

**ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LA VARIACION DE LAS CONDICIONES DE  
SATURACION DEL SUELO EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS  
DE TIERRA**

**CRISTHIAN DANILO MOLINA SANTAMARIA**

**ANDRES ORLANDO RODRIGUEZ PINEDA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2011**

**ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LA VARIACION DE LAS CONDICIONES DE  
SATURACION DEL SUELO EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS  
DE TIERRA**

**CRISTHIAN DANILO MOLINA SANTAMARÍA**

**ANDRÉS ORLANDO RODRÍGUEZ PINEDA**

**Proyecto de grado como requisito parcial para optar el título de  
Ingeniero Civil**

**DIRECTOR:**

**ING. Msc. HEBENLY CELIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2011**

*Dedico este trabajo principalmente a Dios,  
por darme la oportunidad de cumplir este gran sueño  
de ser un profesional de esta gran institución.*

*A mis padres Carmen Cecilia y Jorge Danilo  
por el apoyo en este trayecto de formación y  
por su amor y dedicación en mi educación.*

*A mis hermanos Laura Valentina y Julián Andrés por crear  
en mí la responsabilidad de ser un gran ejemplo  
para ellos, de empuje y dedicación como persona.*

*A toda mi familia que creyeron en mí  
y por su gran colaboración.*

*A mis amigos y compañeros que junto a mí recorrieron  
este tiempo de formación y gratas vivencias.*

*Crísthian Danilo Molina Santamaría*

*Este trabajo va dedicado primordialmente a Dios, por estar siempre presente en la toma de mis decisiones acertadas y por darme la oportunidad de alcanzar este sueño de ser un ingeniero de tan gran institución.*

*A mis padres y familia, pero en especial a mi madre Esperanza Pineda Velasco y mi abuela Rita Elvia Velasco Ariza, que siempre estuvieron apoyándome y alentando a no darme por vencido en los momentos más difíciles de este reto; pero sobre todo por inculcar en mí tan valiosos valores y educación.*

*A aquellas personas ajenas a mi familia que siempre se preocuparon por mi bienestar y correcto desempeño en las aulas de tan maravillosa universidad.*

*A mis amigos, colegas y parceros que nunca me dieron la espalda, por el contrario fueron cómplices de este hermoso trayecto hacia el camino de ser un profesional.*

*Andres Orlando Rodríguez Pineda*

## **AGRADECIMIENTOS**

Damos gracias a Dios principalmente por darnos la oportunidad de poder cumplir una de nuestras grandes metas, desear unos profesionales íntegros de esta valiosa institución, por la salud y el entusiasmo para recibir los mejores conocimientos en nuestra corta preparación.

Agradecemos al cuerpo de docentes de la sede principal y sede Barbosa de la Universidad Industrial de Santander por su gran apoyo y enseñanza durante este recorrido de aprendizaje en estos años de vida universitaria, a su vez a nuestra directora del proyecto de grado la Ingeniera M.sc. Hebenly Celis por su apoyo y colaboración en esta investigación, por compartir sus valiosos conocimientos, experiencias y enseñanza en esta área.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>1. INTRODUCCION</b> .....	<b>20</b>
<b>2. GENERALIDADES</b> .....	<b>21</b>
2.1. Definición de Talud .....	21
2.2. Partes generales de un talud .....	22
2.3. Principales factores que afectan el comportamiento del talud....	23
2.3.1. Formación Geológica .....	24
2.3.2. La geomorfología .....	24
2.3.3. La topografía .....	25
2.3.4. El clima y la hidrología .....	25
2.3.5. La Hidrogeología .....	25
2.3.6. La Sismicidad .....	26
2.3.7. La vegetación .....	26
2.3.8. Parámetros geométricos .....	26
<b>3. REFERENCIAS SOBRE HIDROGEOLOGIA Y PRESION DE POROS...</b>	<b>27</b>
3.1. Aguas subterráneas .....	27
3.2. La humedad superficial .....	27
3.3. La infiltración .....	28
3.4. El agua superficial o escorrentía .....	30
3.5. El nivel freático .....	32
3.6. La presión de poros .....	34
3.7. La erosión .....	35

<b>4. PROCEDIMIENTOS DE INVESTIGACION Y DISEÑO DE TALUDES...</b>	<b>36</b>
4.1. Observación de campo .....	36
4.2. Uso de métodos aproximados .....	37
4.3. Análisis detallado .....	37
4.4. Métodos de cálculo .....	38
4.4.1. Clasificación de los métodos de cálculo .....	38
4.4.2. Métodos de cálculo en deformaciones .....	39
4.4.3. Métodos de equilibrio limite .....	39
4.4.3.1. Métodos exactos .....	39
4.4.3.2. Métodos no exactos .....	40
<b>5. ESTUDIO DE CASOS .....</b>	<b>41</b>
5.1. Software de análisis de Taludes .....	41
5.2. Ejemplo de comparación .....	43
5.3. Análisis de casos .....	47
5.3.1. Caso 1 .....	47
5.3.1.1. Propiedades de los suelos .....	47
5.3.1.2. Geometría del talud .....	48
5.3.1.3. Cargas aplicadas .....	48
5.3.1.4. Sistemas de cimentación de las edificaciones .....	49
5.3.1.5. Superficie de falla .....	50
5.3.1.6. Condición sísmica .....	50
5.3.1.7. Modelamiento .....	51
5.3.1.8. Tabla de comparación de resultados caso 1 .....	59
5.3.1.9. Análisis de resultados caso1 .....	60
5.3.1.10. Conclusiones caso 1 .....	63
5.3.2. Caso 2 .....	64
5.3.2.1. Propiedades de los suelos .....	64
5.3.2.2. Geometría del dique .....	65
5.3.2.3. Superficie de falla .....	66

5.3.2.4.	Modelamiento .....	66
5.3.2.5.	Tabla de comparación de resultados caso 2 .....	74
5.3.2.6.	Análisis de resultados .....	75
5.3.2.7.	Conclusiones caso 2 .....	77
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO</b> .....	<b>78</b>
	BIBLIOGRAFIA .....	
	ANEXOS .....	81

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1. a).</b> Partes de un talud artificial .....	21
b). Partes de un talud natural (Ladera) .....	22
<b>Figura 2.</b> Métodos de cálculo .....	40
<b>Figura 3.</b> Superficie de falla en STABL-WV-2008, (Método Bishop).....	44
<b>Figura 4.</b> Superficie de falla en SLOPEW (Student), (Método Bishop)....	44
<b>Figura 5.</b> Superficie de falla en SLIDE (Student), (Método Bishop).....	45
<b>Figura 6.</b> Geometría del talud. Caso 1 .....	48
<b>Figura 7.</b> Pilotes cargados lateralmente. Momento para suelos cohesivos en pilotes largos con cabeza fija .....	49
<b>Figura 8.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 1 .....	54
<b>Figura 9.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 2 .....	54
<b>Figura 10.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 3 .....	55
<b>Figura 11.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 4 .....	55
<b>Figura 12.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 5 .....	56
<b>Figura 13.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 6 .....	56
<b>Figura 14.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 7 .....	56
<b>Figura 15.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 8 .....	57

<b>Figura 16.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 9 .....	57
<b>Figura 17.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 10 .....	57
<b>Figura 18.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 11 .....	58
<b>Figura 19.</b> Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 12 .....	58
<b>Figura 20.</b> Gráfica y pendientes de los factores de seguridad por el método de Bishop variando condiciones fisca y mecánicas del suelo .....	60
<b>Figura 21.</b> Gráfica y pendientes de los factores de seguridad por el método de Janbu variando condiciones fisca y mecánicas del suelo .....	61
<b>Figura 22.</b> Gráfica y pendientes de los factores de seguridad por el método de Spencer variando condiciones fisca y mecánicas del suelo .....	62
<b>Figura 23.</b> Geometría del dique de tres (3.0m) metros de altura.....	65
<b>Figura 24.</b> Geometría del dique de cuatro punto cinco (4.5m) metros de altura	66
<b>Figura 25.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 1.....	68
<b>Figura 26.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 2.....	68
<b>Figura 27.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 3.....	68
<b>Figura 28.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 4.....	69
<b>Figura 29.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 5.....	69
<b>Figura 30.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 6.....	69
<b>Figura 31.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 7.....	70
<b>Figura 32.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 8.....	70
<b>Figura 33.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 9.....	70

<b>Figura 34.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 10.....	71
<b>Figura 35.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 11.....	71
<b>Figura 36.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 12.....	71
<b>Figura 37.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 13.....	72
<b>Figura 38.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 14.....	72
<b>Figura 39.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 15.....	72
<b>Figura 40.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 16.....	73
<b>Figura 41.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 17.....	73
<b>Figura 42.</b> Superficie de falla método de Bishop, modelo 18.....	73
<b>Figura 43.</b> Grafica de factores de seguridad para dique de altura 3.0m.....	75
<b>Figura 44.</b> Grafica de factores de seguridad para dique de altura 4.5m.....	76

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Parámetros de resistencia del suelo (ejemplo de comparación)...	43
<b>Tabla 2.</b> Resultados ejemplo de comparación.....	43
<b>Tabla 3.</b> Parámetros de resistencia del suelo Caso 1.....	47
<b>Tabla 4.</b> Valores de $A_a$ , $A_v$ , $A_e$ y $A_d$ y definición de la zona de amenaza sísmica de los municipios colombianos.....	50
<b>Tabla 5.</b> Condiciones dinámicas (sismo) aplicadas en el Caso 1.....	51
<b>Tabla 6.</b> Características de las condiciones del modelamiento para el caso 1	52
<b>Tabla 7.</b> Factores de seguridad por los métodos analizados para el caso 1	53
<b>Tabla 8.</b> Tabla de comparación del modelamiento para el caso 1.....	59
<b>Tabla 9.</b> Factores de seguridad por el método de Bishop.....	60
<b>Tabla 10.</b> Factores de seguridad por el método de Janbu.....	61
<b>Tabla 11.</b> Factores de seguridad por el método de Spencer.....	62
<b>Tabla 12.</b> Resultados de ensayos de laboratorio.....	64
<b>Tabla 13.</b> Resultado de ensayo de corte directo.....	64
<b>Tabla 14.</b> Características de las condiciones del modelamiento para el caso 2	67
<b>Tabla 15.</b> Factores de seguridad por el método de Bishop para el caso 2	67
<b>Tabla 16.</b> Tabla de comparación del modelamiento para el caso 2.....	74

<b>Tabla 17.</b> Factores de seguridad dique 3.0m.....	75
<b>Tabla 18.</b> Factores de seguridad dique 4.5m.....	76

## RESUMEN

### TITULO

ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LA VARIACION DE LAS CONDICIONES DE SATURACION DEL SUELO EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS DE TIERRA\*

### AUTORES

CRISTHIAN DANILO MOLINA SANTAMARIA\*\*

ANDRES ORLANDO RODRIGUEZ PINEDA\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Estabilidad, Taludes, Saturación, Freático, Deslizamiento, Suelo, Falla, Seguridad.

### DESCRIPCION

Este estudio se desarrolló con el propósito de analizar el comportamiento de taludes y presas de tierra ante eventos en los cuales varíe los niveles de saturación mediante lluvias importantes o crecidas en ríos.

En el proyecto se profundizó en algunos software libres, especializados en estabilidad de taludes comparando sus resultados en los factores de seguridad y la similitud de sus análisis, por los distintos métodos que contienen; finalmente con esto poder definir un software de trabajo para los casos a analizar.

En nuestro país es muy importante este tipo de estudios debido a que se presentan muchos problemas de deslizamientos por la topografía accidentada y la gran variación del clima en las épocas del año. Se analizarán algunas características como el tipo de suelo, geometría, topografía, clima e hidrología, sismicidad entre otros; que inciden en la estabilidad.

En el proyecto inicialmente se presenta un marco teórico evaluando los principales factores que pueden causar la falla en el talud, posteriormente se estudiarán dos casos de la realidad, analizados mediante software, hallando los factores de seguridad en los que se encuentran actualmente, variando sus condiciones de saturación y propiedades físico-mecánicas. Este análisis servirá como soporte de estudio en la Universidad Industrial de Santander para investigaciones futuras sobre este tema.

---

\*. Proyecto de grado

\*\*.. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Directora M.Sc Ingeniera Hebenly Celis.

## ABSTRACT

### TITLE

STUDY OF THE VARIATIONS INCIDENCE OF THE CONDITIONS OF SATURATION OF THE GROUND IN THE STABILITY OF SLOPES IN EARTH DAMS\*

### AUTHORS

CRISTHIAN DANILO MOLINA SANTAMARIA\*\*

ANDRES ORLANDO RODRIGUEZ PINEDA\*\*

### KEYWORDS:

Stability, Slopes, Saturation, Phreatic, Sliding, Ground, Fail, Security.

### DESCRIPTION

This study was developed in order to analyze the behavior of slopes and earth dams before events can cause varies in the levels of saturation as a consequence of important rains or swellings in rivers.

In the project was deepened in some free software, specialized in stability of slopes comparing its results in the safety factors and the similarity of its analyses, by the different methods that contains. Finally with this be able to define a working software for the cases to analyze.

In our country it is very important east type of studies because many problems of slidings by the injured topography and the great variation of the climate at different times of the year appear. Some characteristics will be analyzed as the type of ground, geometry, topography, climate and hydrology, seismicity among others; that affect the stability.

Initially at the project appears a theoretical frame evaluating the main factors that can cause the fault in the slope, later is a study of two real cases, analyzed by a software, finding the factors of safety in which they are at the moment, varying its physicomechanical conditions of saturation and properties. This analysis will serve as studying support in the Industrial University of Santander for future investigations on this subject.

---

\*. Degree Project

\*\*Faculty of Physicomechanical Engineerings, School of Civil Engineering, Director M.Sc Engineer Hebenly Celis.

## 1. INTRODUCCION

En la ejecución de las obras civiles se debe obtener un amplio conocimiento sobre las especificaciones necesarias para lograr una eficiente realización de proyectos de ingeniería. Estos proyectos deben cumplir con las exigencias requeridas por los estándares establecidos en las normas de construcción y seguridad, necesarias para su mejor desempeño de trabajo para el cual fue diseñado, poniendo a consideración de los ejecutores sus diseños y la utilización de avances tecnológicos en la ingeniería para lograr una mayor eficiencia en la ejecución de dichos proyectos.

El moderno desarrollo de las actuales vías de comunicación como canales, caminos y ferrocarriles, así como el impulso de la construcción de presas de tierra, y el desenvolvimiento de obras de protección contra la acción de ríos han puesto al diseño y construcción de taludes en el plano de importancia ingenieril de primer orden, ya que son estructuras ingenieriles que exigen mayor cuidado por parte del proyectista debido al aspecto de inversión que pueden tener consecuencias por la falla de los taludes.

Con los aspectos nombrados anteriormente se hace necesario un estudio muy claro y conciso sobre la estabilidad de taludes, primordialmente conocer las causas de inestabilidad y los factores que afecten la seguridad del talud, como cambios en su geometría, composición de suelos y variación de las condiciones de saturación, por esto, a continuación se desarrollará un análisis con ayuda de tecnología, mediante software, sobre la variación de las características físicas que influyen en los factores de seguridad.

## 2. GENERALIDADES

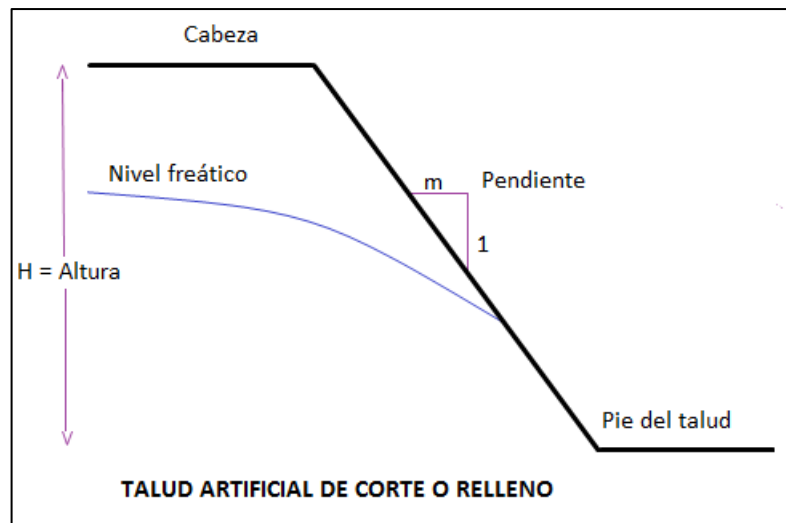
### 2.1. DEFINICIÓN DE TALUD:

Se entiende como talud a una superficie que se encuentra inclinada con respecto a la horizontal conformada por una masa de tierra que posee características de composición en peso y humedad, y con una variedad de suelos que hacen que presenten características geomecánicas ante los diversos factores que lo afecten como clima, geodinámicos, uso del suelo, etc.

Cuando el talud se produce de forma natural se considera como ladera y cuando es realizado por el hombre se denomina talud o cortes transversales.

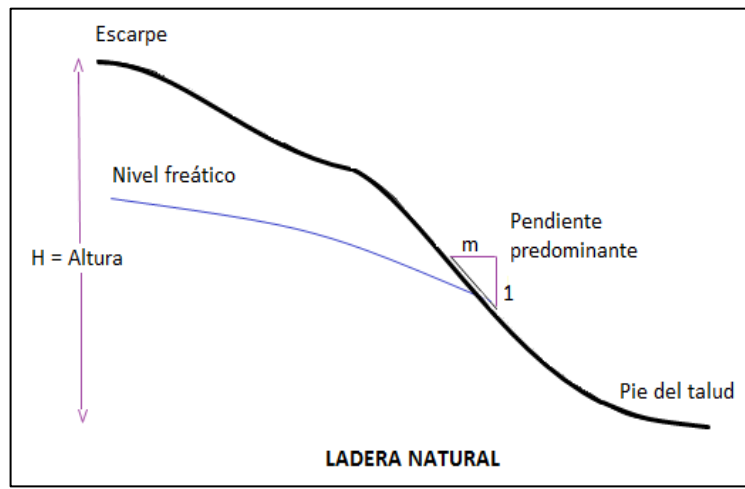
Esquema de las partes de un talud: En la siguiente imagen se presentaran brevemente las partes que conforma un talud o ladera, los cuales poseen las mismas denominaciones.

**Figura 1. a) Partes de un talud artificial**



Parámetros geotécnicos y estabilidad de taludes, pág. 7.

**Figura 1. b)** Partes de un talud natural (ladera)



Parámetros geotécnicos y estabilidad de taludes, pág. 7.

## 2.2. PARTES GENERALES DE UN TALUD

Cuando se trata de taludes o laderas existen varios términos o palabras para definir las partes de un talud.

En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

- **Altura (H):** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza del talud, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien definidos.
- **Pie o base:** Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior. La forma del pie de una ladera es generalmente cóncava.
- **Cabeza o escarpe:** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior del talud o ladera.
- **Nivel freático:** Nivel de agua dentro del cuerpo del talud que puede variar por condiciones externas como infiltración.

- **Pendiente:** Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m/1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. (Suarez Díaz Jaime, 1998)

### **2.3. PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DEL TALUD**

Los deslizamientos producidos por factores que modifican el comportamiento del suelo que conforman el talud, pueden variar por la complejidad de la unión de varias causas conjuntas que por lo general tienen que ver con las propiedades del suelo tanto físicas como mecánicas, así como factores externos que actúan sobre el mismo.

Se entiende como deslizamiento a la rotura y al desplazamiento del suelo situado debajo de un talud, que origina un movimiento hacia abajo y hacia afuera de toda la masa que participa del mismo.

Los deslizamientos pueden producirse de distintas maneras, es decir en la forma lenta o rápida, con o sin provocación aparente, etc. Generalmente se producen como consecuencia de excavaciones o socavaciones en el pie del talud. Sin embargo existen otros casos donde la falla se produce por desintegración gradual de la estructura del suelo, aumento de las presiones intersticiales debido a filtraciones de agua, etc.

Los tipos de falla más comunes en taludes son:

- Deslizamientos superficiales
- Movimientos del cuerpo del talud
  - ✓ Falla rotacional
  - ✓ Falla trasnacional
- Flujos

Entre los factores que afectan el comportamiento del talud se pueden clasificar según el tipo y la característica que afecten y pueden ser: La formación geológica, la geomorfología, la topografía, el clima y la hidrología, la sismicidad, la vegetación, los parámetros geométricos, entre otros.

### **2.3.1. Formación Geológica**

La formación geológica está determinada por los diferentes tipos de suelo que van a existir en la zona de estudio, si la clasificación es homogénea vamos a tener una formación fácil de interpretar y de analizar, pero cuando una zona determinada tiene una clasificación de suelo variada, el comportamiento de cada material va ser muy diferente a los demás por lo que se recomienda un análisis por separado.

### **2.3.2. La geomorfología**

La geomorfología de un suelo nos permite conocer los cambios que están actuando sobre la zona en estudio, ya que son procesos que han producido cambios desde su estado inicial. Por lo que se recomienda elaborar un cuadro de cambios que ha sufrido el suelo así como los que se pueden producir en el futuro.

### **2.3.3. La topografía**

El factor topográfico juega un papel muy importante en lo que es estabilización de taludes, los cortes que existen en el terreno bien sean por deslizamientos así como producidos por el hombre pueden ser causas notables de que una determinada masa de tierra se deslice a través de la superficie del terreno. Cuando se realizan cortes de gran pendiente los cuales sobrepasen al ángulo de la pendiente de equilibrio la cual es  $45^\circ$  se tiene un terreno susceptible a soportar un deslizamiento.

### **2.3.4. El clima y la hidrología**

El comportamiento de un talud depende el clima existente en el sitio donde se encuentra ya que la gran presencia de precipitaciones va a afectar el comportamiento del suelo según el tipo que se tenga luego de haber realizado una clasificación del mismo. Puede haber una saturación de las partículas de suelo al punto de que ya no atrapen humedad y se produzca un deslizamiento por la cantidad de agua existente en el sitio. Los diferentes cambios climáticos es una causa para que frecuentemente se tenga cambios de perfiles del terreno debido a deslizamientos así como escorrentías superficiales, existiendo además cambios en los diferentes tipos de fuerzas existentes en el talud.

### **2.3.5. La Hidrogeología**

Al momento de realizar un análisis para estabilizar un talud se debe elaborar un mapa de factores o causas que lo están afectando y podrían afectar a futuro al comportamiento del mismo en el cual vamos hacer constar lo siguiente:

- ✓ Zonas de infiltración, por lo general arriba del talud.
- ✓ Permeabilidad del suelo
- ✓ Capacidad de absorción del suelo

### **2.3.6. La Sismicidad**

Por encontrarnos en una zona de cadenas montañosas estamos propensos a eventos sísmicos, ya que pueden ser originados por procesos tectónicos o actividad volcánica, un sismo puede activar deslizamientos, dependiendo de la magnitud del mismo.

### **2.3.7. La vegetación**

Cuando un talud se encuentra protegido por una capa vegetal y mejor aun cuando existen árboles que poseen raíces las cuales están a gran profundidad ayudan a mantener estabilizado el terreno ya que sujetan el suelo actuando como un refuerzo absorbente de humedad, evitando así evapotranspiración e infiltración de agua.

### **2.3.8. Parámetros geométricos**

La conformación topográfica del talud:

- ✓ Altura
- ✓ Pendiente
- ✓ Curvatura
- ✓ Largo y ancho

Actuando en forma conjunta o separada, afectan la estabilidad de un talud, por cuanto determinan los niveles de esfuerzos totales y las fuerzas de gravedad que provocan los movimientos. (Suárez Díaz Jaime, “Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales”).

### **3. REFERENCIAS SOBRE HIDROGEOLOGIA Y PRESION DE POROS**

Este trabajo comprende el estudio de las condiciones límites de estabilidad para distintas condiciones de borde, poniendo énfasis en el cambio del grado de saturación de los suelos, que produce el inicio de la falla de los taludes.

El agua es el factor que más comúnmente se le asocia con las fallas de los taludes, debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren después de lluvias fuertes o durante periodos lluviosos y el control del agua subterránea es uno de los sistemas más efectivos para la estabilización de deslizamientos.

#### **3.1. AGUAS SUBTERRANEAS**

Adicionalmente a la gravedad las aguas subterráneas son el factor más importante en la estabilidad de taludes. Las aguas subterráneas pueden afectar la estabilidad de taludes en cinco diferentes formas:

- ✓ Reduce la resistencia
- ✓ Cambia los constituyentes minerales a través de alteración química y solución
- ✓ Cambia la densidad del terreno
- ✓ Genera presiones de poros
- ✓ Causa erosión

#### **3.2. LA HUMEDAD SUPERFICIAL**

La humedad de la superficie del terreno define factores tales como los porcentajes de escorrentía e infiltración y en algunas ocasiones el comportamiento de los taludes.

La humedad superficial está controlada por:

- ✓ Características topográficas de la pendiente de los taludes.
- ✓ Tipo de suelo.
- ✓ Características climáticas.
- ✓ Vegetación.

La humedad del suelo en la superficie del terreno puede determinar la posibilidad de agrietamiento de tensión en ciertos suelos arenos arcillosos y arenos limosos muy susceptibles a efectos de cambios de humedad. En términos generales, los factores ambientales y físicos que determinan el comportamiento de la infiltración dependen en buena parte de los 40 centímetros de suelo más superficial.

### **3.3. LA INFILTRACION**

La infiltración se define como el movimiento del agua desde la superficie del terreno hacia el suelo o roca por los poros o intersticios y discontinuidades de la masa térrea. El porcentaje de infiltración corresponde a la proporción de lluvia que se infiltra. La infiltración a su vez puede dividirse entre aquella parte que contribuye a aumentar el contenido de agua de la zona no saturada y aquella que recarga el sistema saturado de agua subterránea. Una infiltración alta puede producir problemas de presión del agua interna, etc., que puede generar un deslizamiento. En el caso de que el talud llegue a saturarse, la facilidad o dificultad con que el talud se auto-drena depende de las formaciones geológicas circundantes. La presencia de mantos permeables de evacuación de agua favorece grandemente su estabilidad.

### **Factores que afectan la capacidad de infiltración:**

La forma precisa en que se realiza el proceso descrito depende de un gran número de factores, entre los que destacan:

- Textura del suelo.
- Contenido de humedad inicial.
- Contenido de humedad de saturación.
- Cobertura vegetal.
- Uso del suelo.
- Aire atrapado.
- Lavado de material fino.
- Compactación.
- Temperatura, sus cambios y diferencias.

### **Métodos empíricos**

Cuando se tienen mediciones simultáneas de lluvia y volumen de escurrimiento en una superficie, las pérdidas se pueden calcular, de acuerdo a:

$$V_p = V_{ll} - V_{ed}$$

Dónde:

$V_p$  = volumen de pérdidas.

$V_{ll}$  = volumen de lluvia.

$V_{ed}$  = volumen de escurrimiento directo.

Si ambos miembros de la ecuación anterior se dividen entre el área de la superficie donde llueve se obtiene:

$$F = I - R$$

F = infiltración o lámina de pérdidas acumulada.

I = altura de lluvia acumulada.

R = escurrimiento directo acumulado.

Y si a su vez se deriva con respecto al tiempo se obtiene:

$$f = i - r$$

Donde r es la lámina de escurrimiento directo por unidad de tiempo.

Para la aplicación de los métodos que simulan la relación lluvia escurrimiento es necesario conocer la variación en el tiempo de r. Para ello se usan comúnmente dos tipos de criterios en cuencas aforadas: El de la capacidad de infiltración media y el del coeficiente de escurrimiento. (Fundamentos de Hidrología de superficie, Francisco Javier Aparicio Mijares, 1992, pág. 179.)

### **3.4. EL AGUA SUPERFICIAL O ESCORRENTIA**

La escorrentía es la proporción de precipitación que fluye superficialmente sobre el suelo. Cuanto más pronunciadas, impermeables y desprovistas de vegetación son las laderas y más copiosas las precipitaciones, tanto mayor es la parte de las mismas que se convierte en escorrentía. Una lluvia fuerte puede producir abundante escorrentía, pero una llovizna ligera puede absorberse en forma casi total en el suelo antes de que produzca mucha escorrentía, porque el suelo a menos que esté muy seco, se satura en forma relativamente rápida y no puede absorber más agua.

El coeficiente o porcentaje de escorrentía mide la proporción de la lluvia total que fluye superficialmente. Este coeficiente es la relación entre índice de escorrentía y la precipitación anual.

$$C_e = I_e / P_{mm}$$

Siendo:

$C_e$  = Coeficiente de escorrentía

$I_e$  = Índice de escorrentía

$P_{mm}$  = Precipitaciones anuales en milímetros

En algunos países se trabaja con el coeficiente ( $\Phi$ ), el cual indica la cantidad de lluvia que cae en una determinada área que se convierte en escorrentía.

La escorrentía generalmente, se concentra en corrientes de agua, las cuales pueden formar surcos o cárcavas de erosión o pueden correr hacia los taludes. Para cuantificar la cantidad de escorrentía que llega a un punto determinado, se debe calcular la cantidad de agua disponible después de una lluvia, de acuerdo a la cuenca tributaria, teniendo en cuenta las características de la superficie del terreno, cobertura vegetal e infiltración.

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes:

- Área del terreno.
- Altura total de precipitación.
- Características generales o promedio de la superficie (forma, pendiente, vegetación, etc.).
- Distribución de la lluvia en el tiempo.
- Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la superficie.

### **3.5. EL NIVEL FREÁTICO**

La localización del nivel freático corresponde a la línea de presión de poros igual a cero, equivalente a que la presión neta en el sitio es igual a la presión atmosférica. El nivel de agua determina los niveles de presiones hidrostáticas sobre una superficie localizada por debajo de ese nivel o los valores de presión negativa o de succión para el suelo por encima. En taludes naturales de laderas, la línea de nivel freático general sigue una línea aproximadamente paralela a la superficie del terreno y esta sube por el recargue debido a la infiltración.

El agua subsuperficial puede dividirse entre zonas de presión de poros positiva y negativa. Las presiones de poro positivas son superiores y las negativas son inferiores a la presión atmosférica. La línea divisoria es el nivel freático donde la presión es igual a la presión atmosférica, la cual se designa como presión cero.

Por debajo del nivel freático el suelo se encuentra saturado, lo cual equivale a que el agua llena todos los poros de los suelos y todas las cavidades de los materiales infra-yacentes. El agua existente en la zona de saturación se designa por lo general, como agua freática y su superficie superior es el nivel freático. Cuando las circunstancias geológicas y topográficas son más complejas podrá haber más de una zona de saturación y, por consiguiente, más de un nivel freático en una localidad determinada.

La elevación del nivel freático de una localidad determinada depende de varios factores, tales como las fluctuaciones de las precipitaciones y de los caudales y fugas de los cuerpos de agua.

El nivel de agua puede tener como base el pie del talud o puede estar suspendido por un manto impermeable dentro del talud. En el primer caso las fallas a producirse serán preferentemente de pie, mientras en el caso segundo las fallas tienden a ser a mitad del talud.

El nivel freático y en general la presencia de agua en los materiales en la proximidad de la superficie de falla, desempeñan un papel fundamental en la estabilidad y de hecho, hacen algo más complejo el mecanismo para la generación de las fallas.

La configuración del nivel freático depende de la forma del relieve superficial, el cual reproduce generalmente, sí bien con contornos menos abruptos y también depende de la permeabilidad del terreno y del abastecimiento de agua. Comúnmente, se aleja de la superficie del terreno bajo colinas y elevaciones y se acerca a ella en los valles y muy especialmente en los ríos y en los lagos.

Es usual que los periodos de sequía traigan abatimiento importante del nivel freático, en tanto que se eleva, tras periodos de fuertes lluvias. Estas fluctuaciones suelen ser muy marcadas en terreno granulares permeables. El nivel de agua cambia con las lluvias y periodos secos en forma muy marcada en formaciones permeables y un poco menos fuerte en las impermeables y se tiene un máximo y mínimo cuya diferencia en algunos casos puede ser hasta de más de un metro.

El nivel freático puede ascender bruscamente durante un evento lluvioso intenso y bajar nuevamente después de la lluvia.

En el análisis de estabilidad es muy importante definir el nivel de agua y las consiguientes condiciones de saturación y presiones de poros. Un talud seco puede ser estable, mientras el mismo talud puede no ser estable con un determinado nivel freático o un talud estable puede fallar al ascender el nivel freático.

En un talud la altura piezométrica y los planos de localización de niveles de agua son parámetros determinantes en su estabilidad. La presencia de un nivel de agua a una determinada altura dentro del talud produce fuerzas hidrostáticas desestabilizantes y su determinación es necesaria, previamente a los análisis de estabilidad. Una vez determinados los niveles de agua y calculadas las presiones

de poro se puede calcular los esfuerzos efectivos, que son los que se deben tener en cuenta en el análisis teórico de estabilidad.

### **3.6. LA PRESION DE POROS**

La presión de poros es la presión interna del agua de saturación. La presión de poros dentro del suelo depende de la localización de los niveles freáticos, presiones internas de los acuíferos y las características geológicas del sitio.

Esta cambia de acuerdo a las variaciones del régimen de aguas subterráneas. Los incrementos de presión pueden ocurrir rápidamente en el momento de una lluvia, dependiendo de la intensidad de la lluvia, de la rata de infiltración del área tributaria, etc. Un incremento en la presión de poros positiva o una disminución de la presión negativa, equivale a una reducción de resistencia al cortante y de la estabilidad.

El valor de las presiones de poro se mide utilizando piezómetros abiertos o neumáticos. Si no hay flujo de agua la presión es hidrostática y la medida del piezómetro coincide con el nivel freático, pero si existe flujo las presiones no son hidrostáticas. En este último caso la presión de poros en cualquier punto dentro de la masa de suelo puede medirse por medio de las redes de flujo, las cuales comprenden las líneas de flujo y las líneas de igual presión de poros.

Debe tenerse en cuenta el efecto que las discontinuidades tienen en los niveles piezométricos, determinados por las líneas equipotenciales. Las discontinuidades generan diferencias de permeabilidad, las cuales controlan el sistema de presiones dentro del talud.

Para el análisis de presiones de poros sobre una superficie de falla se deben tener en cuenta sus condiciones de drenaje. Cuando existe drenaje, la presión de poros

disminuye hacia la superficie del talud, pero cuando el drenaje es deficiente se puede presentar un aumento importante de la presión de poros en el pie del talud.

### **3.7. LA EROSION**

La erosión hídrica es un fenómeno ocasionado por acción de fuerzas hidráulicas, las cuales actúan sobre las partículas de suelo produciendo su desprendimiento y posterior transporte. La erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza del agua en movimiento. El proceso puede ser analizado iniciando por el despegue de las partículas de suelo, debido al impacto de las gotas de lluvia. Adicionalmente, ocurre el proceso de flujo superficial en el cual las partículas removidas son incorporadas a la corriente y transportadas talud abajo.

Si la “velocidad” de escorrentía es superior a la velocidad máxima erosionante, se produce erosión superficial. La velocidad de escorrentía depende de la pendiente, la intensidad de la lluvia, la cantidad de agua presente y la rugosidad de la superficie del terreno. (Suárez Díaz Jaime, “Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, Hidrogeología y Presión de Poros, Cap. 7.”)

## **4. PROCEDIMIENTOS DE INVESTIGACION Y DISEÑO DE TALUDES**

Dependiendo del tipo de talud y el tiempo y recursos destinados a la investigación de campo y al análisis, existen diferentes procedimientos de investigación y diseño de taludes. Existen tres procedimientos usuales, que representan niveles de complejidad y costo.

1. Uso de observación de campo y experiencia, sin sondajes, ni ensayos de laboratorio, ni análisis de estabilidad.
2. Uso de cálculos de estabilidad mediante métodos aproximados, en combinación con observaciones de campo y un número mínimo de sondajes y ensayos de laboratorio.
3. Uso de cálculos detallados de estabilidad, en combinación con un programa amplio de investigación de campo y ensayos de laboratorio.

### **4.1. OBSERVACIÓN DE CAMPO**

Se diseñan los taludes en base a la observación de campo de taludes existentes en la misma área y del mismo tipo de suelo. Este procedimiento se aplica cuando el costo de perforaciones y ensayos de laboratorio es mayor que el costo de reparar la falla del talud.

El primer paso consiste en revisar los mapas geológicos existentes y un reconocimiento de la geología. Especialmente se estudia evidencias de infiltraciones, topografía y condiciones de taludes aledaños. También deben anotarse el tipo y condiciones de la vegetación existente, la cobertura y la posible inclinación de los árboles.

Usualmente se preparan gráficos de campo para los taludes en donde se anotan los taludes estables e inestables en base a sus alturas y pendientes. Para la

preparación de este tipo de gráfico deben inventariarse los deslizamientos y taludes estables de la zona.

#### **4.2. USO DE MÉTODOS APROXIMADOS**

Este procedimiento se emplea en los análisis de tipo preliminar. Sin embargo algunos métodos aproximados disponibles hacen posible un análisis muy preciso para ciertas condiciones. Existen métodos que consideran efectos de sobrecarga, grietas de tensión, sumergencia, infiltración y aumento de resistencia al cortante con la profundidad.

En la mayoría de los casos se puede obtener con estos métodos una aproximación del 15% en el factor de seguridad. Por lo tanto, cuando no se tienen datos suficientes de resistencia del terreno y condiciones de campo, el uso de ábacos puede ser suficientemente aproximado.

El uso de métodos aproximados se emplea para comparar alternativas, el chequeo del análisis detallado de estabilidad y análisis retrospectivo de taludes.

#### **4.3. ANÁLISIS DETALLADO**

Una investigación detallada de estabilidad incluye el estudio geológico, observación de campo, sondajes de exploración, ensayos de laboratorio y cálculos detallados de estabilidad. El análisis puede realizarse manualmente o por computadora. Los métodos aproximados de estabilidad pueden utilizarse en estudios preliminares o chequeo del análisis final.

Estudios de observación de campo pueden ejecutarse para comprobar el comportamiento del talud, determinar la zona de falla y chequear los métodos de estabilización utilizados.

## **Análisis detallado de estabilidad**

Cuando las condiciones del sitio y los parámetros de resistencia al cortante han sido investigados apropiadamente, se puede efectuar el análisis detallado de estabilidad de taludes.

- 1. Método de Dovelas:** Se pueden analizar superficies de falla circulares y no circulares. La masa deslizante se divide en una serie de dovelas verticales y se establece el equilibrio de las fuerzas que actúan en cada dovela. Existen diversos métodos para convertir el sistema indeterminado en determinado.
- 2. Método de la Cuña Deslizante:** Este es un procedimiento simple y conservador para superficie de falla no circular en suelos con  $\phi = 0$  ó  $\phi > 0$ .

La descripción de las Fuerzas Actuantes, así como el Factor de Seguridad y el Equilibrio de Fuerzas y Momentos, así como los diferentes métodos se presentan en las láminas adjuntas.

(Hurtado Jorge, "Notas sobre análisis de estabilidad de taludes")

## **4.4. MÉTODOS DE CÁLCULO**

### **4.4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO**

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Métodos de cálculo en deformaciones.
- Métodos de equilibrio límite.

#### **4.4.2. MÉTODOS DE CÁLCULO EN DEFORMACIONES**

Consideran en el cálculo las deformaciones del terreno además de las leyes de la estática. Su aplicación práctica es de gran complejidad y el problema debe estudiarse aplicando el método de los elementos finitos u otros métodos numéricos.

#### **4.4.3. MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE**

Se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

Se pueden clasificar a su vez en dos grupos:

- Métodos exactos.
- Métodos no exactos.

##### **4.4.3.1. MÉTODOS EXACTOS**

La aplicación de las leyes de la estática proporciona una solución exacta del problema con la única salvedad de las simplificaciones propias de todos los métodos de equilibrio límite (ausencia de deformaciones, factor de seguridad constante en toda la superficie de rotura, etc.). Esto sólo es posible en taludes de geometría sencilla, como por ejemplo la rotura planar y la rotura por cuñas.

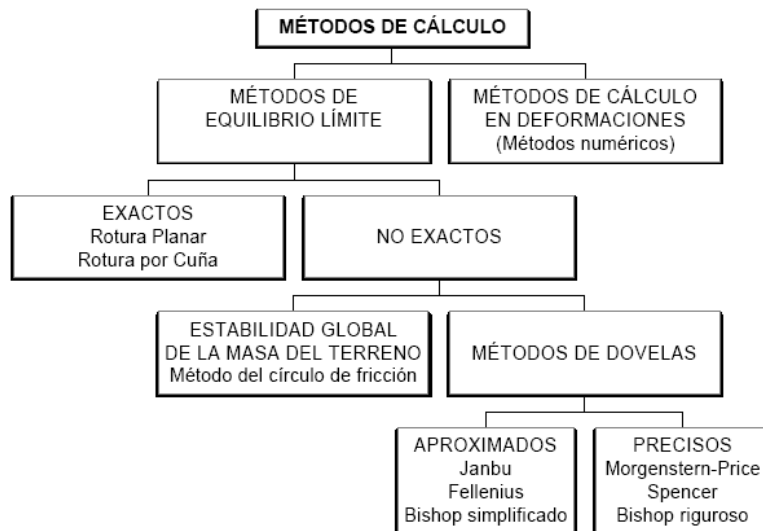
#### 4.4.3.2. MÉTODOS NO EXACTOS

En la mayor parte de los casos la geometría de la superficie de rotura no permite obtener una solución exacta del problema mediante la única aplicación de las leyes de la estática. El problema es hiperestático y ha de hacerse alguna simplificación o hipótesis previa que permita su resolución. Se pueden considerar así los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante, hoy en desuso, y los métodos de las dovelas o rebanadas, que consideran a la masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales.

Los métodos de las dovelas o rebanas pueden clasificarse en dos grupos:

- **Métodos aproximados:** No cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden citar por ejemplo los métodos de Fellenius, Janbu Bishop simplificado.
- **Métodos precisos o completos:** Cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los más conocidos son los de Morgenstern-Price, Sperry Bishop riguroso.

Figura 2. Métodos de cálculo



(Herrera Fernando, "Análisis de estabilidad de taludes")

## 5. ESTUDIO DE CASOS

### 5.1. SOFTWARE DE ANALISIS DE TALUDES

Se realizó una búsqueda de software sobre análisis de taludes principalmente versiones estudiantiles y demos, para posteriormente escoger el más adecuado para el estudio de los casos a analizar, los encontrados fueron:

- **GEOSTUDIO:** Este es un programa de la casa GEO-SLOPE Internacional, costa de un paquete de programas que contiene Temp: Aplicación de la ecuación del calor sobre estructuras de suelos, Seep: Cálculo de redes de flujo, Ctran: Aplicado a fenómenos de contaminación de suelos, Sigma: Orientado al cálculo tensodeformacional, Quake: Cálculo de los efectos de terremotos en suelos y estructuras de suelos, Vandose: Usado en la modelización de acuíferos y **Slope: Cálculo de estabilidad de taludes.** Este programa es muy práctico en su manejo y contiene los siguientes métodos de cálculo: Ordinario (Fellenius), Bishop simplificado, Janbu simplificado, Spencer, Morgenstern-Price, Sarma, Método de equilibrio límite generalizado (GLE) y Método de los elementos finitos



- **SLIDE:** Este es un programa de la casa Rocscience Technical Support, es un programa de cálculo de estabilidad de taludes, es muy completo y de fácil manejo e interacción con el usuario muy amigable. Los métodos de

cálculo que maneja son: Bishop simplificado, GLE/Morgenstern-Price, Janbu simplificado, Janbu corregido, Ordinary/Fellenius y Spencer.



- **GEO 5:** Este es un programa de la casa FINE Civil engineering software, contiene un paquete de programas muy completo que trae aplicaciones como diseño de muros, estabilidad de rocas, muros de gravedad, estabilidad de taludes, estribos, gaviones, losas, muros en voladizos, entre otros, pero al ser versión demo, la aplicación de estabilidad de taludes contiene el estudio para un estrato de tierra con características ya determinadas y posee los siguientes métodos de cálculo: Sarma y Spencer.



- **STABL-WV-2008:** Este programa es de la casa TerraWiz LLC, fue adquirido por docentes de la universidad Industrial de Santander, y se nos fue facilitado gracias a ellos para trabajar en él en estabilidad de taludes. Posee los métodos de cálculo Bishop, Janbu y Spencer.



## 5.2. EJEMPLO DE COMPARACION

Después de haber analizado y trabajado en cada uno de estos software, descartamos el Geo5 por las restricciones que presentaban, se realizó el análisis con los tres software restantes. Este análisis consistió en modelar un ejemplo sencillo y comparar resultados; los parámetros y resultados se presentan a continuación y las imágenes se encuentran en el anexo N° 1.

El ejemplo consiste en un talud que contiene nivel freático, este caso fue extraído de “Introducción al uso del programa Slope/w”, con las siguientes especificaciones geotécnicas del suelo:

**Tabla 1.** Parámetros de resistencia del suelo (Ejemplo de comparación).

Estrato	Profundidad (m)	Parámetros de Resistencia		
		Peso Específico (KN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (KN/m <sup>2</sup> )	Angulo de Fricción (φ)
Suelo superior	0 - 5.	15	5	20°
Suelo inferior	5 - 14.	18	10	25

## TABLA DE RESULTADOS

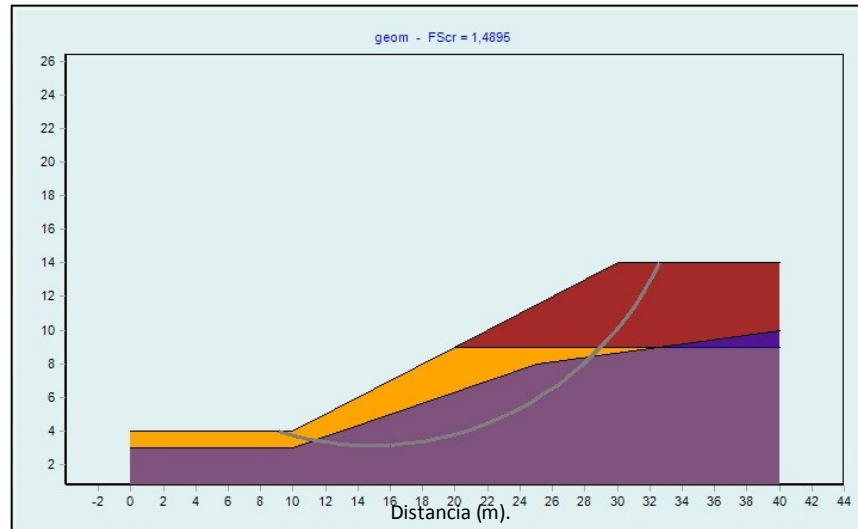
**Tabla 2.** Resultados ejemplo de comparación.

METODO	FACTORES DE SEGURIDAD					
	PROGRAMA			% DIFERENCIA		
	STABL 2008	GEO SLOPE	SLIDE	Stable Vs Geo Slop	Geo Slop Vs Slide	Stable Vs Slide
Bishop	1.49	1.47	1.47	1.31	0.27	1.04
Janbu	1.33	1.32	1.29	1.15	1.67	2.79
Spencer	1.49	1.47	1.47	1.11	0.13	0.97
Ordinary-Fellenius	NA	1.33	1.26	-	5.34	-
GLE-Morgenstern-Price	NA	1.47	1.47	-	0.07	-
Janbu corregido	NA	NA	1.40	-	-	-

\*NA. No aplica.

## Modelamiento en el software STABL-WV-2008

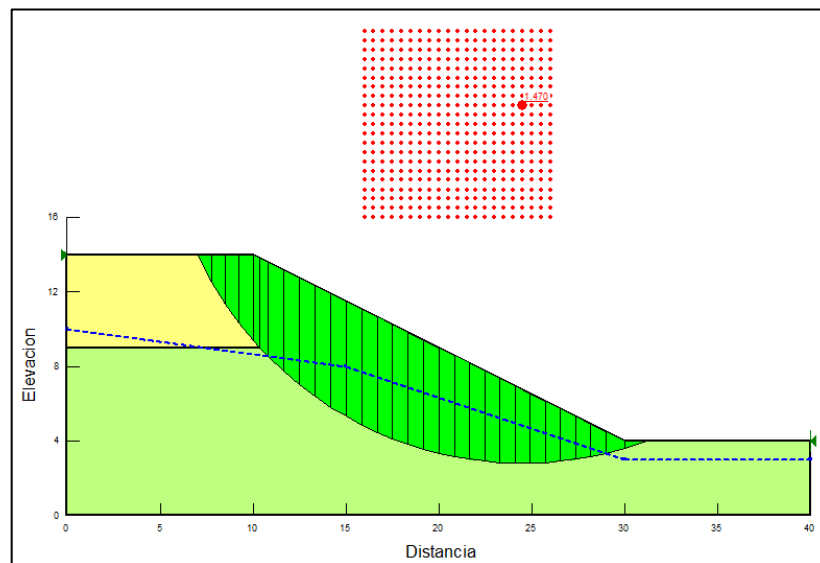
Figura 3. Superficie de falla en STABL-WV-2008, (Método Bishop).



Stabl-wv-2008

## Modelamiento en el software Slope/W

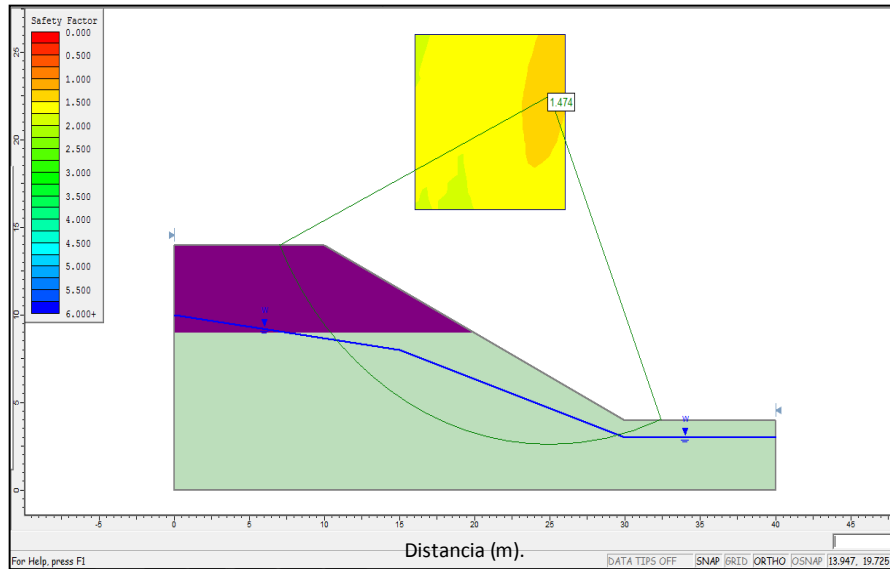
Figura 4. Superficie de falla en SLOPE/W (Student), (Método Bishop).



Geostudio, Slope/w (Student).

## Modelamiento en el software Slide

**Figura 5.** Superficie de falla en SLIDE, (Método Bishop).



### Slide (Student).

Las imágenes de las superficies de falla y los factores de seguridad por los diferentes métodos se encuentran en el anexo número uno (1).

## **ANALISIS DE RESULTADOS**

Después de haber realizado una sencilla modelación en los tres programas, obtuvimos las siguientes conclusiones:

- Los tres programas obtuvieron en cada uno de los métodos analizados resultados similares.
- Los resultados arrojados por los programas varían entre 0,07 y 5,34% de porcentaje de diferencia de acuerdo a nuestras modelaciones.
- A nuestro juicio el programa más sencillo de manejar es el Slide debido a su interfaz práctico y la facilidad en la introducción de datos.
- Al observar los resultados acertados y al tener la licencia del programa STABL-WV-2008 decidimos trabajar en él, ya que los otros al ser versiones estudiantiles poseen algunas restricciones, entonces los estudios de los casos a analizar los realizaremos en este programa.

### 5.3. ANALISIS DE CASOS

El propósito del análisis de casos es considerar situaciones reales, bajo diferentes parámetros de aguas subterráneas y determinar el grado de afectación del talud en cada caso.

#### 5.3.1. CASO 1

Corresponde a un talud que ha sufrido leves deslizamientos con el pasar del tiempo, originados probablemente por las aguas que se infiltran en temporadas de lluvias y características desfavorables del suelo.

##### 5.3.1.1. PROPIEDADES DE LOS SUELOS

Los datos para el análisis de este caso fueron ensayos de Corte directo, determinación de límites, etc. y fueron suministrados por la universidad.

Con estos ensayos se obtuvieron los siguientes parámetros del suelo, tanto para su resistencia pico, como su resistencia residual:

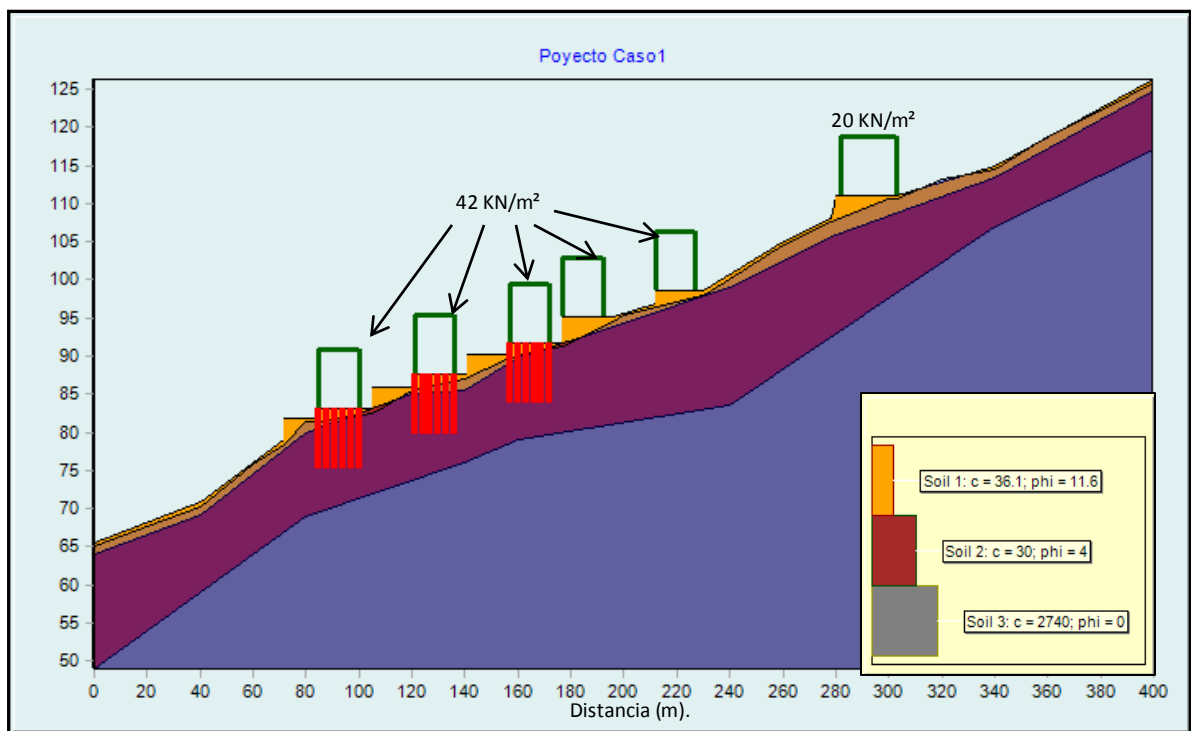
**Tabla 3.** Parámetros de resistencia del suelo del caso 1.

Estrato	Prof. (m)	Parámetros de Resistencia (NF a 50 cm de la superficie)					
		Peso Específico (KN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (KN/m <sup>2</sup> )	Angulo de Fricción (φ)	Cohesión Residual mínimo (KN/m <sup>2</sup> )	Angulo de Fricción Residual mínimo(φ)	W (%)
Calizas Arrecifales	0 - 2.	19	31	34.48°	36.1	11.6°	7.9
Arcilla de Alta plasticidad	2 - 10.	20.6	32.7	16°	30	4°	23.3
Formación Perdices	10 - 60.	26	2740	0	-	-	-

### 5.3.1.2. GEOMETRÍA DEL TALUD

A continuación se presenta una gráfica de la geometría del talud con el nivel freático en la superficie, pilotes y cargas de las edificaciones, para obtener las coordenadas de los estratos del suelo se encuentran en el anexo numero dos (2).

**Figura 6.** Geometría del talud. Caso 1.



**Stabl-wv-2008.**

### 5.3.1.3. CARGAS APLICADAS

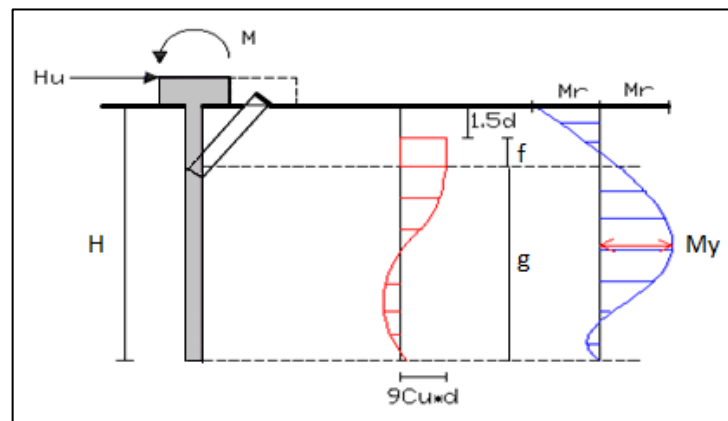
Se aplicaron dos tipos de cargas externas, una carga aplicada de  $42 \text{ KN/m}^2$  en la parte media del talud y una carga de  $20 \text{ KN/m}^2$  en la parte alta del talud como se observa en la figura anterior (fig.6.).

#### 5.3.1.4. SISTEMA DE CIMENTACION EN CARGAS APLICADAS.

Se modelaron grupos de pilotes cada tres (3) metros, seis (6) por fila, de diámetro de treinta (30) centímetros, longitud de ocho (8) metros, una carga lateral de treinta y ocho (38) KiloNewton (KN) y un  $C_u$  obtenido del ensayo de compresión simple de ciento trece KiloNewton sobre metro cuadrado ( $113 \text{ KN/m}^2$ )

El programa STABL-WV-2008 solicita un factor de seguridad que es suministrado por el usuario, este factor de seguridad fue de dos (2), también solicita un cortante y un momento que actúan en el pilote, el cortante lo tomamos como la carga lateral, es decir, 38 KN y el momento fue hallado por el método de Broms en suelos cohesivos, este cálculo se presenta en el anexo número tres (3).

**Figura 7.** Pilotes cargados lateralmente. Momento para suelos cohesivos en pilotes largos con cabeza fija.



Método de Broms.

**Momento = 4186,19 KN.m.**

### 5.3.1.5. SUPERFICIE DE FALLA

Se consideró una superficie de falla circular introduciendo superficie de entrada y salida de la falla que coincidiera con la falla real tomada de campo para todos los casos.

### 5.3.1.6. CONDICION SISMICA

Se considerará comportamientos estáticos y dinámicos del suelo, el caso estático se evaluará las condiciones actuales de estabilidad y el dinámico en caso de que se presente un sismo, para los coeficientes de aceleración sísmica fue tomado de la Norma sismo resistente NSR-10 para la zona en la que se ubica el talud.

#### Componente vertical de los movimientos sísmicos

Cuando se utilice la componente vertical de los movimientos sísmicos de diseño, como mínimo debe tomarse como las dos terceras partes de los valores correspondientes a los efectos horizontales, ya sea en el espectro de diseño, o en las familias de acelerogramas, de contar en este caso con solo registros horizontales. En caso de usar acelerogramas reales podrá emplearse la aceleración vertical registrada con el ajuste equivalente que se haya realizado a las componentes horizontales. (Tomado de NRS-10, Título A.2.8.1)

**Tabla 4.** Valores de  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $A_e$  y  $A_d$  y definición de la zona de amenaza sísmica de los municipios colombianos.

Municipio	$A_a$	$A_v$	Zona de Amenaza Sísmica	$A_e$	$A_d$
Zona del Proyecto	0.1	<u>0.1</u>	Baja	0.05	0.03

(Tomado de NRS-10, Título A.2.8.1)

Como se menciona anteriormente, el componente vertical de los movimientos sísmicos de diseño debe ser mínimo dos terceras partes (2/3) de la horizontal, en este caso se tomó el mismo.

**Tabla 5.** Condiciones Dinámicas (sismo) aplicadas en el caso 1.

<b>Aceleración Vertical</b>	0.1	<b>g</b>
<b>Aceleración Horizontal</b>	0.1	<b>g</b>
<b>Cavitación</b>	-1	<b>Atm.</b>

#### **5.3.1.7. MODELAMIENTO**

Ahora analizaremos varios casos, este análisis se evaluara con respecto a los factores de seguridad, el nivel freático se variará en cuanto la situación más crítica, es decir, a cincuenta (50) centímetros de la superficie, en la mitad del segundo estrato de tierra y sin nivel freático con condiciones de resistencia pico y sin sismo. A continuación se presenta una tabla resumen de los modelos con sus características.

**Tabla 6.** Características de las condiciones del modelamiento para el caso 1.

Modelo	NF	Condiciones de Resistencia		Propiedades del Suelo				Sismicidad	
		Residual	Pico	Suelo	Y (KN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (KN/m <sup>2</sup> )	φ	Si	No
1	Alto		X	Caliza	19	31	34.48		X
				Arcilla	20.6	32.7	16		
				Formación	26	2740	-		
2	Alto		X	Caliza	19	31	34.48	X	
				Arcilla	20.6	32.7	16		
				Formación	26	2740	-		
3	Alto	X		Caliza	19	36.1	11.6		X
				Arcilla	20.6	30.4	4		
				Formación	26	-	-		
4	Alto	X		Caliza	19	36.1	11.6	X	
				Arcilla	20.6	30.4	4		
				Formación	26	-	-		
5	Mitad (Estrato de la Arcilla)		X	Caliza	19	31	34.48		X
				Arcilla	20.6	32.7	16		
				Formación	26	2740	-		
6	Mitad (Estrato de la Arcilla)		X	Caliza	19	31	34.48	X	
				Arcilla	20.6	32.7	16		
				Formación	26	2740	-		
7	Mitad (Estrato de la Arcilla)	X		Caliza	19	36.1	11.6		X
				Arcilla	20.6	30.4	4		
				Formación	26	-	-		
8	Mitad (Estrato de la Arcilla)	X		Caliza	19	36.1	11.6	X	
				Arcilla	20.6	30.4	4		
				Formación	26	-	-		
9	Sin N.F		X	Caliza	19	31	34.48		X
				Arcilla	20.6	32.7	16		
				Formación	26	2740	-		
10	Sin N.F		X	Caliza	19	31	34.48	X	
				Arcilla	20.6	32.7	16		
				Formación	26	2740	-		
11	Sin N.F	X		Caliza	19	36.1	11.6		X
				Arcilla	20.6	30.4	4		
				Formación	26	-	-		
12	Sin N.F	X		Caliza	19	36.1	11.6	X	
				Arcilla	20.6	30.4	4		
				Formación	26	-	-		

## TABLA DE RESULTADOS CASO 1.

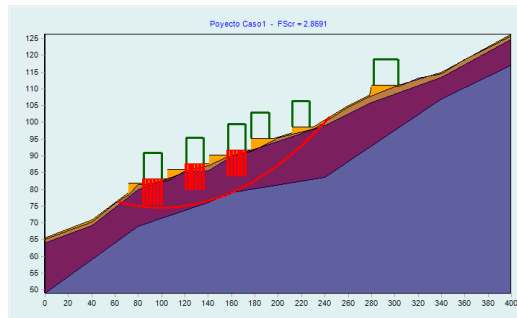
**Tabla 7.** Factores de seguridad por los métodos analizadospa el caso 1.

Modelo	METODO Y FACTOR DE SEGURIDAD		
	Bishop	Janbu	Spencer
1	2.86	2.85	2.87
2	1.62	1.58	1.60
3	1.68	1.64	1.66
4	0.97	0.97	0.98
5	3.49	3.44	3.48
6	2.003	1.99	2.00
7	1.88	1.79	1.89
8	1.12	1.06	1.15
9	3.92	3.92	3.90
10	2.28	2.25	2.31
11	2.10	2.07	2.08
12	1.25	1.26	1.27

A continuación se presentará gráficamente el análisis por el método de Bishop variando condiciones del suelo y factores de sismicidad.

**MODELO 1:** Factor de seguridad: 2.86

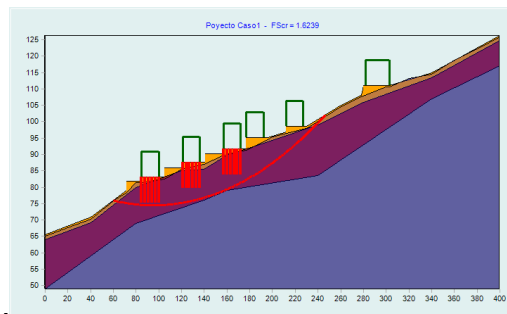
**Figura 8.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 1.



**STABL-WZ-2008**

**MODELO 2:** Factor de seguridad: 1,62

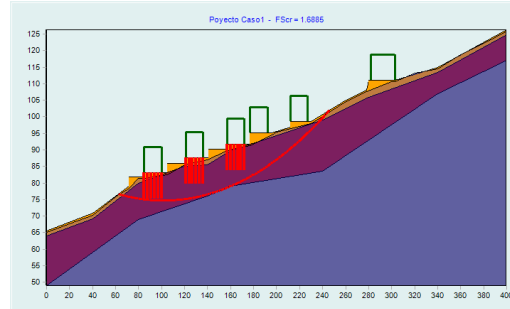
**Figura 9.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 2.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 3:** Factor de seguridad: 1,68

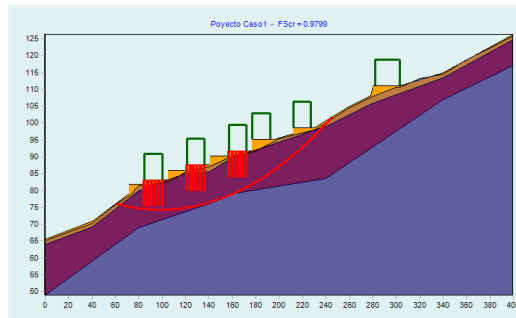
**Figura 10.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 3.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 4:**Factor de seguridad: 0,97

**Figura11.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 4.



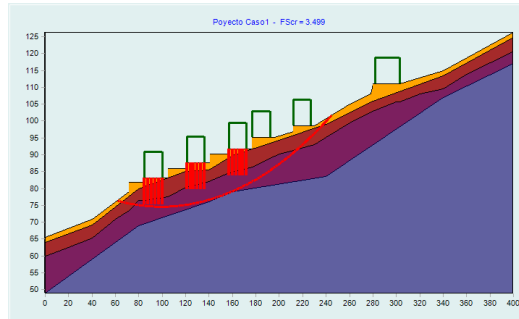
**STABL-WV-2008**

Al bajar el nivel freático se debe calcular el peso específico seco de la Arcilla de alta plasticidad ya que en el estudio de suelos obtuvieron las condiciones de resistencia con el nivel freático alto, es decir, el peso específico utilizado de este suelo fue el Saturado, el procedimiento se adjunta en el anexo número cuatro (4) y el resultado obtenido fue:

$$\gamma_d = 1.671 \text{ gr/cm}^3$$

**MODELO 5:** Factor de seguridad: 3,49

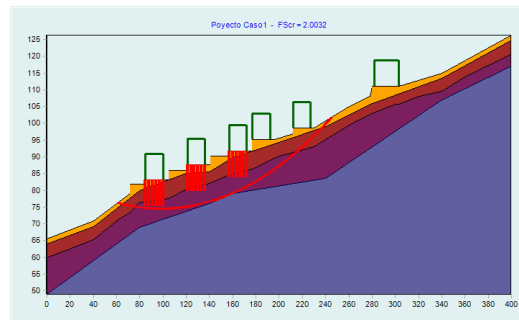
**Figura12.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 5



**STABL-WV-2008**

**MODELO 6:** Factor de seguridad: 2,01

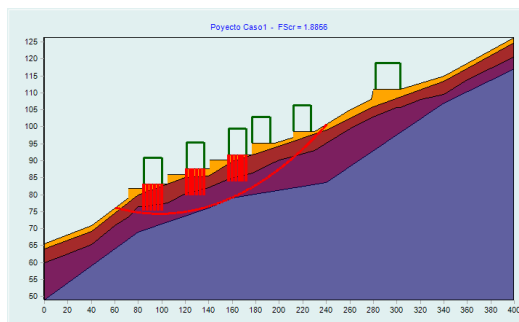
**Figura13.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 6.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 7:** Factor de seguridad: 1,88

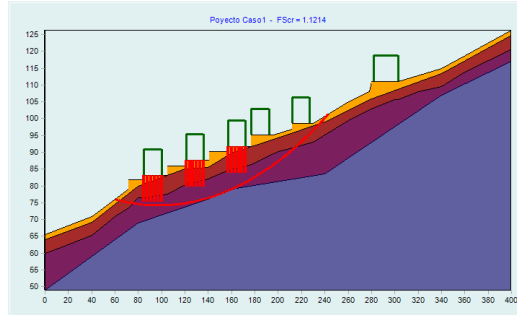
**Figura14.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 7.



**STABL-WV-2008**

- **MODELO 8:** Factor de seguridad: 1,12

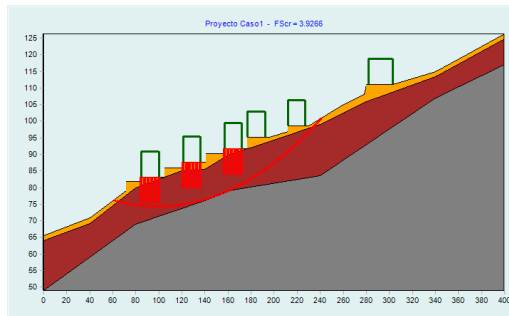
**Figura15.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 8.



**STABL-WV-2008**

- **MODELO 9:** Factor de seguridad: 3,92

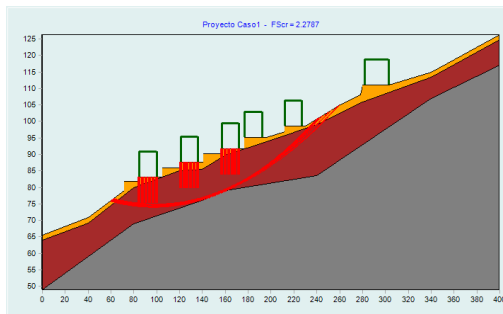
**Figura16.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 9.



**STABL-WV-2008**

- **MODELO 10:** Factor de seguridad: 2,27

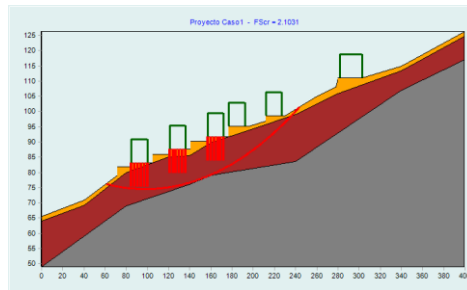
**Figura17.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 10.



**STABL-WV-2008**

- **MODELO 11:** Factor de seguridad: 2,10

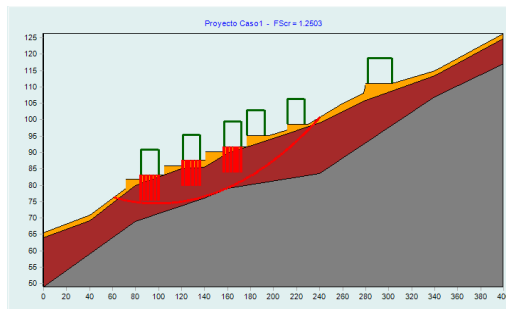
**Figura18.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 11.



**STABL-WV-2008**

- **MODELO 12:** Factor de seguridad: 1,25

**Figura19.** Superficie de falla por metodo de Bishop, modelo 12.



**STABL-WV-2008**

### 5.3.1.8. TABLA DE COMPARACION DE RESULTADOS CASO 1.

A continuación presentamos la tabla de resultados y gráficas, con el objetivo de analizar los resultados obtenidos.

**Tabla 8. Tabla de comparación del modelamiento para el caso 1.**

METODO	1. Nivel Freático alto				2. Nivel Freático en la mitad				3. Nivel Freático bajo.			
	Estático		Dinámico		Estático		Dinámico		Estático		Dinámico	
	Cond. Resist. pico	Cond. residual	Cond. Resist. pico	Cond. residual	Cond. Resist. pico	Cond. residual	Cond. Resist. pico	Cond. residual	Cond. Resist. pico	Cond. residual	Cond. Resist. pico	Cond. residual
<b>Bishop</b>	2,86	1,68	1,62	0,98	3,49	1,88	2,003	1,12	3,92	2,10	2,28	1,25
<b>Janbu</b>	2,85	1,64	1,58	0,97	3,44	1,79	1,99	1,06	3,92	2,07	2,25	1,26
<b>Spencer</b>	2,87	1,66	1,60	0,98	3,48	1,89	2,01	1,15	3,90	2,08	2,31	1,27

1. Nivel Freático a 50cm de la superficie
2. Nivel Freático a 5,50 m de la superficie
3. Sin Nivel Freático.

A continuación se presentan los Porcentajes de diferencia promedios entre las características que se variaron al hacer el análisis en la modelación:

- **Nivel freático:** Porcentaje de diferencia entre 1 y 2: 15,67%; Porcentaje de diferencia entre 2 y 3: 11,62%; Porcentaje de diferencia entre 1 y 3: 25,47%.
- **Condición sísmica (Estático y dinámico):** 32,30%
- **Propiedades de resistencia del suelo (Resistencia pico y Resistencia residual):** 44,45%.
- **Método de Análisis:** 1,56%.

### 5.3.1.9. ANALISIS DE RESULTADOS CASO 1.

En la siguiente tabla se presentan los factores de seguridad por el método de Bishop variando las condiciones de humedad y condiciones físicas y mecánicas del suelo.

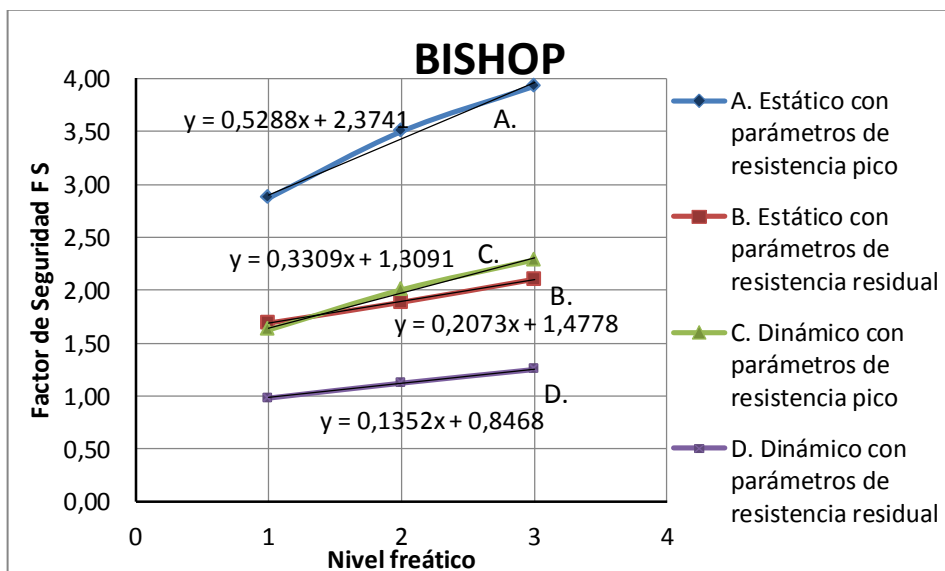
**Tabla 9.** Factores de seguridad por el método de Bishop

METODO BISHOP							
A	1	NF A 0.5	2,86	B	1	NF A 0.5	1,68
	2	NF A 5.5	3,49		2	NF A 5.5	1,88
	3	SIN NF	3,92		3	SIN NF	2,10
C	1	NF A 0.5	1,62	D	1	NF A 0.5	0,97
	2	NF A 5.5	2,01		2	NF A 5.5	1,12
	3	SIN NF	2,28		3	SIN NF	1,25

NF: Nivel freático.

A continuación se presenta la gráfica de los factores de seguridad descritos en la tabla anterior obtenidos en Stabl-wv-2008 por el método de Bishop para analizar su comportamiento y tendencia.

**Figura 20.** Gráfica y pendientes de los factores de seguridad por el método de Bishop variando condiciones físicas y mecánicas del suelo.



En la siguiente tabla se presentan los factores de seguridad por el método de Janbu variando las condiciones físicas y mecánicas del suelo.

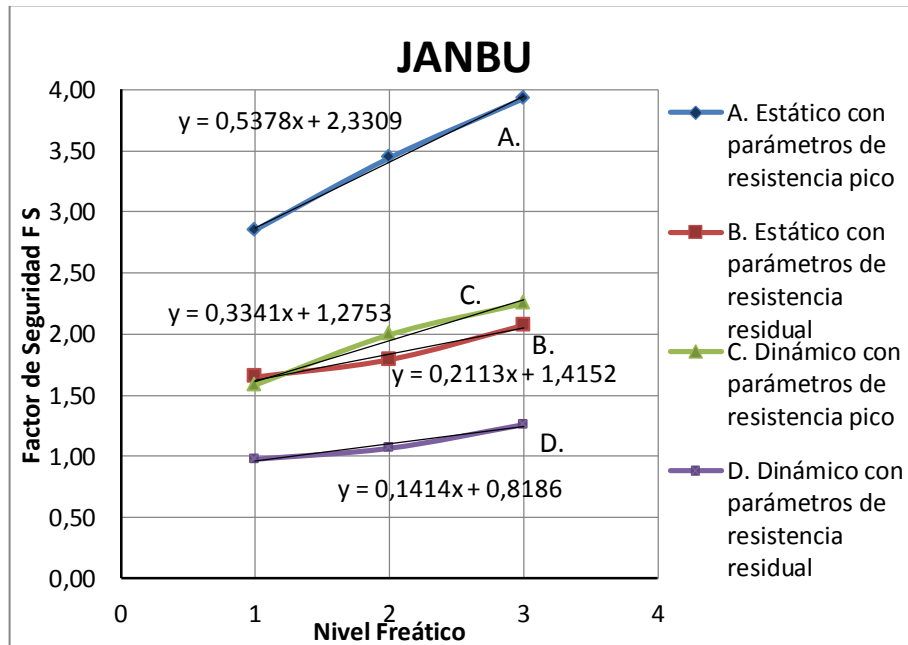
**Tabla 10.** Factores de seguridad por el método de Janbu

METODO JANBU							
A	1	NF A 0.5	2,85	B	1	NF A 0.5	1,65
	2	NF A 5.5	3,44		2	NF A 5.5	1,79
	3	SIN NF	3,93		3	SIN NF	2,07
C	1	NF A 0.5	1,58	D	1	NF A 0.5	0,98
	2	NF A 5.5	1,99		2	NF A 5.5	1,06
	3	SIN NF	2,25		3	SIN NF	1,26

NF: Nivel freático.

A continuación se presenta la gráfica de los factores de seguridad descritos en la tabla anterior obtenidos en Stabl-wv-2008 por el método de Janbu para analizar su comportamiento y tendencia.

**Figura 21.** Gráfica y pendientes de los factores de seguridad por el método de Janbu variando condiciones físicas y mecánicas del suelo.



Microsoft Excel 2010.

En la siguiente tabla se presentan los factores de seguridad por el método de Spencer variando las condiciones físicas y mecánicas del suelo.

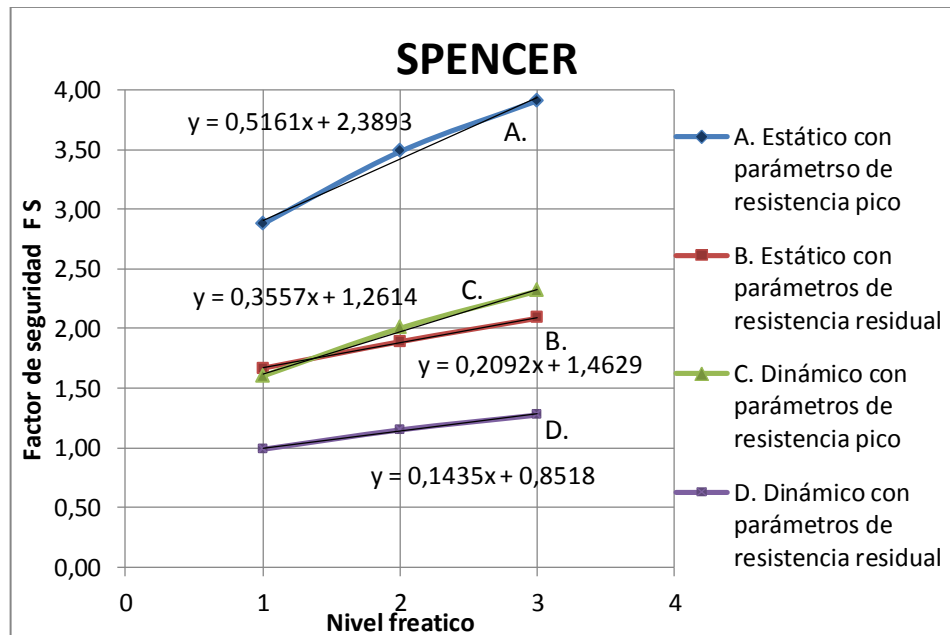
**Tabla 11.** Factores de seguridad por el método de Spencer

METODO SPENCER							
A	1	NF A 0.5	2,87	B	1	NF A 0.5	1,66
	2	NF A 5.5	3,48		2	NF A 5.5	1,89
	3	SIN NF	3,90		3	SIN NF	2,08
C	1	NF A 0.5	1,60	D	1	NF A 0.5	0,98
	2	NF A 5.5	2,01		2	NF A 5.5	1,15
	3	SIN NF	2,31		3	SIN NF	1,28

NF: Nivel freático.

A continuación se presenta la gráfica de los factores de seguridad descritos en la tabla anterior obtenidos en Stabl-wv-2008 por el método de Spencer para analizar su comportamiento y tendencia.

**Figura 22.** Gráfica y pendientes de los factores de seguridad por el método de Spencer variando condiciones físicas y mecánicas del suelo.



Microsoft Excel 2010.

### **5.3.1.10. CONCLUSIONES CASO 1.**

- Para este tipo de suelo se observa una similitud en el comportamiento de estabilidad, de las condiciones estáticas con parámetros de resistencia residual y las condiciones dinámicas con parámetros de resistencia pico. Esto para todas las condiciones de nivel freático. (Ver tendencias B y C).
- En las figuras 20, 21 y 22 se observa una tendencia lineal en el comportamiento de los factores de seguridad con la variación del nivel freático; y la variación de las condiciones dinámicas presentan curvas que se comportan proporcionalmente. (Casi paralelas).
- Analizando los resultados separados por características de variación como nivel freático, condiciones de resistencia, sismicidad y métodos de análisis; y calculando los porcentajes de diferencia entre factores de seguridad, el aspecto que más tiene variación son las condiciones de resistencia del suelo (resistencia pico y resistencia residual), con un porcentaje promedio de diferencia de 44,45 %.

### 5.3.2. CASO 2.

Corresponde a un dique en tierra, el análisis se realizará variando el nivel freático modelando el dique con dos alturas, de tres (3) y cuatro punto cinco (4.5) metros respectivamente.

#### 5.3.2.1. PROPIEDADES DE LOS SUELOS.

Las propiedades físicas y mecánicas del suelo que compone el cuerpo del dique son las descritas en la tabla siguiente, los formatos y cálculos de los ensayos realizados se pueden ver en el anexo número cinco (5).

**Tabla 12.** Resultado de ensayos de laboratorio.

<b>CLASIFICACION</b>	SC. Arena Arcillosa
<b>LIMITE LIQUIDO</b>	48,40%
<b>LIMITE PLASTICO</b>	22,30%
<b>INDICE DE PLASTICIDAD</b>	26,10%
<b>HUMEDAD OPTIMA</b>	14,70%
<b>DENSIDAD OPTIMA</b>	1,915 gr/cm <sup>3</sup>

Las probetas para los ensayos de corte directo se compactaron con tres humedades (Humedad óptima, humedad por encima de la óptima y humedad por debajo de la óptima) diferentes, los resultados obtenidos se presentan a continuación.

**Tabla 13.** Resultados de ensayo de corte directo.

	<b>HUMEDAD DE COMPACTACION (%)</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b><math>\gamma_m</math> (KN/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\gamma_{sat}</math> (KN/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Humedad por encima de la óptima.</b>	20	17	18,65	20,21
<b>Humedad óptima.</b>	14,7	38	19,75	20,16
<b>Humedad por debajo de la óptima.</b>	10	44	17,64	20,22

Las características del suelo de cimentación son las siguientes:

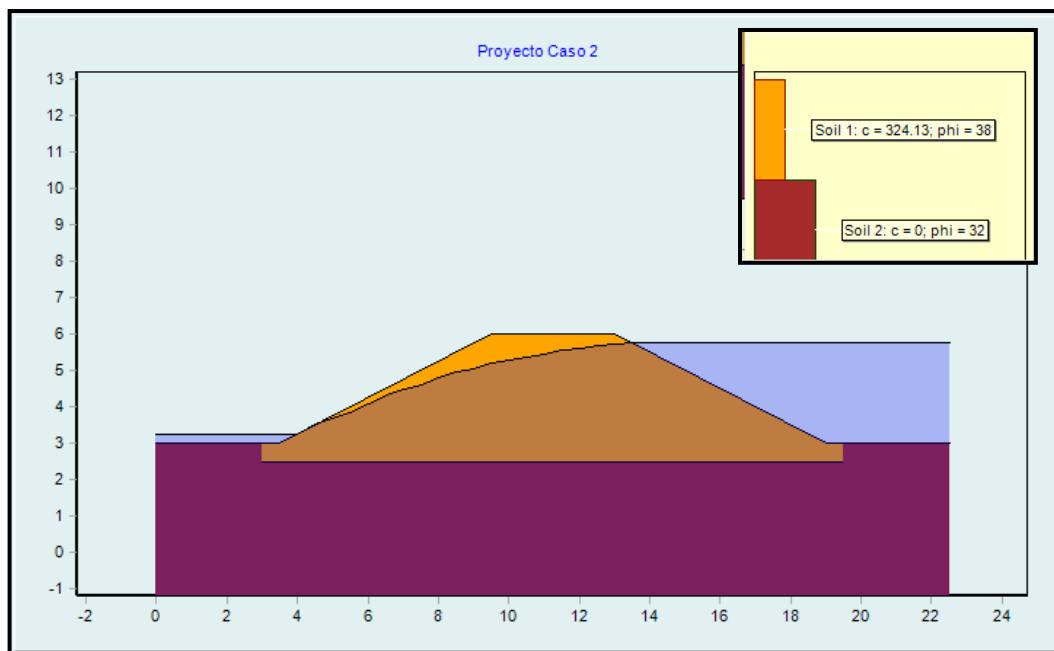
Tipo de suelo: Arenolimoso.

$\gamma_m=17,3 \text{ KN/m}^3$ ;  $\gamma_{sat}=19,0 \text{ KN/m}^3$ ;  $\phi=32$ ; Cohesión=0.

### 5.3.2.2. GEOMETRIA DEL DIQUE.

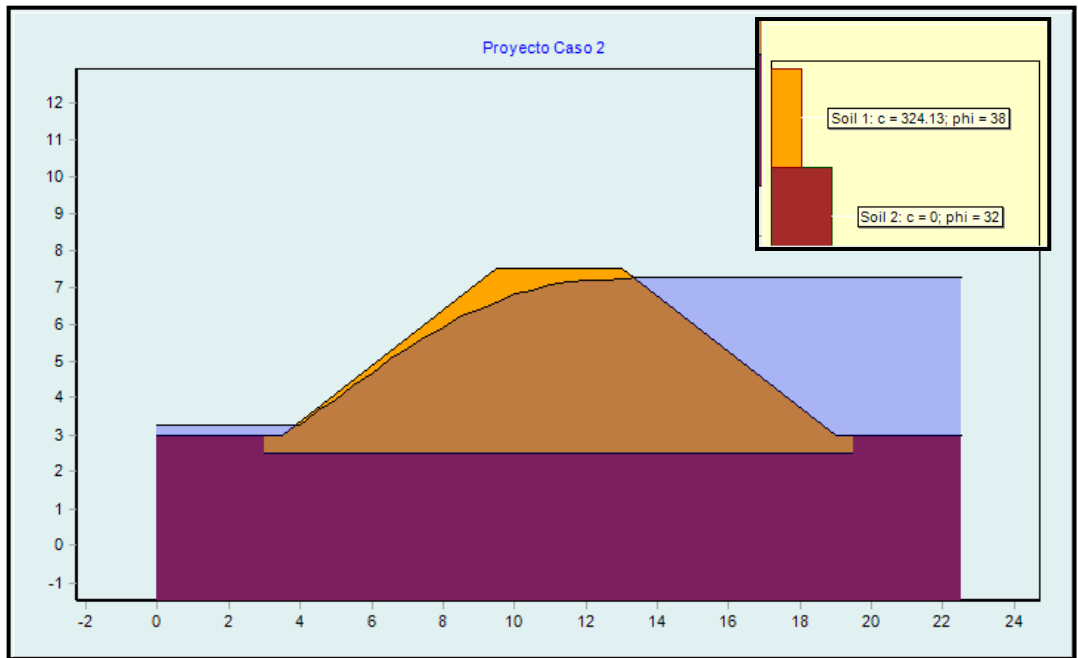
A continuación se presenta una gráfica de la geometría del dique con nivel freático alto. Las alturas modeladas fueron de tres (3.0) y cuatro punto cinco (4.5) metros.

**Figura 23:** Geometría del dique de tres (3.0) metros de altura.



**STABL-WV-2008**

**Figura 24:** Geometría del dique de cuatro punto cinco(4.5) metros de altura.



**STABL-WV-2008**

### 5.3.2.3. SUPERFICIE DE FALLA

Se consideró una superficie de falla circular introduciendo superficie de entrada y salida de la falla.

### 5.3.2.4. MODELAMIENTO

A continuación se presenta una tabla con los modelamientos realizados. El programa utilizado fue STABL-WV-2008 y el método escogido fue Bishop. El modelamiento se realiza para dos alturas del cuerpo del dique descritas anteriormente.

**Tabla 14.** Características de las condiciones del modelamiento para el caso 2.

Modelo	Altura del dique (mt.)	Nivel freático	Propiedades del suelo			
			Humedad de compactación (%)	$\gamma_m$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ . (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$
1	3,0	Alto	20,0	18,65	20,21	17°
2	3,0	Alto	14,7	19,74	20,16	38°
3	3,0	Alto	10,0	17,64	20,22	44°
4	3,0	En la mitad	20,0	18,65	20,21	17°
5	3,0	En la mitad	14,7	19,74	20,16	38°
6	3,0	En la mitad	10,0	17,64	20,22	44°
7	3,0	Sin N.F.	20,0	18,65	20,21	17°
8	3,0	Sin N.F.	14,7	19,74	20,16	38°
9	3,0	Sin N.F.	10,0	17,64	20,22	44°
10	4,5	Alto	20,0	18,65	20,21	17°
11	4,5	Alto	14,7	19,74	20,16	38°
12	4,5	Alto	10,0	17,64	20,22	44°
13	4,5	En la mitad	20,0	18,65	20,21	17°
14	4,5	En la mitad	14,7	19,74	20,16	38°
15	4,5	En la mitad	10,0	17,64	20,22	44°
16	4,5	Sin N.F.	20,0	18,65	20,21	17°
17	4,5	Sin N.F.	14,7	19,74	20,16	38°
18	4,5	Sin N.F.	10,0	17,64	20,22	44°

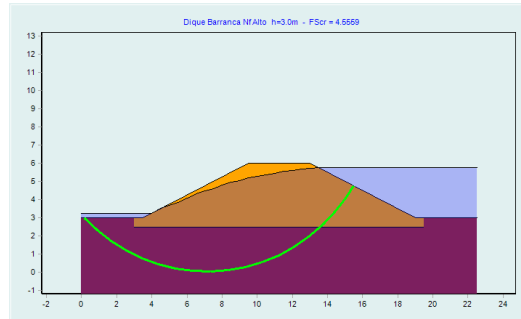
**TABLA DE RESULTADOS CASO 2.**

**Tabla 15.** Factores de seguridad por el método de Bishop para el caso 2.

Modelo	Factor de Seguridad (Met. Bishop)	Modelo	Factor de Seguridad (Met. Bishop)
1	4,56	10	3,07
2	5,47	11	3,12
3	4,57	12	3,27
4	5,13	13	3,99
5	8,17	14	6,27
6	5,39	15	4,09
7	6,37	16	4,96
8	9,42	17	7,33
9	7,03	18	5,42

**MODELO 1:** Factor de seguridad: 4,56.

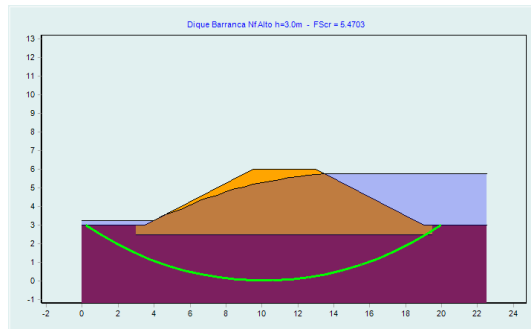
**Figura 25.** Superficie de falla método Bishop, modelo 1.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 2:** Factor de seguridad: 5,47.

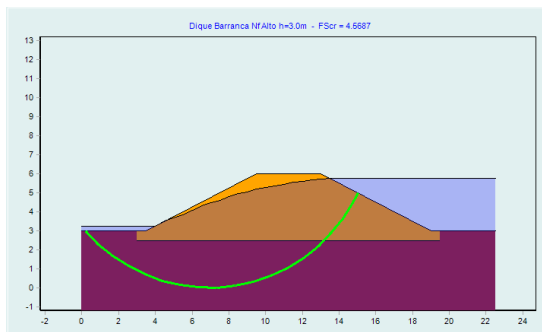
**Figura 26.** Superficie de falla método Bishop, modelo 2.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 3:** Factor de seguridad: 4,57.

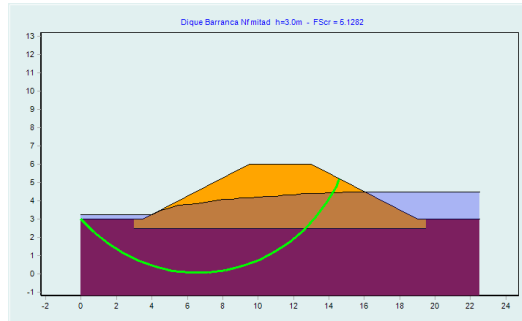
**Figura 27.** Superficie de falla método Bishop, modelo 3.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 4:**Factor de seguridad: 5,13.

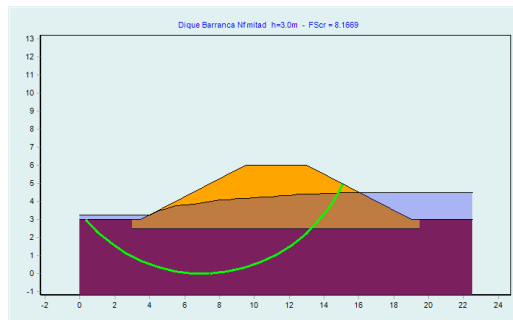
**Figura 28.**Superficie de falla método Bishop, modelo 4.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 5:**Factor de seguridad: 8,17.

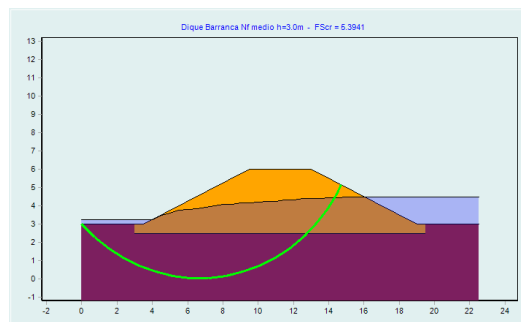
**Figura 29.**Superficie de falla método Bishop, modelo 5.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 6:** Factor de seguridad: 5,39.

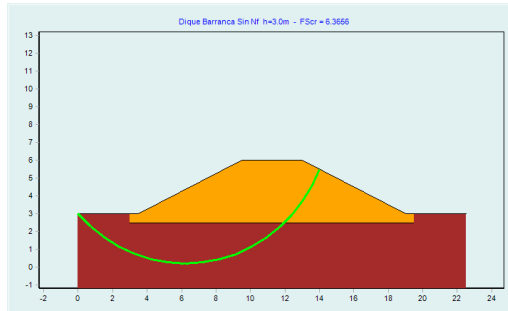
**Figura 30.**Superficie de falla método Bishop, modelo 6.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 7:** Factor de seguridad: 6,37.

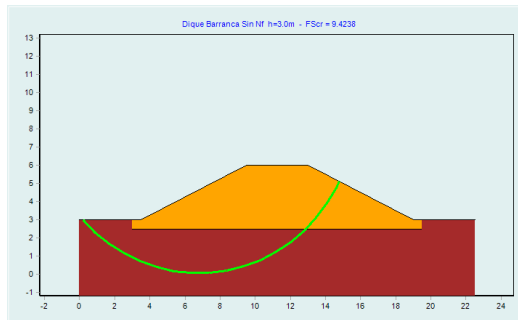
**Figura 31.**Superficie de falla método Bishop, modelo 7.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 8:** Factor de seguridad: 9,42.

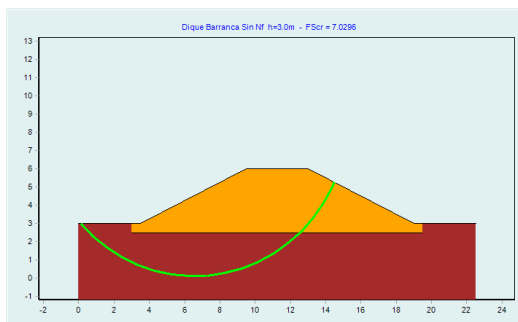
**Figura 32.**Superficie de falla método Bishop, modelo 8.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 9:** Factor de seguridad: 7,03.

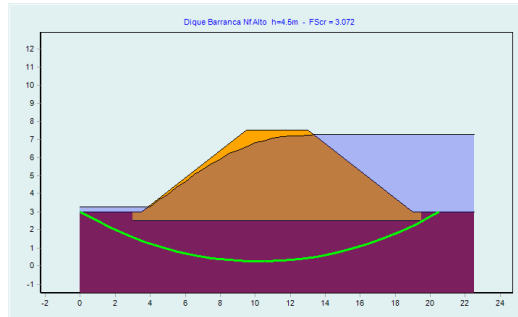
**Figura 33.**Superficie de falla método Bishop, modelo 9.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 10:**Factor de seguridad: 3,07.

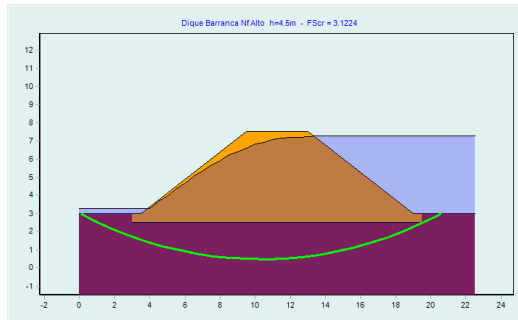
**Figura 34.**Superficie de falla método Bishop, modelo 10.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 11:**Factor de seguridad: 3,12.

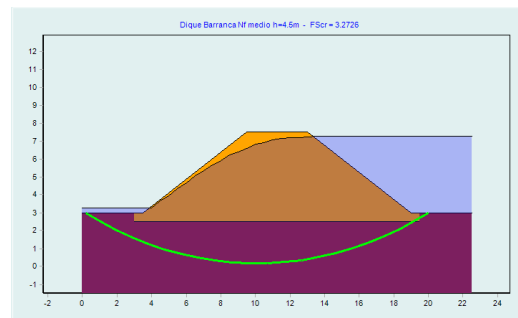
**Figura 35.**Superficie de falla método Bishop, modelo 11.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 12:**Factor de seguridad: 3,27.

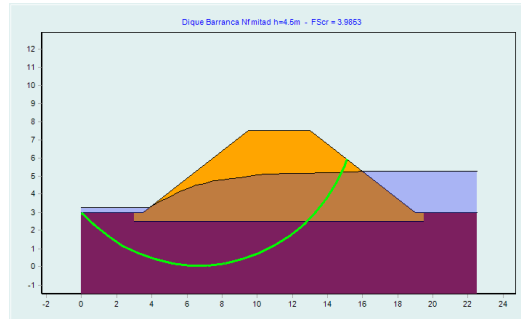
**Figura 36.**Superficie de falla método Bishop, modelo 12.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 13:**Factor de seguridad: 3,99.

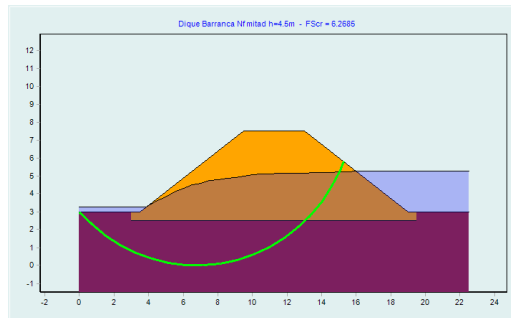
**Figura 37.**Superficie de falla método Bishop, modelo 13.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 14:** Factor de seguridad: 6,27.

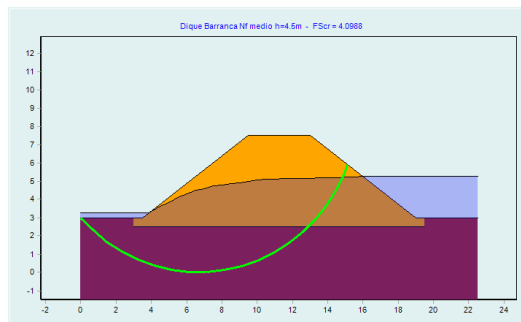
**Figura 38.**Superficie de falla método Bishop, modelo 14.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 15:** Factor de seguridad: 4,09.

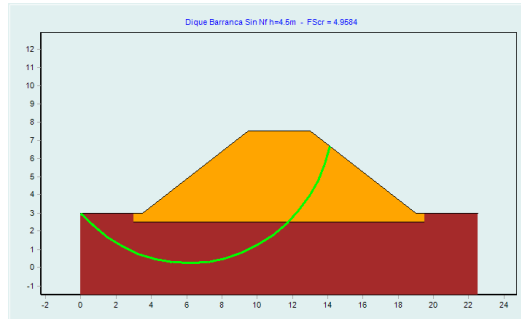
**Figura 39.**Superficie de falla método Bishop, modelo 15.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 16:**Factor de seguridad: 4,96.

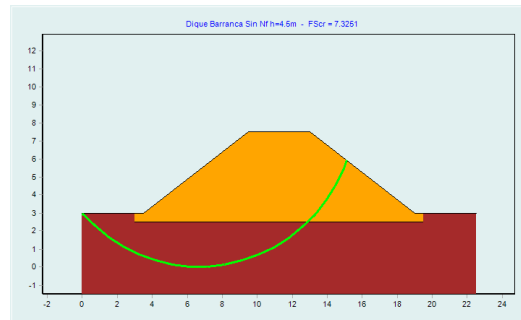
**Figura 40.**Superficie de falla método Bishop, modelo 16.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 17:**Factor de seguridad: 7,33.

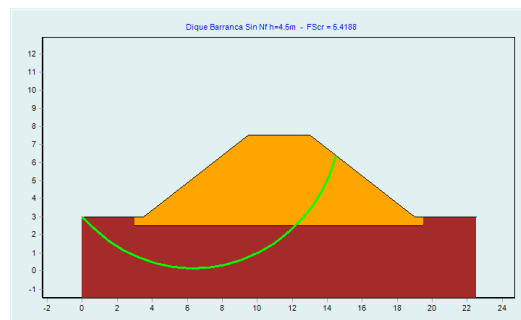
**Figura 41.**Superficie de falla método Bishop, modelo 17.



**STABL-WV-2008**

**MODELO 18:**Factor de seguridad: 5,42.

**Figura 42.**Superficie de falla método Bishop, modelo 18.



**STABL-WV-2008**

### 5.3.2.5. TABLA DE COMPARACION DE RESULTADOS CASO 2.

Tabla 16. Tabla de comparación del modelamiento para el caso 2.

FACTORES DE SEGURIDAD									
ALTURA DIQUE	N.F. ALTO			N.F. EN LA MITAD			SIN N.F.		
	W=20%	W=14,7%	W=10%	W=20%	W=14,7%	W=10%	W=20%	W=14,7%	W=10%
3.0 mtr.	4,56	5,47	4,57	5,13	8,17	5,39	6,37	9,42	7,03
4.5 mtr.	3,07	3,12	3,27	3,99	6,27	4,09	4,96	7,33	5,42

N.F.: Nivel freático

A continuación se presentan los Porcentajes de diferencia promedios entre las características que se variaron al hacer el análisis en la modelación:

- **Altura del dique:** 26,01%
- **Nivel freático:** Porcentaje de diferencia entre NF Alto y en la mitad: 27,18%; Porcentaje de diferencia entre NF en la mitad y sin NF: 18,48%; Porcentaje de diferencia entre NF Alto y sin NF: 40,63%.
- **Humedad de compactación:** Porcentaje de diferencia entre W=20% y W=14,7%: 29,41%; Porcentaje de diferencia entre W=14,7% y W=10%: 25,16%; Porcentaje de diferencia entre W=20% y W=10%: 5,68%.

### 5.3.2.6. ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se realizó para la altura del cuerpo del dique de tres (3) y la de cuatro punto cinco (4,5) metros, por el método de Bishop.

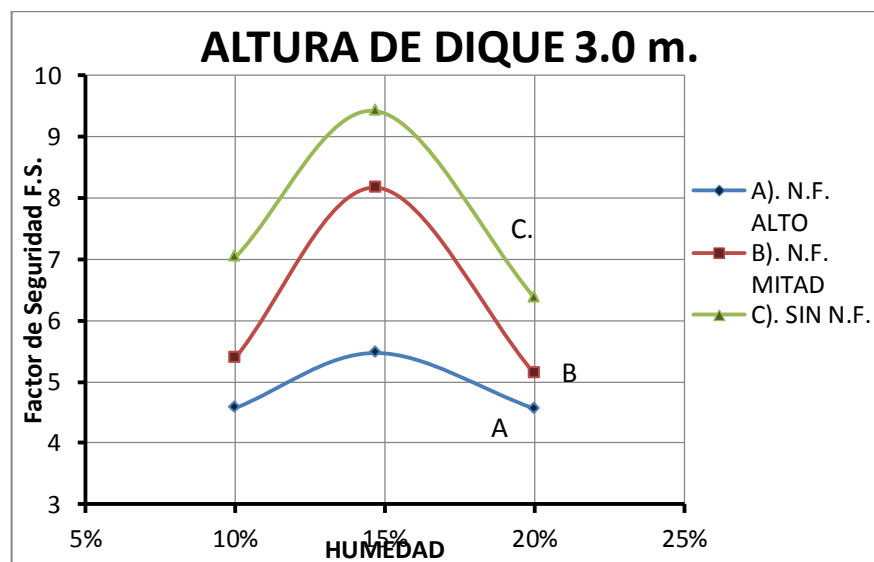
- **DIQUE DE ALTURA 3.0 Mtrs.**

A continuación se presenta una tabla y la gráfica de los factores de seguridad arrojados en el análisis para el dique de tres metros de altura.

**Tabla 17:** Factores de seguridad dique de 3,0 m.

ALTURA DE DIQUE 3.0mts.				
	HUMEDAD	N.F. ALTO	N.F. MITAD	SIN N.F.
1	10%	4,57	5,39	7,03
2	14,70%	5,47	8,17	9,42
3	20%	4,56	5,13	6,37

**Figura 43.** Gráfica de factores de seguridad para dique altura de 3,0 m.



Microsoft Excel 2010.

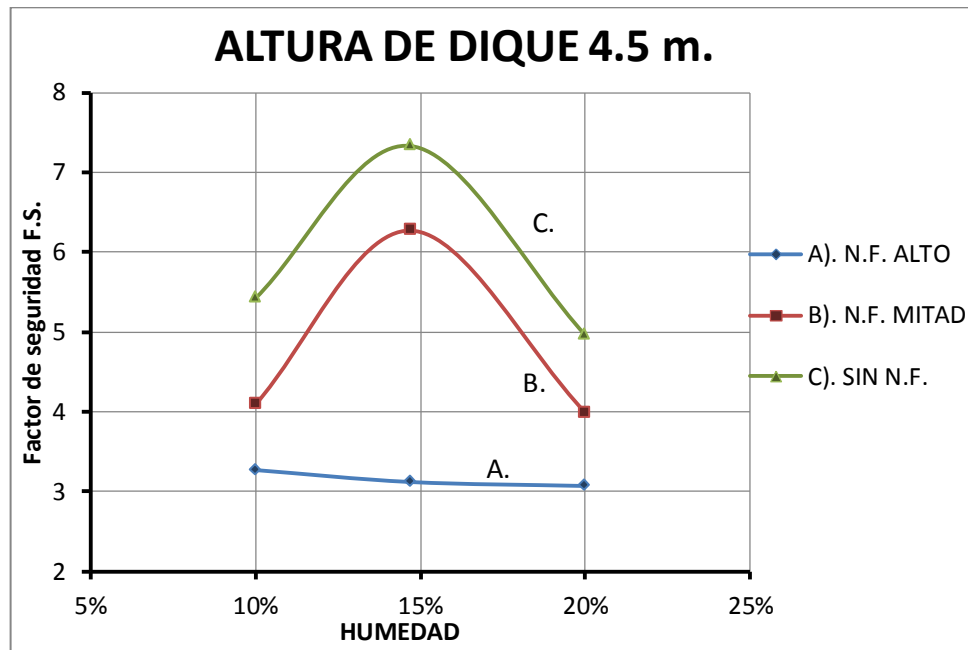
- **DIQUE DE ALTURA 4,5 Mtrs.**

A continuación se presenta una tabla y la gráfica de los factores de seguridad arrojados en el análisis para el dique de cuatro punto cinco metros de altura.

**Tabla 18:** Factores de seguridad dique de 4,5 m.

ALTURA DE DIQUE 4.5 mts.				
	HUMEDAD	N.F. ALTO	N.F. MITAD	SIN N.F.
1	10%	3,27	4,09	5,42
2	14,70%	3,12	6,27	7,33
3	20%	3,07	3,99	4,96

**Figura 44.** Gráfica de factores de seguridad para dique altura de 4,5 m.



Microsoft Excel 2010.

### 5.3.2.7. CONCLUSIONES CASO 2.

- Para la altura del dique de cuatro punto cinco (4,5) metros, en el caso con nivel freático alto se presenta la falla en la cimentación del dique, para todos los casos de humedad de compactación. (Ver gráfica 34, 35 y 36).
- El comportamiento en los factores de seguridad del dique oscila en promedio 27,28% al variar la humedad de compactación con respecto a la óptima. Esto indica la importancia del control de calidad de la compactación en campo.
- Al aumentar la altura del dique en un cincuenta por ciento (50%) se observa un cambio en los factores de seguridad en promedio de un veintiséis por ciento (26%).
- Analizando los resultados separados por características de variación como nivel freático, altura del dique y humedad de compactación; y calculando los porcentajes de diferencia entre factores de seguridad, el aspecto que más tiene variación es el Nivel freático, con un porcentaje promedio de diferencia de 28,76 %.

## **6. CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO.**

- Al analizar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de un talud por separado, la mayor variación en la estabilidad no siempre es generada por el mismo factor, esta depende del caso de estudio.
- Se observa una tendencia lineal en el comportamiento de los factores de seguridad con la variación del nivel freático en ambos casos, se esperaría adelantar más estudios sobre este tema aplicado a diferentes casos, para así dar una afirmación general.
- El grado de saturación es una de las características, si no la más importante, que se debe tener en cuenta en el análisis de estabilidad de taludes y presas de tierra, como se pudo observar en este estudio.

## BIBLIOGRAFIA

- Alva Hurtado Jorge E., “Notas sobre análisis de estabilidad de taludes”, Facultad De Ingeniería Civil, Universidad Nacional De Ingeniería, Febrero, 1994.
- Blanco Torrens Roberto, Chávez Moncayo Miguel Ángel, Quesada Roberto Watson, “ESTABILIZACION DE TALUDES”, Minería y Geología, 2008, Ecuador.
- Candela González José, “Sistemas de Estabilización de Taludes y Laderas”, Casos Prácticos, Terrates Técnicas Especiales SA.
- González De Vallejo Luis I, 2006, “Ingeniería Geológica, Factores Influyentes en la Estabilidad”, Condiciones Hidrogeológicas, Madrid, Pág. 434.
- Grupo de Mecánica Computacional, “Simulación de Falla de Taludes en Ríos de Llanura”, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina, Noviembre 2006.
- Herrera Rodríguez Fernando, “Análisis de estabilidad de taludes”, Geotecnia, 2000, Madrid.
- Macari Emir José, “Evaluación de riesgos de derrumbes causados por lluvias torrenciales”, Rev. int. de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil, Puerto Rico

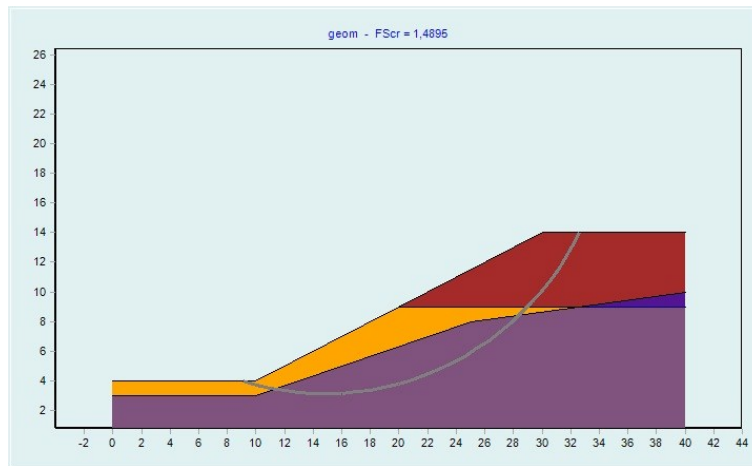
- Suárez Jaime, “Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales”, Hidrogeología Y Presión De Poros Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, Capitulo 7, pag. 233.
- Suarez Jaime, “Procesos que Producen la Falla, (Elementos Activadores o Deteriorantes)”, Presentación Ppt.
- López Pineda German, “Introducción al uso del programaslope/w”, Master Interuniversitario en Ingeniería Geotécnica, Universidad de Córdoba, Pag. 10.
- Arango V. Antonio, “Manual de laboratorio de mecánica de suelos”, Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín, Facultad nacional de minas.
- GeoEstudio,Slope/w (Student). GEO-SLOPE Internacional.Versión 7.10. 2007.
- SLIDE (Student). Rocscience Technical Support.Versioón 5.0. 2008.
- STABL-WV-2008. TerraWiz LLC. Versión 2.0. 2008.
- Norma AASTHO T-88, ASTM D422. Determinación de Granulometría.
- Norma AASTHO T180-01, ASTM D1557. Compactación Proctor Modificado.
- Norma AASTHO T-236, ASTM D3080. Ensayo de Corte Directo.
- Norma AASTHO T-89, ASTM D4318. Determinación limite Líquido.
- Norma AASTHO T-90, ASTM D4318. Limite Plástico e índice de plasticidad.

## ANEXOS.

**ANEXO 1.** Análisis del ejemplo de comparación entre software por cada método que contiene cada uno y su respectiva imagen de la falla.

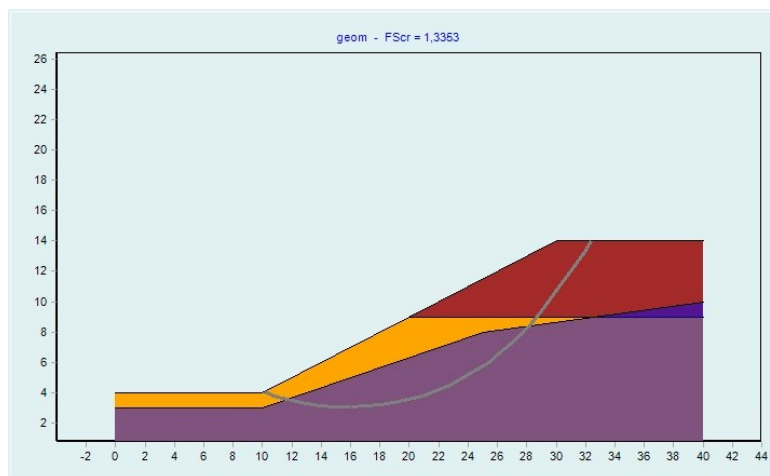
### PROGRAMA: STABL WV 2008

- METODO: BishopFs: 1,4895



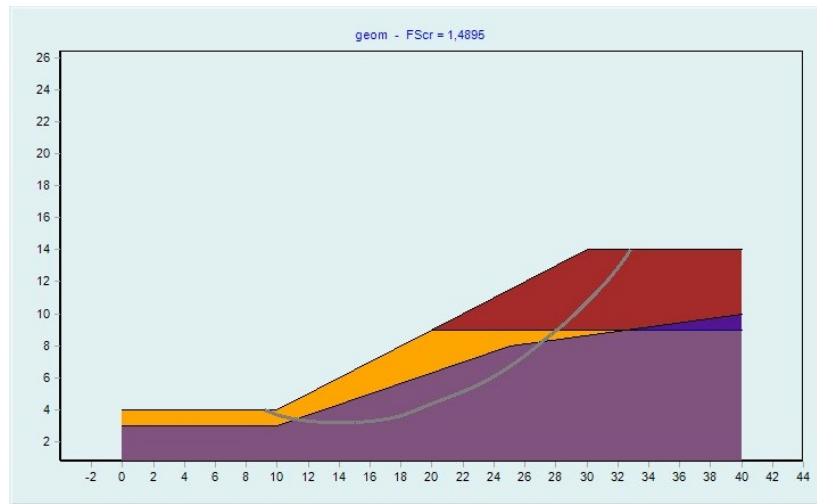
STABL-WV-2008

- METODO: Janbu Fs:1,3353



STABL-WV-2008

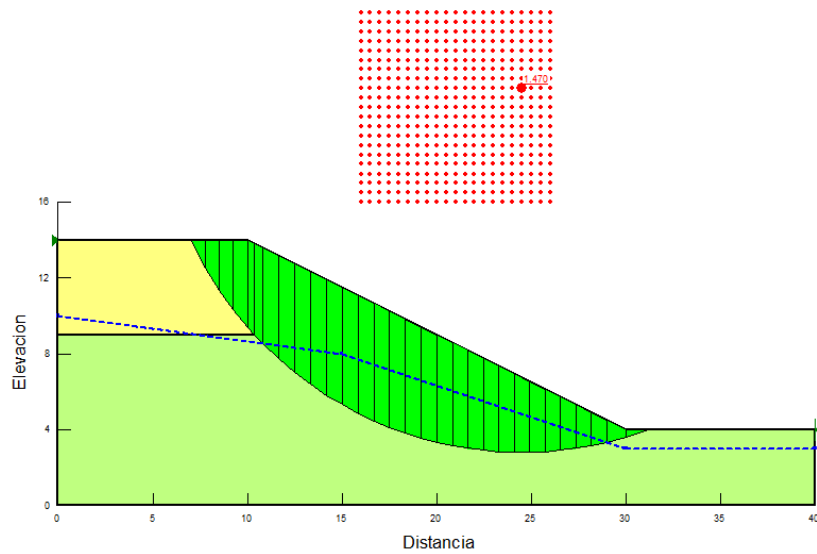
- METODO: Spencer Fs:1,4895



STABL-WV-2008

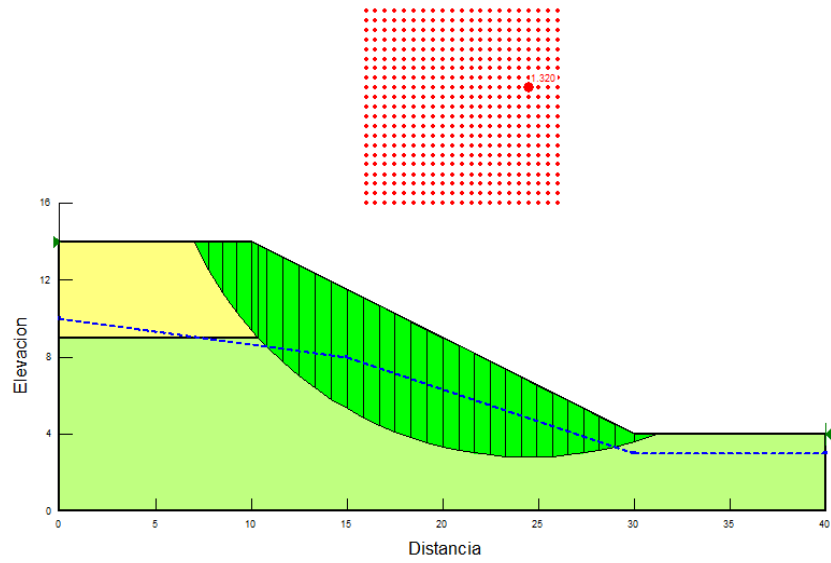
**PROGRAMA: GEOSTUDIO - SLOPE**

- METODO: Bishop Fs:1,470



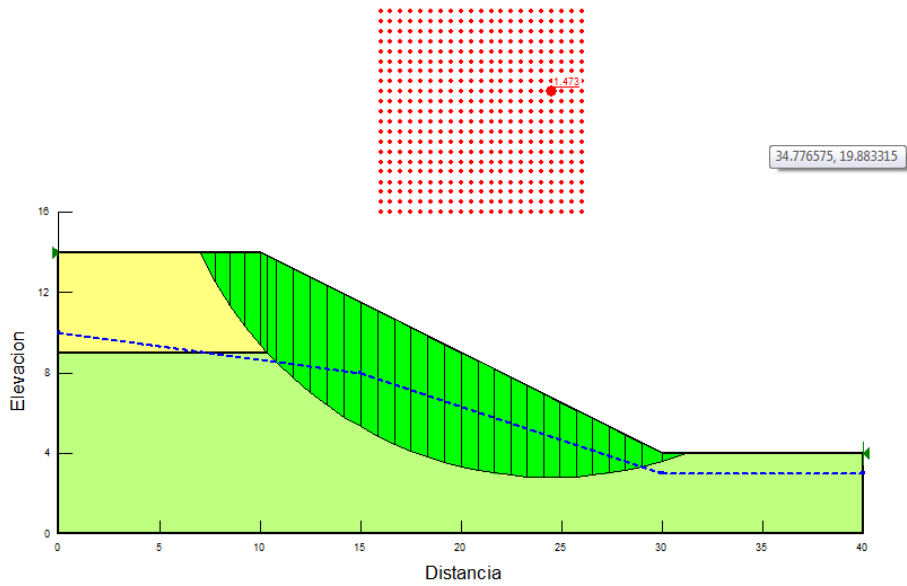
**Geostudio, Slope/w (Student).**

- METODO: Janbu Fs:1,320



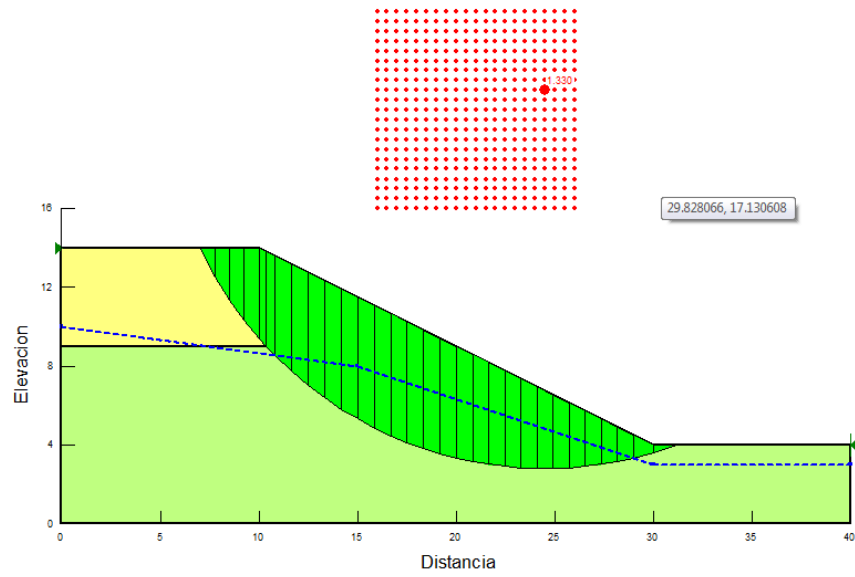
**Geostudio, Slope/w (Student).**

- METODO: Spencer Fs:1,473



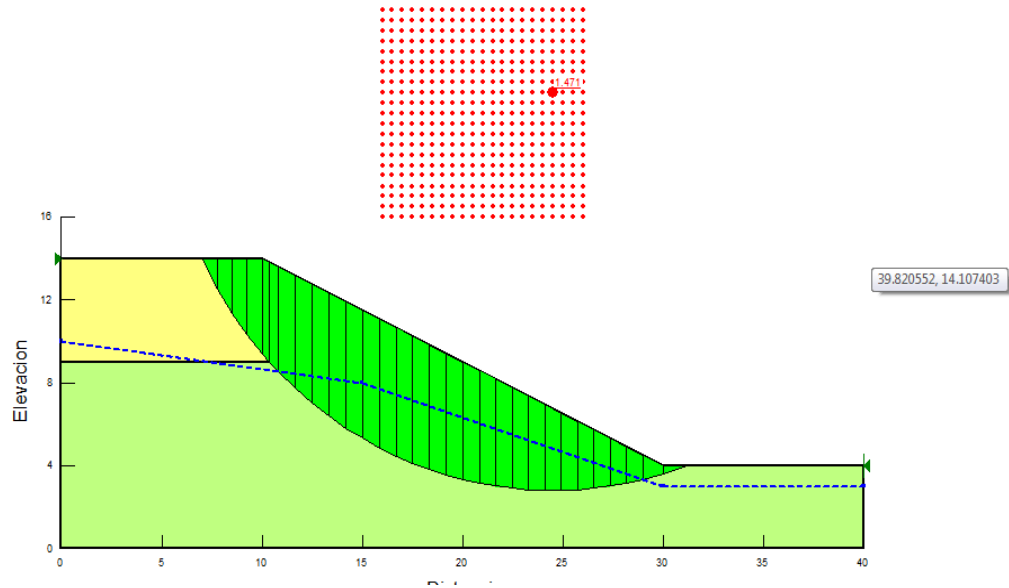
**Geostudio, Slope/w (Student).**

- METODO: Ordinary Fs:1,330



**Geostudio, Slope/w (Student).**

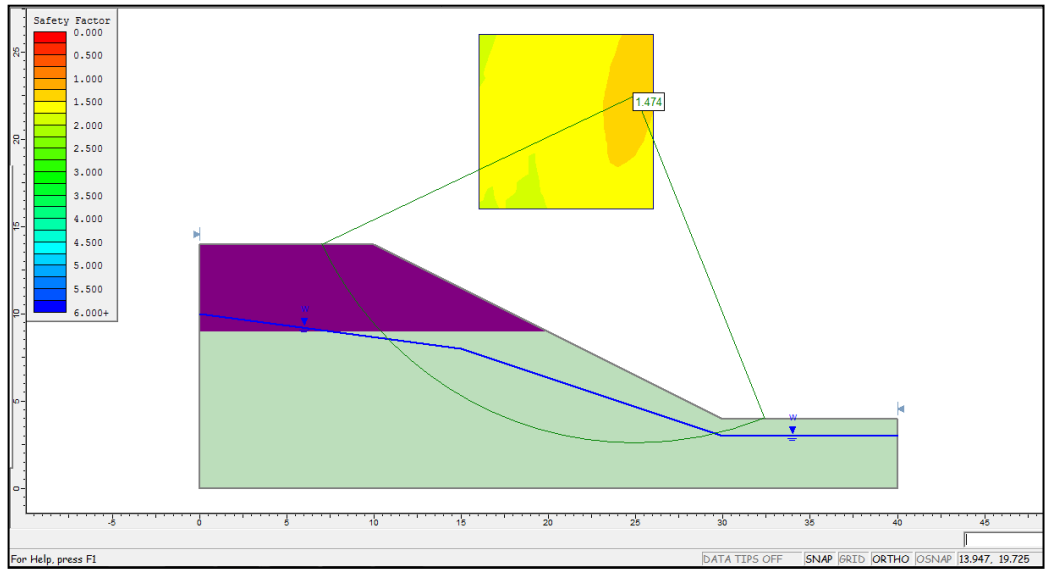
- METODO: GLE y Morgenstern-Price FS: 1,471



**Geostudio, Slope/w (Student).**

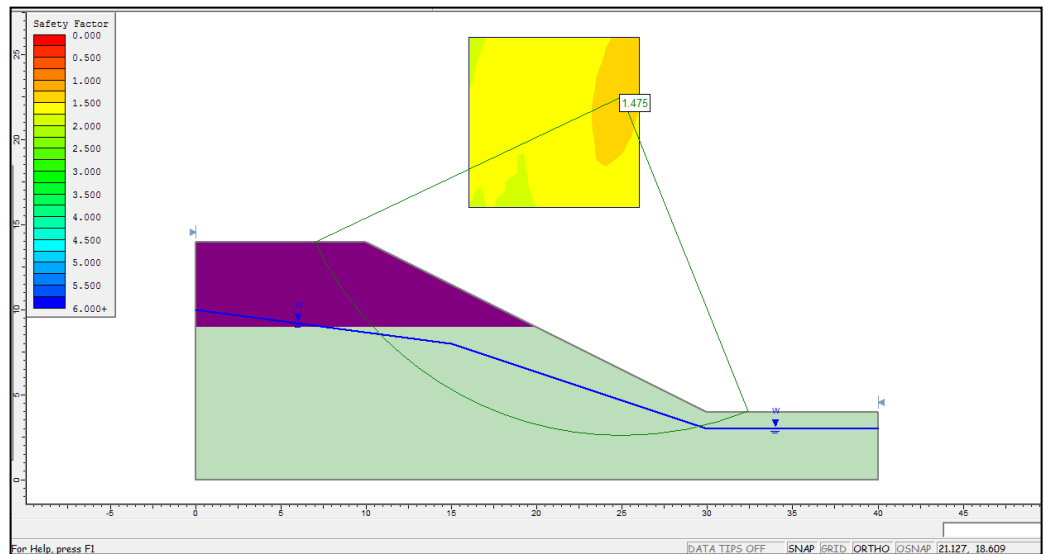
## PROGRAMA: SLIDE

- METODO: Bishop Fs:1,474



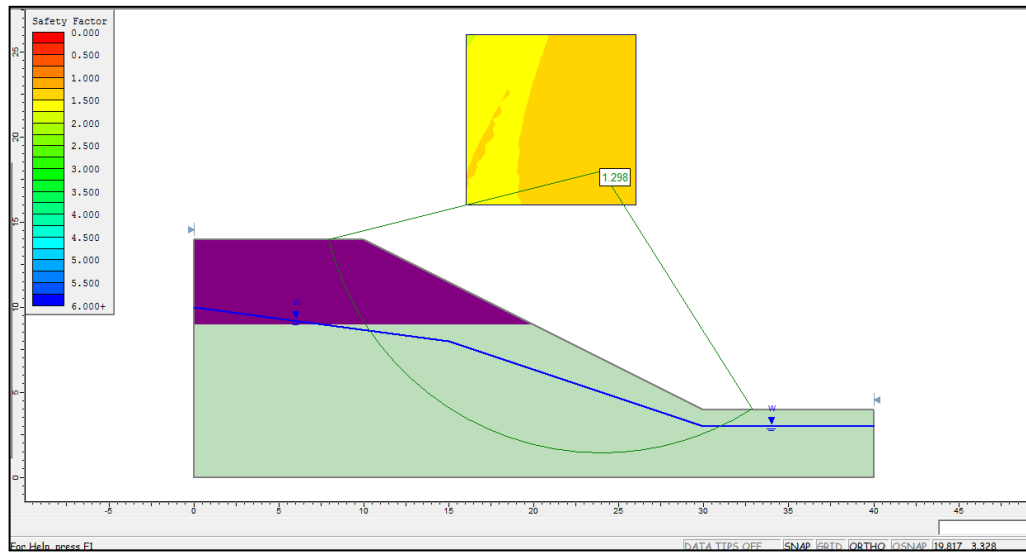
Slide (Student).

- METODO: Spencer Fs:1,475



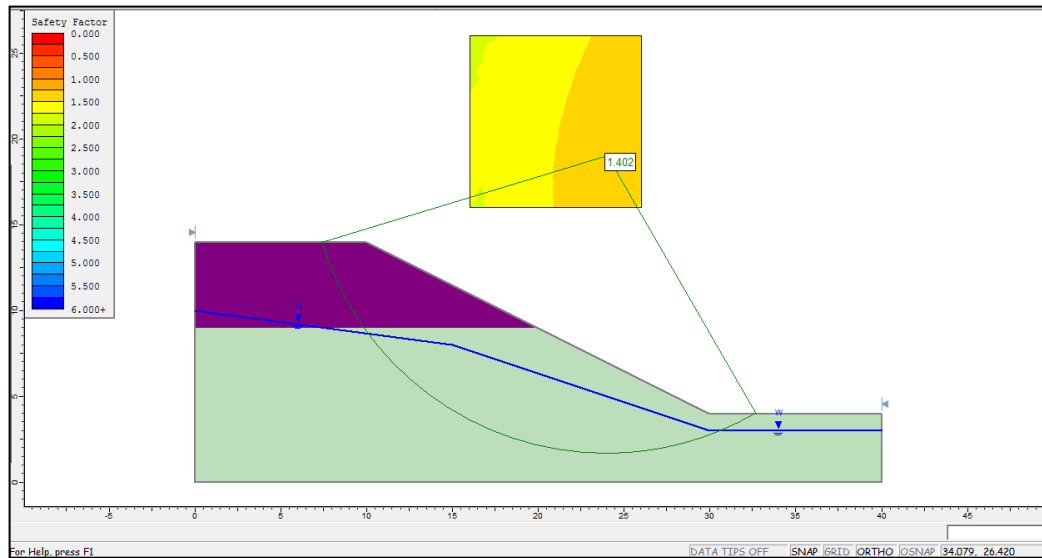
Slide (Student).

- METODO: Janbu Simplificado  $F_s: 1,298$



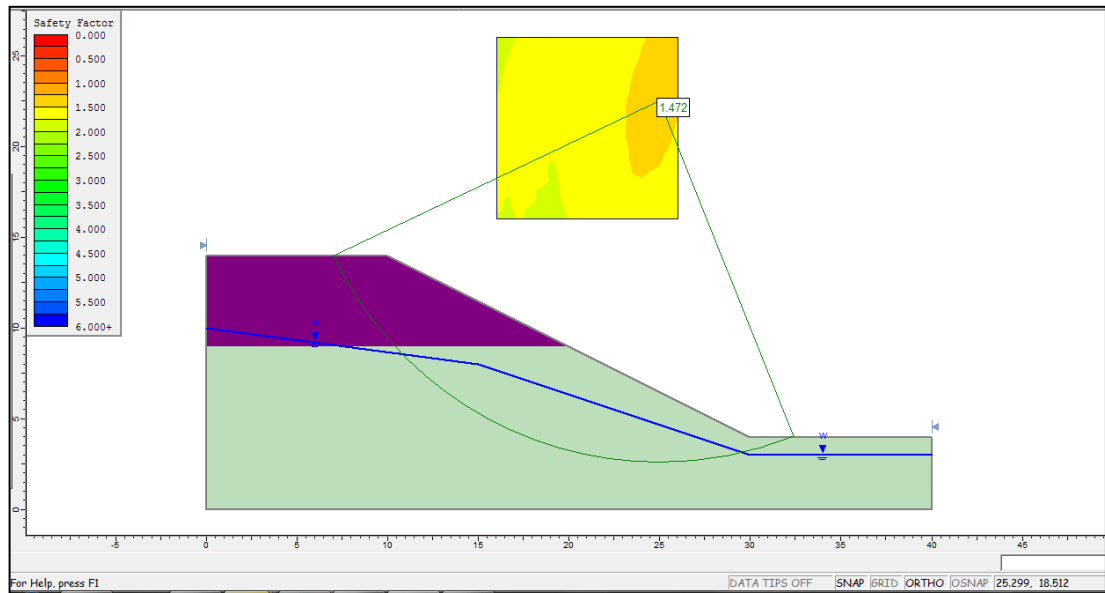
**Slide (Student).**

- METODO: Janbu Corregido  $F_s: 1,402$



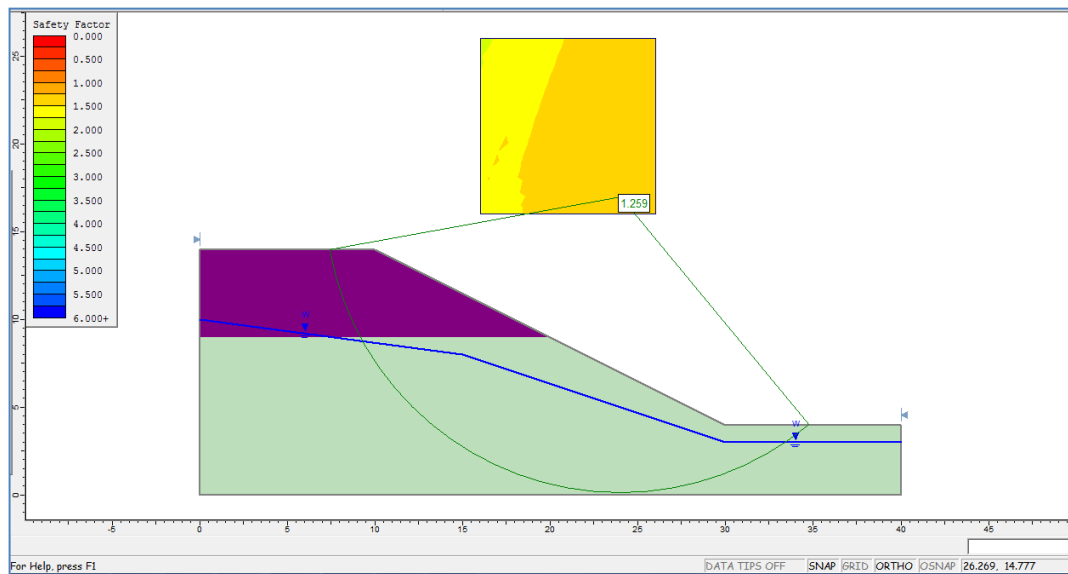
**Slide (Student).**

- METODO: Morgenstern FS: 1,472



**Slide (Student).**

- Ordinary – Fellenius FS: 1,259



**Slide (Student).**

## TABLA DE RESULTADOS

FACTORES DE SEGURIDAD			
PROGRAMA	STABL	GEO	SLIDE
METODO	2008	SLOPE/W	
Bishop	1,4895	1,470	1,474
Janbu	1,3353	1,320	1,298
Spencer	1,4895	1,473	1,475
Ordinary-Fellenius	-----	1,330	1,259
GLE-Morgenstern-Price	-----	1,471	1,472
Janbu corregido	-----	-----	1,402

**ANEXO 2:** Las siguientes tablas representan los perfiles de cada uno de los estratos del talud:

Formación Perdices	
x	y
0	49
20	54.25
40	59.41
60	64.56
80	69
100	71.8
120	74
140	76
160	79
180	80.2
200	82
220	82.5
240	83.5
260	88
280	92.8
300	97.55
320	102.31
340	107.07
360	110.66
380	114.07
400	117.1

Arcilla de Alta Plasticidad	
x	Y
0	64
20	65.6
40	69.2
60	75.1
80	80
100	81.8
120	85.1
140	85.6
160	89.8
180	91.6
200	94.2
220	96.6
240	99
260	103.8
280	106
300	109
320	111.5
340	113.5
360	117.8
380	121.2
400	124.8

Calizas Arrecifales			
x	y	x	y
0	65.5	177	91.8
20	68.1	177	95.1
40	70.8	180	95.1
60	76.3	196	95.1
72	79	200	95.8
72	81.9	212	96.9
80	81.9	212	98.5
85	81.9	220	98.5
85	83.1	230	98.5
100	83.1	240	100.7
105	83.1	260	105.05
105	85.9	278	108.1
120	85.9	280	111.1
121	85.9	300	111.1
121	87.6	303	111.1
140	87.6	320	113.6
141	87.6	340	115
141	90.2	360	119.3
157	90.2	380	122.7
157	91.8	400	126.3
160	91.8		

**ANEXO N° 3.**

Pilotes largos:  $H/D > 10$

H: Longitud = 8.0 mts.      D: Diámetro = 0.3 mts.

$$\frac{H}{D} = \frac{8 \text{ mts}}{0.3 \text{ mts}} = 26,667 > 10 \text{ pilote largo}$$

$$f = \frac{Vu}{9 \cdot Cu \cdot D}$$

$$My = 2.25Cu \cdot dg^2 - 9Cu \cdot df(1.5d + 0.5f)$$

$$f = \frac{38 \text{ KN}}{9 * 113 \text{ KN/m}^2 * 0.3\text{m}} = 0,1245 \text{ m.}$$

$$g = 8 \text{ m} - (1,5 * 0,3\text{m}) - 0,1245 \text{ m} = 7,43 \text{ m.}$$

$$My = 2,25 * 113 \text{ KN/m}^2 * 0,3\text{m} * (7,43\text{m})^2 - 9 * 113 \text{ KN/m}^2 * 0,3\text{m} * 0,1245\text{m} * (1,5 * 0,3\text{m} + 0,5 * 0,1245\text{m}) = 4186,19 \text{ KN.m}$$

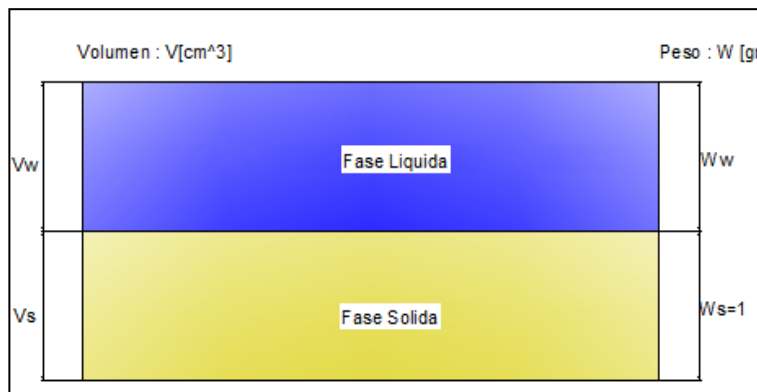
**ANEXO 4:** Obtención del peso específico seco de la arcilla de alta plasticidad partiendo de la humedad y el peso específico saturado.

Peso específico Saturado= $\gamma_{\text{sat}}$ =20.6  $\text{KN/m}^3$

Humedad=W (%) =23.3%

Peso específico de los Sólidos= $\gamma_s$ =2.65  $\text{KN/m}^3$

Relación de peso y volumen para suelo saturado.



Ws: Peso de los Sólidos

Ww: Peso del Agua

Vs: Volumen de los Sólidos

Vw: Volumen del Agua

$\gamma_d$  =Peso Específico Seco

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_w} \quad ; \quad W_{(\%) } = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad ; \quad \gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad ; \quad \gamma_d = \frac{W_s}{V_s + V_w}$$

(“Mecánica de Suelos”, Juárez Badillo, Rico Rodríguez, Tomo I, 2000)

$$2.65 \text{ gr/cm}^3 = \frac{1 \text{ gr}}{V_s} \quad V_s = 0.3773 \text{ cm}^3$$

$$23.3\% = \frac{W_w}{1 \text{ gr}} * 100 \quad W_w = 0.233 \text{ gr}$$

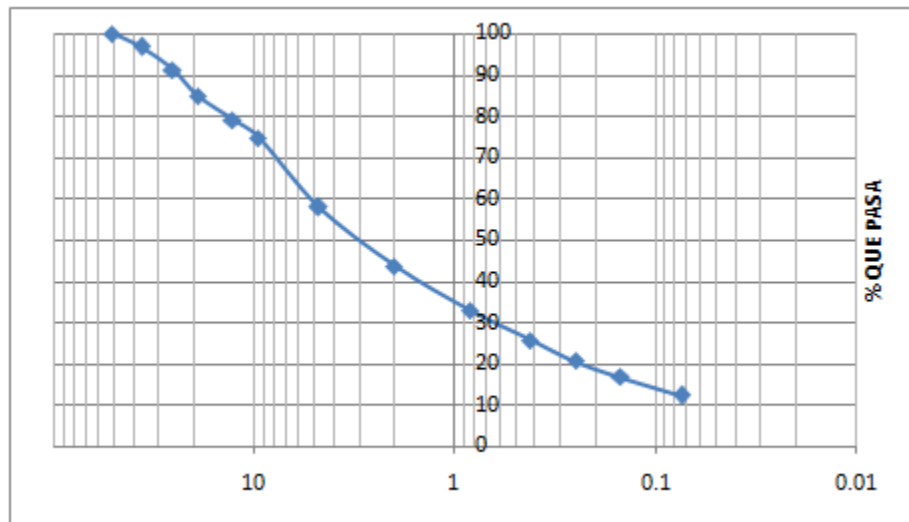
$$2.06 \text{ gr/cm}^3 = \frac{1 \text{ gr} + 0.233 \text{ gr}}{0.3773 \text{ cm}^3 + V_w} \quad V_w = 0.2212 \text{ cm}^3$$

$$\gamma_d = \frac{1 \text{ gr}}{0.3773 \text{ cm}^3 + 0.2212 \text{ cm}^3} \quad \gamma_d = \mathbf{1.671 \text{ gr/cm}^3}$$

PESO INICIAL DE LA MUESTRA (gr) : 5000  
 PESO DESPUES DE LAVADO (gr): 4830  
 PORCENTAJE DE ERROR (%): 0.03

**ANEXO 5. LABORATORIOS.**  
**GRANULOMETRIA**

MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	%RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA	MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA
****	mm	gr	%	%	****	mm	gr	%	%
2"	50.8	0.00	0.00	100.00	10	2	689.15	14.27	43.66
1 1/2"	36.1	157.75	3.27	96.73	20	0.84	514.75	10.66	33.00
1"	25.4	264.85	5.48	91.25	40	0.42	357.45	7.40	25.60
3/4"	19.05	303.45	6.28	84.96	60	0.25	236.05	4.89	20.71
1/2"	12.7	283.15	5.86	79.10	100	0.149	188.05	3.89	16.82
3/8"	9.52	215.45	4.46	74.64	200	0.074	220.85	4.57	12.24
No 4	4.75	806.65	16.71	57.93	PASA 200	*****	591.15	12.24	
SUMA	*****	2031.30	42.07		SUMA	*****	2797.45	57.93	
					TOTAL		4828.75		



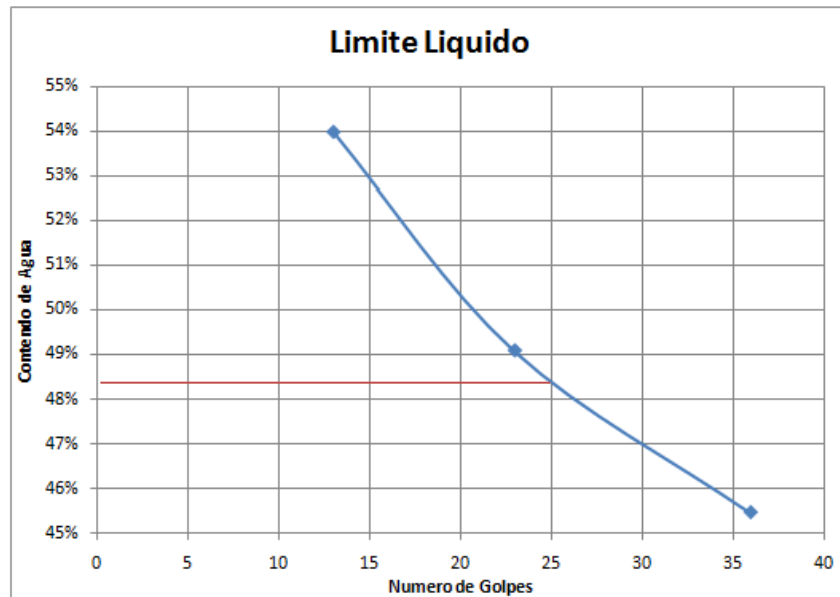
**CLASIFICACION: SC. Arena Arcillosa.**

## LIMITE LIQUIDO

CAPSULA	NUMERO DE	PESO	PESO CAPSULA	PESO CAPSULA	PESO DEL	PESO SUELO	CONTENIDO DE
No	GOLPES	CAPSULA (Kg)	+ SUELO HUMEDO (Kg)	+ SUELO SECO (Kg)	AGUA (Kg)	SECO (Kg)	AGUA (%)
1	36	0.0082	0.0146	0.0126	0.0020	0.0044	45.45%
2	23	0.0075	0.0157	0.0130	0.0027	0.0055	49.09%
3	13	0.0081	0.0158	0.0131	0.0027	0.0050	54.00%

## LIMITE PLASTICO

CAPSULA	PESO	PESO CAPSULA	PESO CAPSULA	PESO DEL	PESO SUELO	CONTENIDO DE
No	CAPSULA (Kg)	+ SUELO HUMEDO (Kg)	+ SUELO SECO (Kg)	AGUA (Kg)	SECO (Kg)	AGUA (%)
1	0.0070	0.0075	0.0074	0.0001	0.0004	25.00%
2	0.0078	0.0090	0.0088	0.0002	0.0010	20.00%
3	0.0068	0.0073	0.0072	0.0001	0.0005	22.22%



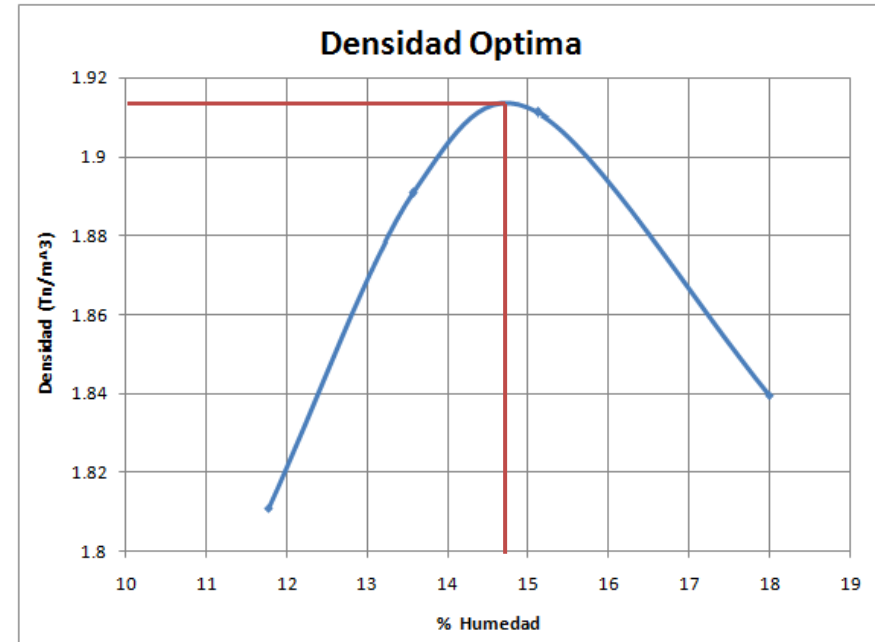
**Limite líquido: 48,4%**

**Limite plástico: 22,3%**

**Índice de plasticidad: 26,1%**

## ENSAYO COMPRESION SIMPLE

TIPO DE ENSAYO	MODIFICADO
NÚMERO DE CAPAS	5
NÚMERO DE GOLPES POR CARA	25
MOLDE No	1
DIÁMETRO MOLDE (cm)	10.17
ALTURA MOLDE (cm)	11.62
VOLUMEN MOLDE (cm <sup>3</sup> )	942.67



PESO TARA (gr)	6.70	6.70	6.80	6.80
PESO DE TARA + SUELO HÚMEDO (gr)	14.30	20.10	16.70	23.20
PESO DE TARA + SUELO SECO (gr)	13.50	18.50	15.40	20.70
PESO AGUA	0.80	1.60	1.30	2.50
PESO SOLIDO	6.80	11.80	8.60	13.90
HUMEDAD %	11.76	13.56	15.12	17.99

**W=14,7%**

**Y=1,915Tn/cm³**

PESO MOLDE (gr)	4256.0	4256.0	4256.0	4256.0
PESO DE MOLDE + SUELO HÚMEDO (gr)	6164.0	6280.0	6330.0	6302.0
PESO DEL SUELO HÚMEDO (gr)	1908.0	2024.0	2074.0	2046.0
DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm <sup>3</sup> )	2.02	2.15	2.20	2.17
DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	1.81	1.89	1.91	1.84

## CORTE DIRECTO HUMEDAD 14,7%

- CARGA 8 Kgr.

DIAMETRO SUPERIOR (m)	0.0570
DIAMETRO CENTRAL (m)	0.0575
DIAMETRO INFERIOR (m)	0.0570
PROMEDIO DIAMETRO (m)	0.0572

AREA (m <sup>2</sup> )	0.0026
------------------------	--------

ALTURA MEDIA (m)	0.0195
------------------	--------

W ANILLO (Kg)	0.1168
W MUESTRA+W ANILLO (Kg)	0.2157
PESO MUESTRA (Kg)	0.0989
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	0.000050
HUMEDAD (%)	14.70
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m <sup>3</sup> )	1975.99

DENSIDAD SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	1722.75
------------------------------------	---------

- CARGA 16Kgr.

DIAMETRO SUPERIOR (m)	0.0570
DIAMETRO CENTRAL (m)	0.0575
DIAMETRO INFERIOR (m)	0.0570
PROMEDIO DIAMETRO (m)	0.0572

AREA (m <sup>2</sup> )	0.0026
------------------------	--------

ALTURA MEDIA (m)	0.02
------------------	------

W ANILLO (Kg)	0.11760
W MUESTRA+W ANILLO (Kg)	0.21911
PESO MUESTRA (Kg)	0.10151
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	0.00005
HUMEDAD (%)	14.70
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m <sup>3</sup> )	1977.43

DENSIDAD SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	1724.01
------------------------------------	---------

- CARGA 32 Kgr.

DIAMETRO SUPERIOR (m)	0.0570
DIAMETRO CENTRAL (m)	0.0575
DIAMETRO INFERIOR (m)	0.0570
PROMEDIO DIAMETRO (m)	0.0572

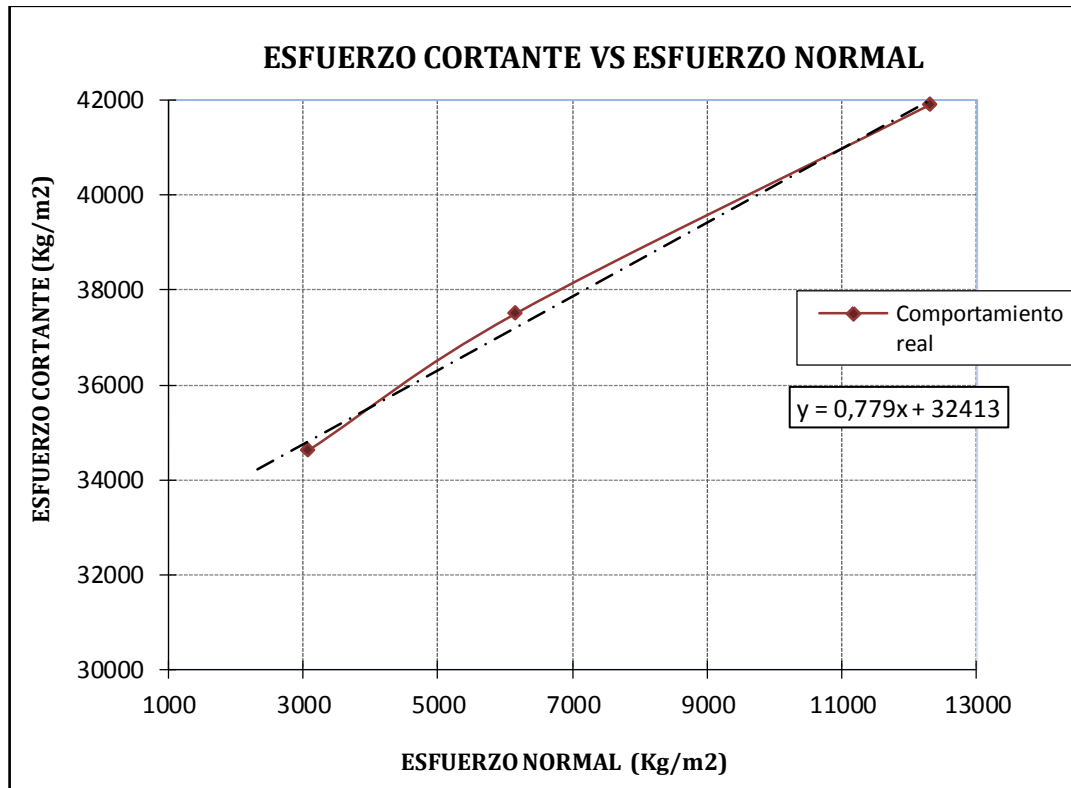
AREA (m <sup>2</sup> )	0.0026
------------------------	--------

ALTURA MEDIA (m)	0.02
------------------	------

W ANILLO (Kg)	0.1094
W MUESTRA+W ANILLO (Kg)	0.2108
PESO MUESTRA (Kg)	0.1014
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	0.0001
HUMEDAD (%)	14.70
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m <sup>3</sup> )	1975.29

DENSIDAD SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	1722.14
------------------------------------	---------

CARGA VERTICAL (Kg)	AREA (m <sup>2</sup> )	CARGA MÁXIMA (HORIZONTAL) (Kg)	ESFUERZO NORMAL (Kg/m <sup>2</sup> )	ESFUERZO CORTANTE (Kg/m <sup>2</sup> )
8	0.0026	90.00	3076.92	34615.38
16	0.0026	97.50	6153.85	37500.00
32	0.0026	108.95	12307.69	41903.85



<b>HUMEDAD</b>	<u>14.7</u>	<b>%</b>
<b>DENSIDAD HUMEDA</b>	<u>1976</u>	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>
<b>PENDIENTE</b>	<u>0.779</u>	
<b>ANGULO FRICCIÓN</b>	<u>38</u>	<b>grados</b>
<b>COHESIÓN</b>	<u>32413</u>	<b>Kg/m<sup>2</sup></b>

## CORTE DIRECTO HUMEDAD 20,0%

- CARGA 8 Kgr.

DIAMETRO SUPERIOR (m)	0.0570
DIAMETRO CENTRAL (m)	0.0575
DIAMETRO INFERIOR (m)	0.0570
PROMEDIO DIAMETRO (m)	0.0572

AREA (m <sup>2</sup> )	0.0026
------------------------	--------

ALTURA MEDIA (m)	0.02
------------------	------

W ANILLO (Kg)	0.1168
W MUESTRA+W ANILLO (Kg)	0.2124
PESO MUESTRA (Kg)	0.0956
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	0.000051
HUMEDAD (%)	20.00
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m <sup>3</sup> )	1862.31

DENSIDAD SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	1551.92
------------------------------------	---------

- CARGA 16Kgr.

DIAMETRO SUPERIOR (m)	0.0570
DIAMETRO CENTRAL (m)	0.0575
DIAMETRO INFERIOR (m)	0.0570
PROMEDIO DIAMETRO (m)	0.0572

AREA (m <sup>2</sup> )	0.0026
------------------------	--------

ALTURA MEDIA (m)	0.02
------------------	------

W ANILLO (Kg)	0.11760
W MUESTRA+W ANILLO (Kg)	0.21330
PESO MUESTRA (Kg)	0.09570
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	0.00005
HUMEDAD (%)	20.00
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m <sup>3</sup> )	1864.25

DENSIDAD SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	1553.55
------------------------------------	---------

- CARGA 32Kgr.

DIAMETRO SUPERIOR (m)	0.0570
DIAMETRO CENTRAL (m)	0.0575
DIAMETRO INFERIOR (m)	0.0570
PROMEDIO DIAMETRO (m)	0.0572

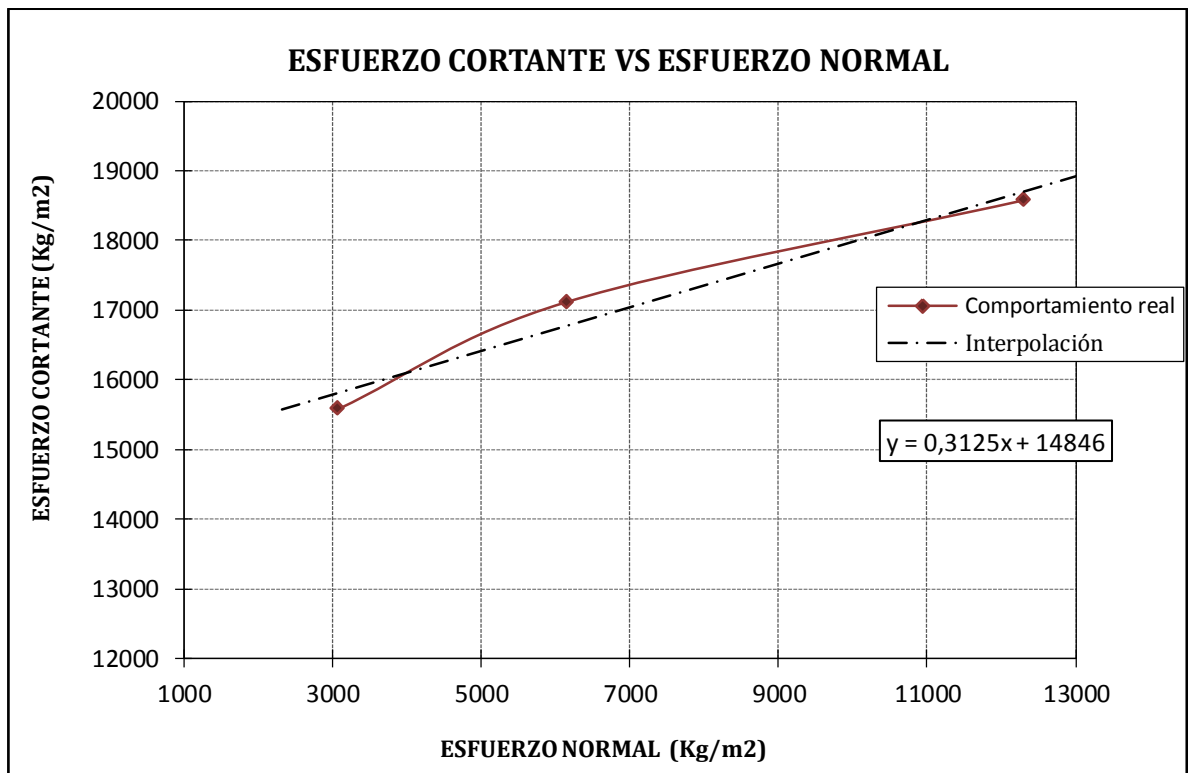
AREA (m <sup>2</sup> )	0.0026
------------------------	--------

ALTURA MEDIA (m)	0.02
------------------	------

W ANILLO (Kg)	0.1094
W MUESTRA+W ANILLO (Kg)	0.2054
PESO MUESTRA (Kg)	0.0960
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	0.0001
HUMEDAD (%)	20.00
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m <sup>3</sup> )	1869.71

DENSIDAD SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	1558.09
------------------------------------	---------

CARGA VERTICAL (Kg)	AREA (m <sup>2</sup> )	CARGA MÁXIMA (HORIZONTAL) (Kg)	ESFUERZO NORMAL (Kg/m <sup>2</sup> )	ESFUERZO CORTANTE (Kg/m <sup>2</sup> )
8	0.0026	40.50	3076.92	15576.92
16	0.0026	44.50	6153.85	17115.38
32	0.0026	48.30	12307.69	18576.92



<b>HUMEDAD</b>	<u>20.0</u>	%
<b>DENSIDAD HUMEDA</b>	<u>1865</u>	Kg/m <sup>3</sup>
<b>PENDIENTE</b>	<u>0.313</u>	
<b>ANGULO FRICCIÓN</b>	<u>17</u>	grados
<b>COHESIÓN</b>	<u>14846</u>	Kg/m <sup>2</sup>

## CORTE DIRECTO HUMEDAD 10,0%

- CARGA 8 Kgr.

DIAMETRO SUPERIOR (m)	0.0570
DIAMETRO CENTRAL (m)	0.0575
DIAMETRO INFERIOR (m)	0.0570
PROMEDIO DIAMETRO (m)	0.0572

AREA (m <sup>2</sup> )	0.0026
------------------------	--------

ALTURA MEDIA (m)	0.0195
------------------	--------

W ANILLO (Kg)	0.1168
W MUESTRA+W ANILLO (Kg)	0.2054
PESO MUESTRA (Kg)	0.0886
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	0.000050
HUMEDAD (%)	10.00
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m <sup>3</sup> )	1770.20

DENSIDAD SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	1609.27
------------------------------------	---------

- CARGA 16 Kgr.

DIAMETRO SUPERIOR (m)	0.0570
DIAMETRO CENTRAL (m)	0.0575
DIAMETRO INFERIOR (m)	0.0570
PROMEDIO DIAMETRO (m)	0.0572

AREA (m <sup>2</sup> )	0.0026
------------------------	--------

ALTURA MEDIA (m)	0.02
------------------	------

W ANILLO (Kg)	0.11760
W MUESTRA+W ANILLO (Kg)	0.20840
PESO MUESTRA (Kg)	0.09080
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	0.00005
HUMEDAD (%)	10.00
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m <sup>3</sup> )	1768.80

DENSIDAD SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	1608.00
------------------------------------	---------

- CARGA 32 Kgr.

DIAMETRO SUPERIOR (m)	0.0570
DIAMETRO CENTRAL (m)	0.0575
DIAMETRO INFERIOR (m)	0.0570
PROMEDIO DIAMETRO (m)	0.0572

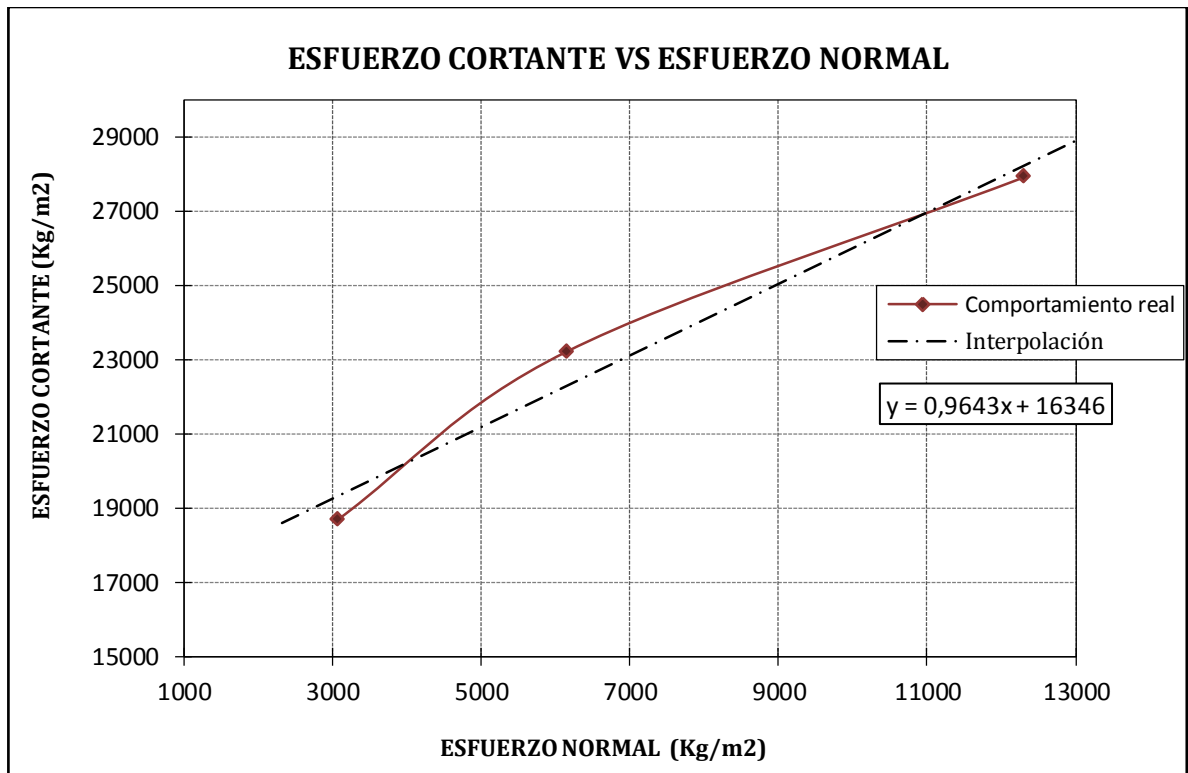
AREA (m <sup>2</sup> )	0.0026
------------------------	--------

ALTURA MEDIA (m)	0.02
------------------	------

W ANILLO (Kg)	0.1094
W MUESTRA+W ANILLO (Kg)	0.1999
PESO MUESTRA (Kg)	0.0905
VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	0.0001
HUMEDAD (%)	10.00
DENSIDAD HUMEDA (Kg/m <sup>3</sup> )	1762.96

DENSIDAD SECA (Kg/m <sup>3</sup> )	1602.69
------------------------------------	---------

CARGA VERTICAL (Kg)	AREA (m <sup>2</sup> )	CARGA MÁXIMA (HORIZONTAL) (Kg)	ESFUERZO NORMAL (Kg/m <sup>2</sup> )	ESFUERZO CORTANTE (Kg/m <sup>2</sup> )
8	0.0026	48.60	3076.92	18692.31
16	0.0026	60.35	6153.85	23211.54
32	0.0026	72.55	12307.69	27903.85



<b>HUMEDAD</b>	<u>10.0</u>	<b>%</b>
<b>DENSIDAD HUMEDA</b>	<u>1767</u>	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>
<b>PENDIENTE</b>	<u>0.964</u>	
<b>ANGULO FRICCIÓN</b>	<u>44</u>	<b>grados</b>
<b>COHESIÓN</b>	<u>16346</u>	<b>Kg/m<sup>2</sup></b>