

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Luis Santana Oyarzo

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA INFLUENCIA
DEL USO DE GEOTEXTIL EN LA ESTABILIDAD DE
TERRAPLENES DE ARENA**

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

FELIPE EDUARDO RUBIO VARO

Concepción, Julio 2016

DEDICATORIA

Dedicado a mi familia, mi madre a la cual amo, Doris Varo y a mi padre que me cuida y guía desde el cielo, Gustavo Rubio Ortega, y como no dedicar este logro a mi pequeño/gran ángel, mi hermano Gustavo Rubio Varo, quienes siempre me ayudaron a recorrer y hacer mas fácil este camino por la Universidad y además, fueron mi principal incentivo para llegar a ser lo que hoy soy.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por su incondicional apoyo y ayuda en todos estos años, por formarme como persona y entregarme los valores que me servirán para toda la vida.

A mis tíos de la pensión, lo que me han acogido a lo largo de estos seis años y medio de universidad, haciéndome parte de su familia y considerándome un hijo, para ellos infinitas gracias.

Una mención especial a mi polola Daniela Henríquez, la persona que ha sabido entregarme todo su apoyo, paciencia, ternura y cariño durante todo este proceso. Y también ha estado ahí entregándome toda la tranquilidad para terminar este proyecto de título, para ti amor muchas gracias.

Como no agradecer mis amigos de “Civil United”, por los buenos momentos y la valiosa amistad formada que nos llevó a que juntos lográramos la meta de esta carrera.

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 paciencia, compromiso y una excelente disposición, para usted profesor, muchas gracias

INDICE GENERAL

DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL	i
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCION.....	¡Error! Marcador no definido.
1.1. Objetivos	5
1.1.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	5
2. METODOLOGIA	6
2.1. Terraplén es de arena con sistema de medición	6
2.1.1. <i>Material de ensayo</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.1.2. <i>Construcción del terraplén</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.1.3. <i>Colocación y cubicación de Geotextil</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.1.4. <i>Disposiciones generales antes del ensayo experimental</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.1.5. <i>Sistema de medición</i>	8
2.2. Ensayos experimentales	12
2.2.1. <i>Protocolo de ensayo</i>	12
2.3. Tratamiento de información	¡Error! Marcador no definido.
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS	16
3.1. Sistema de medición.....	16
3.2. Ensayos experimentales	¡Error! Marcador no definido.
3.3. Análisis cuantitativo de la estabilidad del terraplén de arena.....	25
3.4. Comportamiento hidráulico del flujo del medio poroso.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5. Análisis cualitativo de la falla del talud de arena.....	21
3.6. Análisis temporal entre variables hidráulicas y diferentes colocaciones de geotextil.....	¡Error! Marcador no definido.
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	30
4.1. Conclusiones	30
4.2. Recomendaciones.....	32
REFERENCIAS	33
ANEXO A.....	34

Protocolos de calibración y Códigos de software	34
ANEXO B	41
Resultados	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO C	¡Error! Marcador no definido.
Registros de Videos, fotografías y corridas experimentales	41

INDICE DE FIGURAS

Figura N°1. <i>Tipología de terraplenes empleados en los ensayos experimentales</i>	7
Figura N°2. <i>Esquema del montaje experimental sobre el canal del laboratorio y las variables de medición propuestas (Editado Arratia, 2016).</i>	9

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Cantidad utilizada de geotextil en cada terraplén ensayado.</i>	8
Tabla 2 <i>Resultados registrados durante ensayos experimentales para terraplenes predefinidos.</i>	16

INFLUENCIA DEL GEOTEXTIL SKAPS GT- 131 EN LA ESTABILIDAD DE TERRAPLENES DE ARENA

Autor: Felipe Eduardo Rubio Varo

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

Correo electrónico: frubio@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Luis Santana Oyarzo

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

Correo electrónico: lsantana@ubiobio.cl

RESUMEN

El presente informe muestra la influencia del geotextil SKAPS GT-131 en terraplenes de arena, mediante ensayos experimentales a carga hidráulica constante, llevados a cabo en un canal del Laboratorio de Hidráulica.

Seis ensayos experimentales de terraplenes con diferentes disposiciones de geotextil (A-F) y talud H/V predefinido, fueron empleados para realizar un seguimiento y análisis espacio-temporal de la estabilidad del terraplén. La disposición sin geotextil (A) fue usada como referencia, la razón tiempo de falla y tiempo de llenado t_f/t_{ll} fue usada para comparar el comportamiento de la falla del talud del terraplén.

El principal resultado muestra que la disposición de geotextil Tipo B, C y D presentaron un valor de t_f/t_{ll} mayor al terraplén de referencia definido (Tipo A). Mientras que los terraplenes que presentaron un menor valor de t_f/t_{ll} fueron los ensayos Tipo E y F.

Del trabajo se concluye que el terraplén con disposición de geotextil B, fue el que presentó la mayor variación de valor t_f/t_{ll} en relación al terraplén de referencia, logrando una mejora de un 43% en su estabilidad total.

Palabras Claves: Terraplén, geotextil, disposición estabilidad, carga hidráulica.

8450 Palabras texto + 4 Figuras/Tabla*250 + 2 Figuras/Tablas*500= 10450 totales

INFLUENCE OF GEOTEXTILE SKAPS GT – 131 ON THE STABILITY OF EMBANKMENTS OF SAND

Author: Felipe Eduardo Rubio Varo

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

E-mail: frubio@alumnos.ubiobio.cl

Advisor: Luis Santana Oyarzo

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

E-mail: lsantana@ubiobio.cl

ABSTRACT

The present report shows the influence of the geotextile SKAPS GT-131 in embankments of sand, through trials experimental to load hydraulic constant, carried to out in a channel of the laboratory of hydraulic.

Six experimental trials of embankments with different provisions of geotextile (a-f) and h/v default slope, were used for tracking and analysis space-temporal stability of the embankment. The provision without geotextile (A) was used as reference, the reason time of failure and time of filled t_f / t_{ll} was used for compares the behavior of the failure of the slope of the embankment.

The main result shows that the provision of geotextile type B, C and D had a value of more than fill reference t_f/t_{ll} defined (type A). While you fills those who presented a lower value of t_f/t_{ll} were trials type E and F.

Work concludes that the embankment with geotextile B available, was that presented the greatest variation value t_f/t_{ll} in relation to the reference fill, achieving a 43% improvement in its overall stability.

Keywords: Embankment, geotextile, stability, hydraulic load.

1. INTRODUCCIÓN

El terraplén es una obra civil construida con el objetivo de rellenar un terreno para elevar su nivel y formar una base de apoyo para una obra civil; en su concepción geométrica está constituido por una corona, un núcleo, y sus taludes. Estos son fundamentales en el desarrollo de las actuales vías de comunicación, tales como canales, carreteras y ferrocarriles; así también, en la construcción de presas de tierra y obras de protección contra inundaciones, producto de la acción de ríos, expansión de zonas urbanas, etc.

Los terraplenes, excepto los que son construidos para embalse, no son diseñados para tomar carga hidráulica permanente o eventual. Por esto, el estudio de los daños provocado por el agua es de suma importancia, ya que la carga hidráulica genera un aumento en los esfuerzos de corte que afectan al terraplén, generando deslizamientos o desplazamientos aguas abajo del material que constituye el talud, lo que trae consigo un colapso de la estructura. Ejemplo de esto, fue lo ocurrido en la tragedia del estero Minto el 7 de mayo del año 1995 (Schiessler, 2013), donde el colapso del terraplén produjo consecuencias fatales para la población aledaña y usuaria de dicha estructura.

En la actualidad, existe un aumento en la utilización de materiales geosintéticos en obras de Ingeniería Civil. Esto, por las ventajas que incluye su uso, tales como: facilidad de puesta en obra, economía de producto, ahorro de tiempo de ejecución y utilización de materiales de calidad verificables. Dentro de los materiales geosintéticos se encuentra el geotextil.

El geotextil es una tela permeable y flexible de fibras sintéticas, principalmente polipropileno y poliéster, las cuales se pueden fabricar de forma no tejida o tejida dependiendo de su uso o función a desempeñar. Sus funciones están basadas en la capacidad de filtración y en sus altas resistencias mecánicas, siendo estas: separar, filtrar, drenar, reforzar y proteger (Botasso, Fensel, Ricci, 2004). Sirven en la construcción de sub-base de carreteras y ferrocarriles, en presas, evitan deslizamientos de materiales, refuerzo de taludes y realizan funciones de drenaje en canales y muros de contención.

Por estas características, resulta importante considerar el uso de geotextil en terraplenes de arena a fin de mejorar su estabilidad, ya que la arena al ser un material con baja capacidad de retención de agua y con un alto índice de poros permite el paso del agua al interior del terraplén,

desencadenando un arrastre de material en el talud del terraplén. Este arrastre de material se produce ya que la carga hidráulica genera un flujo de agua a través de los poros de la arena. El agua tiende a ejercer presión sobre las partículas de arena generando caudales al interior del terraplén, a lo cual se le denomina falla por piping (García y Uchimura, 2007). De acuerdo a lo anterior se produce la pérdida de estabilidad del terraplén, la cual al no ser controlada produce pérdidas de la geometría definida del talud aguas abajo, causando con el tiempo que el material que conforma al terraplén sea completamente desplazado para finalmente colapsar la obra, perdiendo su funcionalidad. Por ende, estas estructuras necesitan un sistema que permita mejorar su estabilidad.

Es por ello, que realizar un estudio de la estabilidad de los terraplenes de arena con incorporación de un geotextil es fundamental a la hora de evitar arrastre de material y futuros colapsos, ya que impactan directamente en la seguridad y funcionamiento de dichas estructuras (Li y Arroyo, 2011).

Estos fundamentos dejan en evidencia la importancia de los terraplenes en las obras civiles, y la relevancia de realizar estudios sobre el comportamiento de éstos. Este proyecto de título busca analizar la influencia del uso del geotextil SKAPS GT-131 (no tejido) sobre la estabilidad de terraplenes de arena, mediante la realización de ensayos experimentales en laboratorio, utilizando terraplenes de arena con un talud de razón horizontal-vertical (H: V) de 3:2 y distintas tipologías del geotextil.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Analizar la influencia del geotextil sobre la estabilidad de terraplenes de arena, mediante ensayos experimentales con carga hidráulica constante.

1.1.2. Objetivos específicos

- Habilitar el sistema de medición de temperatura, caudal, altura y geometría, con terraplenes de arena con diferentes disposiciones de geotextil.
- Realizar el seguimiento del comportamiento del terraplén mediante ensayos experimentales a carga hidráulica constante.
- Evaluar el comportamiento espacio-temporal del terraplén de arena con diferentes disposiciones de geotextil, a través de los parámetros obtenidos en los ensayos experimentales.

2. METODOLOGÍA

En esta etapa se presenta las metodologías específicas vinculadas a cada objetivo propuesto. Para ello se realizaron ensayos experimentales en terraplenes de arena con diferentes formas de uso de geotextil y carga hidráulica constante.

2.1. Terraplenes de arena empleados

La arena empleada para la construcción de los terraplenes fue arena limpia tipo Biobío de color negro, la cual posee un coeficiente de uniformidad de $C_u=1.7$ lo que indica que es una arena muy uniforme y con un coeficiente de curvatura $C_c=1.7$ por ende es una arena bien graduada. Además su diámetro medio fue de 0.67mm según granulometría (Gutiérrez, 2015).

El geotextil empleado fue un geotextil no tejido (SKAPS GT-131) resistente al deterioro ultravioleta, descomposición, degradación biológica, etc. Este geotextil está compuesto por fibras sintéticas cuyas funciones principales se basan en su resistencia mecánica a la tracción y su capacidad filtrante y drenante. El SKAPS GT-131 posee un diámetro de aberturas que permite el paso de partículas inferiores a los 0,3 mm.

2.2. Tipología de terraplenes empleados

La figura N°1 muestra las dimensiones y formas de uso de geotextil en cada terraplén ensayado. Para todos los terraplenes ensayados se adoptaron las mismas dimensiones, que fueron 90 centímetros en la base (H) y 30 centímetros de altura (V). Se utilizó un ancho de corona del terraplén nulo (B), debido a que el estudio se focalizó en la influencia del geotextil sobre la estabilidad de un terraplén de arena con talud de razón horizontal/vertical 3/2 (H/V), tanto aguas arriba como aguas abajo, ya que concierne a la máxima inclinación permitida para carreteras (MOP, 2013). El terraplén con disposición A corresponde al de referencia, el cual será empleado para posteriores comparaciones de los resultados experimentales.

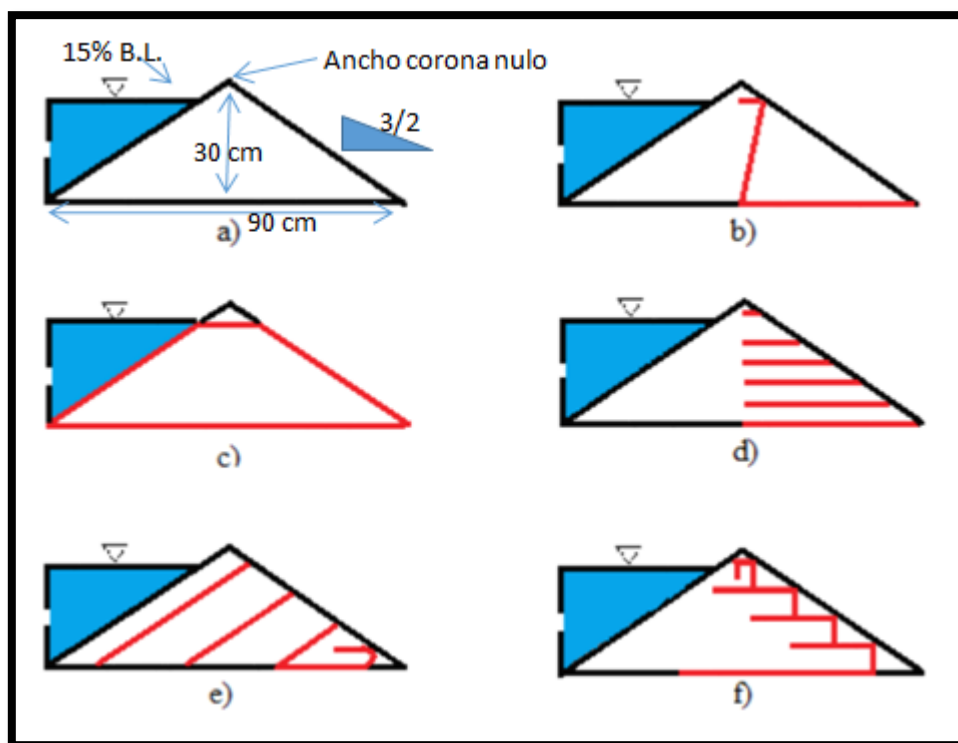


Figura N°1. Tipología de terraplenes empleados en los ensayos experimentales

(a) Tipo A, (b) Tipo B, (c) Tipo C, (d) Tipo D, (e) Tipo E, (f) Tipo F

Los terraplenes se construyeron en el canal de ensayo ubicado al interior del laboratorio de hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del Bío Bío (UBB). Para ello la arena se saturó y se colocó en una serie de capas horizontales con un espesor de 2 cm, y cada una de estas se compactó con una varilla de apisonamiento manual para lograr que el material se compactara. A medida que se compactan las capas de arena se ubicó cuidadosamente el geotextil según cada disposición predefinida, con el cuidado pertinente que el geotextil necesita.

Las tipologías mostradas en la figura N°1 representan cada forma de uso de geotextil, para el caso A (referencia) y F son las establecidas por el Ministerio de Obras Públicas a través del Manual de Carreteras (MOP, 2013) a la hora de construir un terraplén de arena con o sin geotextil. Para el caso A no se considera geotextil, mientras que el caso F si presenta geotextil.

La tipología B buscó analizar la influencia del geotextil sobre la estabilidad del terraplén colocándolo con un ángulo aproximado al ángulo de fricción que presenta la arena (30°-40°), por lo que su disposición fue con un ángulo de 35° aproximadamente.

La colocación C fue concebida bajo el criterio de estudiar la influencia sobre el material confinado al interior de geotextil dispuesto, con el fin de observar un cambio sobre la estabilidad del terraplén. Mientras que la colocación D y E fueron dispuestas de tal manera de observar la influencia del geotextil sobre las líneas de flujo presente al interior del terraplén.

<i>Terraplén</i>	<i>Desarrollo longitudinal de geotextil (m)</i>
<i>A</i>	<i>0</i>
<i>B</i>	<i>0,76</i>
<i>C</i>	<i>1,9</i>
<i>D</i>	<i>1,6</i>
<i>E</i>	<i>1,35</i>
<i>F</i>	<i>1,5</i>

Tabla N°1. Geotextil empleado en cada terraplén ensayado.

2.3.Sistema de medición propuesto

La figura N°2 muestra los componentes del sistema de medición y su ubicación al interior del canal del laboratorio. Se muestra la ubicación de terraplén habilitado para el ensayo. Se observa la disposición de los componentes principales que son: sensores de distancia (SD1, SD2, SD3), sensores de temperatura (ST1 y ST2), cámaras de video (CamV, CamF) y vertedor triangular con abertura de 90°, los cuales medirán: altura de escurrimiento de agua, carga hidráulica, temperatura ambiente y de agua, y caudal de salida respectivamente.

El agua hace ingreso por el lado izquierdo del canal. Para su regulación se usa una válvula tipo llave, que llena un estanque rectangular, cuya finalidad es disminuir la turbulencia del fluido al entrar al canal y así evitar interferencias en las mediciones de los equipos.

A medida que el agua circula por el canal los sensores de distancia y temperatura registran las variaciones de altura de escurrimiento, temperatura de la ambiente y agua para luego hacer paso por el vertedor triangular de 90° ubicado al final del canal y así realizar los aforos volumétricos predefinido en el protocolo de ensayo.

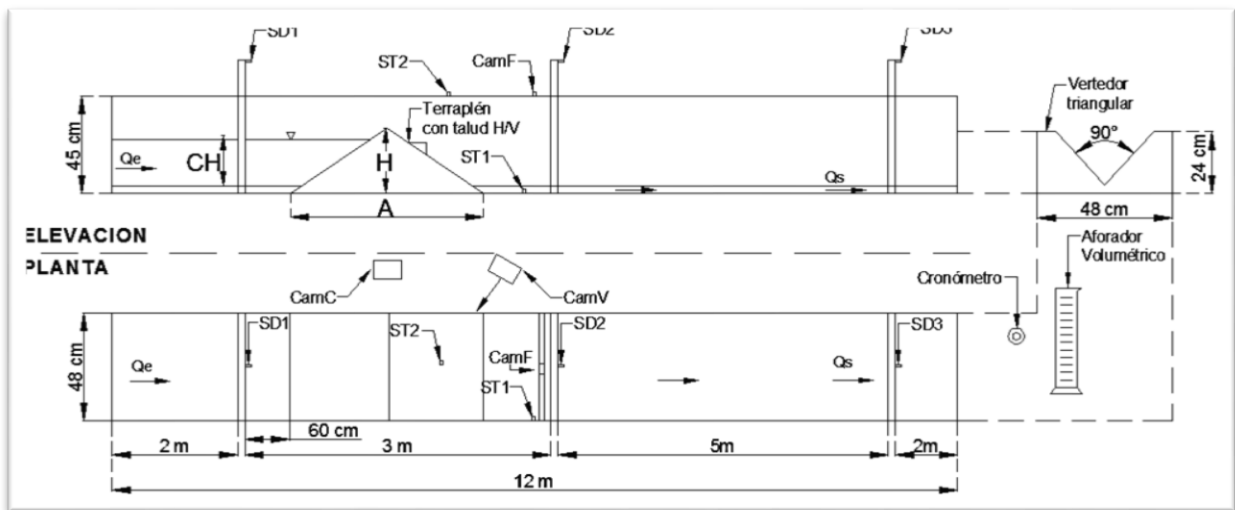


Figura N°2. Esquema del montaje experimental sobre el canal del laboratorio y las variables de medición propuestas (Editado Arratia, 2016).

a) Componentes de medición

- **Distancias:** Se emplearon 3 sensores de distancia, que están ubicado antes y después del terraplén y el tercer sensor se ubica antes del vertedor triangular a la salida del canal. Estos son ultrasónicos del modelo PING)) TM#28015 con un rango de medición de 0.02 a 3 metros y precisión menor a 0.2 milímetros. Dichos sensores se conectan a un microcontrolador modelos 2560 y este a su vez se conectan a un computador por medio de un puerto serial USB. Las mediciones se pueden ver en tiempo real mediante el Software Arduino, gracias al programa adhoc adjunto en el anexoA.

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

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

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

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

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:** Se utilizaron dos cámaras para el registro de video como muestra la figura N°2. Se utilizó una cámara (CamF) de celular LG L5 de 5 megapíxeles colocada en la parte frontal del terraplén que registro archivos de videos que posteriormente fueron guardados en la computadora en formato (.mp4), también se utilizó una cámara (CamV) de marca JVC modelo Optical 22x GR-AX730, ubicada de forma lateral al terraplén, 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 de video se tomaron a una distancia que varió entre los 30 a 40 cm desde el canal para la cámara lateral y aproximadamente a 70 cm desde el pie del talud aguas abajo, en ambas cámara enfocándose en el centro de éste para ver los cambios ocurridos durante el ensayo.
- **Cámara fotográfica:** Se utilizó una cámara para fotografías que se aprecia en la figura N°2 como CamC, esta es de 8 megapíxeles de un teléfono celular Samsung Galaxy Grand, donde estos archivos se guardaron en formato JPEG (.JPG). Los registros fotográficos se tomaron con una frecuencia aproximada de 30 minutos y a una distancia de 1 metro aproximadamente del talud aguas abajo en forma transversal como muestra el esquema del canal.

- **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:** Se utilizó un tubo de precipitado de 1.800 cm³ de capacidad, con una precisión menor a 0,1 cm³ para medir el volumen de agua que sale al final del canal.
- **Cronometro:** Se utilizó un cronómetro marca TORPEDO CHRONOGRAPH 1/100 SEC que posee un error menor a 16 centésimas de segundo, con el cual se medio el tiempo de realización de cada aforo volumétrico.

b) Variables medidas

- **Carga hidráulica (CH):** Es la presión aplicada por un volumen de agua por unidad de superficie en un determinado periodo de tiempo. Se determina como la diferencia de alturas entregadas por el sensor uno (SD1) ubicado aguas arriba y el sensor dos (SD2) ubicado aguas abajo del terraplén.
- **Caudal:** Es una cantidad de fluido que circula a través de una sección por unidad de tiempo. El caudal producido por el colapso del terraplén fue estimado a partir de la

ecuación (4) en función de la altura de escurrimiento sobre el vertedor, donde se relaciona con el registro entregado por el sensor 3 (SD3). Mientras el fluido se encuentra en estado de régimen permanente, se realizan aforos volumétricos del caudal de salida (Q_s), ya que debido a la magnitud de los caudales, la ecuación (4) del vertedor no presenta la precisión necesaria (Gutiérrez, 2015).

2.4. Ensayos experimentales

La figura N°2 muestra el montaje experimental propuesto, el que consistió en la realización de seis ensayos de terraplenes de arena con distintas tipologías de geotextil a carga hidráulica constante, con el propósito de realizar un seguimiento del comportamiento del terraplén, modificando el protocolo definido por Gutiérrez (2015). La pendiente longitudinal del canal experimental se mantuvo constante e iguales en todos los ensayos experimentales.

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 terraplenes 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.

2.4.1. *Protocolo de ensayo*

- ✓ Tener el terraplén de arena con el geotextil 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 10 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 24 horas posterior a la llegada del 15% del borde libre o cuando ocurra el colapso del terraplén.
- ✓ Guardar el registro de los datos de los sensores en un archivo texto (.txt), los videos en formato (.mp4) y el de fotografías en formato (.JPG).
- ✓ Desconectar el equipo de medición del computador.
- ✓ Desconectar los equipos de grabación del computador
- ✓ Limpiar el canal de laboratorio.

Cabe señalar que las señales de salida de los sensores se conectan a una placa Arduino, y esta se comunica a un computador por medio de un puerto serial USB donde las mediciones son observadas en tiempo real, luego son registradas y guardadas como datos para su posterior estudio. El código Arduino utilizado para el registro de las mediciones de sensores y vertedor 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. Los valores se muestran en forma tabulada para su posterior análisis (Tabla N°2).

2.5. Comportamiento espacio-temporal de terraplenes propuestos

Para evaluar el comportamiento espacio-temporal de los terraplenes de arena con distintas tipologías de geotextil, se realiza un análisis de los resultados obtenidos durante cada ensayo, para los diferentes parámetros medidos, considerando la estabilidad del terraplén, el flujo en el medio poroso con carga hidráulica, el tiempo de falla/ llenado (T_f/T_{ll}) y un análisis temporal entre las variables empleadas. Posteriormente se realiza una comparación de dichos parámetros medidos con el terraplen de referencia, que para efectos de este estudio es el terraplen con disposición de geotextil A (Tipo A).

2.5.1. Parámetro T_f/T_{ll}

Corresponde a una razón adimensional entre el tiempo de falla (T_f) y el tiempo de llenado (T_{ll}), establecida para relacionar los distintos ensayos. Este parámetro sirve para definir cuan estable es el talud del terraplén, puesto que la falla del pie del talud compromete la estabilidad de la estructura. Esta variable se estableció para poder comparar los terraplenes con diferente colocación de geotextil y el terraplén de referencia (Tipo A), ya que estos presentaron distintos tiempos de llenado para alcanzar el nivel de carga hidráulica establecida.

2.5.2. Estabilidad del talud aguas abajo del terraplén

Utilizando los datos obtenidos en cada uno de los ensayos experimentales realizados con diferente disposición de geotextil, junto a la observación en tiempo real de los cambio del talud y a un análisis en cámara lenta de los videos registrados, se realiza un análisis cualitativo del mecanismo de falla del talud, ya que el tiempo de falla se ve directamente relacionado por el tiempo de llenado (Arratia, 2016). Además, se realiza un análisis cuantitativo para cada terraplén, a fin de establecer una relación entra la razón T_f/T_{ll} y cada tipología propuesta de geotextil, puesto que la estabilidad del talud aguas abajo se relación directamente con el tiempo de falla y este a su vez con el tiempo de llenado.

Con el propósito de establecer comparaciones entre los ensayos realizados y el ensayo correspondiente al terraplen de referencia, se muestra en forma grafica el comportamiento de las variables analizadas que influyen en la estabilidad del talud aguas abajo. Dichas variables son las siguientes:

Caudal de Falla (Q_f): Corresponde al caudal de salida aforado en el momento de ocurrida la falla en el pie del talud.

Caudal Carga Hidráulica ($Q_{c.h.}$): Corresponde al caudal de salida aforado al momento de alcanzar el nivel de carga hidráulica establecido.

2.5.3. Flujo en el medio poroso al interior del terraplén

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.

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

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 $\Delta V/\Delta t$ es la variación del volumen de agua en el tiempo, aguas abajo del terraplén (Arratia, 2016).

El caudal que sale del interior del terraplén influye en el arrastre de material en el pie del talud. Si el caudal de salida se mantiene, provoca fallas en el talud y conlleva a una pérdida de estabilidad. Es por ello que se muestra en forma gráfica el cambio del caudal de salida y del medio poroso a medida que se llega al nivel de carga hidráulica establecida.

Para evaluar la estabilidad de los terraplenes de arena con diferentes disposición de geotextil, se procede a mostrar los resultados obtenidos durante cada ensayo, para su posterior comparación y análisis visto desde diferentes puntos: Estabilidad de terraplén, flujo del medio poroso con carga hidráulica, tiempo de falla/llenado y un análisis temporal entre variables.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados experimentales obtenidos para cada tipología ensayada se resumen en este capítulo.

3.1. Sistema de medición

La tabla N°2 muestra las variables medidas con los elementos del sistema de medición propuestos. En esta tabla se presentan los valores medios y desviación estándar de las variables medidas durante los ensayos experimentales.

Tabla N°2 Resultados registrados durante ensayos experimentales para terraplenes predefinidos.

Tipología	Carga Hidráulica (mm)	Caudal Máx de salida Qs (l/s)	Temperatura Agua (°C)		Temperatura Ambiente (°C)	
			X	σ	X	σ
A	244,31	0,0294	23,46	0,11	29,47	0,18
B	245,41	0,0275	23,18	0,3	26,08	0,58
C	244,81	0,0256	21,69	0,38	21,17	1
D	242,09	0,0555	21,69	0,11	22,94	0,37
E	241,78	0,072	21,57	0,26	24,42	0,61
F	246,36	0,0588	23,73	0,14	30,99	0,9

Los caudales de salidas mostrados en la tabla N°2 corresponden a los caudales máximos que fueron medidos mediante aforos volumétricos antes de ocurrido el colapso del terraplén, de donde se destaca que para los dos menores caudales 0,0275 l/s y 0,0256 l/s para las disposiciones de geotextil B y C respectivamente, no se aprecia una diferencia significativa (7,4%) en sus caudales, pero si en la cantidad de geotextil utilizado, en contra parte para el caudal mayor que fue de 0,072 l/s lo presentó el terraplén E, de lo cual se concluye que la cantidad de geotextil utilizado no influye directamente en el caudal de salida del terraplén.

La Tabla N°2 presenta la variación de temperatura ambiente y del agua a lo largo de cada ensayo realizado. Se logra consignar que la temperatura ambiente varió desde los 21,17 °C a los 30,99 °C, y la temperatura del agua entre los 21,69 °C y los 23,73 °C en los ensayos realizados. Cabe señalar que los ensayos se llevaron a cabo en tiempo de verano, al correspondiente mes de enero del año 2016.

El sistema de medición habilitado para cada ensayo experimental presento fallas en dos ocasiones, a causa de la salida de un cable de la placa Arduino desde su pink establecido, provocando una entrega errada de información. Esto se solucionó ubicando en su lugar dicho cable en la placa antes mencionada, lo que llevo a realizar una nueva corrida experimental con un tiempo de prueba de 600 segundos, para así cerciorar que todos los elementos funcionaran correctamente. De esta forma se asegura que la información entregada por el Software Arduino es verídica.

En cuanto al nivel de carga hidráulica establecido, fue imposible mantenerla de forma constante debido a que existieron variaciones de presión en la válvula tipo llave que alimenta el canal, es por ello que se obtuvieron distintos tiempos de llenado para cada ensayo.

3.2. Ensayos Experimentales

La figura N°3 muestra la evolución de las distintas tipologías del terraplén usado en los ensayos experimentales.

De la Figura N°3 se aprecia que el caudal del medio poroso (Q_{mp}), obtenido por la ecuación (5) oscila alrededor del caudal de salida aforado, esto se produce porque el flujo que sale del interior del terraplén es irregular debido al mecanismo de falla (Arratia, 2016), ya que al momento de caer el material del talud, obstruye el flujo que pasa a través de este, pero después de un periodo de tiempo el flujo logra saturar nuevamente el material abriéndose paso nuevamente, lo que provoca estas variaciones de caudal por continuidad a la salida del terraplén. El caudal del medio poroso si bien oscila, el promedio de estas oscilaciones es el caudal aforado cuando se llega al nivel de carga hidráulica predefinido, lo que corrobora que el flujo en el interior del terraplén es irregular debido al geotextil presente y al tipo de falla que se produce

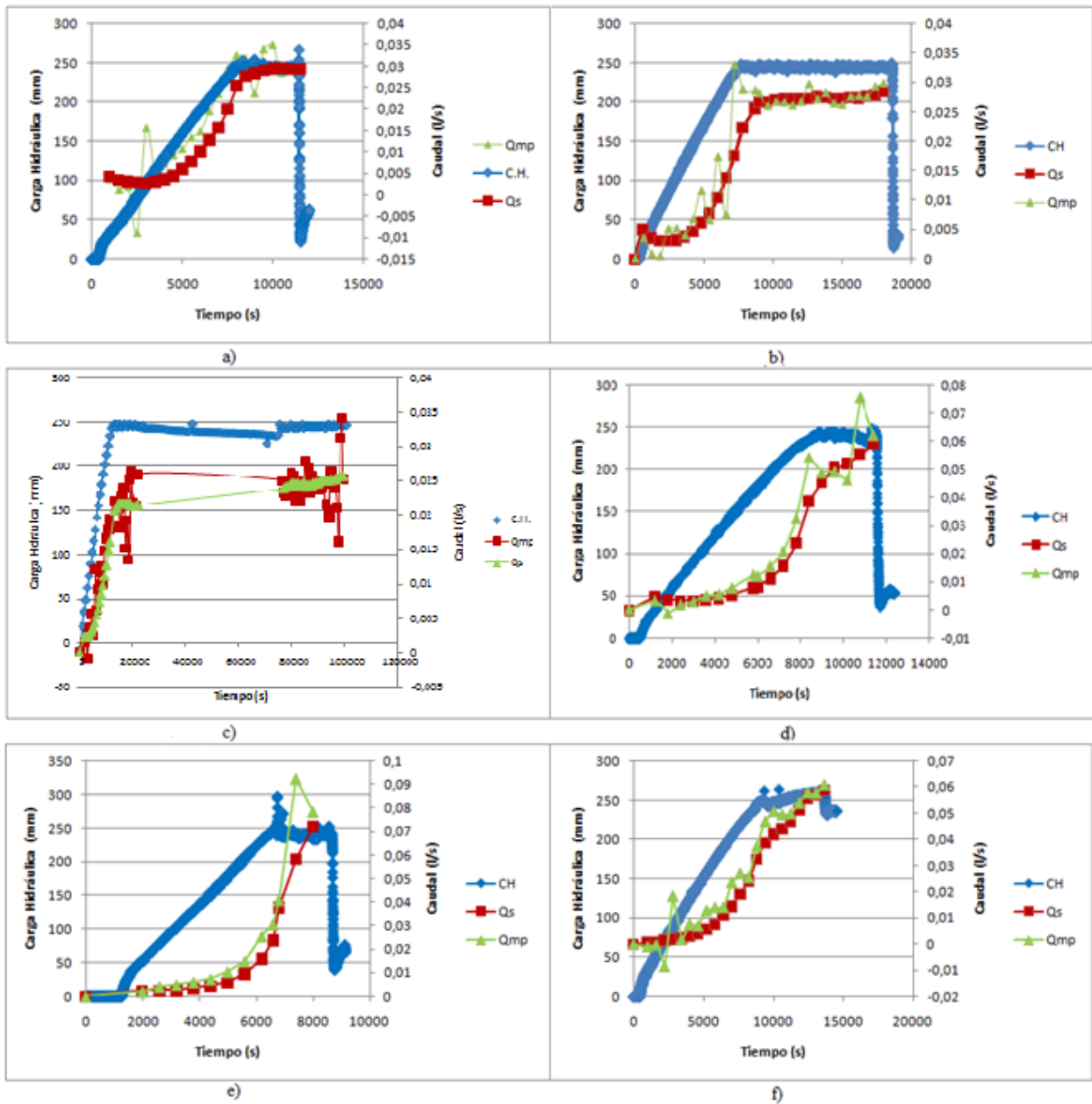


Figura 3: Evolución del caudal y la carga hidráulica de los distintos ensayos experimentales.

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

Para el ensayo del terraplen de referencia (TipoA), la carga hidráulica presentó un crecimiento constante durante 7976 (s) hasta alcanzar el nivel establecido, con un caudal de salida de 0,0254 l/s y un caudal en el medio poroso en ese mismo instante de tiempo de 0,02548 l/s. lo que corrobora que el promedio de las oscilaciones del caudal en el medio poroso efectivamente son

igual al caudal de salida aforada. El colapso del terraplen de referencia ocurre a las 3454 segundos de alcanzado el nivel de carga establecido, esto se aprecia en la abrupta caída a las 11430 (s) que presenta la curva de carga hidráulica. El caudal medido (aforo) al momento de colapsar la estructura es de 4,43 l/s, mientras que por medio de la ecuación (4), la que corresponde al caudal medido por el sistema de medición empleado a través de los datos entregados por el sensor de distancia 3 (SD3) dio un caudal de 4,1 l/s. Lo que indica que para grandes caudales la ecuación (4) funciona de excelente forma.

En el ensayo con disposición de geotextil B (Tipo B) el tiempo en que llega al nivel de carga hidráulica establecida es de 7650 (s), tiempo casi idéntico al terraplen de referencia. El caudal de salida medido en ese instante de tiempo es de 0,0211 l/s lo que es aproximadamente un 20% menor al caudal de salida en el terraplen de referencia. El caudal en el medio poroso a los 7700 (s) es de 0,0228 l/s, siendo esto un 5% mayor en relación al caudal al momento de alcanzar el nivel establecido. El colapso del terraplen Tipo B ocurre a los 10950 segundos desde que se llegó al nivel de carga hidráulica establecido, eso indica que el terraplen con disposición B retrasó el tiempo de colapso en 7479 (s) o sea 2 hrs aproximadamente. Al momento de colapsar el terraplen (18600 (s)) presentó un caudal de 3,04 l/s (Ecuación (4)), lo que es un 45% menos al caudal de colapso en el terraplen de referencia.

El ensayo con disposición de geotextil C (Tipo C) fue el que más duró, con un tiempo de ensayo de 100898 (s) aproximadamente de 28 hrs continuadas. Al momento de llegar al nivel de carga hidráulica establecido que fue a las 11900 segundos, se midió por medio de aforo volumétrico un caudal de 0,01982 l/s y un caudal en el medio poroso de 0,019396 l/s, lo que significó una variación del 25% en relación a estas dos variables medidas para el terraplen de referencia (Tipo A).

Señalar que para ese ensayo se provocó un aumento en el nivel de carga a las 102268 (s) con el fin de provocar su colapso, lo cual no ocurrió, si no que se logró que el agua pasara sobre el terraplen con un caudal aproximada de 0,0326 l/s.

Debido a la duración del ensayo C y a la gran cantidad de datos generados, se realizó un promedio de los datos de carga hidráulica cada 600 (s) con el fin de presentar de forma clara las variables medidas. También se aprecia un descenso de la carga hidráulica y una no realización de aforos ni cálculos de caudal en el medio poroso durante 54000 segundos, esto corresponde a que

durante la noche no fue posible realizar el seguimiento del terraplen, ya que el laboratorio donde se realizaron los ensayos experimentales tiene un horario de funcionamiento que va desde las 8:00 hrs hasta las 18:00 hrs.

Para el ensayo con disposición D (Tipo D), se alcanza el nivel de carga hidráulica establecido a las 8620(s), con un caudal medido en ese instante de 0,04123 l/s y un caudal en el medio poroso de 0,0456 l/s, lo que corresponde a un 60% y 55% respectivamente de variación en relación al terraplen de referencia. El colapso ocurre a los 11570 (s) de iniciado el llenado del canal de ensayo y presentó un caudal de 2,62 l/s, aproximadamente un 60% menos al caudal de colapso que presentó el terraplen Tipo A.

Para el ensayo E (Tipo E) a los 6600 (s) se alcanza el nivel de carga hidráulica establecido con un caudal de salida medido de 0,02394 l/s y un caudal en el medio poroso de 0,03 l/s, aca se aprecia una variación entre estas dos variables del 25% producto de las grandes oscilaciones que presentó el flujo a través del terraplen. El caudal de salida al momento de alcanzar el nivel de carga hidráulica establecido es prácticamente el mismo al presentado por el terraplen de referencia variando solo por un 5%. El colapso ocurre a los 8670 (s) o sea 2000 (s) después de alcanzado en nivel establecido, con un caudal aproximado de 3,13 l/s, un 30% menor al caudal de colapso en el terraplen de referencia.

Por último, en el ensayo E (Tipo E), se alcanza a los 8600 (s) el nivel de carga establecida, con un caudal de salida para ese instante de 0,0326 l/s y un caudal en el medio poroso de 0,03736 l/s, lo que corresponde a una variación del 45% en relación al caudal de salida en el terraplen de referencia y tan solo de un 17% en relación al medio poroso. El colapso para este ensayo no ocurre, al igual que en el ensayo C, por lo que se provoca intencionalmente a los 13650 (s). Este ensayo presenta un caudal de salida demasiado pequeño a la hora de colapsar, lo que indica que las alturas medidas por el sensor de distancia 3 (SD3) también lo son, esto quiere decir que el caudal por medido por la ecuación (4) no es confiable.

3.3. Análisis cualitativo de la falla del talud de arena

En los ensayos de terraplén de arena con talud 3/2 con diferente colocación de geotextil, se apreciaron diferentes mecanismos de fallas de talud que afectaron la estabilidad del terraplén, en el ensayo C no se perdió estabilidad, solo presentó un alto grado de saturación y flujo limpio continuo (sin arrastre de material). Para el ensayo E, se apreciaron dos mecanismos de fallas como se puede ver en la Figura N°4. Por otro lado, en el ensayo F existió arrastre de material, pero no presentó colapso la estructura.

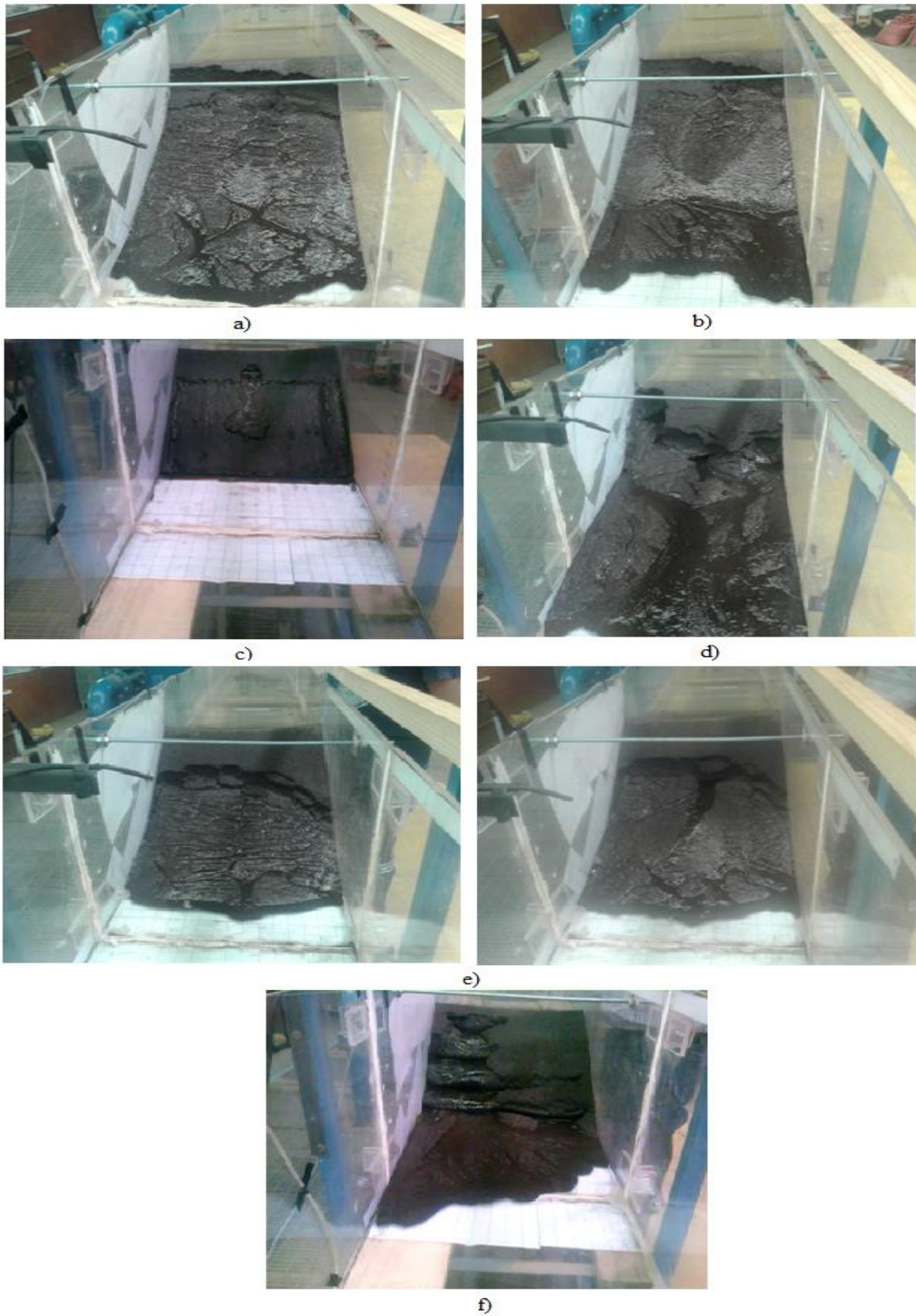


Figura N°4 Mecanismo de falla en talud aguas abajo del terraplén.

(a) Tipo A, (b) Tipo B, (c) Tipo C, (d) Tipo D, (e) Tipo E, (f) Tipo F.

En el ensayo del terraplén de referencia con disposición de geotextil A, se observó el mecanismo de falla por tubificación (piping) de flujo disperso, en el 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 (20%), llegó un punto donde el nivel de saturación era tal, que aparecieron cárcavas producto de los flujos en el centro y extremos del talud, este flujo empezó a arrastrar y desplazar material del pie del talud 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 de la carga hidráulica, arrastrando arena y depositándola aguas abajo del talud. En la parte del talud que aun no fue desplazado se generaron grietas, que luego generan la caída de material por gravedad obstruyendo el paso del flujo por un lapso de tiempo, esta obstrucción desaparece cuando el material se satura y permite que el flujo de agua limpie la superficie con los canales de circulación y se repita el proceso.

Para el ensayo de terraplén con disposición de geotextil B, presento el mismo mecanismo y características del falla que el ensayo A (Sin geotextil), falla por tubificación de flujo disperso, en cambio través del análisis de los videos se noto que el talud sufrió un alto grado saturación (más del 50%) al momento de fallar en comparación con el terraplén A, también se observó un flujo preferencial en la base del terraplén, esto debido a que el agua siguió la línea del geotextil ubicado en la base del terraplén (ver Figura 1), aun con la existencia de este flujo preferente en la base del terraplén, el talud no presentó arrastre hasta los 6350 segundos y con una carga hidráulica de al menos un 70%, en cambio para los demás ensayo el pie del talud fallo con una carga hidráulica del 25%.

En el ensayo C, en el cual el geotextil cubre todo el terraplén por su exterior no se logra apreciar arrastre de material ya que el geotextil al ser colocado de forma que confinara las partículas no dejándolas pasar, no se genera arrastre de material ni menos pérdida de estabilidad del terraplén, el material que si se arrastró fue el que se encontraba en la corona del terraplén, el cual se comportó como un terraplén independiente que cedió fácilmente al estar en presencia de carga hidráulica, al aumentar el nivel de agua se apreció un flujo limpio y continuo durante todo el ensayo, como no se genera desplazamiento en el pie del talud la razón adimensional tiende a infinito y su caudal de falla es asumido como cero. Se observó una hinchazón del geotextil, esto se produjo debido al aumento de los esfuerzos de cortes que genera el nivel de carga hidráulica que va aumentando y sumado a la presión que genera la arena.

Para el ensayo con colocación D se observó un flujo preferente en el centro de la primera capa de geotextil colocada, a medida que el nivel de carga hidráulica aumentó este flujo preferente fue cambiando hacia los lados del talud, esto ocurrió por la obstrucción que hizo el material que cayó por gravedad sobre el caudal que por ahí pasaba. El mecanismo de falla predominante es el provocado por la tubificación de flujo concentrado, el que presenta socavación y grietas en la parte del talud que no aun no fue desplazado. Al momento de alcanzar el nivel de carga hidráulica establecido, se generó un flujo preferente por el lado derecho del talud, esto ocasionó gran arrastre de material, luego de unos minutos el material que cedió del talud aun no desplazado obstruyó el paso del flujo produciendo que el agua abriera paso por otro camino, que en este caso fuera el centro del talud. Posteriormente el flujo creó surcos preferenciales con arrastre de material y un caudal de salida alto al momento de realizados los aforos.

En el ensayo de colocación E, se apreciaron dos mecanismos de fallas que influyeron en la estabilidad del terraplén, el primero, falla por flujo disperso el que se presentó entre los 3600 y 4800 segundos de comenzado el llenado del canal, se comportó de igual manera que el terraplén A (sin geotextil), se apreciaron cárcavas en el talud a medida que el nivel de carga hidráulica aumentaba, pero luego de estos 1200 segundos, el aumento de la carga hidráulica establecida provoca que aparezca un flujo preferente en el centro del talud (parte superior media), dicho flujo causa la falla por flujo concentrado (Ver Figura 8) causando socavación y una gran cantidad de grietas en la parte superior del talud no desplazado, luego todo este material agrietado cede bruscamente producto de la gravedad, causando que la estructura colapse a los pocos segundos (8670 s) de alcanzado el nivel de carga hidráulica establecido.

La colocación F, que es la establecida por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), se observa el mecanismo de falla por flujo disperso, con cárcavas en la arena que protege la primera capa (abajo) de geotextil, pero luego al aumentar el nivel de carga hidráulica el material que se encuentra protegiendo la segunda capa de geotextil cae debido a la saturación y al flujo preferente que se genera entre capas. A medida que aumenta el nivel de carga hidráulica se observó que el flujo encontró en el lado izquierdo del talud, un lugar propicio para pasar sin problema ya que como podemos apreciar en la Figura 9, es por aquí donde se generó mayor arrastre de material, lo que no pone en riesgo de colapso a la estructura ya que el geotextil logra contener la fuerza generada por el material y la carga hidráulica. En este ensayo se debió provocar intencionalmente

el colapso del terraplén ya que si se continuaba ensayando, los registros no iban a variar mayormente.

En el anexo C se encuentran disponibles los videos registrados en cada unos de los ensayos descritos anteriormente.

3.4. Análisis cuantitativo de la estabilidad del terraplén de arena

La estabilidad del terraplén se ve afectada directamente por la acción de carga hidráulica, que causa una falla en el talud del terraplén, la cual provoca un arrastre del material que lo constituye, y esto sumado a que la arena posee una baja capacidad de retención de agua y un alto índice de poros, son el escenario ideal para el afloramiento de flujos de tubificación al interior del terraplén.

Al fallar el talud, la estabilidad del terraplén se compromete, ya que gran parte de su material que lo conforma se ve desplazado aguas abajo, lo que causa que la arena del terraplén que aún no ha sido arrastrado y la carga hidráulica que aún está aumentando (hasta llegar al nivel predefinido) generen esfuerzos sobre la estructura que ha perdido gran parte de su material aguas abajo.

La pérdida de material en el pie de talud es el comienzo de la pérdida de estabilidad del terraplén, ya que apareciendo dichos flujos de tubificación desencadenan un ciclo de saturación-arrastre que no cesa hasta que todo el talud se desplaza, por ello que el tiempo de falla (t_f) en el pie del talud es fundamental a la hora de evaluar la estabilidad del terraplén con diferentes colocación de geotextil, ya que mientras más se logre retrasar este tiempo de falla en el pie del talud, mayor estabilidad tendrá en el terraplén.

El llenado del canal juega un importante papel debido a que a mayor llenado del canal, mayor carga hidráulica está actuando sobre las partículas que conforman al terraplén, por ello que el tiempo de llenado y tiempo de falla, son datos que deben ser considerado a la hora de estudiar el comportamiento de estabilidad del terraplén, esta estrecha relación hace fundamental la búsqueda de un tiempo de falla lo más cercano posible al tiempo de llenado, esperando un tiempo de falla igual o mayor al tiempo de llenado del canal.

La Figura N° 9 muestra la relación T_f/T_{ll} y Caudal v/s Tipología de terraplén en todos los ensayos experimentales.

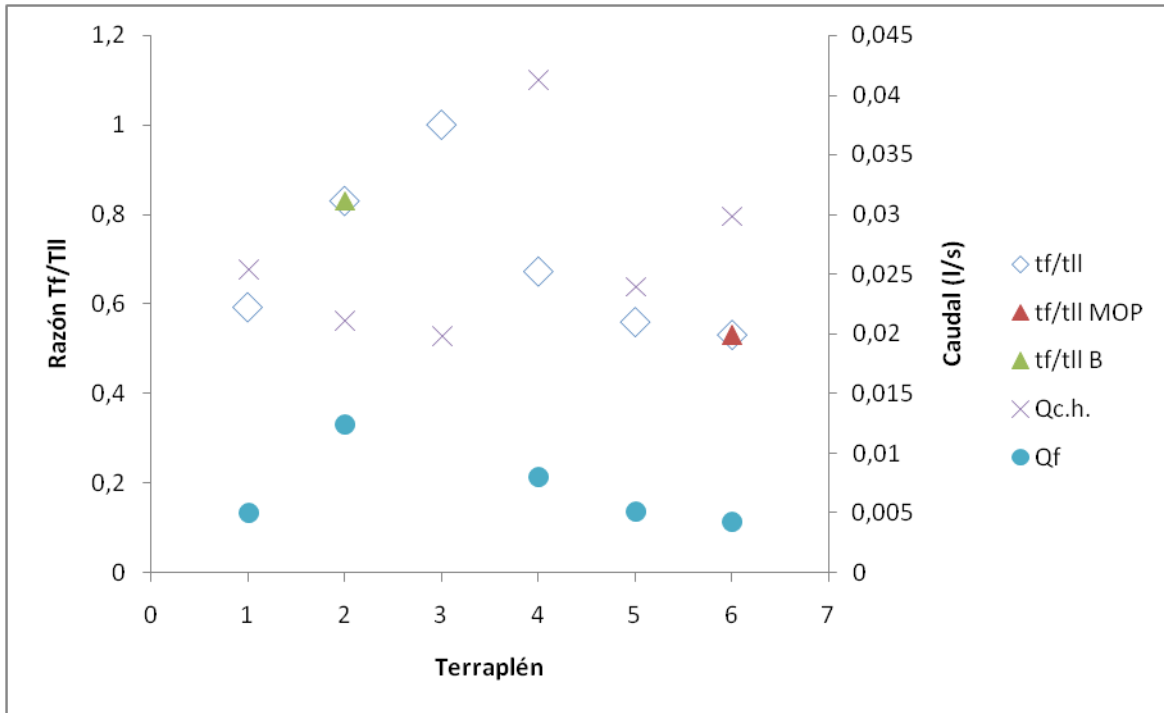


Figura N°5. Relación entre variables hidráulicas y diferentes tipologías de terraplenes ensayados.

En la figura N°5 se observa que para las diferentes disposiciones de geotextil se presentaron variaciones de la razón adimensional creada de 0,53 y 0,83 para el ensayo F y B respectivamente, de esto se infiere que la cantidad de geotextil no influye a la hora de mejorar la estabilidad del terraplén de arena, para el caso de la colocación C la razón adimensional tiende a infinito ya que no presentó tiempo de falla.

Como se aprecia en la figura N°4 que para el ensayo A (referencia) que es el correspondiente a la colocación que no considera geotextil, la razón adimensional (tf/tll) presentada fue de 0,59 y el caudal medido (aforo) a la hora de ocurrida la falla del pie del talud fue de 0,005 l/s, valores que fueron correlacionados con los obtenidos por el Señor Arratia (2016) y que no difieren en forma considerable con los obtenidos en este ensayo. Cuando se llegó a nivel de carga hidráulica establecido, el caudal medido (Qc.h.) fue de 0,0254 l/s medido a los 7976 segundo, esto es 5 veces al caudal de falla.

Por otra parte, en el caso del geotextil con disposición B que es uno con la cantidad más baja de geotextil (0,76 m) es el que mejor relación adimensional presentó de todos los ensayos la cual fue de 0,83, esto quiere decir que tardó más en producirse la pérdida de estabilidad en relación al tiempo de llenado que experimentó el terraplén al tener esta razón más alta. Al momento de

alcanzar el nivel de carga hidráulica establecida (15%) se alcanzó a tener un caudal en régimen permanente, lo que no se logró en ninguno de los otros ensayos, este caudal fue de 0,027 l/s aproximadamente 2 veces al caudal.

Para el caso de la colocación C la razón creada tiende a infinito esto debido a la disposición que se adoptó previamente con el fin de confinar el material que conforma al terraplén (arena), debido a esto no existió arrastre de material en el pie del talud ni pérdida de estabilidad de la estructura, por ende no presenta caudal de falla ($Q_f=0$).

En el ensayo D no se lograron cambios significativos en la razón adimensional que fue de 0,67, tan solo un 11% mayor a la del terraplén 3/2 de referencia, ni en el caudal de falla 0,008 l/s. Al llegar al nivel de carga hidráulica establecida (15%) se realiza un aforo volumétrico con el cual se calcula el caudal ($Q_{c.h.}$) que está pasando, en este caso es de 0,04123 l/s siendo el mayor caudal al momento de llegar al nivel de carga hidráulica establecido, esto debido a los flujos preferente que se generaron en cada una de las capas horizontales de geotextil dispuestas.

Para la tipología E, los cambios no fueron mayormente significativos en relación al terraplén de referencia (Tipo A). Se aprecia un caudal de falla de 0,0051 l/s, prácticamente igual al Tipo A esto debido a que se generó un flujo por los lados del talud (interfaz arena/acrílico) lo que causó que el desplazamiento de material se produjera por estos lados, para luego generalizarse.

Para el ensayo con disposición F (Tipo F), se aprecia la razón adimensional t_f/t_{ll} mas baja que fue de 0,53 en relación a todos los ensayos realizados, esto ocurre debido a que el geotextil presente en la base del terraplén que está en contacto con el acrílico permite el paso del flujo de agua que a traviesa el terraplén de manera tal, que al encontrarse con el material que protege al geotextil (arena) lo desplaza de forma sencilla, ya que este al cumplir una función protectora es compactado con menor fuerza con el fin de no dañar el geotextil. Por lo mismo el caudal de falla es menor ya que se necesita un menor caudal para desplazar el pie del talud.

Como se aprecia en la figura N°5 las disposiciones con las que se logró una mayor razón adimensional fueron las tipologías B y D en las cuales se obtuvieron aumentos de un 40% y 14% respectivamente en relación al terraplén de referencia (Tipo A) definido. En cambio para los ensayos E y F la razón adimensional disminuyo en 5% y 11% respectivamente, para el ensayo F se esperaba que sucediera esto, debido a lo mencionado en el párrafo anterior, ya que el material desplazado fue el que protegía al geotextil de agentes externos que pudiesen deteriorarlo. Aun

existiendo este arrastre de material en el ensayo F, este no comprometió mayormente la estabilidad total de la estructura del terraplén, puesto que al llegar al nivel de carga hidráulica establecido no ocurrió un colapso total, si no un desplazamiento parcial del material protector del geotextil, lo que se puede apreciar en los videos registrados en el anexo C. El ensayo tipo C al no presentar arrastre de material en su talud, no presento un tiempo de falla, por lo que su razón adimensional t_f/t_{ll} se asume como infinito para los posteriores análisis.

El caudal alcanzado al llegar al nivel de carga hidráulica establecido ($Q_{c.h.}$) fue la que mas varió según cada disposición de geotextil. Como se aprecia en la figura N°4 el que obtuvo un mayor caudal fue el ensayo Tipo D, esto dado que el geotextil dispuesto en forma horizontal propició el paso del flujo de agua que atravesaba al terraplén debido a la característica drenante que posee el geotextil. Para los ensayos Tipo B, C y E, el caudal al momento de llegar al nivel establecido fue inferior al terraplen de referencia (Tipo A), se aprecia un descenso del caudal de 17%, 21% y 5% respectivamente, dado que el geotextil aporta un grado de compactación mayor al material que constituye al terraplén, en este caso arena. Para el caso Cel caudal fue menor ya que el geotextil que envuelve al terraplén hizo que los espacios existentes al interior del terraplén disminuyeran y asi el caudal que atravesaba también disminuyera.

El caudal de falla para los ensayos B, D y E fueron mayores a los que se presentó el terraplén patro (Tipo A). El terraplén Tipo A presentó un caudal de falla de 0,005 l/s y los terraplenes ya mencionados presentaron caudales de 0,01238 l/s, 0,008 l/s y 0,0051 l/s respectivamente, lo que representa una variación del 148% para el terraplén tipo B, 60% para el tipo D y un 20% para el tipo E. Como se dijo anteriormente el terraplén tipo C no presentó un caudal de falla por lo que se asume un caudal igual a cero ($Q_f=0$).

Finalmente se puede concluir que las disposiciones predefinidas influyen directamente en la estabilidad del terraplén haciendo varias tanto las razones adimensionales como el caudal de falla y carga hidráulica para cada terraplén ensayado. Esto debido al grado de compactación que agrega el geotextil, haciendo disminuir los espacios por donde puede fluir el agua, lo que provoca un disminución de los caudal que pasan al interior del terraplén, haciendo necesaria una mayor carga hidráulica que genere un caudal capaz de desplazar el pie del talud del terraplén de arena.

La disposición de geotextil que mejoró ostensiblemente la razón adimensional fue la tipología B la cual fue un 40% mayor en relación al terraplén de referencia (Tipo A) empleado en este

estudio. En el estudio realizado por el Señor Arratia (2016) se obtuvo una razón t_f/t_l para el terraplén Tipo A de 0,64 y para un terraplén con talud aguas abajo 4/1 de 0,96, lo que indica que la razón t_f/t_l obtenida en la tipología B ensayada es un 30% mayor a l terraplén Tipo A y tan solo un 15% menor para el terraplén de talud 4/1.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Por último, luego de realizar el análisis del geotextil sobre la estabilidad de terraplenes de arena, se concluye que:

- La disposición del geotextil incide directamente en la estabilidad del terraplén de arena, no así la cantidad de geotextil empleada. Como se logró ver en el ensayo Tipo B que fue el de mayor razón tf/tll y el que menos geotextil requirió; en cambio el ensayo D presentó una de las razones tf/tll más bajo y ocupó 1,35 metros lineales de geotextil.
- La disposición de geotextil B para un terraplén con talud de razón $3/2$, es la que mayor razón adimensional (tf/tll) presentó en relación al terraplén de referencia (Tipo A), la cual fue de 0,87 osea un 43% mayor.
- En la colocación C, no se aprecia arrastre de material del talud, sino un flujo limpio y continuo de salida desde el terraplén.
- Para el ensayo F, donde se consideró la disposición establecida por el Ministerio de Obras Públicas, existe arrastre de material en los primeros minutos de comenzado el ensayo, aun así este arrastre no genera mayor pérdida de estabilidad en la estructura, debido a que solo cumple una función de protección, corroborando que esta colocación es una excelente forma de prevenir posibles colapso por acción de carga hidráulica.
- Los terraplenes que presentaron mecanismo de falla por flujo disperso fueron los con disposición de geotextil A y B. Para el terraplén con disposición D, se apreció el mecanismo de falla por flujo concentrado con socavación en la parte media del talud. Para el caso E se observaron dos mecanismos de falla, en los primeros 4800 segundos falla por flujo disperso y, al momento de llegar al nivel de carga hidráulica establecida, falla por flujo concentrado con socavación. En el caso del ensayo C y F no se observó un mecanismos de falla relevante que afectara la estabilidad de la estructura, como se vio en el ensayo F, solo la capa protectora de geotextil se vio desplazada.

- Las disposiciones de geotextil en la interfaz canal/arena ya sea en paredes o en la base del terraplén, favorecen el afloramiento de flujos preferente al interior de la estructura, ya que el material del cual está hecho el canal del laboratorio, en este caso acrílico, opone nula resistencia al paso del agua.
- Disposiciones de geotextil que no confinen de alguna manera el material del terraplén no ayudan a mejorar la estabilidad. Esto se vió en los ensayos con colocación D y E, en el cual las capas de geotextil solo estaban puestas sobre la arena y fueron los que menor razón adimensional presentaron.
- Disposiciones iguales o mayores al de la fricción de la arena (30° - 40°) y que confinen el material, mejoran ostensiblemente la razón tf/tll .
- Como se apreció en otras investigaciones la razón adimensional tf/tll se ve directamente relacionada con el nivel de carga hidráulica que actúa, en cambio en estos ensayos se logra variar esta razón, lo que indica que el geotextil si influye en la estabilidad de terraplenes de arena.
- 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, este estado solo se logró para el ensayo B, el promedio de estas oscilaciones es igual al caudal de salida aforado.
- La carga hidráulica es el agente responsable de generar flujos al interior del terraplén lo que generó arrastre de material y pérdida de estabilidad de la estructura, ya que se observó en cada ensayo, que pequeños cambios de la altura de carga hidráulica, provocaba visibles cambios en el talud del terraplén.

4.2. Recomendaciones

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

- Desarrollar disposiciones a partir del ángulo de fricción del tipo de suelo del cual se construye el terraplén.
- Utilizar otro tipo de geotextil, con el fin de observar cómo cambian los datos que se registraron en este estudio.
- Implementar un sistema automatizado de sensores y cámaras con el fin de tener un registro más detallado de los sucesos que ocurren en el terraplén durante todo el ensayo, ya sea durante el día o la noche.
- Tener un sistema que controle la válvula de llenado en el canal, para tener un manejo del tiempo de llenado del canal y para mantener la carga hidráulica constante durante los ensayos realizados en la noche.

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. Arratia David (2016). Estudio experimental de la falla del talud en terraplenes de arena. Universidad del Biobío. Concepción, Chile
4. 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 Marzo de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num2/art14/index.html>
5. Li, Xiangyue, Rendón, Luis Emilio, & Espinoza, María Joselina. (2010). Consideración de fuerzas de filtración en el análisis de estabilidad de taludes granulares. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(3), 89-107. [Consultada: 23 de marzo de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v1n3/v1n3a6.pdf>
6. MOP. (2103) Manual de carreteras volumen n°3: Instrucciones y criterios de diseño. Ministerio de obras públicas. Dirección de vialidad, Gobierno de Chile. Chile.
7. 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 Abril de 2016]. Disponible en Internet: <http://www.13.cl/programa/bienvenidos/lo-que-tenes-que-saber/tragedia-del-estero-minte-el-error-que-mato-a-27-person>
8. Botasso, Fensel, Ricci (2004). Ensayo de resistencia a la penetración estática de geotextiles según normativa argentina. Disponible en Internet: http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/2011/06/2003_Penetracion-Geotextiles_Infraestructura-Vial_2003_Costa_Rica.pdf

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; 33
```

```
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); 34
```

```

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;

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

Distal2 = 0.5*0.001*(331.5+0.6*temperatura3) * dura2/Nref - 0.0; // En milímetros

Distal3 = 0.5*0.001*(331.5+0.6*temperatura3) * dura3/Nref + 0.0; // En milímetros 35

```

```
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

Registros de Videos, fotografías y corridas experimentales