falla del talud aumentó apareciendo otro punto de flujo concentrado en el extremo izquierdo de la unión suelo-canal con la misma característica del primero. Este flujo concentrado generó arrastre de material por ambos puntos, solo en las zonas con flujo, que empezaron a llevar el suelo al pie del talud de manera progresiva, así el flujo se presentaba totalmente canalizado. Posteriormente el flujo canalizado se propagó cruzando el talud y creando surcos preferenciales con arrastre de material. Estos surcos generados empezaron a concentrarse en un único canal en forma recta o sinusoidal (tipo meandros) y escalones con taludes transversales, arrastrando bastante material hasta el pie del talud.

Luego de avanzada la falla en forma significativa, se produjo la falla por tubificación de flujo disperso en la zona superior del talud formando la razón 3/1, que se describe en el punto 3.2.2. Y se observó que en la zona inferior media del talud el arrastre era generado por canalización, como se muestra en la Figura N° 4.

Para el terraplén con talud 4/1, el mecanismo de falla por tubificación de flujo concentrado provocó un mayor arrastre de material hasta el pie del talud, lo que lo hizo más invasivo, ya que abarcó un amplio espacio del canal, aguas abajo del terraplén. No así los terraplenes con talud menor a 3, fueron mucho menos invasivos durante la falla, al arrastrar menos material y en forma pareja, por tener el mecanismo de falla por tubificación de flujo disperso.

Los eventos descritos del mecanismo de falla en el terraplén con talud 4/1, se muestran en los videos y fotografías disponibles en la carpeta “Talud4_1” del Anexo C.

La Figura N° 4 muestra el terraplén con talud 4/1 con su mecanismo de falla, provocado por la tubificación de flujo concentrado con socavacion en la zona inferior media y tubificación con flujo disperso en la zona superior media.

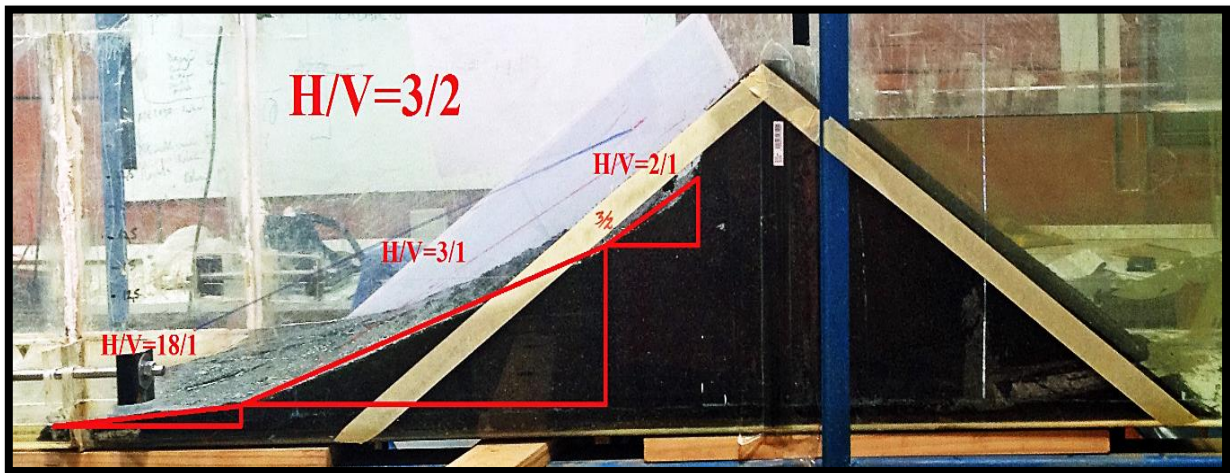


Figura N° 4. Mecanismo de falla en terraplén de talud 4/1.

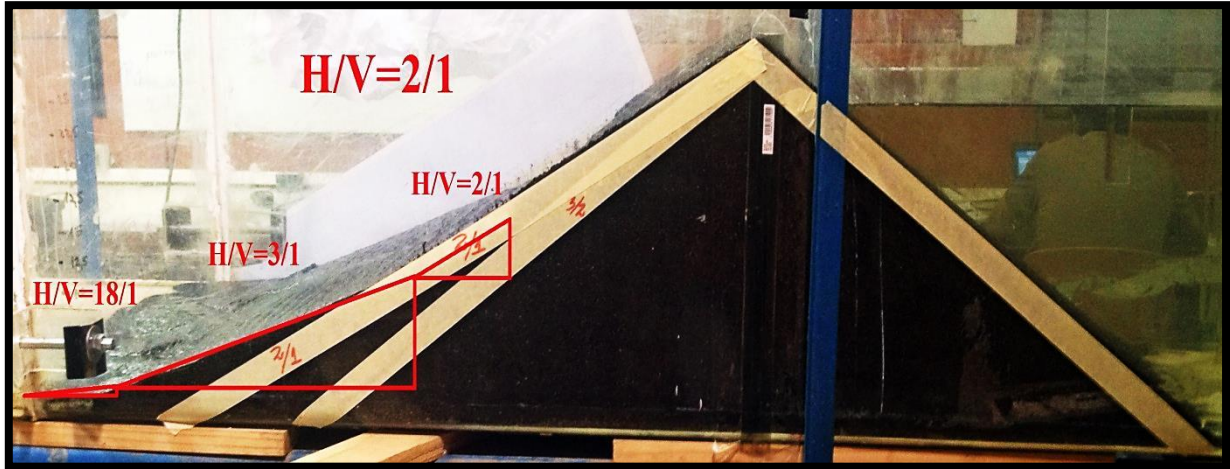
3.3. Análisis cuantitativo de la falla del talud

3.3.1. Análisis de geometría del talud

La Figura N° 5 muestra los cambios de geometría de los terraplenes con talud H/V menor a 3 durante la falla.



(a)



(b)

Figura N° 5. Falla en talud de terraplenes.
(a) Talud 3/2, (b) Talud 2/1.

En la Figura N° 5 de los ensayos experimentales con terraplenes de talud H/V menor a 3, se obtuvo un mismo cambio de geometría en el talud aguas abajo durante la falla. Éste consistía en un cambio de la razón horizontal/vertical (H/V) que inició con el talud original, y luego adoptó 3 taludes de falla, de 18/1, 3/1 y 2/1.

De la Figura N° 5 se observa al pie del talud, el primer talud de falla de 18/1, producto de la presencia del flujo de agua superficial en el material, provocando un transporte generalizado de éste. El segundo talud de falla es de 3/1 presente en la zona media, como un talud de transición y equilibrio, producido por la presencia de la tubificación de flujo disperso, donde la arena está saturada y arrastrada principalmente por el flujo que pasa a través del terraplén. Y el tercer talud de falla de 2/1 presente en la zona posterior, producido por el material que cae del talud original siendo depositado, resultado de la gravedad.

La Figura N° 6 muestra los cambios de geometría producidas en el terraplén con talud 4/1 durante la falla.

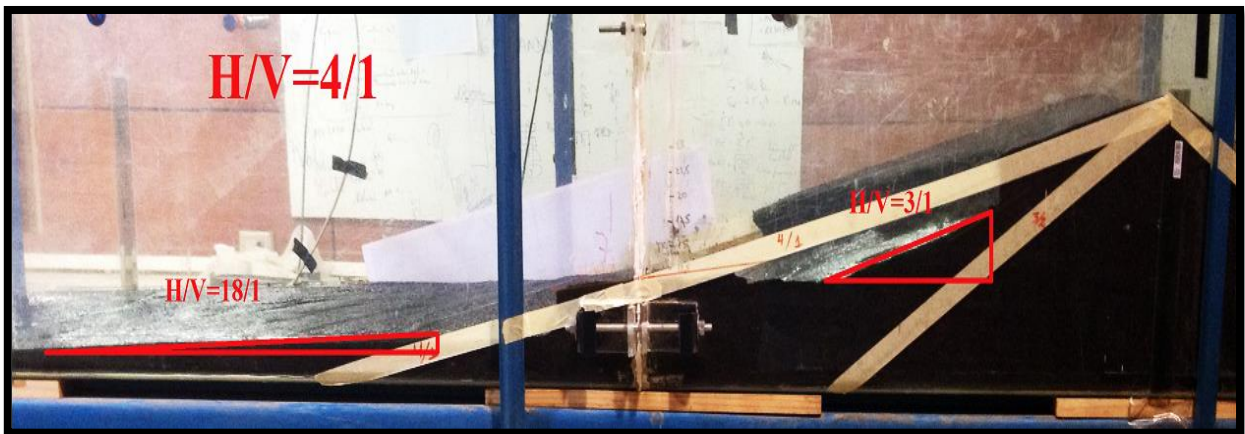


Figura N° 6. Falla en terraplén de talud 4/1.

El terraplén con talud 4/1, produjo una falla con 2 tipos de talud el de 18/1 y el de 3/1.

En el principio el talud se saturó completamente a un 50 % de la altura del terraplén, hasta que ocurrió la falla por tubificación de flujo concentrado a 1/4 del talud desde el pie, donde el flujo de agua se canalizó.

En la Figura N° 6 se observa el talud de falla del pie que fue de 18/1 y se produjo por el transporte generalizado del material con el flujo superficial sin talud de transición de 3/1. Este talud también se observó en forma transversal debido a los canales sinusoidales formados descritos en el punto 3.2.1.

Cuando la falla del talud se generalizó hasta el 50% del talud, se observó una razón de 3/1 de la mitad del talud hacia arriba, producido por la saturación completa de la arena y la falla por tubificación de flujo disperso y en el pie la razón 18/1 por el arrastre del material del lecho.

A diferencia de los terraplenes con talud menor a 3, donde se adoptaron 3 taludes de falla (18/1, 3/1, y 2/1) el talud mayor a 3 solo adoptó 2 (18/1 y 3/1) pero con el de 18/1 repetido en forma transversal.

El terraplén de talud 3/1 no presentó falla alguna, ni cambio geométrico, debido a eso se pudiese tomar como un talud estable para la arena bajo la carga hidráulica predefinida.

3.3.2. Comportamiento hidráulico del flujo del medio poroso

La Figura N° 7 muestra el comportamiento temporal del flujo del medio poroso, y la carga hidráulica durante el ensayo del terraplén con talud $H/V=2/1$.

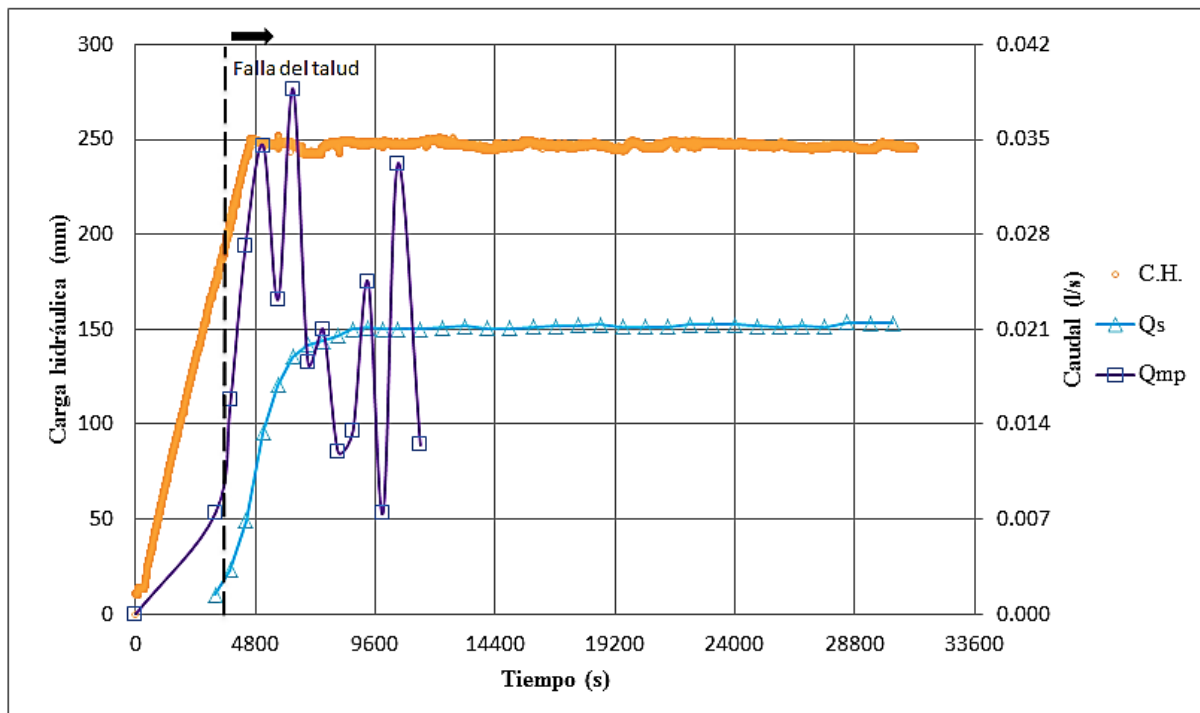


Figura N° 7. Comportamiento del caudal y la carga hidráulica en terraplén con talud 2/1.

En la Figura N° 7 se observan 3 curvas respecto al tiempo, el de carga hidráulica, caudal de salida (aforado) y caudal en el medio poroso obtenido por la ecuación (5) de continuidad.

De la Figura N° 7 se discrimina que el caudal del medio poroso (Q_{mp}), obtenido por la ecuación (5), oscila alrededor del caudal aforado en estado de régimen permanente, esto se produce porque

el flujo que sale del interior del terraplén es irregular debido al mecanismo de falla (ver descripción del mecanismo de falla en el punto 3.2.1), ya que en el momento donde cae el material del talud original, obstruye el flujo que pasa, pero después de un periodo de tiempo el flujo se abre paso nuevamente y aumenta, lo que provoca finalmente la fluctuación del caudal por continuidad en la salida del terraplén. El caudal del medio poroso si bien oscila, el promedio de estas oscilaciones es el caudal aforado en estado de régimen permanente, que para el talud 2/1 es $Q_s = Q_{mp}$ (promedio) = 0.021 (l/s), lo que corrobora que el flujo en el interior del terraplén es irregular por el mecanismo de falla.

El caudal de salida aforado presenta un crecimiento progresivo a medida que transcurre el tiempo y sube el nivel de carga hidráulica, este crecimiento se comporta en forma similar a la carga hidráulica, hasta que llega a un caudal constante en estado régimen, donde se aprecia paralelo al eje de las abscisas y se produce una correlación similar en la gráfica con los cambios obtenidos en la carga hidráulica.

La carga hidráulica crece constantemente en forma casi lineal hasta los 4590 segundos, donde este tiempo corresponde al llenado, para alcanzar el nivel de carga hidráulica al 15 % del borde libre del terraplén, y luego se estabiliza en los 248 mm de carga hidráulica durante todo el ensayo.

El tiempo en que ocurre la falla en el talud varió entre los 3500 (s) a los 4680 (s) para los taludes de 2/1 y 3/2 respectivamente.

El caudal máximo medido en estado de régimen es de 0.0214 (l/s) para el talud de 2/1.

El desfase de tiempo entre la carga hidráulica y el caudal de salida, que es el tiempo medio en el que el flujo alcanza el estado de régimen permanente, desde el momento en que ha alcanzado el nivel de carga hidráulica, varió entre los 1030 (s) a los 8520 (s) para los taludes de 3/2 a 4/1 respectivamente.

La Figura N° 8 muestra la relación entre el tiempo medio para llegar al estado de régimen permanente, luego de alcanzar el nivel de carga hidráulica constante para cada talud predefinido.

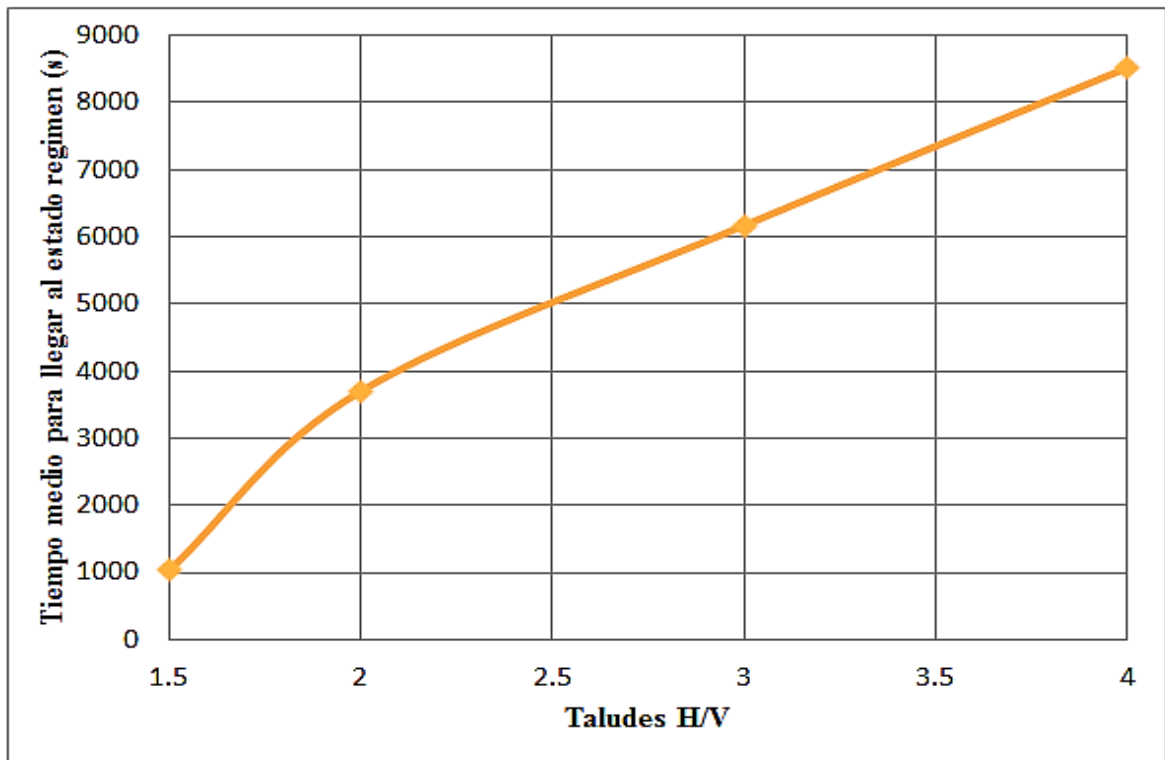


Figura N° 8. Tiempo medio para llegar al estado de régimen permanente respecto a los taludes predefinidos.

Como se muestra en la Figura N° 8, se aprecia que existe un desfase de tiempo entre la carga hidráulica y el caudal de salida, cuando se alcanza el nivel de carga hidráulica y el flujo de salida llega a un estado de régimen permanente. Esto representa el tiempo en que tarda el flujo en cruzar el terraplén a través del medio poroso de la arena.

En la Figura N° 8 el tiempo medio para alcanzar el estado de régimen permanente es mayor a medida que el talud H/V incrementa. Esto se debe únicamente al incremento de la longitud del terraplén, ya que el suelo no cambia (arena) por lo que la permeabilidad es la misma y la carga hidráulica es constante, es decir, sólo es por su geometría predefinida.

3.3.3. Análisis temporal entre variables geométricas e hidráulicas

La Figura N° 9 muestra la relación de la geometría predefinida del talud, respecto a la razón adimensional entre el tiempo de falla (t_f) y de llenado (t_{ll}), los caudales en el tiempo de la falla (Q_f), en el tiempo que alcanza el nivel de carga hidráulica ($Q_{c.h.}$) y cuando alcanza el estado de régimen permanente (Q_{rp}), en todos los ensayos experimentales.

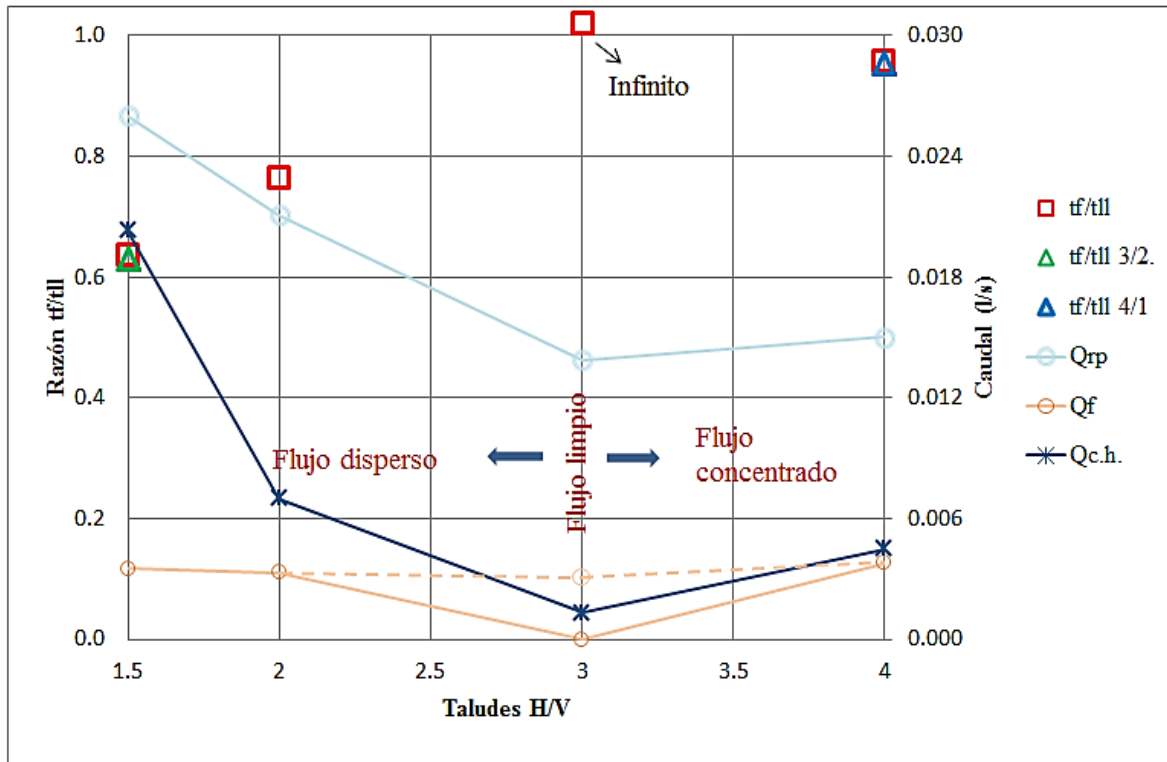


Figura N° 9. Relación entre variables geométricas e hidráulicas.

En la Figura N°9 se observa que la razón $\frac{t_f}{t_{ll}}$ es mayor a medida que el talud aumenta, ya que el talud 3/2 presentó una razón de 0.64 y el talud 4/1 una razón de 0.96. De lo anterior se puede inferir que el tiempo de falla es mayor cuando el talud aumenta independiente del tiempo de llenado, por ende ambas son directamente proporcionales respecto a la geometría de los taludes. Para el talud 4/1 se realizaron dos ensayos pero con distinto tiempo de llenado y entre ambos el porcentaje de variación de la razón $\frac{t_f}{t_{ll}}$ fue de un 0.1 %, que en términos experimentales la diferencia es despreciable. Lo mismo ocurre con el talud 3/2, pero en este no se realizaron dos ensayos, sino que se comparó con el terraplén ensayado por el Señor Gutiérrez (2015), donde por medio de extrapolación se obtuvo el tiempo de llenado, ya que en ese estudio el terraplén colapsó antes de alcanzar el nivel de carga hidráulica. Y el porcentaje de variación entre ambos fue de un

0.6% a pesar de haber una diferencia en el tiempo de llenado de aproximadamente 6700 (s). Se infiere por tanto que el tiempo de llenado, con el tiempo de falla son proporcionales, ya que la razón $\frac{t_f}{t_{ll}}$ se mantiene constante para cada talud predefinido, porque depende solo de la geometría del talud.

El terraplén con talud 3/1 aparece con razón infinita, debido a que este no presentó falla durante el ensayo, por ende no presenta caudal de falla ($Q_f=0$). También se presenta la línea segmentada, la cual representa el caudal que podría haber ocasionado el arrastre de material por ende la falla, sin embargo como el caudal de salida fue menor al mencionado, no ocurrió la falla de éste talud.

Se observa en la Figura N° 9 que para los terraplenes con talud menor a 3, donde la razón $\frac{t_f}{t_{ll}}$ es menor, el caudal aforado presentó aumento de hasta casi 6 veces, del caudal en la falla, al caudal en estado de régimen permanente, mientras que para el terraplén con talud mayor a 3, donde la razón $\frac{t_f}{t_{ll}}$ es mayor, el caudal aforado presenta solo aumentos de hasta 3 veces, desde el caudal en la falla al de régimen permanente. Esta diferencia en la proporción del aumento en los caudales indicados, se deben solo a la geometría del talud, con su mecanismo de falla.

El caudal cuando alcanza el nivel de carga hidráulica ($Q_{c.h.}$), para los terraplenes con talud menor a 3 es mayor, ya que en el tiempo en que ocurre la falla del talud, falta entre un 25 a 35% alcanzar el nivel de carga hidráulica, lo que provoca que el flujo tiene más tiempo para dañar el talud y provocar un aumento significativo del caudal. Mientras que para el terraplén con talud mayor a 3, el caudal $Q_{c.h.}$ es menor, debido a que la falla del talud ocurre casi al llegar al nivel de carga hidráulica establecido.

Finalmente se puede concluir que la geometría predefinida incide directamente en la falla del talud, ya que los terraplenes con talud menor a 3, desarrollaron un mecanismo de falla por tubificación de flujo disperso, donde la falla del talud ocurrió en un menor tiempo antes de alcanzar el nivel de carga hidráulica, generando también caudales mayores en estado de régimen permanente. No así el talud mayor a 3, donde la falla del talud se produjo por tubificación de flujo concentrado (con socavación) y disperso, donde la falla del talud ocurrió en un mayor tiempo, antes de alcanzar el nivel de carga hidráulica, generando caudales menores en estado de régimen permanente, al tener más suelo en el medio poroso que atravesar.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Por último, luego de realizar el análisis de la incidencia de la geometría en la falla del talud de terraplenes de arena, se concluye que:

- El terraplén con talud 3/1, se considera como un talud estable para la arena, porque no presentó la falla del talud, sólo un flujo limpio de salida desde el terraplén.
- En los terraplenes con talud H/V menor a 3 se produjo el mecanismo de falla por tubificación (piping) de flujo disperso. Mientras que para el terraplén con talud H/V mayor a 3, se obtuvo dos tipos de falla, el primero y más importante en la zona inferior media del talud, el mecanismo de falla por tubificación de flujo concentrado con socavación y en la zona superior media del talud el mecanismo de falla por tubificación de flujo disperso. Además el talud mayor a 3, fue más invasivo en cuanto al material desplazado aguas abajo del terraplén.
- Los terraplenes con talud menor a 3, al presentar el mismo mecanismo de falla, desplegaron 3 taludes de falla. Partiendo con el talud H/V=2/1 correspondiente al material que iba cayendo del talud original, producto de la gravedad. Luego el talud 3/1 como un talud de transición y equilibrio, producida esencialmente por el material que está completamente saturado y siendo arrastrado por el flujo a través del terraplén, y el talud 18/1 por la presencia del flujo de agua superficial en el material, provocando un transporte generalizado de éste.

Y el terraplén con talud mayor a 3, presentó 2 taludes de falla, el talud de 3/1 y 18/1, con la aparición de este último talud en forma transversal.

- La razón adimensional de tiempos de falla/llenado $\frac{t_f}{t_u}$, se relaciona en forma directamente proporcional a los taludes predefinidos que fallaron de cada terraplén, ya que para un talud menor la razón fue menor y viceversa. De lo anterior se infiere que el tiempo de falla respecto al talud predefinido se comporta en forma proporcional, luego que a mayor talud, mayor es el tiempo en el que demora en ocurrir la falla, independiente del tiempo de llenado.

- El tiempo de llenado para alcanzar la altura de carga hidráulica establecida, se relaciona en forma directamente proporcional, con el tiempo de falla del talud, pues a medida que el llenado se realizaba en un mayor tiempo, el tiempo de falla del talud también aumentaba y esta razón se mantenía constante, para cada talud predefinido.
- Los terraplenes con talud H/V predefinidos que fallaron, se relacionan en forma inversamente proporcional al caudal de salida en estado de régimen permanente, puesto que al tener un terraplén con talud mayor, se obtuvieron caudales menores.
- El caudal del medio poroso, que es el flujo que sale del terraplén es irregular debido al mecanismo de falla, por ello oscila alrededor del caudal aforado en estado de régimen permanente, pero el promedio de las oscilaciones es igual al caudal en régimen aforado.
- El tiempo medio en que tarda el flujo en alcanzar el estado de régimen permanente, se relaciona de manera directamente proporcional con la geometría de los taludes H/V predefinidos, debido a que a mayor talud, mayor fue el tiempo medio en que se llegó a la condición de régimen permanente, después de llegar al nivel de carga hidráulica.
- La carga hidráulica es el agente responsable de provocar el caudal que pasa a través del terraplén y ocasiona la falla del talud, ya que se logró advertir en los ensayos, que pequeños cambios de la altura de carga hidráulica, provocaba cambios notorios en el caudal en estado de régimen permanente.

4.2. Recomendaciones

En los terraplenes ensayados se utilizó un sólo suelo de material para su construcción. Por ello se hacen las siguientes recomendaciones para posteriores estudios en este ámbito:

- Utilizar otro tipo de suelo para la construcción de los terraplenes, o cambiar simplemente el tipo de arena utilizado (como arena blanca), con el fin de observar cómo cambian los datos que se registraron en este estudio.
- Contar con dos cámaras para el desarrollo del ensayo, una en forma transversal al talud y otra transversal al terraplén, en forma fija y así tener los cambios sufridos en el tiempo en el talud.
- Tener un sistema automático que controle la válvula de llenado en el canal, para mantener la carga hidráulica constante durante los ensayos llevados a cabo en la noche y así no sufrir cambios en esta altura establecida.

REFERENCIAS

1. García, E., & Uchimura, T. (2007). Study of failure mechanism in embankments induced by rainfall infiltration by monitoring pore water pressures and water contents. *Dyna-Colombia*, 74(152), 125-135.
2. Gutiérrez Néstor (2015). Efectos de la carga hidráulica en el colapso de terraplenes de arena. Universidad del Biobío. Concepción, Chile.
3. Li, X., & Arroyo, V. (2011). Impacto de fuerzas de filtración y tubificación retrograda a la inestabilidad de talud y erosión hídrica. Revista digital universitaria [en línea]. Volumen 12, No.2 [Consultada: 17 de Noviembre de 2015].
Disponibile en Internet: <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num2/art14/index.html>
4. MOP. (2103) Manual de carreteras volumen n°3: Instrucciones y criterios de diseño. Ministerio de obras públicas. Dirección de vialidad, Gobierno de Chile. Chile.
5. Schiessler, G. (2013). La tragedia del Estero Minte: El error que mató a 27 personas. Reportaje del programa Bienvenidos en Canal 13. [Consultada: 12 de Enero de 2016].
Disponibile en Internet: <http://www.13.cl/programa/bienvenidos/lo-que-ienes-que-saber/tragedia-del-estero-minte-el-error-que-mato-a-27-person>

ANEXO A

Protocolos de calibración y Códigos de software

Calibración de equipos

- Calibración de sensores de distancia.

La calibración de los sensores se realizó con un vertedor cerrado vertical como control aguas abajo, y una pendiente del canal $J=0.0136$, el cual se llevó a cabo con el siguiente procedimiento:

- Abastecer el canal con agua hasta una altura de 30 cm medidos en una regla ubicada a los 3.05 metros del inicio del canal, entre los sensores de distancia SD1 y SD2 justo donde se ubicó el terraplén de ensayo.
- Aguardar a lo menos 5 minutos o el tiempo suficiente, hasta cuando el agua del canal se encuentre en estado de régimen permanente.
- Adquirir la medición de la altura de escurrimiento, en forma manual, utilizando la regla ya mencionada, ya que será como nivel de referencia. Y también se registra el tiempo en que se alcanza la altura.
- Se inicia el descenso del nivel de agua por una válvula dispuesta antes del inicio del canal en el estanque rectangular, para alcanzar alturas de escurrimiento más bajas.
- Los ítems anteriores se repiten en forma iterativa desde alturas de escurrimiento altas, hasta la más baja posible.
- En cada altura se tiene registro de las lecturas obtenidas por los 3 sensores de distancia y además la lectura en forma manual, las cuales se grafican para obtener la ecuación de calibración de cada uno de los sensores, Señales de sensores (mV) v/s Nivel de referencia (mm).
- Finalmente de las curvas de tendencias adjudicadas de cada sensor en el gráfico, se despeja el nivel de referencia para así obtener altura de escurrimiento en función de la señal de los sensores, entregando lectura en milímetros.

- Calibración del vertedor.

La calibración se lleva a cabo con un vertedor triangular de 90° que sella el canal, la cual se lleva a cabo a través del siguiente procedimiento:

- Abastecer el canal con agua, a través de la válvula o las bombas que alimentan el canal.
- Aguardar a lo menos 5 minutos o el tiempo suficiente para que el agua en el canal alcance el estado de régimen permanente.
- Tomar altura de escurrimiento del sensor SD3 y registrar la medición de caudal utilizando un recipiente de volumen conocido y un cronómetro, para aforos volumétricos.
- Los ítems anteriores se repiten, generando aumentos y descensos del nivel de agua.
- En cada altura de escurrimiento se tiene un caudal asociado, por ende se grafica Caudal (l/s) v/s Lectura sensor SD3 (V), así se obtiene la curva de descarga del vertedor a través de una curva de tendencia, que entrega finalmente el caudal en litros/segundo.

Código Arduino para ensayos experimentales con curvas de calibraciones

```
#define PinAltura1 5

#define PinAltura2 6

#define PinAltura3 8

#define LargoMaxPulso 18000

//#define temp1 9

#define temp2 7

#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 =5;
```

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

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

float dura1 = 0, dura2= 0, dura3 = 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 + 2.53 ;

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= (698.48-Dista1)/0.9842;

Distancia2= (688.58-Dista2)/1.001;

Distancia3= (734.51-Dista3)/0.9741;

Q= -4495.1*(Dista3/1000)*(Dista3/1000)*(Dista3/1000) +
9886.7*(Dista3/1000)*(Dista3/1000) - 7255.6*(Dista3/1000) + 1776.6;

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(Q,2);

//delay(920);

}
```

ANEXO B

Resultados

La Figura B 1 muestra el comportamiento temporal del flujo del medio poroso, y la carga hidráulica durante el ensayo del terraplén con talud $H/V=3/2$.

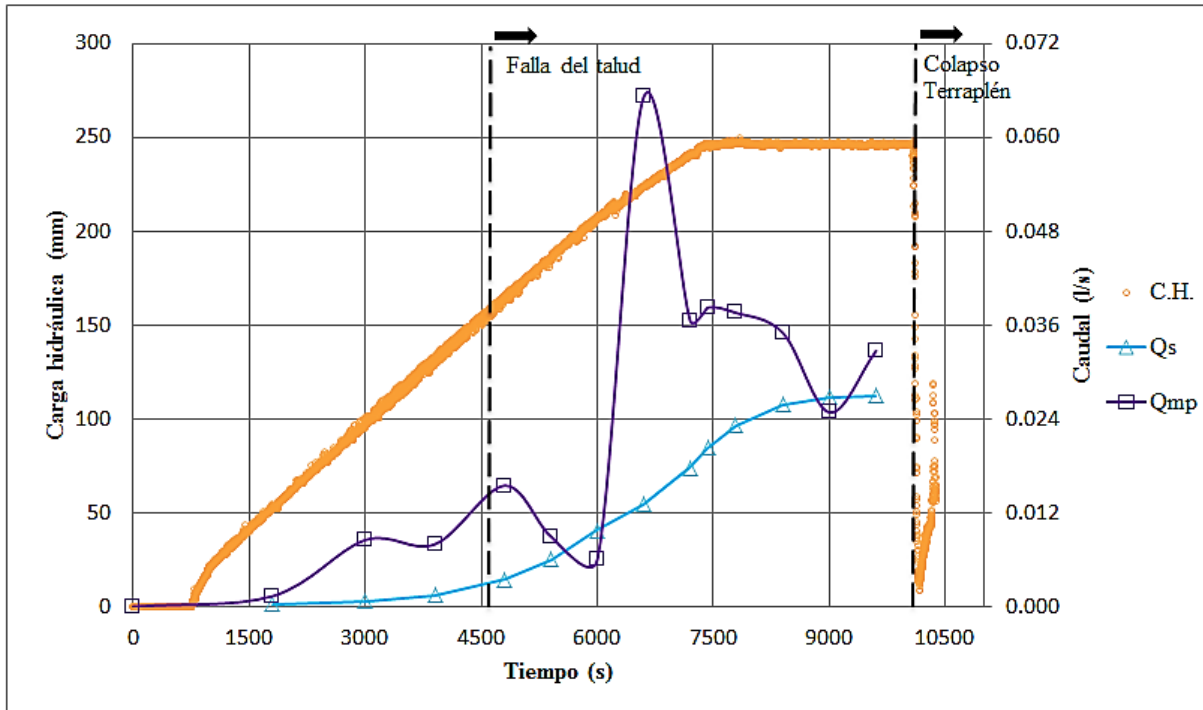


Figura B 1. Comportamiento del caudal y la carga hidráulica en el terraplén con talud 3/2.

En la figura se distingue que el llenado del canal para alcanzar la carga hidráulica establecida fue muy lento, creciendo en forma constante hasta los 7000 segundos aproximadamente desde que se abre la válvula, lo que deja ver que el llenado tuvo un mayor porcentaje de tiempo que la duración de la carga hidráulica en forma constante hasta el colapso del terraplén.

El caudal aforado presenta un comportamiento similar al de la carga hidráulica, hasta que llega al caudal en estado de régimen permanente, pero esto sucede en un corto periodo de tiempo, ya que después ocurre en este único ensayo el colapso del terraplén, el cual ocurrió a los 10230 segundos desde iniciado el ensayo, que se advierte en la Figura B 1, cuando la carga hidráulica sufre una fuerte caída.

El caudal alcanzado durante el colapso a través de la curva de descarga fue de 6.08 (l/s).

El promedio del caudal por continuidad es igual al caudal aforado en régimen.

El caudal máximo medido es de 0.0270 (l/s), antes del colapso.

El tiempo en que ocurre la falla del talud en este terraplén es a los 4680 (s).

El desfase de tiempo medio para llegar al estado de régimen permanente una vez alcanzado el nivel de carga hidráulica, correspondiente a 1030 segundos, para este talud.

La Figura B 2 muestra el comportamiento temporal del flujo del medio poroso, y la carga hidráulica durante el ensayo del terraplén con talud H/V=3/1.

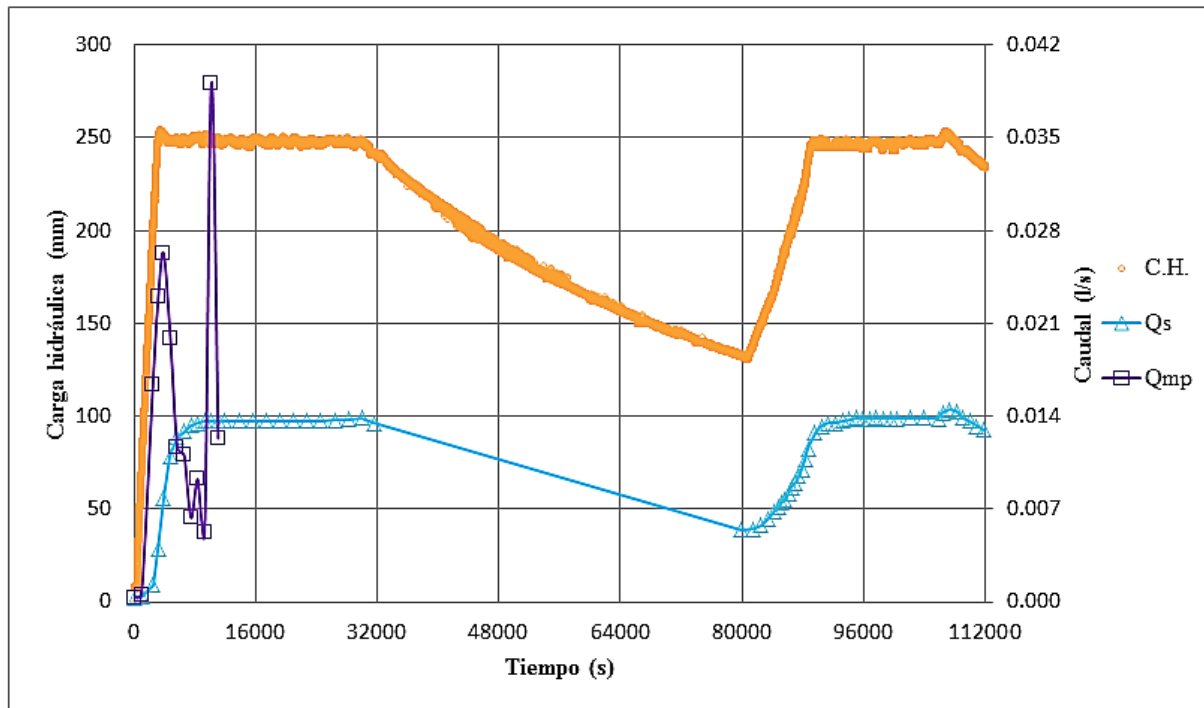


Figura B 2. Comportamiento del caudal y la carga hidráulica en el terraplén con talud 3/1.

En la Figura B 2 se observa que el nivel de carga hidráulica se alcanza a los 3130 segundos, que es el tiempo de llenado.

Se aprecia un descenso del nivel de carga hidráulica entre los 31200 y 80000 segundos, que corresponde al progreso del ensayo durante la noche, en la cual no se puede mantener la carga hidráulica constante, ya que no hay forma programada de operar la válvula para que no haya fluctuación del nivel de carga hidráulica. El crecimiento nuevamente de la carga hidráulica que se observa hasta los 88600 segundos, es cuando se llega al laboratorio en el día para operar la válvula nuevamente y alcanzar el nivel establecido.

Se percibe que pequeños cambios del nivel de carga hidráulica ocasiona cambios considerables en el caudal, como se observa poco antes de terminar el ensayo.

El promedio del caudal por continuidad es igual al caudal aforado en estado régimen.

El caudal máximo medido es de 0.0145 (l/s), para este talud.

El desfase de tiempo entre la carga hidráulica y el caudal en régimen permanente, correspondió aproximadamente a 6170 segundos.

Después de un poco más de 31 horas de ensayo no se produjo la falla en este talud de 3/1, es decir, no hubo cambio en la geometría inicial estable del terraplén, ni arrastre de material por el flujo, debido a esto se procedió a parar el ensayo considerando que no se produce la falla, por lo tanto se considera que el terraplén con talud $H/V=3/1$ es un talud estable para la arena.

La Figura B 3 muestra el comportamiento temporal del flujo del medio poroso, y la carga hidráulica durante el ensayo del terraplén con talud $H/V=4/1$.

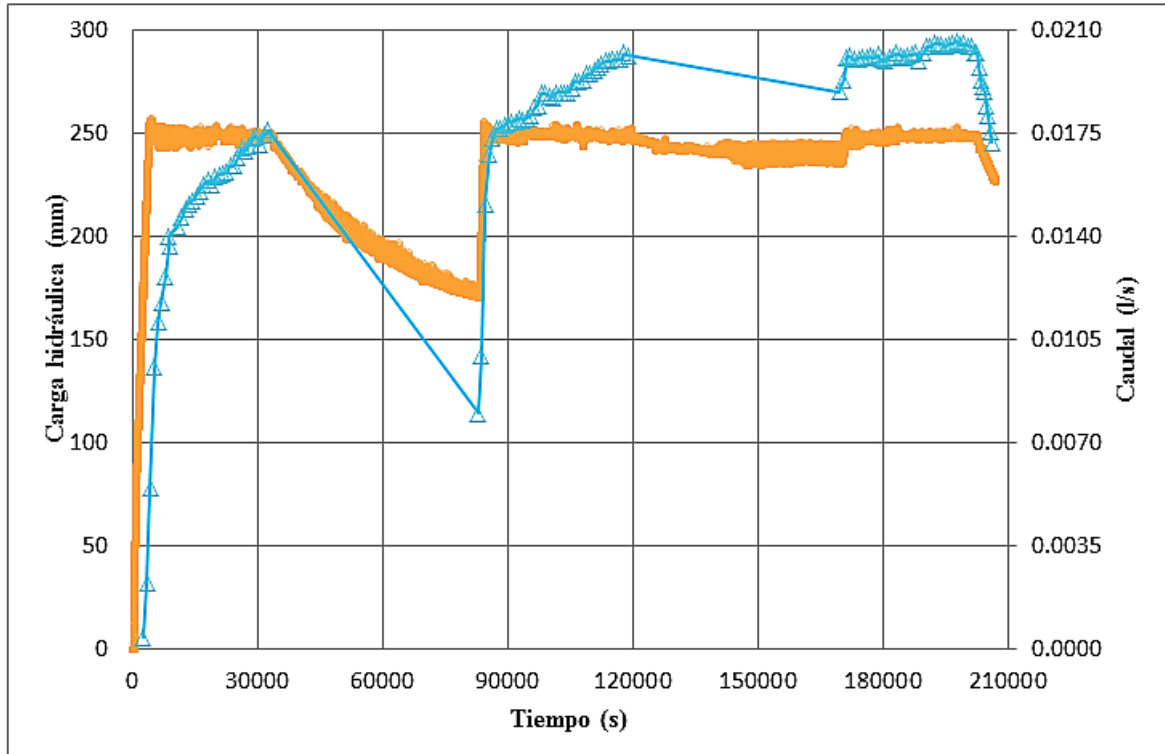


Figura B 3. Comportamiento del caudal y la carga hidráulica en el terraplén con talud 4/1.

La carga hidráulica aumento en forma constante hasta los 4080 segundos.

Se distinguen dos descensos del nivel de carga hidráulica, el cual ya se explicó el motivo por el que ocurrieron, pero cabe señalar que uno es más significativo que el otro, esto se ocasionó porque el talud en la segunda noche ya se encontraba con una falla generalizada y un alto volumen de material desplazado en el pie, lo que provocó que al bajar la carga hidráulica un poco, el flujo no tenía la suficiente energía para cruzar el terraplén.

En cuanto al caudal aforado se observa que después de la falla se llegó a un estado régimen durante un periodo de tiempo, pero luego de ello este caudal aumentaba, es decir permanecía un lapso de tiempo en régimen pero este siguió aumentando como muestra la gráfica como una escalera hasta que se detuvo el ensayo.

El tiempo en que ocurre la falla del talud en este terraplén es a los 3900 (s).

El caudal máximo medido es de 0.0205 (l/s).

El desfase de tiempo entre la carga hidráulica y el caudal en régimen permanente, correspondió aproximadamente a 8520 segundos.

La Figura B 4 muestra el comportamiento temporal del flujo del medio poroso, y la carga hidráulica durante el ensayo del terraplén N° 5 según Tabla N° 1 con talud H/V=4/1.

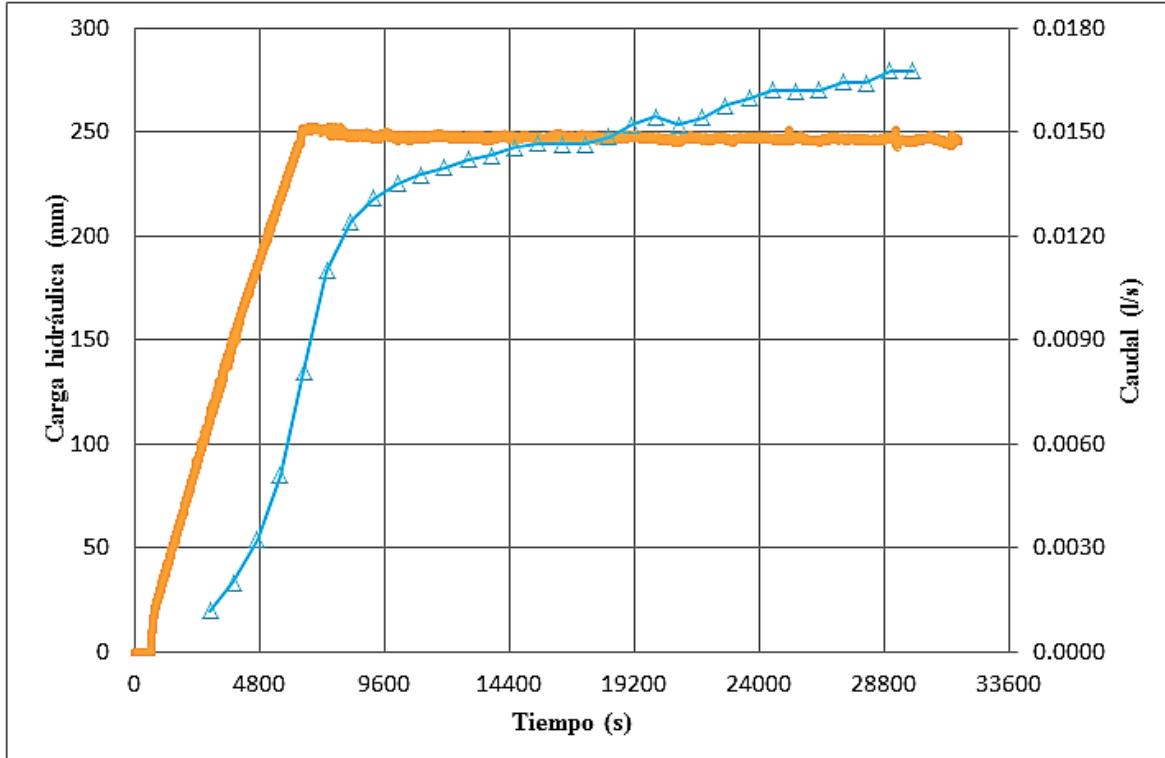


Figura B 4. Comportamiento del caudal y la carga hidráulica en el terraplén con talud 4/1.

Este ensayo es el mismo que el anterior, pero llevado a cabo en un menor tiempo (debido a lo explicado en el punto 3.2), donde si se compara con la Figura B 3 hasta los 30000 (s) se observa que el caudal se comporta exactamente de la misma forma con un crecimiento constante, y además coincide el valor obtenido en ese tiempo.

La carga hidráulica aumento en forma constante hasta los 6450 segundos. El tiempo de falla fue a los 6160 (s) y el caudal máximo aforado fue de 0.0168 (l/s).

ANEXO C

Registros de Videos, fotografías y corridas experimentales

En la carpeta del “Anexo C” disponible en el DVD del presente proyecto de título, se encuentran 4 carpetas con los 4 ensayos experimentales llevados a cabo. El nombre de estas carpetas son las siguientes: Talud3_2, Talud2_1, Talud3_1 y Talud4_1. En cada una de estas carpetas se encuentran las corridas experimentales, 2 carpetas con las fotografías desde los dos puntos establecidos en el punto 2.1.4, y una carpeta con los videos de cada ensayo experimental.

Corridas experimentales

Las corridas experimentales, que son los datos registrados en todos los ensayos por el Software Arduino son mostrados en formato texto (.txt), con el siguiente itemizado por columna:

Tiempo del experimento (s)	Sensor temperatura del agua (°C)	Sensor temperatura del ambiente (°C)	Altura de agua del sensor número uno (mm)	Altura de agua del sensor numero dos (mm)	Altura de agua del sensor numero 3 (mm)	Caudal de la curva de descarga (l/s)

Registros de videos

Los videos registrados se guardaron con una velocidad de reproducción 64 veces más rápido que el original como se mencionó en el punto 2.1.4. Los videos se enumeraron según el talud horizontal (H)/vertical (V) ensayado, más el número del video si es más de uno, como se representa a continuación: H_V_N°.

- El terraplén con talud 3/2 sólo se registró un video con una duración de 2 horas con 39 minutos, donde se inició el video a los 750 (s) luego de iniciado el ensayo y se detuvo luego de su colapso a los 10340 segundos.
- Para el terraplén con talud 2/1, se registró un video con una duración de 8 horas y 22 minutos, donde se inició este video a los 572 (s) luego de iniciado el ensayo y se detuvo a los 30750 (s).
- En el terraplén con talud 3/1, se registraron 3 videos. El primero con una duración de 8 horas y 26 minutos, donde este video se inició a los 280 (s) y se detuvo a los 30740 (s). El segundo tuvo una duración de 13 horas y 28 minutos, se inició a los 31280 (s) y se detuvo a los 79900(s). Y el último video registró una duración de 8 hrs. con 46 minutos, se inició este video a los 80317 (s) y se detuvo a los 111980 (s).

- En el terraplén con talud 4/1, se registraron 5 videos. El primero con una duración de 3 hrs. con 53 minutos, se inició a los 1000 (s) y se detuvo a los 15016 (s). Para el segundo video se procedió a cambiar de posición la cámara para este único ensayo, debido al mecanismo de falla presentado, por su gran arrastre de material hasta el pie del talud, este video tuvo una duración de 13 hrs. con 43 minutos, el cual se inició a los 33000 (s) y se detuvo a los 82500(s). El tercer video tuvo una duración de 9 hrs. con 45 minutos, se inició a los 83000 (s) y se detuvo a los 118200 (s). El cuarto video tuvo una duración de 14 horas, se inició a los 118720 (s) y se detuvo a los 169255 (s). El quinto y último video tuvo una duración de 9 hrs. con 35 minutos, se inició a los 169850 (s) y se detuvo a los 204420 (s).