

---

# Determinación de los factores sísmicos que afectan la estabilidad de taludes

---

Antonio Lemus Aragón



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



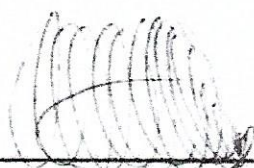
**Determinación de los factores sísmicos que afectan la  
estabilidad de taludes**

Trabajo de graduación presentado por Antonio Lemus Aragón para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil


Guatemala,

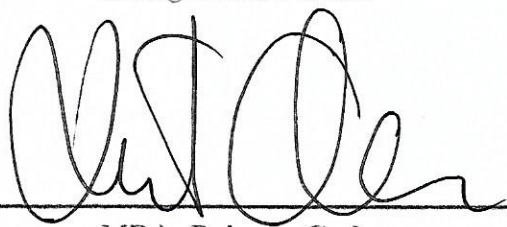
2020

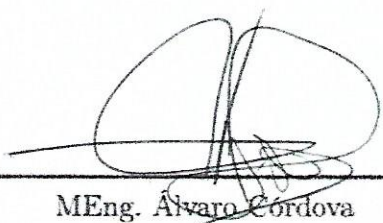
Vo.Bo.:

(f)   
MEng. Álvaro Rubio

Tribunal Examinador:

(f)   
MEng. Álvaro Rubio

(f)   
MBA. Roberto Godo

(f)   
MEng. Álvaro Córdova

Fecha de aprobación: Guatemala, 10 de JUNIO de 2020.

Agradezco a mis papás por haber hecho el sacrificio para que pudiera estudiar en la universidad. También quiero agradecer a mis compañeros ya que sin el esfuerzo en conjunto no hubiera sido posible. Otro agradecimiento a mi asesor de tesis (Álvaro Rubio) por estar pendiente de mi tesis y haber hecho un esfuerzo extra. Finalmente, quisiera agradecer a Electronics Shop, mi trabajo, porque no dudaron en darme tiempo para poder finalizarla y obtener el título.

<b>Prefacio</b>	<b>III</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>VII</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>VIII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract</b>	<b>X</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>3</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	3
2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
<b>3. Marco teórico</b>	<b>4</b>
3.1. Parámetros del suelo relevantes . . . . .	4
3.1.1. Ángulo de fricción . . . . .	4
3.1.2. Relaciones de volumen . . . . .	5
3.1.3. Relaciones de peso . . . . .	6
3.2. Fundamentos de deslizamientos . . . . .	7
3.2.1. Tipos de fallas . . . . .	7
3.2.2. Factores y causas de deslizamientos . . . . .	7
3.2.3. Procedimientos de análisis de estabilidad . . . . .	8
3.3. Sismología . . . . .	10
3.3.1. Parámetros sísmicos . . . . .	13
3.3.2. Sismología a través de la historia en Guatemala . . . . .	16
3.3.3. Deslizamiento Las Colinas en El Salvador . . . . .	18
3.3.4. Deslizamiento en Aratozawa, Japón . . . . .	19

<b>4. Metodología</b>	<b>21</b>
4.1. Observación . . . . .	21
4.1.1. Revisión de casos históricos . . . . .	21
4.1.2. Análisis con métodos computacionales . . . . .	21
4.2. Descripción . . . . .	23
4.2.1. Análisis con métodos computacionales . . . . .	23
<b>5. Resultados</b>	<b>32</b>
5.1. Análisis de casos históricos . . . . .	32
5.2. Análisis con método computacional . . . . .	33
5.2.1. Sismos de falla local . . . . .	33
5.2.2. Falla por subducción . . . . .	40
5.2.3. Comparación de sismos . . . . .	42
5.2.4. Comparación de desplazamientos . . . . .	43
5.2.5. Comparación de modelos pseudo-estáticos . . . . .	44
<b>6. Discusión de resultados</b>	<b>45</b>
6.1. Observaciones de casos históricos . . . . .	45
6.2. Resultados con métodos computacionales . . . . .	45
<b>7. Conclusiones</b>	<b>47</b>
<b>8. Recomendaciones</b>	<b>48</b>
<b>9. Bibliografía</b>	<b>49</b>
<b>10. Anexos</b>	<b>50</b>

---

## Lista de figuras

---

1.	Relación esfuerzo normal y cortante . . . . .	4
2.	Diagrama de Mohr Coulomb . . . . .	5
3.	Relación de volúmenes en una muestra . . . . .	6
4.	Tipos de falla en taludes . . . . .	7
5.	Movimiento de suelo en falla de talud . . . . .	8
6.	Método de dovelas, superficies circulares . . . . .	9
7.	Método ordinario de dovelas . . . . .	9
8.	Método simplificado de Bishop . . . . .	10
9.	Interacción por subducción . . . . .	11
10.	Interacción por divergencia . . . . .	11
11.	Interacción por transformación . . . . .	12
12.	Llegada de las ondas sísmicas . . . . .	12
13.	Partes de una falla sísmica . . . . .	13
14.	Acelerogramas . . . . .	14
15.	Relación propuesta entre aceleración pico horizontal e intensidad según escala de Mercalli . . . . .	14
16.	Comparación de acelerogramas con aceleraciones efectivas diferentes . . . . .	16
17.	Epicentro de terremoto de 1976 en Guatemala . . . . .	16
18.	Mapa tectónico de la región . . . . .	17
19.	Deslizamiento las Colinas . . . . .	18
20.	Puntos de muestreo en Las Colinas . . . . .	19
21.	Morfología de presa . . . . .	20
22.	Respuestas máximas en el cuerpo de la presa . . . . .	20
23.	Dimensiones talud en modelo . . . . .	23
24.	Valor de densidad en modelo . . . . .	24
25.	Valor elásticos en modelo . . . . .	24
26.	Valor plásticos en modelo . . . . .	25
27.	Valor cohesión en modelo . . . . .	26
28.	Condiciones de frontera en modelo . . . . .	26
29.	Carga gravitacional en modelo . . . . .	27
30.	Tablas creadas del programa . . . . .	28
31.	Amplitudes en programa . . . . .	29

32.	Carga de sismo aplicada en modelo . . . . .	29
33.	Tipo de análisis aplicado en modelo pseudo-estático . . . . .	30
34.	Valores de sismo pseudo-estático para ingresar . . . . .	30
35.	Diseño de modelo pseudo-estático . . . . .	31
36.	Acelerograma de falla local . . . . .	34
37.	Desplazamiento de nodo en falla local . . . . .	34
38.	Comparación de desplazamientos contra sismo de falla local . . . . .	35
39.	Resultado gráfico del modelo con sismo de falla local en El Salvador . . . . .	35
40.	Espectro de aceleraciones de sismo local ocurrido en El Salvador . . . . .	36
41.	Resultado gráfico del modelo pseudoestático con sismo de falla local en El Salvador . . . . .	36
42.	Acelerograma falla de Motagua . . . . .	37
43.	Desplazamiento por falla de Motagua . . . . .	38
44.	Comparación de desplazamientos contra sismo de Motagua . . . . .	38
45.	Espectro de aceleraciones de sismo local falla de Motagua . . . . .	39
46.	Resultado gráfico del modelo pseudoestático con sismo de falla local en la falla de Motagua . . . . .	39
47.	Resultado gráfico de deformaciones por falla local en Motagua . . . . .	40
48.	Acelerograma de falla por falla en área desubducción . . . . .	40
49.	Desplazamientos por falla en área de subducción . . . . .	41
50.	Comparación de desplazamientos contra sismo de falla por subducción . . . . .	41
51.	Resultado gráfico del modelo con sismo de falla de subducción . . . . .	42
52.	Resultado de modelo pseudo-estático por sismo de subducción . . . . .	42
53.	Resultado de modelo pseudo-estático por sismo de subducción . . . . .	43
54.	Comparación de desplazamientos según tipo de sismo . . . . .	44
55.	Deslizamiento en San Cristóbal luego del terremoto de 1974 . . . . .	50
56.	Deslizamiento en El Progreso después del Terremoto de 1974 . . . . .	51
57.	Diagrama de movimientos sísmicos en Guatemala . . . . .	52
58.	Deslizamiento en Las Colinas El Salvador a través del tiempo . . . . .	52
59.	Deslizamiento en Las Colinas, El Salvador . . . . .	53
60.	Deslizamiento en Las Colinas, El Salvador . . . . .	53



---

Lista de cuadros

---

1. Valores obtenidos de factor de seguridad en modelos pseudo-estáticos . . . . . 44

Se tuvo como objetivo principal determinar la estabilidad de un talud a través de una simulación numérica tomando en cuenta los factores sísmicos. Ésto se logró a través del uso de las herramientas ABAQUS y Geoslope, que trabajan con diferentes tipos de algoritmos. ABAQUS trabaja con métodos matemáticos lineales, conocido comúnmente como elementos finitos, y Geoslope trabaja a través de un análisis pseudo-estático, que es el comúnmente utilizado la industria del diseño de taludes. También se investigaron casos históricos en El Salvador, ya que tiene una morfología tectónica parecida a la de Guatemala, y en Japón.

La información obtenida de los estudios indica que el análisis utilizado normalmente, que es el método pseudo-estático, es simple y no analiza todas las partes de un sismo. Debido a que un sismo está compuesto por factores relevantes que son determinantes para saber que tan destructivo puede ser un sismo; como lo son la aceleración pico, el tiempo en el que el movimiento se mantiene en la aceleración máxima y la duración del sismo.

Las aplicaciones de este trabajo es amplia dentro del área de análisis de taludes, ya que se puede diseñar con los sismos reales ocurridos por las fallas cercanas a los lugares de interés. También el diseño que se haga tendrá la certeza de que los valores obtenidos son lo más parecidos a la realidad que se puede modelar.

For this thesis, the main objective was to determine the stability of a slope through a numerical simulation taking into account seismic factors. This was achieved through the use of tools such as ABAQUS and Geoslope , which work with different types of algorithms. ABAQUS works with linear mathematical methods, commonly known as finite elements, and Geoslope works through a pseudo-static analysis, which is the commonly used in the slope design industry. Historical cases were also investigated in El Salvador, since it has a tectonic morphology similar to the one in Guatemala, and in Japan.

The information obtained from the studies indicates that the analysis normally used, which is the pseudo-static method, is simple and does not analyze all parts of an earthquake. Because an earthquake is composed within its accelerograms by different peak accelerations, and time lapses with high accelerations. Another factor that the pseudo-static analysis does not take into account is the duration of the earthquake and is an important factor according to the results obtained.

The applications of this work are wide within the area of slope analysis, since it can be designed with the real earthquakes caused by faults near the places of interest. Also the design that is made will have the certainty that the values obtained are similar to the reality.

Debido a la ubicación de Guatemala en el globo terráqueo se puede encontrar la convergencia de tres placas tectónicas: Norteamérica, Cocos y Caribe. Ya que contamos con esta configuración de placas dentro del territorio nacional los sismos son una realidad. Estos pueden llegar a ser mortales para los pobladores gracias a un deslizamiento de un talud provocado por un sismo. Las placas interactúan de diferentes maneras entre sí y dentro de sí por lo que los movimientos que generan tienen diferentes características. Se busca determinar qué parámetro sísmico es más crítico para el deslizamiento de taludes, y con ello se podrán hacer protecciones más eficientes y contar con la certeza de que un sismo no los desestabilizará.

El estudio de taludes es amplio, sin embargo, es un tema complejo de estudiar. Por lo mismo, la norma no es cuestionada por los diseñadores de taludes y protecciones. Para ello el estudio de casos históricos y la correlación entre factores sísmicos y la estabilidad puede cambiar la manera en que se entienden los taludes, simplificando un análisis más completo sobre estos elementos constructivos.

Al hablar de estabilidad de taludes es inevitable hablar de factores sísmicos que afectan a los mismos. Los factores con los cuáles se diseña en la actualidad son las fallas locales, sin embargo, debido a la posición de Guatemala, no es lo único que cuenta, también puede haber sismos por fallas de subducción como las que se crean en el Cinturón del Pacífico. Los acelerogramas producidos por ambos son diferentes, teniendo diferencias en su contenido de frecuencia y su valor de las aceleraciones pico y duración. Se puede observar con la aceleración pico dos fenómenos: la cantidad de veces que el sismo llega a esta aceleración y la intensidad. Estos factores pueden llegar a ser determinantes para el estudio de estabilidad.

El análisis de casos históricos es una parte importante del estudio. El caso de El Salvador, que sufrió dos sismos de diferentes tipos de fallas, con consecuencias muy diferentes en cada uno para sus taludes, tiene la mayor importancia en el estudio, debido a la cercanía y la similitud geológica con el valle central de Guatemala. Gracias a estudios realizados en estos casos se puede empezar a mapear una correlación directa entre ciertas características de los sismos con la desestabilización de los taludes.

La estabilidad de los taludes es importante para todos. Los deslizamientos pueden generar problemas de movilidad, ya que arterias principales de un país montañoso como es Guatemala, tienen por lo general taludes en ambos lados de las carreteras. También, es importante el diseño correcto ya que muchos asentamientos dentro del territorio están localizados en laderas, arriba o abajo de los taludes y un deslizamiento puede llegar a ser crítico. Por lo que se va a estudiar a profundidad los taludes y los sismos y se hará una relación entre tipos de sismos y peligrosidad en los cortes de tierra.

### 2.1. Objetivo general

Determinar la estabilidad de un talud a través de una simulación numérica tomando en cuenta los factores sísmicos.

### 2.2. Objetivos específicos

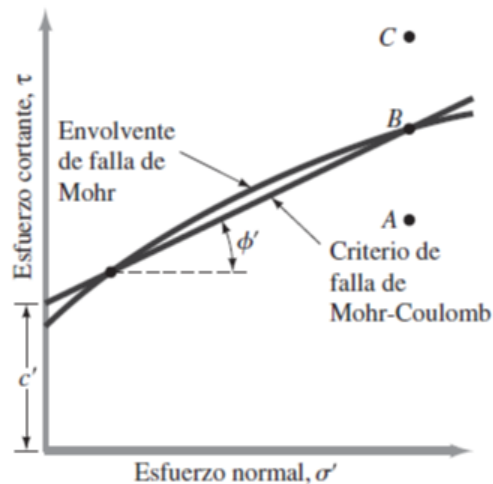
- Determinar que factores sísmicos afectaran la estabilidad de los taludes.
- Revisar casos históricos para determinar una relación entre tipo de sismo y el deslizamiento de taludes.
- Definir el tipo de sismo que es más relevante para diseñar taludes en Guatemala.

### 3.1. Parámetros del suelo relevantes

#### 3.1.1. Ángulo de fricción

El criterio de falla de Mohr-Coulomb presenta la teoría que un material falla por la combinación crítica de esfuerzo normal y cortante. Una aproximación exacta para el método, que su envolvente es una curva, es una función lineal del esfuerzo normal, como se puede observar en la Figura 1. [1]

Figura 1: Relación esfuerzo normal y cortante



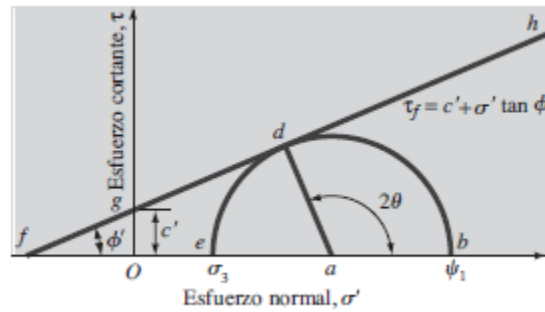
[1]

Es crítico poder encontrar la envolvente de falla, y cobra relevancia al encontrar que en la Figura 1 se pueden observar 3 puntos: el punto A se refiere a una falla producida a lo

largo del plano de falla relacionado con el esfuerzo normal y el esfuerzo de cortante sobre el mismo. El punto B que se encuentra sobre la intersección de la envolvente de falla de Mohr y el Criterio de falla de Mohr-Coulomb describe una falla que se producirá en el plano de corte. Y un punto C es hipotético, debido a que al alcanzar los valores de esfuerzo cortante y normal sobre la envolvente de falla de Mohr el suelo ya habrá cedido y habrá fallado. [1]

La ecuación de criterio de falla de Mohr-Coulomb establece que la falla por cortante se producirá en el momento que el esfuerzo cortante en un plano alcance el valor obtenido por la ecuación. En la Figura representada a continuación, se puede encontrar que el ángulo de fricción es la pendiente que adopta la ecuación lineal descrita por Mohr-Coulomb. [1]

Figura 2: Diagrama de Mohr Coulomb



[1]

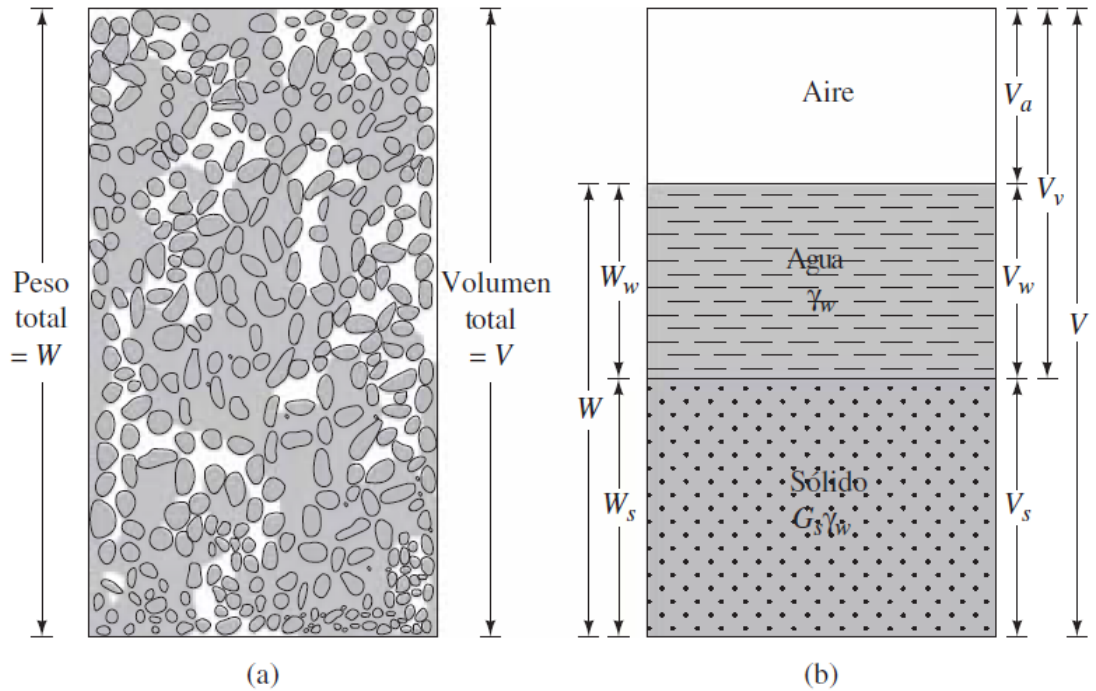
### 3.1.2. Relaciones de volumen

Para encontrar las propiedades y relaciones peso volumen de un suelo se separa en tres componentes presentes a la hora de la extracción: sólido, agua y aire. Esto quiere decir que el volumen total de una muestra está dado por la siguiente ecuación y descrito en la Figura 3. [1]

$$V = V_a + V_w + V_s \quad (1)$$



Figura 3: Relación de volúmenes en una muestra



[1]

Las relaciones de volumen en una muestra de suelo tienen un uso común dentro de la relación de vacíos, la porosidad y el grado de saturación. Estos tres parámetros del suelo suelen ser útiles para el estudio de los suelos. La relación de vacíos ( $e$ ) es definida como la proporción de volumen de vacíos que hay dentro de un volumen de sólidos. La porosidad ( $n$ ) se puede obtener con la división de volumen de vacíos dentro del volumen total de la muestra. El grado de saturación ( $S$ ) es la relación de volumen de agua con el volumen de vacíos, indicada como un porcentaje. [1]

### 3.1.3. Relaciones de peso

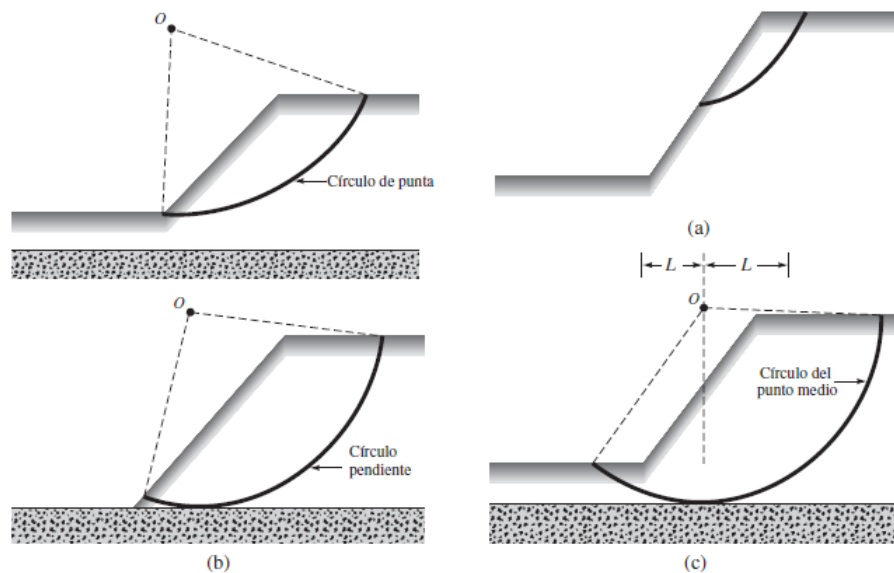
Las relaciones de peso más utilizadas para la caracterización del suelo son contenido de humedad y el peso unitario. El contenido de humedad ( $w$ ) se encuentra como la razón del peso de agua dentro del peso de sólidos dentro de una muestra. El peso unitario ( $\gamma$ ) es la relación del peso por unidad de volumen. Esta relación puede ser también utilizada en caso querer conocer el peso unitario seco ( $\gamma_d$ ) el peso que se debe de conocer para la proporción es el peso del sólido y éste relacionarlo con la unidad de volumen. [1]

## 3.2. Fundamentos de deslizamientos

### 3.2.1. Tipos de fallas

Las fallas dentro de los taludes se pueden clasificar en tres categorías debido a que son los tipos de falla más comunes: falla de talud, falla superficial de talud y falla de base. La falla de talud (a) se produce cuando la falla pasa por encima de la punta y la superficie de deslizamiento se traslapa con el talud. Si el círculo de falla, conocido como círculo de punta, pasa a través de la punta y encima del pie se genera una falla poco profunda denominada superficial de talud (b) el círculo para este tipo de fallas se llama círculo de pendiente. Para la falla de base (c) la falla pasa por debajo del pie, el círculo de este tipo de fallas se llama círculo del punto medio. [1]

Figura 4: Tipos de falla en taludes

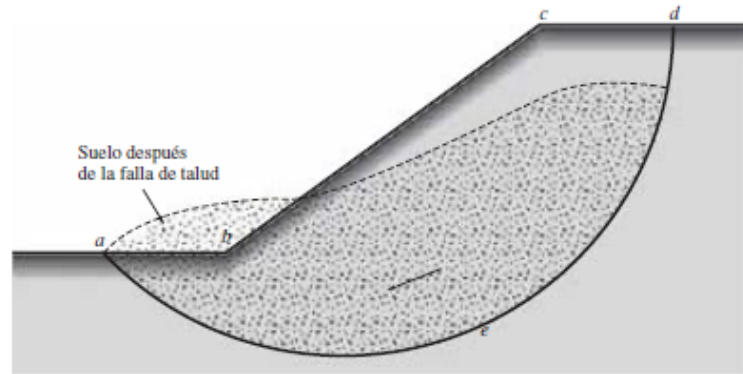


[1]

### 3.2.2. Factores y causas de deslizamientos

Cuando un talud tiene una superficie inclinada y no es totalmente horizontal, la fuerza de la gravedad hará que haya un empuje hacia abajo en el suelo. Esta fuerza crea, si la pendiente no es lo suficientemente horizontal, un deslizamiento de la masa de suelo contenido dentro de una zona definida. Para determinar si un talud es estable hay que establecer la resistencia del suelo a corte y el corte a lo largo de la superficie de ruptura más probable, y compararlos. Este análisis lleva por nombre el análisis de estabilidad de talud. [1]

Figura 5: Movimiento de suelo en falla de talud



[1]

Para que un talud sea estable se debe de diseñar con un factor de seguridad mayor a 1. El factor de seguridad es la relación entre la resistencia media del suelo a corte y el esfuerzo cortante promedio desarrollada a lo largo de la superficie potencial de falla. Un análisis de talud finito con plano de falla superficial se analiza a través del método de Culmann. Para este análisis se asume que el suelo a corte tiene menor resistencia que el esfuerzo que se está causando en el plano. Así también, hay que suponer que la relación entre la resistencia del suelo al corte con la tensión media de corte es mínima, lo que puede causar la falla. Debido a estas asunciones se puede llegar a la ecuación que describe una altura máxima de un talud en equilibrio. o, la resistencia media del suelo a corte depende de la cohesión, el ángulo de fricción de drenado y el esfuerzo normal efectivo en la superficie potencial de falla. [1]

$$H_{cr} = \frac{4c'}{\gamma} \left[ \frac{\sin \beta \cos \phi'}{1 - \cos (\beta - \phi')} \right] \quad (2)$$

### 3.2.3. Procedimientos de análisis de estabilidad

#### Procedimiento de la masa

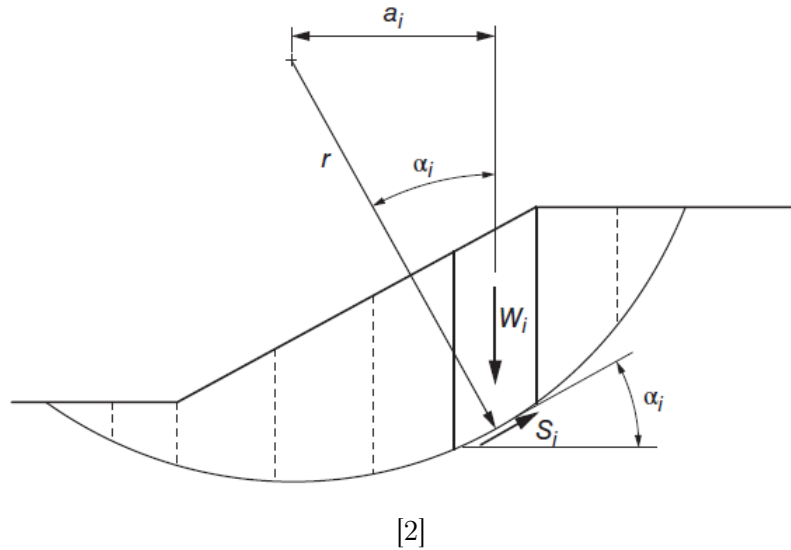
El procedimiento de la masa consiste en asumir que la masa del suelo que está sobre la cara que presenta falla es una unidad. También se requiere que el suelo sea presentado como homogéneo, aunque esta no sea una realidad. [1]

#### Método de dovelas

Para este análisis se debe de considerar el suelo sobre el plano base cortado en secciones, cortadas de manera vertical. Este análisis tiene consideraciones por la no homogeneidad del suelo a analizar y de la presión del agua intersticial que puede tener el talud. Para el método existen diferentes maneras de analizarlo: por medio de superficies circulares, el método ordinario y el método de Bishop. [2]

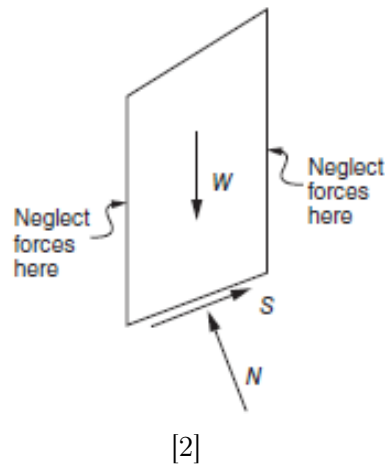
El método de superficies circulares consiste en considerar equilibrio de momentos en el centro del círculo. Para encontrar si el talud se encuentra estable hay que tener conocimiento de las secciones en las cuales se está separando el suelo y su distancia horizontal desde el centroide del elemento hacia el centro del círculo proyectado. [2]

Figura 6: Método de dovelas, superficies circulares



El momento producido en la base circular es el peso de la porción cortada por el brazo que es la distancia entre centroides (del círculo y de la porción). El método ordinario es un método que anula las fuerzas realizadas por las otras dovelas vecinas a la analizada. El método también puede ser encontrado en otras literaturas como el “Método Sueco”. El método se basa en encontrar la fuera normal actuando sobre la porción de suelo.

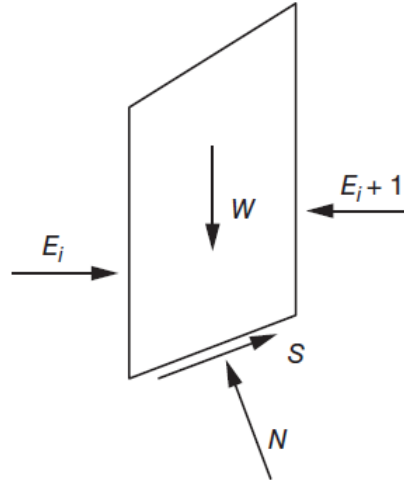
Figura 7: Método ordinario de dovelas



El método simplificado de Bishop asume que las fuerzas verticales a los lados de la dovela son en ese plano y no existe fuerza cortante entre los elementos separados. Estas fuerzas son

asumidas en la dirección vertical para satisfacer el equilibrio en la dirección y obtener una expresión para la fuerza normal en la base del elemento a analizar.

Figura 8: Método simplificado de Bishop



[2]

### 3.3. Sismología

Para iniciar un desarrollo sobre la sismología hay que analizar como primer punto las diferentes amenazas que puede presentar un sismo. Las ondas que se esparcen por medio de la superficie y hacen que se mueva el suelo es lo que hace que la energía dentro de un sismo sea perceptible y dañino para las estructuras, tanto civiles como taludes. Para el análisis del suelo una amenaza latente es la licuefacción que es cuando un suelo empieza a actuar como líquido, disminuyendo la capacidad soporte de este y haciendo que lo que esté sobre él empiece a asentarse; este fenómeno es más común cuando se encuentran los suelos saturados cerca de cuerpos de agua. Otro peligro que se puede apreciar con los sismos es el deslizamiento de taludes, que pueden ser causados por una licuefacción del suelo o por una falla dentro del talud sin movimiento. Un último riesgo, común solamente cerca de los mares, es el riesgo de un tsunami, que comprenden olas de periodos largos y de gran altura. [3]

Los sismos son causados por la deriva continental de las placas tectónicas. Las placas tectónicas son elementos de gran tamaño organizados como bloques que forman la corteza terrestre. Existen seis placas principales denominadas continentales: Africana, Americana, Antártica, Australia-India, Eurasia y Pacífico. Sin embargo, se pueden encontrar placas de menor tamaño dentro de la corteza. Las placas se están moviendo constantemente a lo que se le llama la deriva continental. [3]

La interacción entre placas está limitada a tres diferentes tipos de interacción: subducción, transformante y divergente. La subducción implica que las dos placas están siendo empujadas una contra la otra, generando que una vaya por debajo y otra arriba. Las placas

que están en subducción están generalmente a las orillas de los continentes ya que la corteza oceánica es más fría y densa y se hunde por su propio peso por debajo de la corteza continental que es más ligera. La subducción genera que la corteza se funda de nuevo y genere magma. Las placas que interactúan por divergencia son placas que son empujadas en direcciones opuestas. La roca fundida en el manto debajo de la corteza está emergiendo entre las placas, éste se enfría y forma parte de las placas. Las interacciones transformantes son cuando las dos placas están sobre el mismo plano y no consumen ni generan magma. Generalmente se encuentran moviéndose en direcciones opuestas en el plano horizontal, generando una fricción entre ellas y de esa manera transformando las placas. [3]

Figura 9: Interacción por subducción

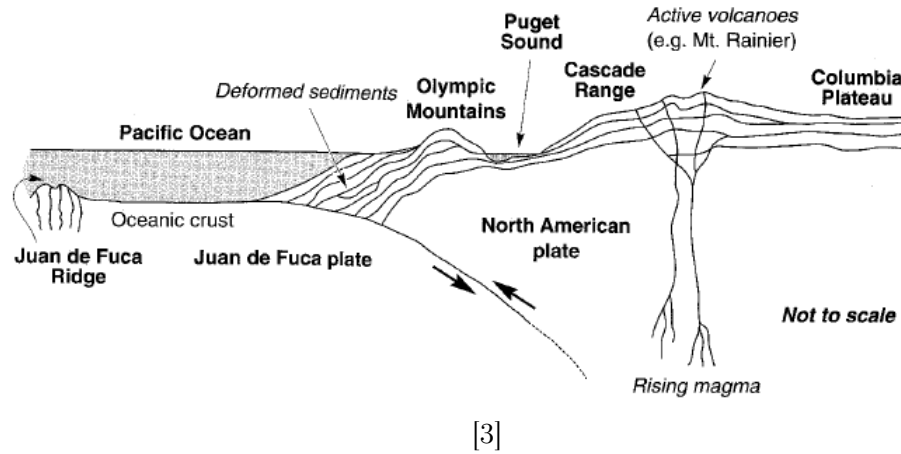


Figura 10: Interacción por divergencia

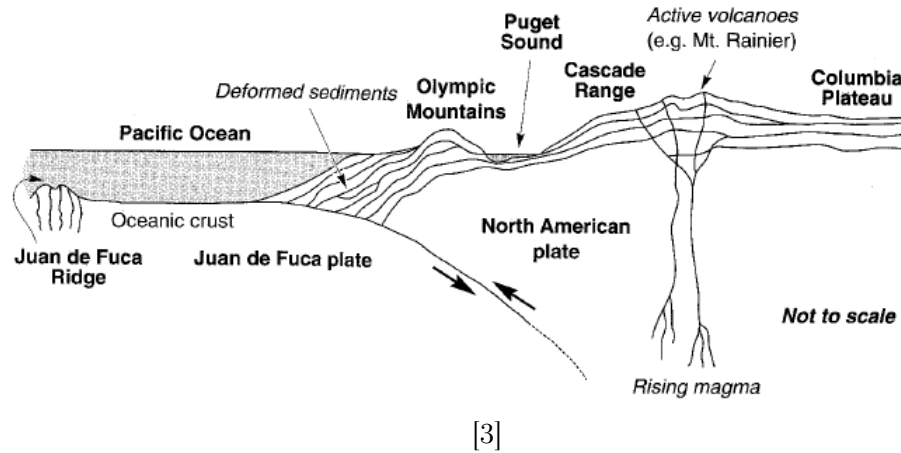
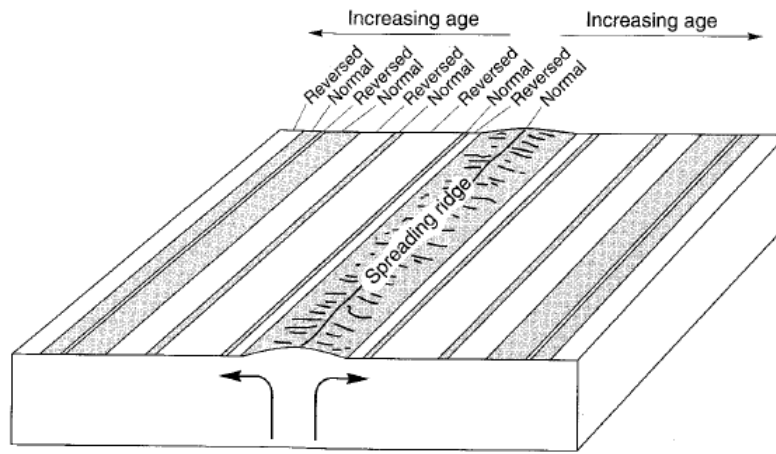


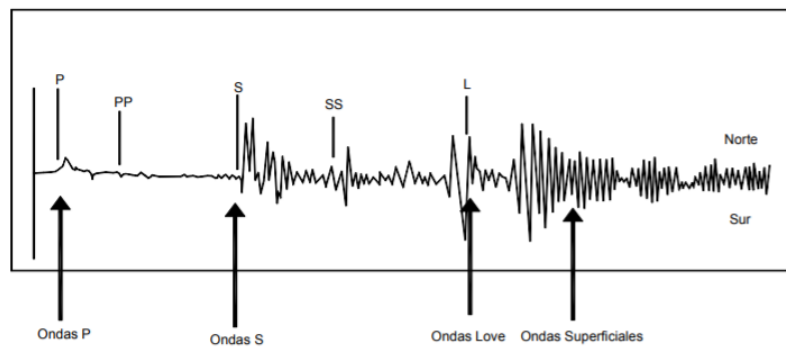
Figura 11: Interacción por transformación



[3]

Los sismos producen ondas de diferentes tipos y son sensibles de diferentes maneras. Las ondas de compresión (P) son las primeras en sentirse, debido a la rapidez con la que viajan. Las ondas de cortante (S) produce un movimiento de corte en el suelo, esto quiere decir que las partículas se mueven en dirección normal a la dirección de las ondas. Las ondas Rayleigh son perceptibles en la superficie de la tierra y se asemeja al movimiento de las ondas en el agua. Las ondas Love (L) se generan a partir de las ondas S y su interacción con la corteza. Estas generan torsión y no tienen una componente paralela a la gravedad. [4]

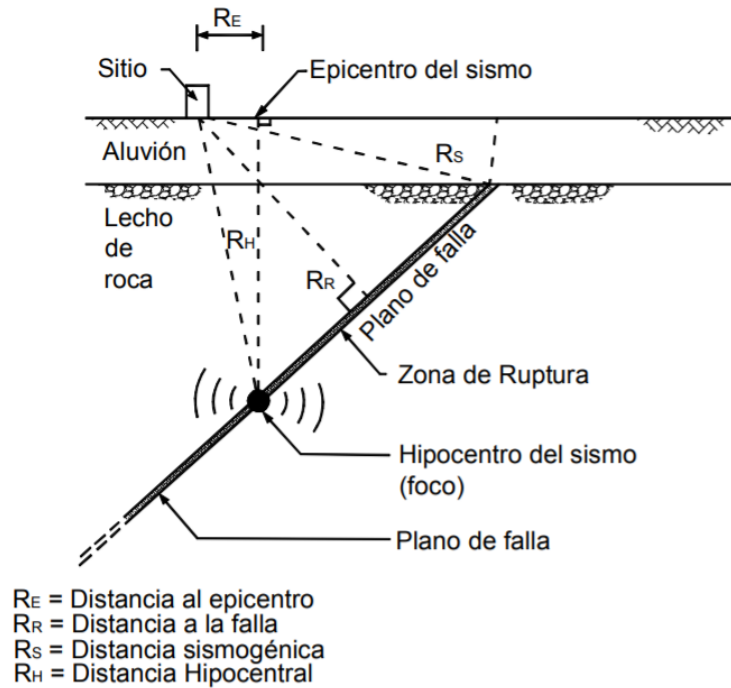
Figura 12: Llegada de las ondas sísmicas



[4]

La magnitud de un sismo es la medida cuantitativa con la cuál se mide un evento sísmico. E sta mide a través de un instrumento la energía sísmica liberada al producirse la falla. La escala mayormente utilizada es la de Richter, la cuál se basa en las medidas de un sismógrafo a una distancia no mayor de 100 kilómetros del epicentro del sismo. El epicentro del sismo es la proyección en la superficie del hipocentro como se puede observar en la Figura 13. La escala de Richter va de 1-10 siendo 1 la menor cantidad de energía liberada y 10 siendo la mayor cantidad. [4]

Figura 13: Partes de una falla sísmica



[4]

La intensidad de un sismo se asocia al grado de destrucción que tuvo un evento en las inmediaciones. Se mide de I-XII, siendo I el menor daño y XII el mayor. Para los taludes se mide a través de la cantidad de masa de suelo desplazada y el tipo de material que se desplazó. Con un sismo leve (IV) la roca cae y las alteraciones a la masa de suelo son mínimas. Para un sismo que sienten todas las personas (VI) se pueden observar avalanchas de suelo o roca y éstos ya son destructivos en sus cercanías. [4]

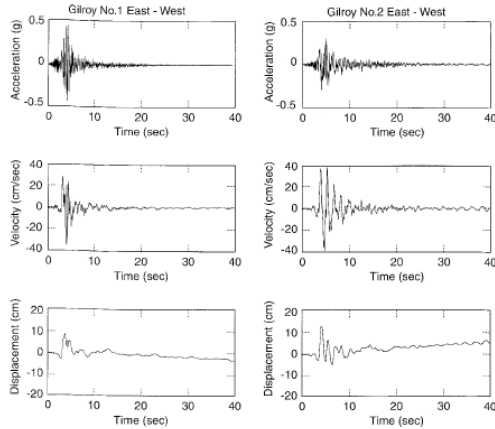
### 3.3.1. Parámetros sísmicos

#### Acelerograma

La manera más común de describir un movimiento sísmico es a través de un historial de tiempo, donde en el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical la aceleración, la velocidad o el desplazamiento. Estos gráficos son llamados acelerogramas y de ellos se puede obtener mucha información del sismo, como lo es aceleraciones pico y la duración. [3]



Figura 14: Acelerogramas

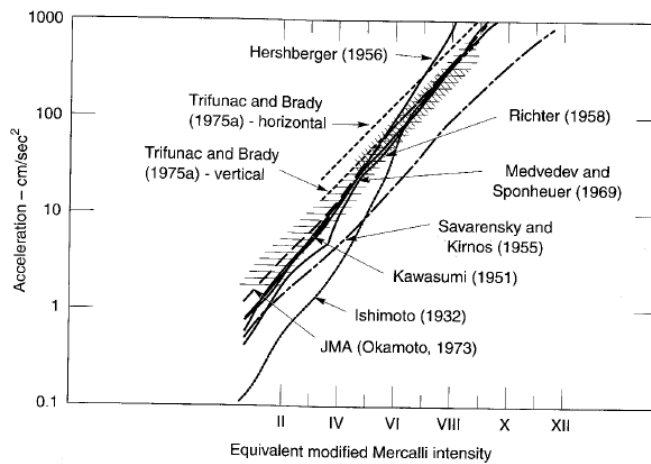


[3]

### Aceleración pico horizontal

La manera más común de medir la amplitud de un movimiento sísmico es a través de la aceleración pico horizontal. Esta aceleración es el valor absoluto más alto obtenido de los acelerogramas. La estrecha relación entre los valores de aceleración pico horizontal y la fuerza inercial es de manera directa, es decir, que mientras más grande es la inercia de un elemento estructural las fuerzas dinámicas inducidas por la aceleración pico horizontal. Se asocia la aceleración pico horizontal también con la intensidad del sismo cuando solo esta información está disponible en los casos históricos, sin embargo, esta relación está lejos de ser precisa. Gracias a la relación que se crea se creó una gráfica de relación intensidad-aceleración como se puede observar en la Figura 15. [3]

Figura 15: Relación propuesta entre aceleración pico horizontal e intensidad según escala de Mercalli



[3]

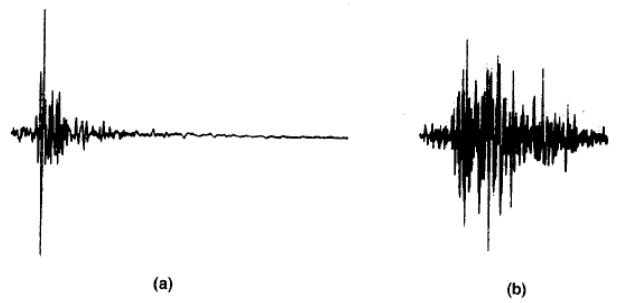
Las aceleraciones pico verticales no son tan estudiadas como las horizontales debido a

que los márgenes de seguridad con los que se diseñan las aceleraciones inducidas por la gravedad, usualmente proveen una resistencia adecuada a las fuerzas dinámicas inducidas por las aceleraciones verticales.

### **Aceleración efectiva**

La aceleración efectiva surge debido a que la aceleración pico en algunos casos está relacionada de manera directa con el daño, sin embargo, la repetición de ciclos de amplitudes altas puede generar los mismos daños. Esta aceleración es la que se relaciona de manera más directa con la respuesta estructural y daño de un terremoto. Está en función del tamaño del área cargada y la frecuencia de contenido de excitación, que depende de la cercanía a la fuente del sismo de la estructura. Unos acelerogramas muestran características de un pico más alto que es mayor que la amplitud de los picos repetidos, como se observa en la Figura 16, que muestra el sismo de Stone Canyon (a) y el sismo de Konya (b) los cuales demuestran aceleraciones pico parecidas pero con aceleraciones efectivas diferentes.

Figura 16: Comparación de acelerogramas con aceleraciones efectivas diferentes



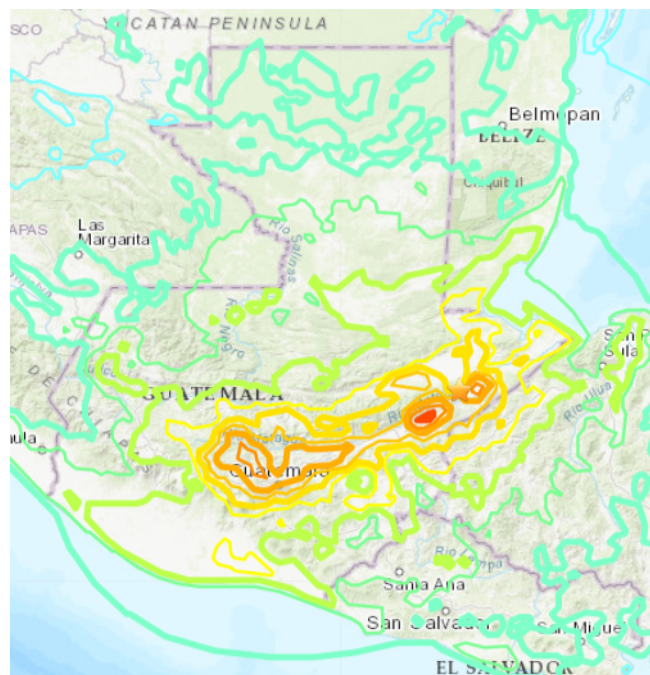
**Figure 3.12** Accelerograms from (a) the N29W Melendy Ranch record of the 1972 Stone Canyon ( $M = 4.6$ ) earthquake and (b) the longitudinal record from the 1967 Koyna ( $M = 6.5$ ) earthquake. The time and acceleration scales are identical for both records. Peak accelerations are very close, illustrating the limitations of using peak amplitude as a sole measure of strong ground motion. (After Hudson, 1979; used by permission of EERI.)

[3]

### 3.3.2. Sismología a través de la historia en Guatemala

El 4 de febrero de 1976 Guatemala sufrió un terremoto de magnitud 7.5 en la escala de Richter. El terremoto tuvo un epicentro a 240 km de la falla de Motagua y dejó como saldo mayor a 23,000 personas. Un caso similar en relación a la magnitud ocurrió en 1816 gracias a una fractura de la falla Chixoy - Polochic. Estos dos casos son los más recientes dentro de un sistema de fallas por convergencia a lo largo de los bordes de las placas Caribe y Norteamérica. [5]

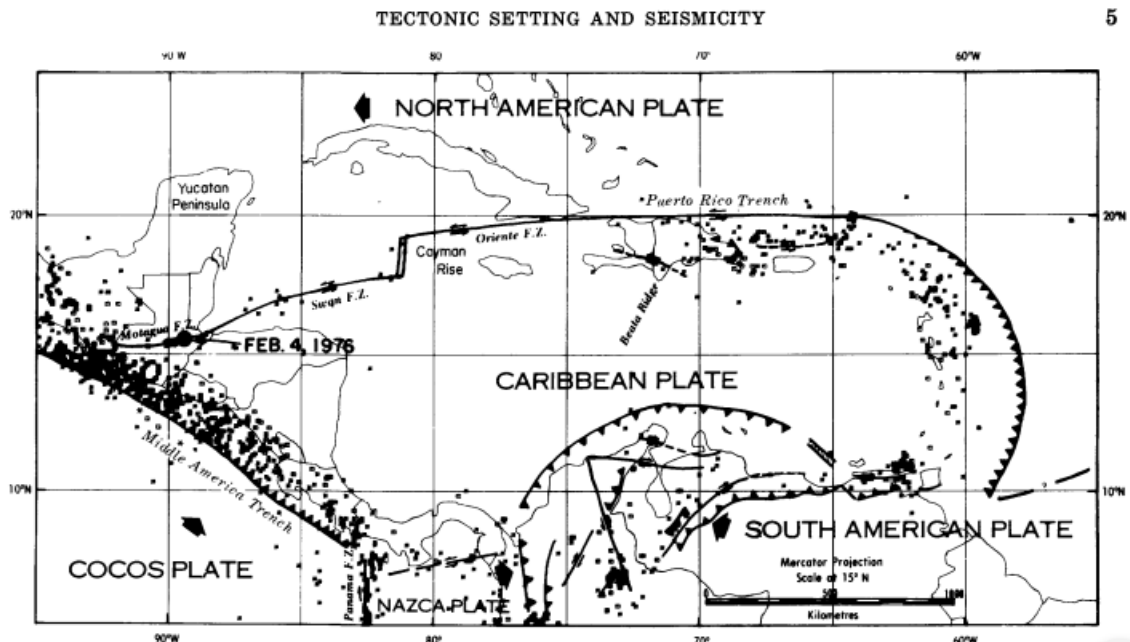
Figura 17: Epicentro de terremoto de 1976 en Guatemala



[6]

La configuración tectónica en el año del sismo de M7.5 por falla en el Motagua está representada en la Figura 18. La zona de la falla del Motagua estuvo inactiva sísmicamente desde 1902 hasta febrero de 1976 que es el evento principal en la zona, que representa la interacción de la interacción entre las placas Caribe y Norte América. El otro sismo significativo representado en la Figura 18 mapeado en la falla del Motagua, se atribuye a la subducción de la placa de Cocos, no por la falla de Motagua. La mayor actividad sísmica se encuentra en el área asociada con la unión de la placa Caribe, Cocos y Norte América, una unión muy compleja. [6]

Figura 18: Mapa tectónico de la región



[6]

Otros sismos sufridos y registrados en el territorio guatemalteco están separados en períodos de actividad. El primer periodo de actividad sísmica que comprende el periodo de tiempo de 1702 - 1822 que reporta sismos dañinos moderados mayormente en el departamento de Chiquimula. Los mayores registrados en esta época son en 1733 y 1765, registrados en Jocotán a Quezaltepeque y Chiquimula, respectivamente. El sismo registrado en 1816, gracias a una ruptura de la falla de Chixoy - Polochic desde San Cristóbal Verapaz hacia el este. El daño ocurrido al este de San Cristóbal las Casas y en Chiapas, México es el registrado en las arcas, y no hay registro de una réplica en Guatemala. Se calcula que la falla fue de aproximadamente de 240 kilómetros, equivalente a la falla en Motagua para el terremoto de 1976. Las magnitudes en casos anteriores no se pueden cuantificar en una escala exacta como lo es la de Richter por lo que se mide en la escala modificada de Mercalli. Esta escala nos permite definir la destrucción del sismo a través de un análisis de daños y los registros muestran daños a las iglesias. Se definió la escala en intensidad de destrucción y la destrucción moderada se le asigna un valor de VII mientras el colapso total tiene un valor de VII en la escala. [5]

En el segundo periodo de 1822 - 1945 fue un periodo sin mayor actividad sísmica regis-

trada. En la época se registraron 177 sismos fueron reportados pero ningún evento reportado cercano a las fallas. [5]

El tercer periodo es un periodo activo que comprende los años 1945-1983, y en este periodo ya se contaba con el primer sismografo en Guatemala. La época comienza con el sismo de Quiriguá el 10 de agosto de 1945, producido por la falla del Motagua. La falla produjo un sismo de magnitud 5.5, generando daños en las plantaciones cercanas a la frontera de Quiché - Alta Verapaz. En este periodo se registró el sismo de M 7.5 el 4 de febrero de 1976, que dejó muchas muertes y una falla con un deslizamiento de la falla de 1 - 3.4 metros. Sismos relevantes posteriores registrados son el sismo de Tecpán en 1978 con M 5.0 y Puerto Barrios en 1980 con M 6.5. [5]

### 3.3.3. Deslizamiento Las Colinas en El Salvador

El Salvador en el 2001 fue golpeado por dos sismos severos con un mes de separación. El primero fue en la costa sur de El Salvador, el cual destruyó aproximadamente 108,000 casas, y mató al menos a 944 personas. La mayoría de personas murieron gracias a un deslizamiento en un área conocida como Las Colinas en la ciudad de Neuva, San Salvador. [7]

El deslizamiento de Las Colinas desplazó alrededor de  $200,000 m^3$  del risco de la montaña conocido como El Bálsamo ubicada al sur de la ciudad de San Salvador, en Santa Tecla. La zona se divide en tres como se ve en la Figura 19. En la zona 1 se hizo un boquete de aproximadamente de 100 metros de diámetro con 20-30 metros de profundidad. En la zona 2 se puede observar que se hizo la pendiente más pronunciada y mientras se acerca al pie del talud se va haciendo más suave. En la zona 3 se encontraba la mayoría de casas afectadas dónde se destruyó todo y se puede observar que ya tuvo una limpieza por parte de las autoridades. [7]

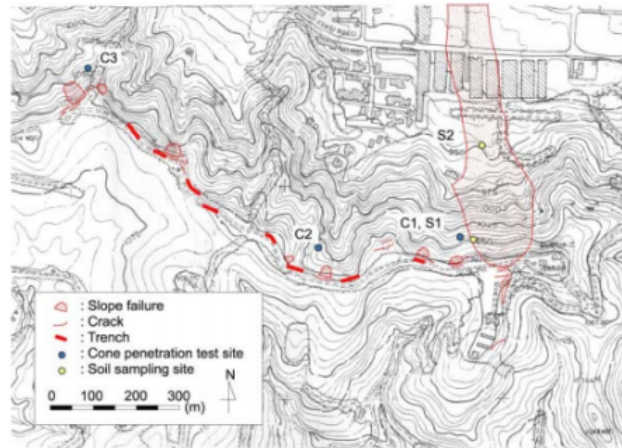
Figura 19: Deslizamiento las Colinas



[7]

Los análisis de suelo conducidos en el deslizamiento se basaron en el método de penetración y se hicieron a lo largo de tres puntos de la colina, cómo está demostrado en la Figura 20.

Figura 20: Puntos de muestreo en Las Colinas



[7]

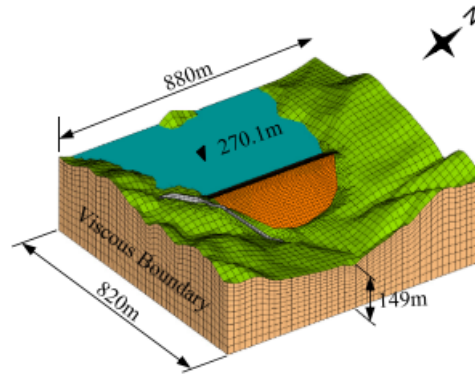
El sismo ocurrido en enero tuvo una magnitud de 7.6 en la escala de Richter, con un epicentro a 100 kilómetros al sudoeste de San Miguel, San Salvador. El sismo ocurrió a 60 km de la superficie por una falla de subducción en la placa de Cocos. Un mes después del sismo de enero de 2001 en El Salvador, otro sismo de magnitud 6.6 en la escala de Richter ocurrió. El epicentro estuvo ubicado a 30 km al Este de San Salvador y fue superficial. Este sismo fue provocado por una falla transcurrente en la placa de Caribe. [8]

### 3.3.4. Deslizamiento en Aratozawa, Japón

Durante el terremoto de Iwate-Miyagi Nairiku, de intensidad 7.2 en la escala de Richter, el talud de una presa llamada Aratozawa se desplomó. El sismo fue registrado el 14 de junio de 2008 con una aceleración pico de  $1,024 \text{ cm/s}^2$  lo cual sobrepasó el factor estipulado por la norma de diseño japonesa de 0.15 g. Sin embargo, no es el último sismo en sobrepasar la norma de diseño, ya que se ha sobrepasado entre 6 y 8 veces el coeficiente en la última década y no se han producido daños materiales. [9]

El sismo de Iwate-Miyagi Nairiku de M7.2 tuvo epicentro a sólo 16 kilómetros de la presa de Aratozawa. La Figura 21 muestra la aceleración del sismo en el pie del talud, el centro y la cresta. La máxima aceleración fue en el centro con una aceleración de  $535 \text{ cm/s}^2$ . Para investigar el sismo y sus efectos en el cuerpo del talud se utilizó un método equivalente 3-D a partir de la linealización. [9]

Figura 21: Morfología de presa



[7]

La Figura 22 muestra la aceleración pico y el desplazamiento relativo de respuesta en el método reproducido y con el dato del sismo. Se puede observar que a pesar de las discrepancias en los valores de aceleración máxima en cada posición la frecuencia y los desplazamientos se acercan.

Figura 22: Respuestas máximas en el cuerpo de la presa

Item	Position	Direction	Record	Analysis
Max. acceleration (cm/s <sup>2</sup> )	Dam crest	Stream	+510 -525	+680 -544
		Cross stream	+455 -437	+614 -472
		Vertical	+488 -622	+448 -472
	Middle of the center core	Stream	+402 -535	+327 -304
		Cross stream	+478 -380	+272 -258
		Vertical	+446 -470	+308 -412
	Foundation	Stream	+1024 -673	+993 -546
		Cross stream	+899 -713	+868 -624
		Vertical	+691 -614	+561 -524
Fundamental frequency (stream direction (Hz))			1.47	1.47
Relative displacement of the crest to the foundation in stream direction (cm)			+11.13 -11.76	+7.72 -11.58

[7]

### 4.1. Observación

#### 4.1.1. Revisión de casos históricos

Para poder obtener un análisis completo de los casos históricos se van a revisar estudios realizados sobre sismos y sus secuelas en diferentes países, principalmente en taludes. Para ello se buscarán estudios que contengan información sobre el colapso del talud, que cuente con información descriptiva sobre el sismo que lo azotó. La información que se busca recopilar sobre el sismo es: tipo de sismo, duración, intensidad, destrucción y fuente. Se busca información que pueda servir a las autoridades para poder dimensionar el peligro que genera un talud cuando está próximo a una población o lugar de paso.

#### 4.1.2. Análisis con métodos computacionales

Para cumplir con el objetivo se compararán dos formas de trabajar un análisis de estabilidad de taludes. Para ambas metodologías se buscará cuál es la fuente sísmica más crítica y se compararán los resultados. Se utilizará análisis pseudo-estático, que con la información de la aceleración pico y las cualidades del talud, tanto morfológicas como geológicas, calcula un valor de factor de seguridad para la estructura. Se ordenará de mayor a menor factor de seguridad, siendo el de menor factor de seguridad el más crítico. Para el análisis de elementos finitos los valores que se requieren son un acelerograma del sismo y los valores morfológicos y geológicos del talud. Se correrá cada análisis tres veces, con tres diferentes sismos: uno generado por una falla local en El Salvador, uno generado por una falla por subducción y un último generado por una falla local en la falla del Motagua. Los valores obtenidos se ordenarán de mayor a menor, siendo el de mayor deformación el escenario más crítico. Para



homogenizar el estudio los valores geológicos y morfológicos del talud serán los mismos para los seis análisis corridos. Luego de haber obtenido los resultados en orden más crítico, se compararán estos resultados.

### **Análisis con GEOSLOPE**

El programa GEOSLOPE es un programa que analiza la estabilidad de pendientes para suelo y rocas. El programa trabaja a través del diseño de estado límite (LFRD) utilizando datos de cargas permanentes o variables, peso unitario del suelo, factores sísmicos, resistencia del suelo, propiedades de los materiales y valores de refuerzo. Para los materiales de suelo se puede trabajar con el modelo Mohr-Coulomb lineal y espacial, con valores normales de ruptura, resistencia como una función de profundidad y con altas resistencias. Para el análisis sísmico utiliza el modelo pseudo-estático que crea una fuerza permanente representando el movimiento de la tierra durante un sismo. [10]

Los datos de entrada que requiere el programa para poder realizar el análisis son:

- Para el suelo requiere los datos de densidad, plasticidad y cohesión.
- Valor de aceleración pico (kh) del sismo.

El resultado que proporcionará el modelo es un valor de factor de seguridad, proporcionado en una gráfica. Para el presente análisis se utilizará el valor máximo obtenido dentro de la geometría del talud.

### **Análisis con ABAQUS**

ABAQUS es un programa que utiliza análisis por medio de elementos finitos de propósito general. El programa tiene un énfasis en el análisis estructural lineal y no-lineal para aplicaciones de ingeniería y transferencia de calor. [11]

Para modelar en el programa se utilizará un análisis 3D, el cual requerirá propiedades del material. En este trabajo se utilizó un modelo Mohr-Coulomb lineal el cuál requería propiedades de plasticidad y cohesión del material. Se restringió todos los movimientos del modelo a los laterales, ya que se asume que el talud es infinito. La carga que requiere este modelo es una carga de sismo uniforme sobre todo el elemento, donde la amplitud va a ser un acelerograma con tiempos en el eje horizontal y aceleraciones en g en el eje vertical. Se tendrá que programar una serie de pasos, que esto lo que dice es el valor en el tiempo en el cual se realizará el análisis (*e.g.*, Cada 0.01 s).

El programa al crear el análisis dará valores de deformación y de esfuerzos dentro del elemento. Para el presente se utilizará el valor de deformación máxima que se obtuvo con los esfuerzos inducidos por las aceleraciones aplicadas al material. La deformación máxima requiere observar todos los pasos creados dentro del programa y dentro de ellos poder encontrar el valor requerido.

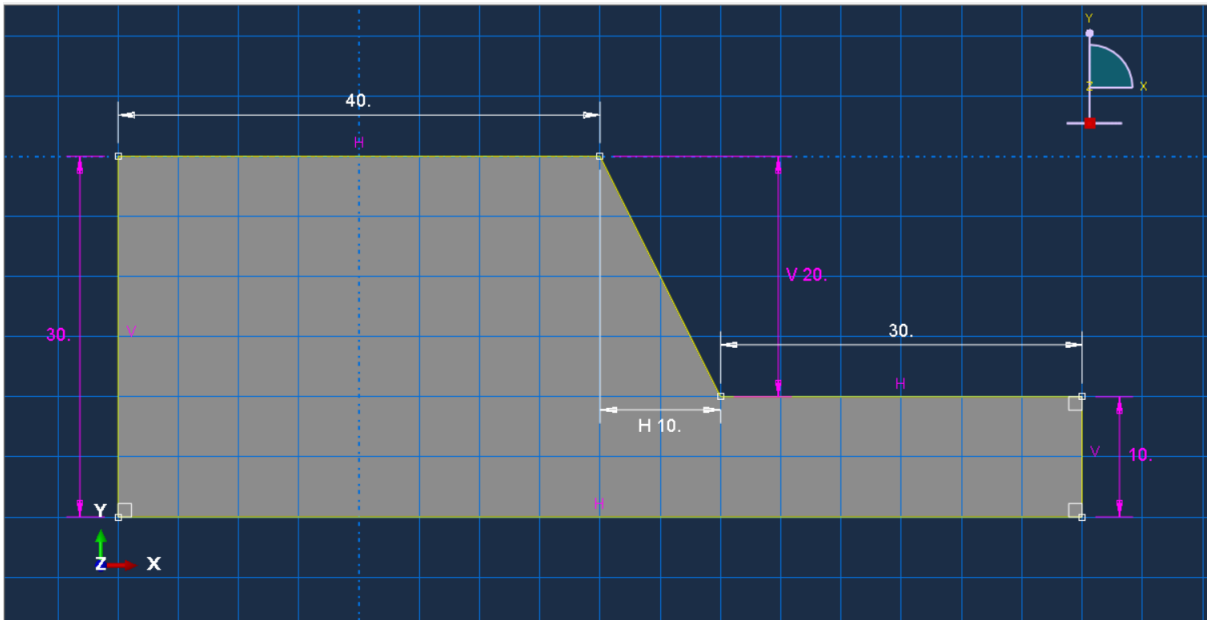
## 4.2. Descripción

### 4.2.1. Análisis con métodos computacionales

#### Modelado en Abaqus

Los valores del talud se pueden observar en la Figura 23. Los programas son adimensionales, entonces se trabajará en el sistema internacional (KMS). La pendiente que se busca es una pendiente con relación 1:2.

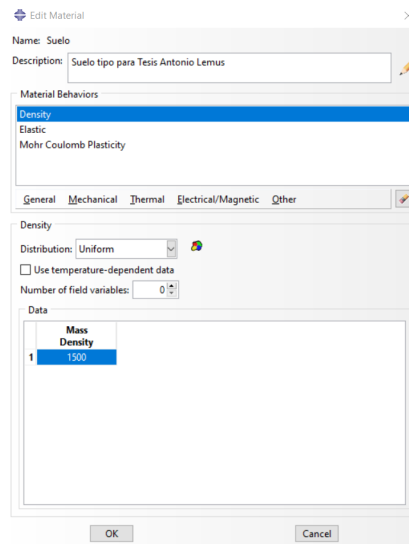
Figura 23: Dimensiones talud en modelo



Fuente: Elaboración propia

El valor de la densidad que se utilizará es de  $1,500 \text{ kg/m}^3$  para el suelo, el cual es un valor típico en los suelos de Guatemala. Se trabajará con un suelo uniforme u homogéneo, lo que quiere decir que no tiene variantes a través de la masa.

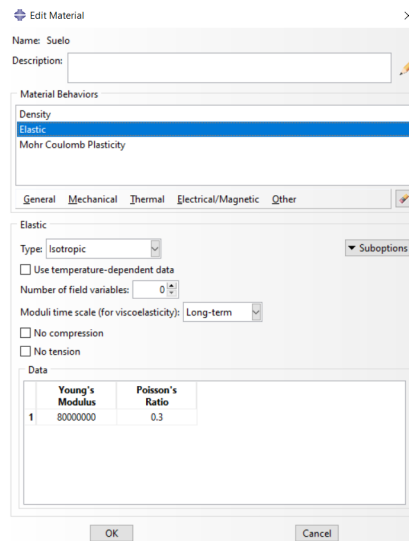
Figura 24: Valor de densidad en modelo



Fuente: Elaboración propia

El valor para el módulo de Young que se utilizará es de 80 MPa y un radio de Poisson de 0.3. Se definirá el material como isotrópico, lo que quiere decir que tiene los valores iguales en todas las direcciones.

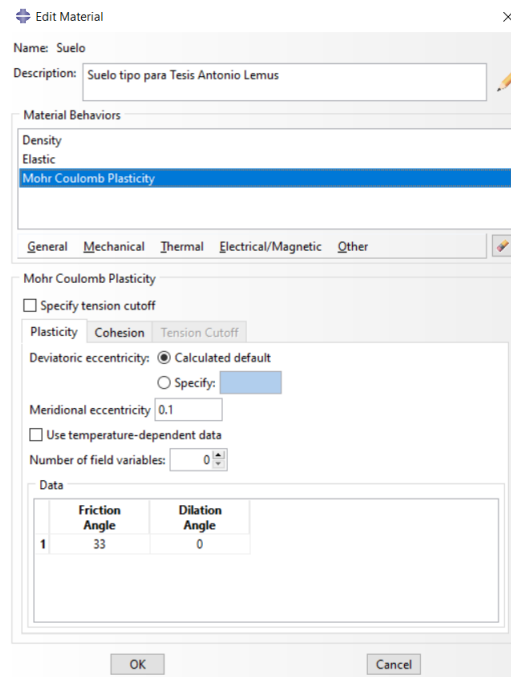
Figura 25: Valor elásticos en modelo



Fuente: Elaboración propia

Para el material de suelo se tomará un valor de ángulo de fricción de 33° y se dejará el valor predeterminado de ángulo de dilatación.

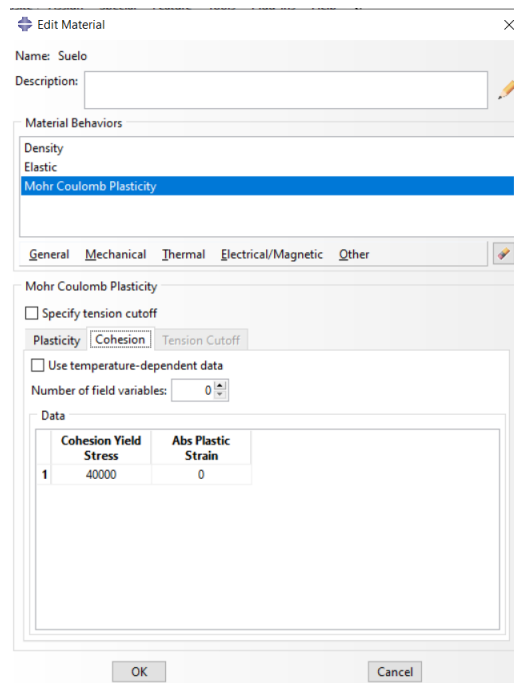
Figura 26: Valor plásticos en modelo



Fuente: Elaboración propia

Para los valores de cohesión se utilizará 40 kPa y se dejará el valor predeterminado en el valor absoluto de tensión plástica, ya que se asume que no pasará a la región inelástica el suelo del talud.

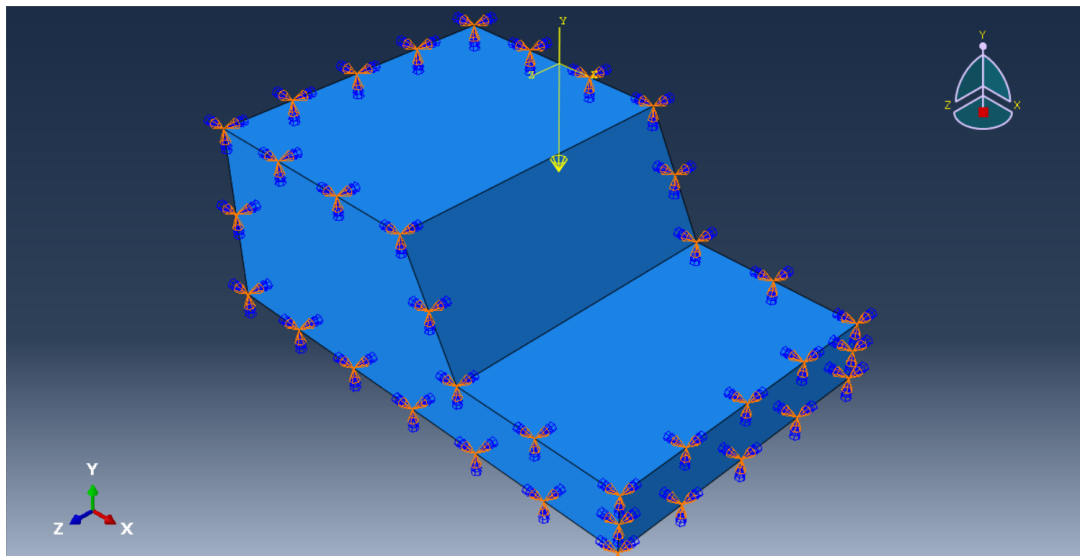
Figura 27: Valor cohesión en modelo



Fuente: Elaboración propia

Para las condiciones de frontera se considerará que todas las caras circundantes y la cara inferior están empotradas, debido a la continuidad del material. Esto quiere decir, que el talud no es un talud de las medidas determinadas sino que se extiende en las direcciones z, x y (-) y indefinidamente.

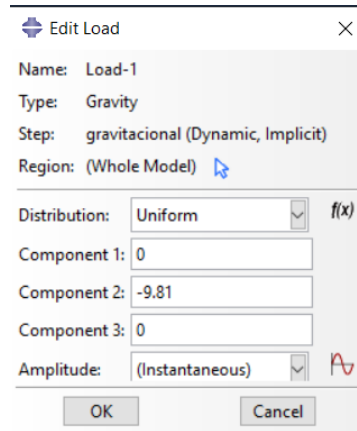
Figura 28: Condiciones de frontera en modelo



Fuente: Elaboración propia

La carga gravitacional que se utilizará es de  $9.81 \text{ m/s}^2$  en la dirección negativa de la componente 2. Esto quiere decir que es la dirección normal al plano x-z y que va a ir hacia abajo la aceleración. Es una distribución uniforme porque se quiere que la gravedad actúe sobre todo el talud de forma uniforme. Se considera una carga con amplitud instantánea ya que es una carga constante sobre el talud.

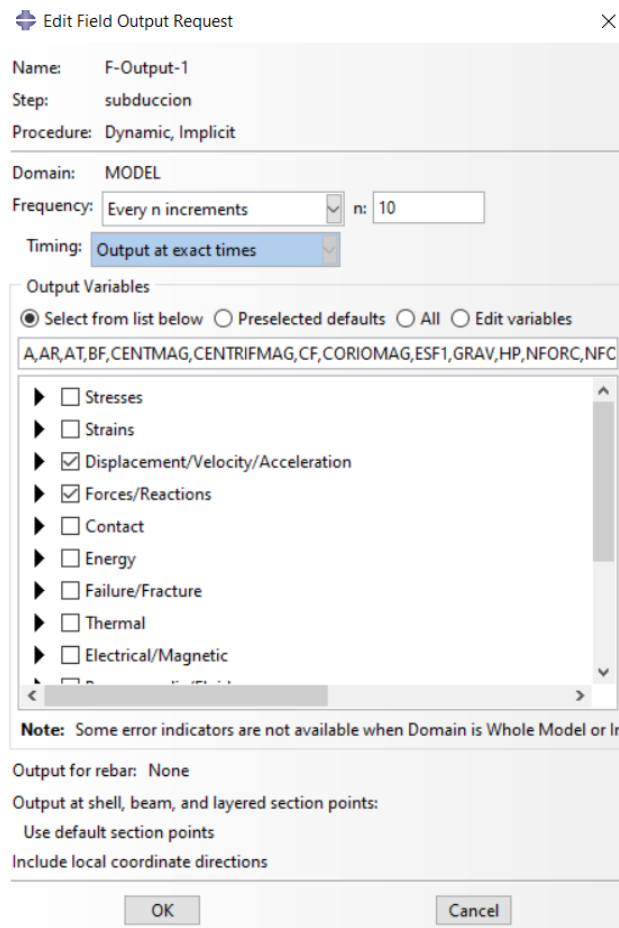
Figura 29: Carga gravitacional en modelo



Fuente: Elaboración propia

Para la solicitud de datos de salida se le pedirá un informe al programa sobre los desplazamientos en los nodos y los esfuerzos internos que tendrá el elemento cuando se le apliquen las cargas.

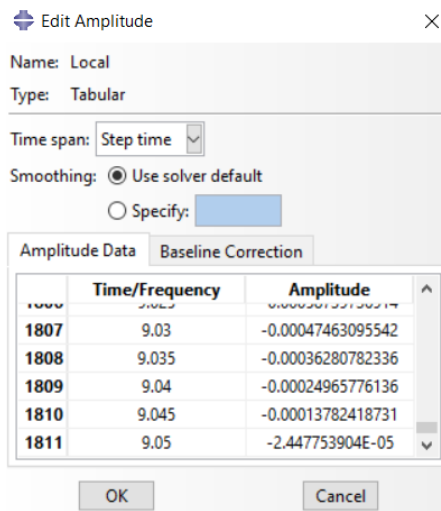
Figura 30: Tablas creadas del programa



Fuente: Elaboración propia

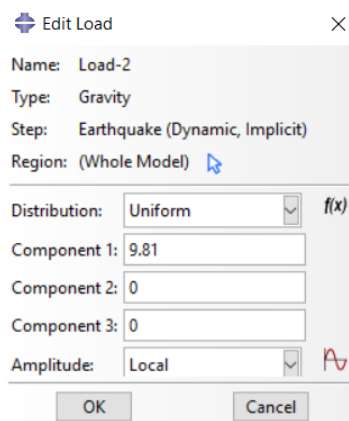
Para el ingreso del sismo se debe de ingresar el acelerograma completo, como una tabla de valores. Con la amplitud se creará una carga con valor de  $9.81 \text{ m/s}^2$  en la dirección horizontal x y se aplicará a toda la masa de manera homogénea. Se analizará cada 10 pasos y se tendrán en los rangos de tiempo proporcionados por el acelerograma.

Figura 31: Amplitudes en programa



Fuente: Elaboración propia

Figura 32: Carga de sismo aplicada en modelo

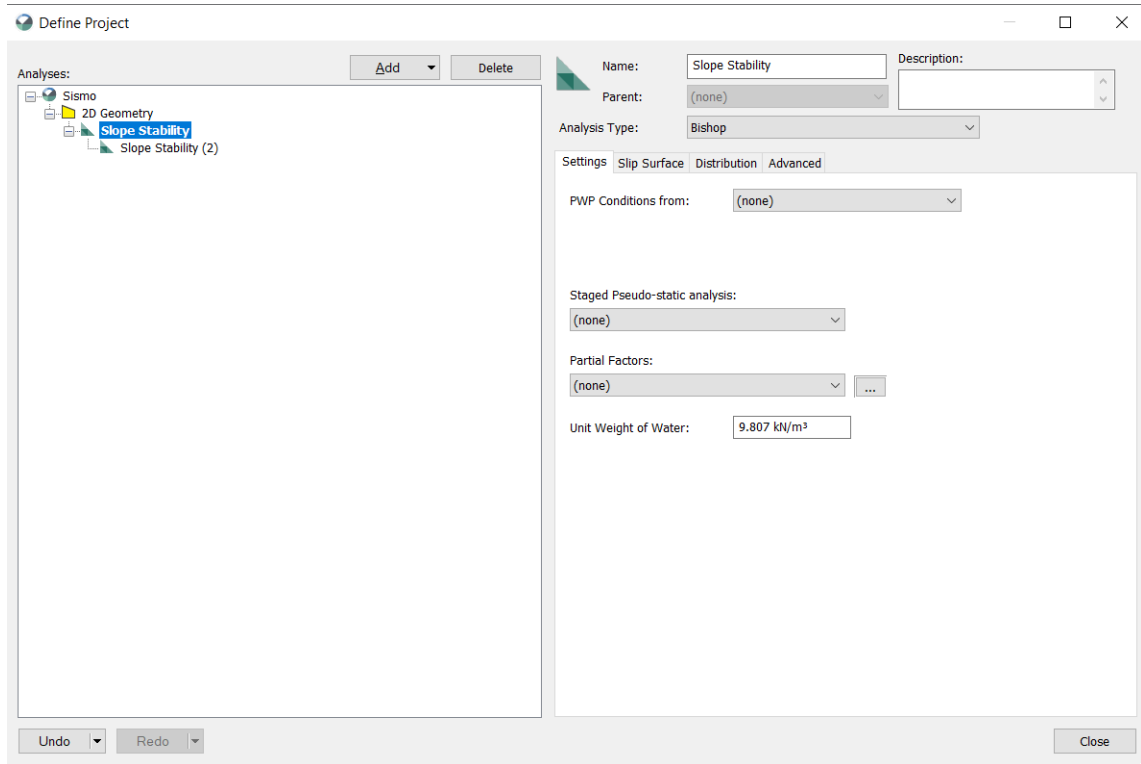


Fuente: Elaboración propia



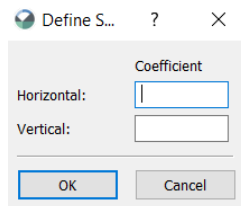
## Modelado en GEOSLOPE

Figura 33: Tipo de análisis aplicado en modelo pseudo-estático



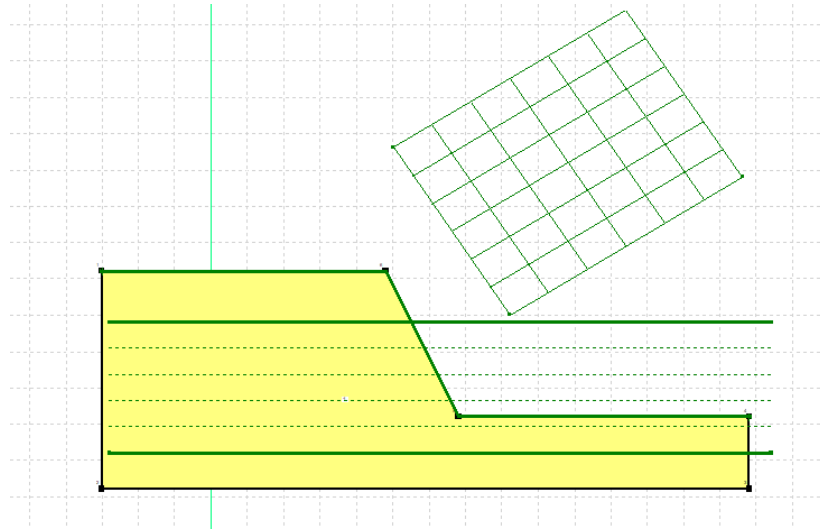
Fuente: Elaboración propia

Figura 34: Valores de sismo pseudo-estático para ingresar



Fuente: Elaboración propia

Figura 35: Diseño de modelo pseudo-estático



Fuente: Elaboración propia

### 5.1. Análisis de casos históricos

Los casos analizados en Guatemala, El Salvador y Japón evidencian la falta de estudio que hay en la región. Guatemala cuenta con una base de datos sobre sismos y deslizamiento de taludes limitada y la información que se tiene es incompleta. En Guatemala se pudo observar que el terremoto de febrero de 1976 es el más significativo y del que más información se puede recavar. Este terremoto generó destrucción en la mayoría del país, debido al epicentro en una falla local localizada en Izabal, específicamente en la falla del Motagua. Los asentamientos humanos fueron una gran parte de la población afectada, específicamente los que se encontraban asentados en laderas y zonas de riesgo.

El sismo en Guatemala en 1976 fue destructivo, ya que las estructuras no estaban preparadas para tal sismo. El sismo fue generado en la falla de Motagua, entre la interacción de placas de Caribe y Norte América. Dentro del estudio se recabó que debido a que la circulación de automóviles no era como la de hoy en día el estudio y la información del sismo es limitada. Sin embargo, el tema del deslizamiento de taludes toma mas relevancia en años posteriores ya que dejar incomunicados dos lugares en Guatemala puede llegar a ser crítico para la economía y para la vida de personas.

El sismo que provocó el deslizamiento de Las Colinas en El Salvador es relevante ya que causó 500 muertes debido a los asentamientos en la base del talud. Gracias a esto, estudios más extensos sobre el talud fueron conducidos. Se logró llegar a la conclusión que las masas tan grandes expuestas a erosión y con tanta gente en las faldas hay que estarlas monitoreando, específicamente en búsqueda de rajaduras. Otra recomendación importante es que hay que tener una norma clara para uso de suelo en los pies de los taludes para poder mitigar el saldo de vidas humanas.

El sismo Iwate Miyagi Nairiku en Japón tiene como factor más importante la aceleración pico, ya que sobrepasó los niveles de diseño en Japón. Es interesante observar que a pesar de que se han sobrepasado los límites entre 6 y 8 veces en la última década los daños materiales y pérdida de vidas humanas han sido bastante bajas. El deslizamiento en la provincia de Aratozawa en el embalse es un claro ejemplo que más parámetros sísmicos que no se limitan a la aceleración pico juegan un papel importante en el estudio de los taludes.

## **5.2. Análisis con método computacional**

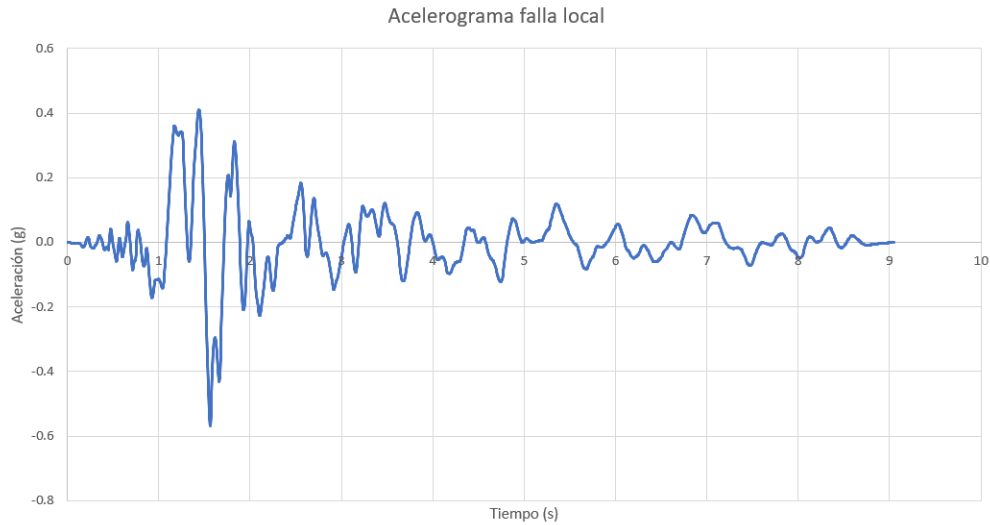
En análisis con método computacional trabajado en ABAQUS se basó en un modelo realizado con dimensiones predeterminadas y valores de suelo predeterminados. Los sismos ingresados son sismos locales y de subducción y se ingresaron como cargas dinámicas solamente en el plano horizontal. Para el análisis pseudo-estático se tomó la aceleración pico como referencia y a través de la lectura de el espectro sísmico se tomaron los valores  $K_v$  y  $K_a$  que requería el software Geoslope.

### **5.2.1. Sismos de falla local**

#### **Sismo en El Salvador**

De acuerdo a la información de la Figura 36 el sismo de falla local tiene una longitud de 10 segundos, con las aceleraciones pico entre el segundo 1 y 2. La aceleración pico tiene un valor de 0.56 g lo que equivale a  $5.49 \text{ m/s}^2$ . Esta aceleración es observada una vez, en el segundo 1.56. Las aceleraciones luego del periodo de excitación de mayores amplitudes son aceleraciones de valores menores a 0.2 g, lo que hace que tengan el 30 % de los valores máximos.

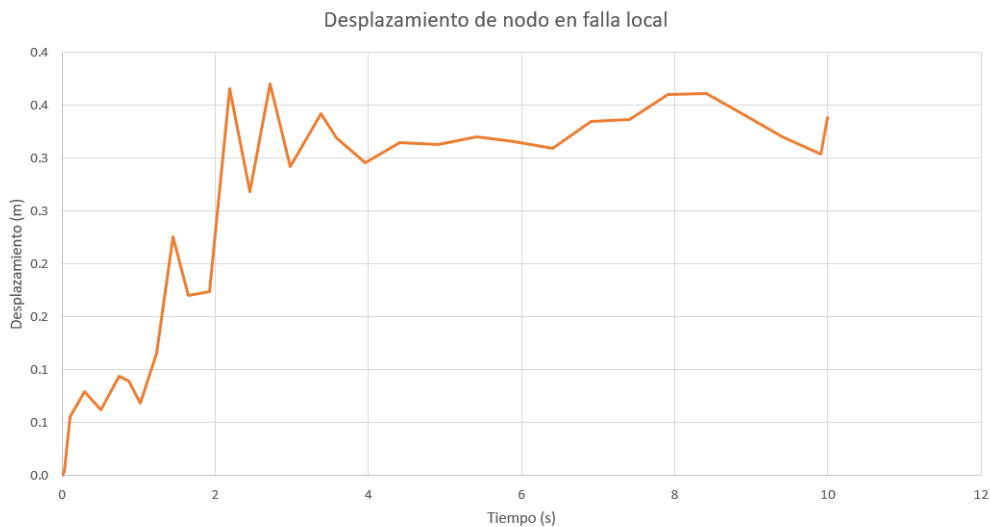
Figura 36: Acelerograma de falla local



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Figura 37 el desplazamiento del nodo llega a un valor máximo de 0.37 metros. En el momento que llega a este valor es a los 2.71 segundos. Se puede observar que después del segundo 1.02 los desplazamientos tienen un aumento abrupto, lo que se puede interpretar como una falla. Antes de la falla los desplazamientos tenían valores de 0.06 metros, luego de la falla tiene desplazamientos con valores de 0.36 metros. Los desplazamientos después del segundo 4 tienen valores estables, el talud ya no se mueve más de 7 centímetros.

Figura 37: Desplazamiento de nodo en falla local

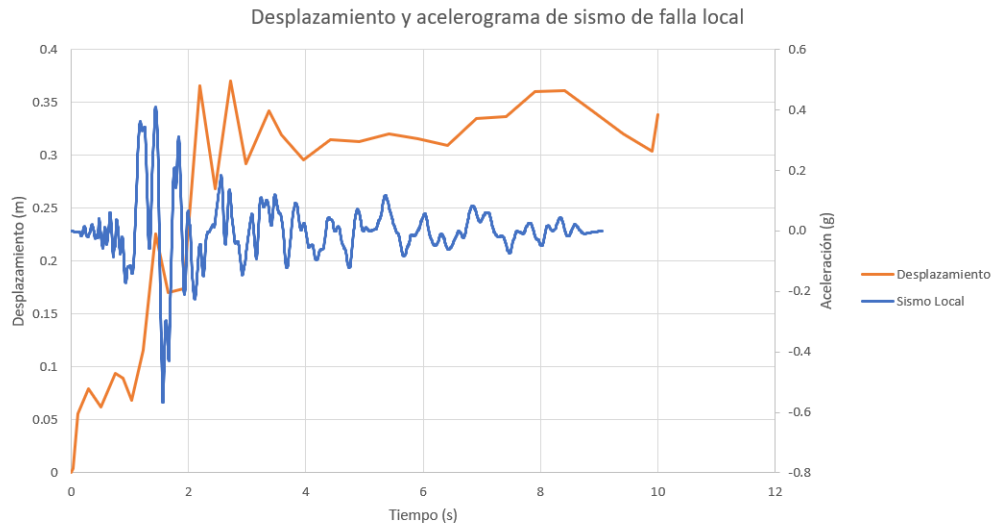


Fuente: Elaboración propia

Lo que se puede observar en la Figura 38 es en los momentos de mayor aceleración es cuando hay dos pendientes mayores, representando las fallas. Se puede también observar en

el momento en que la falla empieza, esto ocurre en el momento que la aceleración empieza ciclos con mayor amplitud en el acelerograma. Es consistente la aceleración del sismo con los desplazamientos mostrados por el talud.

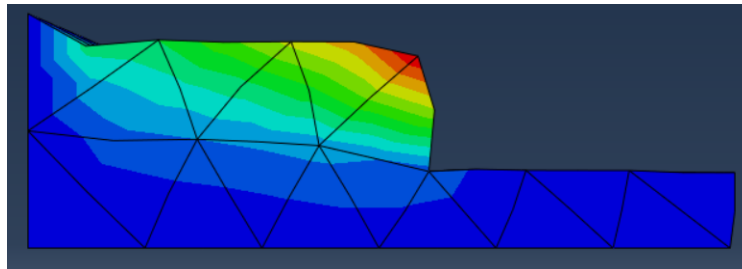
Figura 38: Comparación de desplazamientos contra sismo de falla local



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 39 se puede encontrar el resultado gráfico del modelo con un sismo de falla local. La escala de colores nos indica que el color rojo es dónde más se deformó, respondiendo así a el fallo normal de un talud, con el círculo de falla. Se puede observar el círculo de falla, ya que la disipación de deformaciones se puede observar en el cambio de colores hasta llegar a azul, que es una deformación 0. La Figura 39 nos demuestra como queda deformado el talud, con las deformaciones amplificadas, y todo esto después de la falla.

Figura 39: Resultado gráfico del modelo con sismo de falla local en El Salvador



Fuente: Elaboración propia

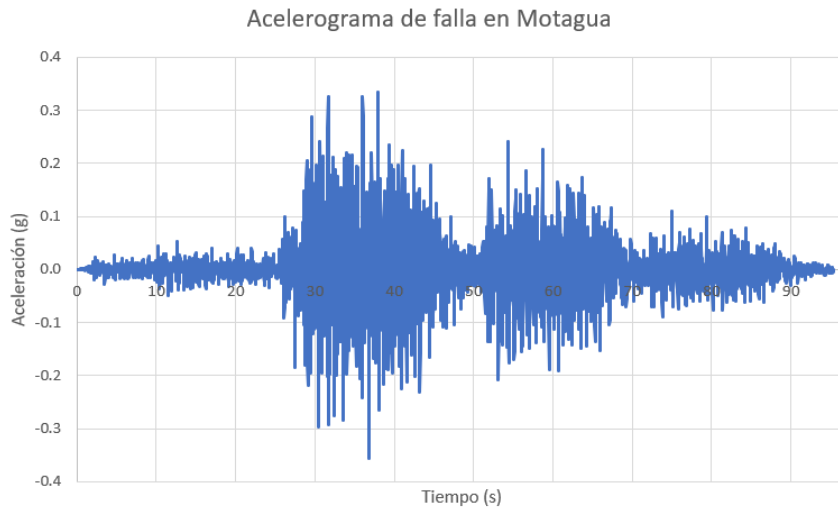
Se analizó el espectro de aceleraciones observado en la Figura 40. De este espectro se puede obtener la aceleración pico, que lo encontramos como el primer valor del mismo. El valor de la aceleración máxima del sismo es de 0.57 g.



## Sismo por falla en la falla de Motagua

El acelerograma que genera una falla en Motagua representado en la Figura 42 nos muestra que el sismo tiene una duración de 96 segundos de inicio a fin. Al inicio el sismo tiene amplitudes de 0.05, del segundo 0 al 25. Luego, el sismo genera aceleraciones pico con valores de 0.35 g en el módulo de 27-45 segundos. Se puede ver que las amplitudes disminuyen y luego se observa en el segundo de 50 que la segunda parte dura 25 segundos y la aceleración pico es de 0.24 g que ocurre en el segundo 54.32.

Figura 42: Acelerograma falla de Motagua

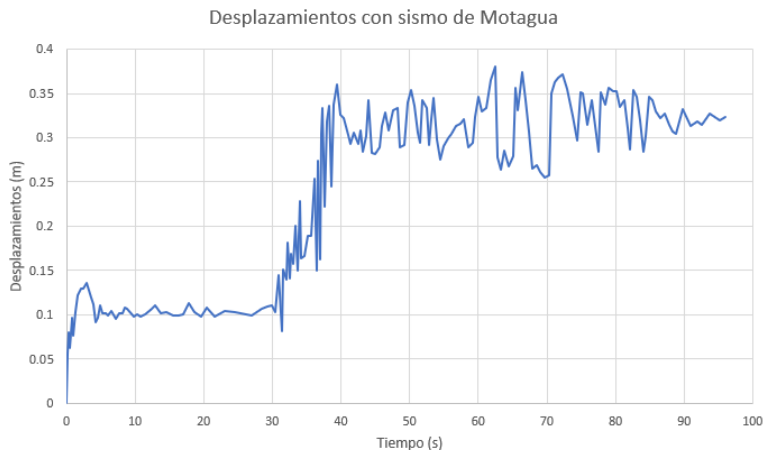


Fuente: Elaboración propia

Los desplazamientos que se muestran en la Figura 43 demuestran que del segundo 0 al 30 las deformaciones del talud son de 0.09 metros, luego se puede ver un incremento abrupto de los desplazamientos, lo que se interpreta, como una falla en el material. Luego de la falla, el talud llega a una deformación de 36 centímetros, manteniéndose en un rango de más menos 10 centímetros.



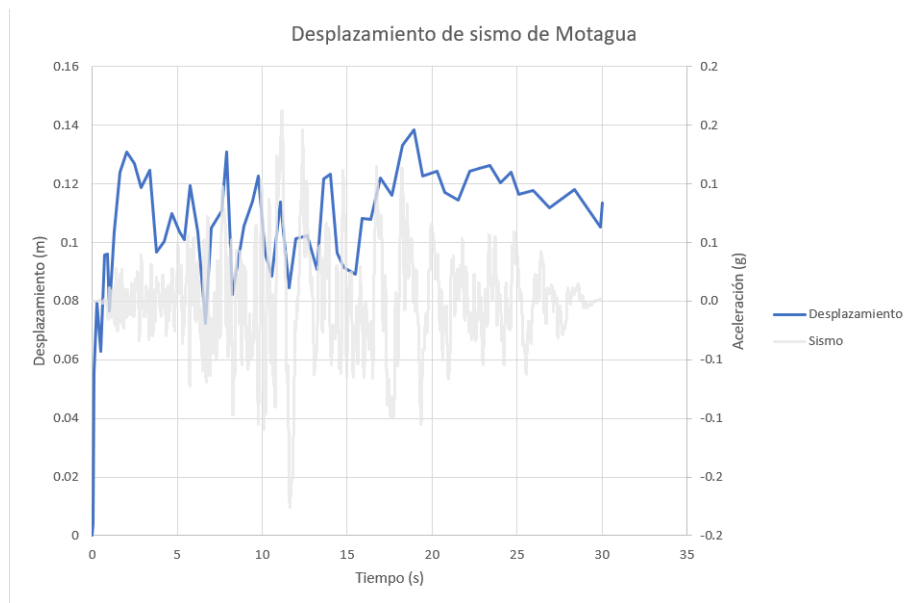
Figura 43: Desplazamiento por falla de Motagua



Fuente: Elaboración propia

Para la falla de Motagua, representado en la Figura 44, podemos observar que es una falla con sismo poco severo, con aceleraciones pico que apenas superan los 0.2 g. Las deformaciones al inicio no tienen consecuencia con el acelerograma, debido a que tiene aceleraciones de menos del 50 % en relación a las aceleraciones pico registradas por el sismógrafo. Las deformaciones llegan a ser más irregulares al momento que las aceleraciones pico ingresan.

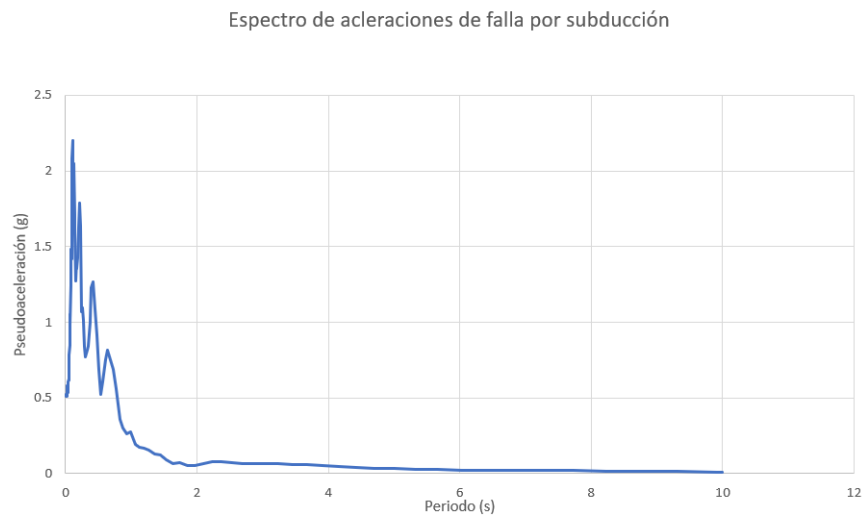
Figura 44: Comparación de desplazamientos contra sismo de Motagua



Fuente: Elaboración propia

Se analizó el espectro de aceleraciones observado en la Figura 40. De este espectro se puede obtener la aceleración pico, que lo encontramos como el primer valor del mismo. El valor de la aceleración máxima del suelo es de 0.57 g.

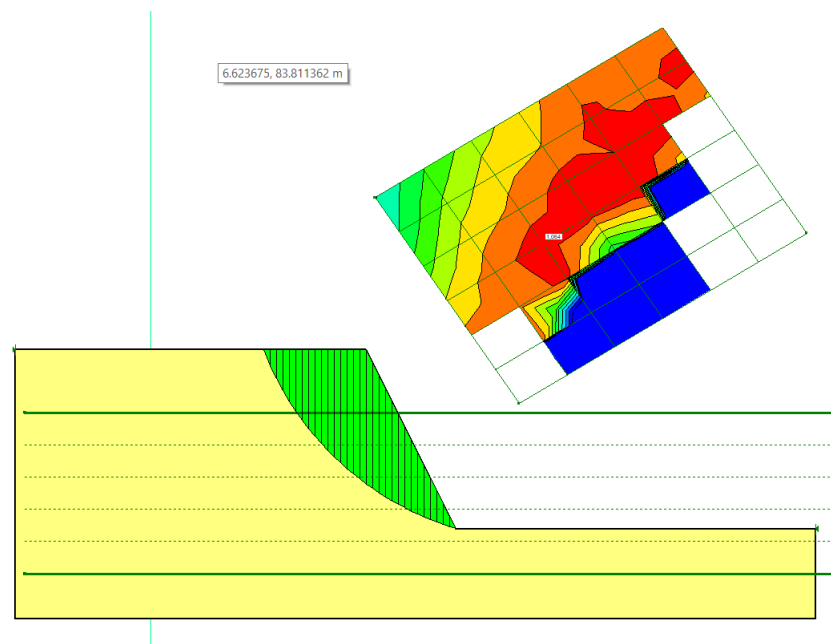
Figura 45: Espectro de aceleraciones de sismo local falla de Motagua



Fuente: Elaboración propia

Con el sismo provocado por la falla de Motagua se calculó un valor de factor de seguridad de 1.201, como lo indica la Figura 46 lo que indica que el talud con el sismo no colapsó.

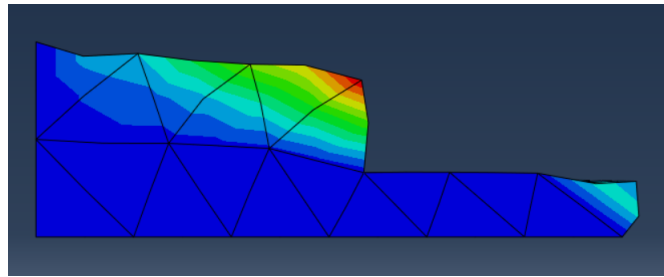
Figura 46: Resultado gráfico del modelo pseudoestático con sismo de falla local en la falla de Motagua



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 47 podemos encontrar que en los sismos ocurridos por fallas en área de subducción se generan los círculos de falla. El sismo genera que las deformaciones máximas, que tienen un valor de 81 centímetros, estén concentradas al centro del talud.

Figura 47: Resultado gráfico de deformaciones por falla local en Motagua

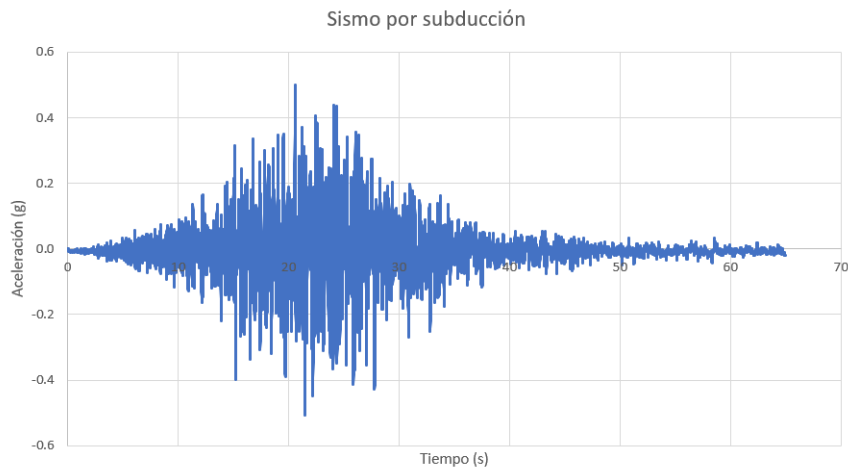


Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2. Falla por subducción

En el acelerograma de la falla por subducción retratada en la Figura 48 se puede observar que empieza con aceleraciones bajas en relación a las aceleraciones pico. Las aceleraciones suben de manera lineal y llegan a una aceleración máxima que es de 0.5 g. Sin embargo las aceleraciones que rodean a las aceleraciones pico no superan el 10 % de decrecimiento. Esto indica que el sismo en esos instantes está oscilando de manera enérgica por un período de 10-15 segundos. Después de la excitación del sismo las aceleraciones disminuyen de manera lineal. El sismo presenta una duración de 65 segundos de inicio a fin.

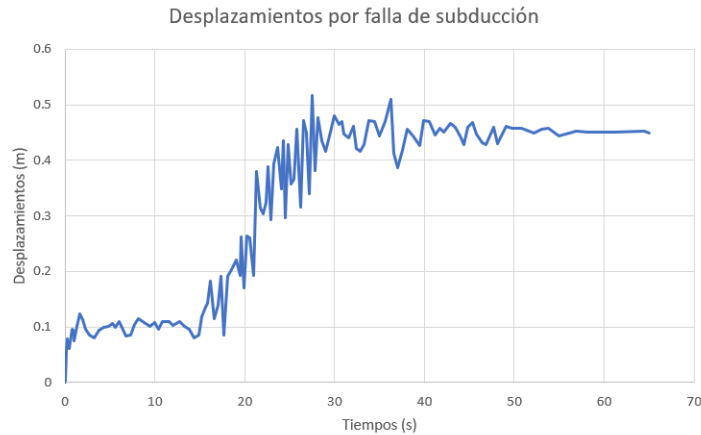
Figura 48: Acelerograma de falla por falla en área desubducción



Fuente: Elaboración propia

La gráfica de desplazamientos representada en la Figura 49 demuestra como el sismo afecta las deformaciones del nodo con mayor deformación. Al principio, del segundo 0 al 15 se puede observar que las deformaciones alcanzan los 12 centímetros. Sin embargo, luego de los 15 segundos se observa una pendiente, interpretable como la falla. Después de la falla las deformaciones tienen un valor de 45 centímetros.

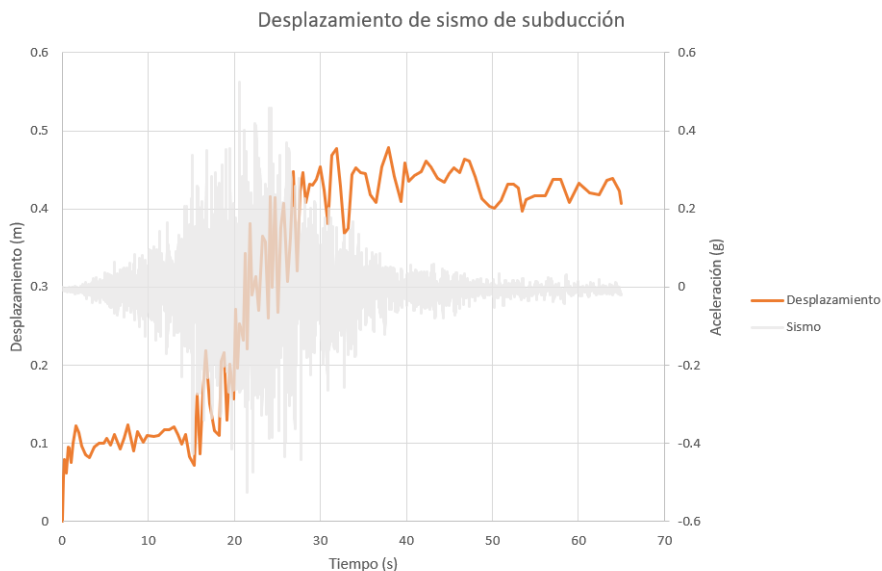
Figura 49: Desplazamientos por falla en área de subducción



Fuente: Elaboración propia

Según la Figura 50 se puede observar el sismo ocasionado por una falla en área de subducción y los desplazamientos que éste genera en el modelo. Las deformaciones que alcanza en el área de inicio del sismo son de 0.1 m. Al momento de intensificarse el sismo en el segundo 7 las deformaciones suben, llegando a la falla. En el momento de empezar a fallar el talud, el sismo está en el área de aumento de amplitudes. Luego de haber fallado podemos observar que a pesar que las aceleraciones son de menos de 0.1 g las deformaciones siguen siendo irregulares, sin estabilizarse en ningún punto durante el sismo.

Figura 50: Comparación de desplazamientos contra sismo de falla por subducción

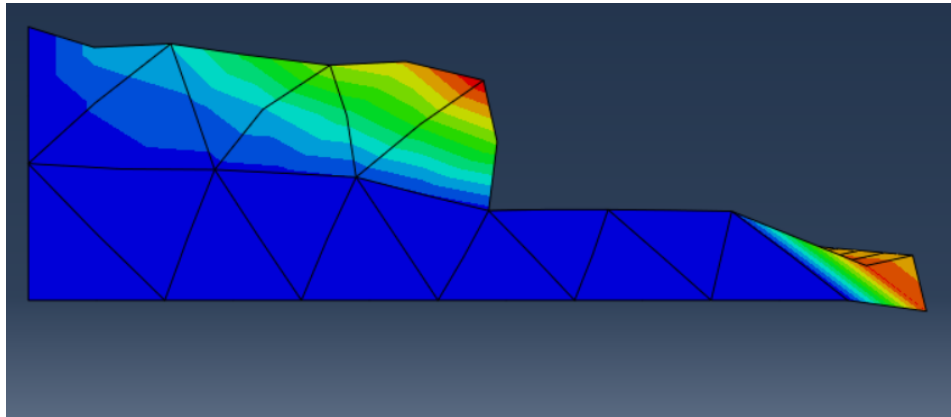


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 51 se puede encontrar que en los sismos ocurridos por fallas en área de subducción se generan los círculos de falla. El sismo genera que las deformaciones máximas,

que tienen un valor de 41 centímetros, estén concentradas al centro del talud.

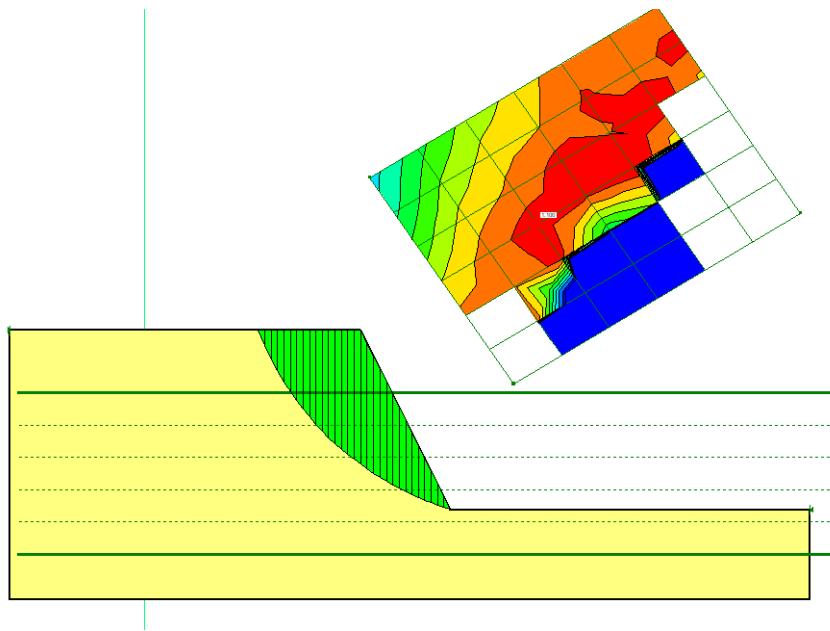
Figura 51: Resultado gráfico del modelo con sismo de falla de subducción



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 52 se puede observar que el valor de factor de seguridad para un sismo de subducción en el modelo pseudo-estático es de 1.100, lo que indica que el talud está a salvo de un colapso si un sismo con esa magnitud lo golpea.

Figura 52: Resultado de modelo pseudo-estático por sismo de subducción



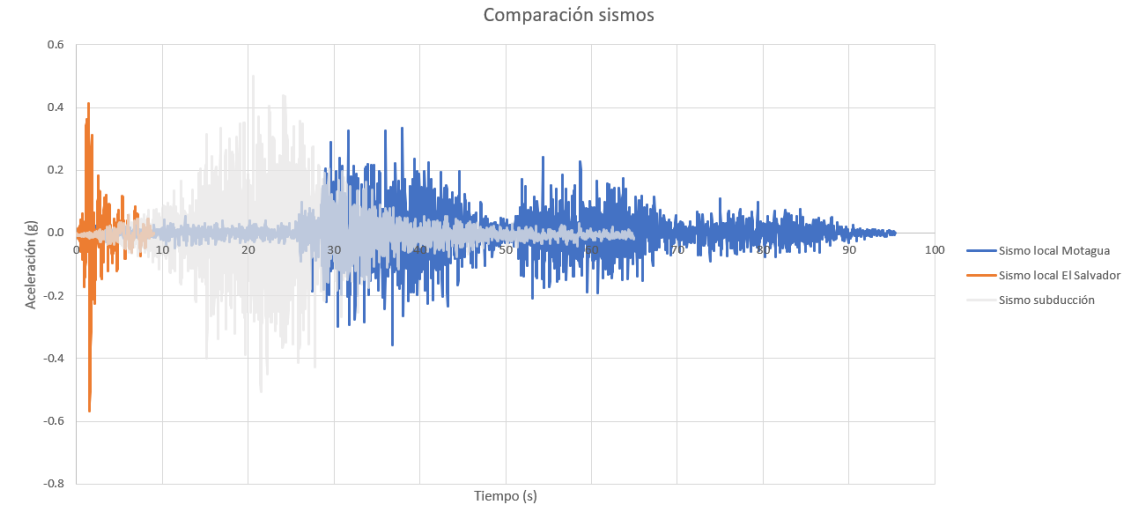
Fuente: Elaboración propia

### 5.2.3. Comparación de sismos

Como se puede observar en la Figura 53 el sismo que ocurrió en la falla local ocurrido en El Salvador fue el que tuvo la aceleración pico mayor, con un valor de 0.57 g, el segundo

con mayor aceleración pico fue el de falla de subducción con un valor de aceleración de 0.51 g y por último se encuentra al sismo por falla local que ocurrió en la falla del Motagua que tiene un valor de 0.36 g. También observable en la Figura 53 es los valores de longitud de los sismos, siendo el más duradero el sismo ocurrido en la falla del Motagua y el que menos duró el de la falla local en El Salvador.

Figura 53: Resultado de modelo pseudo-estático por sismo de subducción

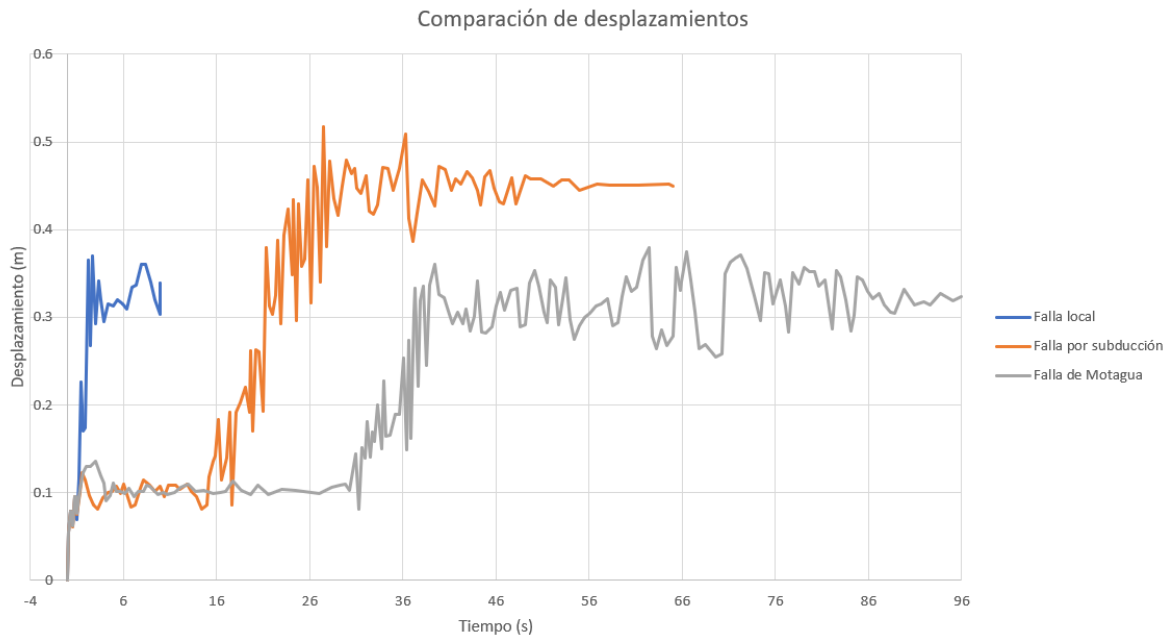


Fuente: Elaboración propia

#### 5.2.4. Comparación de desplazamientos

En la Figura 54 se muestra el desplazamiento de el mismo talud bajo tres diferentes sismos. La falla local en El Salvador, representada por el color azul, y en la falla de Motagua, representada en gris. Los sismos locales se comportan de maneras parecidas llevando las deformaciones a valores antes, durante y después de la falla a valores muy cercanos. El valor más alto de desplazamiento lo hizo el sismo por subducción, con un valor de 0.45. Los valores de deformación antes de la falla en los tres casos son parecidos, todos en el orden de los 0.3 metros. El tiempo en el que el material falla es diferentes, ya que falla primero el de falla local de El Salvador y de último el de falla de Motagua. Luego de la falla se puede observar que las deformaciones sufridas por el talud que fue sometido a las cargas de la falla del Motagua, no se estabilizaron.

Figura 54: Comparación de desplazamientos según tipo de sismo



Fuente: Elaboración propia

### 5.2.5. Comparación de modelos pseudo-estáticos

Según los resultados obtenidos del modelo pseudo-estático y proyectados en el Cuadro 1 el sismo que mayor daño hace es el sismo de falla local en El Salvador, debido a que su factor de seguridad es menor. Por último se encuentra el sismo local en Motagua con un valor de factor de seguridad de 1.201.

Cuadro 1: Valores obtenidos de factor de seguridad en modelos pseudo-estáticos

Tipo de sismo	Factor de seguridad obtenido
Falla local en El Salvador	1.064
Falla por subducción	1.100
Falla local en Motagua	1.201

Fuente: Elaboración propia

### 6.1. Observaciones de casos históricos

La región ha sido azotada por muchos eventos sísmicos, y se puede observar que han causado muertes y pérdidas monetarias. Los eventos estudiados en El Salvador, Guatemala y Japón evidencian que los sismos por fallas en áreas de subducción a pesar de tener una aceleración pico menor a la de una falla local son destructivos de igual manera, por lo que no hay que descartarlos del análisis. Se observó que los sismos generados por fallas de subducción son sismos con una longitud mayor y con una aceleración efectiva mayor, por lo que la cercanía a una falla por subducción, como lo es la localizada en el Anillo de Fuego en el Océano Pacífico, cerca de las costas guatemaltecas, debe de ser objeto de estudio y no sólo tomar en cuenta fallas locales.

El análisis de casos históricos destaca la relevancia del estudio y protección de los taludes. Muchas vidas en la región se han perdido gracias, ya sea al mal diseño, o negligencia de las autoridades con respecto a los taludes. Para ello hay que tener un estudio claro de cómo poder mejorar el diseño y poder optimizar las estructuras que protegen los mismos.

### 6.2. Resultados con métodos computacionales

Los sismos analizados son tres, dos sismos de falla local y uno por subducción. Cada uno de los tres tiene diferentes acelerogramas, con diferencias principales en duración total y valor de aceleración pico. El diseño a través de un análisis pseudo-estático solo requiere las aceleraciones pico, sin tomar en cuenta los otros factores del sismo. En comparación el análisis de desplazamientos por un método matemático computacional (Elementos finitos) requiere un acelerograma completo, con todos los valores y parámetros sísmicos, para poder analizar



el desplazamiento del talud. Al comparar los valores obtenidos como factor de seguridad con el análisis pseudoestático y con los valores de deformación con el análisis con el método de elementos finitos, se puede observar que no hay relación entre el sismo más destructivo para el talud y la aceleración pico. Se puede observar que la aceleración pico sigue siendo un factor determinante, sin embargo, si hay que tomar en cuenta los valores relacionados al sismo observadas en un acelerograma. Al obtener los resultados de los análisis por medio de elementos finito y pseudo-estático se puede observar que el valor de la aceleración pico no es el único factor determinante para saber si un talud va a colapsar, hay que tomar en cuenta la duración del sismo en su etapa con amplitudes mayores, la cantidad de veces que se llegan a aceleraciones altas y la duración total del sismo. Esto se puede deducir a partir de los valores más intensos en cada uno de los análisis ya que el valor más bajo de factor de seguridad fue el valor de el sismo local por falla en El Salvador, lo que quiere decir que fue el que más daño hizo al talud, y para el análisis por medio de elementos finitos fue el sismo por subducción ya que éste generó las mayores deformaciones.

Se estableció que todos los factores sísmicos que se pueden tomar en consideración, como lo son la amplitud, el tiempo, la aceleración pico y aceleraciones efectivas deben de ser incluidos en el análisis. Esto se puede observar en los resultados, ya que el sismo más destructivo para el talud según el análisis pseudo-estático es el generado por la falla local en El Salvador y el sismo más destructivo según el análisis por medio de elementos finitos es el generado por la falla por subducción. Se puede observar con los sismos que el sismo de subducción es un sismo más largo, sin embargo su aceleración pico es menor en comparación a la generada por la falla local. Esto evidencia que al utilizar un solo factor como lo es la aceleración pico, no se están tomando en cuenta factores nocivos para el elemento.

El análisis por medio de elementos finitos probó ser un análisis más completo, tomando en cuenta más variables para poder modelar un talud y su resistencia a un sismo. Se probó que el análisis pseudo-estático, al tomar en cuenta una sola variable, puede ser más impreciso a la hora de la toma de decisiones, ya que con un análisis de elementos finitos se pueden tomar más factores en cuenta dentro de un talud, como el esfuerzo y la deformación en todos las partes que componen el elemento estructural.

## CAPÍTULO 7

---

### Conclusiones

---

- Se determinó que los factores sísmicos que afectan los taludes son la duración, la amplitud, aceleración pico y aceleraciones efectivas.
- Se revisaron los casos históricos y se encontró que el tipo de fuente sísmica influye en el comportamiento del talud.
- Se definió que tanto un sismo provocado por una falla local como uno generado por una falla de subducción tienen que ser incluidos en los diseños de taludes para Guatemala.

---

### Recomendaciones

---

1. Para la Universidad a seguir el análisis de elementos finitos aplicados al estudio de taludes, para poder desarrollar el tema y así hacer modelos más exactos.
2. Si se desea continuar con el estudio utilizar diferentes comportamientos del material, no sólo un comportamiento lineal Mohr-Coulomb, para poder modelar de una manera exacta el comportamiento del talud.
3. A los geotécnicos que empiecen a utilizar diseños con elementos finitos para diseñar taludes, de esa manera poder diseñar de una manera segura los taludes.
4. Para las municipalidades acudir a diseñadores estructurales y geotécnicos para poder diseñar los taludes que generen riesgo a la población.
5. Si se desea reproducir el estudio contar con una versión que permita el análisis con más nodos y poder afinar el mesh, de esta manera tener un modelo que aproxime de mejor manera las deformaciones.
6. Para alumnos estudiar programas que utilicen elementos finitos para sus análisis y de esa manera profundizar el comportamiento de los materiales y las fuerzas reales aplicadas a la estructura, obteniendo modelos con mayor precisión.
7. A las autoridades crear una red de sismógrafos para poder captar acelerogramas reales en el territorio y de esa manera obtener data histórica para el diseño de todas las estructuras.

- 
- 
- [1] B. M. Das, *Ingeniería Geotécnica*, Parte 4. 2001, págs. 1-22, ISBN: 9781111576752.
  - [2] J. M. Duncan, S. G. Wright y T. L. Brandon, *Soil Strength and Slope Stability, 2nd Edition*. 2014, ISBN: 978-1-118-65165-0.
  - [3] S. Kramer, *Geotechnical earthquake engineering, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall*; 1996.
  - [4] J. Suarez, *Deslizamientos: Análisis Geotécnico*. 1978.
  - [5] A. R. White, “Catalog of historic seismicity in the vicinity of the Chixoy - Polochic and Motagua faults, Guatemala”, 1984.
  - [6] G. Survey, “The Guatemalan earthquake”, 1976.
  - [7] K. Kongai, J. Johansson, P. Mayorca, T. Yamamoto, M. Miyajima, R. Uzoka, N. E. Pulido, F. C. Durán, K. Sassa y H. Fukuoka, “Las Colinas Landslide Caused By the January 13, 2001 Off the Coast of El Salvador Earthquake”, *Journal of JAEE - Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, vol. 2, n.º 1, págs. 1-15, 2002, ISSN: 1884-6246.
  - [8] *USGS Earthquake Hazards Program*. dirección: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000a7m5/executive>.
  - [9] N. Yasuda, N. Matsumoto, M. Naruoka y Z. Cao, “Study on the mechanism of the peculiar behaviors of Aratozawa dam in the 2Yasuda, N., Matsumoto, N., Naruoka, M., & Cao, Z. (2018). Study on the mechanism of the peculiar behaviors of Aratozawa dam in the 2008 earthquake. 26th International Congress on La”, *26th International Congress on Large Dams, 2018*, págs. 1118-1138, 2018.
  - [10] *GEOSLOPE*. dirección: <https://www.geoslope.com/products/sloped/features>.
  - [11] *Abaqus*, dic. de 2018. dirección: <https://www.arl.hpc.mil/software/description.html?sw=Abaqus>.
  - [12] p. H. PL, *1976: el resumen trágico del Terremoto*, feb. de 2019. dirección: <https://www.prensalibre.com/hemeroteca/resumen-tragico-del-terremoto-de-1976/>.

Figura 55: Deslizamiento en San Cristóbal luego del terremoto de 1974



FIGURE 34.—Landslides in steep road cut in stratified pumice and ash deposits at San Cristobal, west of Guatemala City.

[5]

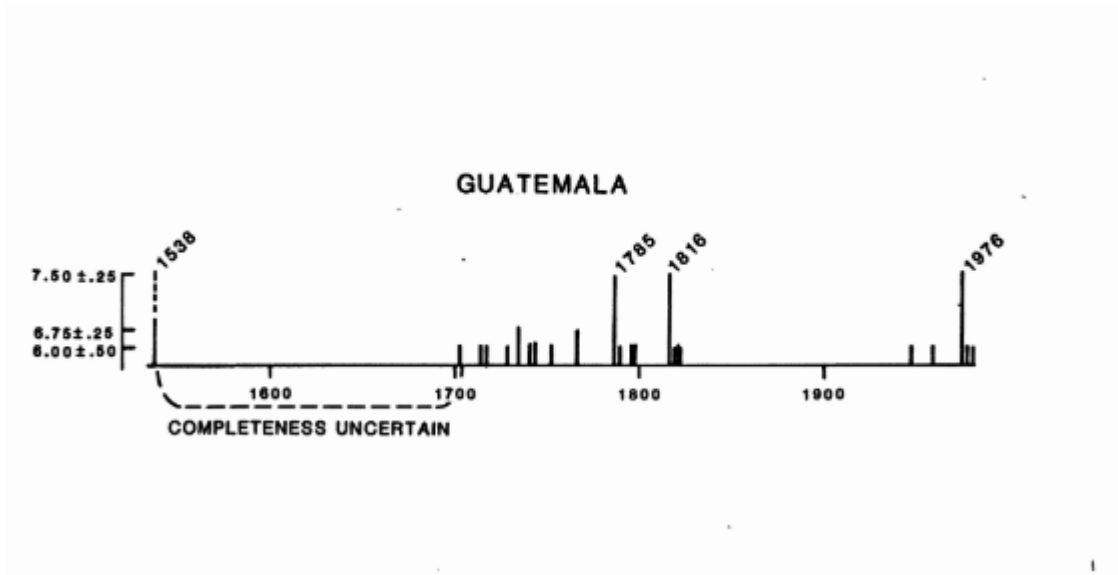
Figura 56: Deslizamiento en El Progreso después del Terremoto de 1974



FIGURE 41.—One of the many landslides obstructing the main highway from Guatemala City toward El Progreso.

[5]

Figura 57: Diagrama de movimientos sísmicos en Guatemala



[5]

Figura 58: Deslizamiento en Las Colinas El Salvador a través del tiempo



(a) January 14

Photo. by Mr. Jose Antonio Rivas



(b) February 4

[9]

Figura 59: Deslizamiento en Las Colinas, El Salvador



[9]

Figura 60: Deslizamiento en Las Colinas, El Salvador



[12]



