

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

Profesor Patrocinante: Luis Santana Oyarzo  
Profesores Comisión: Verónica Lazcano Castro  
Sergio Quijada Vera

**ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE TERRAPLENES  
DE ARENA SOMETIDOS A CARGA HIDRÁULICA**

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

**DIEGO ALEJANDRO VARGAS VARGAS**

Concepción, Enero 2017

*A mi madre Juana Vargas que me cuida desde el cielo,  
a mis tíos y primos,  
a mis amigos,  
a la gente de CU y de N3S,  
a Don Luis Santana por su paciencia infinita,  
y en especial a mi tía María que me recibió en mis momentos más difíciles.*

## INDICE GENERAL

Resumen .....	1
Abstract.....	2
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Objetivos .....</b>	<b>5</b>
1.1.1. <i>Objetivo General</i> .....	5
1.1.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	5
<b>2. ANTECEDENTES GENERALES.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Estabilidad de Taludes.....</b>	<b>6</b>
2.1.1. <i>Caracterización de Taludes</i> .....	6
2.1.2. <i>Estabilidad de taludes y clasificación de movimientos de masa</i> .....	7
2.1.3. <i>Análisis de Estabilidad de Talud</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.1.4.. <i>Criterio de Mohr-Coulomb</i> .....	8
<b>2.2. Movimiento de agua en medio poroso .....</b>	<b>9</b>
2.2.1. <i>Efecto de agua en taludes</i> .....	9
2.2.2. <i>Ley de Darcy</i> .....	10
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Parámetros geotécnicos e hidráulicos.....</b>	<b>11</b>
3.1.1. <i>Material de ensayo</i> .....	11
3.1.2. <i>Ángulo de fricción</i> .....	12
3.1.3. <i>Densidad</i> .....	13
3.1.4. <i>Cohesión</i> .....	13
3.1.5. <i>Permeabilidad</i> .....	13
3.1.5.1. <i>Construcción de terraplenes</i> .....	14
3.1.5.2. <i>Sistema de medición</i> .....	14
3.1.5.3. <i>Ensayos experimentales</i> .....	17
3.1.5.4. <i>Modelos en Slide v6.0</i> .....	19
3.1.5.5. <i>Validez de la ley de Darcy</i> .....	21
3.1.5.6. <i>Permeabilidad media</i> .....	22

<b>3.2. Factores de seguridad .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3. Efecto de los parámetros geotécnicos sobre la estabilidad .....</b>	<b>23</b>
3.3.1. <i>Análisis de sensibilidad .....</i>	23
3.3.2. <i>Análisis probabilístico.....</i>	23
<b>4. Resultados y análisis .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1. Parámetros relevantes en la estabilidad.....</b>	<b>25</b>
4.1.1. <i>Parámetros geotécnicos .....</i>	25
4.1.2. <i>Permeabilidad .....</i>	26
4.1.2.1. <i>Ensayos experimentales .....</i>	26
4.1.2.2. <i>Modelos en Slide v6.0.....</i>	29
4.1.2.3 <i>Estimación de permeabilidad y validez de la ley de darcy .....</i>	30
4.1.2.4 <i>Permeabilidad media .....</i>	32
<b>4.2. Factores de seguridad .....</b>	<b>34</b>
<b>4.3. Efecto de los parámetros geotécnicos sobre la estabilidad .....</b>	<b>37</b>
4.3.1. <i>Análisis de sensibilidad .....</i>	37
4.3.2. <i>Análisis probabilístico.....</i>	38
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1. Conclusiones .....</b>	<b>40</b>
<b>5.2. Recomendaciones .....</b>	<b>42</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>43</b>
<b>ANEXO A: Protocolo de calibración y Códigos de software .....</b>	<b>45</b>
<b>ANEXO B: Registros multimedias, corridas experimentales, modelos de Slide v6.0 ..</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO C: Métodos de estimación de permeabilidad.....</b>	<b>54</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Elementos componentes de un talud.....	6
Figura 2: Terraplenes de ensayo habilitados .....	14
Figura 3: Esquema de montaje experimental en el laboratorio .....	15
Figura 4: Altura para verificación de la Ley de Darcy. ....	22
Figura 5: Comportamiento del caudal y carga hidráulica en terraplén.....	27
Figura 6: Terraplenes modelados en Slide v6.0 .....	29
Figura 7: Intervalos de confianza Test t de Student .....	32
Figura 8: Comparación de permeabilidades de arena Bío-Bío.....	33
Figura 9: Factores de seguridad de las superficies mínimas globales .....	34
Figura 10: Análisis de sensibilidad en superficie mínima global.....	37
Figura 11: Análisis probabilístico para terraplén N°1 .....	38

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Análisis granulométrico .....	11
Tabla 2: Diámetros efectivos representativos del material.....	12
Tabla 3: Parámetros geotécnicos .....	25
Tabla 4: Resultados registrados durante ensayos experimentales .....	26
Tabla 5: Permeabilidades por terraplén .....	30

## **ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE TERRAPLENES DE ARENA SOMETIDOS A CARGA HIDRÁULICA**

**Autor:** Diego Vargas Vargas

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

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

**Profesor Patrocinante:** Luis Santana Oyarzo

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

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

### **RESUMEN**

El presente informe muestra un estudio de la estabilidad de terraplenes de arena sometidos a carga hidráulica, mediante ensayos experimentales llevados a cabo en el canal de laboratorio de la Universidad del Bío-Bío.

De ensayos experimentales y de laboratorio se obtuvieron los parámetros geotécnicos e hidráulicos relevantes en la estabilidad tales como ángulo de fricción, densidad, cohesión y permeabilidad. Esta última se obtiene mediante el uso de datos de otros proyectos de títulos relacionados y al uso del software Slide v6.0, con el que posteriormente se obtiene el factor de seguridad (FS) para los terraplenes modelados con razón (ancho de corona B, altura h)  $B/h = 0$  (sin corona) y  $B/h \neq 0$  (con corona). Se realizó un análisis de sensibilidad a los parámetros que afectan al FS factor de seguridad.

El principal resultado muestra que los taludes con razón (horizontal H, vertical V)  $H/V < 3$  no alcanzan el FS de 1 tanto en condiciones con/sin carga hidráulica, mientras que la razón  $H/V = 3/1$  alcanza el factor de seguridad de 1 para las dos condiciones. La razón  $H/V = 4/1$  posee un factor de seguridad mayor a 1 para las dos condiciones, pero genera fallas en el talud debido al flujo de agua que pasa a través de él.

Del trabajo realizado se concluye que el aumento de la razón B/h mejora el factor de seguridad, que la razón  $H/V = 3/1$  es estable para las condiciones con/sin carga hidráulica y que la cohesión es el parámetro que más afecta al factor de seguridad.

**Palabras Claves:** Terraplén, estabilidad, carga hidráulica, factor de seguridad.

7653 Palabras Texto + 15 Figuras/Tablas\*125+ 1 Figuras/Tablas\*250= 9778 Palabras

# **STUDY OF THE STABILITY OF SAND EMBANKMENTS SUBJECT TO HYDRAULIC LOAD**

**Author:** Diego Vargas Vargas

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

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

**Advisor:** Luis Santana Oyarzo

Civil and Environmental Engineering Department, University of Bio-Bio

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

## **ABSTRACT**

The present report shows a study of the stability of sand embankments subjected to hydraulic loading, through experimental tests carried out in the laboratory flume of the Bío-Bío University.

The relevant Geotechnical and hydraulic parameters of stability were obtained from experimental and laboratory tests, such as friction angle, density, cohesion and permeability. The last one is obtained through the use of data from other related title projects and the use of the software Slide v6.0, With tit later you get the security factor (SF) for the patterned embankments with reason (crown width B, height h)  $B/h = 0$  (no crown) and  $B/h \neq 0$  (with crown). A sensitivity analysis was performed to the parameters that affect the security factor.

The main result shows that the slopes with reason (horizontal H, vertical V)  $H/V < 3$  do not get the SF of 1 both in conditions with/without hydraulic loading, while the reason  $H/V = 3/1$  reaches the security factor of 1 to the both conditions. The reason  $H/V = 4/1$  has a security factor greater than 1 for both conditions, but generates faults in the slope due to the flow of water passing through it.

Of the work done concludes that the increase of the reason B/h improve the security factor, that the reason  $H/V = 3/1$  is stable for conditions with/without hydraulic loading and that the cohesion is the parameter that most affects the security factor.

**Keywords:** Embankment, stability, hydraulic load, security factor.

## 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; geométricamente está constituido por sus taludes, corona y núcleo. El desarrollo de las actuales vías de comunicación, tales como caminos y ferrocarriles, obras de protección contra inundaciones, presas de tierra, así como el impulso de la construcción de edificaciones han puesto al diseño taludes en un plano de importancia de primer orden (De Matteis, 2003).

En los taludes existe peligro de que la masa de suelo que lo compone descienda hacia una posición más estable debido al efecto de fuerzas tales como la gravedad, las sobrecargas, erosión, infiltración, e incluso actividades sísmicas (Gerscovich, 2015). La presencia de agua en taludes tiene gran importancia en la ocurrencia de deslizamientos de masa, dado que provoca aumento de la presión de poros, aumento de la densidad aparente, y genera fuerzas hidráulicas internas (Li, Rendón, Espinoza, 2010).

A excepción de los terraplenes construidos para embalses, estos no son diseñados para resistir carga hidráulica, la cual puede generar deslizamientos y desplazamientos aguas abajo del material que constituye el talud, lo que puede desencadenar en el posterior colapso de la estructura, tal como lo ocurrido en 1995 en la tragedia del estero Minto (Schiessler, 2013), donde fallecieron 27 personas.

La condición de estabilidad de un talud se puede definir en base al análisis de modelos físico-matemáticos, los cuales consideran la relación existente entre las fuerzas resistentes y las desestabilizadoras que se presentan en una masa de suelo, la cual se denomina factor de seguridad. Cuando esa relación es mayor a 1 indica que las fuerzas resistentes son mayores a las desestabilizadoras, por lo tanto, es un talud estable (Fellenius, 1927).

Actualmente se han desarrollado diferentes softwares que analizan la estabilidad de una masa de suelo; en especial la estabilidad ha sido abordada numéricamente a través de la solución de métodos matemáticos de estabilidad tales como Fellenius, Bishop, Spencer, etc., mediante análisis de elementos finitos de aguas subterráneas, incluyendo fenómenos como infiltración rápida, diseño de soportes, e incluso considerando los efectos de la carga hidráulica en el



nivel freático. Slide v6.0 desarrollado por Rocscience posee todas esas características, sumadas a una interfaz gráfica de fácil interacción.

Gutiérrez (2015) realizó el “Estudio experimental de los efectos de la carga hidráulica en el colapso de terraplenes de arena” el cual analizaba la incidencia de la geometría en la falla de terraplenes de arena con diferentes razones B/h (ancho de corona B, altura de terraplenes h), manteniendo constante la razón de talud  $H/V = 3/2$  (horizontal H, vertical V), mientras que Arratia (2016) realizó el “Estudio experimental de la falla del talud en terraplenes de arena” donde evaluó la incidencia de la geometría con diferentes razones de talud H/V y mantuvo la razón  $B/h = 0$ . Ambos estudios realizaron ensayos experimentales a terraplenes de arena sometidos a carga hidráulica, evaluando la estabilidad en base a los cambios de geometría y al análisis temporal y espacial de variables, tales como tiempo de falla y tiempos de llenado, todo esto sin considerar la estabilidad de la masa de suelos a través de parámetros tales como ángulo de fricción, cohesión, densidad, y permeabilidad, es decir, parámetros relevantes para obtener el factor de seguridad.

En base a la exclusión de los factores de seguridad expuesta anteriormente, en el presente Proyecto de Título se busca realizar un estudio de la estabilidad de terraplenes de arena sometidos a carga hidráulica, mediante la obtención de los parámetros relevantes en la estabilidad a través de ensayos de laboratorio, ensayos experimentales y el uso de la base de datos de Gutiérrez y Arratia, junto al uso del software Slide v6.0, dando como resultado la obtención de factores de seguridad para los terraplenes en condiciones con/sin carga hidráulica, junto al análisis de los cambios generados en el factor de seguridad por variación en los parámetros geotécnicos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

- Analizar el factor de seguridad en la estabilidad de terraplenes de arena sometidos a carga hidráulica.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Estimar parámetros geotécnicos e hidráulicos de terraplenes de arena mediante experimentos y ensayos de laboratorio.

- Evaluar la estabilidad de terraplenes de arenas a través de la obtención de factores de seguridad.

- Analizar el efecto de los parámetros geotécnicos e hidráulicos sobre el factor de seguridad.

## 2 ANTECEDENTES GENERALES

Para una mejor comprensión de este informe es necesaria la descripción y definición de conceptos claves de la estabilidad y movimiento del agua en medio poroso.

### 2.1 Estabilidad de taludes

#### 2.1.1 Caracterización de taludes

Se define como talud a toda superficie inclinada con respecto a la horizontal que haya adoptado una masa de suelos de forma permanente. Pueden clasificarse tanto en taludes naturales como artificiales.

- *Pie de talud o base*: Corresponde al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud.
- *Cabeza o corona*: Cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud.
- *Altura*: Distancia vertical entre el pie y la corona.
- *Altura del nivel freático*: Distancia vertical desde el pie del talud hasta el nivel de agua, lugar donde la presión de agua es igual a la presión atmosférica.
- *Pendiente*: Medida de la inclinación de la superficie del talud, puede medirse en grados ( $^{\circ}$ ), en porcentaje (%) y en razón horizontal es a vertical (H/V).
- *Material*: Suelo que compone el terraplén, sus características geotécnicas importantes son: Densidad, ángulo de fricción, cohesión.

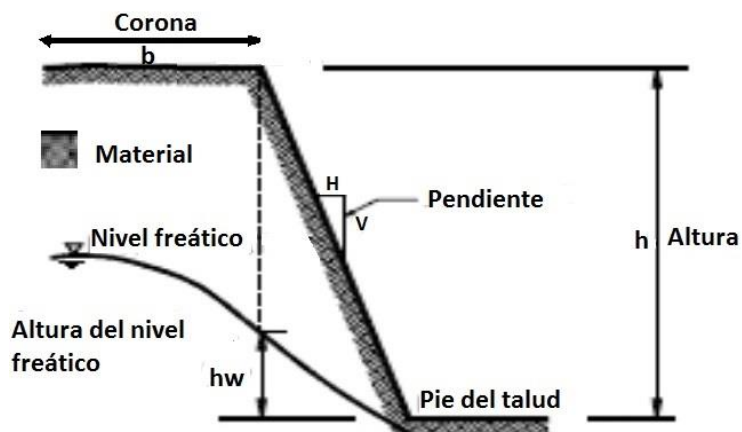


Figura N°1: Elementos componentes de un talud. (Fuente: Elaboración propia).

### 2.1.2 Estabilidad de taludes y clasificación de movimientos de masa

La estabilidad de un talud es la seguridad de una masa de tierra contra fallas y movimientos. Cuando la masa del suelo presenta una superficie inclinada, siempre existe peligro de que el suelo del nivel superior descienda, por lo que el talud tenderá a moverse hasta una posición más estable. Las fuerzas que afectan y causan inestabilidad son:

- *Gravedad*: tiene relación con la geometría del talud como la altura y la pendiente, el tipo de material que conforme la masa de suelo, es decir todo lo que desfavorezca al equilibrio de masa.
- *Infiltración*: movimiento del agua desde la superficie hacia el suelo por los poros.
- *Posibles sobrecargas*: algún tipo de carga que se encuentre en la cima o algún tipo de soporte.
- *Erosión*: efectos adversos que provoca tanto el viento como el agua en la superficie del talud.
- *Sismicidad de la zona*: esto puede acelerar o desencadenar grandes movimientos de masas, como resultado de una serie de vibraciones que provocan el desplazamiento de la componente vertical del peso e inducen una mayor tensión tangencial de cizalla en el plano de rotura.

### 2.1.3 Análisis de estabilidad de taludes

Para definir el estado de estabilidad de un talud, es común en la práctica obtener un factor de seguridad (FS) de la masa de suelo en base al análisis de un modelo matemático que simula la estabilidad.

El factor de seguridad se define como una relación que existe entre las fuerzas que aportan a la resistencia al movimiento y aquellas que tienden a desestabilizar la masa de suelo. (Ecuación 1).

$$F.S = \frac{\sum \text{Fuerzas Resistentes}}{\sum \text{Fuerzas desestabilizadoras}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Si esta relación es mayor a 1 indica que el talud es estable, es decir, que las fuerzas resistentes son mayores a las fuerzas desestabilizadoras. Si la relación es menor a 1 el talud tiene altas probabilidades de que sea inestable y presente deslizamientos a corto plazo.

Los métodos de análisis de estabilidad de taludes se basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan en una superficie del talud. Por lo general asumen que el suelo es un material isotrópico y se han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares.

Los métodos para el análisis de estabilidad se pueden clasificar en: Método del equilibrio límite (MEL) y Métodos numéricos.

El primero requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no requiere información sobre la relación esfuerzo-deformación que sufre un determinado material, además asume que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y las resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla, por ejemplo, en el caso de un F.S = 1.00, la masa analizada está a punto de fallar.

El segundo se centra en la relación tensión-deformación que se produce en un determinado material hasta llegar al punto de rotura. De estos modelos se obtienen valores correspondientes a los desplazamientos, deformaciones y tensiones que se van generando en base a la resolución de las ecuaciones de plasticidad mediante métodos de elementos finitos.

Se procederá a trabajar con MEL, a través de la relación entre las fuerzas y/o momentos resistentes versus actuantes, utilizando el criterio de fallo de Mohr-Coulomb.

#### **2.1.4 Criterio de Mohr-Coulomb**

Este criterio expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano tri-axial de tensiones, obteniéndose la relación entre los esfuerzos normales y tangenciales actuantes en el momento de rotura mediante la expresión matemática (Ecuación 2):

$$\tau = \sigma_n * \tan(\Phi) + c \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo cortante (N/m<sup>2</sup>)

$\sigma_n$  = Tensión normal (N/m<sup>2</sup>)

$c$  = Cohesión (N/m<sup>2</sup>)

$\Phi$  = Ángulo de fricción interno (°).

El criterio Mohr-Coulomb implica que tiene lugar una fractura por corte al alcanzarse la resistencia máxima del material.

## 2.2 Movimiento del agua en medio poroso

### 2.2.1 Efectos del agua en taludes

Los efectos que provoca el agua en taludes tienen gran importancia en la ocurrencia de deslizamientos de masas de tierra, provocados tanto por aguas superficiales como aguas sub-superficiales. Los efectos relacionados son:

- *Aumento de presión de poros*: Presión interna del agua de saturación en los intersticios. El agua subterránea circula ejerciendo presión en las partículas de suelo, la cual hace que disminuya la presión efectiva y la resistencia al corte, viéndose afectada la estabilidad del talud. Esta depende de la ubicación de los niveles freáticos, de las presiones internas de los acuíferos y de las características geológicas del sitio.

- *Aumento de la densidad aparente*: La presencia de una superficie freática en un terreno aumenta la densidad o peso específico de los suelos, debido a que los poros se llenan de agua, esta cantidad de agua extra tiene un peso que, al unirse al peso propio del terreno, aumenta el peso específico del conjunto y con esto, se aumentan los esfuerzos cortantes y se disminuye el factor de seguridad.

- *Fuerzas hidráulicas internas*: El movimiento de las corrientes de agua subterránea ejerce una presión hidrodinámica sobre el suelo en la dirección de flujo. Esta fuerza actúa como un elemento destabilizante sobre la masa de suelo, disminuyendo el factor de seguridad. La fuerza hidrodinámica puede ocasionar el movimiento de las partículas de suelo, fenómeno que se conoce como tubificación.

### 2.2.2 Ley de Darcy

Debido a los efectos provocados por la presencia de agua en taludes es necesario estudiar el movimiento de aguas en medio poroso, para lo cual se presenta la Ley de Darcy.

El flujo unidireccional de un fluido como el agua en un suelo saturado puede ser expresado usando la ley empírica de Henry Darcy (1856), quien estudió las propiedades de un flujo de agua a través de filtros de material arenoso, variando la longitud de la muestra y la presión de agua. De sus experimentos y para velocidades lo suficientemente pequeñas concluyó que, si se tiene un cilindro vertical de sección constante  $A$  y longitud  $L$ , y se hace circular agua a través de él, con una diferencia de niveles entre la entrada y la salida  $\Delta H$ , puede escribirse el caudal que circula como (Ecuación 3):

$$Q_i = k_i * i * A = -k * \frac{\Delta H}{\Delta L} * A \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

$Q_i$ : Caudal o gasto en la dirección  $i$  ( $L^3/T$ ).

$k_i$ : conductividad hidráulica en la dirección  $i$ , ( $L/T$ ).

$i$  = Gradiente hidráulico ( $L/L$ )

$A$  = Área de la sección transversal ( $L^2$ ).

La expresión anterior nos plantea que el coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) puede ser considerado como la velocidad del agua a través de un suelo cuando está sujeto a un gradiente hidráulico, en una sola dirección.

### 3. METODOLOGÍA

En esta etapa se presentan las metodologías específicas vinculadas a cada objetivo propuesto. Para ello se realizaron ensayos de laboratorio y ensayos experimentales a terraplenes de arena, junto con el uso de datos experimentales de proyectos de título relacionados.

#### 3.1 Parámetros geotécnicos e hidráulicos

##### 3.1.1 Material de ensayo

Para la construcción de terraplenes se utilizó como material arena limpia tipo Bío-Bío de color negro, de la cual, su granulometría se muestra a continuación en la Tabla n°1.

**Tabla N°1: Análisis granulométrico.**

<b>Malla</b>	<b>Abertura(mm)</b>	<b>Peso (gr)</b>	<b>% Pasa</b>
<b>N°4</b>	4.75	0	100.000
<b>N°10</b>	2	4.2	99.116
<b>N°20</b>	0.85	87.4	80.716
<b>N°40</b>	0.425	262.8	25.389
<b>N°60</b>	0.25	107.9	2.674
<b>N°200</b>	0.075	12.6	0.021

**Tabla N°2: Diámetros efectivos representativos del material.**

<b>D<sub>60</sub></b>	0.690 mm
<b>D<sub>50</sub></b>	0.614 mm
<b>D<sub>30</sub></b>	0.460 mm
<b>D<sub>10</sub></b>	0.306 mm
<b>Cu</b>	2.255
<b>Cc</b>	1.002

La tabla n°2 resulta de la interpolación de los datos de la tabla n°1, donde el tamaño  $D_x$ , es el tamaño del grano tal que solo el  $x$  % de los granos son de tamaño menor, ósea es el ancho de malla del tamiz que deja pasar el  $x$  %. El coeficiente de uniformidad (Cu) evalúa la uniformidad del suelo y corresponde a  $D_{60}/D_{10}$ , mientras que el Coeficiente de curvatura (Cc) refleja la graduación de los granos y corresponde a  $(D_{30})^2/(D_{10}*D_{60})$ . De lo anterior se puede concluir que la arena Bío-Bío es un material uniforme y mal graduado, del tipo SP.



### 3.1.2 Ángulo de fricción

El ángulo de fricción o de rozamiento interno es una propiedad de los materiales granulares. Su interpretación física está relacionada con el ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de una masa de suelo, lo que impacta directamente en el factor de seguridad en el caso de taludes. Para materiales sin cohesión el ángulo de reposo coincide con el ángulo de fricción.

Existen diversos procedimientos para la estimación del ángulo de reposo, pero los resultados son altamente dependientes de la metodología del experimentador. Dado que en Chile no existe norma ni metodología consolidada para obtener esta propiedad de los suelos, se realiza el procedimiento más común que consiste en el ASTM Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders (Designation: 1444 – 00) que consiste en:

- Usar un embudo con un diámetro interior entre 0.64 cm y 0.97 cm.
- Colocar un tapón en la parte inferior y posteriormente llenar con material granular suelto previamente homogeneizado.
- Posicionar sobre una hoja de papel a una altura de 3.81 cm.
- Remover el tapón y añadir arena continuamente de manera de mantener un flujo constante de material hasta que el punto de descarga del embudo fue tapado por el peak del montículo de arena formado.
- Medir cuatro diámetros en la base del montículo, y luego promediarlos, valor denominado  $D_1$ .
- Repetir el procedimiento 2 veces hasta obtener  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ .

El ángulo de reposo se calcula mediante la siguiente ecuación (4):

$$\phi_{\text{Rep}} = \tan^{-1} [2H (D_A - d)] \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

H = Altura entre la superficie del papel y el punto de descarga del embudo.

$D_A$  = Promedio entre  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ .

d = Diámetro interno a la salida del embudo.

### **3.1.3 Densidad**

La densidad es una magnitud escalar referida a la cantidad de peso presente en un determinado volumen. Para determinar los diferentes tipos de densidades presentes en el material, ya sea bajo condiciones secas o en presencia de agua, se realizaron ensayos de laboratorio para determinar la densidad in situ en un terraplén  $H/V = 3/2$  y  $B/h = 0$ , construido bajo el protocolo de compactación establecido por Arratia (2016), el que consiste en capas de arena saturada, colocadas en serie de horizontal con un espesor de 2 cm, compactadas con una varilla de apisonamiento manual hasta completar la altura de 30 cm.

El procedimiento de medición in situ será el Método del cono de la arena según NCh 1516 de 1979, el cual no se discutirá en este informe.

### **3.1.4 Cohesión**

La cohesión es una cualidad por la cual las partículas del terreno se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas, la que depende entre varias cosas del número de puntos de contacto que cada partícula tiene con sus vecinas.

No se realiza procedimiento para la medición de la cohesión, la que será discutida en el punto 4, Resultados y análisis.

### **3.1.5 Permeabilidad**

La permeabilidad o conductividad hidráulica es un coeficiente de proporcionalidad que representa la resistencia que ofrece el suelo a un fluido, el cual es un valor constante para cada medio y para cada fluido en unas mismas condiciones. Como el agua es un fluido poco compresible, los cambios de presión no afectan prácticamente a  $K$ , pero si se ve afectada a través de la compactación, la que acarrea en general una reducción de la permeabilidad.

Para abordar los cambios de permeabilidad producidas por la compactación en los diferentes terraplenes, esta será estimada mediante el uso del software Slide v6.0, y del uso de datos experimentales de ensayos de terraplenes de arena realizados por Gutiérrez (2015) y Arratia (2016).

### 3.1.5.1 Construcción de terraplenes

A modo de validación de los resultados obtenidos por Arratia (2016) se realizaron ensayos experimentales en terraplenes de arena con las dimensiones geométricas y taludes H/V predefinidos mostrados en la figura N°2, dispuestos con sus medidas de ancho en la base y altura nominal en centímetros. Estos poseen una corona nula ( $B=0$ ), H/V de 3/2 y 3/1 respectivamente. Estas razones fueron elegidas dentro de los diversos ensayos de Arratia debido a que la razón 3/2 consiste en la máxima inclinación permitida para carreteras por el MOP (2013), la cual también fue utilizada por Gutiérrez (2016) para todos sus ensayos, además la razón 3/1 fue utilizada debido a que fue el único terraplén que conservó su estabilidad bajo condiciones de carga hidráulica al 15% del borde libre.



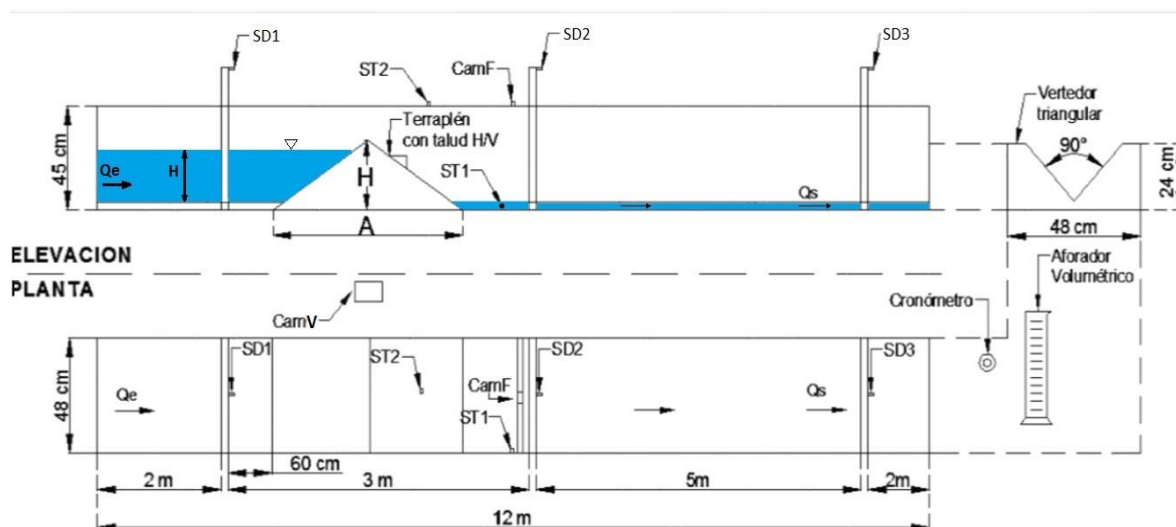
**Figura N°2. Terraplenes de ensayo habilitados, con sus medidas en centímetros.**

### 3.1.5.2 Sistema de medición

La figura N°3 muestra los componentes del sistema de medición y su ubicación al interior del canal del laboratorio. Se muestra la ubicación del 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 del agua, ambiente, 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 del agua y ambiente para luego hacer paso por el vertedor triangular de  $90^\circ$  ubicado al final del canal y así realizar los aforos volumétricos predefinido en el protocolo de ensayo.



**Figura N°3. 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 Anexo A.

Las ecuaciones (5), (6) y (7) 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 X.

$$\text{Sensor 1: } y = \frac{698.48-x}{0.9842} R^2 = 1 \quad \text{Ec. (5)}$$

$$\text{Sensor 2: } y = \frac{688.58-x}{1.0010} R^2 = 1 \quad \text{Ec. (6)}$$

$$\text{Sensor 3: } y = \frac{698.48-x}{0.9741} R^2 = 0.999 \quad \text{Ec. (7)}$$

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°X. Se utilizó una cámara (CamF) de celular LG L5 de 5 mega-píxeles colocada en la parte frontal del terraplén que registró 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, con ambas cámaras enfocándose en el centro de éste para ver los cambios ocurridos durante el ensayo.

- *Vertedor*: Se utilizó un vertedor triangular de acrílico con una abertura de 90° elaborado en el laboratorio. La ecuación (8) muestra el resultado de la calibración del vertedor, según protocolo definido en el Anexo A.

$$Q = -4495.10 \cdot h^3 + 9886.70 \cdot h^2 - 7255.60 \cdot h + 1776.60. \quad R^2 = 0.9986 \quad \text{Ec. (8)}$$

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 cm<sup>3</sup> de capacidad, con una precisión menor a 0,1 cm<sup>3</sup> para medir el volumen de agua que sale al final del canal.

- **Cronómetro:** Se utilizó un cronómetro marca TORPEDO CHRONOGRAPH 1/100 SEC que posee un error menor a 16 centésimas de segundo, con el cual se midió el tiempo de realización de cada aforo volumétrico.

#### b) Variables medidas

- **Altura de escurrimiento (SD1):** Es la altura alcanzada por el agua, en el talud aguas arriba del terraplén. Su valor es entregado por el sensor 1 (SD1) en milímetros (mm).

- **Caudal:** Es una cantidad de fluido que circula a través de una sección por unidad de tiempo. El caudal producido en los ensayos de terraplenes fue estimado a partir de la ecuación (8) 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 (8) del vertedor no presenta la precisión necesaria (Gutiérrez, 2015).

### 3.1.5.3 Ensayos experimentales

La figura N°3 muestra el montaje experimental propuesto, el que consistió en la realización de dos ensayos de terraplenes de arena con distintas relaciones H/V a carga hidráulica constante, siguiendo el protocolo definido por Arratia (2016). 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. Se vierte agua por el vertedor en la zona aguas abajo del talud para romper la tensión capilar que está presente, y además mantener un gradiente hidráulico constante, es decir, un nivel de referencia inicial plano.

## 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 verificar 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 mediante cámara frontal y lateral.
- 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: registro de tiempo (s), temperatura ambiente y de agua (°), niveles de escurrimiento (mm), caudal (lt/s) 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.

### 3.1.5.4 Modelos en Slide v6.0

Slide es uno de los softwares de análisis de estabilidad más completo disponible en la actualidad, posee análisis de elementos finitos de aguas subterráneas, infiltración rápida, realiza análisis de sensibilidad y diseño de soportes. Trabaja con cualquier tipo de suelo, ya sean arcillosos o rocosos, y debido a su interfaz se pueden editar o crear modelos complejos de terraplenes, presas de tierra, muros de contención y otros con facilidad.

No se realizan ensayos para determinar la permeabilidad debido a las diferencias de compactación entre ensayos, dado esto, esta será obtenida de manera aproximada mediante la modelación en Slide de los ensayos de laboratorio. Para esto se realizarán modelaciones en las cuales se mantendrán constante los parámetros de densidad del agua, densidad del suelo, cohesión, ángulo de fricción y las características del método de aguas subterráneas del programa. Se considerará que el material de ensayo no posee variación de la permeabilidad en dirección horizontal y vertical, es decir se tratará como un medio isótropo.

Consideraciones para modelado en Slide v6.0

- *Sistema de unidades:* Se trabajará con sistema internacional de unidades (SI).
- *Geometría:* La geometría de cada talud es generada en AutoCAD 2015, con líneas del tipo CLOSE LINE para los contornos externos del terraplén, el archivo debe ser guardado en .dxf para su posterior exportación.
- *Dirección de falla:* Por dirección de falla se debe entender la selección de la cara del talud que se someterá a análisis de estabilidad.
- *Métodos de estabilidad:* Slide trabaja con 9 métodos de estabilidad, los cuales son: Bishop simplificado, Cuerpo de Ingenieros #1, Cuerpo de Ingenieros #2, GLE/Morgenstern-Price, Janbú simplificado, Janbú corregido, Lowe-Karafiath, Ordinario o de Fellenius, y por último Spencer.
- *Aguas subterráneas:* Se selecciona el método Steady State FEA. Este método trabaja con análisis de elementos finitos, los cuales tienen por función determinar el nivel freático en base a permeabilidad, geometría y la altura de escurrimiento en la cara del talud aguas arriba. Sirve para calcular las presiones intersticiales a lo largo del terraplén, las cuales son utilizadas por los diversos métodos de estabilidad.



- *Grilla*: Crea una grilla cuadrada, que determina los posibles centros de rotación de los círculos de desplazamientos para obtener las posibles superficies de falla. Se trabajará con superficies de falla circulares.
- *Propiedades del suelo*: Se debe ingresar la densidad del suelo, el tipo de esfuerzo, en este caso Mohr-Coulomb, por lo tanto, se debe ingresar la cohesión y ángulo de fricción.
- *Malla*: Al trabajar con elementos finitos es necesario crear una malla que indique la cantidad de elementos finitos en los cuales será dividido el terraplén.
- *Propiedades hidráulicas*: Se debe ingresar la permeabilidad, y la respectiva relación  $K_v/K_h$  para cuando se trabaje con suelos anisótropos. Si el suelo es isótropo la relación  $K_v/K_h = 1$ .
- *Condiciones de borde*: Se debe seleccionar en la geometría del terraplén las zonas que posean las siguientes características: bordes de presión cero, caudales unitarios, infiltración por lluvias y bordes impermeables.
- *Sección de descarga*: Crea una línea a través de la cual se calcula el caudal que pasa por la aquella sección. Slide trabaja con un ancho unitario (1 metro).

De los datos experimentales una vez alcanzado el 15% de borde libre, es decir, una altura de escurrimiento de 0.255 (m), con los caudales en estado de régimen permanente, y dado que Slide calcula los caudales en el talud aguas abajo con un ancho de 1 metro, se dividirán los caudales experimentales por el ancho del canal, equivalente a 0.48 metros. Luego se procederá a ingresar una permeabilidad arbitraria, la que se irá iterando hasta que los caudales del modelo posean un error menor al 5% con respecto a los caudales experimentales. De esta manera se estimarán permeabilidades para cada terraplén.

### 3.1.5.5 Validez de la ley de Darcy

La ley de Darcy establece una relación lineal entre la velocidad y el gradiente hidráulico del tipo  $v = k \cdot i$  y es válida para un régimen de flujo laminar, en un medio isotrópico, saturado y homogéneo. Puede decirse que, en la generalidad de los casos, el flujo del agua subterránea cumple con esta ley, aun cuando a veces se presentan ciertas condiciones, particularmente referidas al número de Reynolds que originan separaciones con respecto a ella.

El régimen del flujo viene definido por el número de Reynolds, o sea, por el coeficiente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, el cual en este caso se escribe (Ecuación 9):

$$Re = \frac{v \cdot D_{50} \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

$V$  = Velocidad del flujo (cm/seg).

$D_{50}$  = Tamaño medio de las partículas. (cm)

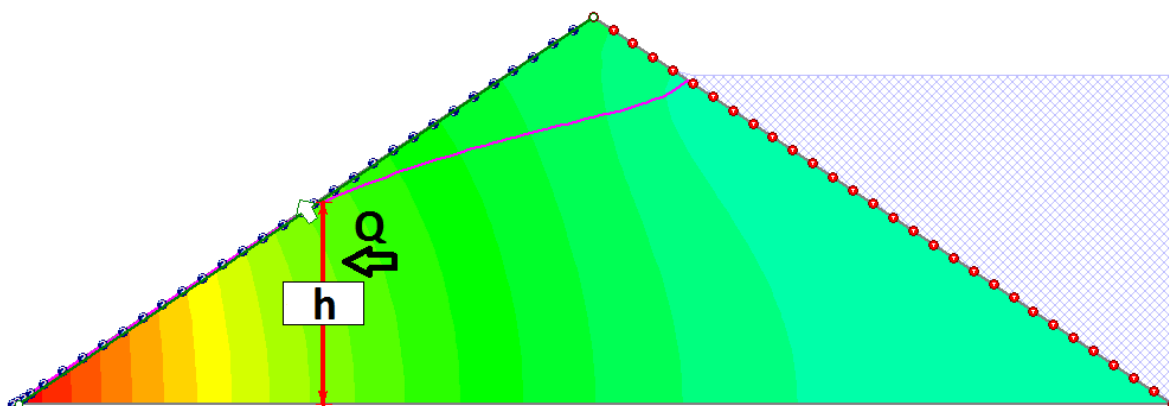
$\rho$  = Densidad del fluido ( $\text{g/cm}^3$ ).

$\mu$  = viscosidad dinámica (dinas  $\text{seg/cm}^2$ ).

La ley de Darcy es válida si  $Re < 1$ , siendo preciso en general  $Re < 4$  que corresponde a condiciones de flujo laminar, a partir de estos valores se presenta una zona de transición hasta  $Re = 10$ .

Se probará la validez de Darcy mediante la obtención de los números de Reynolds para cada terraplén, donde  $D_{50}$ , la densidad del fluido, y la viscosidad dinámica se mantendrán constantes, por lo tanto, el único parámetro necesario es la velocidad del flujo.

Para la estimación de la velocidad del flujo, se usarán velocidades medias, las que corresponderán al caudal en estado de régimen, dividido por el área a través del cual circula. Esta área tiene como base el ancho del canal, correspondiente a 0.48 m, y la altura será la que se encuentre antes de la zona de rezume que por definición es la superficie de terreno a través de la cual el agua pasa del terreno saturado hacia el aire a presión atmosférica, en el talud aguas abajo respectivamente. Esta altura será obtenida de los modelos de Slide con la permeabilidad estimada en 3.1.5.4. La figura N°4 indica la altura considerada antes de la zona de rezume:



**Figura N°4. Altura para verificación de la Ley de Darcy. (Elaboración propia)**

### 3.1.5.6 Permeabilidad media

Una vez obtenidas las permeabilidades del punto 3.1.5.4, y demostrando si es que es válida la ley de Darcy del punto 3.1.5.5 para cada permeabilidad, se procede a estimar una permeabilidad media a través de una prueba t de Student. Con esto se determinan las diferencias entre dos medias muestrales, en este caso, terraplenes con  $B/h = 0$  y  $B/h \neq 0$ , y en base a la construcción de los intervalos de confianza, se determinará si la hipótesis nula es rechazada.

El valor de permeabilidad media será comparado con los valores obtenidos en “Estudio experimental del coeficiente de permeabilidad en arenas” realizados por Patricio Puga, con el fin de determinar si el valor obtenido se encuentra dentro de los rangos admisibles de permeabilidad de arenas.

### 3.2 Factores de seguridad

Una vez hechos los modelos en Slide y con los parámetros obtenidos en el punto 3.1, se obtienen los factores de seguridad para las siguientes condiciones: Terraplén sin carga hidráulica, y terraplén con carga hidráulica al 15% de borde libre, mediante los métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer y Morgenstern- Price.

Slide calcula los factores de seguridad para N superficies de fallas en la cara del talud, de las cuales el valor final entregado es el factor de seguridad mínimo obtenido de las N superficies de falla. Esta superficie es denominada superficie crítica de falla o superficie mínima global.

### **3.3 Efecto de los parámetros geotécnicos sobre la estabilidad**

#### **3.3.1 Análisis de sensibilidad**

El análisis de sensibilidad tiene por objetivo determinar cómo afecta la variación de los parámetros de entrada a la estabilidad de un terraplén, en especial, a la superficie mínima global. Mediante este análisis se puede determinar cuáles parámetros pueden ser críticos en la evaluación de la estabilidad de un talud, como así cuales parámetros son menos importantes.

Slide v6.0 basa su funcionamiento en la selección de un rango de valores mínimos y máximos para los parámetros de entrada, en este caso los parámetros a variar son: cohesión, ángulo de fricción y densidad del suelo. Posteriormente cada parámetro es variado en incrementos uniformes entre los valores mínimos y máximos, y el factor de seguridad de la superficie mínima global es calculado para cada valor. El resultado de este análisis es un gráfico de factor de seguridad vs el rango de mínimo a máximo de cada variable.

#### **3.3.2 Análisis probabilístico**

El análisis probabilístico se basa en la definición de uno de los parámetros de entrada como una variable aleatoria, a partir de la cual se determinarán los factores de seguridad. Tiene como finalidad analizar la variabilidad de los datos de entrada, en caso de que no se posea certeza acerca del valor de este. A diferencia del análisis de sensibilidad, el análisis probabilístico trabaja para todas las posibles superficies de falla y no solo para la superficie mínima global.

Al seleccionar el análisis probabilístico en Slide, el parámetro de entrada debe ser acompañado de valores mínimos y máximos relativos (es decir, distancias desde el valor medio), desviación estándar y la selección de una función de distribución de probabilidad.

Slide utiliza el Método de Monte-Carlo, el cual genera un número  $X$  de variables aleatorias en base a los rangos mínimos, máximos y la desviación estándar. El factor de seguridad será re-computado  $X$  veces, donde  $X$  es el número de muestras aleatorias generadas por Monte-Carlo.

Se trabaja con distribución normal, para lo cual todas las muestras generadas deben ser incluidas en las 3 desviaciones estándar del valor medio, por lo tanto, los valores mínimos relativos y máximos relativos deben ser iguales a al menos tres veces la desviación estándar, para asegurarse que la función que se adapte mejor a los datos sea la distribución normal.

Los resultados entregados por Slide incluyen:

- *FS (deterministic)*: Es el factor de seguridad determinístico, el cual es un factor de seguridad calculado en base a un análisis regular de estabilidad, es decir, con el valor medio del parámetro ingresado.
- *FS (mean)*: Es el factor de seguridad promedio de todos los factores de seguridad calculados en base a las X variables aleatorias generadas.
- *PF (probability failure)*: Es la probabilidad de falla que presenta el terraplén.

$$PF = \frac{\text{Número de análisis con } FS < 1}{\text{Número } x \text{ de muestras}} * 100 \quad \text{Ec. (10)}$$

- *RI Normal*: El índice de confiabilidad es una indicación del número de desviaciones estándar, que separan el FS promedio del factor de seguridad crítico. El índice de confiabilidad recomendado para distribución de datos normal es de al menos 3.
- *Histogramas*: Estos permiten visualizar la distribución de muestras generadas para la variable aleatoria de entrada, ilustran de manera gráfica la posibilidad de falla (área con  $FS < 1$  dividida por el área total del gráfico).

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos para cada metodología planteada en el capítulo 3.

### 4.1 Parámetros relevantes en la estabilidad

#### 4.1.1 Parámetros geotécnicos

La tabla N°3 muestra los parámetros geotécnicos obtenidos de los ensayos de laboratorios realizados al material de ensayo, extraídos de un terraplén con razón H/V = 3/2 construido en el laboratorio de hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del Bío-Bío (UBB). Además, indica la cohesión y el ángulo de fricción con sus respectivas unidades de medida.

**Tabla N°3. Parámetros geotécnicos de terraplenes de arena**

<b>Parámetros geotécnicos</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Densidad compacta húmeda	1.890	T/m <sup>3</sup>
Densidad compactada seca	1.736	T/m <sup>3</sup>
Densidad compactada saturada	2.183	T/m <sup>3</sup>
Densidad seca mínima	1.490	T/m <sup>3</sup>
Densidad máxima compactada seca	1.765	T/m <sup>3</sup>
Densidad relativa	90.90	%
Humedad natural	8.88	%
Humedad de saturación	25.74	%
Ángulo de fricción	31	°
Cohesión	0	T/m <sup>2</sup>

La tabla N°3 muestra los parámetros geotécnicos obtenidos de ensayos de laboratorio como lo son la densidad y el ángulo de fricción. La humedad es nombrada en la tabla debido a que con ella se obtienen las densidades relativas y la densidad compactada seca. La densidad compactada saturada corresponde a la densidad considerada para los modelos de Slide para las condiciones de carga hidráulica al 15% del borde libre, mientras que la densidad relativa se utiliza para medir el grado de compactación del material, la cual entre 85-100 % se considera muy densa.

El ángulo de reposo de 31° es un valor bajo el promedio de las arenas, el cual por lo general es superior a 33°, estudios como “Ángulo de fricción crítico y ángulo de reposo de la arena del Gaumo” (2008) y “Análisis Comparativo de Métodos para la Medición del Ángulo de Reposo de Suelos Granulares” (2010) indican que existen variaciones en la medición de los

ángulos de reposo de un mismo material granular, que dependen del tipo de método por el cual se ensayan, dando posibilidad de que el valor de  $31^\circ$  sea diferente al que puede ser medido mediante un ensayo triaxial.

Para la cohesión no se realizaron ensayos experimentales para medir su valor, principalmente debido a la cantidad de finos mostrados en la Tabla N°1 la que muestra un 0.021% que pasa por el tamiz N°200, por lo que se considera una cohesión nula del material, es decir,  $0 \text{ T/m}^2$ .

#### 4.1.2 Permeabilidad

##### 4.1.2.1 Ensayos experimentales

Los terraplenes de arena fueron construidos correctamente y discrepan en un 2.0% de los taludes teóricos, no obstante, esta diferencia no se considerará para el análisis, por lo que se tomarán en cuenta sólo los valores teóricos nominales.

Los ensayos experimentales se llevaron a cabo con su sistema de medición funcionando correctamente, sin presentar problemas de ruido en ninguno de los sensores ni componentes de medición. La tabla N°5 muestra las variables medidas con los elementos del sistema de medición propuesto.

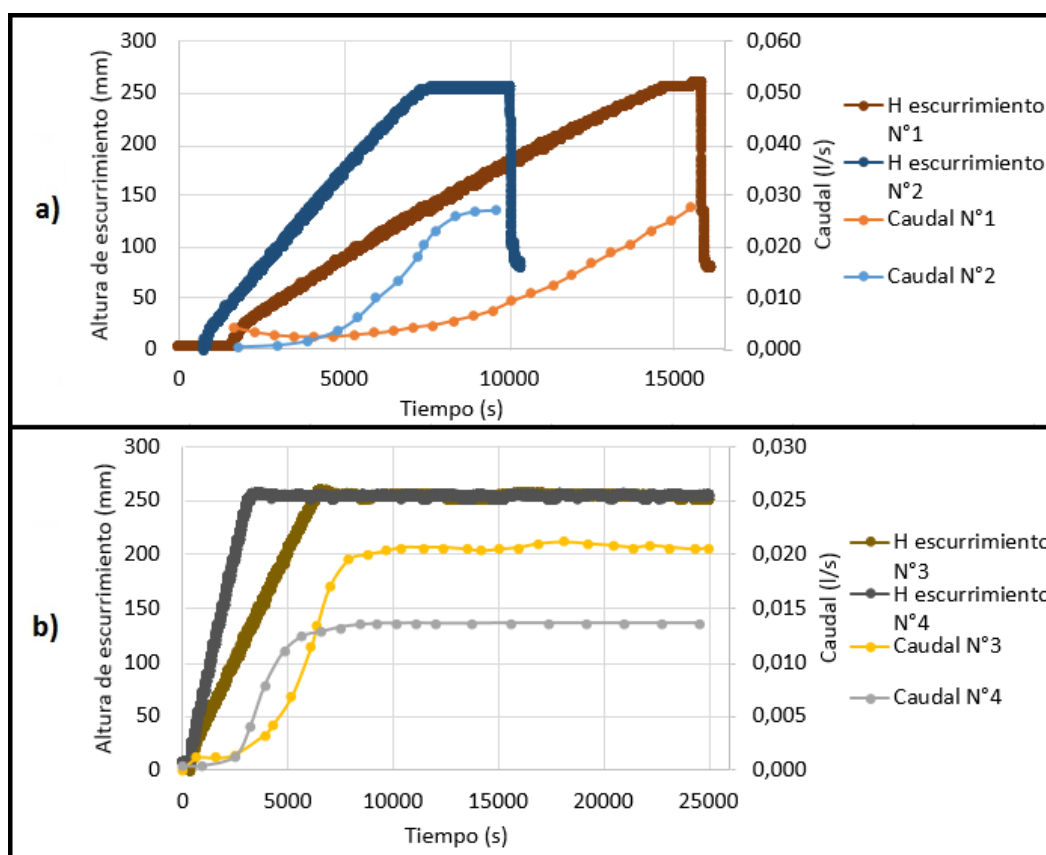
**Tabla N°4: Resultados registrados durante ensayos experimentales para taludes predefinidos**

N°	Autor	H/V	B/h	HS1 (mm)	Caudal de salida en régimen, Qs (l/s)	Temperatura Ambiente (C°)	Temperatura Agua (C°)
1	Vargas	3/2	0	255	0.0275	20 - 23	19 - 21
2	Arratia	3/2	0	255	0.0269	19 - 27	21 - 24
3	Vargas	3/1	0	255	0.0207	20 - 27	16 - 22
4	Arratia	3/1	0	255	0.0136	26 - 28	19 - 23
5	Arratia	2/1	0	255	0.0212	18 - 27	19 - 22
6	Arratia	4/1	0	255	0.0201	21 - 29	19 - 25
7	Gutiérrez	3/2	1/4	255	0.0393	14 - 16	-
8	Gutiérrez	3/2	1/2	255	0.0335	15 - 16	-
9	Gutiérrez	3/2	1	255	0.0312	12 - 16	-
10	Gutiérrez	3/2	3/2	255	0.0270	8 - 20	-
11	Gutiérrez	3/2	2	255	0.0191	6 - 16	-

La tabla N°4 incluye los registros experimentales realizados por Arratia (2016), los que consistían en terraplenes en los que se variaba la pendiente, es decir la relación H/V, manteniendo una altura fija de 0.3 m (h). También se incluyen los registros experimentales realizados por Gutiérrez (2015), los que consistían en terraplenes con la razón H/V=3/2 fija, y en los que variaba el ancho de coronamiento (B), manteniendo una altura fija de 0.3 m, es decir, variaba la relación B/h.

Los caudales en estado de régimen varían entre 0.136 (l/s) para el terraplén N°4 y 0.393 (l/s) para el N°7. La temperatura ambiente varía entre 6 y 29 grados, debido a que los ensayos de Arratia fueron realizados en época de verano, mientras los de Gutiérrez en invierno. Los ensayos de Gutiérrez no presentan medición de temperatura de agua, la cual fue incluida en los posteriores protocolos de ensayo.

La figura N°5 muestra el comportamiento temporal del caudal y la altura de escurrimiento a través de los ensayos N°1, N°2, N°3 y N°4.



**Figura N°5. Comportamiento del caudal y la carga hidráulica en terraplén N°1, N°2, N°3 y N°4. a) H/V = 3/2, b) H/V = 3/1**



En la figura N°5. a), se observan 4 curvas, que corresponden a las alturas de escurrimiento y caudales de los ensayos N°1 y N°2 respectivamente. La geometría ensayada corresponde a terraplenes con razón  $H/V= 3/2$  y  $B/h=0$ . Independiente de los tiempos de llenado, los caudales obtenidos varían en 0.0006 l/s, con la diferencia que en los caudales del ensayo N°2 se alcanza a apreciar que alcanzan el estado de régimen, mientras que en el ensayo N°1 muestra un crecimiento progresivo de los caudales, sin que alcancen su estabilización antes del colapso. En ambos ensayos los caudales aumentan aún después de que se alcance el 15% de borde libre.

En la figura N°5 b), se observan 4 curvas, que corresponden a las alturas de escurrimiento y caudales de los ensayos N°3 y N°4 respectivamente. La geometría ensayada corresponde a un terraplén con razón  $H/V= 3/1$  y  $B/h=0$ . Los tiempos de llenado tienen una diferencia cercana a 5000 (s), pero no presentaron cambios en su geometría inicial, manteniendo su estabilidad, presentando flujos de agua limpios sin arrastre de sedimentos. Se observa una diferencia de 0.0071 (l/s) en los caudales de estado de régimen, lo cual, tomando en cuenta que la geometría es la misma, el mismo material de ensayo y con el mismo borde libre, se podría explicar debido a variaciones en la compactación entre los ensayos.

4.1.2.2 Modelos en Slide v6.0

La figura N°6 muestra como resultado los modelos realizados en el software Slide v6.0 de los terraplenes de la tabla N°5.

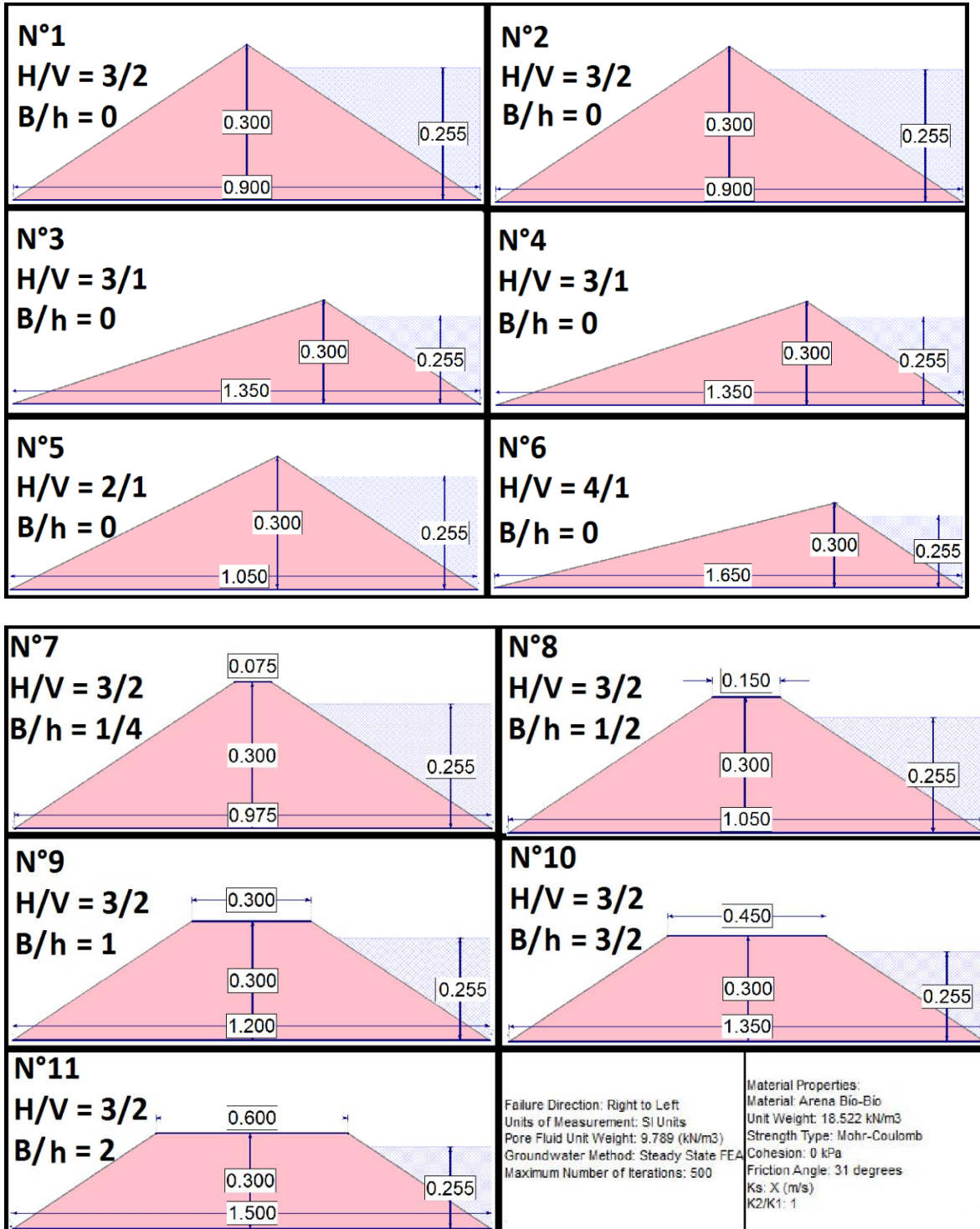


Figura N°6. Terraplenes modelados en Slide v6.0

La figura N°6 muestra las geometrías modeladas en Slide en metros. Para la modelación se dejaron constantes los siguientes parámetros: Dirección de falla de izquierda a derecha, densidad del agua: 9.789 KN/m<sup>3</sup>, correspondiente a la densidad del agua a 20°C, estimada como una media de las temperaturas a las que se puede exponer un terraplén en cualquier época del año. Método de aguas subterráneas Steady State FEA con un máximo 500 iteraciones para su convergencia con una tolerancia de 0.005. La densidad del suelo de 18.522 (KN/m<sup>3</sup>), correspondiente a la densidad compactada del material, cohesión de 0 (KPA), ángulo de fricción de 31°, relación K<sub>2</sub>/K<sub>1</sub> = 1 lo que indica que no se considerará variación entre la permeabilidad horizontal y vertical, por lo tanto, se asume que el suelo es un material isotrópico. Se trabaja con una malla de 1500 elementos finitos y un borde libre de 15%, es decir, una altura de escurrimiento de 0.255 (m) en el talud aguas arriba del terraplén. La permeabilidad (K<sub>s</sub>) es el único parámetro a variar dentro de los modelos de Slide.

#### 4.1.2.3 Estimación de permeabilidad y validez de la ley de Darcy.

La tabla N°5 muestra los caudales del modelo asociados a los caudales obtenidos de manera experimental, junto a la permeabilidad obtenida y al Número de Reynolds.

**Tabla N°5: Permeabilidades y Número de Reynolds.**

N°	H/V	B/h	Caudal modelo /0.48 (l/s)	Caudal experimental en régimen (l/s)	Error (%)	Permeabilidad (m/s)	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	Área (cm <sup>2</sup> )	Velocidad (cm/s)	Número de Reynolds
1	3/2	0	0.027	0.027	0.2	8.70E-04	27,5	792,0	0,036	0,219
2	3/2	0	0.027	0.027	1.2	8.60E-04	26,9	806,4	0,036	0,220
3	3/1	0	0.021	0.021	1.1	1.10E-03	20,7	796,8	0,026	0,159
4	3/1	0	0.013	0.014	-1.6	7.00E-04	13,6	811,2	0,017	0,105
5	2/1	0	0.022	0.021	1.4	8.00E-04	21,3	768,0	0,028	0,170
6	4/1	0	0.020	0.020	1.2	1.35E-03	20,1	811,2	0,024	0,150
7	3/2	1/4	0.039	0.039	0.3	1.35E-03	38,9	686,4	0,057	0,347
8	3/2	1/2	0.034	0.034	0.3	1.25E-03	33,6	633,6	0,053	0,325
9	3/2	1	0.031	0.031	-1.1	1.35E-03	31,4	576,0	0,055	0,334
10	3/2	3/2	0.026	0.027	-2.1	1.35E-03	26,9	508,8	0,053	0,324
11	3/2	2	0.019	0.019	0.3	1.05E-03	19,0	432,0	0,044	0,270

La tabla N°5 surge del ingreso de una permeabilidad arbitraria al terraplén modelado en Slide, la cual se va iterando hasta que el caudal entregado por el modelo sea igual al caudal obtenido a través de los ensayos experimentales. Slide asume un ancho unitario (1 m) como base para sus modelos, por lo tanto, el caudal que debe entregar el modelo debe ser equivalente a el caudal experimental dividido por 0.48 (m), que es el equivalente al ancho del canal del laboratorio. Este último se considera el caudal al que se debe llegar para que termine el proceso iterativo. Los errores entre los caudales modelados, y los caudales experimentales son menores al 3%, lo que indica que la permeabilidad asociada a cada terraplén fue determinada con gran precisión. Las permeabilidades varían entre 7.00E-04 y 1.35E-03 (m/s), con diferencia entre los valores de 6.50E-04 (m/s), es decir, que la permeabilidad mayor es más 1.93 veces mayor que el valor mínimo. Los terraplenes con B/h  $\neq$  0 poseen menor variación en sus permeabilidades, que van desde 1.05E-03 a 1.35E-03, lo que indica que las compactaciones fueron similares. Dentro de los terraplenes con B/h = 0, la permeabilidad del terraplén 4/1 es de 1.35E-03 (m/s), valor distante del 7.00E-03 (m/s) del terraplén 3/1, que es el terraplén con el que posee menor diferencia en geometría.

La metodología para obtener las permeabilidades puede ser empleada debido a que se tiene un medio isotrópico, homogéneo y una vez alcanzado los caudales en estado de régimen permanente el terraplén se considera saturado, por lo tanto, si se cumple los requisitos para utilizar la ley de Darcy.

En caso de que se quiera utilizar los caudales instantáneos, y no los de régimen permanente, el terraplén no se considera totalmente saturado siendo necesario utilizar la ecuación de continuidad para determinar el caudal medio que atraviesa el terraplén dado un volumen de control aguas abajo del talud. Esta ecuación 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  $\Delta V$  tiende a cero.

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_{mp} - Q_s, \text{ donde } \Delta V = Ah(t) \quad (\text{Ecuación N}^\circ 11)$$

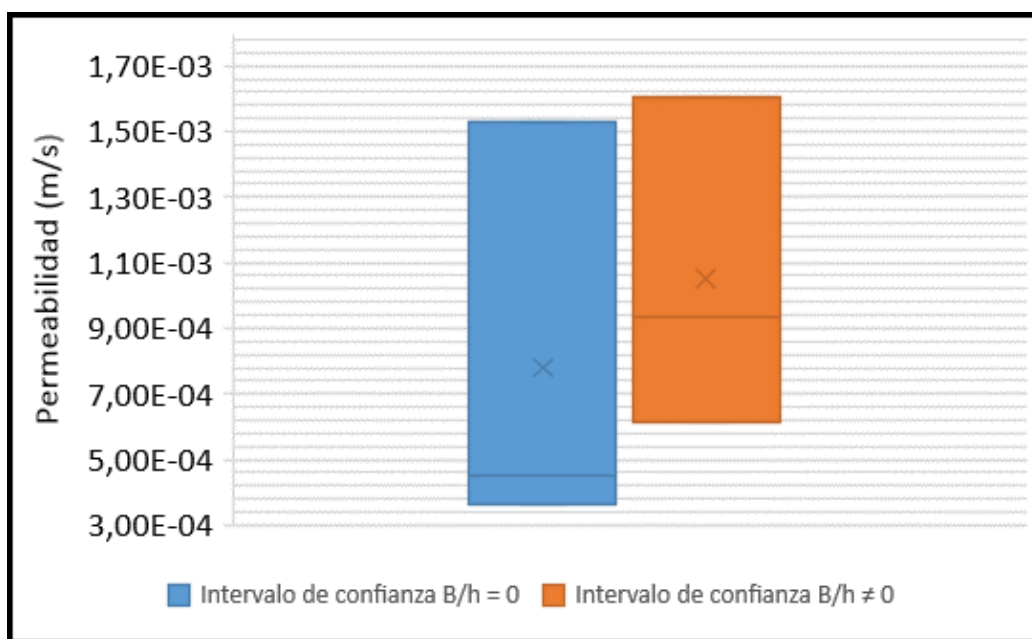
Donde  $Q_s$  es el caudal de salida obtenido por los aforos volumétricos,  $Q_{mp}$  es el caudal del medio poroso obtenido por la ecuación, A es el área del canal aguas abajo del terraplén (volumen de control), h (t) es la variación de altura de agua entregada por el sensor 2 (SD2),

por lo tanto  $\Delta V/\Delta t$  es la variación del volumen de agua en el tiempo, aguas abajo del terraplén (Arratia 2016). Además, como el terraplén no se encuentra saturado la conductividad hidráulica ( $\theta$ ) es función del contenido de agua del terraplén expresándose como  $K = K(\theta)$ . El problema anterior puede ser solucionado mediante las Ecuaciones de Richards, las que requieren del uso de la relación entre la conductividad hidráulica y la humedad característica del suelo.

La tabla N°5 también presenta los números de Reynolds obtenidos para cada terraplén. Las áreas fueron calculadas con una base de 0.48 (m), correspondiente al ancho del canal y las alturas fueron estimadas de los modelos de Slide en el último punto antes de que el nivel freático llegará a la zona de rezume. La velocidad media fue obtenida mediante la división de los caudales por el área estimada. Los valores utilizados en la Ecuación 9 corresponden a  $D_{50} = 0.0614$  (cm), densidad del agua = 1 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), viscosidad dinámica del agua a 20° C = 0.01003 (dinas  $\text{seg}/\text{cm}^2$ ). La ley de Darcy es válida para todos los terraplenes, dado que los números de Reynolds son menores a 1, lo que indica que se está en presencia de un flujo laminar.

#### 4.1.2.4 Permeabilidad media

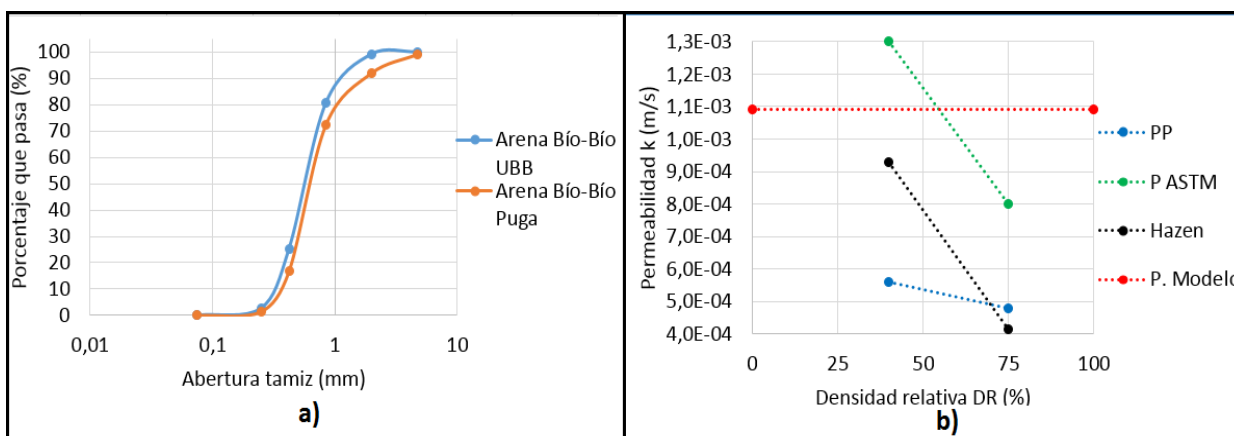
La figura N°7 muestra de manera gráfica los intervalos de confianza del test t de Student:



**Figura N°7: Intervalos de confianza mediante t de Student.**

La figura N°7 fue obtenida mediante el cálculo de los intervalos de confianza de las permeabilidades de la tabla N°5, separando las muestras en razón  $B/h = 0$  y  $B/h \neq 0$  respectivamente. Los intervalos consideran un nivel de confianza del 97.5%, e indican que no existe diferencia entre  $B/h = 0$  y  $B/h \neq 0$ , por lo tanto, se puede utilizar el promedio de todos los casos, que da como resultado una permeabilidad media de  $1.09E-03$  (m/s). El coeficiente de variación para  $B/h = 0$  es de 25% mientras que  $B/h \neq 0$  es de 10 %, lo que indica que los datos son homogéneos.

La permeabilidad media fue comparada con los valores obtenidos por Puga (2012), los que se ilustran en la figura N° 8:



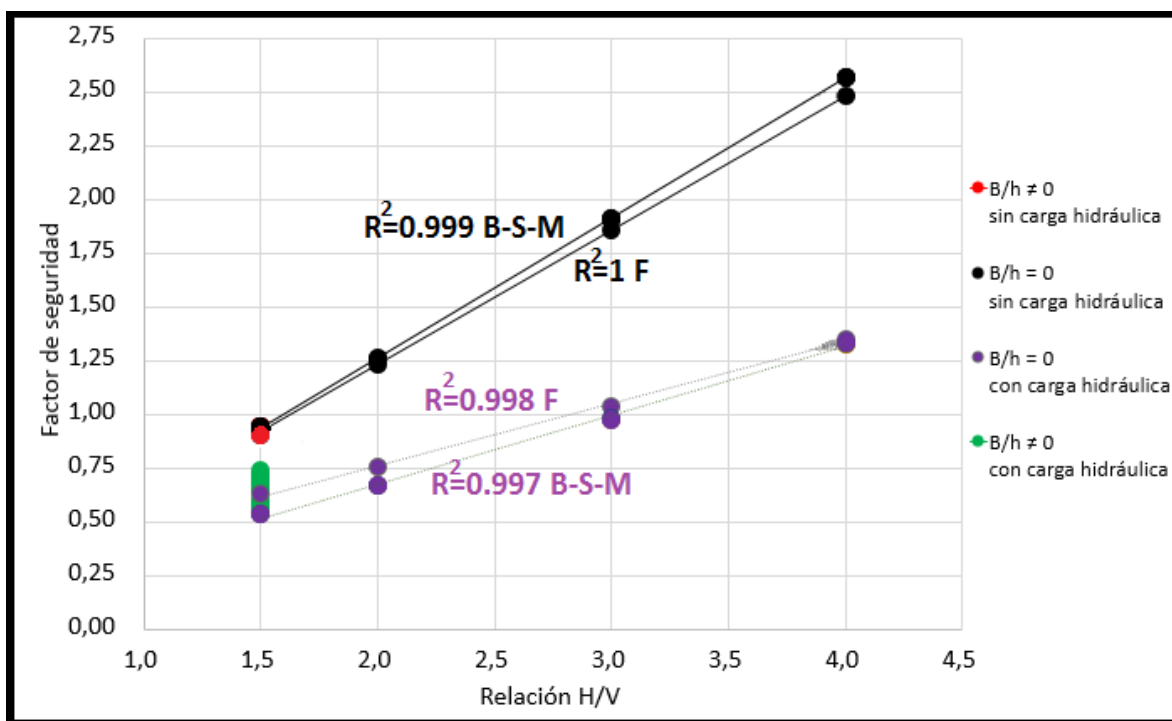
**Figura N°8. Comparación de permeabilidades de arena Bío-Bío.**  
**a) Curvas granulométricas; b) Permeabilidad vs Densidad relativa.**

La figura N°8 a) muestra la comparación de la granulometría de la arena Bío-Bío ensayada por Puga (2012) y la arena Bío-Bío con la que se construyeron los terraplenes, donde se aprecia que las curvas poseen similares formas. La figura N°8 b) muestra los resultados obtenidos por Puga, donde obtiene la permeabilidad para distintas densidades relativas, en este caso para  $DR= 40\%$  y  $DR= 75\%$  a través del uso de un permeámetro pequeño y un permeámetro de carga constante ASTM. Dentro de las conclusiones de Puga se determina que los valores de permeabilidad son entregado de manera más confiable por el permeámetro ASTM, dado que el permeámetro pequeño sobrepasa las velocidades de la validez de la ley de Darcy. La permeabilidad media obtenida por Slide se encuentran dentro del rango de valores obtenidos por el permeámetro ASTM, pero los ensayos de laboratorio a los que fue

sometido el material determinaron una densidad relativa del 90%, lo que muestra que los resultados de Puga no son aplicables en base a una interpolación de la curva Permeabilidad Vs Densidad relativa, pero el valor medio obtenido de los modelos de Slide se encuentra dentro del rango de las permeabilidades de las arenas. La permeabilidad también fue obtenida mediante el método indirecto de Hazen (Anexo C). pero los valores difieren en casi un orden con los obtenidos por los modelos.

### 4.2 Factores de seguridad

La figura N°9 presenta los factores de seguridad de los modelos realizados en Slide v6.0 del punto 4.1.2.2, con la permeabilidad media obtenida del punto 4.1.2.3, mediante los métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer y Morgenstern-Price:



**Figura N°9. Factores de seguridad de las superficies mínimas globales.**

La figura N°9 contiene los factores de seguridad de la superficie mínima de falla, para 9 de los 11 terraplenes modelados en el punto 4.1.2.2, esto se debe a que al usar una permeabilidad media para todos los terraplenes, no existe diferencia entre los terraplenes N°1 y N°2, y los

terraplenes N°3 y N°4 respectivamente. Para cada terraplén se calculan 8 factores de seguridad, 1 asociado a cada método (Fellenius, Bishop, Spencer, Morgenstern-Price), y cada terraplén fue evaluado en 2 condiciones: sin carga hidráulica, y con carga hidráulica al 15% del borde libre del talud aguas arriba del terraplén, lo que da un total de 72 factores de seguridad.

No se pueden apreciar los 72 factores de seguridad, debido a que no existe diferencias considerables entre los diferentes métodos, por ejemplo, las diferencias existentes para el factor de seguridad del terraplén N°5 ( $H/V = 2$ ;  $B/h=0$ ) entre el método de Morgenstern-Price y Fellenius es de 0.026.

Para los terraplenes  $B/h \neq 0$  (con coronamiento) sin carga hidráulica, todos los factores de seguridad tienen un valor entre 0.922 y 0.944, esto se debe a que independiente de la relación existente entre  $B/h$ , las superficies mínimas de falla se encuentra en la cara del talud y no incluyen la corona, por lo tanto, el factor de seguridad queda determinado por la razón de talud  $H/V = 3/2$ .

Para terraplenes con  $B/h = 0$  (sin coronamiento) con y sin carga hidráulica presentan crecimientos lineales en los factores de seguridad a medida que aumenta la razón  $H/V$ . Esto se puede demostrar con los coeficientes de determinación  $R^2$ , los cuales son cercanos a 1, con excepción de Fellenius en la condición sin carga hidráulica la cual es igual a 1. La linealidad que presentan los factores de seguridad puede deberse a que la permeabilidad no produce diferencias considerables en la presencia de agua entre los diferentes taludes, dejando a la pendiente como el principal factor de la estabilidad al tener los parámetros geotécnicos constantes.

Los terraplenes con  $B/h \neq 0$  con carga hidráulica, presentan mejoras en los factores de seguridad, a medida que aumenta la razón  $B/h$ , variando desde 0.647 para  $B/h = 0.25$  a 0.739 para  $B/h = 2$ . La mejora se debe a que varía la altura del nivel freático, debido a la pérdida de energía asociada al movimiento del agua en el medio poroso, lo que genera que exista menos altura de agua en la superficie posible de falla analizada, lo que conlleva a menores presiones intersticiales y mejores factor de seguridad. La permeabilidad del suelo no es lo



suficientemente pequeña como para que varíe el nivel freático de manera drástica, y esto se vea reflejado de manera significativa en el factor de seguridad.

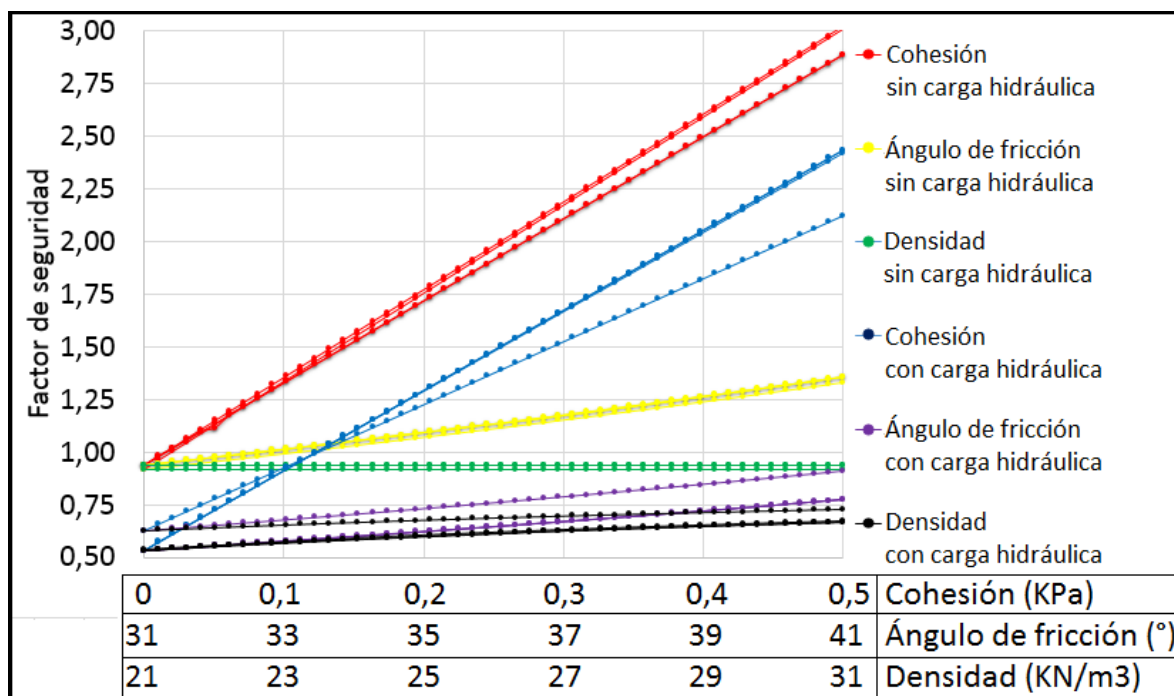
La condición de estabilidad, es decir, factores de seguridad mayores a 1 se encuentran a partir de los terraplenes con razón  $H/V = 3/1$  tanto en condiciones con/sin carga hidráulica. Comparando los factores de seguridad vs el comportamiento mostrado en los ensayos de laboratorio, los dos terraplenes  $H/V = 3/1$  mantuvieron su estabilidad en presencia de carga hidráulica, sin falla de talud, presentando altos grados de saturación y flujo limpio continuo. El terraplén  $H/V = 4/1$  si sufrió falla de talud, del tipo tubificación por flujo concentrado con socavación, el cual es estable desde el punto de vista de los factores de seguridad. La permeabilidad de  $H/V = 4/1$  estimada en el punto 4.1.2.3 es la más alta de las medidas en los 11 terraplenes con  $1.35E-0.3$  m/s, con un caudal experimental en régimen de 0.020 l/s, mayor que el caudal del terraplén  $H/V = 3/1$  de 0.0136 l/s para Arratia y cercano al 0.0207 l/s ensayado a modo de validación, por lo que su falla puede deberse a que se alcanzó el caudal de sedimentación.

El resto de los terraplenes poseen factores de seguridad menores a 1 en condiciones de carga hidráulica al 15% del borde libre, lo que concuerda con los registros de laboratorio, donde todos los terraplenes sufrían fallas en el talud, por lo que la razón  $H/V = 3/2$  no es estable, al punto de que sin carga hidráulica se encuentra bajo 1. Esto no significa que el terraplén fallará de manera inmediata, sino que solo las fuerzas resistentes son mayores a las desestabilizadoras, por lo cual la posible falla puede depender del tiempo. Esto es importante porque demuestra que la pendiente máxima referida por el MOP no es aplicable a todos los materiales, y eso sin que se considerasen los efectos sísmicos en este proyecto de título.

### 4.3 Efecto de los parámetros geotécnicos sobre la estabilidad

#### 4.3.1 Análisis de sensibilidad

La figura N°10 muestra el análisis de sensibilidad de parámetros geotécnicos del terraplén N°1 con razón H/V = 3/2.



**Figura N°10. Análisis de sensibilidad en superficie mínima global**

La figura N°10 muestra la variación que sufre el factor de seguridad de la superficie mínima global, en base a la variación de los parámetros de entrada de manera individual en el terraplén N°1. Al comienzo del eje horizontal, se encuentran los parámetros iniciales de la modelación, Cohesión = 0 (Kpa), ángulo de fricción = 31°, densidad = 21.393 (KN/m<sup>3</sup>), y al final los aumentos de 0.5 (KPa), 10° en el ángulo de fricción, y 10 (KN/m<sup>3</sup>) en la densidad.

El cambio en la cohesión de 0 (KPa) a 0.5 (KPa), aumenta el factor de seguridad desde 0.939 a 3.02, casi 3 veces su valor inicial en el caso sin carga hidráulica. Con carga hidráulica al 15% del borde libre el factor de seguridad pasa de 0.534 a 2.42.

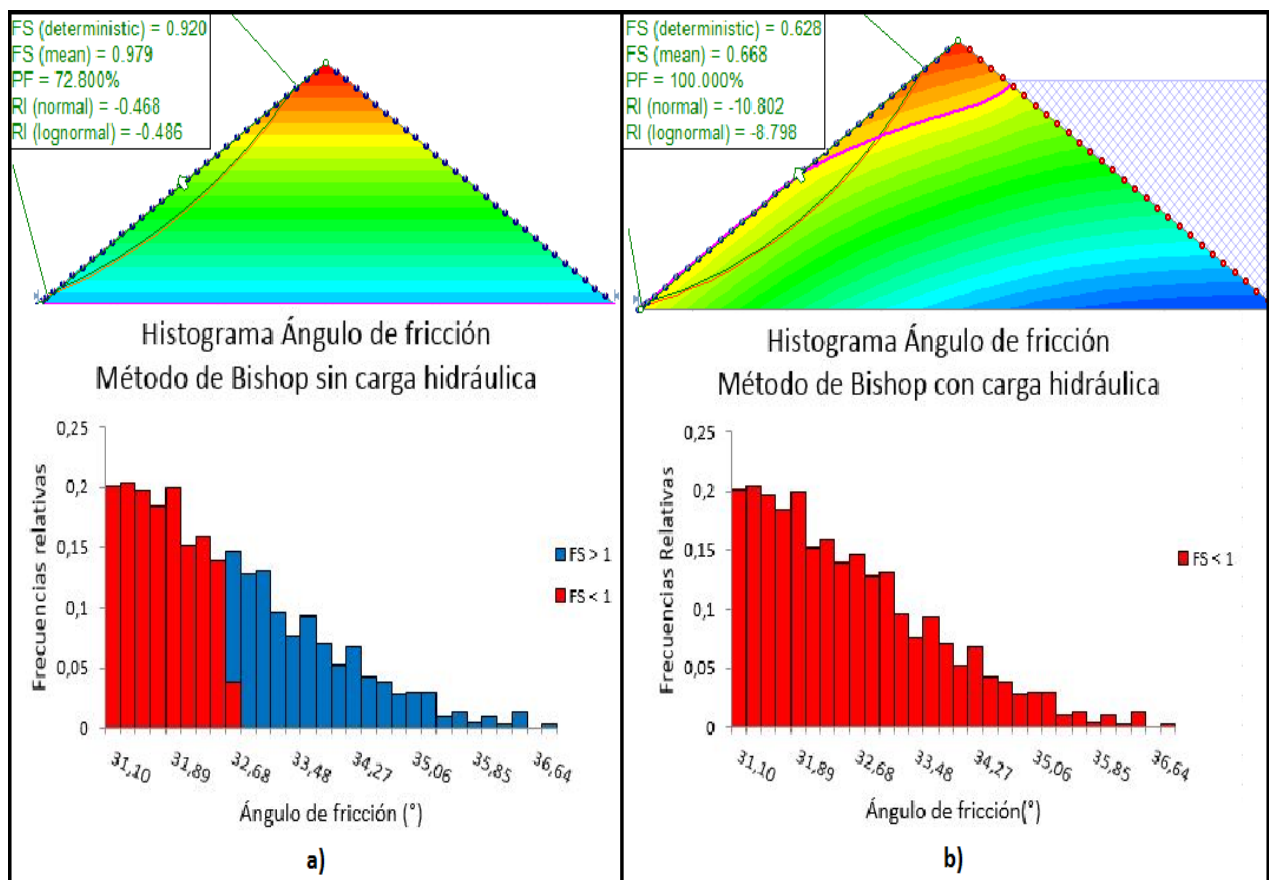
Los cambios en la densidad del material que compone el terraplén no produce mejoras en el factor de seguridad en el estado sin carga hidráulica, manteniéndose en 0.939. Con carga hidráulica presenta leves mejoras pasando de 0.534 a 0.668.

El ángulo de fricción pasa de 31° y FS de 0.939 a 41° y un FS de 1.330, es decir el factor de seguridad varía solo un 4.11% por aumentos de un grado para el caso sin carga hidráulica. Con carga hidráulica el factor de seguridad pasa de 0.534 a 0.775.

Cabe aclarar que los cambios en el factor de seguridad solo afectan a la superficie mínima global, esto implica que, al momento de variar un parámetro, no significa que el factor de seguridad mínimo del terraplén varíe a lo expuesto en la figura N°10, sino que solo esa superficie de falla mejorará su factor de seguridad, pero a su vez, existirá una nueva superficie mínima global producida por el cambio de parámetros, que está asociada a un nuevo factor de seguridad mínimo.

### 4.3.2 Análisis probabilístico

La figura N° 11 muestra los resultados obtenidos del análisis probabilístico generado al ángulo de fricción, realizado en Slide v6.0:



**Figura N°11. Análisis probabilístico para terraplén N°1.**  
**a) Condición sin carga hidráulica; b) Condición con carga hidráulica**

La figura N°11 muestra el análisis probabilístico llevado a cabo para el parámetro ángulo de fricción solo para el método de Bishop, realizada principalmente debido a la poca diferencia existente entre métodos mostrada en 4.2. La nula variación que produce la densidad en el factor de seguridad expuesto en 4.3.1 y la nula cohesión de las arenas en general, hacen que el parámetro a estudiar para el análisis probabilístico sea el ángulo de fricción. A esto se suma la posible variabilidad del parámetro obtenido según lo expuesto en 4.1.

Para el Método de Monte-Carlo, fueron generadas 1000 muestras aleatorias entre  $31^\circ$  y  $37^\circ$ , con una desviación estándar de 2. La figura N°11 a) muestra un FS determinístico de 0.920, un FS promedio de las variables aleatorias de 0.979, y una probabilidad de falla de 72.8 %. La probabilidad de falla indica que 728 muestras de las 1000 generadas de manera aleatoria tienen un factor de seguridad menor a 1, esto se aprecia de manera gráfica en el histograma, donde la zona roja indica el  $FS < 1$ , y la probabilidad de falla será el área con  $FS < 1$  dividido por el área total. Esto indica que a partir de un ángulo de fricción de  $32.5$  aproximadamente, el factor de seguridad será mayor a uno.

La figura N°11 b), muestra el terraplén N°1 con carga hidráulica al 15% del borde libre, donde el 100% de las muestras aleatorias no alcanzan un factor de seguridad de 1, por lo tanto, independiente del rango de valores del ángulo de fricción el terraplén no será estable.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Luego de realizar el estudio de la estabilidad en terraplenes de arena sometidos a carga hidráulica se concluye que:

- Los parámetros relevantes en la estabilidad son: Cohesión, ángulo de fricción, densidad y permeabilidad.
- El ángulo de reposo coincide con el de fricción cuando se tienen materiales sin cohesión, y es más relevante para la estimación de inclinaciones máximas en taludes. Su valor depende de la metodología empleada, por lo que es necesario una normativa chilena que regule su obtención.
- Terraplenes construidos con el mismo material granular, mismo protocolo de compactación e igual geometría, presentan diferencias en sus caudales de régimen, las cuales se deben a que independiente del protocolo de compactación es imposible mantener una compactación pareja a lo largo de un terraplén, más aún considerando que esta se realizó con una varilla de apisonamiento manual.
- La metodología para la obtención de permeabilidades puede ser empleada debido a las características de los ensayos; terraplenes considerados medios isotrópicos, homogéneos, y con los caudales en estado de régimen, es decir, donde es válida la ley de Darcy. En caso de que no se trabaje con los caudales en estado de régimen es necesario trabajar con las ecuaciones para el estado transiente, en zona no saturada, lo que incluye la aplicación de las ecuaciones de Richards.
- No existen diferencias considerables en los factores de seguridad obtenidos mediante Fellenius, Bishop, Spencer y Morgenstern-Price, lo que se debe principalmente a que en los modelos se consideraron superficies de falla circulares en los taludes del terraplén.
- Los terraplenes con  $B/h \neq 0$  sin carga hidráulica todos los factores de seguridad tienen un valor entre 0.922 y 0.944, esto se debe a que independiente de la relación existente entre  $B/h$ , las superficies mínimas de falla se encuentra en la cara del talud, por lo tanto, el factor de seguridad queda determinado por la pendiente, es decir la razón  $H/V$ .
- Los terraplenes con  $B/h \neq 0$  con carga hidráulica, presentan mejoras en los factores de seguridad, a medida que aumenta la razón  $B/h$ , variando desde 0.647 para  $B/h = 0.25$  a

0.739 para  $B/h = 2$ . La mejora se debe a que varía la altura del nivel freático, debido a la pérdida de energía asociada al movimiento del agua en el medio poroso, lo que genera que exista menos altura de agua en la superficie posible de falla analizada, lo que conlleva a menores presiones intersticiales y mejores factor de seguridad.

- Los terraplenes con razón  $H/V = 3/1$  son los únicos estables en condiciones con/sin carga hidráulica, tanto por lo entregado por el programa Slide a través de los factores de seguridad, como en los comportamientos observados en los ensayos experimentales.
- El análisis de sensibilidad a los modelos determinó que la cohesión es el parámetro que mejor aumenta el factor de seguridad de una superficie mínima global, mientras que la densidad produce las menores mejoras.

## 5.2 Recomendaciones

En los terraplenes ensayados se utilizó solo un material para su construcción, por ello se hacen las siguientes recomendaciones para posteriores estudios:

- Utilizar otro tipo de suelo para la construcción de terraplenes, la cual puede ser arena blanca, junto con la adición de colorantes al agua, con esto se puede determinar la diferencia entre las líneas de flujo experimentales y las líneas de flujo estimadas por Slide v6.0. Además, se pueden determinar los gradientes hidráulicos dentro del terraplén, junto con la medición de la capilaridad que se genera en el terraplén.
- Utilizar materiales en los cuales la cohesión no sea nula, para determinar la influencia de la cohesión en la estabilidad de los taludes.
- Cambiar el sistema de la válvula de llenado de uno manual a uno automático que permita mantener la carga hidráulica constante durante los ensayos.
- Uso de cámaras de alta resolución, transversal al talud y otra transversal al terraplén, con un sistema de medición que incluya la distorsión de imagen generadas por el foco de la cámara.

**REFERENCIAS**

1. De Matteis Á. (2003). *Geología y Geotecnia*. Argentina: Universidad Nacional de Rosario.
2. Gerscovich. D. (2016). *Estabilidad de taludes*. Brasil: Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
3. Li X., Rendón L., Espinoza J. (2011). *Fuerzas de filtración y efectos de sumersión en taludes granulares de presas y bordos*. México: Instituto Mexicano de tecnología del Agua.
4. Schiessler G. (2013). *Reportaje La tragedia del estero Minte*. Chile: Canal 13.
5. Fellenius W. (1927). *A history of soil properties*. Suecia: Royale Institute of Technology
6. Gutiérrez, N. (2015). *Estudio experimental de los efectos de la carga hidráulica en el colapso de terraplenes de arena*. Proyecto de título en conformidad para optar al título de Ingeniero Civil. Chile: Universidad del Bío-Bío.
7. Arratia, D. (2016). *Estudio experimental de la falla del talud en terraplenes de arena*. Proyecto de título en conformidad para optar al título de Ingeniero Civil. Chile: Universidad del Bío-Bío.
8. Puga, P. (2012). *Estudio experimental del coeficiente de permeabilidad en arenas*. Proyecto de título en conformidad para optar al título de Ingeniero Civil. Chile: Universidad Católica de la Santísima Concepción.



9. Solaque D, Lizcano A. (2008). *Ángulo de fricción crítico y ángulo de reposo de la arena del Guamo*. España: Revista Épsilon, Sociedad Andaluza de Educación Matemática Thales.
10. Rodas R., Rouse P. (2010). *Análisis Comparativo de Métodos para la Medición del Ángulo de Reposo de Suelos Granulares*. Chile: Revista de la Construcción. Vol. 9.

## **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-Distal)/0.9842;
Distancia2= (688.58-Distal2)/1.001;
Distancia3= (734.51-Distal3)/0.9741;
Q= -4495.1*(Distal3/1000)*(Distal3/1000)*(Distal3/1000)
+9886.7*(Distal3/1000)*(Distal3/1000) - 7255.6*(Distal3/1000) + 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**

### **Corridas experimentales, modelos Slide v6.0**

En la carpeta “Anexos”, subcarpeta “Anexo B” disponible en el DVD del presente proyecto de título, se encuentran un archivo Excel .xlsx llamado “Ensayos, Arduino, FS, Sensibilidad”. Contiene los aforos volumétricos y datos experimentales entregados por Arduino de los ensayos realizados por Arratia, Gutiérrez y Vargas. Se encuentra además los datos del Test t de Student, Factores de Seguridad tanto para condiciones estáticas como condiciones sísmicas, Validez de la ley de Darcy, comparación de datos entre ensayos, análisis de sensibilidad y análisis probabilístico.

En la carpeta “Anexos”, subcarpeta “Anexo B”, subcarpeta “Modelos en Slide v6.0”, se encuentran modelos de Slide v6.0 con los que se calcularon los factores de seguridad con una permeabilidad media establecida, y los modelos con solo los parámetros geotécnicos, sin permeabilidad.

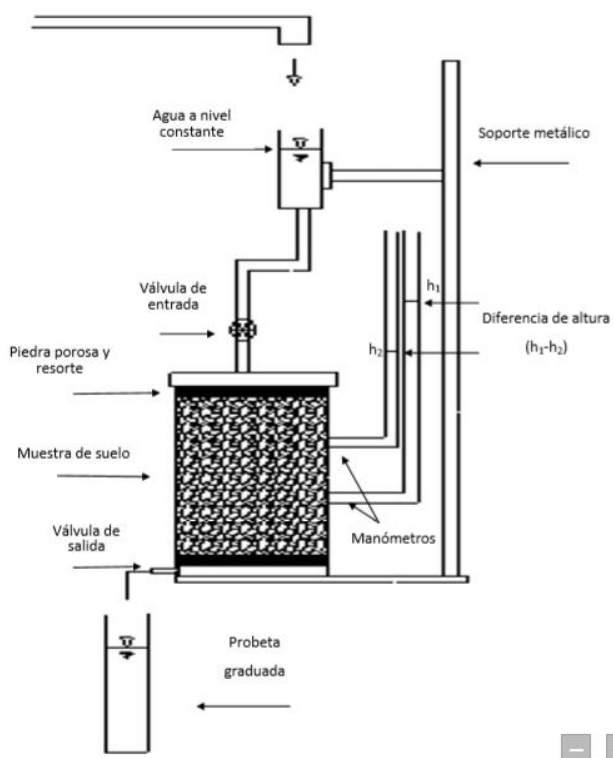
## **ANEXO C**

### **Métodos de estimación de permeabilidad**

### -Permeámetro de carga constante ASTM

Consiste en un cilindro de acrílico, que cuenta con dos manómetros con escala métrica utilizados para medir la pérdida de carga los cuales está ubicados en la parte central del cilindro a una distancia igual al diámetro del cilindro. Además, cuenta con dos piedras porosas cilíndricas con una permeabilidad superior a la de la muestra, tanto en su extremo inferior como superior, las cuales son encargadas de contener la muestra y evitar el transporte de partículas.

Al abrir la válvula de salida, se estabiliza el flujo y luego se miden las diferencias de alturas entre manómetros, obteniendo las pérdidas de carga  $\Delta h$  a través del tiempo.



**Esquema permeámetro de carga constante ASTM (Fuente: Puga 2012)**

### -Métodos indirectos

Diferentes autores como Hazen (1892,1911) establecieron métodos indirectos de obtención de permeabilidades en base a las características granulométricas del suelo. Dado que el diámetro promedio de los poros en un suelo con una porosidad dada crece en proporción al promedio del tamaño de los granos, se espera que la permeabilidad de suelos granulares crezca, en alguna proporción, con el tamaño característico de los granos, designado como “diámetro efectivo de los granos”,  $D_e$ . Hazen propuso las siguientes expresiones:

$$k_c \cong 10^{-2} * D_{10}^2 \quad D_{10} (mm) \quad \text{Arenas sueltas}$$

$$k_c \cong 0.35 * D_{15}^2 \quad D_{15} (cm) \quad \text{Arenas densas}$$