

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Determinación del comportamiento de las arenas volcánicas del valle central de Guatemala por medio de modelación por elementos finitos**

Trabajo de graduación presentado por Héctor Daniel Payes Aguilar para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2022



**Determinación del comportamiento de las arenas volcánicas del valle central de Guatemala por medio de modelación por elementos finitos**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



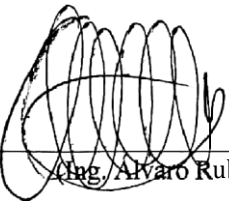
**Determinación del comportamiento de las arenas volcánicas del valle central de Guatemala por medio de modelación por elementos finitos**

Trabajo de graduación presentado por Héctor Daniel Payes Aguilar para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2022


Vo.Bo.:



---


(Ing. Alvaro Rubio)

Tribunal Examinador:



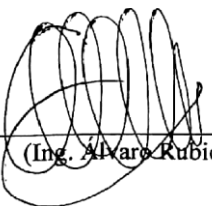
---

(Inga. Carla Gordillo)



---

(Ing. Otomel Echeverría)



---

(Ing. Alvaro Rubio)

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de diciembre de 2022.

## PREFACIO

Esta investigación tiene como objetivo determinar el comportamiento de las arenas volcánicas del valle central de Guatemala a partir del modelado por elementos finitos. Para ello se consideró la geología y también casos pasados que han tenido relevancia en la historia del país, como la catástrofe ocurrida en el Cambray II. Este trabajo se divide en 4 fases, la primera consistió en la recopilación de información buscando como enfoque el programa más adecuado para el modelado por elementos finitos.

La segunda fase consistió en la implementación de parámetros usuales de la geología de Guatemala al programa, entre estos están: Cohesión, ángulo de fricción, peso unitario, módulo de elasticidad, módulo de poisson, entre otros. Con ello se logró realizar diferentes procedimientos que ayudaron a comprender que, las arenas volcánicas de Guatemala tienen un modelo diferente al Mohr Coulomb, llamado Hardening Soil.

Para la tercera fase, se realizó un análisis de sensibilidad para los parámetros más relevantes o que mayor influencia tienen en la estabilidad de taludes, con el fin de obtener el parámetro más sensible ante los distintos escenarios presentados en la investigación, dando como resultado que la cohesión es el parámetro más sensible, y por lo tanto, es al que hay que prestarle más atención al momento de realizar el cálculo de estabilidad.

Por último, después de haber obtenido que la cohesión es el parámetro más sensible, se procedió a realizar la curva de fragilidad ante las deformaciones que presenta un talud típico, con una altura aproximada de 35 metros, con el propósito de presentar las probabilidades que tiene la geoestructura de fallar con una leve disminución en la cohesión del material. Al ser un material frágil, se observa que el colapso de un talud es brusco cuando alcanza su límite.

## CONTENIDO

<b>PREFACIO</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XI</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	<b>2</b>
<b>A. Caso de deslizamiento: Cambray II, Municipio de Santa Catarina Pinula</b> .....	<b>2</b>
<b>III. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>IV. OBJETIVOS</b> .....	<b>6</b>
<b>A. Objetivo general</b> .....	<b>6</b>
<b>B. Objetivos específicos</b> .....	<b>6</b>
<b>V. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
<b>A. Aspectos geológicos</b> .....	<b>7</b>
1. Marco geológico. ....	7
2. Geomorfología. ....	7
<b>B. Principios de los suelos</b> .....	<b>9</b>
1. Condiciones de drenado y no drenado. ....	9
2. Esfuerzo total y efectivo. ....	10
3. Efectos de la densidad.....	10
4. Efectos de la gradación. ....	10
<b>C. Propiedades de los suelos</b> .....	<b>10</b>
1. Ángulo de fricción .....	11
2. Cohesión .....	11
3. Contenido de humedad .....	12
5. Módulo de elasticidad.....	13
6. Módulo de Poisson.....	13
7. Módulo volumétrico (Bulk).....	14
<b>D. Estabilidad de taludes</b> .....	<b>14</b>
1. Causas de los deslizamientos. ....	16
2. Tipos de vulnerabilidades en taludes. ....	18
3. Análisis de estabilidad para el caso estático. ....	19
4. Análisis de estabilidad para el caso dinámico.....	19
<b>B. Métodos de análisis para la estabilidad de taludes</b> .....	<b>19</b>
1. Método de equilibrio límite. ....	19
2. Método de elementos finitos.....	20
<b>C. Modelos constitutivos</b> .....	<b>21</b>
1. Mohr Coulomb.....	21
2. Modelo hiperbólico Duncan-Chang.....	22
3. Hardening Soil. ....	23
4. Softening Soil. ....	24
<b>D. Curva de fragilidad</b> .....	<b>25</b>

1. Estructuras geotécnicas.....	26
<b>VI. METODOLOGÍA .....</b>	<b>28</b>
<b>A. Metodología de análisis de taludes .....</b>	<b>28</b>
1. Metodología por equilibrio límite.....	28
2. Modelado por elemento finitos.....	29
<b>B. Modelo para análisis de taludes compuestos por arenas volcánicas de Guatemala.....</b>	<b>31</b>
1. Planteamiento de los modelos constitutivos.....	31
2. Calibración del modelo por medio de retroanálisis .....	31
<b>C. Procedimiento del modelado .....</b>	<b>36</b>
1. Interfaz de Plaxis.....	36
2. Definición de parámetros para cada modelo constitutivo.....	36
3. Definición de mallado.....	39
<b>VII. RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
<b>A. Análisis de sensibilidad de talud típico .....</b>	<b>40</b>
<b>B. Curva de fragilidad.....</b>	<b>44</b>
<b>VIII. CONCLUSIONES .....</b>	<b>47</b>
<b>IX. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>48</b>
<b>X. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>49</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Módulos para talud típico por Mohr Coulomb .....	31
Tabla 2 Parámetros para talud típico por Mohr Coulomb .....	31
Tabla 3 Módulos utilizados para las arenas de Guatemala por Mohr Coulomb .....	32
Tabla 4 Parámetros basados en la geología de Guatemala por Mohr Coulomb .....	32
Tabla 5 Módulos asumidos por el modelo de retroanálisis.....	33
Tabla 6 Parámetros asumidos por medio del retroanálisis.....	33
Tabla 7 Módulos utilizados las arenas de Guatemala por Hardening Soil .....	35
Tabla 8 Parámetros basados en la geometría de Guatemala por Hardening Soil.....	35
Tabla 9 Peso unitario vs factor de seguridad para ambos modelos constitutivos .....	41
Tabla 10 Cohesión vs factor de seguridad para ambos modelos constitutivos .....	42
Tabla 11 Ángulo de fricción vs factor de seguridad para ambos modelos constitutivos .....	43
Tabla 12 Datos para la variación de cohesión en el talud por Hardening Soil .....	45

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Deslizamiento de depósitos cuaternarios.....	2
Figura 2 Daños provocados por el deslizamiento del Cambray II.....	3
Figura 3 Daños provocados en hogares .....	3
Figura 4 Desprendimiento de suelos antiguos del talud .....	4
Figura 5 Arrastre de rocas de gran tamaño .....	4
Figura 6 Mapa geológico y geomorfológico de Guatemala.....	8
Figura 7 Mapa geológico y geomorfológico de Guatemala.....	9
Figura 8 Ensayo de corte directo .....	10
Figura 9 Ángulo de fricción para distintos tipos de suelo.....	11
Figura 10 Cohesión en suelos granulares.....	11
Figura 11 Contenido húmedo del suelo .....	12
Figura 12 Densidad de los suelos.....	13
Figura 13 Módulo de poisson para suelos.....	14
Figura 14 Deslizamiento de talud en Cambray II, Guatemala .....	15
Figura 15 Planos comunes de falla: (a) planar, (b) multiplanar (c) circular, (d) noncircular .....	20
Figura 16 Comportamiento elástico perfectamente plástico para el modelo Mohr Coulomb .....	21
Figura 17 Superficie de fluencia en el espacio de Mohr Coulomb (c=0) .....	22
Figura 18 Modelo hiperbólico de Duncan Chang.....	23
Figura 19 Relación hiperbólica esfuerzo-deformación.....	23
Figura 20 Módulo de elasticidad para diferentes profundidades del suelo usando la cohesión como parámetro base .....	24
Figura 21 Gráfica de esfuerzo-deformación para un suelo granular denso .....	25
Figura 22 Curva de fragilidad.....	26
Figura 23 Análisis por Equilibrio Límite.....	29
Figura 24 Geometría de talud evaluado .....	30
Figura 25 Resultados de Mesh deformado.....	30
Figura 26 Resultados de Deformaciones del talud.....	31
Figura 27 Perfil antes del deslizamiento del Cambray II.....	32
Figura 28 Resultados obtenidos para el caso no.1 .....	33
Figura 29 Mesh deformado para el análisis por Mohr Coulomb .....	34
Figura 30 Deformaciones obtenidas para el análisis por Mohr Coulomb.....	34
Figura 31 Mesh deformado para el análisis por Hardening Soil.....	35
Figura 32 Deformaciones obtenidas para el análisis por Hardening Soil .....	36
Figura 33 Menú principal para modelado.....	36
Figura 34 Características del material analizado por Mohr Coulomb .....	37
Figura 35 Parámetros integrados para el análisis.....	37
Figura 36 Características del material analizado por Hardening Soil.....	38
Figura 37 Parámetros integrados en el modelo Hardening Soil.....	38
Figura 38 Selección del discretizado del mallado.....	39
Figura 39 Análisis de sensibilidad por Mohr Coulomb para un talud típico .....	40
Figura 40 Análisis de sensibilidad por Hardening Soil para un talud típico.....	41
Figura 41 Análisis de sensibilidad para el peso unitario.....	42
Figura 42 Análisis de sensibilidad para la cohesión .....	43
Figura 43 Análisis de sensibilidad para el ángulo de fricción .....	44
Figura 44 Curva de fragilidad para talud típico.....	45

## RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo profundizar en el comportamiento de las arenas volcánicas del valle central de Guatemala por medio de simulaciones por medio de elementos finitos utilizando herramientas complementarias como análisis de sensibilidad y curvas de fragilidad. Esto es beneficioso, ya que, al momento de realizar trabajos en taludes, es vital comprender la manera en la que se comportará el mismo para cada posible escenario y así determinar probabilísticamente la falla para distintas aceleraciones sísmicas. (Keefer, 1984)

Antes de empezar a analizar taludes por el método de elementos finitos, se recopiló información sobre los parámetros más relevantes a considerar al momento de realizar el cálculo de estabilidad de taludes. Después de esto, se procedió a tomar en cuenta todos los posibles modelos constitutivos por los que se puede analizar el material volcánico de Guatemala. Uno de los más utilizados es Mohr Coulomb, sin embargo, tiende a ser un modelo bastante alejado de la realidad.

Para el modelado del talud, se utilizó uno de los programas más avanzados en la rama de la geotecnia a nivel mundial, Plaxis 2D. Este programa permite analizar distintos escenarios por medio del método de elementos finitos, con la ventaja de que tiene una gran variedad de modelos constitutivos para analizar las máximas deformaciones y esfuerzos de todo tipo de casos, desde excavaciones, hasta túneles.

Después de haber corrido las simulaciones para los diferentes escenarios en el talud, se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de evaluar el parámetro más sensible. Sabiendo este dato, se procedió a hacer la curva de fragilidad. Estas curvas son muy utilizadas en el área estructural, para esta ocasión se decidió evaluar la probabilidad de falla del talud para distintas cohesiones. Además, el aumento en la altura de la pendiente produce los cambios en las curvas de fragilidad, por lo que una mayor probabilidad de falla se asocia con pendientes de mayor altura. Un aumento en la inclinación también tiene un impacto en la falla de la masa de suelo y su inestabilidad. (Keefer, 1984)

## I. INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país que presenta un escenario geológico complejo debido a que se encuentra en medio de tres placas tectónicas, Cocos, Caribe y Norteamérica. Esto nos indica que no solo tiene una geología complicada, sino que también lo vuelve un país altamente sísmico. En el momento en que se realiza el choque de placas tectónicas, se produce una liberación de energía que transmite ondas sísmicas en el suelo, causando en el peor de los casos, una gran cantidad de catástrofes en la región.

Además, la ciudad de Guatemala descansa sobre materiales piroclásticos debido a la cadena volcánica que se encuentra alrededor. Estos piroclastos son de origen pumítico, o, en otros términos, de rocas pómez. El material volcánico del país contiene una gran variedad de gravas con arenas limosas. Este suelo es el más utilizado en el área de la ingeniería civil en Guatemala, desde la utilización de rellenos constructivos, hasta el estrato competente de la cimentación de una estructura.

Para explicar el comportamiento de las arenas volcánicas de Guatemala, es fundamental entender que, debido a que este material se origina de los volcanes, se ha ido depositando capa tras capa en el valle de Guatemala. Al ser así, quiere decir que puede llegar a ser un material frágil al momento de que ocurra algún factor externo, como infiltración de agua debido a lluvias, sismos, viento, entre otros. La consecuencia de esto en el mejor de los casos es un leve deslizamiento, el problema es que, al ser también un material con poca cohesión, su falla será catastrófica, haciendo que colapse en su totalidad.

Es por ello, que es necesario comprender la manera en la que va a fallar un talud compuesto por arenas volcánicas. Un ejemplo de ello es Cambray II, este caso ha marcado la historia del país de una manera significativa, ya que muchas personas quedaron soterradas debido al enorme deslizamiento que se dio en el talud. Esta geoestructura estaba compuesta por este tipo de arenas, la causa por la que falló fue debido al río que pasaba en el pie del talud, poco a poco fue erosionándolo hasta que perdiera su estabilidad, y el detonante del problema fue la época lluviosa en ese momento, ocasionando una gran tragedia.

Lastimosamente, muchas veces el ser humano puede ser el causante de los grandes deslizamientos, cortando taludes imprudentemente, o tomando material de las partes más bajas de los taludes, causando inestabilidad en estos. Es por ello por lo que se realiza esta investigación, para analizar el comportamiento de los taludes compuestos por arenas volcánicas al momento de un factor externo o actividad humana.

Para ello, se indagó sobre el modelo constitutivo de este material. Como se mencionaba al principio, la geología de Guatemala es tan complicada, que no se puede determinar por un modelo estandarizado el material del país. Las arenas volcánicas de la región tienen un comportamiento en donde al alcanzar su máxima resistencia, fallan terriblemente. Es un material rígido, pero a la vez frágil. En la geotecnia, es de suma importancia comprender el modelo constitutivo de los suelos a evaluar antes de realizar el modelado de elementos finitos.

El modelado de elementos finitos es uno de los dos métodos que se utilizan para la estabilidad de taludes. Su complejidad es tan alta, que existen programas específicamente para realizar el método numérico. Para esto se pueden tomar distintos parámetros del suelo dependiendo del modelo constitutivo. Una vez se hayan introducido los parámetros correspondientes, se puede comenzar a realizar el modelado. Con esto se pueden obtener las deformaciones que tendrá la geoestructura al momento de aplicarle una fuerza externa o interna.

## II. ANTECEDENTES

### A. Caso de deslizamiento: Cambray II, Municipio de Santa Catarina Pinula

El asentamiento “El Cambray” se localiza en una zona conformada por depósitos de aluvión del cuaternario, principalmente por depósitos masivos de arena pómez granular en la parte alta e intermedia, cubiertos por suelos y paleosuelos y una secuencia de caídos y cenizas finas en la parte baja, en donde se pudo identificar pequeñas salidas de antiguas resurgencias (nacimiento de agua ladera de la opuesta al deslizamiento). El material litológico que conforma el área, el cual no se encuentra estratificado, el grado de meteorización es moderado (III), con conformación de paleosuelo en la parte superior y suelos orgánicos.



Figura 1 Deslizamiento de depósitos cuaternarios

Fuente: Monterroso (2016)

El jueves 01 de octubre de 2015, se reportó por una persona la ocurrencia de un movimiento masivo en ladera (deslizamiento). Esto activó el incidente por parte de las autoridades de SE CONRED y se iniciaron acciones. El deslizamiento reportado provocó el soterramiento de varias viviendas y personas en el sector denominado El Cambray II, del municipio de Santa Catarina Pinula; ante tal circunstancia, se inició con el protocolo de búsqueda y rescate en la zona afectada y declarando alerta anaranjada institucional en el Sistema CONRED y alerta roja para la Coordinadora Municipal para la Reducción de Desastres COMRED. (Monterroso, 2016)

En las zonas de emplazamiento de viviendas en la colonia Los Patios se identificó una grieta en la parte alta de la ladera, que tiene una orientación perpendicular a la pendiente de esta, abarcando varios terrenos y viviendas. Debido a su dirección y características, esta grieta es indicativa de un movimiento de laderas activo, que, en caso de moverse completamente, puede destruir viviendas que se encuentran en la parte baja de la ladera. (Monterroso, 2016)



Figura 2 Daños provocados por el deslizamiento del Cambray II

Fuente: Monterroso (2016)



Figura 3 Daños provocados en hogares

Fuente: Monterroso (2016)

En general toda la zona de depósito de sedimentos se encontraba en condiciones de inestabilidad ya que el material no estaba compactado, y representaba peligro para todas las personas que se encuentran realizando actividades en el rescate. Asimismo, se recorrió la ladera frente al deslizamiento, (zona 14, de la ciudad capital), se identificó pequeños movimientos y desprendimientos de suelo antiguos, reptación de la vegetación, descargas de agua residual y fluvial, así como el inicio de pequeñas cárcavas, ocasionados por el emplazamiento de edificios, fugas de agua potable, mal manejo de desechos sólidos (basura). (Monterroso, 2016)



Figura 4 Desprendimiento de suelos antiguos del talud

Fuente: Monterroso (2016)

La zona aguas abajo del río Pinula donde ocurrió el deslizamiento, y de donde se encuentra el depósito de sedimentos se estableció que efectivamente, provocó un taponamiento completo del cauce del río, en todo el sector de El Cambray II. Es importante destacar que una de las características de este río, es que el cauce contiene demasiadas rocas de gran tamaño, generadas por los deslizamientos de taludes a lo largo de su recorrido, los cuales son arrastrados durante las crecidas. La capacidad de arrastre del río durante una crecida es evidente ya que se pueden observar varias rocas colocadas en algunos casos sobre depósitos aluviales. (Monterroso, 2016)



Figura 5 Arrastre de rocas de gran tamaño

Fuente: Monterroso (2016)

### III. JUSTIFICACIÓN

Durante los últimos años, Guatemala ha sufrido una gran cantidad de eventos de riesgo geológicos que han aumentado la responsabilidad en aquellos ingenieros a cargo de la estabilidad de taludes. Esto llevó al reconocimiento de la correspondiente vulnerabilidad de las geoestructuras y su potencial para afectar vidas humanas y causar graves problemas económicos. Mitigar las pérdidas potenciales dependen del desempeño de las pendientes, la predicción del daño por deslizamiento es crucial para la evaluación de las pérdidas económicas en áreas propensas a deslizamientos de tierra relacionados. Idealmente, debería ser estimados con un grado aceptable de credibilidad. (Zheng, 2014)

Cada año se escucha fuertemente el tema de los deslizamientos en la ciudad de Guatemala. Provia reportó entre el 1 de mayo y Provia reportó entre el 1 de mayo y el 5 de septiembre pasados un total de 165 emergencias atendidas en carreteras, de las cuales 68 fueron por derrumbe, 33 por desprendimiento de rocas, 56 por caída de árboles, cuatro socavamientos, dos por desbordamiento de ríos y una por acumulación de agua. La mayoría de las consecuencias fueron a raíz de deslizamientos, ya sea de suelos o rocas.

Por esta razón, esta investigación es sumamente importante para el conocimiento del área de ingeniería y también entes reguladores como CONRED. A partir de estadísticas, como las anteriores, es que el humano toma conciencia sobre los problemas que los rodean. En esta ocasión, se decidió evaluar los taludes compuestos por arenas volcánicas debido a que, al momento de fallar, tienden a colapsar bruscamente, acercándose a una falla frágil y esto en el ámbito de la construcción es fatal, ya que siempre se desea una falla dúctil.

Sin embargo, los suelos no son materiales homogéneos como el acero o el concreto, en dónde sí conocemos las características. Por el contrario, el suelo como la arena limosa (selecto) es complejo, como todos los demás suelos, por la razón de que hay muchos factores externos como la humedad, la profundidad, rocas, etc. que influyen en parámetros que no se pueden asumir o no están establecidos como el módulo de elasticidad, módulo de poisson, entre otros. Por eso mismo, se debe conocer el comportamiento de un suelo tan heterogéneo como es el material volcánico del país, con el fin de comprender la manera de analizarlo en taludes y evitar incidentes en el transcurso de los años.

## **IV. OBJETIVOS**

### **A. Objetivo general**

Desarrollar simulaciones por medio de elementos finitos para el comportamiento de arenas volcánicas del valle central de Guatemala

### **B. Objetivos específicos**

- Investigar sobre los posibles modelos a utilizar para el modelaje de las propiedades geotécnicas para las arenas volcánicas del valle central de Guatemala
- Modelar un talud por análisis de elementos finitos para determinar su comportamiento ante distintos escenarios.
- Determinar la curva de fragilidad para un talud compuesto por arenas volcánicas del valle central de Guatemala.

## V. MARCO TEÓRICO

Para comprender el comportamiento de un material tan complejo como lo son, las arenas volcánicas de Guatemala, se debe englobar temas principales con el fin de entender la manera en la que estas se han ido depositando en el valle central del país, y cómo es que este material ha tomado un papel importante en la ingeniería civil. A continuación, se desarrollarán temas tomando en cuenta los aspectos geológicos de Guatemala, la mecánica de suelos, estabilidad de taludes, modelos constitutivos, entre otros.

### A. Aspectos geológicos

**1. Marco geológico.** La ciudad de Guatemala tiene un escenario complicado al momento de hablar de geología, esto se da gracias a las tres placas tectónicas que la rodean, Cocos, Caribe y Norteamérica. Durante su formación han interactuado eventos tectónicos y volcánicos. La interpretación se respalda en evidencias geológico- geomorfológicas y sísmicas. Debido a las actividades que se tienen en la falla del Motagua y Jalpatagua, se producen fracturas en la corteza, provocando el ascenso del magma y a la vez ocasionando la formación de volcanes. (Pérez, 2009)

**2. Geomorfología.** En Guatemala se imponen dos orientaciones, las cuales son: 1) un arco de rocas cristalinas y sedimentarias, que va desde Chiapas hasta el Mar Caribe. 2) Un alineamiento representado por rocas volcánicas, del período terciario. Las regiones que nacen de estas orientaciones son conocidas como: Sierras del Norte de América Central y la Provincia Volcánica. Cabe resaltar que, al Norte del país, se encuentra la cuenca sedimentaria de El Petén. (Pérez, 2009)

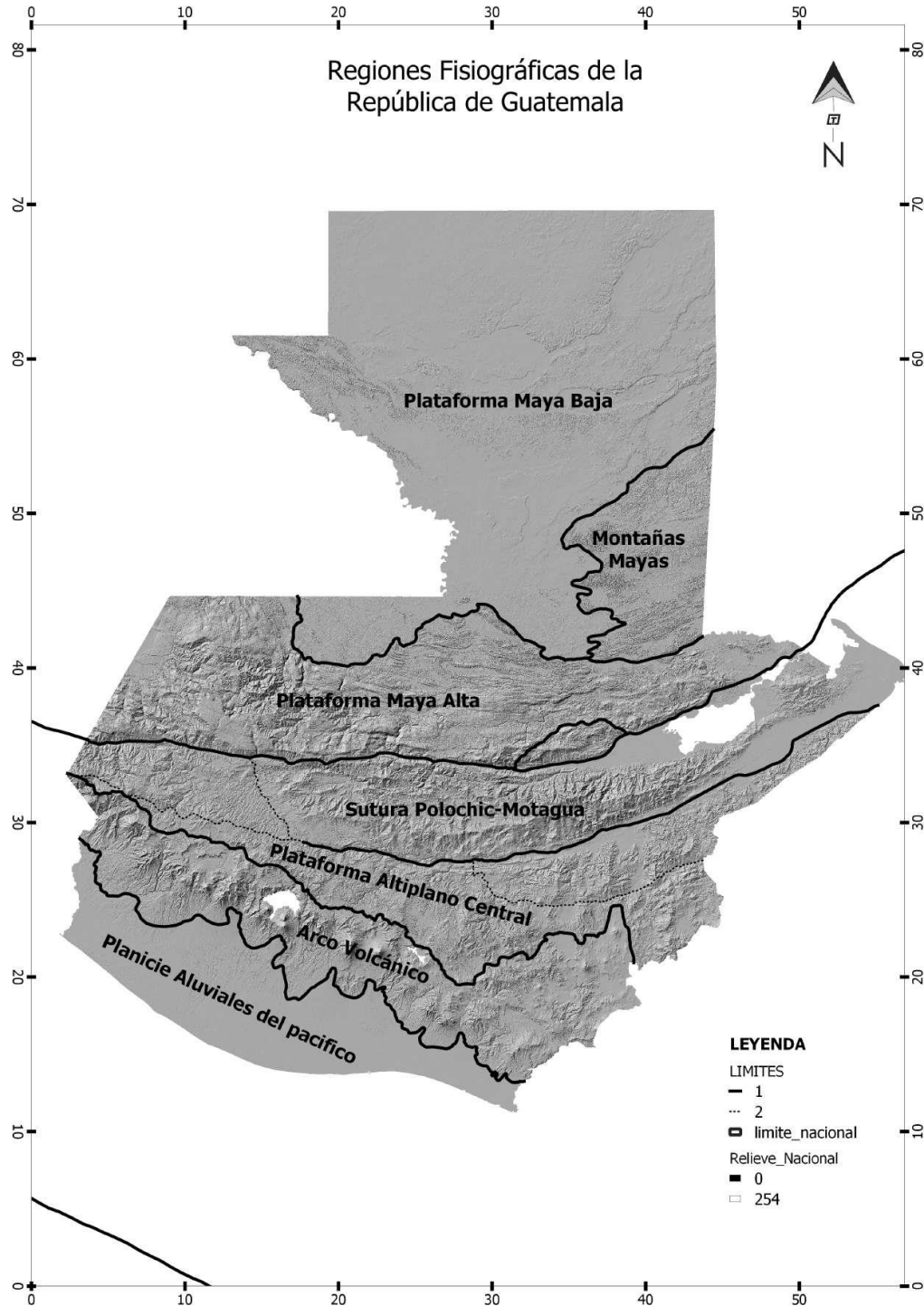


Figura 6 Mapa geológico y geomorfológico de Guatemala

Fuente: Callejas y Rubio (2021)

La estructura del valle de la ciudad de Guatemala es una depresión de origen tectónico. Está delimitada por las fallas de Mixco y Pinula, el desnivel de los bloques es de 500m aproximadamente. En el graben de la ciudad, las fallas de Pinula y Mixco son fallas normales de gran ángulo. Por la actividad volcánica del país, se han encontrado grandes masas de flujos piroclásticos en el territorio. (Weyl, 1980)

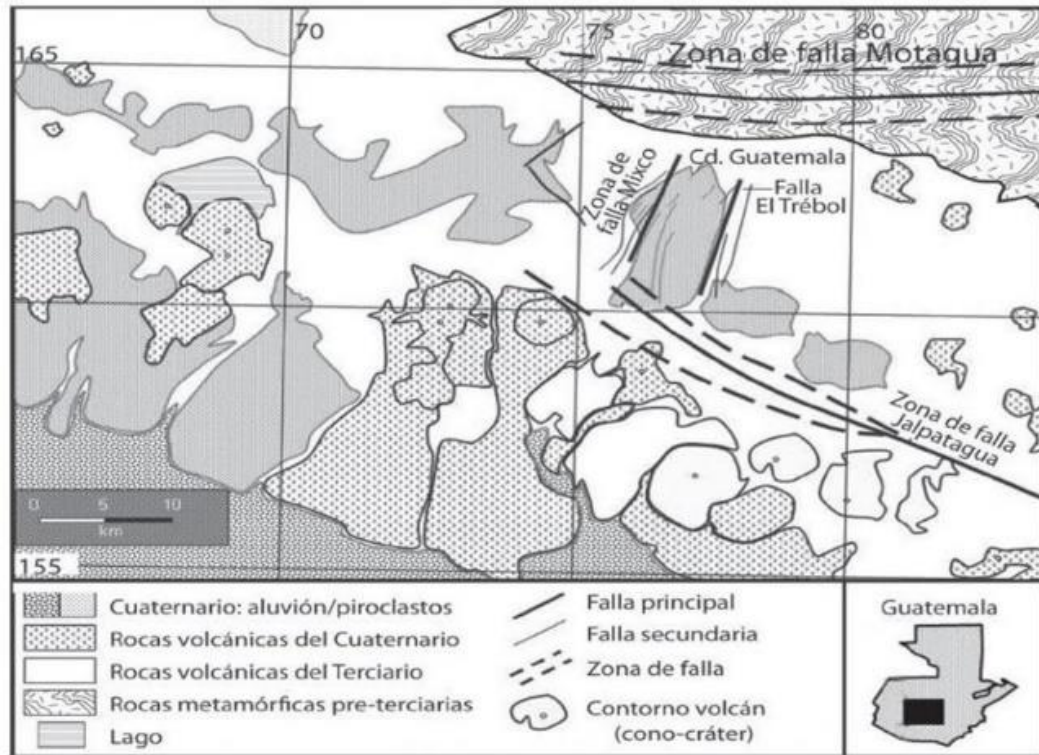


Figura 7 Mapa geológico y geomorfológico de Guatemala

Fuente: Pérez (2009)

## B. Principios de los suelos

Para que el análisis de estabilidad de taludes sea útil, se deben formular de manera correcta los problemas encontrados. Para ello, se requiere primero de un amplio conocimiento de mecánica de suelos. Segundo, conocimiento de geología y las condiciones del sitio, y tercero, conocimiento de las propiedades de los suelos en el sitio. A continuación, se presentarán las propiedades que son necesarias para entender y formular un buen análisis de estabilidad de taludes.

**1. Condiciones de drenado y no drenado.** Los conceptos de “drenado y “no drenado” son de suma importancia en el comportamiento de los suelos, y es de valor revisar estos conceptos al momento de examinar los principios de mecánica de suelos. Para entender de una manera más fácil, la condición drenada quiere decir que el suelo está seco, y la condición no drenada quiere decir que el suelo está húmedo. Estas definiciones se relacionan con el cambio de carga al momento de tener presión de poro, es decir, presión del agua en el suelo. (Duncan, 2014)

La condición drenada permite que el agua salga mucho más rápida del suelo, con el fin de descargar ese peso extra. Sin embargo, un suelo puede ir disipando la presión de poro mientras se ve una carga aplicada sobre este, con el paso del tiempo. La condición no drenada es aquella en dónde el flujo de agua no entra ni sale del suelo, debido a que tiene como objetivo retener el agua. Cambios en la carga cambia también la presión de poro, porque el agua es incapaz de moverse rápidamente mientras está bajo una carga.

**2. Esfuerzo total y efectivo.** El esfuerzo se define como la fuerza por unidad de área. El esfuerzo total es la suma de todas las fuerzas, incluyendo aquellas que se relacionan con las que hacen contacto con las partículas del suelo y las presiones del agua, dividido el área total. El área total incluye el área de los vacíos y de los sólidos. El esfuerzo efectivo representa las fuerzas que son transmitidas a través de las partículas del suelo. Esto es igual al total menos la presión del agua. (Duncan, 2014)

**3. Efectos de la densidad.** La densidad tiene un efecto importante en la resistencia de los materiales granulares. Para estos suelos, el ángulo de fricción incrementa con la densidad. Mientras más suelta una arena, más rápido va fallará, y, por lo tanto, su ángulo será menor al de una arena más densa. (Duncan, 2014)

**4. Efectos de la gradación.** Un factor que también es influyente en el ángulo de fricción es el nivel de gradación del material. Arenas que son bien gradadas tienden a tener un mayor ángulo de fricción, esto pasa porque las partículas están tan bien distribuidas, que permiten darle más resistencia al suelo, y puede volver más denso el material. (Duncan, 2014)

### C. Propiedades de los suelos

Un paso clave para el análisis de estabilidad de taludes es la medición o estimación de la resistencia en el suelo. Los análisis que hacen la diferencia son aquellos que pueden presentar los esfuerzos correctos en el suelo con el fin de evaluar la resistencia de este. Se ha aprendido bastante sobre este procedimiento durante los últimos 70 años. La cantidad de información que se ha venido acumulando a lo largo del tiempo es bastante amplia. El propósito de estos ensayos es evaluar los puntos de inicio del estudio y análisis para la estabilidad. (Duncan, 2014)

Para fines de esta investigación, se estará evaluando únicamente los suelos granulares. Las características de estos suelos (grava, arenas, rocas) son bastante similares. Esto sucede debido a la permeabilidad que tienen, usualmente son drenados en su totalidad. Son suelos con una baja cohesión, esto quiere decir que las partículas no se adhieren entre ellas. La resistencia del suelo depende de las propiedades mecánicas del mismo. A continuación, se presentan los parámetros que son esenciales al momento de realizar la estabilidad de taludes. (Duncan, 2014)

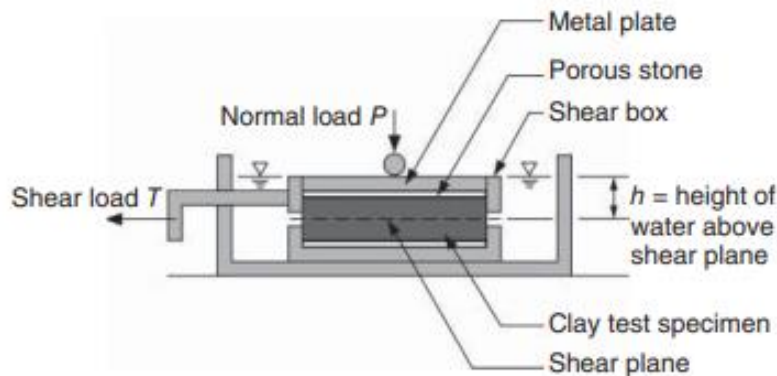


Figura 8 Ensayo de corte directo

Fuente: Duncan (2014)

1. **Ángulo de fricción ( $\phi$ ).** También es conocido como el ángulo de rozamiento interno. Este parámetro es un valor que depende del tamaño, forma y densidad de las partículas del suelo. Los granos más gruesos tienden a tener partículas más angulares que los granos finos. Para encontrar el ángulo de fricción, se pueden utilizar dos métodos: El ensayo de corte directo o triaxial. El primero es el método más usado y antiguo en el cálculo de la resistencia al corte. En dónde se coloca una muestra de suelo en una caja, aplicando una fuerza normal y una fuerza cortante con el fin de obtener la resistencia máxima del suelo. (Escobar, 2013)

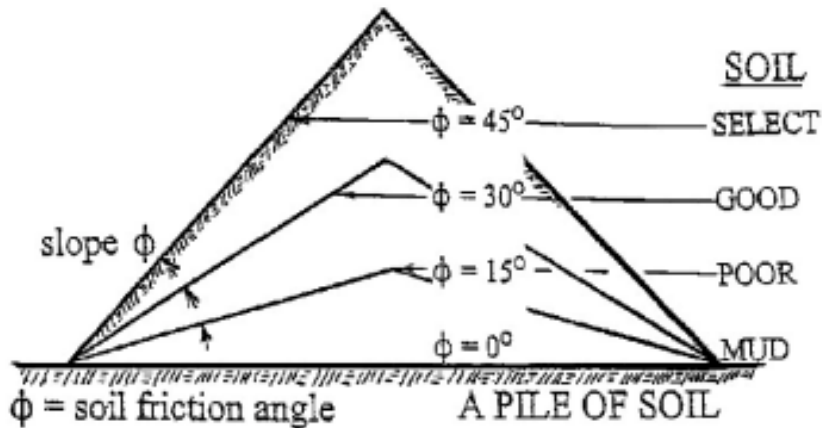


Figura 9 Ángulo de fricción para distintos tipos de suelo

Fuente: Rahman (2010)

2. **Cohesión (c).** La cohesión es la máxima resistencia del suelo a tensión. Se puede definir como la adherencia entre las partículas del suelo debido a la atracción entre ellas en virtud de las fuerzas moleculares. Este parámetro variará mucho dependiendo del contenido de humedad de la muestra a ensayar. Se encuentra principalmente en los suelos finos (arcillas y limos), mientras que en los suelos granulares es casi nula. El valor de la cohesión es la carga horizontal que se aplica al suelo en el ensayo de corte directo. (Escobar, 2013)

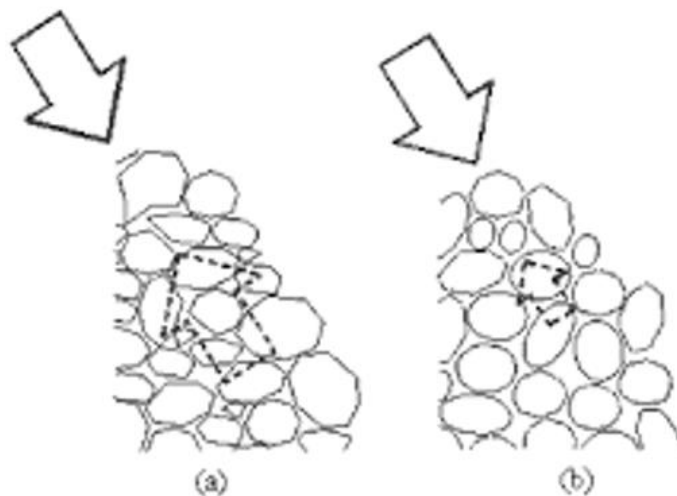


Figura 10 Cohesión en suelos granulares

Fuente: Rahman (2010)

**3. Contenido de humedad (%).** El contenido de humedad de los suelos se basa en la relación del peso de los sólidos y el peso del agua que retiene el suelo. En países como Japón, se han registrado humedades de más de mil por ciento, esto se puede volver un gran problema ya que el suelo pesa 15 veces más debido al agua que está dentro del mismo. Un suelo saturado quiere decir que tiene más del 100% de humedad.

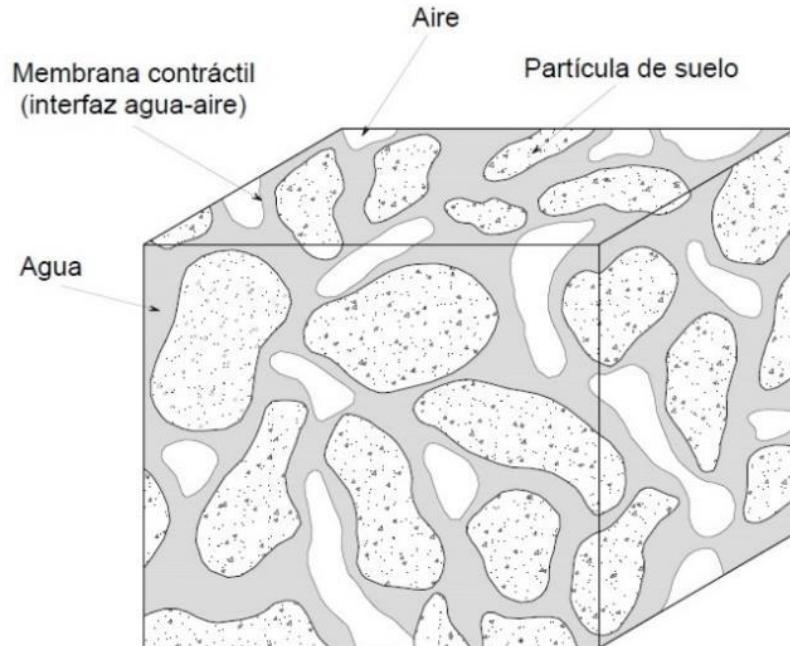


Figura 11 Contenido húmedo del suelo

Fuente: López (2016)

**4. Peso unitario.** Se define como la masa de una masa por unidad de volumen. El peso unitario varía de acuerdo con el contenido de humedad que posee el suelo, que son: húmedo, saturado y seco. El peso unitario húmedo se define como la masa de un suelo no saturado por unidad de volumen, donde los vacíos contiene agua y aire, que será:

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

El peso unitario seco se define como el peso del suelo sin contenido de agua por unidad de volumen, que se describe como:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

El peso unitario saturado se define como el peso del suelo saturado por unidad de volumen, donde los vacíos están saturados de agua, que se describe como:

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V}$$

El peso unitario del agua es el peso del agua por unidad de volumen, que se define como:

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$$

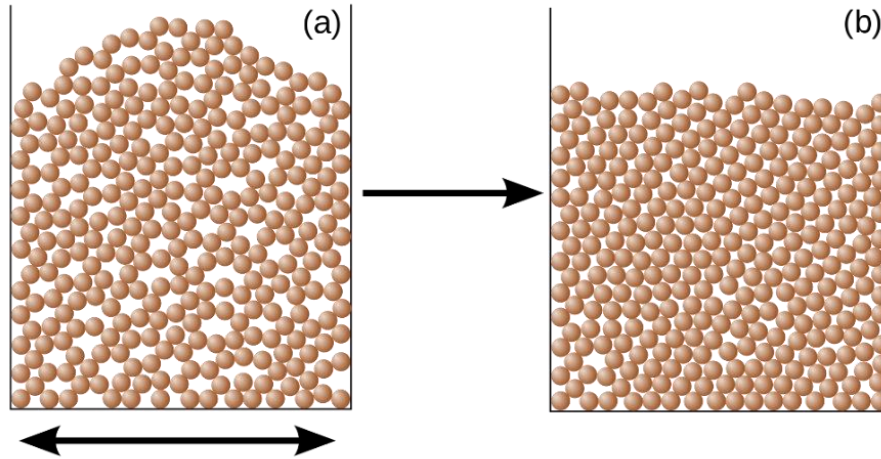


Figura 12 Densidad de los suelos

Fuente: Yepes (2020)

**5. Módulo de elasticidad.** Comúnmente es denominado como módulo de elasticidad del suelo, es un parámetro elástico y una medida de la rigidez del suelo. Es la relación de tensión a lo largo de un eje sobre la deformación de este, en el rango del comportamiento elástico. Se utiliza seguido en el cálculo de asentamientos del suelo y deformación elástica para la capacidad soporte del material. (Geotechdata, 2013)

**6. Módulo de Poisson.** Es una propiedad elástica del suelo, la cual se define como la deformación bajo una carga uniaxial. Este valor puede variar entre 0 y 0.5 para los suelos dependiendo de varios factores como, el tipo de suelo, la densidad, presión de confinamiento, porosidad, contenido de humedad y saturación, entre otros. La relación es cercana a 0 cuando no existe un movimiento lateral del suelo bajo una carga. Llega a 0.5 cuando no hay un cambio volumétrico en la muestra, es decir, la deformación es simétrica con respecto al módulo de elasticidad. (Kumar, Vahedifard, y Toan, 2021)

El módulo de Poisson para arcillas rígidas a blandas es de 0.20 a 0.45, para limos es de 0.20 a 0.35, y para arenas densas a sueltas es de 0.15 a 0.35 (Budhu, 2010). Este parámetro al igual que el módulo de Young, se necesita como entrada en una amplia gama de simulación numérica (elementos finitos) para casos como: estabilidad de taludes, presión de suelos, capacidad soporte del suelo, y asentamientos del mismo.

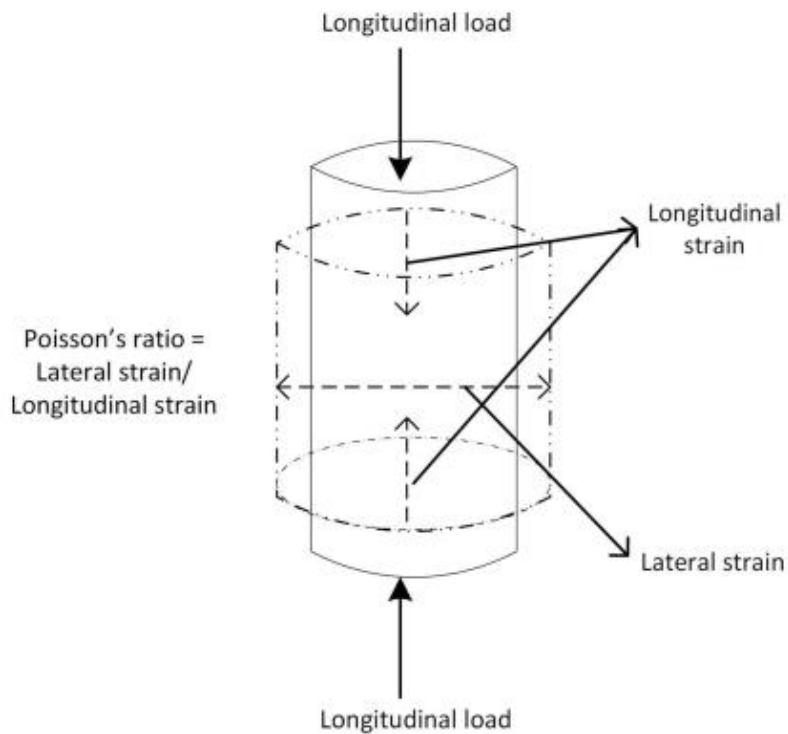


Figura 13 Módulo de poisson para suelos

Fuente: Kumar, Vahedifard, y Toan (2021)

**7. Módulo volumétrico (Bulk).** Es una constante elástica que refleja la resistencia del material en cuánto a pérdida o ganancia de volumen en condiciones de presión hidrostática Si la presión hidrostática disminuye, entonces el volumen aumentará.

#### D. Estabilidad de taludes

Desde siempre se han dado los deslizamientos en taludes, ya sea en aquellos que son naturales o también en los artificiales. Existen pendientes en estados que van desde muy estables a marginalmente estables. Cuando ocurre un terremoto, los efectos del temblor del suelo a menudo son suficientes para causar fallas en las pendientes que eran marginal o moderadamente estables antes del terremoto. (Duncan, 2014)

El daño resultante es capaz de variar de insignificante a catastrófico, dependiendo de las características geométricas y materiales del talud. Es por ello que la evaluación de la estabilidad del movimiento sísmico es una de las actividades más importantes del ingeniero geotécnico. Como se puede observar en la Figura no. 3, la falla debido a factores externos, como por ejemplo las lluvias, sismos, u otros logran golpear significativamente la masa de suelo.



Figura 14 Deslizamiento de talud en Cambray II, Guatemala

Fuente: Prensa Libre (2015)

Para los estudios preliminares de la estabilidad de taludes, es importante conocer las condiciones de estos y los deslizamientos que han ocurrido en sismos anteriores. Es de esperar, que mientras mayor sea la magnitud del sismo, mayor será la cantidad de suelo que se desliza. Un estudio de 300 sismos en Estados Unidos mostró que los sismos con menores magnitudes provocaron grandes deslizamientos de tierra. (Keefer, 1984)

Con esto se entendió, que los taludes que tuvieron actividad sísmica fallaron con bajas magnitudes y vibraciones del sismo debido a que se encontraban al límite de las condiciones estáticas. Es decir, un talud con factor de seguridad bajo en estas condiciones, resiste de manera estacionaria, sin embargo, está a nada de fallar al momento de aplicar una aceleración que sobrepase su falla. (Keefer, 1984)

La estabilidad de las pendientes se ve agravada por muchos factores, y una evaluación completa de la estabilidad de taludes debe considerar los efectos de cada uno. Características geológicas, hidrológicas, topográficas, geométricas y materiales influyen en la estabilidad de un talud particular. (Esteva L, 1964) Se necesita información sobre estas características para realizar e interpretar de manera confiable los resultados de los análisis de estabilidad de taludes tanto estáticos como sísmicos, revisión de documentos disponibles, reconocimiento de campo. (Kramer, 1996)

El reconocimiento de campo implica una observación cuidadosa y un mapeo detallado de una variedad de características del sitio asociadas con la inestabilidad existente o potencial de la pendiente. Características como escarpes, grietas por tensión protuberancias; Terreno accidentado: zanjas, canales y cercas desplazadas Los cimientos, las paredes o las paredes o los postes pavimentados e inclinados pueden identificarse como evidencia de inestabilidad. La ubicación de arroyos, manantiales, filtraciones. los estanques y la mayoría de las áreas, y las diferencias en la cubierta vegetal, pueden proporcionar evidencia de un flujo de agua alterado o interrumpido causado por la inestabilidad de la pendiente. (Kramer, 1996)

Las pruebas *in situ* y geofísicas son particularmente útiles para determinar la ubicación de una superficie de falla existente. También se tienen los métodos de reflexión y refracción sísmica, los cuáles, además de dar un acercamiento principal al terreno, permiten conocer las aceleraciones sísmicas para un determinado punto, es por ello que fenómenos geológicos como taludes, licuefacción y más, conllevan un diferente estudio de suelos. (Kramer, 1996)

Las pruebas de laboratorio se utilizan a menudo para cuantificar las características físicas de los diversos materiales del subsuelo para ingresar en un análisis numérico de estabilidad de taludes. Densidad del suelo, la fuerza y el comportamiento de esfuerzo-deformación son de primordial importancia; otras características, como la distribución del tamaño de grano, la plasticidad, la permeabilidad y la compresibilidad, también son útiles. Sólo después de obtener esta información se puede realizar un análisis de estabilidad. Es importante recordar que el análisis en sí no es más que una parte de una evaluación completa de la estabilidad de taludes y que su precisión se reducirá si no se presta especial atención a los demás aspectos de la evaluación. (Kramer, 1996)

**1. Causas de los deslizamientos.** Es importante comprender los agentes de inestabilidad en taludes por dos razones. La primera se relaciona con los fines que se le dará al talud, para construcciones o nuevos proyectos, es necesario entender cómo cambian las propiedades del suelo, al igual que las sobrecargas y condiciones de infiltración a las que puede estar sometida la geoestructura.

No se puede mencionar las causas de los taludes sin antes entrar en el principio de la estabilidad de los taludes, el cual consiste en que la resistencia a corte del suelo debe ser superior al esfuerzo cortante requerido para el equilibrio. Por alguna razón, la mayoría de los casos de inestabilidad, se dan debido a que el esfuerzo del suelo es menor que el del equilibrio. Esta condición se puede alcanzar por dos maneras: Por medio de una disminución en la resistencia a cortante del suelo, y por medio de un incremento en el esfuerzo cortante para el equilibrio.

Las causas que se dan debido a la disminución de la resistencia a corte en el suelo son:

- a. **Incremento en la presión de poro.** El aumento en el nivel freático, situaciones más adversas de infiltración, y fuertes lluvias, son las razones más frecuentes para el incremento en la presión de poro y disminución en el esfuerzo efectivo del suelo. Todos los tipos de suelo se ven afectados en estas condiciones. El período de tiempo para que se logre este fenómeno depende de la permeabilidad del suelo. Para este caso, en dónde se está evaluando el comportamiento de las arenas volcánicas del suelo, el período es muy corto debido a la poca cohesión que tiene este material.
- b. **Agrietamiento.** Las fallas en los taludes se dan frecuentemente por el avance del agrietamiento en la corona de estos. Este progreso en la grieta va produciendo una tensión en el suelo que llega a exceder la resistencia de este. Una vez que el suelo se fractura, el talud pierde su resistencia en el plano de falla.
- c. **Hinchamiento.** Esto sucede más en materiales arcillosos, especialmente en arcillas con mucha plasticidad y fuertemente sobreconsolidadas. No ha sido posible estimar el mismo hinchamiento de estos materiales en laboratorio como en campo. Skempton (1964) mostró 3 casos de deslizamientos en arcillas sobreconsolidadas en Londres, donde las zonas con mayor cantidad de agua se extendieron aproximadamente una pulgada a cada lado de las superficies de corte, lo que condujo a una dilatación localizada y pérdida de la resistencia

dentro de la arcilla fuertemente sobreconsolidadas.

- d. **Deslizamientos resbaladizos.** De las superficies resbaladizas que más se han evaluado, se puede concluir que los deslizamientos se producen sobre todo en las arcillas muy plásticas. Esto produce un esfuerzo cortante en diferentes planos de deslizamiento. Este resultado tiende a alinear las partículas de la arcilla en sus diferentes planos, causando un brillo opaco como el de una barra de jabón nueva. Las superficies resbaladizas son más débiles que las que están a su alrededor, al momento de que esto ocurre, se toma su ángulo de fricción residual, el cual es mucho más bajo que el máximo. Se puede tener un ángulo residual de 5 o 6 grados para estas arcillas, y un ángulo máximo de 20 o 30 grados para el mismo material.
- e. **Deformación de suelos frágiles.** Esta es una de las causas más comunes que ocurren en los suelos de Guatemala. Suelos frágiles están sujetos al ablandamiento de la tensión. Después de que la curva de esfuerzo-deformación ha alcanzado su máxima resistencia, las resistencias al corte de los suelos disminuyen con más deformación. Este tipo de comportamiento ocasiona una falla progresiva.
- f. **Meteorización.** Las rocas y suelos están sujetos a la pérdida de la resistencia como resultado de la meteorización, que involucra varios procesos físicos, químicos y biológicos. La meteorización física rompe los suelos en pedazos más pequeños, y la química y biológica los transforman en materiales con propiedades fundamentalmente diferentes.

A continuación, se presentarán las causas para el caso en donde el esfuerzo cortante es mayor a la resistencia del suelo:

- g. **Cargas en la corona del talud.** Si el suelo en la cresta del talud está soportando cargas adicionales, el esfuerzo requerido para que se produzca el equilibrio aumentará. Las cargas más comunes que sobrecargan el suelo son la construcción de rellenos y edificios con cimentaciones poco profundas. Para evitar tales cargas se debe realizar un retiro de la corona del talud, el cual se determina a partir de un análisis de estabilidad.
- h. **Presión de agua en grietas en la corona del talud.** Si las grietas en la parte más alta del talud se llenan con agua, la presión hidrostática en las grietas carga el suelo, ocasionando un incremento en el esfuerzo cortante en el talud llegando a desestabilizarlo. Si la grieta permanece mucho tiempo llena con agua a tal punto que se desarrolle una condición de infiltración, la presión de poro incrementará llevando la situación a un peor escenario.
- i. **Excavaciones en la corona del talud.** Las excavaciones pueden llegar a formar pendientes más empinadas de lo usual, que podrían incrementar los esfuerzos cortantes en el suelo dentro del talud y reducir su estabilidad. Este escenario es parecido al de la erosión en el pie del talud debido a un arroyo.
- j. **Escenarios sísmicos.** Por último, se menciona una de las causas que más renombre tienen en esta investigación. Los sismos someten las pendientes a aceleraciones verticales y horizontales que dan como resultado variaciones cíclicas en los esfuerzos dentro del suelo, incrementándolos por encima de sus valores estáticos. Incluso si el movimiento sísmico no provoca cambios en la resistencia del suelo, la estabilidad del talud se reduce durante esos breves segundos. Si las cargas cíclicas causan reducción en la resistencia del suelo, los

efectos son aún más severos.

**2. Tipos de vulnerabilidades en taludes.** Cualquier fenómeno natural que modifique las condiciones geométricas y geomecánicas de un talud puede inducir impactos en la población, edificaciones y actividades que se clasifican como consecuencias directas e indirectas (Kramer, 1996).

- a. **Vulnerabilidad física.** Este término expresa el grado de pérdida o daño potencial de un elemento o conjunto de elementos en riesgo cuando se ven afectados por el comportamiento de una masa inestable. Hasta el momento no se ha elaborado ninguna teoría para modelar los efectos dañinos de todo tipo de deslizamientos de tierra, con la excepción del impacto repentino de un bloque en un muro; sin embargo, el número de parámetros variables para este caso (velocidad, masa del bloque, ángulo de impacto, posición del punto de impacto en la pared, deformación potencial de toda la estructura, geometría detallada de la pared, resistencia del material) no permiten obtener un resultado significativo en términos de análisis de riesgo global de una gran zona de deslizamientos. (Dai FC, 2002)
- b. **Vulnerabilidad social.** Este término expresa la tasa de impacto debido a un deslizamiento de tierra en la población expuesta. En muchos casos de caída de rocas, incluso de intensidad limitada, esta tasa es del 100 % ya que puede causar la muerte. Las heridas graves que conducen a una discapacidad importante permanente también se evalúan en cerca del 100 %, porque los costos a largo plazo que provocan para la sociedad son elevados. Las heridas temporales (como una pierna rota) se consideran por el contrario como una vulnerabilidad menor, ya que las personas pueden recuperarse en poco tiempo. El coeficiente de vulnerabilidad social también incluye las consecuencias psicológicas de la pérdida de un hogar, ya que a menudo se observa más difícil para las víctimas perder sus raíces afectivas que ser heridas. Incluso el hecho de ser evacuados provisionalmente, por un tiempo determinado, constituye un impacto en la población que se ocupa de la vulnerabilidad social. (Dai FC, 2002)
- c. **Vulnerabilidad ambiental.** Para los bosques, este impacto es importante ya que varias zonas se consideran bosques protectores contra desprendimientos y avalanchas, por lo que su valor potencial debe evaluarse mediante el análisis de su función global (productiva, protectora, recreativa). En lo que respecta a los impactos sobre los recursos hídricos y las condiciones del caudal en los ríos, también es importante analizar la posible pérdida de manantiales por desprendimiento de rocas, incluso si aún no están equipados para el consumo de agua, y la posible pérdida de peces en caso de que el flujo del río se vea perturbado por una masa que obstruya su curso. Así, los principales criterios para determinar el valor de los coeficientes de vulnerabilidad ambiental son: la intensidad del fenómeno, en relación con su efecto perturbador sobre la naturaleza; la función del bosque o de las especies animales y vegetales amenazadas; la sensibilidad y rareza de estas especies. (Dai FC, 2002)
- d. **Vulnerabilidad económica.** Además de la posible destrucción de activos en o cerca de los deslizamientos de tierra, tales fenómenos inducen impactos económicos indirectos cuando bloquean una carretera o una vía férrea, destruyen una línea eléctrica o un agua. una tubería o una represa en un valle que causa un lago que representa un peligro río abajo donde se debe detener la actividad económica en el valle de abajo, pero tal vez sin un destructivo final. Es importante darse cuenta de que, en la mayoría de las situaciones reales, los impactos económicos indirectos son mucho más grande que los impactos directos. (Dai FC, 2002)

**3. Análisis de estabilidad para el caso estático.** Los taludes se vuelven inestables cuando los esfuerzos cortantes requeridos para mantener el equilibrio alcanzan o exceden la resistencia al corte disponible en alguna superficie de falla potencial. Para pendientes en las que los esfuerzos cortantes requeridos para mantener el equilibrio bajo carga gravitacional estática son altos, los esfuerzos dinámicos adicionales necesarios para producir inestabilidad pueden ser bajos. Es decir, para aquellos taludes vulnerables en su condición estática, pueden necesitar un bajo esfuerzo dinámico para hacer que este falle. (Kramer, 1996)

**4. Análisis de estabilidad para el caso dinámico.** El análisis de la estabilidad sísmica un talud se complica aún más por las siguientes razones: 1. Los esfuerzos dinámicos inducidos por la sacudida sísmica 2. los efectos de esas deformaciones sobre la resistencia y el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales de la pendiente. (Kramer, 1996)

La licuefacción y la movilidad cíclica son las causas más frecuentes de debilitamiento de la inestabilidad. Se dispone de una serie de técnicas analíticas, basadas tanto en el equilibrio límite como en los análisis de esfuerzo-deformación, para ambas categorías de inestabilidad sísmica. Los movimientos sísmicos pueden inducir tensiones dinámicas horizontales y verticales significativas en las pendientes. Estos esfuerzos producen fuerzas normales y cortantes a lo largo de las posibles superficies de falla dentro de una pendiente. (Kramer, 1996)

## **B. Métodos de análisis para la estabilidad de taludes**

Los métodos para analizar la estabilidad de taludes incluyen ecuaciones, cuadros, hojas de cálculo, y programas para el cálculo de ello. En muchos casos, se usa más de un método para obtener los resultados deseados. Por ejemplo, si se utiliza un software para el análisis, es necesario de una hoja de cálculo para verificar los resultados. (Duncan, 2014)

**1. Método de equilibrio límite.** El análisis de equilibrio límite considera las fuerzas o los momentos equilibrantes de una masa de suelo sobre una falla potencial en la superficie de la misma. Se asume que el suelo en la superficie para este caso debe ser rígido. También se asume que la resistencia al corte se va movilizándose en el mismo rango de puntos donde puede encontrarse la falla potencial. Esto es equivalente a asumir que la superficie es perfectamente-rígida plástica.

Se han evaluado una serie de procedimientos que consideran la variación en el equilibrio límite para analizar el caso estático de taludes. En taludes homogéneos, la falla crítica en la superficie usualmente es circular. Desde que el mínimo de factores de seguridad para planos de falla circulares es muy cerca al rango, se decidió que este tipo de taludes debe ser idealmente analizado por métodos como el de método modificado de Bishop, el cuál asume fallas circulares en la superficie.

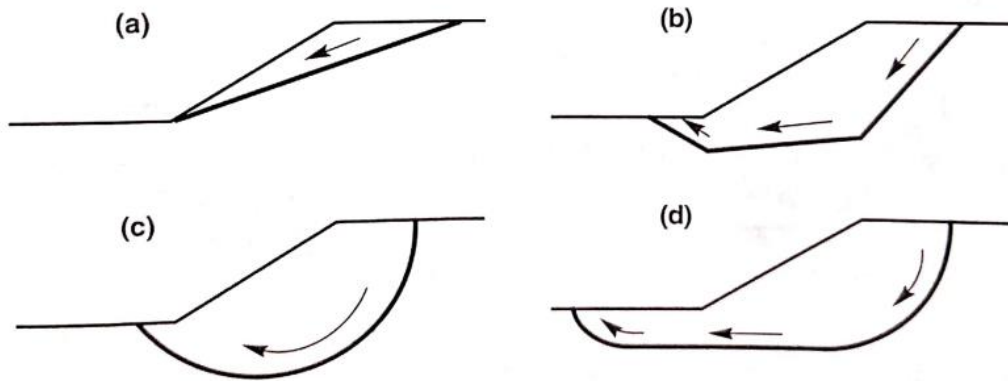


Figura 15 Planos comunes de falla: (a) planar, (b) multiplanar (c) circular, (d) noncircular

Fuente: Kramer (1996)

**2. Método de elementos finitos.** El método de elementos finitos ha tenido un mayor uso en la práctica de la ingeniería geotécnica durante los últimos 50 años. Se empezó utilizando para flujos de calor y agua en suelos, y luego se aplicó para la determinación de esfuerzos y deformaciones en taludes y terraplenes. Más recientemente, se ha utilizado para el cálculo de factores de seguridad en taludes. (Duncan, 2014)

Al momento de realizar el análisis del talud, es necesario tomar en cuenta seis parámetros del suelo: Cohesión, ángulo de fricción, peso húmedo, ángulo de dilatación, módulo de Elasticidad y Poisson. A continuación, se presentan algunos de los programas que permiten realizar el modelado de elementos finitos para geotecnia: (Duncan, 2014)

**Plaxis 2D:** Es un software de elementos finitos potente y fácil de usar diseñado para el análisis 2D de deformación y estabilidad en ingeniería geotécnica. Las ventajas de este programa, es que viene equipado con una amplia gama de funciones que permitir resolver problemas geotécnicos. En este software, se permite analizar capas subterráneas, estabilidad de taludes, modelar perfiles de suelo y evaluar sus deformaciones, con el fin de observar el comportamiento de este.

Para fines de esta investigación, se estará adentrando más en el tema de elementos finitos y estabilidad de taludes. El programa genera ondas de calor para indicar cuáles son los puntos con más deformación en la estructura geotécnica. A parte de ello, tiene una interfaz bastante sencilla que le permite al usuario realizar las funciones con más facilidad. Plaxis es uno de los programas más utilizados en el mundo para la ingeniería geotécnica, las aplicaciones que tiene son bastante extensas y a la vez convenientes para fines prácticos. (Duncan, 2014)

**Phase2:** Es un programa bastante potente para el análisis de elementos finitos en el tema de la geotecnia. se utiliza para analizar desde el soporte de un talud, hasta modelar la excavación de minas a cielo abierto. Lo que más distingue este software, es el análisis de elementos finitos y estabilidad de taludes por medio del método de reducción de fuerza cortante.

Este programa incluye estado de equilibrio, análisis de elementos finitos de aguas subterráneas incrustado en el programa. Es por ello incluye funciones para trabajar paralelamente, sin necesidad de cambiar de módulo. (Duncan, 2014)

**SIGMA/W:** Al igual que Plaxis 2D y Phase2, es un programa con mucha capacidad de elementos finitos para el modelado de tensiones y deformaciones del suelo, roca y estructuras geotécnicas. Se

conoce por su capacidad de realizar funciones de excavación, y consolidación en los suelos.

Las aplicaciones más comunes que tiene son para las deformaciones en las estructuras como pilotes, muros de contención, entre otros, causas de los sismos. (Duncan, 2014)

### C. Modelos constitutivos

**1. Mohr Coulomb.** Es el modelo constitutivo más utilizado para entender el comportamiento del suelo. Su teoría es fácil de entender, los parámetros son fáciles de obtener y los cálculos son rápidos de realizar. Sin embargo, debe comprenderse bien para evitar darle un mal uso. En primer lugar, es importante hacer énfasis en que este modelo es solo una parte del rompecabezas de los modelos constitutivos, es un primer acercamiento para llegar a un modelo más preciso.

Este modelo se basa en la teoría Lineal-elástico perfectamente plástico donde la relación esfuerzo-deformación se desarrolla linealmente hasta un punto de fluencia en donde entra a un rango plástico. Para llevarlo a cabo se trabajan con dos parámetros provenientes de la ley de Hooke (módulo de Young y módulo de Poisson). Existen otros dos parámetros que definen el criterio de falla (cohesión y ángulo de fricción). (Bujang, 2009)

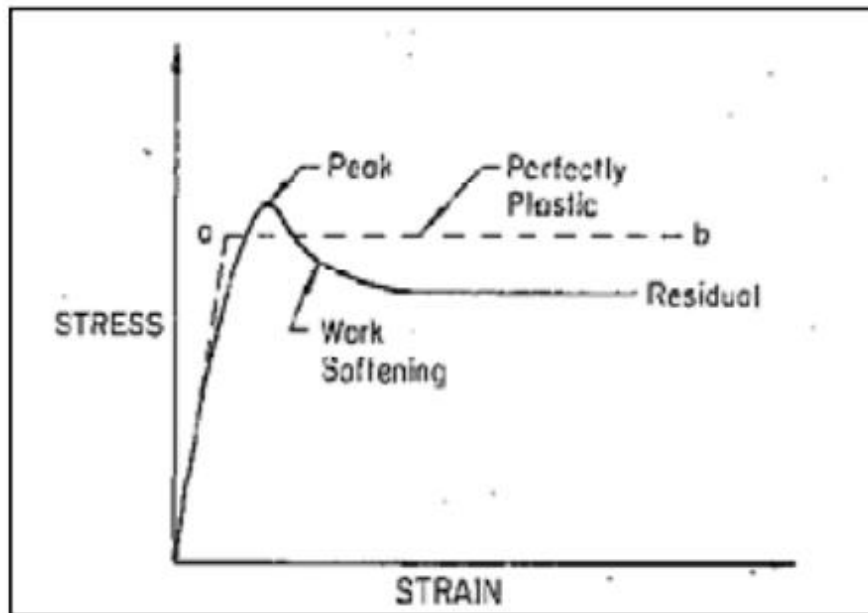


Figura 16 Comportamiento elástico perfectamente plástico para el modelo Mohr Coulomb

Fuente: Bujang (2009)

Aunque el comportamiento de la falla es generalmente bien captado en condiciones drenadas, el esfuerzo efectivo que se permite en materiales no drenados podría desviarse significativamente. Es preferible usar parámetros no drenados en análisis no drenados, con un ángulo de fricción equivalente a 0. Para el rango perfectamente plástico, el modelo no incluye deformación por medio de un modelo “Hardening” o “Softening”.

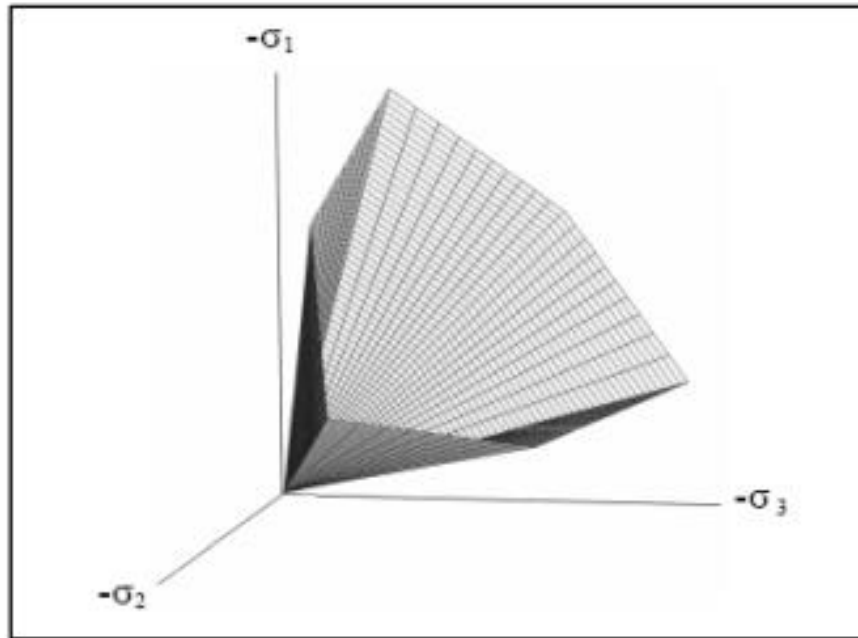


Figura 17 Superficie de fluencia en el espacio de Mohr Coulomb ( $c=0$ )

Fuente: Bujang (2009)

**2. Modelo hiperbólico Duncan-Chang.** Fue presentado en forma ajustada por Duncan y Chang (1970), el que parte del supuesto de que las curvas esfuerzo-deformación del suelo pueden aproximarse a una curva hiperbólica que relaciona el esfuerzo desviador con la deformación axial. Los parámetros que se requieren para trabajar con el modelo se encuentran en función del esfuerzo de confinamiento y del esfuerzo cortante.

El modelo de Duncan-Chang se usa ampliamente ya que sus parámetros del suelo se pueden obtener fácilmente directamente de la prueba triaxial estándar. Es una mejora simple pero obvia del modelo de Mohr-Coulomb. En este sentido, se prefiere este modelo al modelo de Mohr-Coulomb. El fracaso mismo se describe mediante el criterio de falla de Mohr-Coulomb, pero este no está formulado adecuadamente en el marco de plasticidad. Como resultado, la dilatancia no se puede describir. Este modelo captura el comportamiento del suelo de una manera muy manejable sobre la base de sólo dos parámetros de rigidez y es mucho apreciado para el modelado práctico.

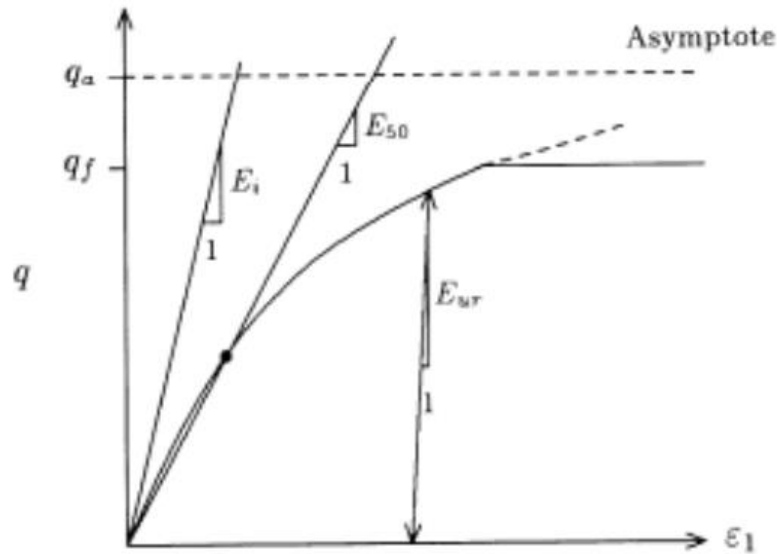


Figura 18 Modelo hiperbólico de Duncan Chang

Fuente: Bujang (2009)

**3. Hardening Soil.** Este es un modelo avanzado para la simulación del comportamiento del suelo. Hardening Soil es un modelo de elastoplástico de modelo hiperbólico, formulado en el marco de la plasticidad de endurecimiento por cizallamiento. Además, simula una resistencia adicional del suelo conforme se va consolidando el material. Este modelo de segundo orden se puede utilizar para simular el comportamiento de arenas y gravas, así como tipos de suelo más blandos, como arcillas y limos

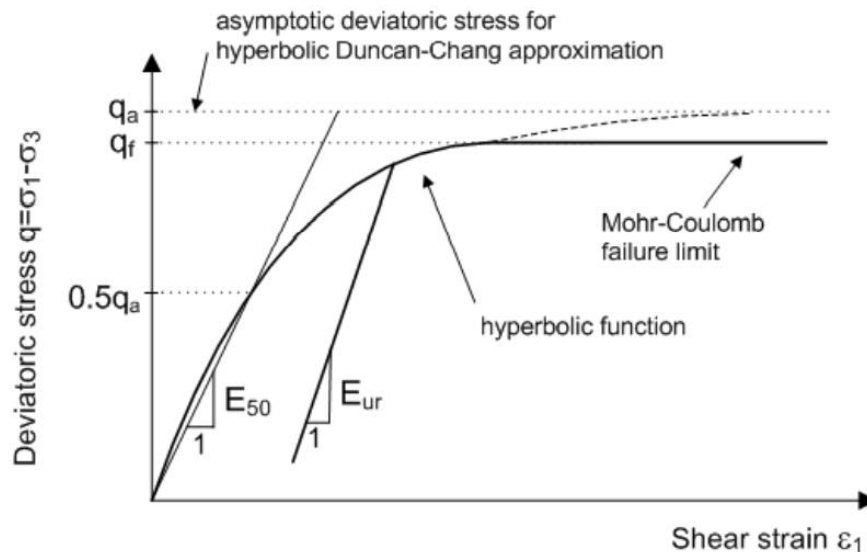


Figura 19 Relación hiperbólica esfuerzo-deformación

Fuente: Obrzurd (2018)

Ya que los resultados de los análisis de las deformaciones del suelo deben ser realistas y relevantes, es importante que la relación esfuerzo-deformación del suelo se represente en una

manera acertada y razonable. Esto es sumamente complicado, debido a que las características del suelo son complejas, y el comportamiento del suelo es no lineal, inelástico y fuertemente dependiente de los esfuerzos que se apliquen al suelo.

El modelo hiperbólico se desarrolló con el intento de cambiar la perspectiva de ver el suelo, alentando las características más importantes de la relación esfuerzo-deformación del suelo, usando datos obtenidos por ensayos de laboratorio. El propósito de esta sección es evaluar los parámetros hiperbólicos del suelo para presentar resultados más verídicos. Existe un término llamado “Stress dependent stiffness” el cual indica, que a mayor presión de confinamiento o esfuerzo, mayor rigidez se tendrá en el suelo. (Obrzurd, 2018)

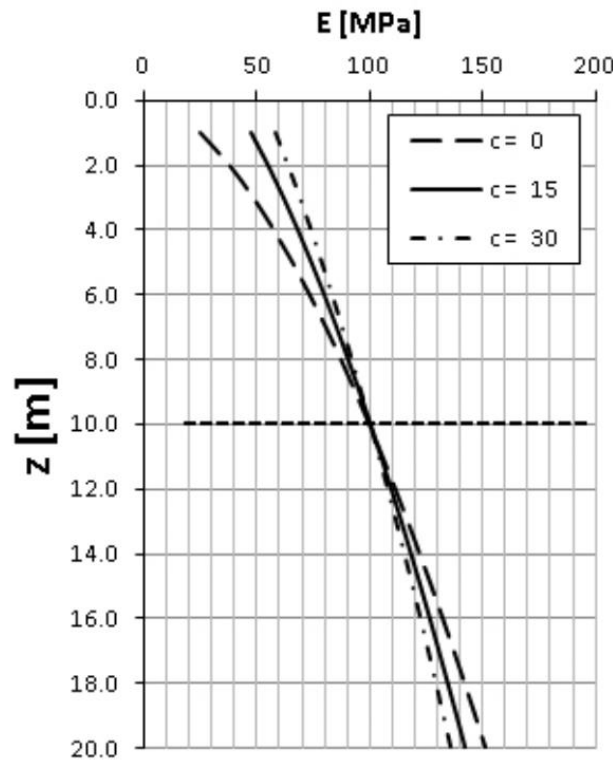


Figura 20 Módulo de elasticidad para diferentes profundidades del suelo usando la cohesión como parámetro base

Fuente: Obrzurd (2018)

**4. Softening Soil.** Existe una gran variedad de materiales, como las rocas, el concreto, algunos suelos, que se comportan por medio de un fenómeno llamado “strain softening”. Existen principalmente dos comportamientos que conducen a este fenómeno:

- a. Degradación de la rigidez, por micro fisuras o crecimiento de vacíos en el material. La roca o el concreto son ejemplos de estos materiales. La caída rápida de la rigidez en estos materiales después de haber alcanzado su resistencia máxima se atribuye a la falla en la totalidad del material. Gracias a esto, se concluye que la pérdida de resistencia en la gráfica esfuerzo-deformación es el resultado de la propagación de fracturas en el material.
- b. Degradación del límite elástico, asociado a la pérdida de cohesión en el material. Arcillas sobre consolidadas o arenas densas son ejemplos de este comportamiento. Estudios

basados en ensayos de laboratorio han demostrado que la deformación en estos materiales puede ocurrir en pruebas controladas.

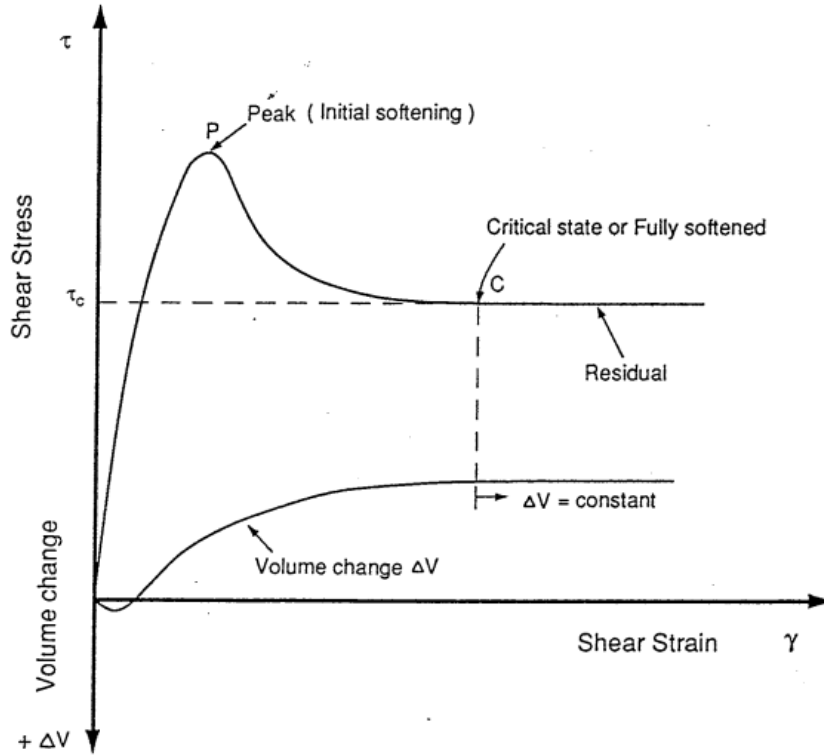


Figura 21 Gráfica de esfuerzo-deformación para un suelo granular denso

Fuente: Chen (1992)

#### D. Curva de fragilidad

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de daño que pueda alcanzar una estructura con respecto a la acción sísmica a la que puede estar sometida. El campo de estas curvas es bastante amplio, durante los últimos años se ha utilizado significativamente para el ámbito estructural, sin embargo, se han hecho estudios con esta metodología para evaluar estructuras geotécnicas.

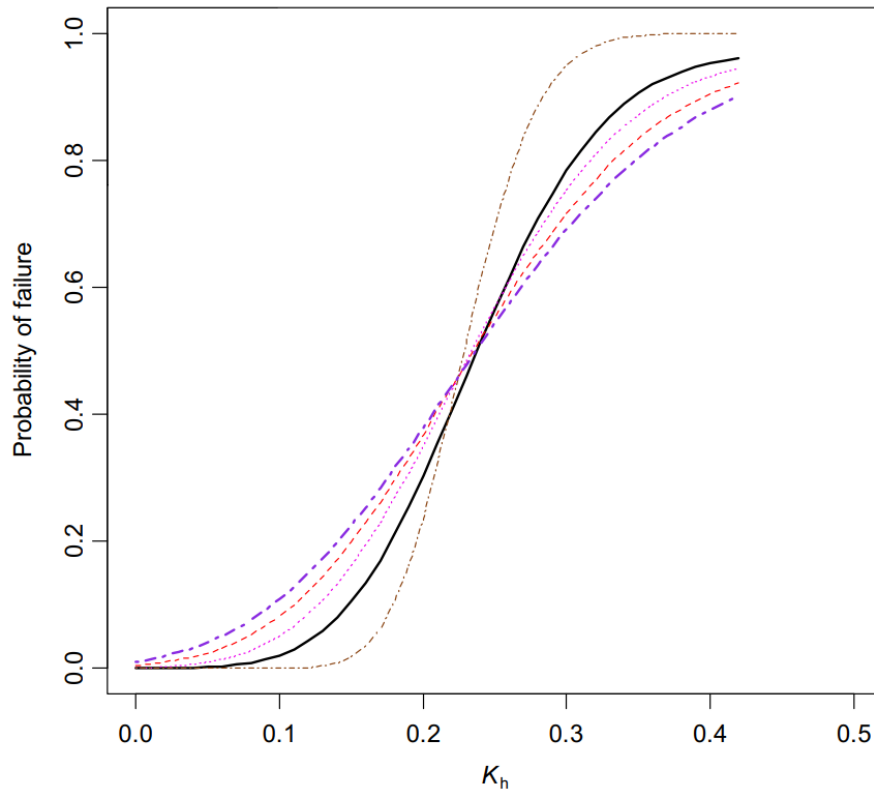


Figura 22 Curva de fragilidad

Fuente: Zheng (2014)

**1. Estructuras geotécnicas.** La cantidad de análisis para este tipo de estructuras es más reducida. Hay algunas investigaciones que proponen curvas para estructuras geotécnicas como taludes, túneles, muros de contención y estructuras de gaviones. Para este caso de estudio, se enfocará únicamente en taludes compuestos por arenas volcánicas.

Distintos riesgos geológicos han incrementado el peligro en el área de taludes, dando como resultados deslizamientos. Esto dirige el estudio al reconocimiento de vulnerabilidad en estas geoestructuras y el potencial que tienen para afectar las vidas humanas, causando serios daños y pérdidas económicas. Una de las maneras de mitigar estos problemas es por medio del análisis de taludes y la predicción de daños que pueden generar. Idealmente, se debe aceptar con cierto grado de credibilidad.

Haciendo énfasis en las geoestructuras, también se puede mencionar que el riesgo incrementa con lluvias u otros factores externos que impactan de forma negativa a los taludes, generando más preguntas acerca de la preparación que tienen los ingenieros geotecnistas ante estas situaciones. El comportamiento de estas estructuras se puede determinar por medio de funciones de fragilidad, o curvas de fragilidad.

Las curvas de fragilidad proporcionan un panorama más amplio y una perspectiva mucho más comprendida ante este tipo de escenarios. Para ello es importante tomar en cuenta que, el incremento de la altura de un talud produce cambios en las curvas de fragilidad, ya que la

probabilidad de falla es asociada con taludes más altos. El incremento en la inclinación también tiene un impacto importante en la falla. Se menciona esto, ya que la geometría de la geoestructura es bastante relevante al momento de determinar los factores de seguridad.

## VI. METODOLOGÍA

En esta sección se muestran las aplicaciones de los principios aprendidos de la mecánica de suelos e ingeniería geotécnica, tomando como foco principal el modelado de geoestructuras. Un modelo es una simplificación de la realidad, el modelador debe ser habilidoso para ser minucioso y observar todos los escenarios a considerar al momento de evaluar el cuerpo de suelo. Muchos ingenieros se apresuran a tomar decisiones, y hacen asunciones inapropiadas para un caso en particular.

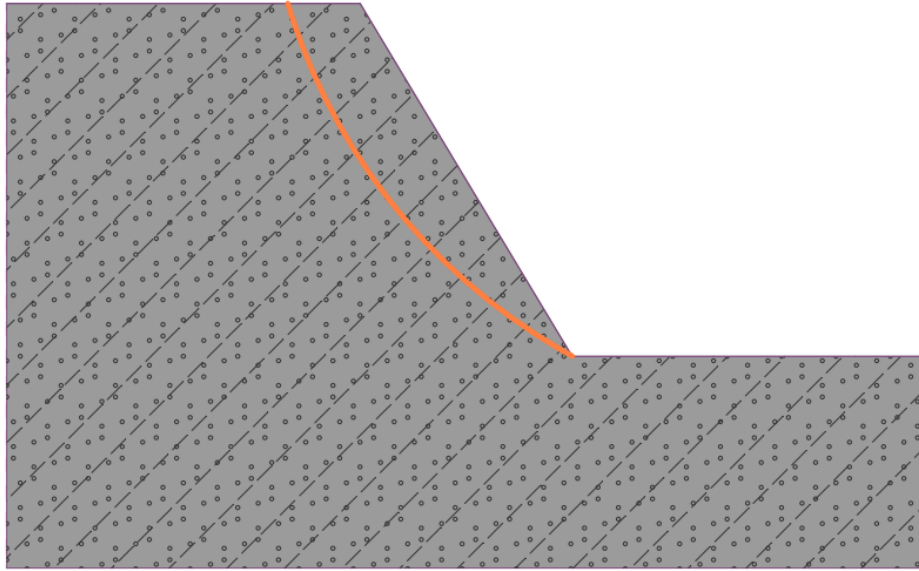
La Ingeniería está relacionada con el modelado, y también se enfoca en la manera de buscar soluciones a problemas de la vida real. Es necesario tener la capacidad de ver la esencia de los problemas e identificar las características primordiales del mismo, para entender cómo solventar el problema y lo más importante, cómo modelarlo en el software.

En el siguiente capítulo, se presentarán los métodos para evaluar las arenas volcánicas de Guatemala. Para este caso, se decidió utilizar el software Plaxis 2D, el cual permite tener una amplia gama de funciones y variables para lograr escenarios con mayor exactitud y obtener parámetros más conservadores.

### A. Metodología de análisis de taludes

**1. Metodología por equilibrio límite.** El análisis de equilibrio límite considera las fuerzas o los momentos equilibrantes de una masa de suelo sobre una falla potencial en la superficie de esta. Se asume que el suelo en la superficie para este caso debe ser rígido. La principal característica de este método es que considera partes del talud a analizar para conformar el plano de falla del mismo. Para este análisis existen distintos métodos, Bishop simplificado, Spencer, Morgenstern, entre otros.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de un talud evaluado por el método de Bishop en Geo5.



La superficie de deslizamiento después de la optimización.

**Verificación de estabilidad de taludes (Bishop)**

Suma de fuerzas activas :  $F_a = 1383.20$  kN/m

Suma de fuerzas pasivas :  $F_p = 1687.50$  kN/m

Momento de deslizamiento :  $M_a = 58813.58$  kNm/m

Momento estabilizador :  $M_p = 71752.34$  kNm/m

Factor de seguridad =  $1.22 < 1.50$

**Estabilidad del talud NO ACEPTABLE**

Figura 23 Análisis por Equilibrio Límite

Fuente: (Elaboración propia)

Debido a que la metodología para equilibrio límite es totalmente diferente a la de elementos finitos, se obtiene un Factor de Seguridad más alto, porque no está tomando en cuenta todos los escenarios que pueden suceder en la geoestructura. Por otro lado, el método de elementos finitos toma en cuenta la reducción de resistencia, el cuál analiza los parámetros más bajos que permite el talud antes de que falle y los compara con los que se definieron al principio, de esta manera se obtiene el factor de seguridad.

**2. Modelado por elemento finitos.** El modelado por elementos finitos ha sido una herramienta que se ha venido utilizando durante los últimos 50 años. Permite realizar modelos más avanzados por medio de modelos constitutivos especiales para cada tipo de suelo.

Para la geometría del talud se planteó calcular una geoestructura que estuviera a punto de fallar, esto con el fin de comparar el método de equilibrio límite con el de elementos finitos. Se considera importante realizar esta comparación, ya que, en muchas ocasiones, los modeladores no conocen el riesgo que puede ser, hacer que cumpla un talud en sus factores de seguridad cuándo el programa ya está siendo bastante conservador.

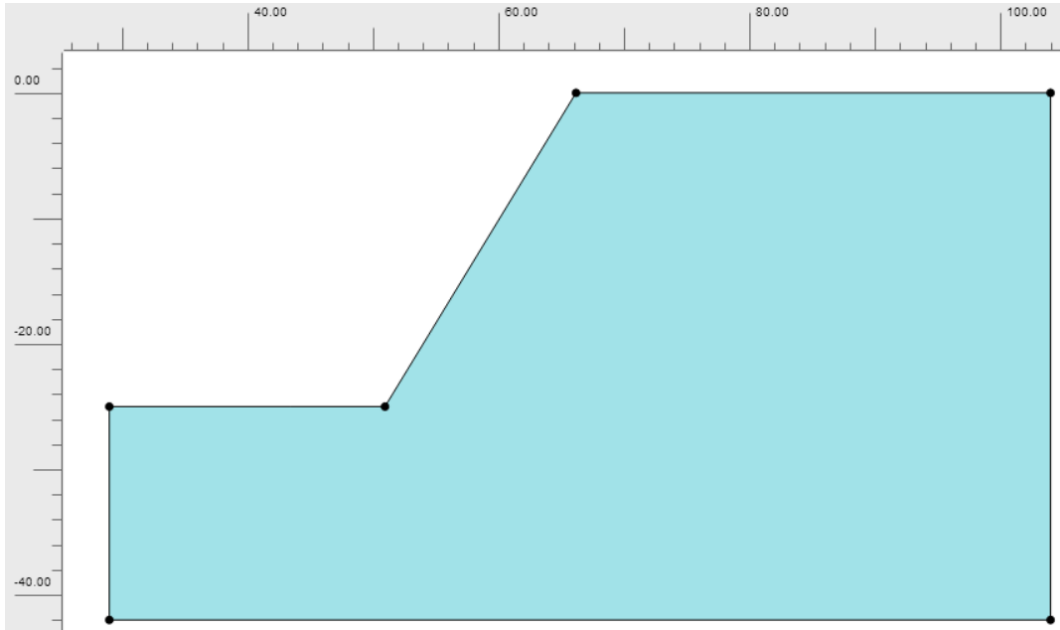


Figura 24 Geometría de talud evaluado

Fuente: (Elaboración propia)

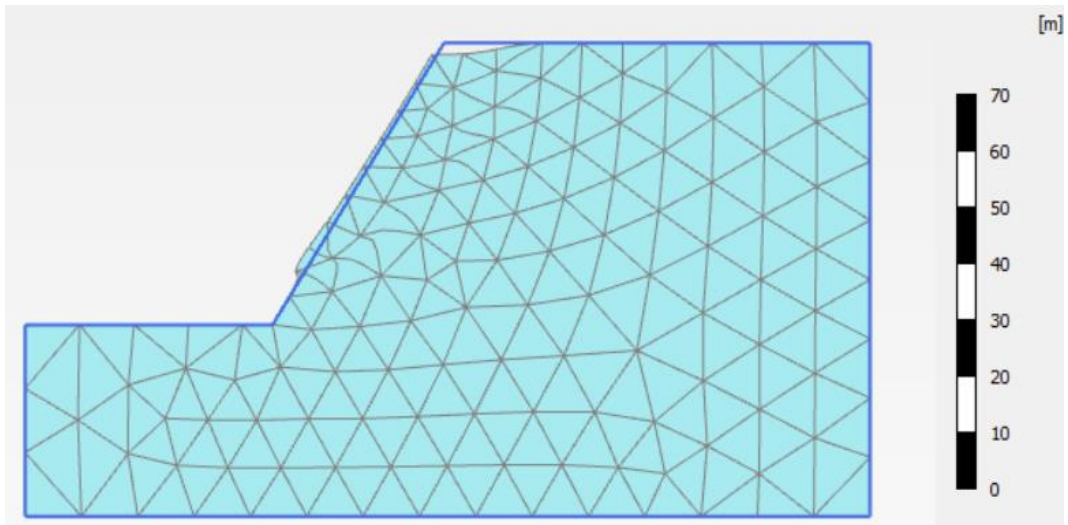


Figura 25 Resultados de Mesh deformado

Fuente: (Elaboración propia)

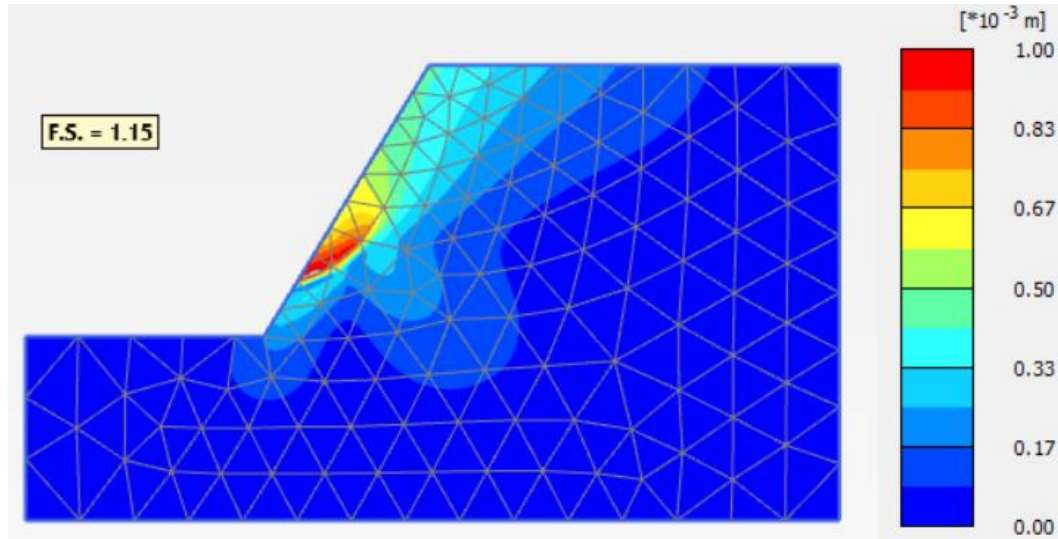


Figura 26 Resultados de Deformaciones del talud

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 1 Módulos para talud típico por Mohr Coulomb

Material	Módulo de elasticidad (kPa)	Módulo de Poisson (v)
Arena limosa	20,000	0.30

Tabla 2 Parámetros para talud típico por Mohr Coulomb

Material	Peso húmedo (kN/m <sup>3</sup> )	Ángulo de fricción (φ)	Cohesión (Kpa)
Arena limosa	14.00	40	20

## B. Modelo para análisis de taludes compuestos por arenas volcánicas de Guatemala

**1. Planteamiento de los modelos constitutivos.** El primer modelo constitutivo que se tomó en cuenta para el análisis fue el de Mohr Coulomb. Este modelo es el más común en el mundo de los suelos. La especificación de este modelo y su criterio implica una relación lineal entre la resistencia al esfuerzo cortante del suelo y un esfuerzo normal actuando sobre el mismo.

$$\tau = c - \sigma \tan \phi$$

El segundo modelo constitutivo que se integró para este análisis fue Hardening Soil. Este es un modelo de elastoplástico de modelo hiperbólico, formulado en el marco de la plasticidad de endurecimiento por cizallamiento. Además, simula una resistencia adicional del suelo conforme se va consolidando el material. Este modelo de segundo orden se puede utilizar para simular el comportamiento de arenas y gravas, así como tipos de suelo más blandos, como arcillas y limos

**2. Calibración del modelo por medio de retroanálisis.** Cuando un talud falla, puede proveer información valiosa para entender las condiciones del talud al momento del deslizamiento. Cada vez que falla un talud, es porque su factor de seguridad llegó a un valor menor a 1. Con el modelo de retroanálisis es posible comprender las fallas de taludes que han

ocurrido con el paso de los años. Se creó con el fin de establecer las condiciones que tenía la geoestructura en su momento.

En muchas ocasiones existe información extra que pueden ayudar a obtener una mejor estimación de la resistencia a corte del suelo en ese talud. Para esta sección, se decidió evaluar el talud que falló en el Cambray II en 2015. El modelado por elementos finitos se realizó para los dos modelos constitutivos mencionados anteriormente.

**Análisis del talud del Cambray II por Mohr Coulomb:**

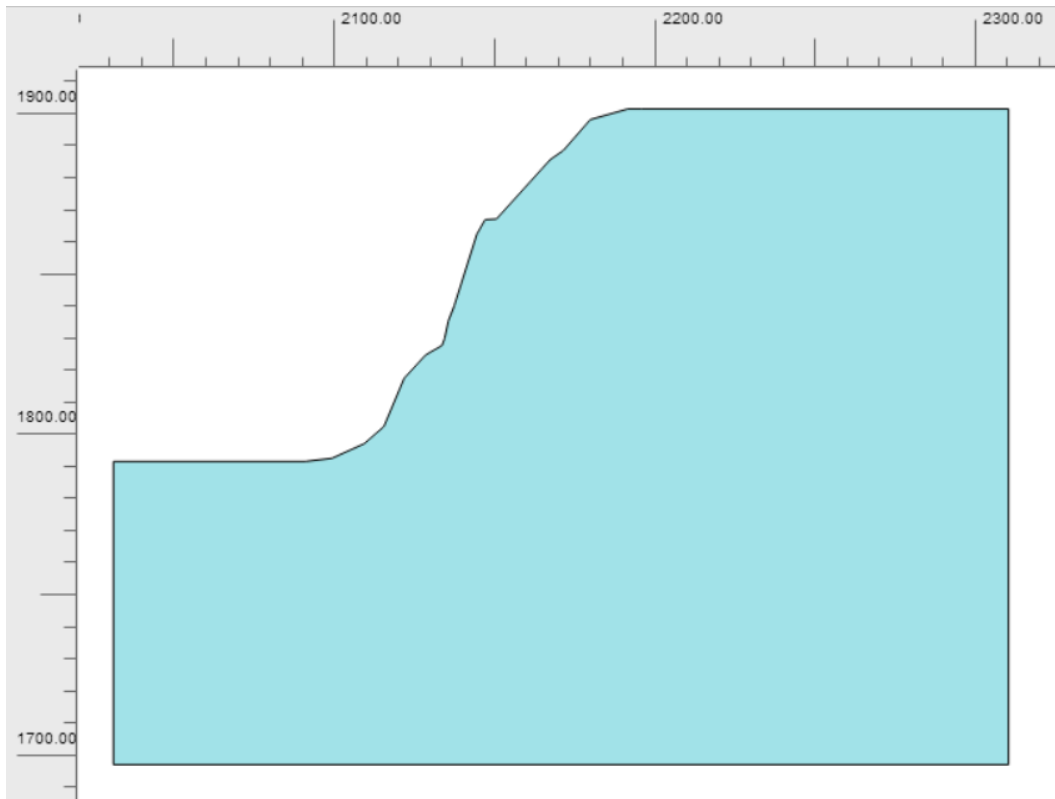


Figura 27 Perfil antes del deslizamiento del Cambray II

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 3 Módulos utilizados para las arenas de Guatemala por Mohr Coulomb

Material	Módulo de elasticidad (kPa)	Módulo de Poisson (ν)
Arena limosa	20,000	0.30

Tabla 4 Parámetros basados en la geología de Guatemala por Mohr Coulomb

Material	Peso húmedo (kN/m <sup>3</sup> )	Ángulo de fricción (φ)	Cohesión (Kpa)
Arena limosa	14.00	40	15

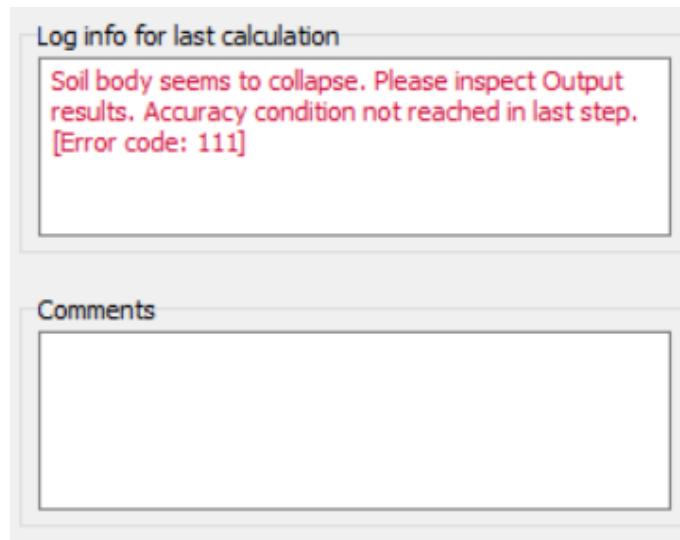


Figura 28 Resultados obtenidos para el caso no.1

Fuente: (Elaboración propia)

Al momento de modelarlo por medio de Mohr Coulomb con los parámetros establecidos en las tablas no. 1 y 2, el programa advierte al usuario de que la estructura es inestable por mucho. Aun habiendo utilizado parámetros del suelo que son comunes para la geología de Guatemala (arenas volcánicas) el talud colapsa. Esto da un indicio de que el modelo que se está utilizando no es el correcto para comprender el comportamiento de este suelo. Sabiendo esto, se decidió utilizar el retroanálisis para entender los parámetros que tenía el suelo cuando falló en 2015.

Tabla 5 Módulos asumidos por el modelo de retroanálisis

Material	Módulo de elasticidad (kPa)	Módulo de Poisson (v)
Arena limosa	20,000	0.30

Tabla 6 Parámetros asumidos por medio del retroanálisis

Material	Peso húmedo (kN/m <sup>3</sup> )	Ángulo de fricción (φ)	Cohesión (Kpa)
Arena limosa	14.00	40	75

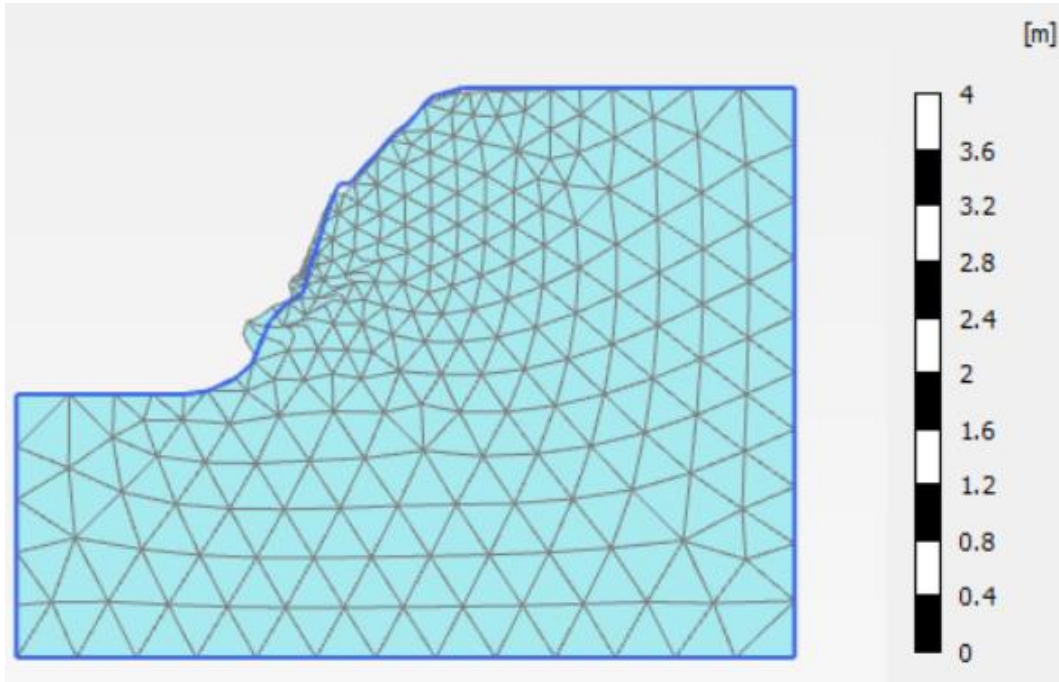


Figura 29 Mesh deformado para el análisis por Mohr Coulomb

Fuente: (Elaboración propia)

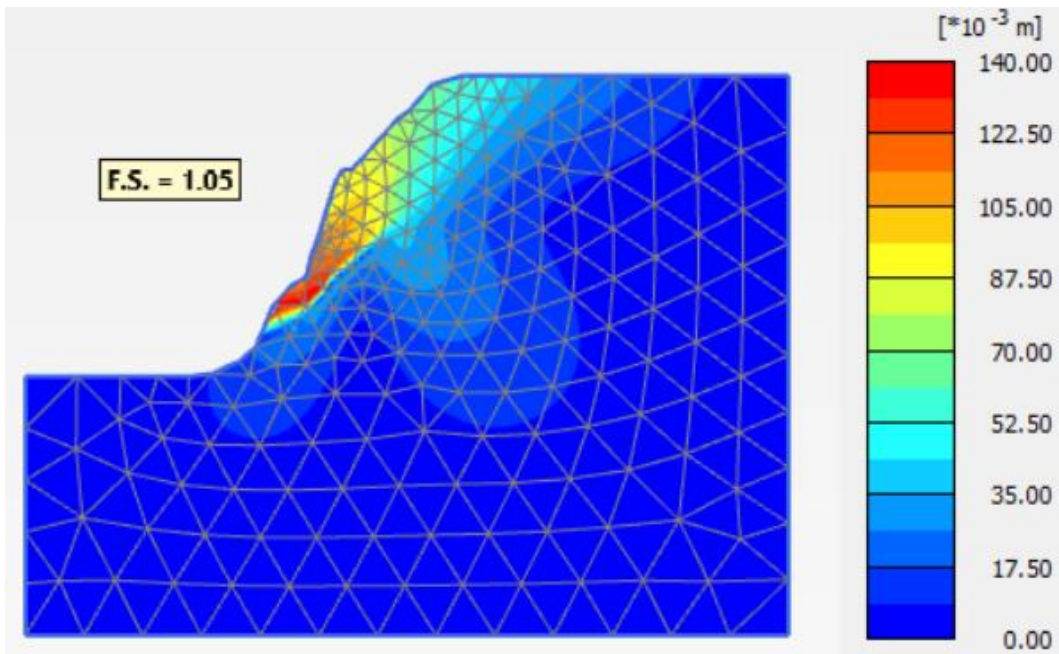


Figura 30 Deformaciones obtenidas para el análisis por Mohr Coulomb

Fuente: (Elaboración propia)

Después de haber utilizado los parámetros que tenía el talud por medio de retroanálisis, se puede observar que el talud cumple con los valores asignados. El talud necesitó una cohesión de 75 kPa para alcanzar un factor de seguridad de 1. Sin embargo, este valor está asumido desde los primeros metros del talud hasta los últimos, es decir que se analizó con una cohesión lineal desde los suelos

superficiales, hasta los más profundos, pero en la rama de la geotecnia, esto es incoherente. A continuación, se muestra el análisis por medio del modelo constitutivo Hardening Soil.

### Análisis del talud del Cambray II por Hardening Soil:

Tabla 7 Módulos utilizados las arenas de Guatemala por Hardening Soil

Material	$E_{50}$ (kPa)	$E_{oed}$ (kPa)	$E_{ur}$ (kPa)	Power
Arena limosa	20,000	20,000	60,000	0.10

Tabla 8 Parámetros basados en la geometría de Guatemala por Hardening Soil

Material	Peso húmedo (kN/m <sup>3</sup> )	Ángulo de fricción ( $\phi$ )	Cohesión (Kpa)	Ángulo de dilatación ( $\psi$ )	C'inc (kN/m <sup>2</sup> /m)
Arena limosa	14.00	40	15	5	1.5

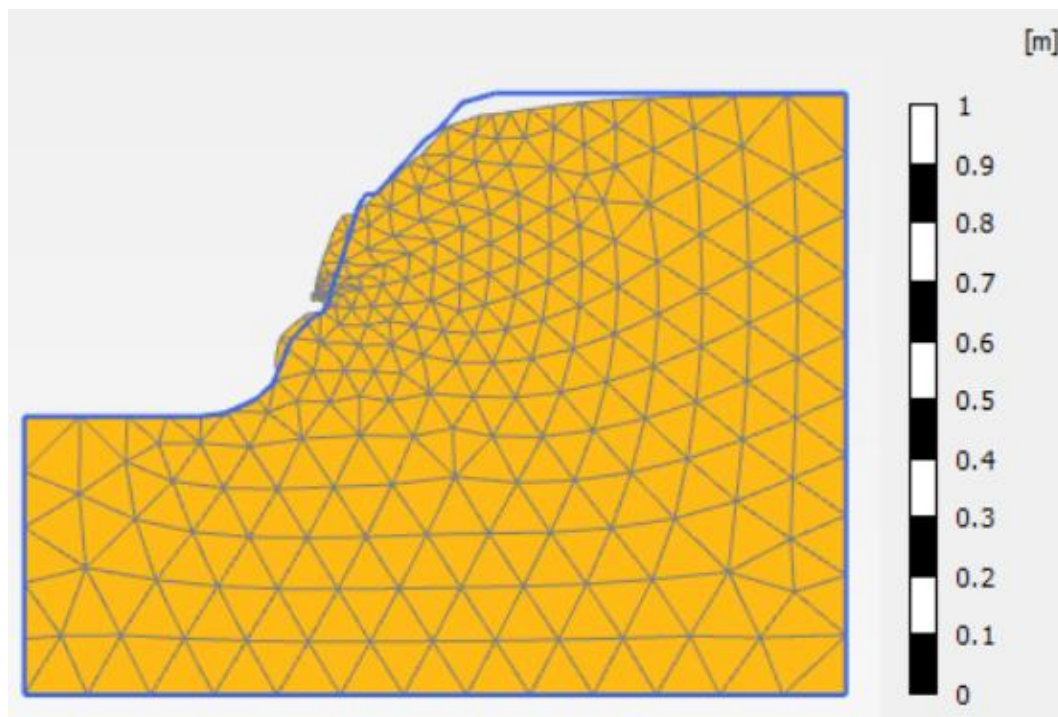


Figura 31 Mesh deformado para el análisis por Hardening Soil

Fuente: (Elaboración propia)

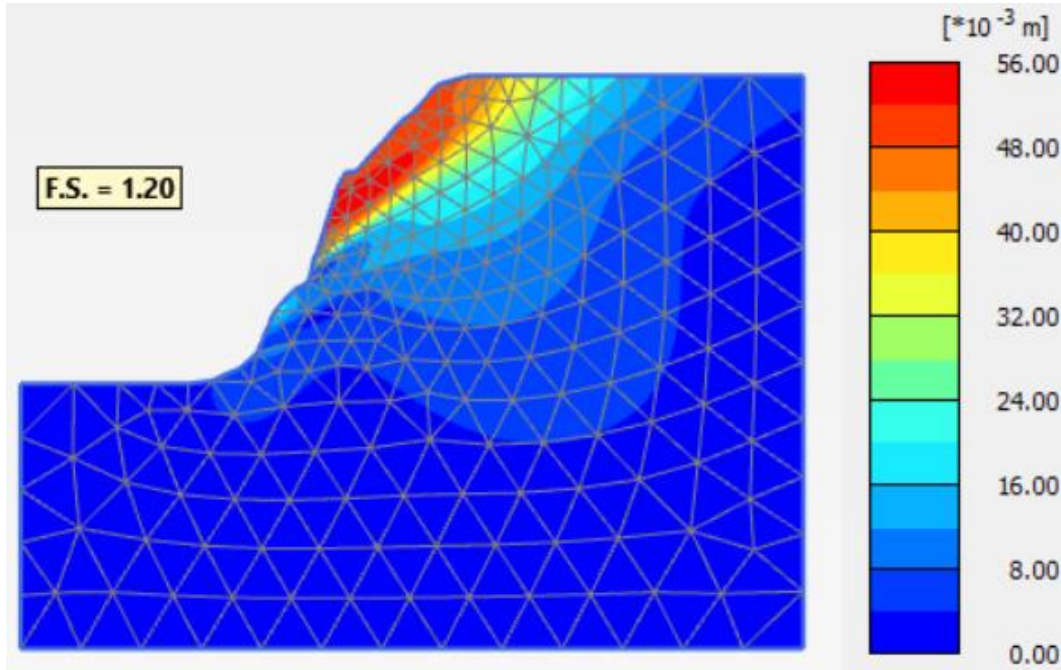


Figura 32 Deformaciones obtenidas para el análisis por Hardening Soil

Fuente: (Elaboración propia)

### C. Procedimiento del modelado

**1. Interfaz de Plaxis.** Antes de empezar a modelar, es primordial crear la geometría del talud a analizar, para este caso se analizó el talud antes de fallar del Cambray II.

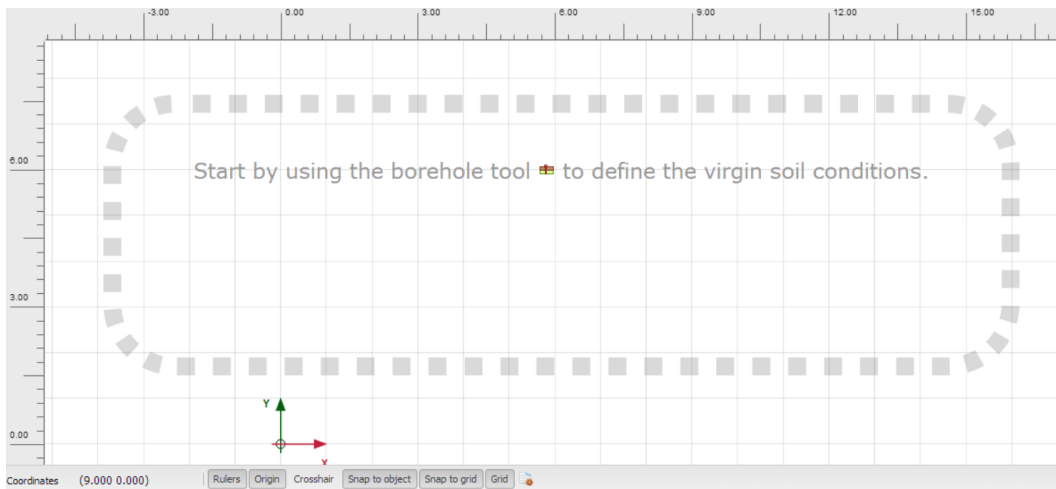


Figura 33 Menú principal para modelado

Fuente: (Elaboración propia)

**2. Definición de parámetros para cada modelo constitutivo.** La rama de la geotecnia puede llegar a ser un poco complicada en cuanto al análisis teórico del suelo. Puede llegar a ser difícil de tratar con los suelos, es por ello por lo que la base de esta rama debe ser la experiencia. Muchas de las técnicas utilizadas para el modelado han sido semi-empíricas más que empíricas,

esto por la complejidad de los escenarios que se pueden llegar a dar en el modelado de los suelos. Se llegó a la idea de que, para este tipo de situaciones es vital la experiencia para entender los resultados que brinda el programa. (Muir, 2004)

Property	Unit	Value
<b>Material set</b>		
Identification		Arena Limosa
Material model		Mohr-Coulomb ←
Drainage type		Drained
Colour		RGB 161, 226, 232
Comments		Material especial en Guatemala.
<b>General properties</b>		
$Y_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	14.00
$Y_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	15.00

Figura 34 Características del material analizado por Mohr Coulomb

Fuente: (Elaboración propia)

Property	Unit	Value
<b>Stiffness</b>		
$E'$	kN/m <sup>2</sup>	20.00E3
$\nu'$ (nu)		0.3000
<b>Alternatives</b>		
G	kN/m <sup>2</sup>	7692
$E_{oed}$	kN/m <sup>2</sup>	26.92E3
<b>Strength</b>		
$c'_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	20.00
$\phi'$ (phi)	°	40.00
$\psi$ (psi)	°	0.000

Figura 35 Parámetros integrados para el análisis

Fuente: (Elaboración propia)

Como bien se mencionó anteriormente, el modelo Mohr Coulomb es un modelo constitutivo que aproxima el comportamiento del suelo y por lo tanto, tiende a ser irreal. Aunque para los primeros resultados se debe analizar por este modelo para tener un acercamiento a la solución del problema, no es un modelo verídico para este caso. Por otro lado, existe el modelo “Hardening Soil” el cual permite modelar el suelo por medio de un modelo hiperbólico de Duncan-Chang. En donde los módulos son más grandes a mayor profundidad.



Property	Unit	Value
<b>Material set</b>		
Identification		SELECTO HS
Material model		Hardening soil 
Drainage type		Drained
Colour		 RGB 207, 2, 36
Comments		Arenas volcánicas de Guatemala.
<b>General properties</b>		
$Y_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	14.00
$Y_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	15.00

Figura 36 Características del material analizado por Hardening Soil

Fuente: (Elaboración propia)

Property	Unit	Value
<b>Stiffness</b>		
$E_{50}^{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	20.00E3
$E_{oed}^{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	20.00E3
$E_{ur}^{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	60.00E3
power (m)		0.1000
<b>Alternatives</b>		
Use alternatives		<input type="checkbox"/>
$C_c$		0.01725
$C_s$		5.175E-3
$e_{init}$		0.5000
<b>Strength</b>		
$c'_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	15.00
$\phi'$ (phi)	°	40.00
$\psi$ (psi)	°	5.000
<b>Advanced</b>		
Set to default values		<input type="checkbox"/>
<b>Stiffness</b>		
$v'_{ur}$		0.2000
$P_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	100.0
$K_0^{nc}$		0.3572
<b>Strength</b>		
$c'_{inc}$	kN/m <sup>2</sup> /m	1.500
$\gamma_{ref}$	m	198.0
$R_f$		0.9000

Figura 37 Parámetros integrados en el modelo Hardening Soil

Fuente: (Elaboración propia)

**3. Definición de mallado.** Todos los elementos del modelo están conectados entre sí por nodos, el conjunto de ítems se les denomina malla. El discretizado del mallado dependerá de lo que se quiere analizar, para este caso, se escogió una densidad media del mallado.

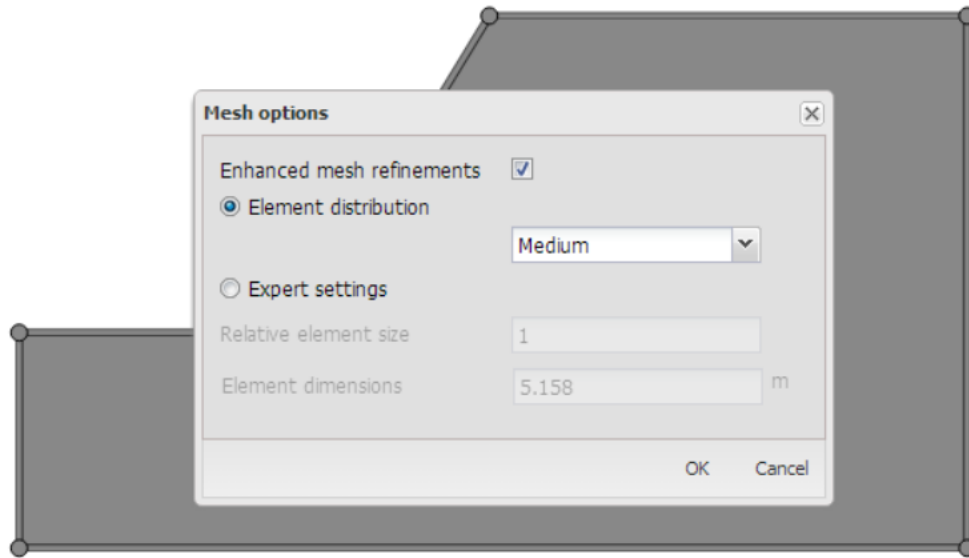


Figura 38 Selección del discretizado del mallado

Fuente: (Elaboración propia)

## VII. RESULTADOS

### A. Análisis de sensibilidad de talud típico

La inestabilidad de taludes puede ocurrir debido a la influencia de los parámetros del suelo, los cuales consisten en el peso unitario ( $\gamma$ ), cohesión ( $c$ ), y el ángulo de fricción ( $\phi$ ). Los valores de estos parámetros no son constantes, dependen muchas veces de otros factores externos como profundidad, humedad, saturación, entre otros, que hacen que sea difícil de calcular los valores con certeza. Estos valores tienden a manejarse por rangos, en donde no siempre se maneja únicamente un número, sino un rango de valores para lograr una mejor estimación. (Surjandari, 2019)

El análisis de sensibilidad se utiliza para determinar el efecto que tendrá la variación de los parámetros del suelo en la estabilidad de taludes. Con ellos, se puede obtener los efectos que tendrá el talud, así como los cambios que se produzcan en el factor de seguridad. Este análisis provee una perspectiva externa en donde se considera todos los casos posibles a los que puede estar sometido una geoestructura. Funciona cambiando el valor de un parámetro para evaluar qué tanto afecta el sistema que se está analizando. (Surjandari, 2019)

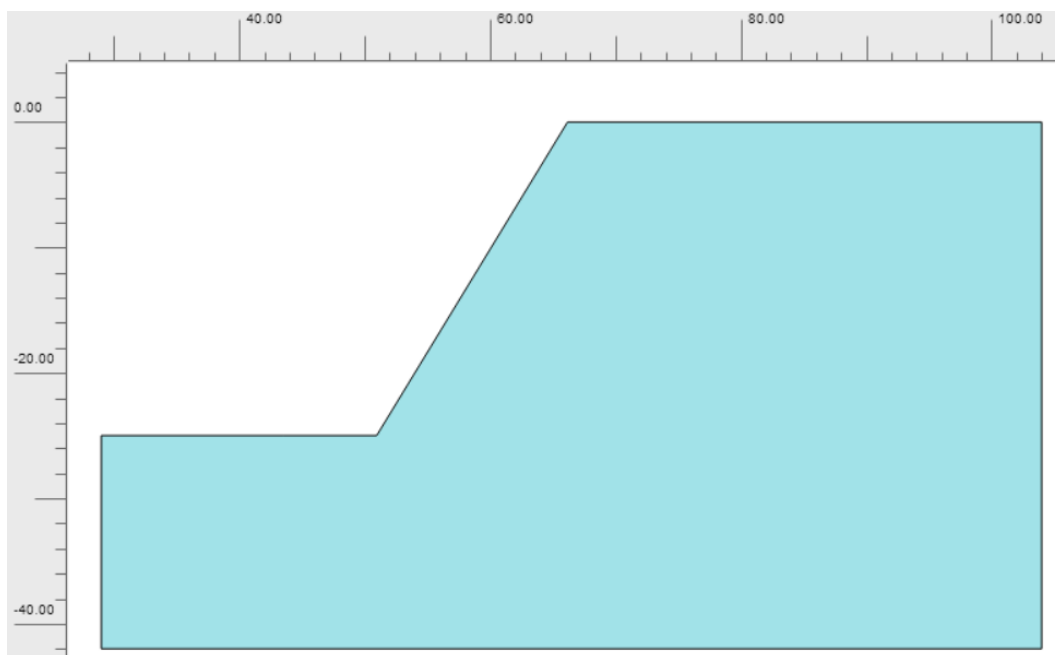


Figura 39 Análisis de sensibilidad por Mohr Coulomb para un talud típico

Fuente: (Elaboración propia)

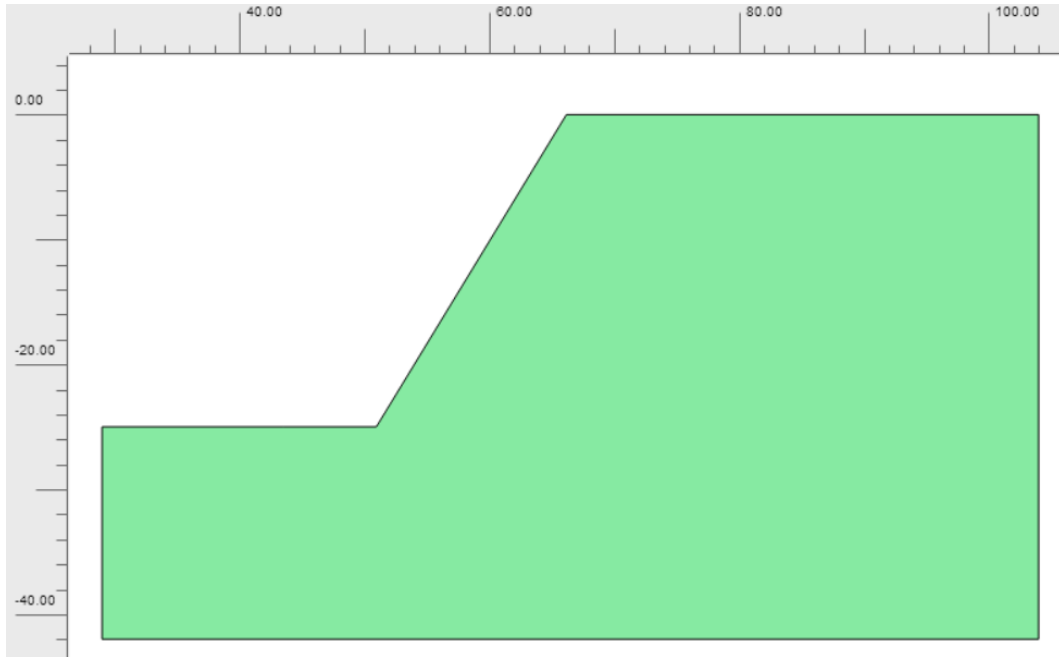


Figura 40 Análisis de sensibilidad por Hardening Soil para un talud típico

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 9 Peso unitario vs factor de seguridad para ambos modelos constitutivos

<b>Mohr Coulomb</b>		<b>Hardening Soil</b>	
Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	F.S.	Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	F.S.
12	1.24	12	1.81
13	1.19	13	1.74
14	1.15	14	1.68
15	1.12	15	1.62
16	1.09	16	1.57

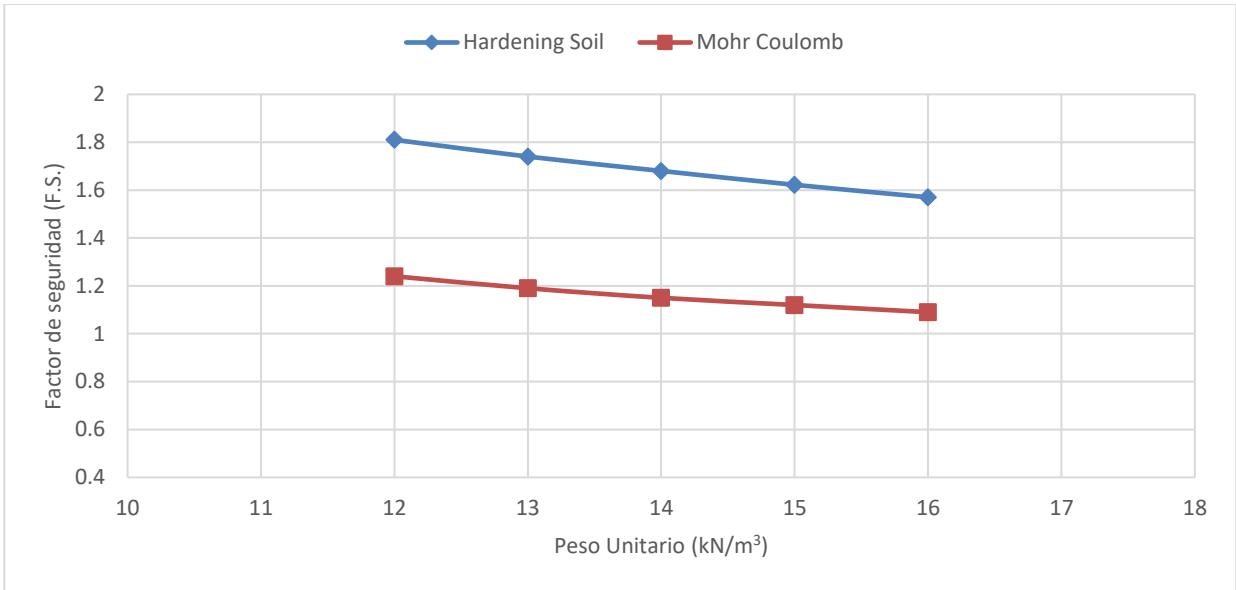


Figura 41 Análisis de sensibilidad para el peso unitario

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 10 Cohesión vs factor de seguridad para ambos modelos constitutivos

<b>Mohr Coulomb</b>		<b>Hardening Soil</b>	
Cohesión (kPa)	F.S.	Cohesión (kPa)	F.S.
15	1.061	15	1.584
20	1.163	20	1.685
25	1.282	25	1.774
30	1.394	30	1.852
35	1.510	35	1.952
40	1.612	40	2.033
45	1.711	45	2.100

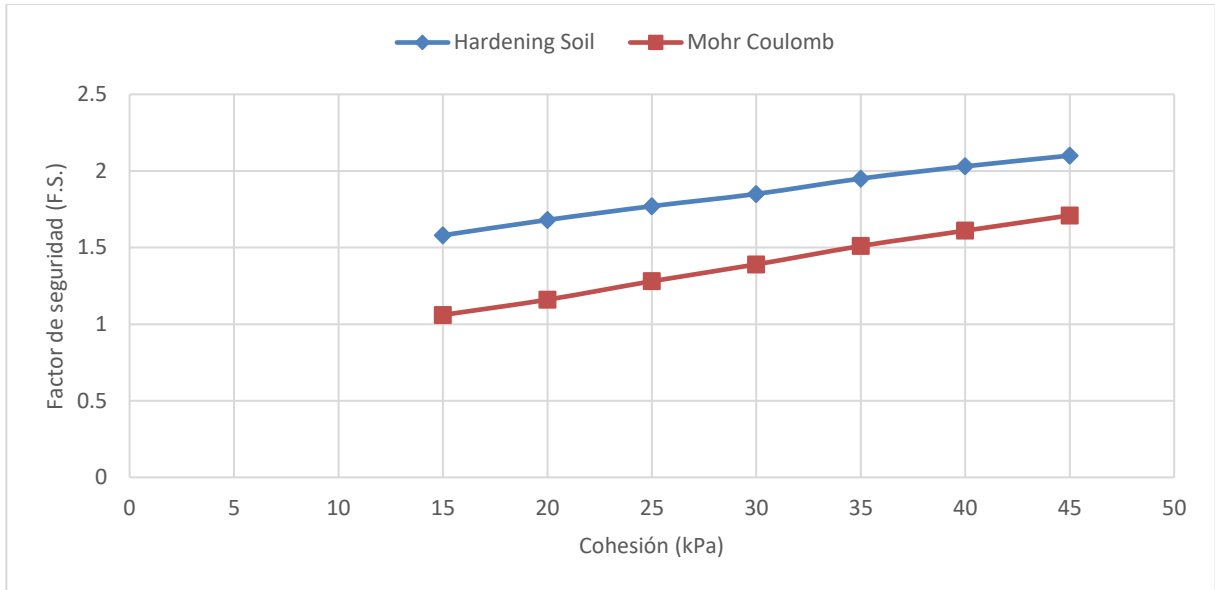


Figura 42 Análisis de sensibilidad para la cohesión

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 11 Ángulo de fricción vs factor de seguridad para ambos modelos constitutivos

<b>Mohr Coulomb</b>		<b>Hardening Soil</b>	
Ángulo de fricción (°)	F.S.	Ángulo de fricción (°)	F.S.
33	1.002	33	1.470
34	1.025	34	1.498
35	1.037	35	1.530
36	1.061	36	1.551
37	1.076	37	1.584
38	1.109	38	1.627
39	1.127	39	1.649

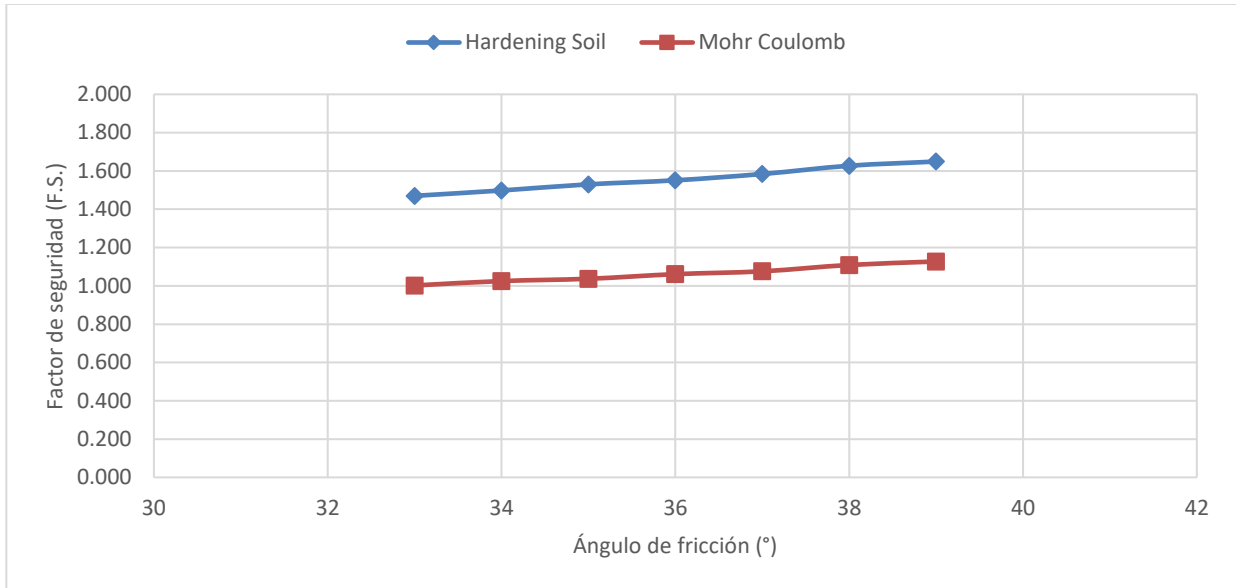


Figura 43 Análisis de sensibilidad para el ángulo de fricción

Fuente: (Elaboración propia)

La Tabla no. 9 muestra que el incremento del peso unitario tiende a disminuir el factor de seguridad. Es importante mencionar que el rango de valores es poco influyente en el factor de seguridad del talud evaluado para ambos modelos constitutivos, se puede observar que para Hardening Soil existe mayor factor de seguridad debido al incremento de cohesión conforme aumenta la profundidad del estrato, en este caso la arena. Para esta sección de la investigación se procuró utilizar datos coherentes y comúnmente utilizados en el campo de la geotecnia.

Se puede observar también en la Tabla no. 10, que la cohesión es un factor sumamente significativo en la variación del factor de seguridad del talud evaluado. Para ello se tomaron rangos de 5 en 5, ya que usualmente se tiende a trabajar con valores aproximados en el campo laboral. El comportamiento de este parámetro es diferente en comparación con el peso unitario, ya que, al aumentar la cohesión, también se aumenta el factor de seguridad. Es necesario hacer énfasis, en que este parámetro es el más sensible de los tres.

Por último, en la Tabla no. 11 se muestran los valores obtenidos para la variación del ángulo de fricción. Al igual que el peso unitario, este parámetro tiene un rango de 1 en 1. Al igual que en la gráfica de la cohesión, el factor de seguridad incrementa conforme va aumentando el ángulo de fricción, sin embargo, la sensibilidad no es fuerte, es decir, que, aunque aumenta, no influye grandemente en la variación del ángulo, lo que indica una vez más, que la cohesión es un parámetro bastante sensible al momento de realizar un análisis de estabilidad de taludes.

## B. Curva de fragilidad

La curva de fragilidad ha sido ampliamente utilizada en estructuras, pero la cantidad de análisis para estructuras geotécnicas es más reducida. Hoy en día, se han aplicado curvas para estructuras geotécnicas como taludes, túneles, muros de contención y estructuras de gaviones. Además, esta herramienta es esencial para medir los niveles de daño que tendrán los taludes.

En esta sección se presentan las mayores deformaciones que puede tener el talud típico evaluado en el capítulo de análisis de sensibilidad.

Tabla 12 Datos para la variación de cohesión en el talud por Hardening Soil

Cohesión (kPa)	F.S.	Deformación (mm)
17	1.045	82.71
20	1.124	37.68
25	1.209	24.88
30	1.239	18.71
35	1.259	14.46
40	1.3	13.08
45	1.387	12.64

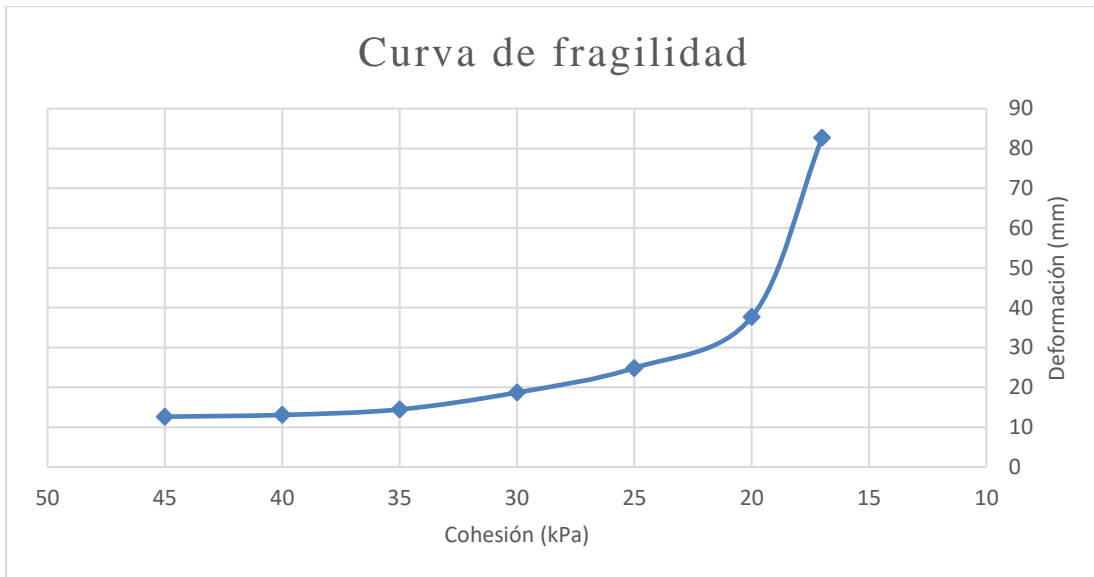


Figura 44 Curva de fragilidad para talud típico

Fuente: (Elaboración propia)

Se debe mencionar primero, que el modelo constitutivo para esta sección es clave al momento de medir los niveles de daño del talud. Para ello se utilizó Hardening Soil, ya que se quería acercar este caso lo más posible a la realidad. Este modelo al asumir de que mientras más profundo el suelo, mayor es la cohesión de este, se vuelve sumamente fundamental para el análisis de la curva de fragilidad.

Sabiendo esto, se realizaron diferentes simulaciones del talud visto en la sección A de este capítulo. El principal objetivo de esto fue evaluar las deformaciones que tendrá la geoestructura para la variación del parámetro de la cohesión. Se consideró un rango de 17-45 kPa, los cuales son valores razonables y usuales para la geología del valle de Guatemala. Además de la deformación, el otro dato que fue útil para esta sección fue el factor de seguridad.

Como se puede observar en la Tabla no. 12, el factor de seguridad y deformación del talud son directamente proporcionales a la cohesión. Cabe resaltar, que la metodología que utiliza Plaxis

reconoce cuando un talud no alcanza un factor de seguridad de 1. Por lo tanto, se concentraron esfuerzos en obtener el valor más cercano a 1, para medir la deformación que máxima que tiene el talud antes de que falle, ya que lo que no se quiere que pase en una geoestructura como estas, que están compuestas por material volcánico es que se produzca una falla.

En la gráfica se produce un efecto inusual, y es que como se puede analizar, la tendencia de la curva iba de manera parabólica hasta que llegó al menor valor de cohesión que aceptaba Plaxis, el cual fue de 17kPa. En este valor, la curva se dispara, lo que indica que existe un gran nivel de daño en el talud precisamente en ese punto. Si se observa detenidamente los valores de cohesión, hay un aumento significativo de deformación al momento de reducir la cohesión de 20kPa a 17kPa, es más del 100%.

Por ello, la curva de fragilidad tiene un papel muy importante en un país tan montañoso y con un suelo tan complejo como las arenas volcánicas, porque con una leve variación de cohesión, el talud es mucho más propenso a fallar en su totalidad.

## VIII. CONCLUSIONES

Con este trabajo de investigación, se demuestra la necesidad de entender el comportamiento de las arenas volcánicas de Guatemala para evaluar escenarios geológicos y tener un panorama más claro al momento de realizar algún proyecto en el ámbito de la ingeniería civil. En base a los objetivos planteados para este trabajo de graduación, se concluye lo siguiente:

- 1) Se desarrollaron simulaciones por medio de elementos finitos para entender el comportamiento de arenas volcánicas del valle central de Guatemala.
- 2) Se investigó que uno de los modelos que tiene para analizar las arenas volcánicas del valle central de Guatemala es Hardening Soil, ya que establece que la relación esfuerzo-deformación es hiperbólica y la resistencia del suelo es dependiente de la presión de confinamiento.
- 3) Con la ayuda del software Plaxis 2D, se alcanzó a modelar taludes compuestos por arenas volcánicas del valle central de Guatemala por medio del método de elementos finitos, el cual permite obtener esfuerzos y deformaciones para distinguir geoestructuras.
- 4) Se logró determinar que la curva de fragilidad para un talud compuesto por arenas volcánicas del valle central de Guatemala por medio del parámetro más sensible para estabilidad de taludes el cual es la cohesión.

## IX. RECOMENDACIONES

La evaluación de taludes en Guatemala es uno de los temas más críticos que existen en la región, ya que, por ser un país altamente sísmico y con un clima tropical, se pueden dar distintos escenarios que pueden ocasionar serios deslizamientos en diferentes partes de la región. Es por ello que se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- 1) Para los entes reguladores (AGIES, CONRED, MARN, municipalidades) se recomienda seguir desarrollando investigaciones para evaluar las probabilidades de falla que pueden ocurrir en las distintas geoestructuras que existen en la región.
- 2) Para los diseñadores y supervisores, se recomienda buscar soluciones al momento de tener un proyecto cercano a un talud, ya que la mayoría de estos están compuestos por arenas en la parte central de Guatemala, y si no se toma en cuenta, se puede tener una posible falla al momento de un escenario negativo.
- 3) Es recomendable para el área de la investigación, comprender los modelos constitutivos que existen en el área geotecnia, debido a que hay un modelo para un caso en específico. Al hacerlo, se tendrá resultados mucho más precisos para la evaluación de taludes por el método de elementos finitos.
- 4) Se recomienda analizar la estabilidad de taludes para el caso dinámico por medio de la integración de acelerogramas al software Plaxis 2D, en lugar de utilizar cargas pseudoestáticas.
- 5) Se recomienda seguir analizando el suelo arenoso del valle central de Guatemala, con diferentes modelos constitutivos para generar un modelo específico para este tipo de materiales en la ciudad y así generar resultados más certeros en distintas ramas de la ingeniería geotécnica.

## X. BIBLIOGRAFÍA

- Brand, M. (2013). Análisis de las propiedades mecánicas del suelo a partir de la mezcla con residuos de la construcción. Escuela de ingeniería de Antioquía.
- Callejas, F., Rubio, A. (2021). Modelo geológico tectónico de Guatemala. Guatemala.
- Chen, J. J.-R. (1992). *Numerical modelling of effects of strain softening*. Australia.
- Cheung RWM, T. W. (2005). *Realistic assessment of slope reliability for effective landslide hazard management*. Geotechnique 55(1):85-94.
- Cornforth, D. (2005). Landslides in Practice: Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils.
- Dai FC, N. Y., Lee CF. (2002). *Landslide risk assessment and management: an overview*. End Geol 64(1):65-87.
- Duncan, J.M., Peter, B., Wong, K., Mabry, P. (1980). *Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stresses and movements in soil masses*.
- Duncan, T. B., Stephen Wright. (2014). Soil strength and slope stability.
- Esteva L, R. E. (1964). *Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes*. Boletín Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
- Holtz, R., Kovacs, W. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice Hall, Inc. New Jersey.
- Keefer, D. (1984). "Landslides caused by earthquakes," Geologic Society of America Bulletin, Vol. 95, No. 2, pp. 406-421
- Kramer. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. US.
- Kumar, S., Vahedifard, F., Toan, C. (2021). *Poisson's Ratio Characteristic Curve of Unsaturated Soils*.
- Monterroso, D. (2016). Consideraciones sobre condiciones físicas asociadas al deslizamiento en el sector el Cambray II, municipio de Santa Catarina Pinula, Departamento de Guatemala.
- Lemus, A. (2020). Factores sísmicos que afectan la estabilidad en taludes. Universidad Del Valle de Guatemala.
- Obrzurd, R., Truty, A. (2018). *The Hardening soil model a practical guidebook*. Zace services Ltd, software engineering, Switzerland.
- Olgado, M., Pérez, C. (2020). El cambray 2: las dolorosas heridas que quedan del deslizamiento que dejó 280 muertos en 2015. dirección: <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/a-un-dia-de-cumplirse-cinco-anos-de-la-pesadilla-de-el-cambray-vecinos-adornan-y-recuerdan-a-sus-difuntos/>
- Perez, C. (2009). Estructura geológica del valle de la ciudad de Guatemala Interpretada Mediante un Modelo de Cuenca por Distensión. Revista Geológica de América Central, Costra Rica, 41 pp. 71-78.
- Rahman, S. (2010). *Pipe zone bedding and backfill: a flexible pipe perspective*. ASCE Pipelines Conference 2010. Keystone, Colorado, USA
- Yepes, V. (2020). *Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención*. Colección Manual de Referencia, 2ª edición. Editorial Universidad Politécnica de València, 480 pp. Ref. 328. ISBN: 978-84-9048-903-1.
- Zeng S, L. R. (2002). *Stability analysis of drilled shafts reinforce slope, Soils and Foundations*, 42(2), 93-102.