

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE TALUDES EN
SUELOS RESIDUALES EN CONDICIÓN PSEUDO-ESTÁTICA,
CASO EIA.**

OMAR STIVEN RIOS SERNA

Trabajo de grado para optar por título de ingeniero civil

Manuel Alonso Builes Brand

I.C M. Eng.



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2016**

A mis padres por su apoyo incondicional, por la motivación y ejemplo de vida que son. Por la educación y valores que inculcaron en mi vida, por ser mi fuente de motivación y darme la oportunidad de estudiar lo que quise. Todo este logro es gracias a su esfuerzo y amor.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su apoyo, amor y brindarme la oportunidad de estudiar en tan privilegiada universidad.

A Manuel Builes Brand, por su tiempo, paciencia y enseñanzas transferidas no solo en este proyecto sino durante el tiempo de mi desarrollo como profesional.

A Mauricio Ramírez Leal, por su acompañamiento y colaboración con el diseño y montaje de acoples, la plataforma vibratoria y el actuador dinámico.

A Santiago Quintero Vélez y Juan Fernando Sánchez Colorado, por su apoyo durante la extracción de las muestras y ejecución de los ensayos.

A Inducerchas S.A.S, por el descuento y trabajo elaborado en la plataforma vibratoria de acero.

A Carlos Andrés Blandón Uribe, por prestarme los acelerómetros.

A Rubén Darío Hernández Pérez, por ayudarme a posponer dos días la demolición del laboratorio de estructuras.

Al personal de laboratorio de estructuras y metal-mecánica por su conocimiento e instrumentos prestados para elaborar y corregir detalles de los ensayos. También por el apoyo financiero prestado para la compra de la plataforma vibratoria.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1 PRELIMINARES.....	15
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivos del proyecto	16
1.2.1 Objetivo general:	16
1.2.2 Objetivos específicos:.....	16
1.3 Marco de referencia.....	17
1.3.1 Antecedentes.....	17
1.4 Marco teórico:.....	18
1.4.1 Conceptos generales.....	18
1.4.2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes	22
1.4.2.1 Método de Spencer	23
1.4.2.2 Método de Morgenstern-Price	27
2 METODOLOGÍA.....	35
2.1 Obtención de la muestra de suelo	35
2.2 Ensayos de laboratorio	38
2.2.1 Corte directo simple no drenado no consolidado	38
2.2.1 Límites de Atterberg	39
2.2.2 Densidad del suelo	40
2.3 Montaje e instrumentación del modelo.....	41
2.3.1 Dimensionamiento del talud.....	41
2.3.2 Diseño de la plataforma vibratoria.	42
2.3.3 Extracción del talud	44
2.3.4 Instrumentación del talud.....	45

2.4	Evaluación del comportamiento sísmico del talud físico.....	46
2.5	Evaluación del comportamiento sísmico del talud empleando métodos de equilibrio límite	46
2.6	Comparación de resultados obtenidos del talud físico y el talud virtual.....	46
3	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	47
3.1	Resultados de ensayos de laboratorio.....	47
3.1.1	Ensayo de corte directo.....	47
3.1.2	Módulo de elasticidad.....	49
3.1.3	Límites de Atterberg.....	50
3.1.3.1	Limite líquido.....	50
3.1.3.2	Limite plástico.....	51
3.1.3.3	Índice de plasticidad.....	51
3.1.4	Densidad del suelo.....	53
3.2	Montaje e instrumentación del modelo.....	54
3.2.1	Plataforma vibratoria.....	54
3.2.2	Extracción del talud.....	56
3.2.3	Instrumentación del talud.....	56
3.3	Comportamiento sísmico del talud físico.....	57
3.3.1	Ensayo 1.....	57
3.3.1.1	Movimiento armónico con frecuencia=1Hz.....	57
3.3.1.2	Movimiento armónico con frecuencia= 2Hz.....	59
3.3.2	Ensayo 2.....	61
3.3.2.1	Movimiento armónico con frecuencia= 1Hz.....	61
3.3.2.2	Movimiento armónico con frecuencia= 2Hz.....	63
3.3.3	Ensayo 3.....	65
3.3.3.1	Movimiento armónico con frecuencia= 1Hz.....	65

3.3.3.2	Movimiento armónico con frecuencia= 2Hz	67
3.3.4	Deformaciones	68
3.4	Comportamiento sísmico del talud virtual	75
3.4.1	Superficies de falla y factor de seguridad	75
3.4.2	Deformaciones	81
3.5	Comparación de resultados	85
4	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES.....	87
4.1	Conclusiones	87
4.2	Consideraciones	87
5	REFERENCIAS	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Resultados de esfuerzos cortantes	48
Tabla 2	Resultado ángulo de fricción y cohesión	49
Tabla 3	Esfuerzo a cortante máximo en el rango elástico	49
Tabla 4	Esfuerzo de corte en el 50%	49
Tabla 5	Resultados límite líquido	50
Tabla 6	Resultados límite plástico.....	51
Tabla 7	Registro de aceleraciones máximas del ensayo 1 con frecuencia de 1Hz.....	57
Tabla 8	Incremento de aceleraciones ensayo 1 (1Hz)	58
Tabla 9	Registro de aceleraciones máximas del ensayo 1 con frecuencia de 2Hz.....	59
Tabla 10	Incremento de aceleraciones ensayo 1 (2Hz)	60
Tabla 11	Registro de aceleraciones máximas del ensayo 2 con frecuencia de 1Hz.....	61
Tabla 12	Incremento de aceleraciones ensayo 2 (1Hz)	62
Tabla 13	Registro de aceleraciones máximas del ensayo 2 con frecuencia de 2Hz.....	63
Tabla 14	Incremento de aceleraciones ensayo 2 (2Hz)	64
Tabla 15	Registro de aceleraciones máximas del ensayo 3 con frecuencia de 1Hz.....	65
Tabla 16	Incremento de aceleraciones ensayo 3 (1Hz)	66
Tabla 17	Registro de aceleraciones máximas del ensayo 3 con frecuencia de 2Hz.....	67
Tabla 18	Incremento de aceleraciones ensayo 3 (2Hz)	68
Tabla 19	Deformaciones absolutas por SeismoSignal ensayo 1	70
Tabla 20	Deformaciones absolutas por SeismoSignal ensayo 2 (1Hz)	71
Tabla 21	Deformaciones absolutas por SeismoSignal ensayo 2 (2Hz)	72
Tabla 22	Deformaciones absolutas por SeismoSignal ensayo 3 (1Hz)	73
Tabla 23	Deformaciones absolutas por SeismoSignal ensayo 3 (2Hz)	74
Tabla 24	Resumen de aceleraciones máximas con frecuencia de 1Hz.....	76

Tabla 25	Resumen de aceleraciones máximas con frecuencia de 2Hz.....	76
Tabla 26	Superficies de falla y factores de seguridad en condiciones sísmicas	76
Tabla 27	Reducción de factores de seguridad	80
Tabla 28	Deformaciones ensayo 1 en condiciones sísmicas	82
Tabla 29	Deformaciones ensayos 2 y 3 en condiciones sísmicas	83
Tabla 30	Resumen deformaciones teóricas (Phase 2) y experimentales (SeismoSignal) 86	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representación fuerza sísmica	16
Figura 2	Esquema general de una ladera en suelo residual de granito	18
Figura 3	Nomenclatura de taludes y laderas	19
Figura 4	Ondas primarias.....	21
Figura 5	Ondas Secundarias.....	21
Figura 6	Métodos de análisis de estabilidad de taludes	22
Figura 7	Fuerzas entre dovelas y fuerza resultante cuando son paralelas	24
Figura 8	Fuerzas en la dovela.....	24
Figura 9	Coordenadas de superficie de falla por método de Spencer	26
Figura 10	Ecuaciones de equilibrio de la masa potencial de deslizamiento.	27
Figura 11	Fuerzas actuantes en una dovela.....	28
Figura 12	(a) Elemento en la interfaz entre dos dovelas; (b) Esfuerzos efectivos actuantes en el elemento.....	31
Figura 13	Ubicación de la EIA y punto de extracción de la muestra	35
Figura 14	Mapa geológico de Antioquia.....	36
Figura 15	Perfil de suelo.....	37
Figura 16	Ensayo de corte simple no drenado no consolidado.....	38
Figura 17	Modelo virtual de instalación de actuador dinámico y estructura vibratoria .	41
Figura 18	Dimensiones del talud	42
Figura 19	Diseño de partes de la plataforma vibratoria.....	42
Figura 20	Diseño de plataforma vibratoria acoplada.....	43
Figura 21	bosquejo de extracción de la muestra.....	44
Figura 22	Molde de madera.....	44
Figura 23	Talud sobre mesa metálica.....	45

Figura 24	Acelerómetro Crossbow	45
Figura 25	Ensayo de corte directo	47
Figura 26	Esfuerzo cortante vs esfuerzo normal.....	48
Figura 27	Procedimiento ensayo límite líquido	50
Figura 28	Límite líquido	51
Figura 29	Carta de Casagrande para suelos cohesivos.....	52
Figura 30	Molde para determinar la densidad del suelo.....	53
Figura 31	Plataforma vibratoria y base de nivelación.....	54
Figura 32	Ampliación de perforaciones del apoyo	54
Figura 33	Instalación del actuador dinámico.....	55
Figura 34	Acople entre actuador dinámico y estructura vibratoria.....	55
Figura 35	Extracción y moldeo del talud	56
Figura 36	Ubicación acelerómetros en el talud	56
Figura 37	Aceleraciones primer ensayo con frecuencia de 1Hz.....	57
Figura 38	Aceleraciones primer ensayo con frecuencia de 2Hz.....	59
Figura 39	Aceleraciones segundo ensayo con frecuencia de 1Hz	61
Figura 40	Aceleraciones segundo ensayo con frecuencia de 2Hz	63
Figura 41	Aceleraciones tercer ensayo con frecuencia de 1Hz.....	65
Figura 42	Aceleraciones tercer ensayo con frecuencia de 1Hz.....	67
Figura 43	(a) Acelerograma corregido del ensayo 1 (1Hz) corona; (b) Deformación... 69	
Figura 44	(a) Acelerograma corregido del ensayo 1 (1Hz) medio; (b) Deformación..... 69	
Figura 45	(a) Acelerograma corregido del ensayo 1 (2Hz) corona; (b) Deformación... 69	
Figura 46	(a) Acelerograma corregido del ensayo 1 (2Hz) medio; (b) Deformación.... 70	
Figura 47	(a) Acelerograma corregido del ensayo 2 (1Hz) corona; (b) Deformación... 71	
Figura 48	(a) Acelerograma corregido del ensayo 2 (1Hz) medio; (b) Deformación.... 71	

Figura 49	(a) Acelerograma corregido del ensayo 2 (2Hz) corona; (b) Deformación...	72
Figura 50	(a) Acelerograma corregido del ensayo 2 (2Hz) medio; (b) Deformación....	72
Figura 51	(a) Acelerograma corregido del ensayo 3 (1Hz) corona; (b) Deformación...	73
Figura 52	(a) Acelerograma corregido del ensayo 3 (1Hz) medio; (b) Deformación....	73
Figura 53	(a) Acelerograma corregido del ensayo 3 (2Hz) corona; (b) Deformación...	74
Figura 54	(a) Acelerograma corregido del ensayo 3 (2Hz) medio; (b) Deformación....	74
Figura 55	Modelación del talud en Slide	75
Figura 56	Factor de seguridad del talud en condiciones estáticas	75
Figura 57	Propiedades del suelo en Phase 2	81
Figura 58	Modelo del ensayo 1 talud en Phase 2.0	81
Figura 59	Modelo de ensayos 2 y 3 talud en Phase 2.0.....	83
Figura 60	Falla por falta de confinamiento en el talud físico y el modelo de Phase.....	85

RESUMEN

La distribución de fuerzas generadas por un sismo en un talud, además de ser consideradas constantes en la superficie de falla, se asumen en función de la masa de deslizamiento potencial del talud. Esto se debe a que el sistema de ecuaciones que se genera en cada parte del talud (dovela) es indeterminado si estas fuerzas no son consideradas constantes ni conocidas.

El propósito de esta investigación es tratar de conocer y entender el comportamiento de la distribución de la fuerza real obtenida por un sismo en diferentes tramos del talud, elaborando un modelo a escala y comparándolo con los métodos que se utilizan en diseño actualmente como el método de Spencer y Morguestern-Price, a fin de analizar las variaciones en las fuerzas, deformaciones y aceleraciones entre el modelo a escala que representa probablemente lo natural y un modelo virtual que representa las metodologías de diseño actuales. Se realizará un modelo a escala, extrayendo la muestra del campus de la EIA y moldeándolo a las condiciones previamente definidas en el trabajo, este se someterá a una fuerza oscilatoria, la cual representa el sismo en un talud en condición pseudo-estática, el comportamiento obtenido de este modelo físico se comparará con un modelo virtual utilizando los softwares Slide y Phase 2 de Rocscience, el cual tendrá las mismas condiciones que el modelo físico.

Palabras Clave: Fuerza sísmica, factor de seguridad, métodos de equilibrio límite, cohesión y ángulo de fricción.

ABSTRACT

The distributed forces generated by an earthquake on a slope, besides being assumed to be constant at the failure surface, are also based on the mass of the potential slip slope. This is because the equation system generated in each part of the slope (slice) is unknown, if this force is not taken as constant and known.

The purpose of this research is to know and understand the real seismic distributed force behavior in different sections of the slope, making a scale model and comparing it with the methods currently used in design, such as Spencer and Morgenstern-Price methods; in order to analyze the variations in the forces, deformations and accelerations between the scale model which probably represents the natural, and a virtual model which represent the current design methodologies. The scale model was made by extracting a sample from the campus of the EIA and molding it to the conditions previously defined in this paper. It will be submitted to an oscillatory force, which represents the quake on a slope in pseudo-static conditions, the behavior obtained of the physical model will be compared to a virtual model using the softwares Slide and Phase 2 from Rocscience, which have the same conditions as the physical model.

Key words: seismic force, factor of safety, methods of limit equilibrium, cohesion and friction angle.

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años los análisis de estabilidad de taludes se han realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite, las cuales dependen de la resistencia del suelo. "Este método supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0" (Suárez Díaz, 1998).

Las teorías actuales de diseño en estabilidad de taludes parten de la idea de un suelo isotrópico al cual se le han desarrollado métodos de análisis de superficies de falla circulares o elipsoidales, pero en la realidad, los suelos residuales (suelos no isotrópicos), requieren de un estudio de falla con un enfoque diferente, no geométrico y no simétrico.

Este trabajo busca comparar el comportamiento de la distribución de fuerza sísmica de un talud escala con los métodos de diseño de Spencer y Morgenstern-Price. A fin de observar si la manera en que se analiza el comportamiento de las fuerzas sísmicas en los taludes corresponde a la manera en que se comporta en la naturaleza.

1 Preliminares

1.1 Planteamiento del problema

Un Talud es una superficie inclinada con respecto a la horizontal que adopta permanentemente una estructura de tierra, (Matteis, 2003). Los taludes pueden llamarse laderas si estos se producen de forma natural o puede llamarse talud artificial si es realizado por el hombre.

López y Morales(2003) afirman que los sismos son una de las causas naturales más importantes que activan la inestabilidad de un talud. “Según la estadística mundial, sobre los 25 deslizamientos más catastróficos ocurridos en el siglo XX, el 36% de ellos fueron detonados por acciones sísmicas”. Según Hack, Alkema, Kruse, Leenders y Luzi (2007), la inestabilidad de los taludes causa más destrucción y muertes que el propio terremoto. Un ejemplo claro de esto es el sismo de Alaska de 1964, en el cual el 56% del costo total de daños fue causado por los deslizamientos inducidos por el sismo (Kramer, 1996).

Matteis (2003), define la estabilidad como el factor de seguridad de una masa de tierra contra la falla o el movimiento, es decir, es la garantía de que un deslizamiento de tierra no ocurra. Según Suárez Díaz (1998), en la práctica común de la ingeniería, la estabilidad de un talud se define en términos de un factor de seguridad (Fs), el cual se obtiene de un análisis matemático de estabilidad en el que se consideran la mayoría de los parámetros que puedan afectar su estabilidad, como lo es su geometría, posibles flujos de agua, propiedades del suelo, entre otras. Pero hay factores que no se pueden cuantificar o determinar, como es el caso de la distribución de la fuerza sísmica, la cual si se varía en la superficie de falla hace que el análisis del sistema sea indeterminado como se mencionó anteriormente, por ende no se pueden incluir en el modelo o simplemente se asumen, generando una incertidumbre en la estabilidad del talud, esta es la razón por la cual hay situaciones en las que no se obtienen resultados satisfactorios.

Las ondas sísmicas pueden amplificarse o reducirse según el tipo de material por el cual viajan, en el caso más crítico el incremento en el coeficiente sísmico de aceleración puede superar el de diseño, lo que trae como repercusión la inestabilidad y falla del talud. Actualmente las investigaciones que se han realizado en los taludes se enfocan en la reacción de determinados tipos de suelos frente a los sismos o los tipos de fallas producidos en los taludes, esto con el fin de entender el comportamiento de los taludes. Suárez Díaz, menciona que la fuerza sísmica aplicada en los taludes se asume, que es proporcional al peso de la masa de deslizamiento potencial y de los coeficientes sísmicos horizontales y verticales, los cuales se dividen en un número determinado de dovelas (esto se puede observar en Figura 1). El motivo por el que esta fuerza es constante es una razón matemática, se sabe que para resolver problemas de ecuaciones, mínimo se debe tener la misma cantidad de ecuaciones que de incógnitas, por lo tanto, si la fuerza sísmica se varía en toda la superficie de falla se tendría una cantidad de incógnitas mayor a las ecuaciones posibles para solucionarlo, lo que haría del problema un sistema indeterminado. El propósito de esta investigación es tratar de conocer y entender el comportamiento de la distribución de la fuerza real obtenida por un sismo en diferentes tramos del talud, elaborando un modelo a escala y comparándolo con los métodos que se utilizan en diseño

actualmente como el método de Spencer y Morguestern-Price, ya que estos métodos satisfacen el equilibrio de fuerzas horizontales, verticales y momentos.

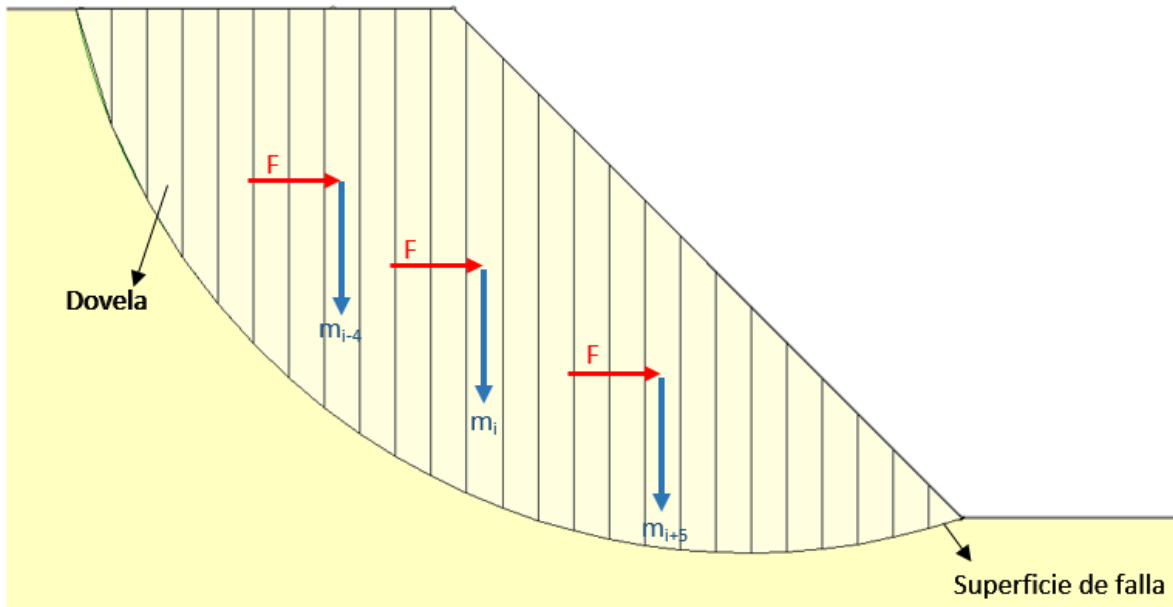


Figura 1 Representación fuerza sísmica

Fuente: creación propia.

Donde

F: fuerza sísmica horizontal

m_i : masa de la dovela

La fuerza sísmica actúa en el centro de gravedad de cada dovela (Terzaghi, 1950), y equivalente al producto entre la masa de la dovela y la aceleración. La sumatoria de la masa de todas las dovelas es la masa potencial al deslizamiento

1.2 Objetivos del proyecto

1.2.1 Objetivo general:

Comparar el resultado del análisis teórico de un talud usando teorías clásicas de equilibrio límite y lo obtenido mediante la modelación a escala en el campus de la EIA

1.2.2 Objetivos específicos:

- Conceptualizar el modelo a escala que se utilizará.
- Construir el talud a escala que se va a utilizar para la instrumentación del modelo.
- Entender la distribución de fuerza sísmica utilizada en los métodos de equilibrio límite.
- Comparar los resultados de la fuerza sísmica obtenida del talud a escala con un modelo matemático utilizando un software especializado (Slide, de Rocscience).

1.3 Marco de referencia

1.3.1 Antecedentes

Actualmente se han realizado diversos estudios sobre el comportamiento de taludes frente a las fuerzas sísmicas, las diferencias con respecto a este trabajo son las consideraciones que toman los otros trabajos, por ejemplo algunos realizan el estudio para taludes de roca, o usan métodos diferentes a los de Spencer o Morguestern-Price o analizan la influencia de las ondas sísmicas en la estabilidad entre otros.

Una investigación realizada por (Dutary, 2012), titulado: *Influencia del contenido frecuencial de ondas sísmicas en la estabilidad de taludes*, da a conocer el comportamiento de taludes de 5, 15 y 30 metros de altura al ser sometidos a determinadas frecuencias de ondas, indicando la respuesta del sistema (amplificación o atenuación) de la fuerza dinámica, teniendo presente que se consideraron diferentes geometrías y tres tipos de materiales con el fin de hallar la relación entre la frecuencia de vibración y el comportamiento del talud. El trabajo concluye que la geometría (altura e inclinación) del talud condiciona la respuesta del sistema frente a los sismos, a mayor altura hay una mayor amplificación. Además los materiales que constituyen el talud, mientras más blandos sean más favorecerán la amplificación de las ondas sísmicas. De esta investigación se obtienen aportes significativos sobre el comportamiento real de un talud frente a la frecuencia del sismo, teniendo como base su constitución y geometría.

Hidalgo y Assis (2011), realizaron una investigación titulada: *Evaluación de la incertidumbre en el análisis de estabilidad de un talud excavado en suelos residuales*, en la cual se evaluó el efecto de la incertidumbre que se tiene sobre los parámetros de resistencia al corte del suelo en un talud compuesto por suelo residual, el cual tiene una altura de 20 metros e inclinación promedio de 45 grados y se ubica en una vía de Antioquia, Colombia.

La incertidumbre de los parámetros depende de la precisión con que estos puedan ser estimados, esta variación de datos puede controlarse con métodos estadísticos y probabilísticos. Los resultados del estudio concluyen que los datos con mayor incertidumbre o variabilidad en el suelo es la cohesión efectiva, la cual influye drásticamente en la probabilidad de falla. Aunque el trabajo no utiliza el mismo método de análisis que se utilizará en este trabajo, aporta el efecto que se tiene en la estabilidad del talud por la variación de los datos recolectados en campo.

Otra investigación, realizada por Sepúlveda (2011), que se titula: *comportamiento sísmico de taludes de roca*, busca desarrollar una herramienta que permita realizar el análisis de estabilidad de taludes rocosos por el método de Newmark. En este trabajo se realiza un estudio del comportamiento de un talud sometiéndolo a fuerzas sísmicas obtenidas de dos terremotos de gran magnitud registrados en Chile, además busca desarrollar una herramienta que permita aplicar el método de Newmark en taludes rocosos. Se obtuvo como conclusión que el parámetro que más influye en el comportamiento sísmico del talud es la cohesión. Este trabajo brinda una perspectiva importante del comportamiento que tiene un talud rocoso frente a las fuerzas sísmicas.

1.4 Marco teórico:

1.4.1 Conceptos generales

Se le llama suelo a la parte superficial de la corteza terrestre, la clasificación de los suelos dependen del proceso de formación y origen del material. En este trabajo se usara un suelo residual de anfibolita ubicado en el campus de la EIA.

“Un suelo residual es un material parecido al suelo derivado de la meteorización in situ y descomposición de fragmentos de roca que no han sido transportados de su ubicación original” (Blight, 2012). La meteorización, también llamada intemperismo, se clasifica en dos tipos: meteorización mecánica y meteorización química.

La meteorización mecánica es la desintegración de la roca en fragmentos producida por efectos físicos como los cambios extremos en la temperatura, actividad biológica entre otros.

La meteorización química es la desintegración de la roca por causa de reacciones químicas entre los minerales constituyentes de la roca y agentes externos como el oxígeno, el agua u otros gases o fluidos. Estos procesos químicos pueden ser hidratación, hidrolisis, solución, reducción y oxidación.

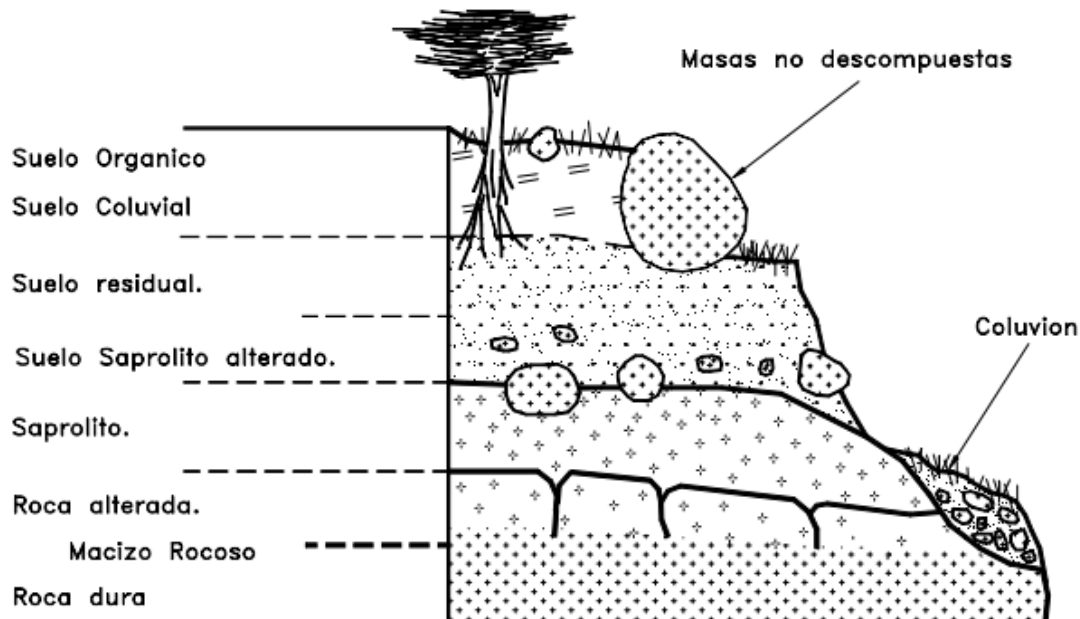


Figura 2 Esquema general de una ladera en suelo residual de granito
Imagen tomada de (Suárez Díaz, 1998)

Una superficie inclinada con respecto a la horizontal puede llamarse ladera si ha sido constituida naturalmente o talud si ha sido modificada o construida por el hombre. La ladera o talud puede clasificarse en tres partes, en su parte superior se encuentra la cabeza, cresta o escarpe; luego se encuentra su parte intermedia semi-recta y por último en su parte inferior se encuentra lo que llamamos pie, pata o base del talud.

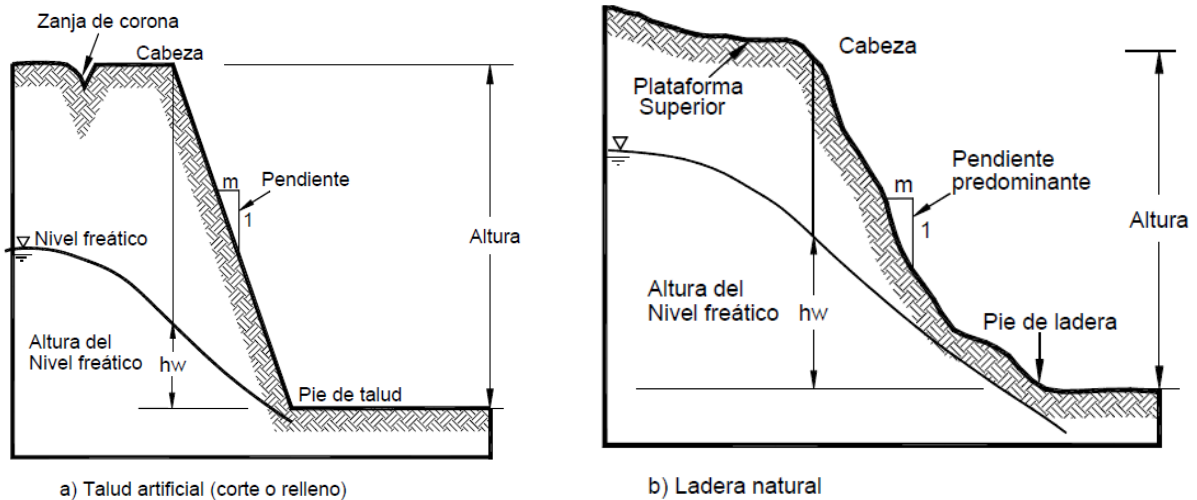


Figura 3 Nomenclatura de taludes y laderas
 Imágenes tomadas de (Suárez Díaz, 2009)

“La estabilidad de taludes es particularmente complicada en un medio tropical, debido a que la mayoría de los suelos son residuales, el régimen hidrológico complejo, la humedad ambiental y la temperatura muy altas, la geología compleja, la topografía escarpada y los demás factores ambientales generalmente, desfavorables.” (Suárez Díaz, 1998)

Como se mencionó en la sesión 1.1 la estabilidad de un talud está totalmente relacionada con el deslizamiento de la masa potencial del talud a lo largo de su superficie de falla por los cambios de esfuerzos en la misma. La estabilidad de un talud depende de factores externos e internos.

Los factores internos son los que provienen de las características propias del talud, como su forma o propiedades físicas del suelo que le constituye. Según Calderón y Hoyos (2011), los factores internos más importantes son los geológicos, geotécnicos, morfológicos e hidrogeológicos.

- Geológicos y geotécnicos

Son los datos referentes al origen del suelo, litología, grado de meteorización, propiedades físico-mecánicas del suelo, tales como el porcentaje de humedad, densidad, permeabilidad, grado de saturación, relación de vacíos, presión de poros, ángulo de fricción entre otros.

- Morfológicos

Datos referentes al aspecto físico del talud, como su inclinación y forma.

- Hidrogeológicos

Este factor se refiere al régimen de flujo de agua en el suelo de manera superficial o subterránea. La presencia de agua influye directamente en los procesos de meteorización física y química.

Los factores externos son los atribuidos por agentes como el clima, sismos y factores antrópicos.

- Clima

El clima es uno de los factores más críticos para la estabilidad de un talud, ya que en las épocas de lluvia, el suelo se deteriora y cambia sus propiedades, además la saturación del terreno produce un aumento en el peso volumétrico, lo que incrementa la presión de poros y una reducción significativa de la resistencia a cortante del suelo que le constituye. Un ejemplo de la importancia de este factor se observa en la tragedia de London Road en Oakland, California (1970), en donde un deslizamiento de un talud ocasionado por un fuerte periodo de lluvia cubrió aproximadamente 15 hectáreas y destruyó 14 casas.

- Sismos

Los sismos son fenómenos naturales producidos por fallas geológicas en la corteza terrestre capaces de generar fuerzas de grandes magnitudes, las cuales afectan considerablemente la estabilidad en los taludes. Estas cargas oscilatorias causan deformaciones cíclicas las cuales generan un aumento en la presión de poros y la reducción en la resistencia a corte. Por otra parte las magnitudes de las ondas sísmicas tienden a amplificarse según el material y la topografía en la que viajan.

- Antrópicos

Como su nombre lo dice "Anthropos", es todo lo referente al ser humano. En este caso son las modificaciones y alteraciones de la actividad humana sobre los taludes, en las cuales este es sometido a cambios drásticos en su composición y geomorfología al realizar cambios en pendiente, cargas o en su estructura natural.

"Aunque la mayoría de las estructuras pueden idealizarse fácilmente como conjuntos de masas discretas con fuentes discretas de rigidez, los materiales geológicos son la excepción. Estos deben ser tratados como continuos y su respuesta a perturbaciones dinámicas debe ser descrita en el contexto de la propagación de ondas" (Kramer, 1996).

La liberación de energía producida por la convergencia, divergencia o fricción de las placas tectónicas producen ondas que se propagan a través del suelo, este puede darse a profundidad o de manera superficial.

Las ondas sísmicas pueden presentar tres tipos de vibraciones. La primera es una vibración longitudinal, en la cual las partículas del suelo experimentan una compresión y tensión en dirección de la propagación, estas se conoce como las ondas primarias. La segunda es una onda de corte, donde presenta un desplazamiento transversal con respecto al eje de propagación, estas se conoce como las ondas secundarias. Por último, la tercera vibración presenta una torsión o giro alrededor del eje de propagación. Los dos primeros tipos de onda se conocen como ondas de volumen.

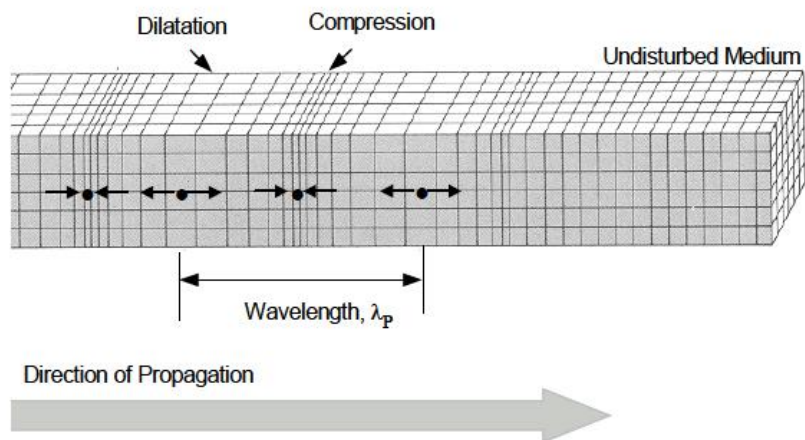


Figura 4 Ondas primarias
Imagen tomada de (Czelada, 2009)

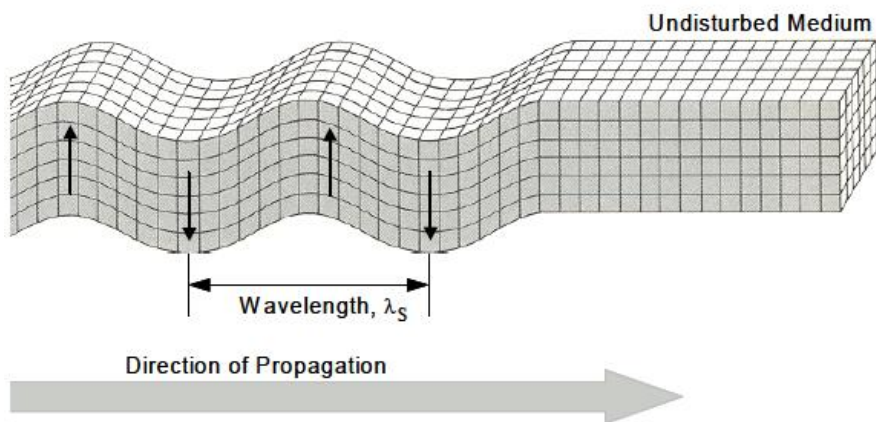


Figura 5 Ondas Secundarias
Imagen tomada de (Czelada, 2009)

1.4.2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Existe una gran variedad de métodos diferentes utilizados para analizar la estabilidad de taludes, cada uno con resultados diferentes e inclusive contradictorios, lo cual es una evidencia clara de la incertidumbre que se tiene en este tema (Suárez Díaz, 1998).

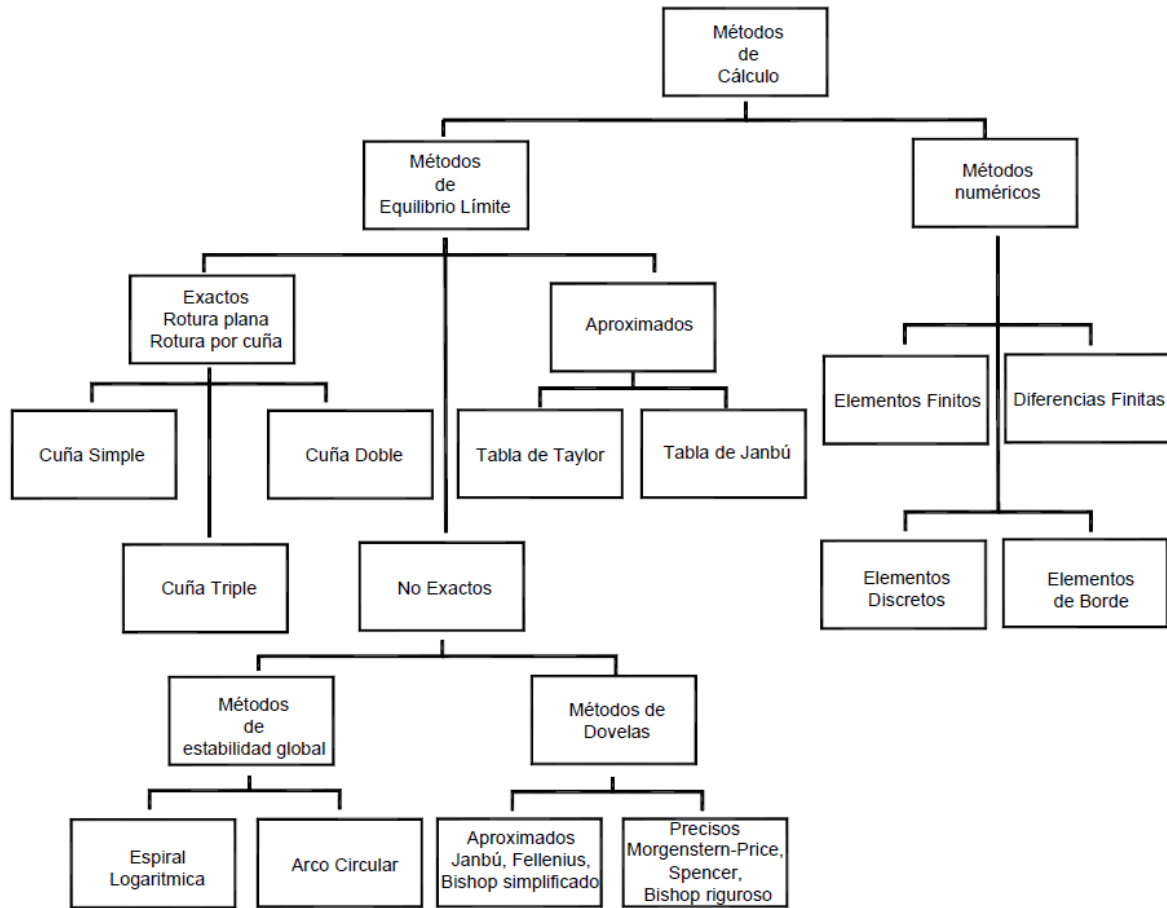


Figura 6 Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Imagen tomada de (Suárez Díaz, 2009)

El análisis de estabilidad de taludes puede desarrollarse por métodos de deformaciones o métodos de equilibrio límite, en este trabajo utilizaremos dos de los métodos de equilibrio límite, el método de Spencer y el método de Morgenstern-Price. Los cuales se encuentran dentro de la clasificación de no exactos, métodos por dovelas y precisos. Estos métodos parten del equilibrio estático de la masa potencialmente inestable del talud y tiene dos conceptos claves, el primero es el factor de seguridad y el segundo es la resistencia al corte del suelo.

El factor de seguridad representa el factor por el cual la resistencia al corte debe reducirse para que esta resistencia al corte se equilibre con el esfuerzo cortante. (Duncan & Wright, 2005)

$$FS = \frac{\text{Resistencia al corte}(\tau)}{\text{Esfuerzo cortante} (S)}$$

Ecuación 1 Factor de seguridad

Es necesario entender que la resistencia al corte es la calculada del material del talud y el esfuerzo cortante es el esfuerzo crítico que trata de producir la falla.

En el análisis de taludes por equilibrio límite se utiliza el criterio de la falla de Coulomb, en donde el esfuerzo cortante se expresa por la ecuación de Mohr-Coulomb.

$$\tau = \frac{c + \sigma \cdot \tan\phi}{FS}$$

Ecuación 2

En donde ϕ y c son el ángulo de fricción y cohesión del suelo, y σ es el esfuerzo normal el plano de corte.

$$\tau = \frac{c' + (\sigma - u) \cdot \tan\phi'}{FS}$$

Ecuación 3

En donde ϕ' y c' son el ángulo de fricción y cohesión del suelo en términos del esfuerzo efectivo, y u es la presión de poros por agua.

Para el cálculo de este factor se asume una superficie de falla con fuerzas actuantes y por medio de ecuaciones de equilibrio estático se calcula la fuerza resistente requerida para producir el equilibrio del sistema, luego se compara la fuerza resistente con la admisible del suelo y se obtiene el factor de seguridad. Se establece este factor de seguridad para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla.

Se realizan varias superficies de falla con el fin de encontrar el factor de seguridad con el mínimo valor, el cual representa la superficie con deslizamiento crítico. Es muy común dividir la masa a estudiar en bloques o dovelas y hacer el análisis individual de estas y luego se realiza el análisis de las condiciones de equilibrio con la sumatoria de fuerzas de todas las dovelas.

1.4.2.1 Método de Spencer

El método de Spencer supone que las fuerzas entre dovelas tienen la misma inclinación y por ende son paralelas, esta inclinación se determina con las ecuaciones de equilibrio. Spencer también asume que la fuerza normal actúa en el centro de cada dovela, este supuesto se vuelve más insignificante sobre los valores calculados al considerar una gran cantidad de dovelas. En este método se da solución a dos ecuaciones de equilibrio primeramente, estas son el equilibrio de fuerzas y equilibrio de momentos.

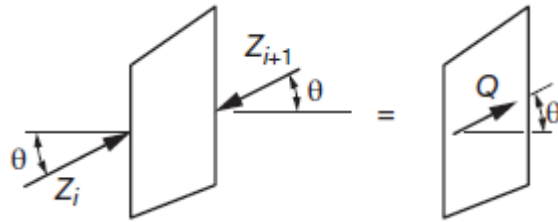


Figura 7

Fuerzas entre dovelas y fuerza resultante cuando son paralelas

Fuente: (Duncan & Wright, 2005)

$$\sum Q_i = Z_i - Z_{i+1} = 0$$

Ecuación 4

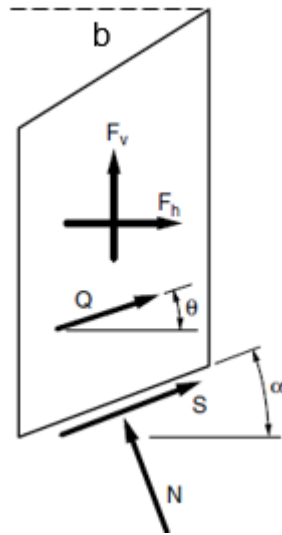


Figura 8 Fuerzas en la dovela

Fuente: (Duncan & Wright, 2005)

$$b = \Delta l \cdot \cos\alpha$$

Ecuación 5

$$W' = W - u \cdot b$$

Ecuación 6

$$N' = W' \cos\alpha$$

Ecuación 7

$$N' = W \cos\alpha - u \cdot \Delta l \cdot \cos^2\alpha$$

Ecuación 8

$$\sigma' = \frac{W \cos\alpha}{\Delta l} - u \cos^2\alpha$$

Ecuación 9

$$S = \frac{c'\Delta l + (N - u\Delta l) \cdot \tan\phi'}{F_s}$$

Ecuación 10

Donde α es la inclinación de la dovela y Δl es la medida de la dovela, y F_h y F_v representan todas las fuerzas horizontales y verticales conocidas sobre la dovela respectivamente, incluyendo las fuerzas sísmicas, peso de la dovela, fuerzas por cargas en la superficie, entre otras.

Si realizamos las ecuaciones de equilibrio de fuerzas para la dovela, obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$N + F_v \cos\alpha - F_h \sin\alpha - Q \sin(\alpha - \theta) = 0$$

Ecuación 11

$$S + F_v \sin\alpha + F_h \cos\alpha + Q \cos(\alpha - \theta) = 0$$

Ecuación 12

Si despejamos N de la primera ecuación y en la segunda ecuación reemplazamos S por la ecuación de Coulomb obtenemos:

$$N = -F_v \cos\alpha + F_h \sin\alpha + Q \sin(\alpha - \theta)$$

Ecuación 13

$$\frac{c'\Delta l + (N - u\Delta l) \cdot \tan\phi'}{F_s} + F_v \sin\alpha + F_h \cos\alpha + Q \cos(\alpha - \theta) = 0$$

Ecuación 14

Ahora si reemplazamos el valor de N de la segunda ecuación por el valor de la primera y despejamos Q encontraremos que:

$$Q = \frac{-F_v \sin\alpha - F_h \cos\alpha - \frac{c'\Delta l}{F_s} + (F_v \cos\alpha - F_h \sin\alpha + u\Delta l) \cdot \frac{\tan\phi'}{F_s}}{\cos(\alpha - \theta) + \sin(\alpha - \theta) \cdot \frac{\tan\phi'}{F_s}}$$

Ecuación 15

Para la ecuación de equilibrio de momentos se puede tomar cualquier punto arbitrario, si tomamos momentos con respecto al origen en un sistema de coordenadas (x,y) la ecuación de equilibrio de momentos se expresaría como:

$$\sum Q(x_b \cdot \text{sen}\theta - Y_Q \cdot \text{cos}\theta) = 0$$

Ecuación 16

Donde x_b es la distancia horizontal hasta el centro de la dovela y Y_Q es la distancia vertical hasta el punto de acción de la fuerza Q encima del centro de la dovela. Estas distancias se podrán observar en la Figura 9.

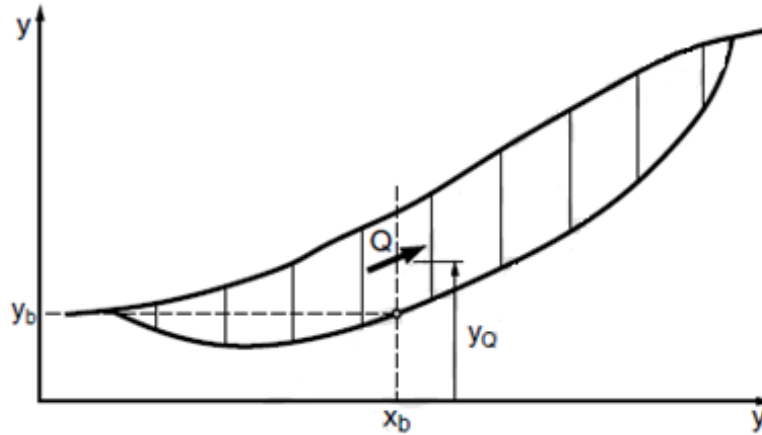


Figura 9 **Coordenadas de superficie de falla por método de Spencer**

Fuente: (Duncan & Wright, 2005)

La coordenada Y_Q puede expresarse como:

$$Y_Q = y_b + \frac{M_0}{Q \cdot \cos\theta}$$

Ecuación 17

Donde M_0 es el momento producido por fuerzas conocidas desde el centro de la base de la dovela.

Teniendo estas 4 ecuaciones principales podemos reemplazar la Ecuación 15 en la Ecuación 1 y la Ecuación 17 en la Ecuación 16, obteniendo como resultado un sistema de 2 ecuaciones y 2 incógnitas, el factor de seguridad (FS) y la inclinación de las fuerzas entre dovelas (θ). Una vez determinados estos dos valores se determina el valor de la fuerza normal (N) y el valor de las fuerzas entre dovelas (Z).

Todas las fórmulas fueron tomadas de (Duncan & Wright, 2005)

1.4.2.2 Método de Morgenstern-Price

El método de Morgenstern-Price asume que las fuerzas entre dovelas tienen un comportamiento $f(x)$, este método es semejante al método de Spencer con la diferencia de que la inclinación de la fuerza resultante de las fuerzas entre dovelas varía de acuerdo a la función, es decir, las fuerzas entre dovelas tienen diferente inclinación.

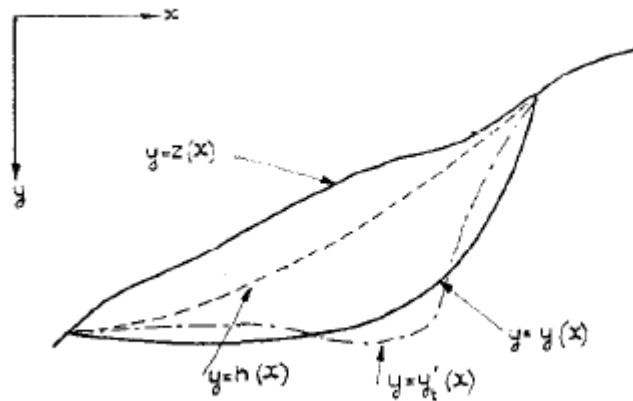


Figura 10 Ecuaciones de equilibrio de la masa potencial de deslizamiento.
Imagen tomada de (Morgenstern & Price)

Donde:

$y = y(x)$ es la ecuación de la superficie de falla asumida.

$y = z(x)$ es la ecuación de la superficie del talud.

$y = h(x)$ es la ecuación del empuje interno por presión del agua.

$y = y'_t(x)$ es la ecuación de empuje horizontal efectiva.

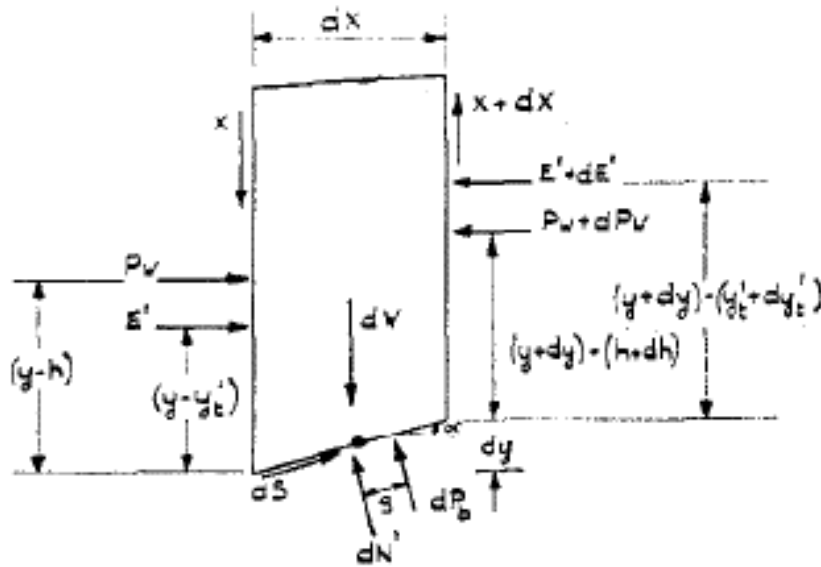


Figura 11 Fuerzas actuantes en una dovela
Fuente: (Morgenstern & Price)

Donde:

E' denota el empuje lateral entre dovelas en terminos de esfuerzos efectivos.

X denota la fuerza cortante vertical de la dovela.

dW denota el peso de la dovela.

p_w denota la resultante de la presión del agua actuando en el lado de la dovela.

dp_b denota la presión del agua actuando en la base de la dovela.

dN' denota la presión normal efectiva.

dS denota la fuerza cortante actuando en la base de la dovela.

α denota la inclinación de la dovela con respecto a la horizontal

Si se toma momentos con respecto al punto medio de la base de la dovela se obtiene

$$E' \left[(y - y'_t) - \left(-\frac{dy}{2} \right) \right] + p_w \left[(y - h) - \left(-\frac{dy}{2} \right) \right] - (E' + dE') \left[y + dy - y'_t - dy'_t - \frac{dy}{2} \right] - X \frac{dx}{2} - (X + dX) \frac{dx}{2} - (p_w + dp_w) \left[y + dy - h - dh - \frac{dy}{2} \right] - dp_b \cdot g = 0$$

Ecuación 18

Después de un procedimiento y su respectiva simplificación se obtiene la siguiente ecuación cuando $dX \rightarrow 0$

$$X = \frac{d}{dx}(E' \cdot y'_t) - y \frac{dE'}{dx} + \frac{d}{dx}(h \cdot p_w) - y \frac{dp_w}{dx}$$

Ecuación 19

Si se realiza equilibrio de fuerzas en la dirección de N' , se obtiene

$$dN' = dW \cos \alpha - dX \cos \alpha - dE' \sin \alpha - dp_w \sin \alpha - dp_b$$

Ecuación 20

Si se realiza equilibrio de fuerzas en la dirección de S , se obtiene

$$dS = dE' \cos \alpha + dp_w \cos \alpha - dX \sin \alpha + dW \sin \alpha$$

Ecuación 21

El criterio de falla de Mohr Coulomb en esfuerzos efectivos puede expresarse como:

$$dS = \frac{1}{FS} [c' dx \sec \alpha + (dN') \tan \varphi']$$

Ecuación 22

Se iguala la Ecuación 21 y Ecuación 22

$$dE' \cos \alpha + dp_w \cos \alpha - dX \sin \alpha + dW \sin \alpha = \frac{1}{FS} [c' dx \sec \alpha + (dN') \tan \varphi']$$

Ecuación 23

Se reemplaza la Ecuación 20 en la Ecuación 23 y se divide por $dX \cos \alpha$

$$\begin{aligned} \frac{dE'}{dx} + \frac{dp_w}{dx} - \frac{dX}{dx} \tan \alpha + \frac{dW}{dx} \tan \alpha \\ = \frac{c'}{FS} \sec^2 \alpha + \frac{\tan \varphi'}{FS} \left(\frac{dW}{dx} - \frac{dX}{dx} - \frac{dE'}{dx} \tan \alpha - \frac{dp_w}{dx} \tan \alpha - \frac{dp_b}{dx} \sec \alpha \right) \end{aligned}$$

Ecuación 24

Se tiene que $\tan \alpha = -\frac{dy}{dx}$, por ende la Ecuación 24 se puede expresar como:

$$\begin{aligned} \frac{dE'}{dx} + \frac{dp_w}{dx} + \frac{dX}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} - \frac{dW}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} \\ = \frac{c'}{FS} \left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right) + \frac{\tan \varphi'}{FS} \left[\frac{dW}{dx} - \frac{dX}{dx} + \frac{dE'}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} + \frac{dp_w}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} - r_u \frac{dW}{dx} \left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right) \right] \end{aligned}$$

Ecuación 25

$$dp_b = r_u \cdot dW \cdot \sec \alpha \quad (1)$$

Ecuación 26

Donde r_u es la relación de presión de poros definida por Bishop y Morgenstern (1960)

Se simplifica la Ecuación 25 y se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{dE'}{dx} \left[1 - \frac{\tan \varphi'}{FS} \cdot \frac{dy}{dx} \right] + \frac{dX}{dx} \left[\frac{\tan \varphi'}{FS} + \frac{dy}{dx} \right] \\ = \frac{c'}{FS} \left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right) + \frac{dp_w}{dx} \left[\frac{\tan \varphi'}{FS} \cdot \frac{dy}{dx} - 1 \right] + \frac{dW}{dx} \left[\frac{\tan \varphi'}{FS} + \frac{dy}{dx} - r_u \left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right) \frac{\tan \varphi'}{FS} \right] \end{aligned}$$

Ecuación 27

Las ecuaciones principales son la Ecuación 19 y la Ecuación 27.

Se tiene entonces un sistema de ecuaciones indeterminado, a causa de las funciones desconocidas E' , X y y'_t . Para dar solución a este problema es necesario hacer un supuesto. Hay tres posibles supuestos que se pueden realizar.

1. La distribución de la fuerza de presión normal a lo largo de la superficie de falla
2. Se puede suponer la posición de la línea de empuje. Por ejemplo,

$$y - y'_t = a(y - z)$$

Ecuación 28

Entonces la ecuación de equilibrio de momentos, sin la presión de poros es

$$X = E \frac{dy}{dx} - a \frac{d}{dx} [E(y - z)]$$

Ecuación 29

Esto vuelve la Ecuación 27 y la Ecuación 29 un sistema determinado, lo que permite determinar las magnitudes de a y FS satisfactoriamente.

3. Se puede asumir una relación entre las fuerzas X y E' . Si se aísla un elemento entre dos dovelas como se muestra en la Figura 12 (a), entonces los esfuerzos efectivos actuantes en el elemento son los mostrados en la Figura 12 (b).

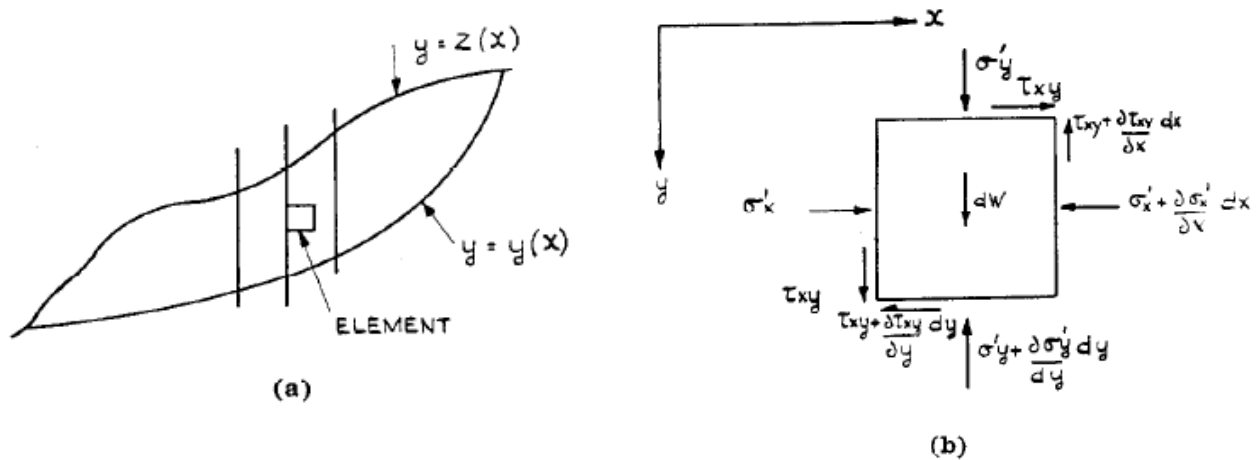


Figura 12 (a) Elemento en la interfaz entre dos dovelas; (b) Esfuerzos efectivos actuantes en el elemento

Imagen tomada de (Morgenstern & Price)

Esto implica que para una geometría y superficie de falla específica las fuerzas internas están determinadas por

$$E' = \int_z^y \sigma'_x(y) dy$$

Ecuación 30

$$X = \int_z^y \tau_{xy}(y) dy$$

Ecuación 31

Lo que permite asumir que

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E'$$

Ecuación 32

Donde X y E' son las fuerzas verticales y horizontales entre dovelas, λ es un factor escalar desconocido y $f(x)$ es una función que se asume y obtiene de los límites de cada dovela. Se realiza una integral de los esfuerzos de cada rebanada y se supone que $f(x)$ varía linealmente.

Si se especifica $f(x)$ el problema es estáticamente determinado. X y FS se pueden determinar a partir de ecuaciones diferenciales que satisfagan las condiciones de frontera. Es necesario tener presente que aunque $f(x)$ puede ser cualquier función, el comportamiento del suelo impone ciertas limitaciones que solo hacen funciones razonables algunas de ellas. Estas pueden estimarse a partir de la teoría elástica. Para simplificar las ecuaciones se define $\lambda \cdot f(x)$ usando los esfuerzos totales horizontales E .

$$E = E' + p_w$$

Ecuación 33

Por ende el punto de aplicación y_t de los esfuerzos totales se define como

$$Ey_t = E'y_t' + p_w \cdot h$$

Ecuación 34

Entonces en lugar de la Ecuación 32 se supone

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E$$

Ecuación 35

Para encontrar la estabilidad de un talud con cualquier pendiente y propiedades se supone que el talud se ha de dividir en infinitas dovelas verticales, esta división se realiza de modo que cada dovela en la superficie de deslizamiento es lineal, la interfaz entre dos tipos de suelos y las zonas de presión de poros son lineales, por ende dentro de cada dovela se tiene

$$y = A \cdot x + B$$

Ecuación 36

$$\frac{dW}{dx} = p_x + q$$

Ecuación 37

$$f = kx + m$$

Ecuación 38

Usando la Ecuación 33 y la Ecuación 38, la Ecuación 19 cambia a

$$X = \frac{d}{dx}(E \cdot y_t') - y \frac{dE'}{dx}$$

Ecuación 39

Entonces la Ecuación 27 se convierte en

$$\frac{dE}{dx}(Kx + L) + KE = Nx + P$$

Ecuación 40

Donde:

$$K = \lambda k \left(\frac{\tan \varphi'}{FS} + A \right)$$

$$L = \lambda m \left(\frac{\tan \varphi'}{FS} + A \right) + 1 - A^2 \frac{\tan \varphi'}{FS}$$

$$N = p \left(\frac{\tan\varphi'}{FS} + A - r_u(1 + A^2) \frac{\tan\varphi'}{FS} \right)$$

$$P = \frac{c'}{FS}(1 + A^2) + q \left(\frac{\tan\varphi'}{FS} + A - r_u(1 + A^2) \frac{\tan\varphi'}{FS} \right)$$

La Ecuación 40 puede integrarse a través de cada dovela con $E = 0$ en el inicio de la superficie de falla. Si para cada dovela x se mide desde el inicio de la dovela a resolver, entonces se tiene que

$$E = E_i \text{ cuando } x = 0$$

Ecuación 41

$$E = \frac{1}{L + Kx} \left[E_i L + \frac{Nx^2}{2} + Px \right]$$

Ecuación 42

El valor de E en al final de la primera dovela es determinado y a su vez este valor es el inicial de la siguiente dovela. La condición de frontera que debe cumplir al final de la superficie de deslizamiento es

$$E = E_n \text{ cuando } x = x_n$$

Ecuación 43

Donde E_n es usualmente cero

Con la Ecuación 42 resuelta y las condiciones de frontera no es suficiente para completar el equilibrio, desde la Ecuación 39 todas deben ser determinadas. Esto se logra determinando y_t de los valores de E y encontrando las condiciones necesarias para satisfacer la Ecuación 35 y la Ecuación 42. Se integra la Ecuación 39 y se obtiene

$$M = E(y_t - y) = \int_{x_0}^x \left(X - E \frac{dy}{dx} \right) dx$$

Ecuación 44

Generalmente $M = 0$ cuando $x = x_n$, por ende la ecuación anterior puede expresarse como

$$M_n = \int_{x_0}^x \left(X - E \frac{dy}{dx} \right) dx = 0$$

Ecuación 45

Si se satisface la Ecuación 45, los valores de y_t pueden determinarse de la Ecuación 44 asegurando que cada dovela cumpla con el equilibrio de momentos.

Para encontrar los valores de λ y FS todas las ecuaciones de equilibrio deben ser satisfechas, luego se suponen los valores de λ y FS y se integran a travez de todas las dovelas para obtener los valores de E_n y M_n , los cuales generalmente no son cero. Después

se usa un método iterativo en el que se modifica los valores de λ y FS hasta obtener que E_n y M_n sean cero.

Algunas veces se podrá encontrar más de un par de valores que satisfagan las ecuaciones y se tiene que decidir cuál es la solución más efectiva. La regla para escoger la solución es que los valores de λ y FS deben hacer que los valores de $L + Kx$ sean positivos en todo el rango de x de la superficie de falla. Esta regla permite encontrar valores únicos para λ y FS .

Hay algunos supuestos especiales en las fuerzas X y E . Si se asume que

$$X = E \frac{dy}{dx}$$

Ecuación 46

Entonces se puede demostrar que

$$y_t = y$$

Ecuación 47

Con esto se puede determinar el factor de seguridad modificando solamente la forma de la Ecuación 43. El supuesto indicado por la Ecuación 47 es similar al análisis circular convencional discutido por Bishop (1955). A pesar de que este supuesto simplifica los cálculos numéricos no es aceptable ya que las fuerzas internas implícitas tienden a ser físicamente inadmisibles. Además no hay razón alguna para que la relación entre las fuerzas internas dependa solamente de la inclinación de la superficie de deslizamiento elegida arbitrariamente.

Otra posible suposición es la sugerida por Janbu (1954) y Sherard (1960).

$$X = \psi E$$

Ecuación 48

Donde ψ es una constante específica.

Aunque al especificar ψ el equilibrio global de momentos no se garantiza, se puede hacer el problema estáticamente determinado si se asume que

$$X = \lambda E$$

Ecuación 49

Donde λ y FS deben determinarse según la Ecuación 43 y la Ecuación 45.

Todas las ecuaciones fueron tomadas de (Morgenstern & Price)

2 Metodología

2.1 Obtención de la muestra de suelo

Las muestras se extraerán del campus de la EIA, sede Las Palmas, la cual se construyó sobre suelos residuales derivado de rocas anfíbólicas como se puede observar en la Figura 14 Mapa geológico de Antioquia.



Figura 13 Ubicación de la EIA y punto de extracción de la muestra
Imagen tomada de google maps (2016)

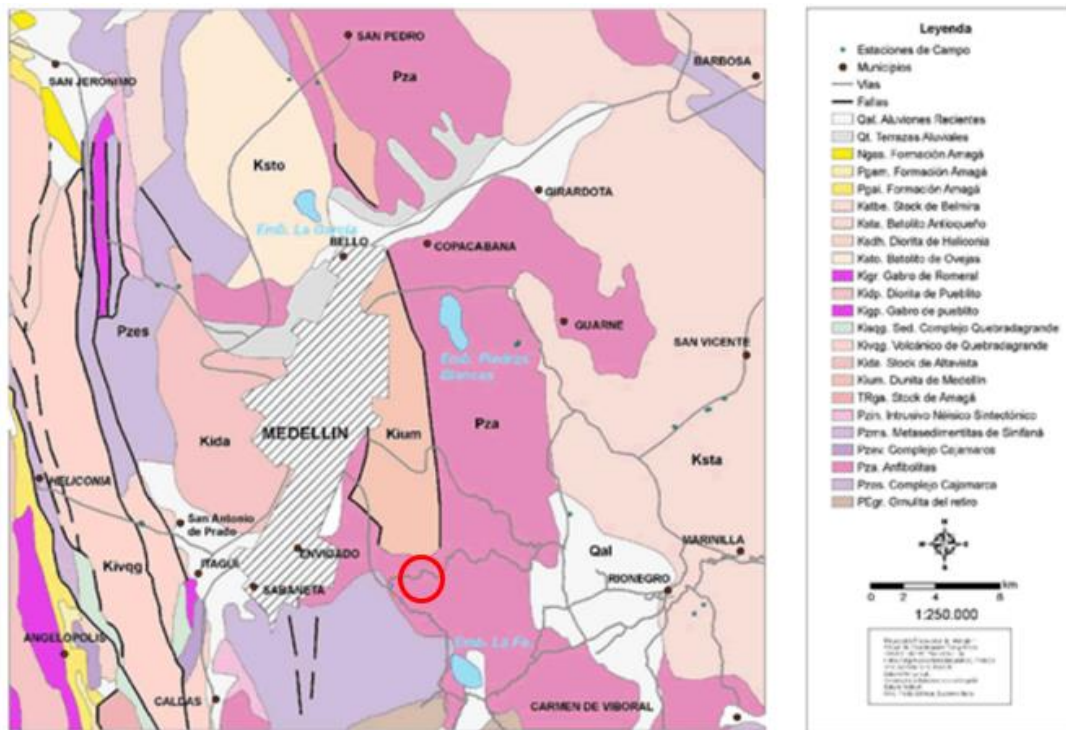


Figura 14 Mapa geológico de Antioquia
 Imagen tomada de <http://goo.gl/CdZhOH>

Se realizó una excavación de aproximadamente 2 metros de profundidad, cerca de las canchas de arquería del campus de la EIA de las palmas, con el fin de encontrar el tipo de suelo de interés.

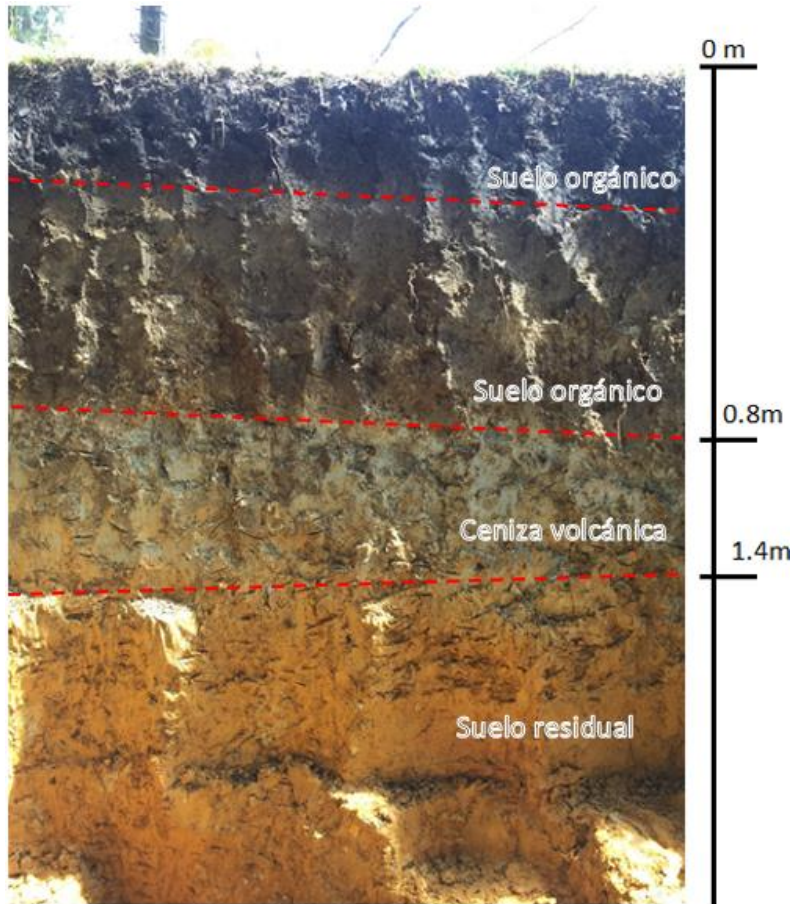


Figura 15 Perfil de suelo

Fuente: creación propia

En los primeros 80 cm de excavación se encontró una capa de suelo de color negro y café oscuro con alto contenido de materia orgánica, tales como raíces y organismos vivos como lombrices. Luego se encontró una capa de 40 a 50 cm de ceniza volcánica de color gris. A partir de 1.4m de profundidad se encontró el tipo de suelo a estudiar, una arcilla de alta plasticidad de color marrón amarillento.

Se tomaron varias muestras con el tubo shellby y luego se procedió a realizar el ensayo de corte simple no drenado no consolidado y con otra muestra se realizó el ensayo de límites de Atterberg.

2.2 Ensayos de laboratorio

2.2.1 Corte directo simple no drenado no consolidado

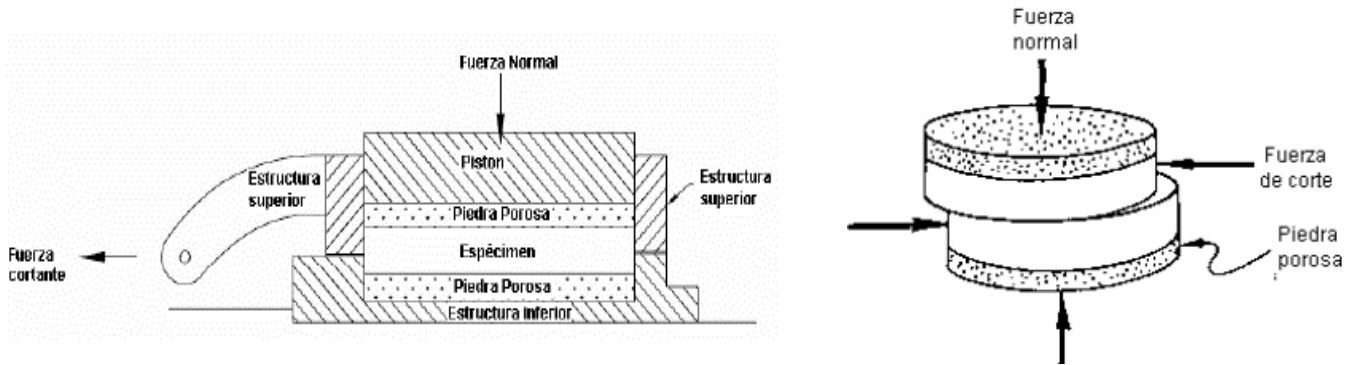


Figura 16 Ensayo de corte simple no drenado no consolidado

Imágenes tomadas de (I.N.V. E – 154 – 07)

Este ensayo permite determinar la máxima resistencia al corte de una muestra de suelo, la cual se introduce en una caja de corte y se somete a una fuerza normal determinada y a una fuerza de cizalladura que se produce por el desplazamiento horizontal de los marcos de la caja de corte. Este ensayo permite medir la fuerza de cizalladura y deformación. Se considera que la muestra llega a la falla cuando el esfuerzo cortante se vuelve constante o se logre una deformación del 10% del diámetro o longitud original.

Una vez realizado el ensayo de corte se calculara el módulo de elasticidad del suelo utilizando la ecuación que le relaciona con el módulo de corte.

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Ecuación 50

Donde:

E es el módulo de elasticidad

G es el módulo de rigidez o corte

ν es el coeficiente de poisson

Formula tomada de (Leoni, 2016)

2.2.1 Límites de Atterberg

Este ensayo permite determinar los límites entre los cuales el suelo se comporta como un semisólido, plástico o líquido caracterizándolo con base en el contenido de agua que posea. El ensayo se realiza con el fin de obtener el límite líquido, el límite plástico e índice de plasticidad del suelo con base en las normas (I.N.V. E – 125 – 07) y (I.N.V. E – 126 – 07) respectivamente.

Para calcular el límite líquido se graficará los números de golpes con el porcentaje de humedad obtenido. Luego se determinará la ecuación de la línea de tendencia y para un número de 25 golpes se hallará la humedad, la cual es el límite líquido

Para el cálculo del límite plástico se utilizara la siguiente ecuación.

$$\text{Límite plástico} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Masa de rollitos secado al horno}} \cdot 100$$

Ecuación 51

$$IP = LL - LP$$

Ecuación 52

Donde:

LP = Límite plástico

IP = Índice de plasticidad

2.2.2 Densidad del suelo

Se determina la densidad húmeda del suelo relacionando la masa húmeda de una muestra de suelo con su respectivo volumen.

$$\gamma_h = \frac{m}{v}$$

$$m = m_f - m_r$$

$$v = \pi \cdot \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 \cdot h$$

Donde:

m es la masa de la muestra de suelo.

m_f es la masa del recipiente con la masa del suelo.

m_r es la masa del recipiente o contenedor.

D_i es el diámetro interno del recipiente.

h es la altura de la muestra.

2.3 Montaje e instrumentación del modelo

Con ayuda del ingeniero Mauricio Ramírez Leal se realizó un modelo virtual del montaje de la mesa vibratoria y se determinó las piezas necesarias para acoplar los diferentes elementos. Para esto se pidió prestado al laboratorio de la universidad EIA el actuador dinámico y 4 patines THK HSR15R con sus respectivos rieles.

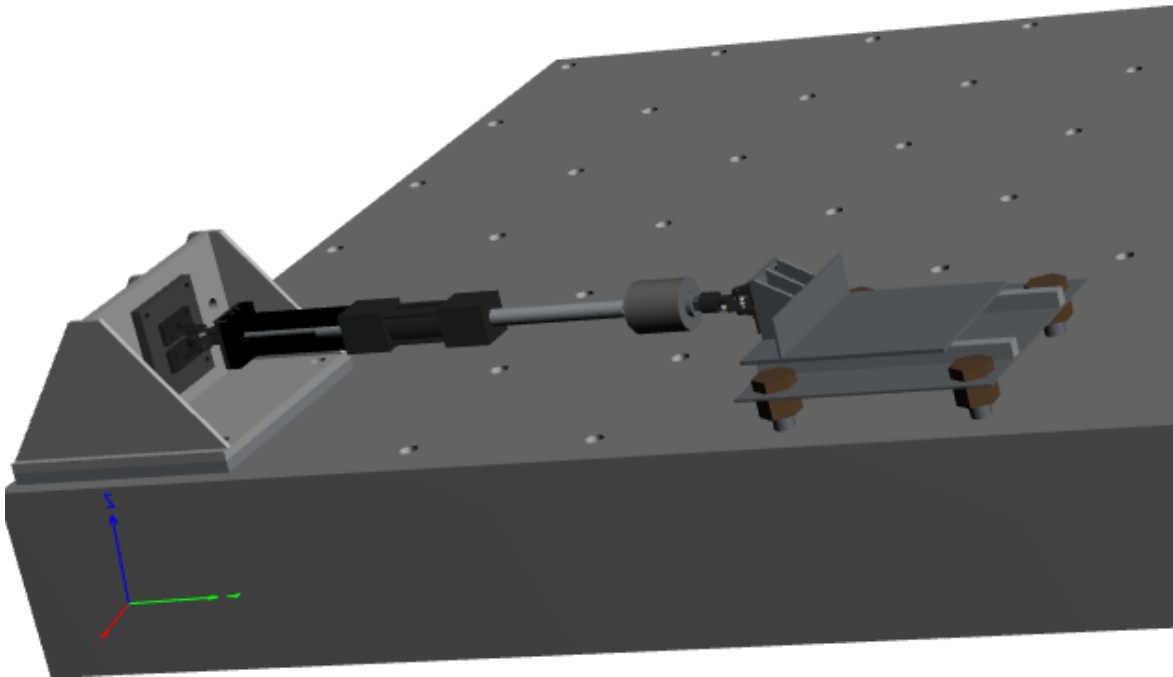


Figura 17 Modelo virtual de instalación de actuador dinámico y estructura vibratoria

Fuente: creación propia

2.3.1 Dimensionamiento del talud

El talud físico se consideró como un modelo directo, el cual es similar al prototipo en geometría, en la forma de aplicación de cargas y respuesta (deformaciones, esfuerzos, entre otros) para cada condición de carga del prototipo (M. Sabnis & G. Harris, 1999).

Se definió las dimensiones del talud con base en su densidad, con el fin de que su masa fuera trasladable del punto de extracción al laboratorio. Se llegó a la conclusión de que un talud con base, altura y ancho de $0.4m$ era la masa ideal para un transporte y extracción manual. Por otra parte, los 4 patines o apoyos no debían exceder una carga de $200kg$ según las especificaciones, lo que implicaba considerar el peso de la plataforma vibratoria.

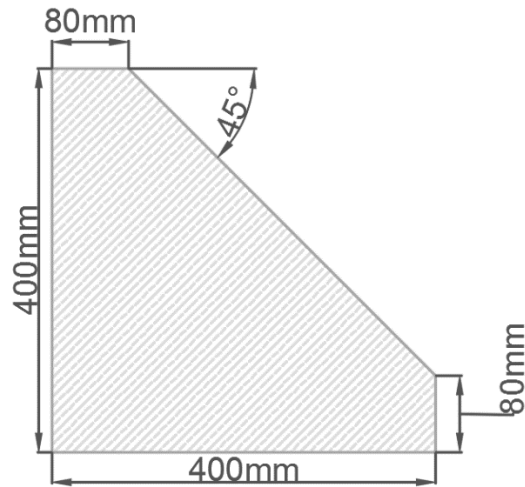


Figura 18 Dimensiones del talud
Fuente: creación propia

2.3.2 Diseño de la plataforma vibratoria.

Con base en lo anterior y al modelo virtual planteado se diseñó las partes de la mesa vibratoria en acero y se realizó la compra en la empresa INDUCERCHAS S.A.S.

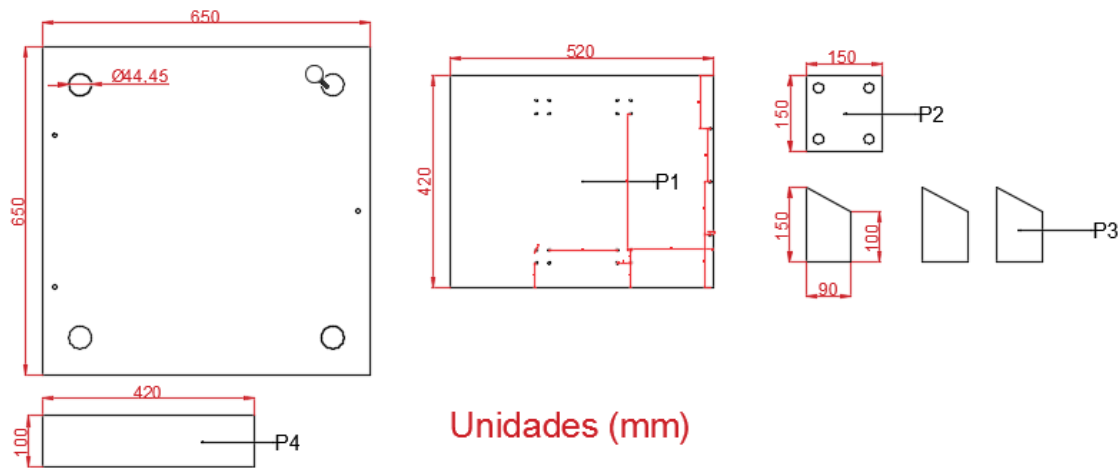
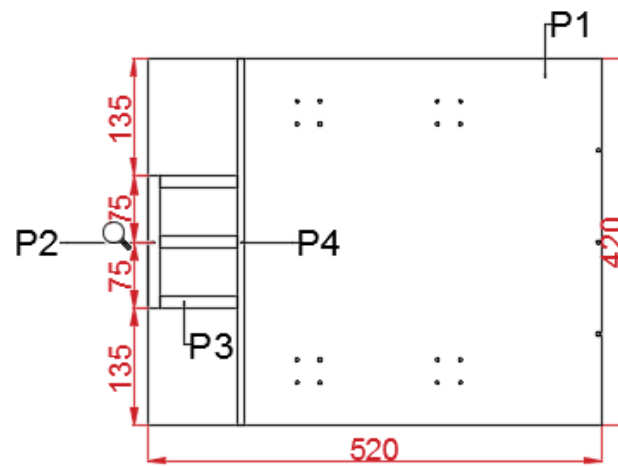


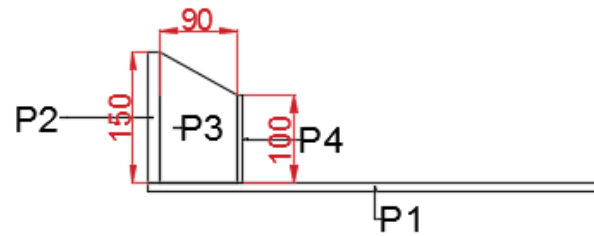
Figura 19 Diseño de partes de la plataforma vibratoria
Fuente: creación propia

La placa de 1/4" no hace parte de la estructura principal de la plataforma vibratoria, esta placa se ubicará en la parte inferior con el fin de dar la nivelación necesaria para el acople con el actuador dinámico.

Vista en Planta



Vista lateral



Unidades (mm)

Figura 20 Diseño de plataforma vibratoria acoplada
Fuente: creación propia

2.3.3 Extracción del talud

Para extraer la muestra del talud se realizará una excavación perimetral a un cubo de suelo de dimensiones con largo y ancho 0.45 metros y una profundidad de 60 centímetros. Además se construirá un molde en madera con las dimensiones para realizar la extracción, la cual se realizará el mismo día en que se llevara a cabo el ensayo, con el fin de no alterar lo máximo posible la muestra de suelo.

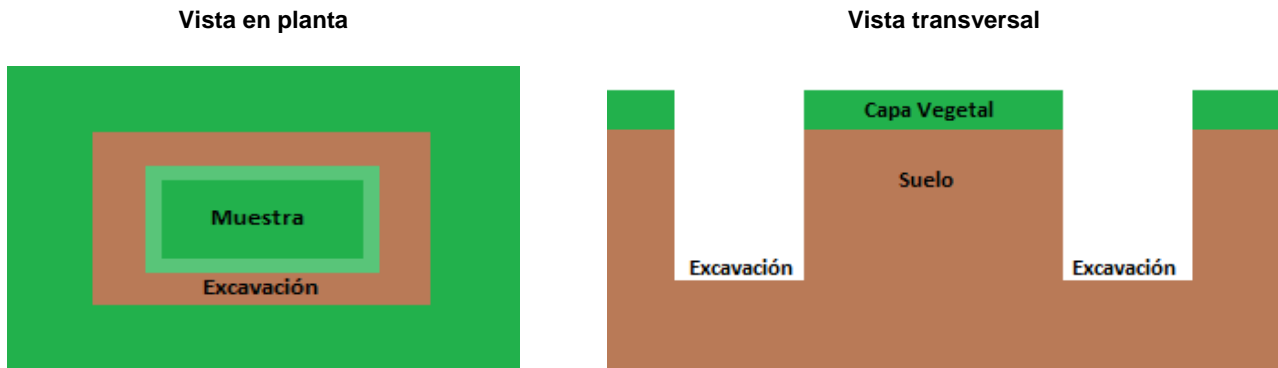


Figura 21 bosquejo de extracción de la muestra

Fuente: creación propia

Una vez extraído el cubo de suelo, se pulirá la muestra con nilón con base en el molde de madera previamente dimensionado otorgando la pendiente y geometría del talud.

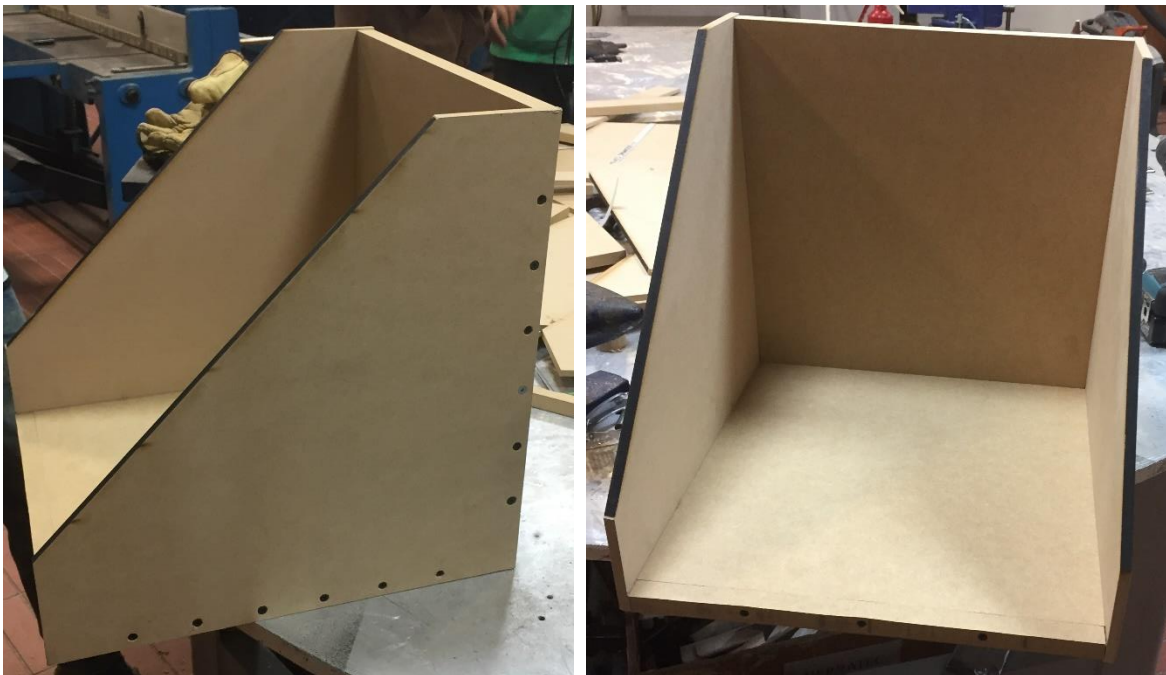


Figura 22 Molde de madera

Fuente: creación propia

2.3.4 Instrumentación del talud

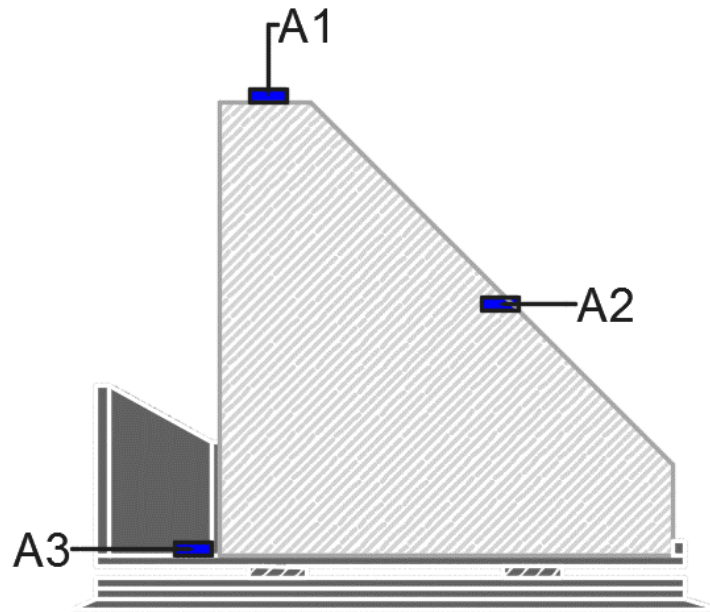


Figura 23 Talud sobre mesa metálica

Fuente: creación propia

El talud se montará sobre la plataforma vibratoria y se ubicarán tres acelerómetros, el primero en la corona del talud, el segundo en la parte media del talud y el tercero en la plataforma vibratoria, a fin de registrar dos aceleraciones en diferentes puntos del talud y la aceleración de entrada, la cual equivale a la registrada en la plataforma vibratoria.



Figura 24 Acelerómetro Crossbow

Imagen tomada de <http://bit.ly/2erTjDV>

2.4 Evaluación del comportamiento sísmico del talud físico.

Teniendo el modelo instrumentado según las especificaciones del capítulo 2.3, se ejecutara un movimiento armónico con frecuencias de $1Hz$ y $2Hz$ a través de un actuador dinámico. Se tomaran los datos de las aceleraciones obtenidas y haciendo uso del software SeismoSignal 2016, el cual posee la universidad, se realizará el cálculo de las deformaciones utilizando el método de la integración.

2.5 Evaluación del comportamiento sísmico del talud empleando métodos de equilibrio límite

Empleando el programa Slide de Rocscience que tiene la universidad, se realizará el análisis de un talud con las mismas condiciones y propiedades que se evaluó el talud físico modelado utilizando las metodologías de Spencer y Morgenstern-Price, se ejecutarán tres simulaciones por ensayo, en las cuales se someterá el talud virtual a cada una de las aceleraciones máximas registradas en los diferentes puntos del talud. La simulación nos mostrará la superficie de falla y la variación del factor de seguridad del talud. Por otra parte, haciendo uso del programa Phase 2.0 de Rocscience, el cual también posee la universidad, se exportara los resultados de Slide y se analizaran las deformaciones del talud para cada una de las aceleraciones registradas.

2.6 Comparación de resultados obtenidos del talud físico y el talud virtual.

Se compararán las deformaciones y aceleraciones obtenidas por el programa Phase 2.0 y Slide con las deformaciones del SeismoSignal y las aceleraciones registradas del talud físico respectivamente. Todo lo anterior con el fin de validar el comportamiento teórico con el comportamiento experimental con base en las metodologías de diseño previamente mencionadas en el capítulo 1.4.2.

3 Presentación y discusión de resultados

3.1 Resultados de ensayos de laboratorio.

3.1.1 Ensayo de corte directo

Se realizó el ensayo de corte directo simple no consolidado no drenado a una velocidad de $0.5 \frac{mm}{min}$ con el fin de determinar los valores de la cohesión y ángulo de fricción del suelo.

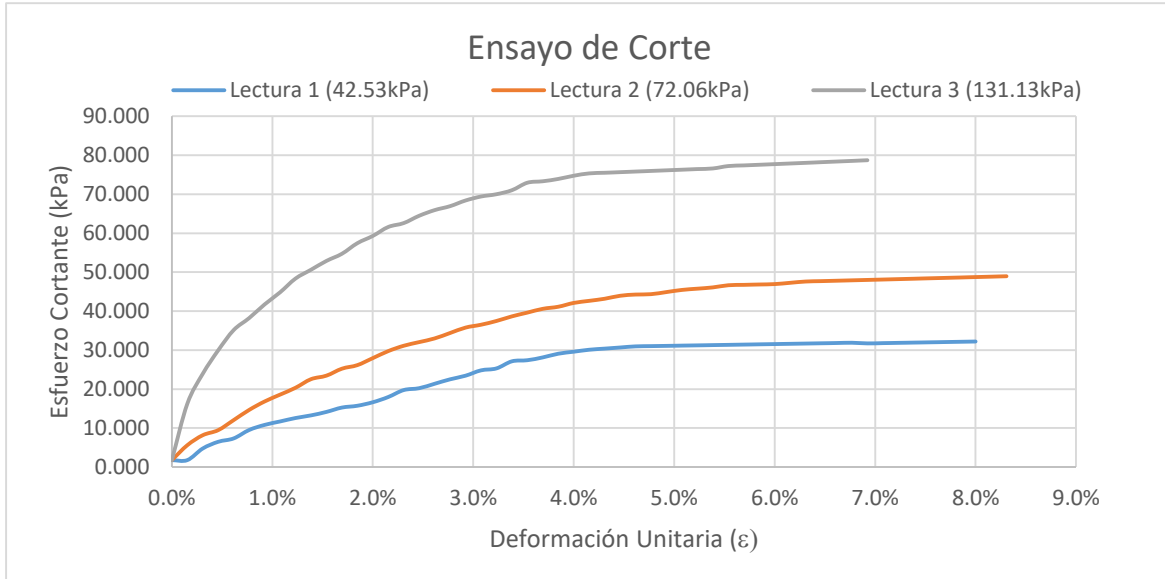


Figura 25 Ensayo de corte directo

Para transformar la información obtenida por la maquina a unidades de fuerza se utilizó la siguiente ecuación.

$$\tau_i = \frac{0.00140800695843 \cdot x + 0.00588308702909}{A_c/1000^2}$$

Donde

τ_i : esfuerzo cortante en [kPa] en la lectura i

x : dato obtenido en la lectura i

A_c : área corregida de la muestra

El área corregida se calculó con la siguiente ecuación tomada de (Olson, 1989)

$$A_c = A_0 F$$

Donde:

A_0 : área inicial de la muestra

$$F = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{\Delta}{D} \right) - \left(\frac{\Delta}{D} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{D} \right)^2} \right]$$

D: diámetro de la muestra

Δ : deformación de la muestra

Se realizaron tres ensayos de corte, cada uno con mayor esfuerzo normal al anterior, y se tomó los esfuerzos cortantes máximos de cada ensayo con el fin de encontrar la cohesión y ángulo de fricción.

Tabla 1 Resultados de esfuerzos cortantes

Datos	Esfuerzo Normal (kPa)	Esfuerzo Cortante (kPa)
Lectura 1	42.53	32.21
Lectura 2	72.06	48.95
Lectura 3	131.13	78.72

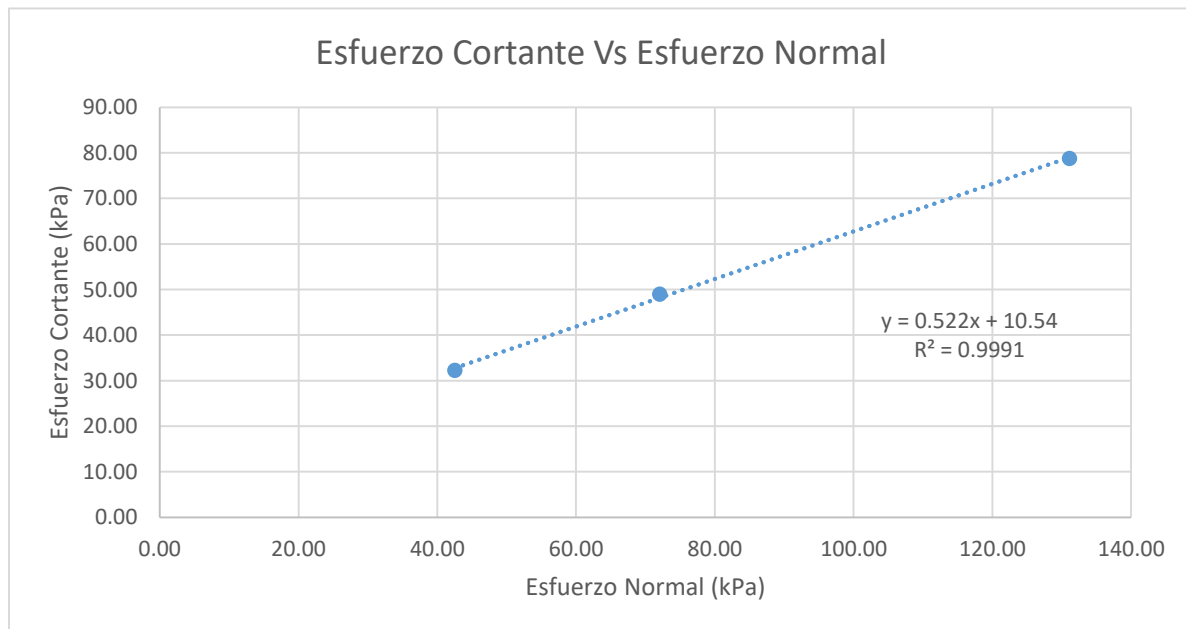


Figura 26 Esfuerzo cortante vs esfuerzo normal

Tabla 2 Resultado ángulo de fricción y cohesión

ϕ°	27.56
C (kPa)	10.54

3.1.2 Módulo de elasticidad

Con base en Figura 25 se toma el esfuerzo cortante máximo en el rango elástico de la lectura 1 y se determina al 50% del esfuerzo la deformación. Luego se divide el esfuerzo cortante con su respectiva deformación unitaria para hallar el módulo de corte (G).

Tabla 3 Esfuerzo a cortante máximo en el rango elástico

Esfuerzo de corte Máximo.(kPa)	Deformación. Unitaria
29.587	0.040

Tabla 4 Esfuerzo de corte en el 50%

	Esfuerzo de. Corte (kPa)	Deformación. Unitaria
G_{50}	14.793	0.015

$$G = \frac{14.793}{0.015} = 961.574kPa$$

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Las arcillas tienen un coeficiente de Poisson entre 0.4 y 5. Para este trabajo se utilizó un coeficiente de Poisson de 0.45.

$$E = 2(961.574)(1 + 0.45)$$

$$E = 2788.56kPa$$

3.1.3 Límites de Atterberg

3.1.3.1 Limite líquido

El ensayo de límite líquido se realizó con base en la norma (I.N.V. E – 125 – 07). Primero se secó la muestra de suelo en el horno. Una vez seca se humedecía con agua destilada moderadamente y se homogenizaba con el fin de evaluar dicha porción de suelo en la máquina de Casagrande.



Figura 27 Procedimiento ensayo límite líquido

Fuente: creación propia

Para determinar el límite líquido del suelo se realizó una gráfica de contenido de humedad contra número de golpes con el fin de encontrar una línea de tendencia en escala logarítmica que permita determinar el contenido de humedad de la muestra para un valor de 25 golpes.

Tabla 5 Resultados límite líquido

Limite Liquido					
	Peso recipiente (g)	# de golpes	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	% Humedad
Muestra 1	10.4	30	22.5	18.2	55
Muestra 2	15.5	18	33.7	27.2	56
Muestra 3	10.7	8	28.5	22	58

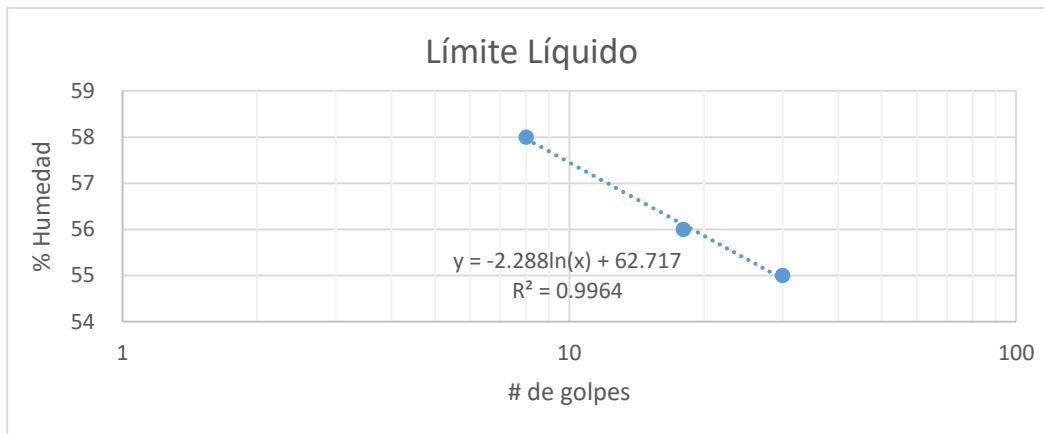


Figura 28 Límite líquido

Si se reemplaza $x = 25$ en la ecuación, entonces se obtiene $LL = 55\%$

3.1.3.2 Límite plástico

Para obtener el límite plástico se saca el promedio de las humedades obtenidas de los rollos de suelo elaborados con base en el procedimiento de la norma (I.N.V. E – 126 – 07).

Tabla 6 Resultados límite plástico

Límite Plástico				
	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	LP	% Error
Muestra 1	1.60	1.25	28.0	-3%
Muestra 2	2.80	2.20	27.3	
		Promedio	27.6	

La norma indica que el límite plástico debe aproximarse al valor entero más cercano, en este caso es 28.

3.1.3.3 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

$$IP = 55\% - 28\% = 27\%$$

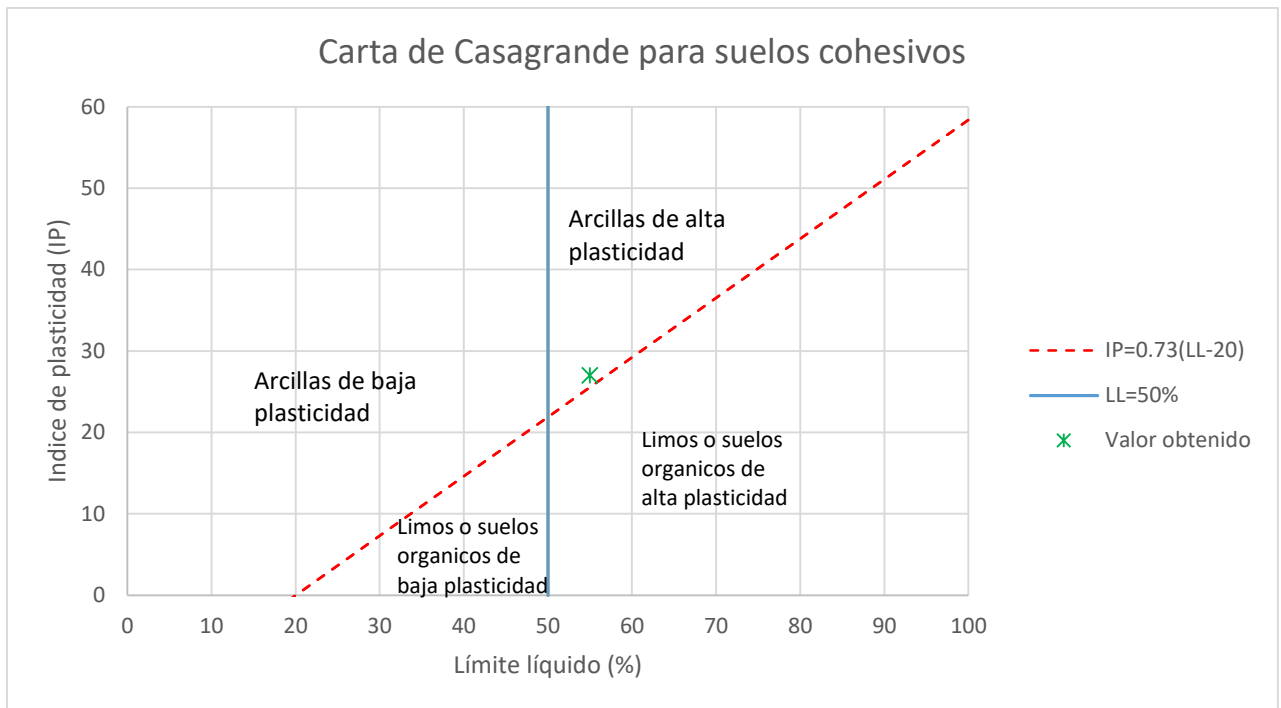


Figura 29 Carta de Casagrande para suelos cohesivos
Fuente: creación propia

Con base en la carta de Casagrande se encontró que la relación entre límite líquido e índice de plasticidad obtenido en los ensayos de laboratorio indican que el suelo es una arcilla de alta plasticidad.

3.1.4 Densidad del suelo



Figura 30 Molde para determinar la densidad del suelo
Fuente: creación propia

Se tomó una muestra de suelo con un recipiente cilíndrico y se determinó la densidad conociendo sus dimensiones y masa.

$$m = 0.741kg - 0.465kg = 0.276kg$$

$$v = \pi \cdot \left(\frac{0.0535m}{2}\right)^2 \cdot 0.07318m$$

$$v = 0.00016451m^3$$

$$\gamma_h = \frac{0.276kg}{0.00016451m^3} = 16.8 \frac{kN}{m^3}$$

3.2 Montaje e instrumentación del modelo

3.2.1 Plataforma vibratoria



Figura 31 Plataforma vibratoria y base de nivelación

Fuente: creación propia

Se realizaron ampliaciones a las perforaciones de los patines en el laboratorio de mecánica con el fin de garantizar una mayor precisión en el acople de los rieles y la plataforma vibratoria.

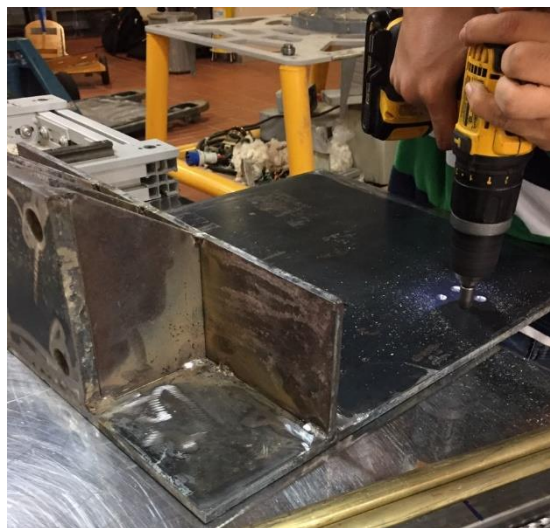


Figura 32 Ampliación de perforaciones del apoyo

Fuente: creación propia

Teniendo la plataforma vibratoria lista, se realizó el anclaje del actuador dinámico y la placa con toda la estructura vibratoria en la losa del laboratorio. Luego se niveló la plataforma vibratoria para su acople con el actuador dinámico.



Figura 33 Instalación del actuador dinámico

Se ancló el actuador dinámico a la pieza de color blanco que se muestra en la Figura 33, la cual estaba anclada a la losa, utilizando espárragos de 3/8" de grado 7. Se agregó articulaciones en los extremos del actuador dinámico, con el fin de evitar transferirle momentos.



Figura 34 Acople entre actuador dinámico y estructura vibratoria

Se realizó el acople entre el actuador dinámico y la estructura vibratoria previamente nivelada.

3.2.2 Extracción del talud



Figura 35 Extracción y moldeo del talud

Se extrajo el talud según lo planteado en el capítulo 2.3.3 y se moldeo de acuerdo al molde con hilo grueso.

3.2.3 Instrumentación del talud

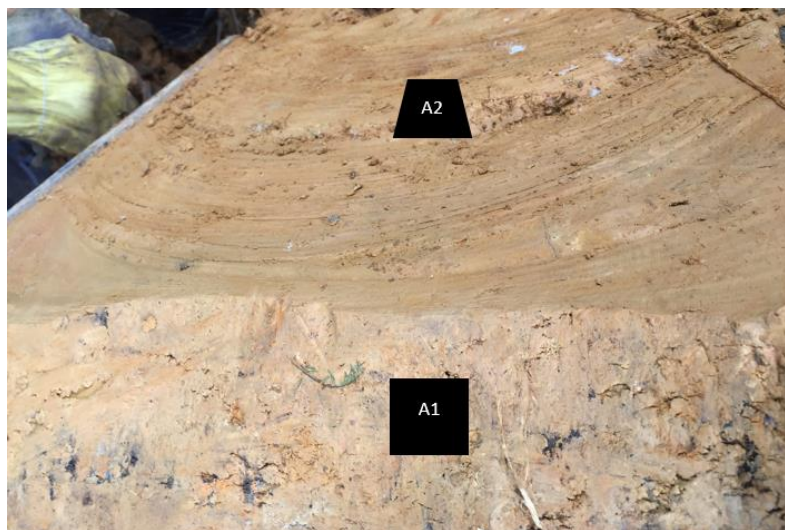


Figura 36 Ubicación acelerómetros en el talud

Se colocó el acelerómetro A1 en la corona del talud, el acelerómetro A2 se ubicó en el punto medio del talud, es decir, a 24 cm medido desde la plataforma vibratoria. El tercer acelerómetro se ubicó en la mesa con el fin de registrar la aceleración de entrada.

3.3 Comportamiento sísmico del talud físico

3.3.1 Ensayo 1

3.3.1.1 Movimiento armónico con frecuencia=1Hz

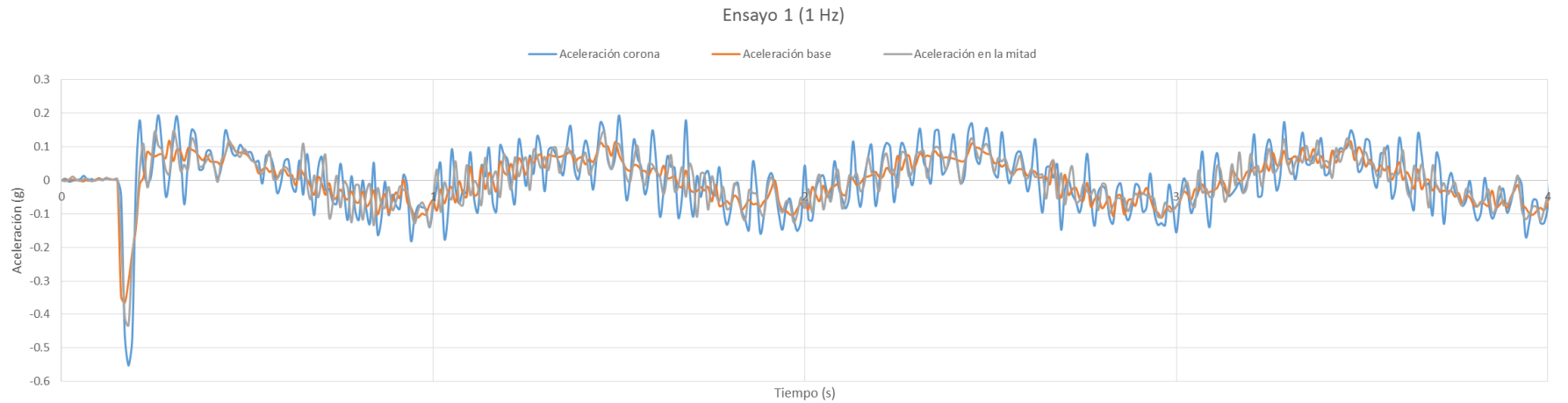


Figura 37 Aceleraciones primer ensayo con frecuencia de 1Hz

Se observa en la gráfica que las aceleraciones registradas en la corona generalmente son mayores que las registradas en el medio y en la base del talud, también se observa que el unto medio tiende a ser mayor que el registrado en la base. Se determinaron las aceleraciones máximas registradas en los diferentes puntos del talud, las cuales serán las implementadas en el modelo del Slide. Se ignoró el tramo de las aceleraciones afectadas por el arranque.

Tabla 7 Registro de aceleraciones máximas del ensayo 1 con frecuencia de 1Hz

Ensayo 1 (1Hz)	Corona	Medio	Base
Aceleración máxima (g)	0.19	0.15	0.12
Tiempo (s)	0.26	0.25	0.29

Se determinó las aceleraciones máximas en la corona con las aceleraciones en el punto medio y base en el mismo instante.

Tabla 8 Incremento de aceleraciones ensayo 1 (1Hz)

Tiempo (s)	Aceleraciones máximas en la corona (g)			Incremento (%)	
	Corona	Medio	Base	Corona vs Base	Medio vs Base
0.26	0.19	0.10	0.08	138%	25%
0.94	0.18	0.09	0.08	124%	8%
1.5	0.19	0.11	0.08	138%	38%
1.87	0.16	0.09	0.08	100%	13%
2.45	0.17	0.13	0.11	55%	18%
3	0.16	0.08	0.08	100%	0%
3.29	0.17	0.12	0.09	89%	33%
3.94	0.17	0.12	0.08	113%	50%

Se puede observar que las aceleraciones en el punto medio y en la corona del talud tienen un incremento con respecto a la aceleración de entrada, es decir, la aceleración registrada en la base. La aceleración en la corona presenta un incremento promedio del 107% y la aceleración en el medio un incremento del 26%

3.3.1.2 Movimiento armónico con frecuencia= 2Hz

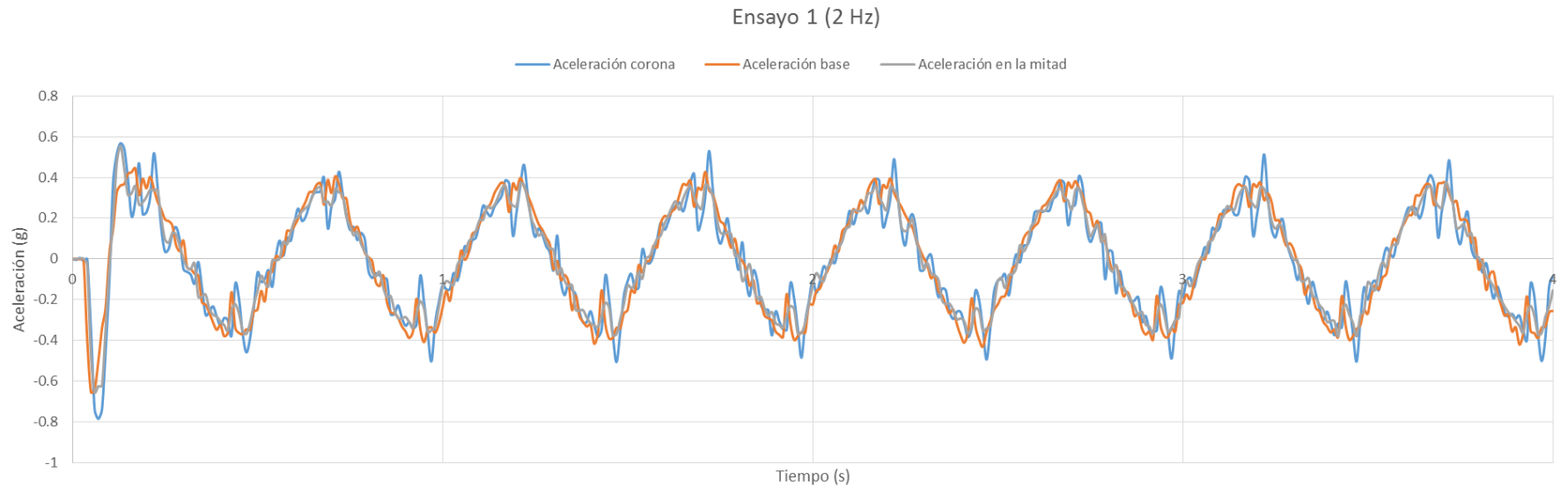


Figura 38 Aceleraciones primer ensayo con frecuencia de 2Hz

Se somete el mismo talud en las mismas condiciones a un movimiento armónico con frecuencia de 2 Hz. La gráfica muestra un comportamiento similar en los ciclos a excepción del que registrado entre 2.6 y 2.8 segundos. Se puede observar que las aceleraciones generalmente tienden a ser mayores en la corona, luego en el medio y por último en la base.

Tabla 9 Registro de aceleraciones máximas del ensayo 1 con frecuencia de 2Hz

Ensayo 1 (2Hz)	Corona	Medio	Base
Aceleración máxima (g)	0.53	0.38	0.43
Tiempo (s)	1.72	3.47	2.46

Tabla 10 Incremento de aceleraciones ensayo 1 (2Hz)

Tiempo (s)	Aceleraciones máximas en la corona (g)			Incremento	
	Corona	Medio	Base	Corona vs Base	Medio vs Base
0.47	0.46	0.37	0.35	31%	6%
0.72	0.43	0.33	0.37	16%	-11%
0.97	0.50	0.35	0.34	47%	3%
1.22	0.46	0.36	0.36	28%	0%
1.47	0.51	0.37	0.34	50%	9%
1.72	0.53	0.35	0.34	56%	3%
1.97	0.48	0.36	0.36	33%	0%
2.22	0.49	0.34	0.33	48%	3%
2.47	0.49	0.34	0.36	36%	-6%
2.72	0.41	0.35	0.35	17%	0%
2.97	0.49	0.34	0.34	44%	0%
3.22	0.51	0.34	0.29	76%	17%
3.47	0.50	0.38	0.34	47%	12%
3.72	0.48	0.34	0.32	50%	6%
3.97	0.50	0.36	0.34	47%	6%

Las aceleraciones en la corona presentan un incremento promedio del 42%. En el punto medio se encuentra algunos datos en los que las aceleraciones en la base son mayores, esto podría deberse a las vibraciones externas ocasionadas por las reformas constructivas que se estaban realizando en los alrededores del laboratorio en ese instante, sin embargo no se conoce la razón con certeza de este suceso. Si despreciamos estos datos negativos, el incremento promedio del punto medio sería de 6%.

Al comparar los incrementos que se genera con la frecuencia de 1 Hz y los generados con la frecuencia de 2 Hz, se pudo observar que al aumentar la frecuencia el incremento disminuyó un poco más de la mitad.

Para esta muestra se realizó un ensayo con frecuencia de 4Hz, sin embargo la aceleración que se generaba era mayor a la capacidad de registro de los acelerómetros. También, el talud fallo por falta de confinamiento en su parte trasera.

3.3.2 Ensayo 2

3.3.2.1 Movimiento armónico con frecuencia= 1Hz

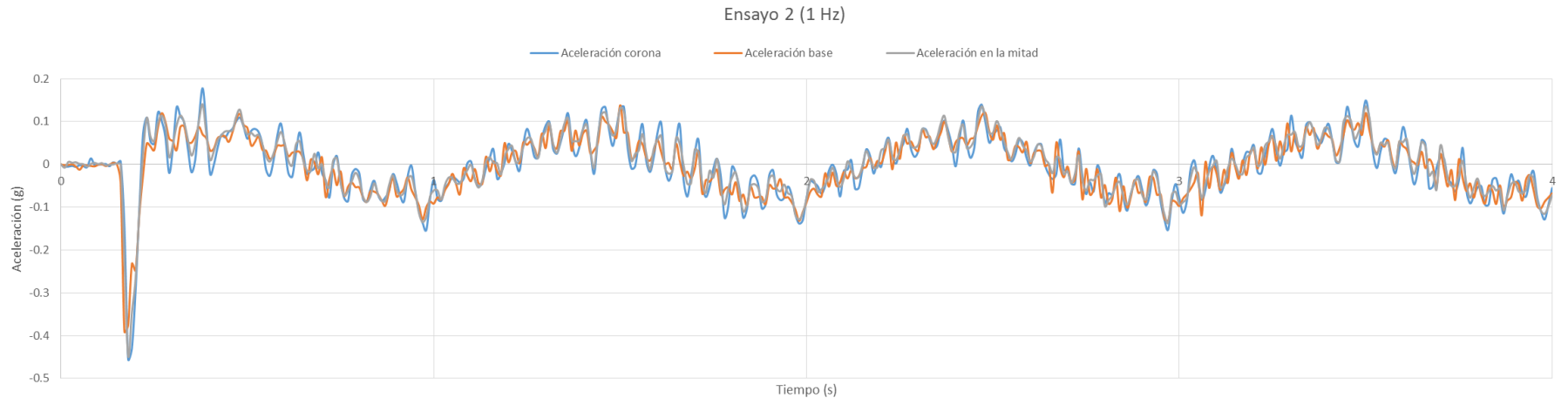


Figura 39 Aceleraciones segundo ensayo con frecuencia de 1Hz

Teniendo presente la falla que se generó por falta de confinamiento del primer ensayo, se optó por realizar el montaje del talud con el molde sobre la mesa vibratoria, de esta manera el molde aportaría el confinamiento faltante. La gráfica presenta un comportamiento similar al del primer ensayo, se observa que la mayoría de las aceleraciones en la corona y el punto medio son mayores que las registradas en la base.

Tabla 11 Registro de aceleraciones máximas del ensayo 2 con frecuencia de 1Hz

Ensayo 2 (1Hz)	Corona	Medio	Base
Aceleración máxima (g)	0.18	0.14	0.14
Tiempo (s)	0.38	0.38	1.5

Tabla 12 Incremento de aceleraciones ensayo 2 (1Hz)

Tiempo (s)	Aceleraciones máximas en la corona (g)			Incremento (%)	
	Corona	Medio	Base	Corona vs Base	Medio vs Base
0.38	0.18	0.14	0.07	157%	100%
0.98	0.15	0.12	0.10	50%	20%
1.51	0.13	0.12	0.07	86%	71%
1.98	0.14	0.13	0.13	8%	0%
2.47	0.14	0.14	0.11	27%	27%
2.97	0.15	0.14	0.13	15%	8%
3.5	0.15	0.14	0.12	25%	17%
3.98	0.13	0.12	0.09	44%	33%

Las aceleraciones registradas en la corona presentan un incremento promedio del 52% con respecto a la base. En el punto medio las aceleraciones presentan un incremento promedio del 39% respecto a las aceleraciones de la base. Se puede observar que las aceleraciones obtenidas en este ensayo son menores que las aceleraciones obtenidas en el primer ensayo de igual frecuencia. Esto es un resultado esperado, ya que el primer ensayo al no tener confinamiento en toda su parte trasera, adopta un comportamiento semejante al de una viga empotrada en la base, mientras que en este ensayo se comporta como una viga empotrada en la base y con apoyo simple en su parte superior, lo que le impide tener una oscilación mayor.

3.3.2.2 Movimiento armónico con frecuencia= 2Hz

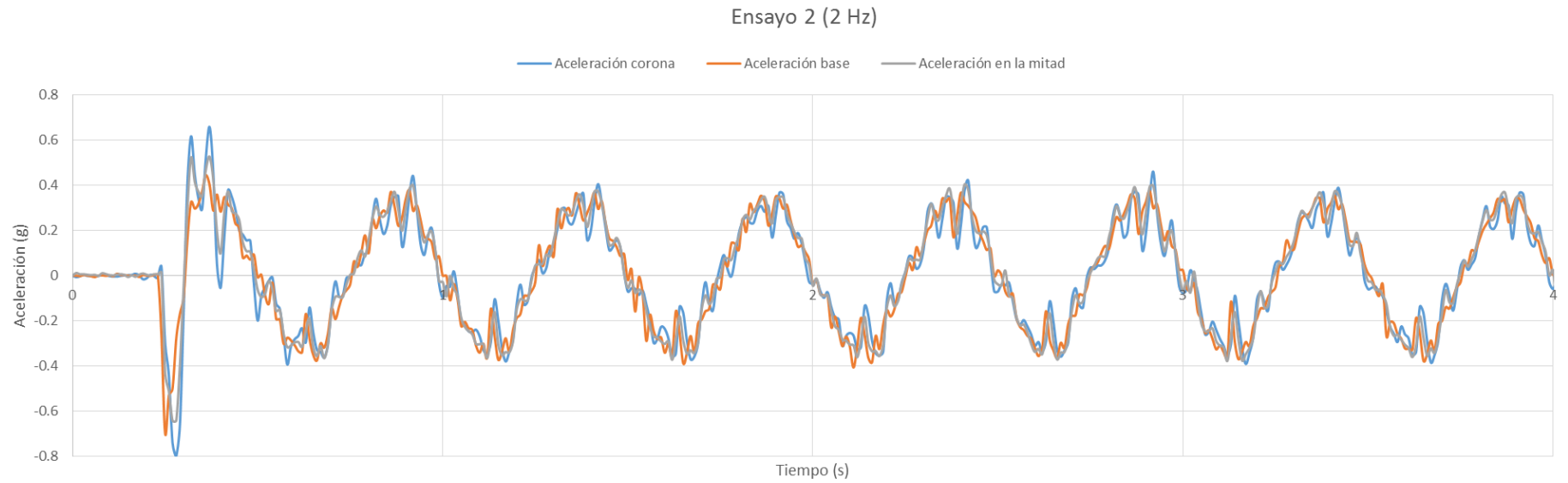


Figura 40 Aceleraciones segundo ensayo con frecuencia de 2Hz

Tabla 13 Registro de aceleraciones máximas del ensayo 2 con frecuencia de 2Hz

Ensayo 2 (2Hz)	Corona	Medio	Base
Aceleración máxima (g)	0.46	0.40	0.41
Tiempo (s)	2.92	2.41	2.11

Tabla 14 Incremento de aceleraciones ensayo 2 (2Hz)

Tiempo (s)	Aceleraciones máximas en la corona (g)			Incremento (%)	
	Corona	Medio	Base	Corona vs Base	Medio vs Base
0.58	0.39	0.32	0.27	44%	19%
0.92	0.44	0.40	0.29	52%	38%
1.17	0.38	0.34	0.28	36%	21%
1.42	0.41	0.37	0.30	37%	23%
1.68	0.36	0.34	0.34	6%	0%
1.91	0.37	0.35	0.34	8%	2%
2.18	0.35	0.36	0.33	6%	9%
2.42	0.42	0.38	0.31	35%	23%
2.67	0.36	0.34	0.30	20%	13%
2.92	0.46	0.40	0.30	53%	33%
3.17	0.39	0.35	0.29	34%	21%
3.42	0.39	0.36	0.29	34%	24%
3.67	0.38	0.32	0.29	31%	10%
3.91	0.37	0.36	0.34	9%	6%

Las aceleraciones en la corona presentan un incremento promedio del 29% y el punto medio un incremento del 19%. Se observa que hay varios registros en los que las aceleraciones tienen un incremento por debajo del 10%, lo que implica que el promedio disminuya.

3.3.3 Ensayo 3

3.3.3.1 Movimiento armónico con frecuencia= 1Hz

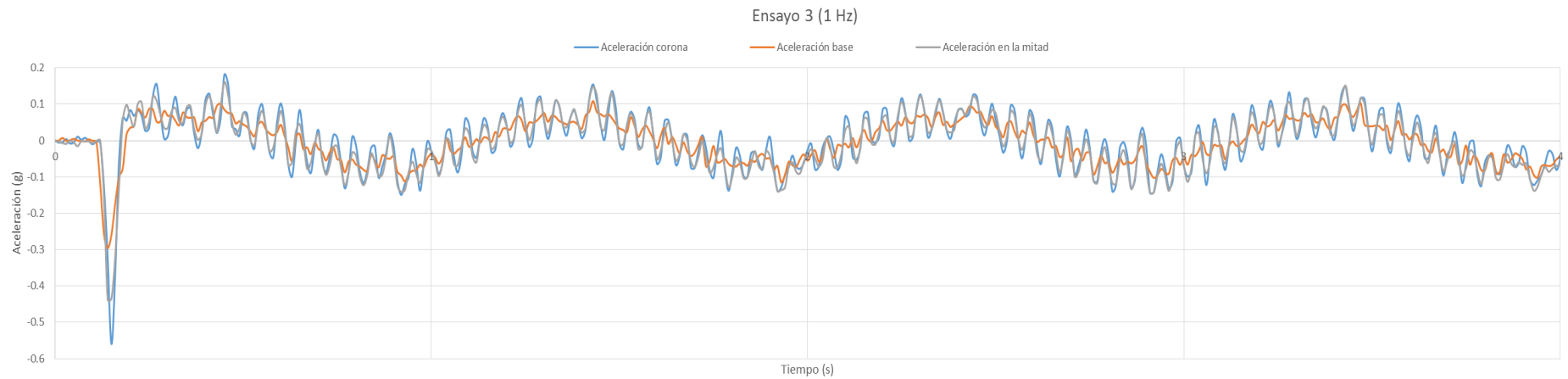


Figura 41 Aceleraciones tercer ensayo con frecuencia de 1Hz

Se observa que la aceleración de la base siempre está por debajo de las aceleraciones registradas en la corona y el punto medio. Siendo la aceleración en la corona casi siempre la mayor.

Tabla 15 Registro de aceleraciones máximas del ensayo 3 con frecuencia de 1Hz

Ensayo 3 (1Hz)	Corona	Medio	Base
Aceleración máxima (g)	0.18	0.16	0.12
Tiempo (s)	0.45	0.45	4.96

Tabla 16 Incremento de aceleraciones ensayo 3 (1Hz)

Tiempo (s)	Aceleraciones máximas en la corona (g)			Incremento (%)	
	Corona	Medio	Base	Corona vs Base	Medio vs Base
0.45	0.18	0.16	0.09	100%	78%
0.92	0.15	0.14	0.10	50%	40%
1.43	0.15	0.15	0.11	36%	36%
1.92	0.14	0.14	0.07	100%	100%
2.45	0.12	0.11	0.08	50%	38%
2.92	0.14	0.14	0.10	40%	40%
3.43	0.15	0.15	0.10	50%	50%
3.93	0.12	0.14	0.09	33%	56%

Se tiene un incremento promedio en la corona del 57%, el cual es similar al registrado en el ensayo 2. En el punto medio se observa un incremento promedio del 55%, el cual es mayor al registrado en el segundo ensayo.

3.3.3.2 Movimiento armónico con frecuencia= 2Hz

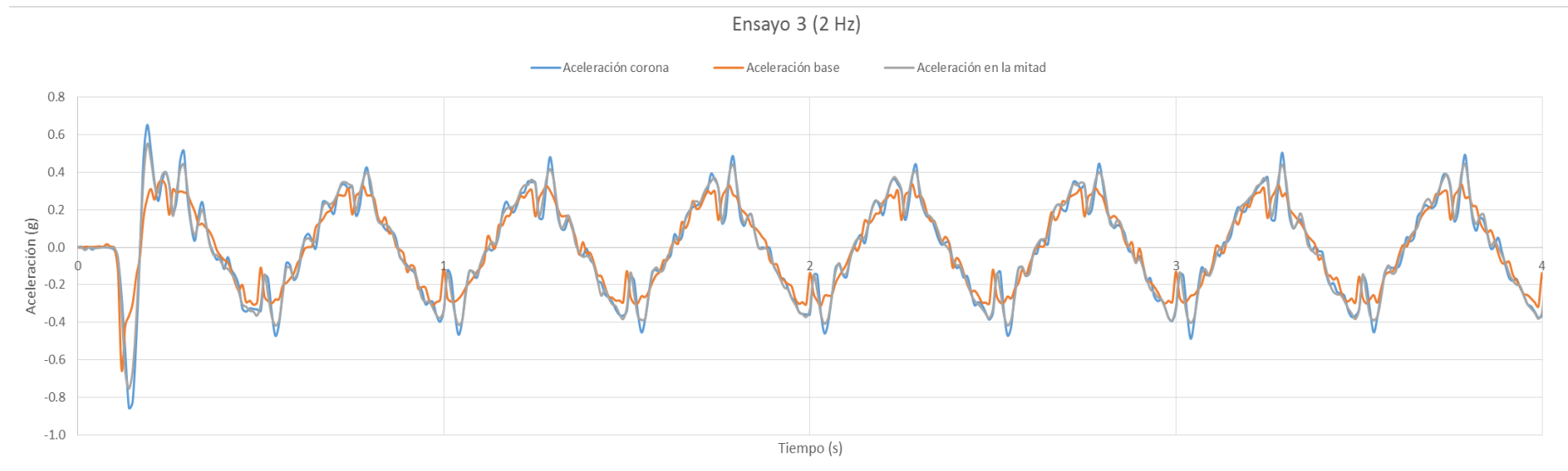


Figura 42 Aceleraciones tercer ensayo con frecuencia de 1Hz

Se observa en la gráfica que el comportamiento las aceleraciones en cada ciclo es casi idéntico. La aceleración en la base generalmente es menor que la aceleración del punto medio y la corona, siendo la corona con la mayor aceleración registrada.

Tabla 17 Registro de aceleraciones máximas del ensayo 3 con frecuencia de 2Hz

Ensayo 3 (2Hz)	Corona	Medio	Base
Aceleración máxima (g)	0.50	0.44	0.34
Tiempo (s)	3.29	3.79	2.28

Tabla 18 Incremento de aceleraciones ensayo 3 (2Hz)

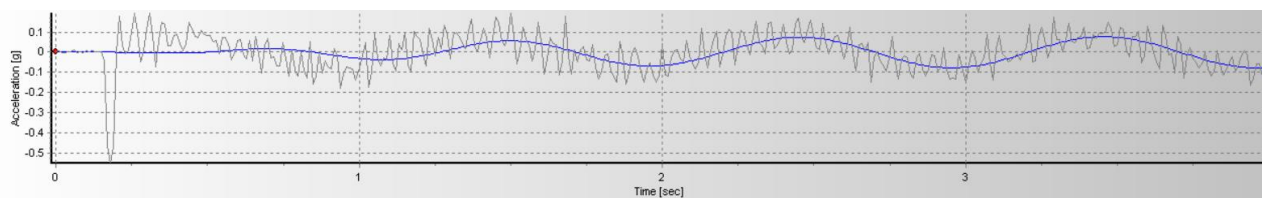
Tiempo (s)	Aceleraciones máximas en la corona (g)			Incremento	
	Corona	Medio	Base	Corona vs Base	Medio vs Base
0.54	0.47	0.42	0.28	68%	50%
0.79	0.43	0.40	0.28	54%	43%
1.04	0.47	0.41	0.27	74%	52%
1.29	0.48	0.42	0.30	60%	40%
1.54	0.45	0.39	0.26	73%	50%
1.79	0.37	0.35	0.34	8%	2%
2.04	0.46	0.41	0.26	77%	58%
2.29	0.44	0.40	0.27	63%	48%
2.54	0.47	0.42	0.26	81%	62%
2.79	0.45	0.40	0.29	55%	38%
3.04	0.49	0.40	0.26	88%	54%
3.29	0.50	0.44	0.27	85%	63%
3.54	0.45	0.39	0.25	80%	56%
3.79	0.49	0.44	0.26	88%	69%
3.99	0.38	0.38	0.31	23%	23%

La mayoría de las aceleraciones registradas en la corona y el punto medio están por encima de 0.4g, dando como resultado un incremento promedio del 65% y 47% respectivamente.

3.3.4 Deformaciones

Haciendo uso del software SeísmoSignal se exportaron los registros de las aceleraciones en la corona y en el punto medio del talud para cada ensayo. Luego se implementó la corrección por línea base y filtrado de frecuencia. Para el filtrado de frecuencia se utilizó el “Bandpass” en los que se le asignó como rango a la frecuencia del ensayo $\pm 30\%$, es decir, si el ensayo tiene como frecuencia 1Hz, entonces el rango establecido es de 0.7 a 1.3 Hz. El tipo de filtro usado fue de tipo Bessel, ya que proporcionaba mejores resultados. De esta manera el acelerograma resultante está libre de algunas frecuencias externas generadas por vibraciones, ruidos entre otros.

(a)



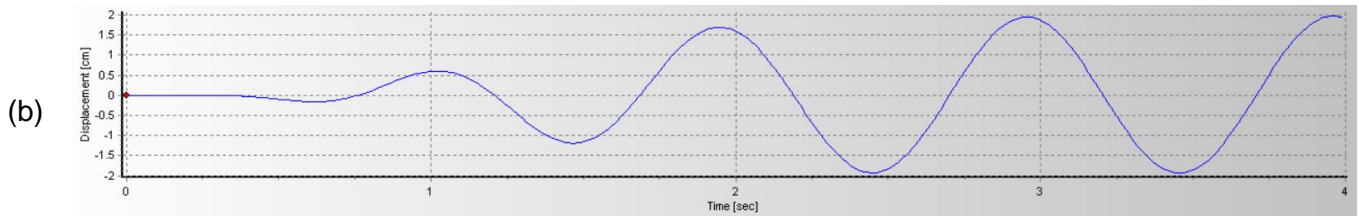


Figura 43 (a) Acelerograma corregido del ensayo 1 (1Hz) corona; (b) Deformación

Se puede observar como el filtro de frecuencias toma un comportamiento con menos distorsiones y corrige las aceleraciones afectadas por el efecto de arranque. En este ensayo se alcanza una deformación máxima en la corona de 1.97cm

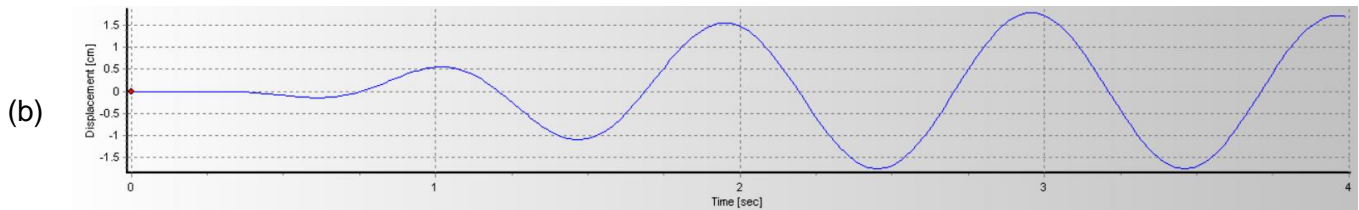
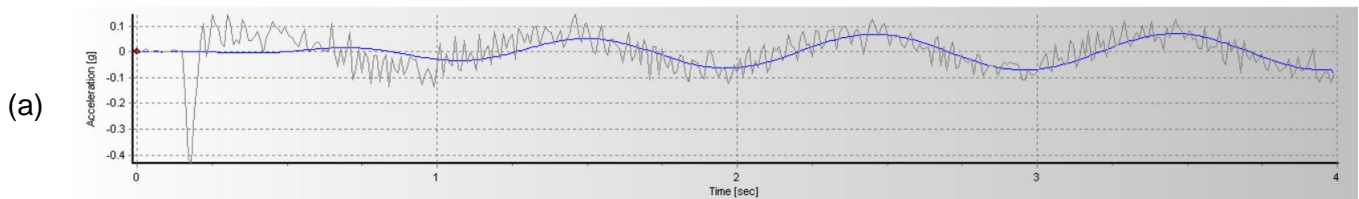


Figura 44 (a) Acelerograma corregido del ensayo 1 (Hz) medio; (b) Deformación

La gráfica muestra que la deformación máxima en el punto medio es de 1.79cm. El cual es un resultado esperado ya que es menor que el registrado en su corona

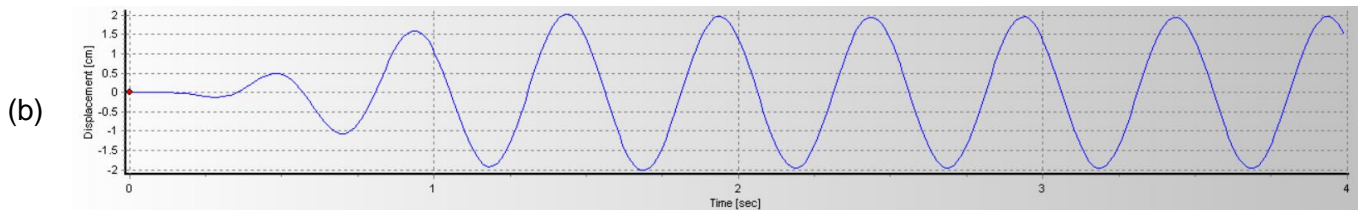
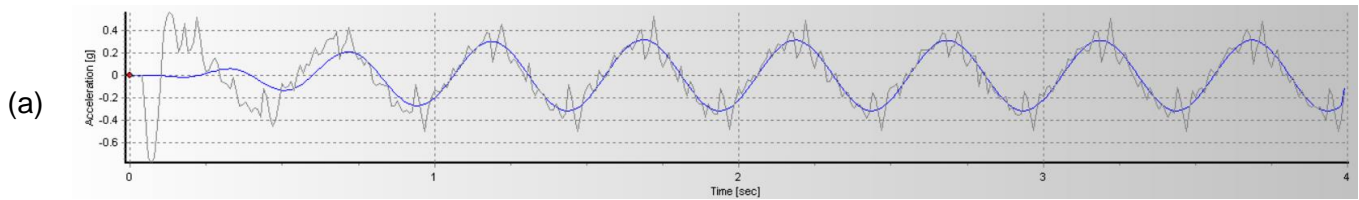


Figura 45 (a) Acelerograma corregido del ensayo 1 (2Hz) corona; (b) Deformación

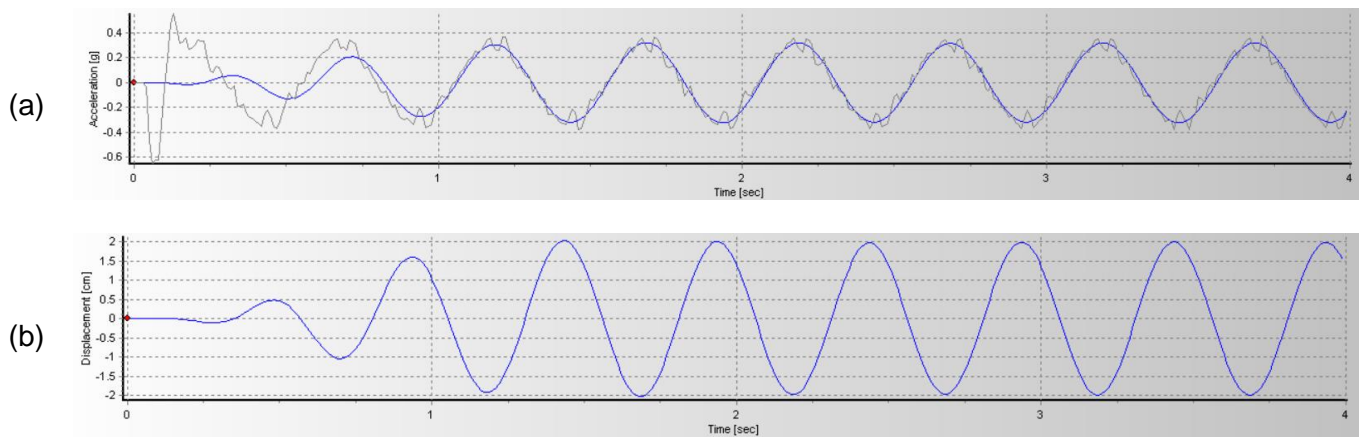


Figura 46 (a) Acelerograma corregido del ensayo 1 (2Hz) medio; (b) Deformación

En este ensayo con frecuencia de 2 Hz tanto la corona como el punto medio desarrollaron una deformación máxima de 2.02cm. Se determinó las deformaciones en el instante en el cual se generaba la máxima aceleración previamente mostrada en el capítulo 3.3.1

Tabla 19 Deformaciones absolutas por SeismoSignal ensayo 1

Ensayo 1 (1Hz)	Corona	Medio
Tiempo (s)	0.26	0.25
Aceleración máxima (g)	0.19	0.15
Deformación (cm)	0.00118	0.00093

Ensayo 1 (2Hz)	Corona	Medio
Tiempo (s)	1.72	3.47
Aceleración máxima (g)	0.53	0.38
Deformación (cm)	1.83696	1.80427

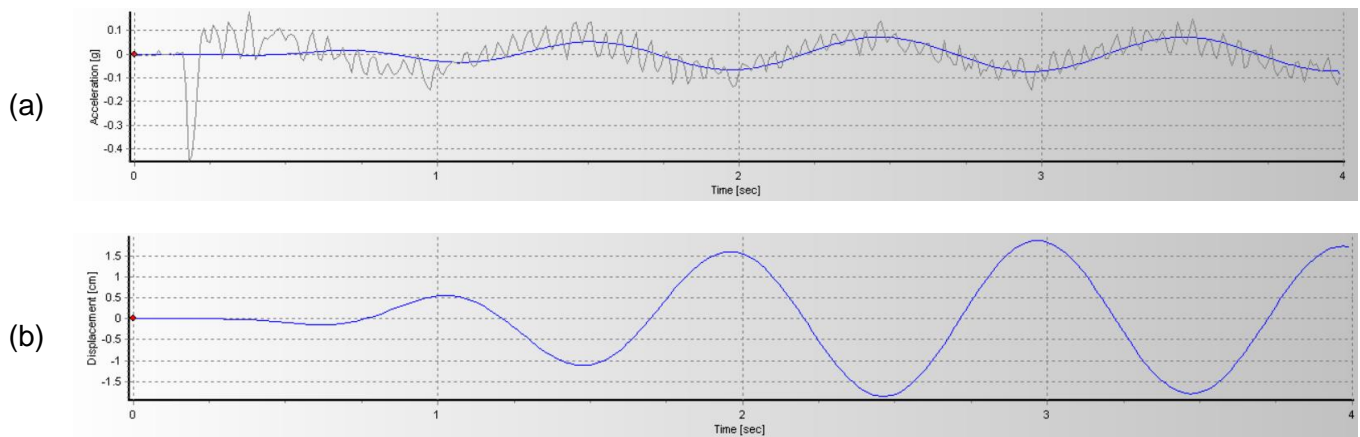


Figura 47 (a) Acelerograma corregido del ensayo 2 (1Hz) corona; (b) Deformación

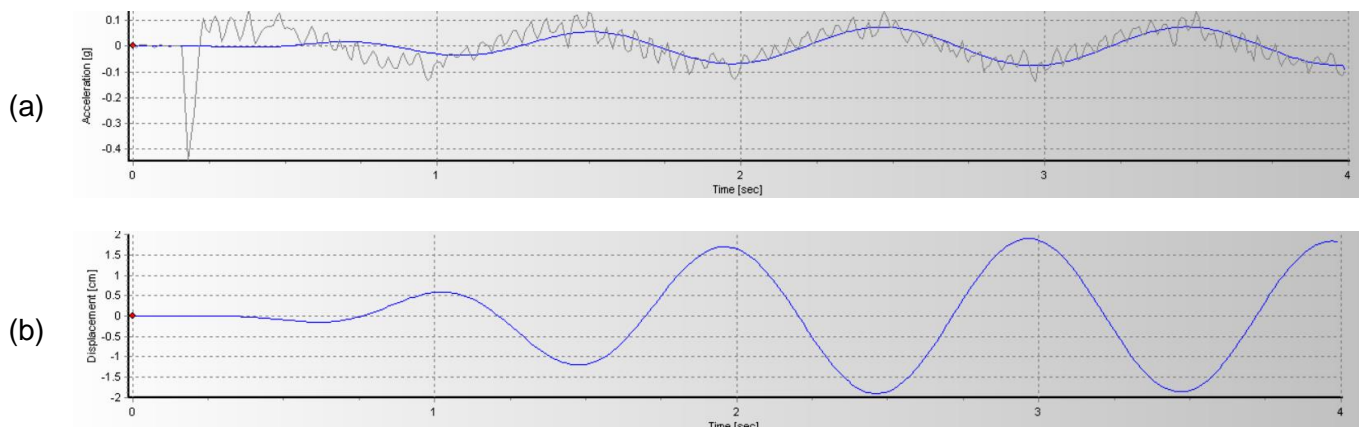


Figura 48 (a) Acelerograma corregido del ensayo 2 (1Hz) medio; (b) Deformación

Se observa que las deformaciones en el punto medio son mayores que las obtenidas en la corona. Esto se debe a que en los ensayos 2 y 3 se confinó la parte trasera del talud en toda su altura, restringiendo sus desplazamientos y aceleraciones. La deformación máxima en la corona y el punto medio fueron de 1.87cm y 1.9cm respectivamente.

Tabla 20 Deformaciones absolutas por SeismoSignal ensayo 2 (1Hz)

Ensayo 2 (1Hz)	Corona	Medio
Tiempo (s)	0.38	0.38
Aceleración máxima (g)	0.18	0.14
Deformación (cm)	0.01968	0.02082

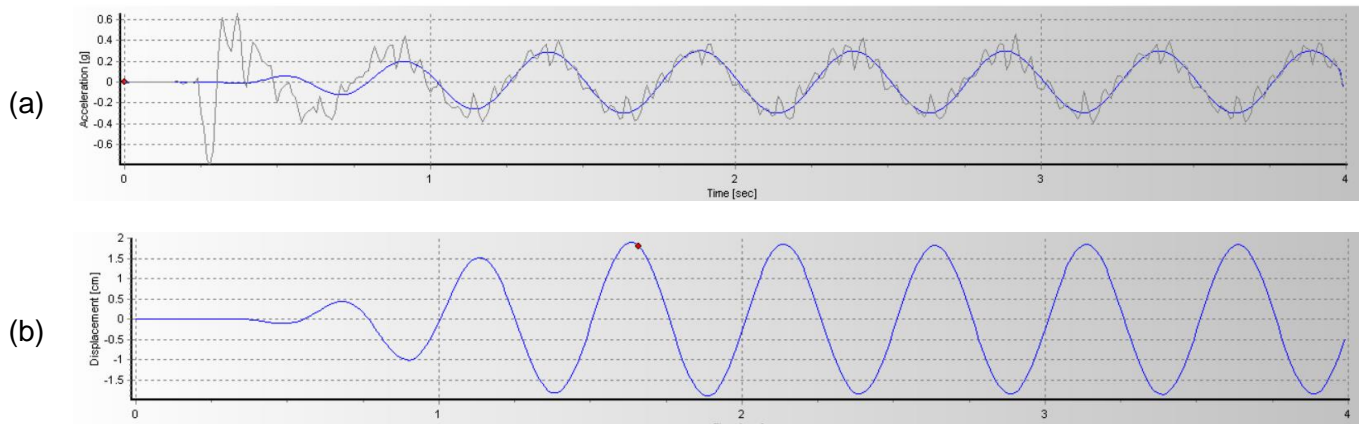


Figura 49 (a) Acelerograma corregido del ensayo 2 (2Hz) corona; (b) Deformación

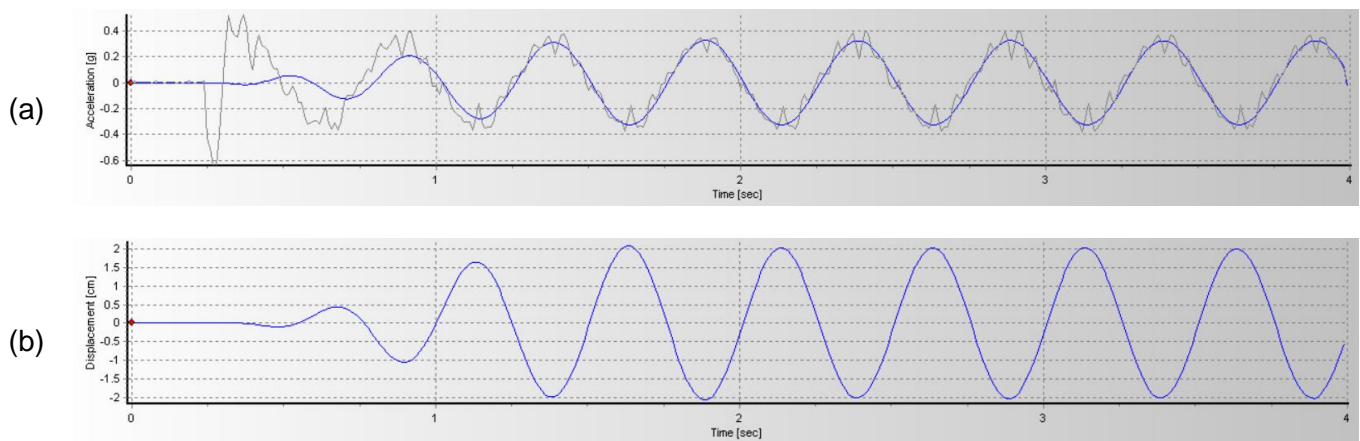


Figura 50 (a) Acelerograma corregido del ensayo 2 (2Hz) medio; (b) Deformación

La deformación máxima en la corona y el punto medio fueron de 1.91cm y 2.08cm respectivamente.

Tabla 21 Deformaciones absolutas por SeismoSignal ensayo 2 (2Hz)

Ensayo 2 (2Hz)	Corona	Medio
Tiempo (s)	2.92	2.41
Aceleración máxima (g)	0.46	0.40
Deformación (cm)	1.66844	1.91941

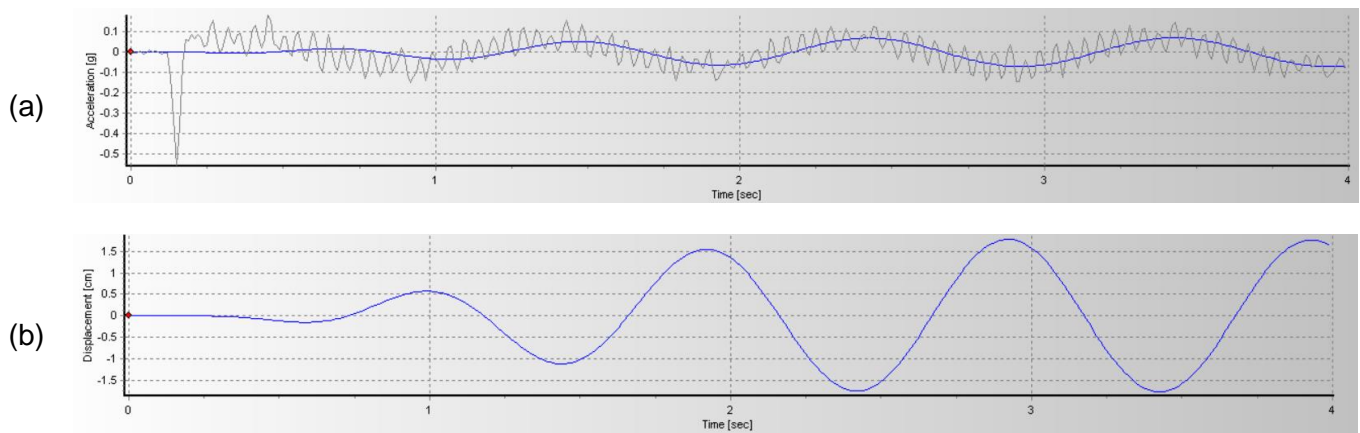


Figura 51 (a) Acelerograma corregido del ensayo 3 (1Hz) corona; (b) Deformación

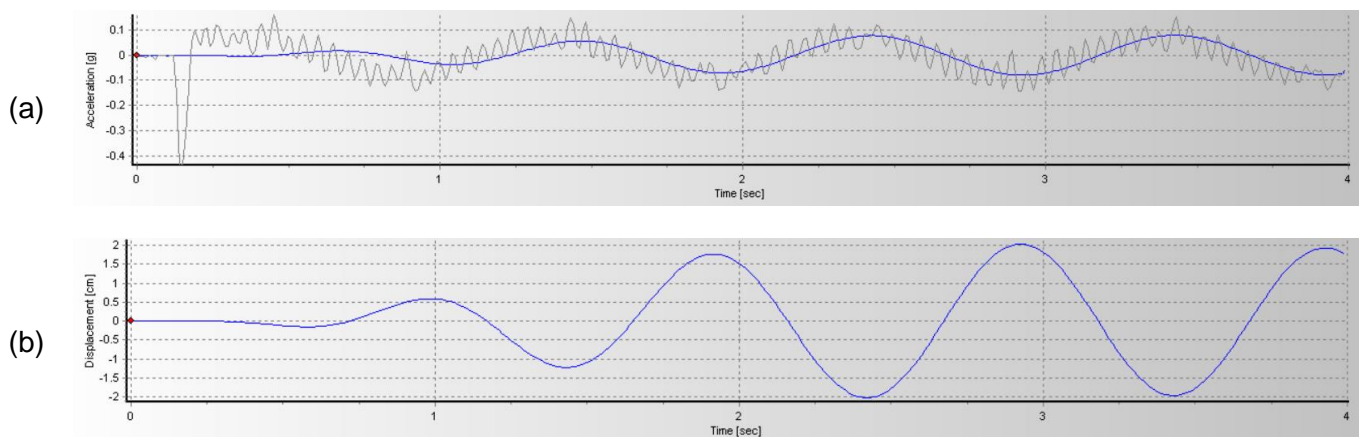


Figura 52 (a) Acelerograma corregido del ensayo 3 (1Hz) medio; (b) Deformación

La deformación máxima en la corona y el punto medio fueron de 1.78cm y 2.02cm respectivamente.

Tabla 22 Deformaciones absolutas por SeismoSignal ensayo 3 (1Hz)

Ensayo 3 (1Hz)	Corona	Medio
Tiempo (s)	0.45	0.45
Aceleración máxima (g)	0.18	0.16
Deformación (cm)	0.08086	0.0829

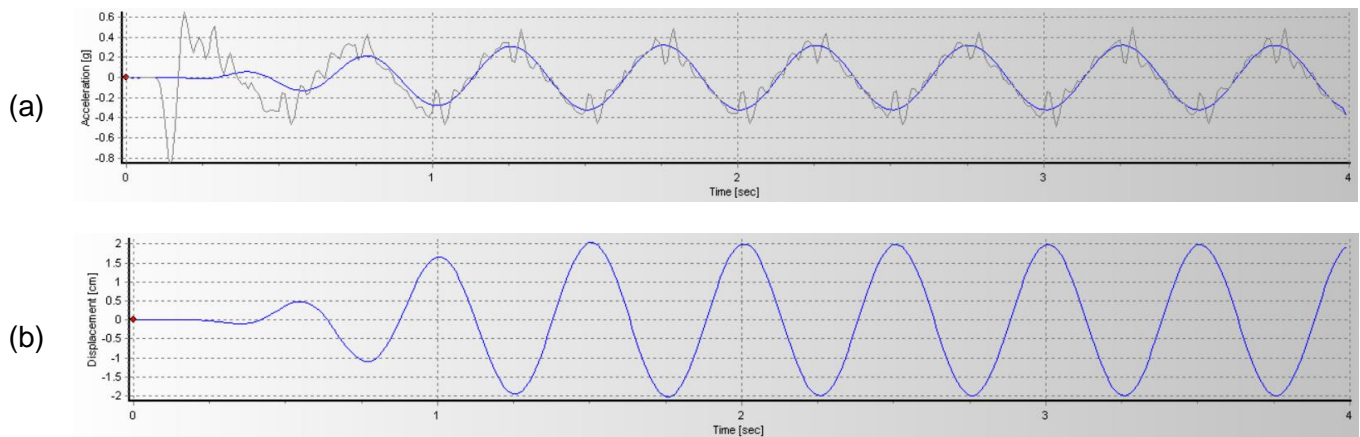


Figura 53 (a) Acelerograma corregido del ensayo 3 (2Hz) corona; (b) Deformación

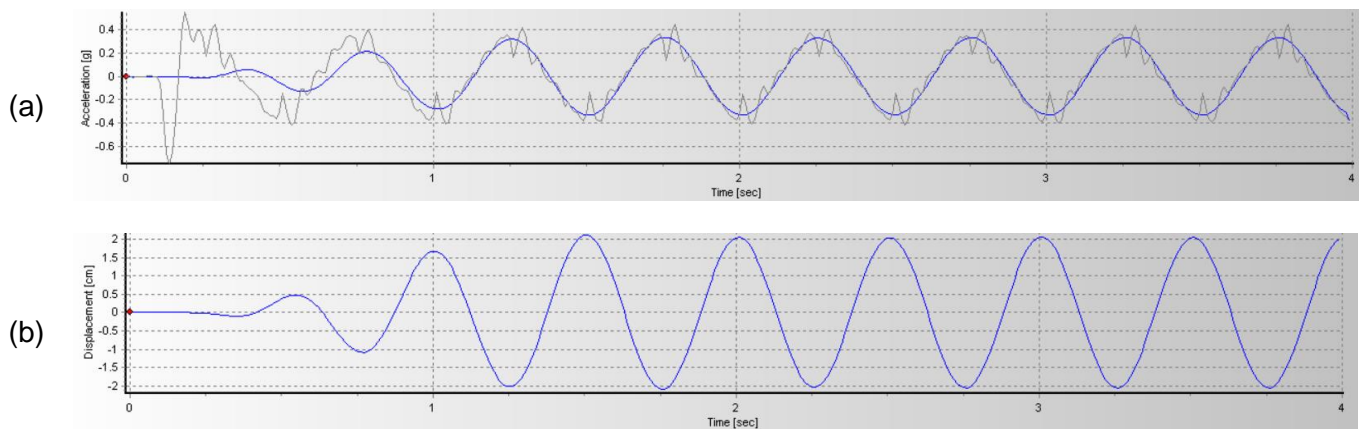


Figura 54 (a) Acelerograma corregido del ensayo 3 (2Hz) medio; (b) Deformación

La deformación máxima en la corona y el punto medio fueron de 2.04cm y 2.12cm respectivamente.

Tabla 23 Deformaciones absolutas por SeismoSignal ensayo 3 (2Hz)

Ensayo 3 (2Hz)	Corona	Medio
Tiempo (s)	3.29	3.79
Aceleración máxima (g)	0.50	0.44
Deformación (cm)	1.83192	1.88602

3.4 Comportamiento sísmico del talud virtual

3.4.1 Superficies de falla y factor de seguridad

Se modeló el talud en el software de Slide con las propiedades del suelo previamente determinadas en el capítulo 3.1. Se tomó un mínimo de 25 dovelas con un máximo de 50 iteraciones y una tolerancia del 0.005 para cada ensayo. La malla es de 0.62x0.55 metros con 200 intervalos en cada dirección.

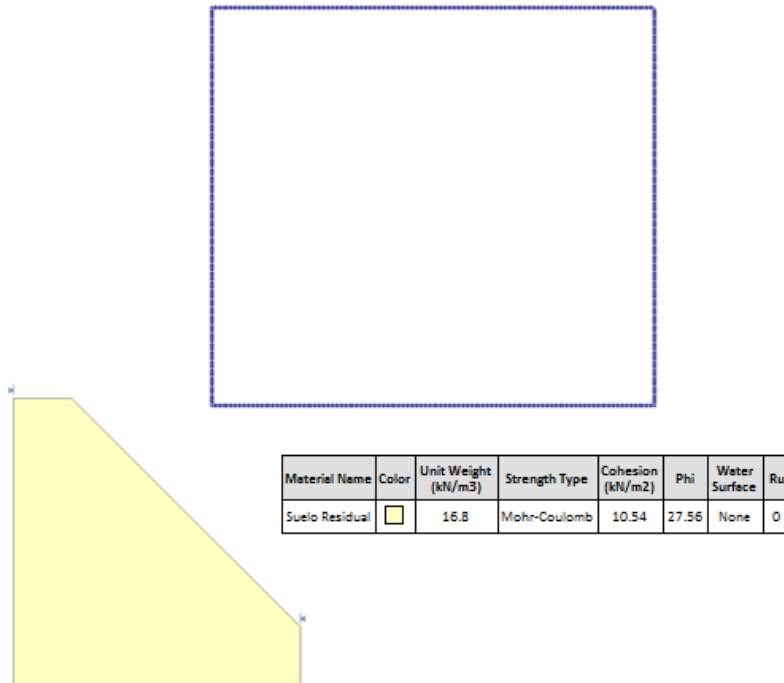


Figura 55 Modelación del talud en Slide

Se determinó los factores de seguridad en condiciones estáticas con los métodos de Spencer y Morgenstern-Price.

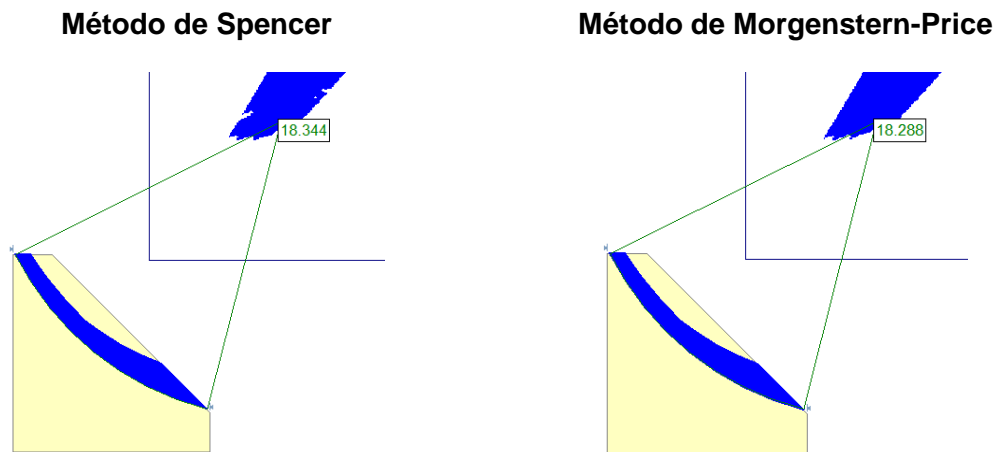


Figura 56 Factor de seguridad del talud en condiciones estáticas

Tabla 24 Resumen de aceleraciones máximas con frecuencia de 1Hz

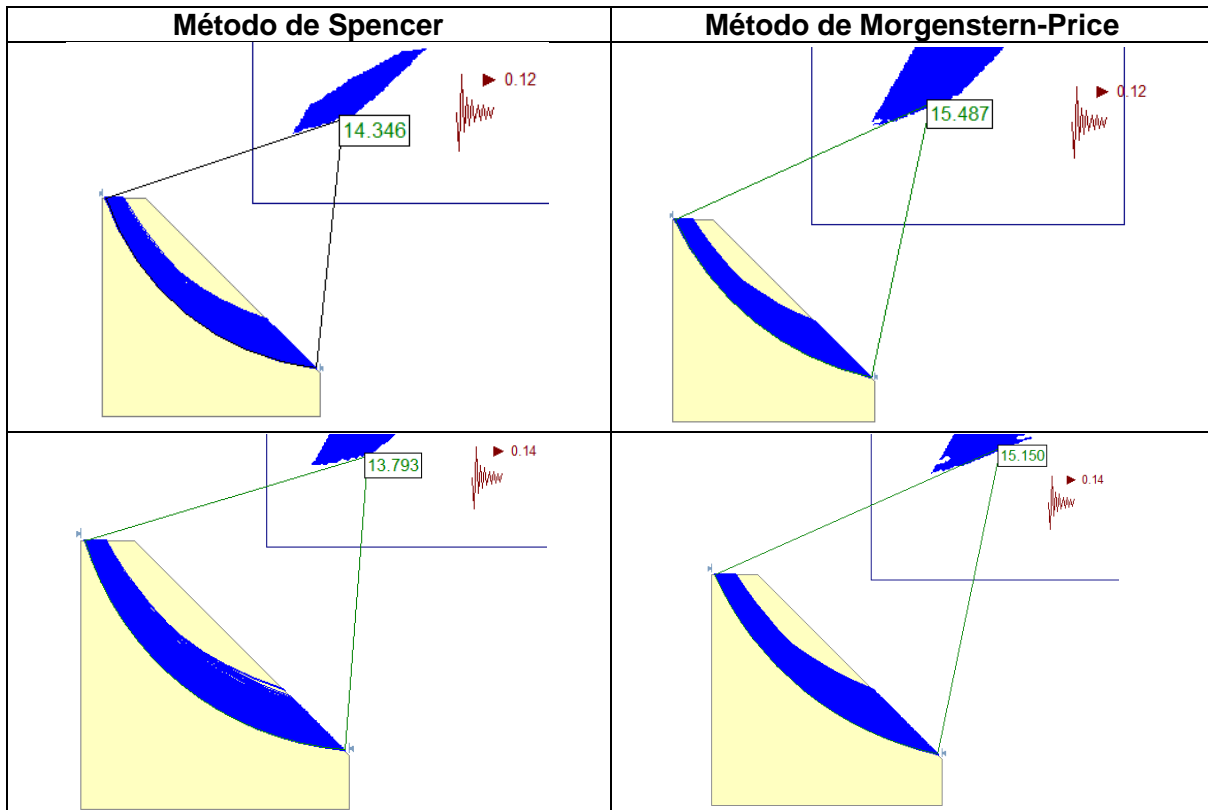
Frecuencia = 1 Hz			
Resumen	Aceleración máxima en la corona (g)	Aceleración máxima en el medio (g)	Aceleración máxima en la base (g)
Ensayo 1	0.19	0.15	0.12
Ensayo 2	0.18	0.14	0.14
Ensayo 3	0.18	0.16	0.12

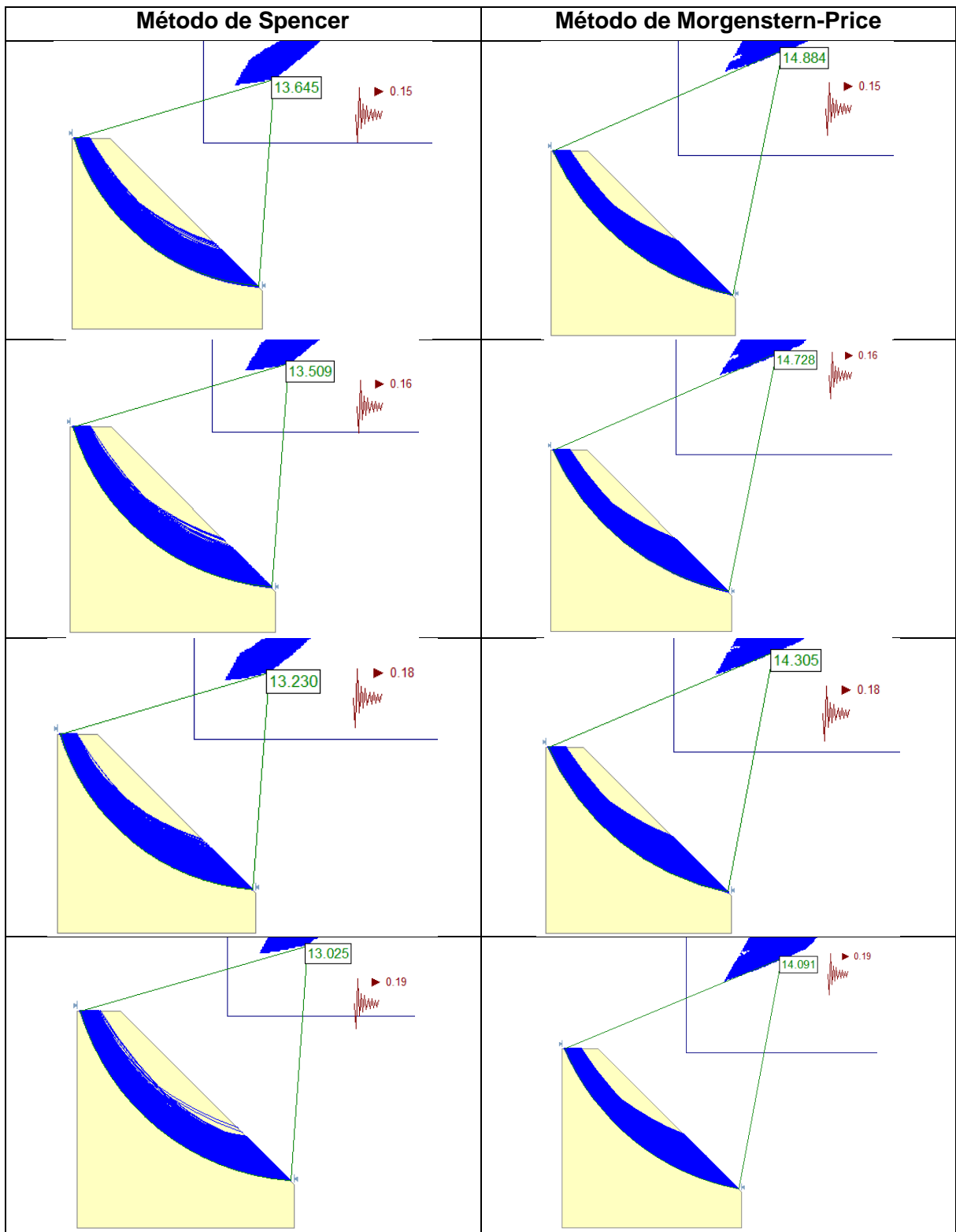
Tabla 25 Resumen de aceleraciones máximas con frecuencia de 2Hz

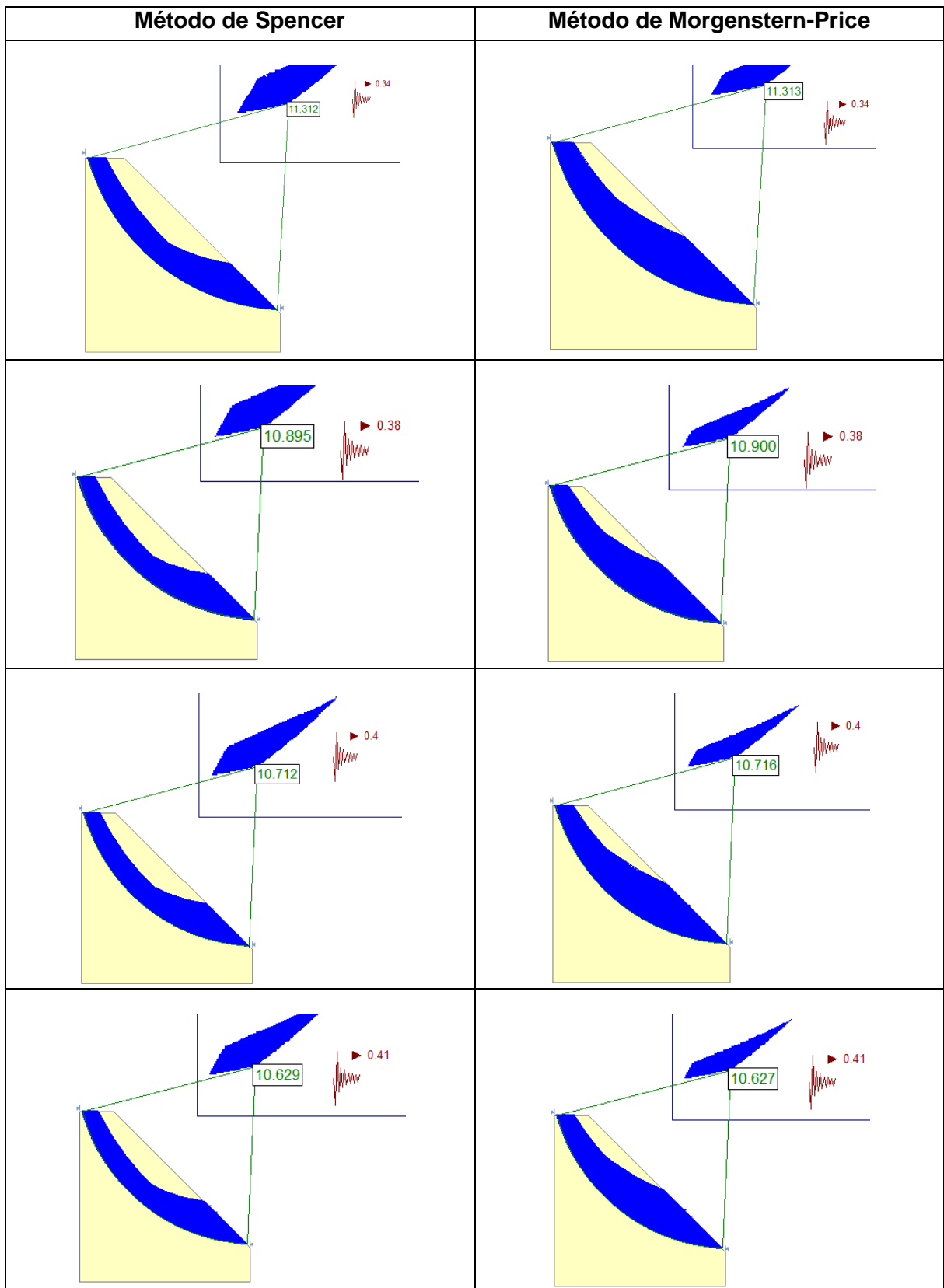
Frecuencia = 2 Hz			
Resumen	Aceleración máxima en la corona (g)	Aceleración máxima en el medio (g)	Aceleración máxima en la base (g)
Ensayo 1	0.53	0.38	0.43
Ensayo 2	0.46	0.40	0.41
Ensayo 3	0.50	0.44	0.34

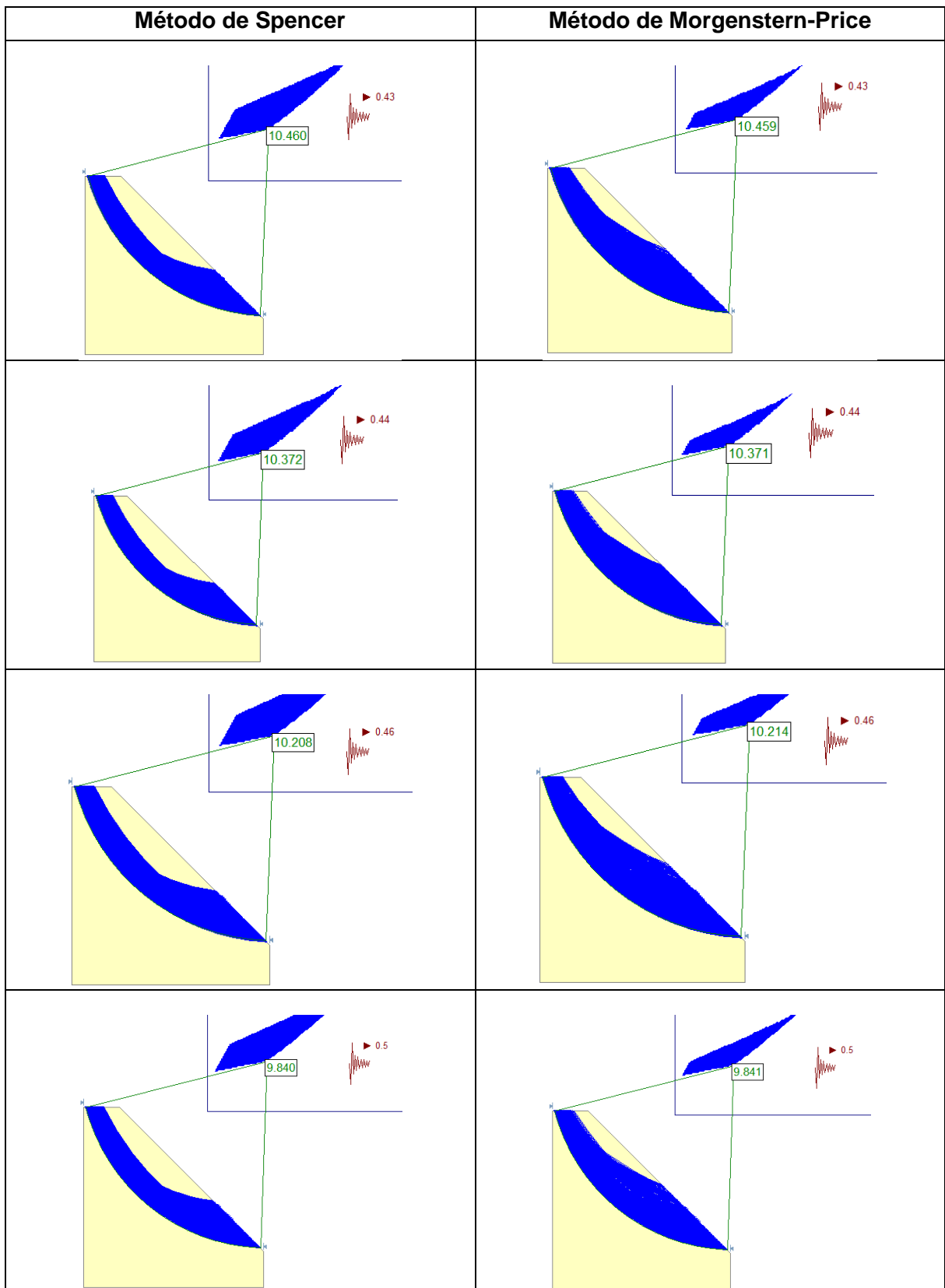
Se determinó el factor de seguridad del talud ingresando cada una de las aceleraciones máximas registradas en los ensayos con frecuencia de 1Hz y 2Hz.

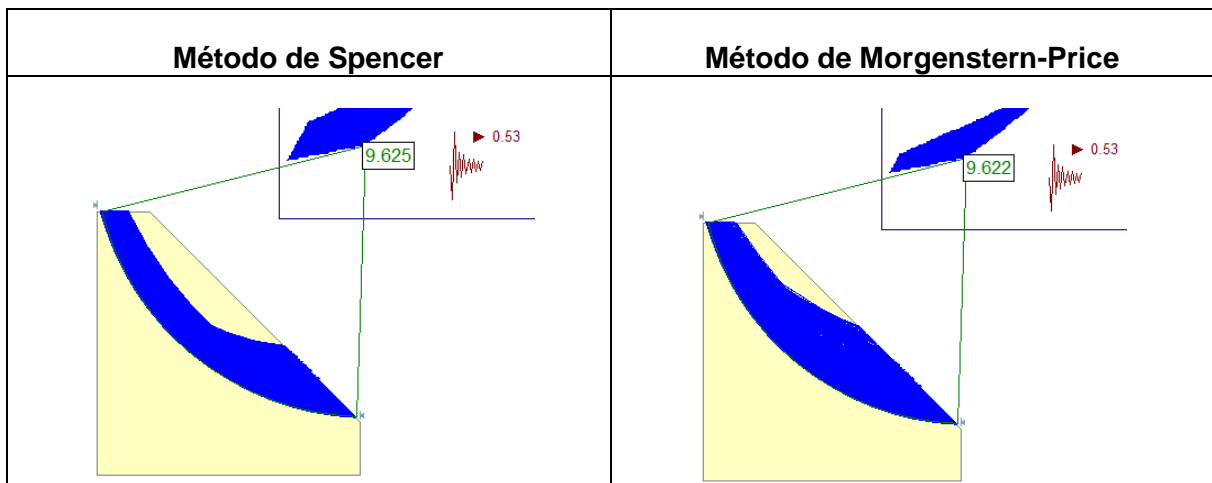
Tabla 26 Superficies de falla y factores de seguridad en condiciones sísmicas











La (Asociación Colombiana de ingeniería sísmica, 2010) establece un factor de seguridad mínimo para taludes de 1.5. El factor de seguridad obtenido está muy por encima del mínimo exigido por la norma, sin embargo se puede observar que el factor de seguridad es muy sensible a la aceleración que se le imponga.

Tabla 27 Reducción de factores de seguridad

Aceleración (g)	Factor de seguridad		Reducción (%)	
	Spencer	Morgenstern-Price	Spencer	Morgenstern-Price
0	18.344	18.288	0%	0%
0.12	14.346	15.487	22%	15%
0.14	13.793	15.15	25%	17%
0.15	13.645	14.884	26%	19%
0.16	13.509	14.728	26%	19%
0.18	13.23	14.305	28%	22%
0.19	13.025	14.091	29%	23%
0.34	11.312	11.313	38%	38%
0.38	10.895	10.9	41%	40%
0.40	10.712	10.716	42%	41%
0.41	10.629	10.627	42%	42%
0.43	10.46	10.459	43%	43%
0.44	10.372	10.371	43%	43%
0.46	10.208	10.214	44%	44%
0.50	9.84	9.841	46%	46%
0.53	9.625	9.622	48%	47%

La reducción de los factores de seguridad depende del método usado, se observa que la variación en la aceleración tiene más impacto en el método de Spencer cuando esta es menor a 0.2g, sin embargo a medida que la aceleración incrementa la reducción en el factor

de seguridad entre ambos métodos es casi la misma, alcanzando una reducción hasta del 48% para una aceleración de 0.53g.

3.4.2 Deformaciones

Se exportó el modelo de Slide al software Phase 2, y se agregaron los parámetros adicionales que exige el programa.

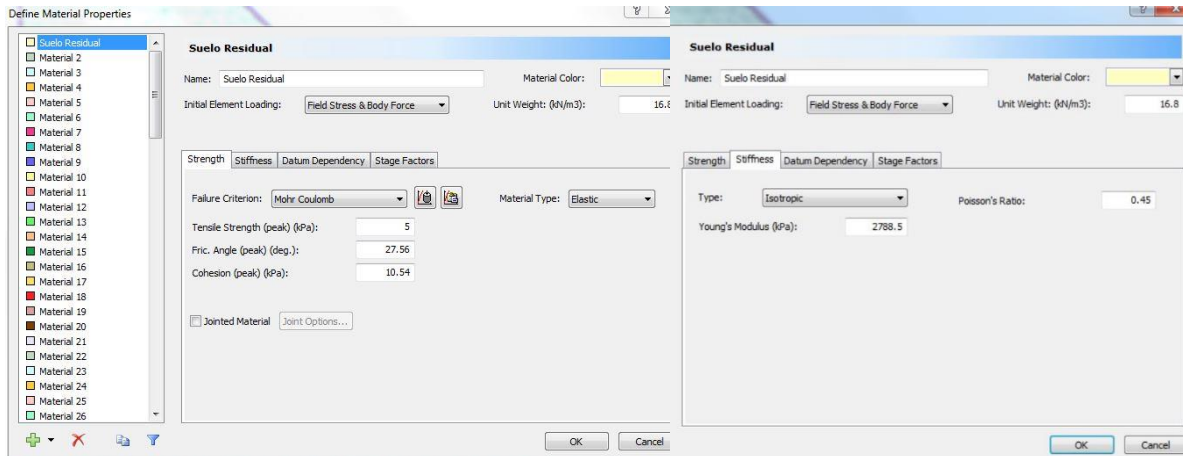


Figura 57 Propiedades del suelo en Phase 2

Se utilizó como el material de tipo elástico ya que el talud no falló

Como el ensayo 1 se realizó con restricciones diferentes a los ensayos posteriores, su modelación se elaboró aparte con las respectivas condiciones y aceleraciones registradas.

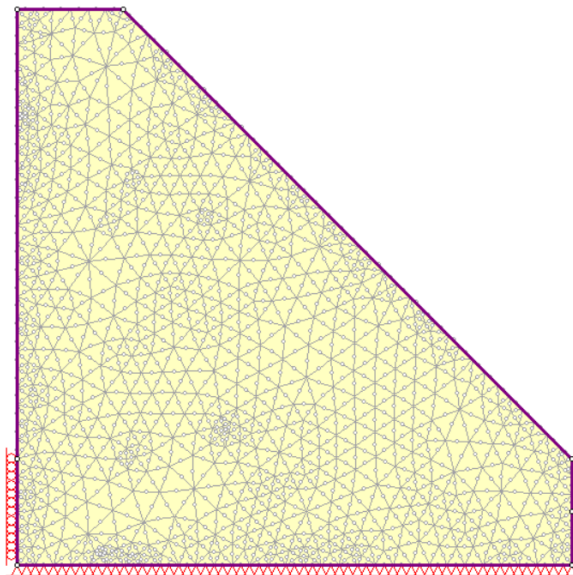
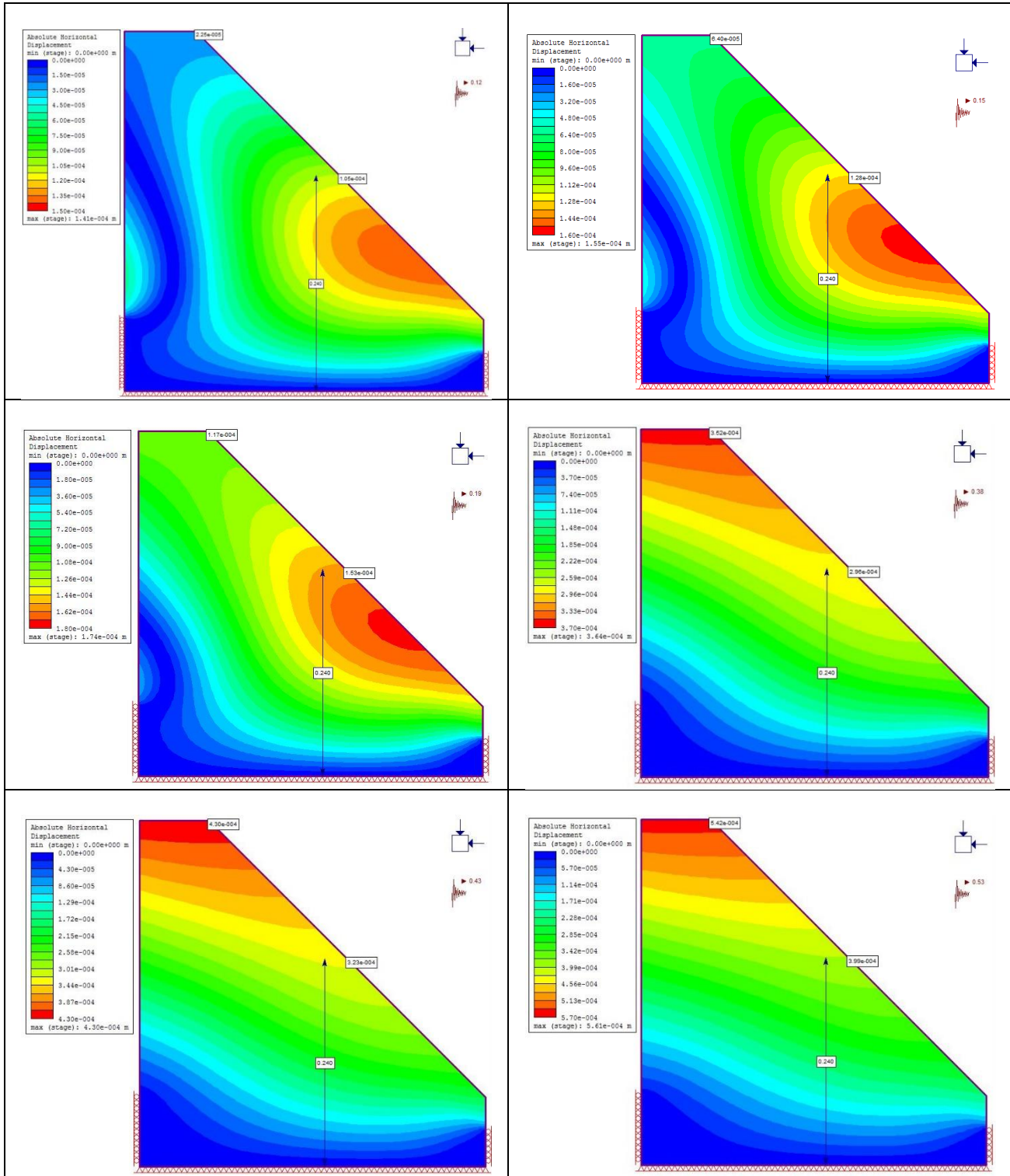


Figura 58 Modelo del ensayo 1 talud en Phase 2.0

Tabla 28 Deformaciones ensayo 1 en condiciones sísmicas



Se observa que el talud desarrolla sus mayores deformaciones en su parte superior, esto se debe a que el talud se comporta como una viga empotrada en la base en donde la energía sísmica se disipa a través de su altura, alcanzando las máximas derivadas en su parte superior. Las deformaciones obtenidas por el Phase 2 son pequeñas, lo cual explica el por qué el talud no fallo en esas condiciones y posee un factor de seguridad alto.

El segundo y tercer modelo se simuló restringido en toda la altura, con el fin de simular las restricciones generadas por el molde de madera con que se extrajo el talud.

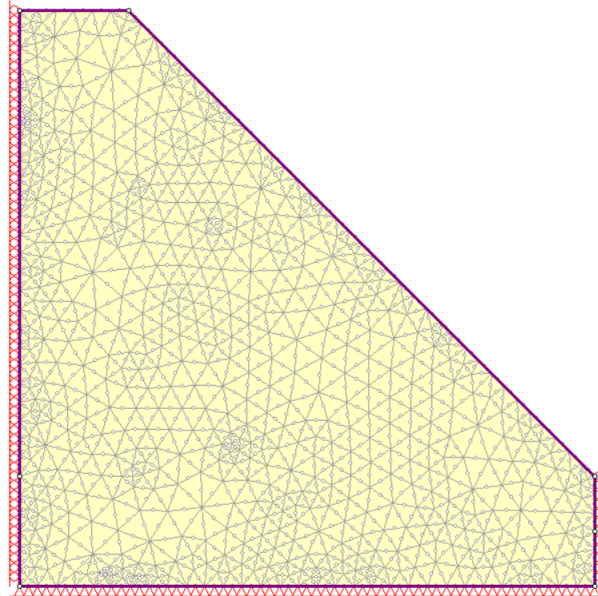
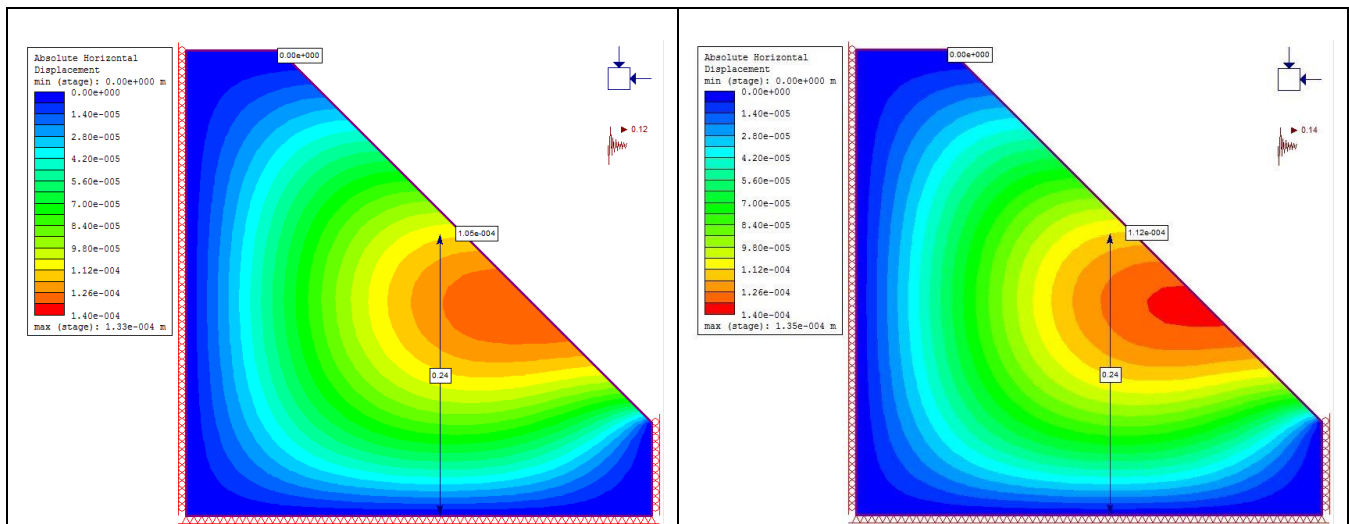
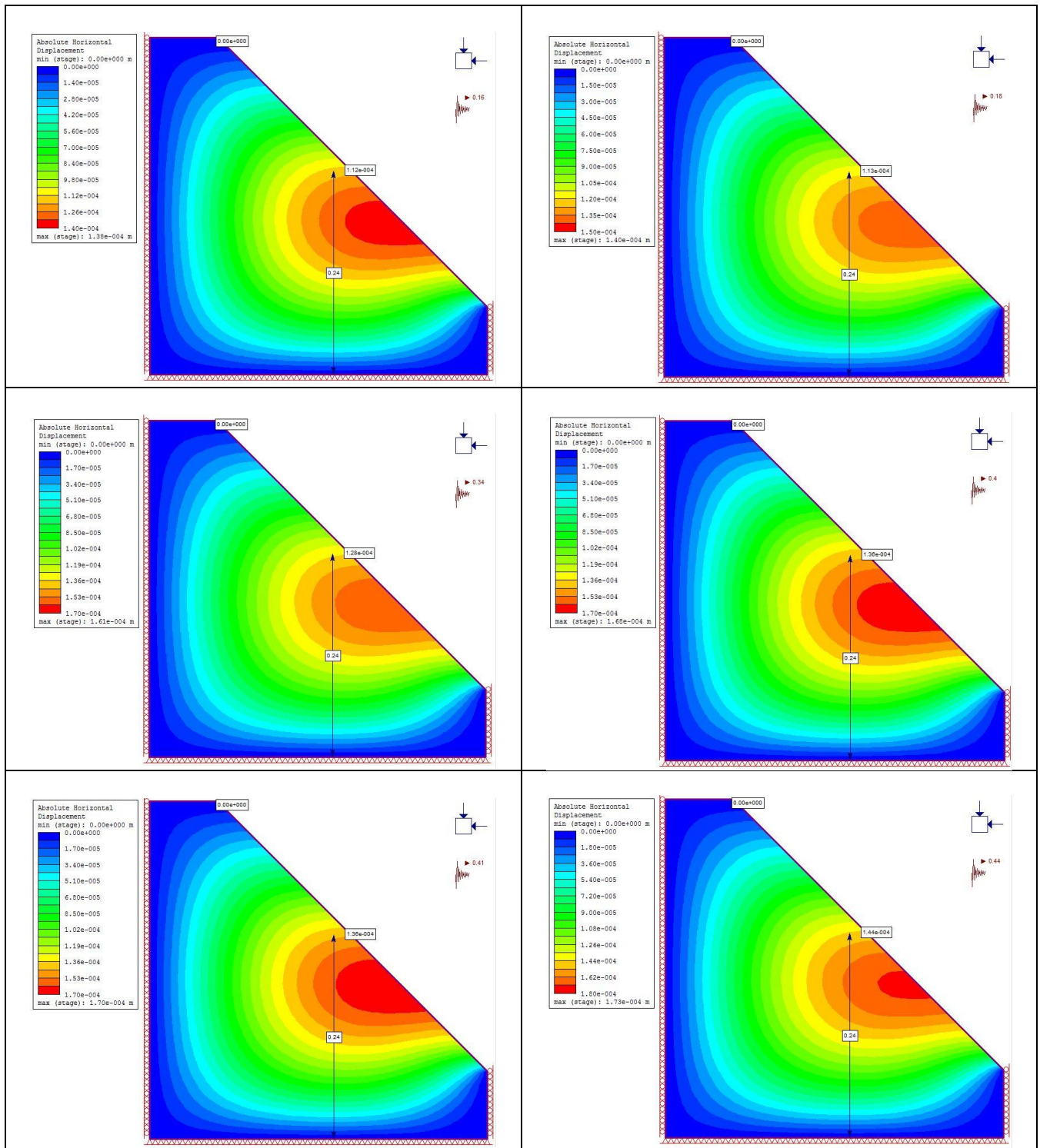
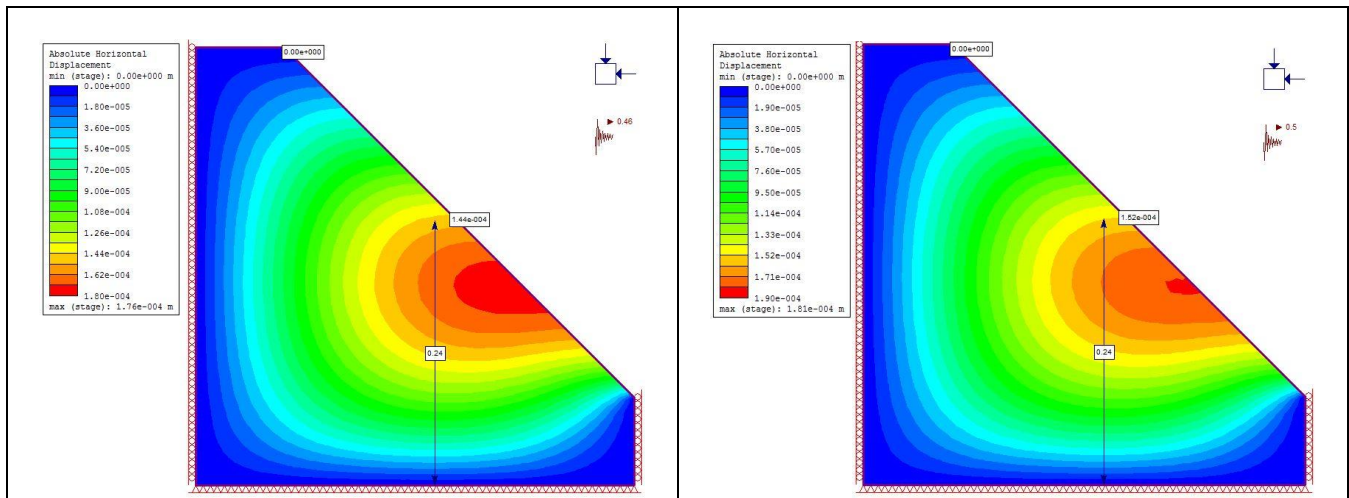


Figura 59 Modelo de ensayos 2 y 3 talud en Phase 2.0

Tabla 29 Deformaciones ensayos 2 y 3 en condiciones sísmicas







Se observa que las deformaciones obtenidas son mayores siempre en el punto medio del talud, contrario a los resultados obtenidos en el primer ensayo. Esto se debe a que al restringir la parte superior del talud, la energía y los esfuerzos producidos por el sismo se concentran en la parte central del talud generando mayores derivas. Además se observa que la mayoría de las deformaciones encontradas son menores que las calculadas en el primer ensayo debido al cambio en sus restricciones y por ende la falla del talud no era probable.

3.5 Comparación de resultados

Como se mencionó en el capítulo 3.3.1.2, se realizó un ensayo con una frecuencia de 4 Hz y como resultado el talud fallo por falta de confinamiento en su parte trasera.

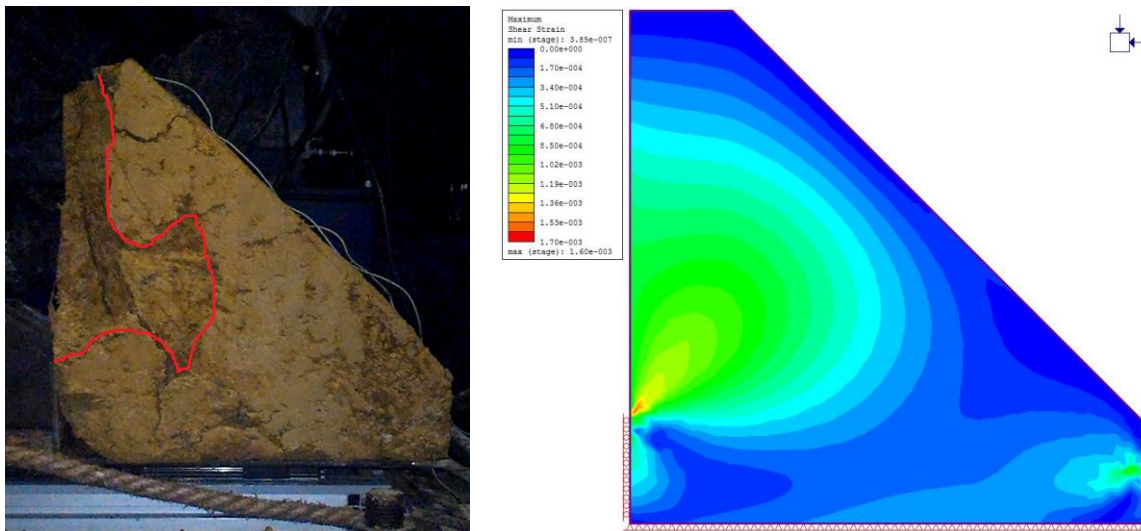


Figura 60 Falla por falta de confinamiento en el talud físico y el modelo de Phase

Se puede observar que los esfuerzos cortantes máximos en el modelo de Phase con las mismas restricciones indican una falla similar a la obtenida con el modelo físico.

Tabla 30 Resumen deformaciones teóricas (Phase 2) y experimentales (SeismoSignal)

Ensayo 1							
Frecuencia (Hz)	Aceleración (g)	Deformación Phase (cm)		Deformación SeismoSignal (cm)		% Error	
		Corona	Medio	Corona	Medio	Corona	Medio
1	0.15	0.0064	0.0128	-	0.0009	-	93%
	0.19	0.0117	0.0153	0.0012	-	90%	-
2	0.38	0.0352	0.0296	-	1.8043	-	5996%
	0.53	0.0542	0.0399	1.8370	-	3289%	-
Ensayos 2							
Frecuencia (Hz)	Aceleración (g)	Deformación Phase (cm)		Deformación SeismoSignal (cm)		% Error	
		Corona	Medio	Corona	Medio	Corona	Medio
1	0.14	0.0000	0.0112	-	0.02082	-	86%
	0.18	0.0000	0.0113	0.01968	-	-	-
2	0.40	0.0000	0.0136	-	1.91941	-	14013%
	0.46	0.0000	0.0144	1.66844	-	-	-
Ensayos 3							
Frecuencia (Hz)	Aceleración (g)	Deformación Phase (cm)		Deformación SeismoSignal (cm)		% Error	
		Corona	Medio	Corona	Medio	Corona	Medio
1	0.16	0.0000	0.0112	-	0.0829	-	640%
	0.18	0.0000	0.0113	0.08086	-	-	-
2	0.44	0.0000	0.0144	-	1.88602	-	12997%
	0.50	0.0000	0.0152	1.83192	-	-	-

Se puede observar que el comportamiento teórico y experimental es totalmente diferente, mostrando mayor distorsión en los ensayos con frecuencia de 2 Hz. El resultado teórico y experimental muestra deformaciones mínimas en los ensayos con frecuencia de 1 Hz, siendo el teórico menor en los ensayos 2 y 3. Estas deformaciones tienen poco efecto en el talud, mientras que las obtenidas por el SeismoSignal en los ensayos con frecuencia de 2 Hz equivalen a más del 5% de la dimensión de su altura, lo que tiene mayor influencia al generar la falla. Se observa también que no necesariamente a mayor aceleración, hay mayor deformación. Esto se debe a que la deformación depende de parámetros como el tiempo de ocurrencia, frecuencia de excitación, oscilación del talud, entre otras.

La fuerza sísmica es el producto entre la aceleración y la masa potencial al deslizamiento. La masa potencial al deslizamiento es una constante, lo cual indica que el parámetro diferenciador es la aceleración. En los ensayos realizados sometidos a una aceleración determinada un modelo físico y un modelo virtual. Como se observó el capítulo 3.3 la aceleración que se registra en el talud varía según la altura con incrementos significativos con respecto a su base. Además en el capítulo 3.4.1 es notable la sensibilidad que tiene el factor de seguridad al variar aceleración, otorgando reducciones hasta del 48%.

4 Conclusiones y consideraciones finales

4.1 Conclusiones

- Se diseñó el modelo del talud incluyendo la plataforma vibratoria con base en el actuador dinámico que pertenece a la universidad y la mayor cantidad de recursos disponibles en los laboratorios. Se diseñó la plataforma con base en el peso teórico del talud, los desplazamientos máximos posibles en los rieles y la fuerza máxima que ejercía el actuador dinámico.
- Se construyó el talud de dimensiones 0.4x0.4x0.4 con inclinación de 45° con base en la capacidad de carga de los patines y con la consideración de que el transporte y extracción del mismo era manual, como se explica en el capítulo 2.3.1 y 2.3.3, e instrumento de acuerdo al capítulo 2.3.4.
- La fuerza sísmica utilizada por los métodos de equilibrio limite parte de que el talud experimenta una única aceleración horizontal en toda su estructura variando únicamente con la masa de cada dovela, sin embargo la fuerza sísmica resultante es una constante aplicada en el centro de gravedad de la masa potencial de deslizamiento
- Se encontró que la aceleración inducida en el talud incrementa en su altura, por ende al ser la fuerza sísmica el producto entre una masa y una aceleración en cada dovela, esta también incrementa y varía con la altura. Lo que implica que la fuerza sísmica resultante no necesariamente esta aplicada en el centro de gravedad de la masa potencial al deslizamiento y que el factor de seguridad al que se diseña tenga reducciones considerables.
- Se encontró que el comportamiento del modelo teórico y experimental en su rango elástico son similares pero en magnitudes totalmente diferentes. El modelo teórico dio como resultados deformaciones más pequeñas que las obtenidas por el modelo físico. También se halló que la deriva máxima del talud no se genera necesariamente en el pico de aceleración del sismo, sino que de esta depende otros factores.

4.2 Consideraciones

Con el fin de disminuir las distorsiones en la lectura de los acelerómetros, se recomienda realizar los ensayos en lugares silenciosos para evitar el registro de ruidos electromagnéticos. Es recomendable evitar estar cerca de agentes externos que produzcan vibraciones fuertes.

Se recomienda dimensionar el modelo físico con base en un modelo virtual que tenga un factor de seguridad menor de 1, con el fin de garantizar la falla y estudiar el comportamiento del talud en su rango plástico.

5 Referencias

- Asociación Colombiana de ingeniería sísmica. (2010). Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. *NSR-10*. Colombia.
- Blight, G. (2012). Origin and formation of residual soils. En G. Blight, & E. C. Leong, *Mechanics of residual soils* (págs. 1-27).
- Calderón, C. E., & Hoyos, L. F. (2011). *Metodología para la Evaluación de Riesgo en Corredores Viales*. Bogota D.C.
- Czelada, J. A. (2009). *Medición del módulo de Young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas*. Buenos Aires.
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. Wiley.
- Dutary, E. L. (2012). *INFLUENCIA DEL CONTENIDO FRECUENCIAL DE ONDAS SISMICAS EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES*. Trabajo de Grado, universidad Javeriana, Facultad de ingeniería, Bogota.
- Hack, R., Alkema, D., Kruse, G. A., Leenders, N., & Luzi, L. (2007). Influence of earthquakes on the stability of slopes. *Engineering Geology*, 4-15.
- Hidalgo, C., & Assis, A. (2011). *Evaluación de la incertidumbre en el análisis de estabilidad de un talud excavado en suelos residuales*. Universidad de Medellín, Universidad de Brasilia.
- I.N.V. E – 125 – 07. (s.f.). *Determinación del límite líquido de los suelos*.
- I.N.V. E – 126 – 07. (s.f.). *Límite plástico e índice de plasticidad de suelos*.
- I.N.V. E – 154 – 07. (s.f.). *Determinación de la resistencia al corte método de corte directo (CD) (consolidado drenado)*.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Washington: Prentice Hall.
- Leoni, A. J. (28 de 10 de 2016). Parametrización de suelos. 27-40. Obtenido de http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Cap%C3%ADtulo%20_Parametrizaci%C3%B3n%20de%20suelos.pdf
- López, M. J., & Morales, L. D. (2003). Estimación de la amenaza y el riesgo de deslizamientos en laderas.
- M. Sabnis , G., & G. Harris, H. (1999). *Estructural modeling and experimental techniques*. CRC Press.
- Matteis, Á. (2003). Geología y Geotecnia. *Estabilidad de taludes*. Universidad Nacional de Rosario.

Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (s.f.). *The analysis of the stability of general slip surfaces*.

Olson, R. E. (1989). Direct shear testing. *Advanced geotechnical laboratory*, 14.

Sepúlveda Barraza, A. (2011). *Comportamiento sísmico de taludes de roca*. Tesis maestría, Universidad Politécnica de Madrid.

Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Publicaciones UIS.

Suárez Díaz, J. (2009). *Deslizamientos, Análisis Geotécnico*. Bucaramanga: Publicaciones UIS.

Terzaghi, K. (1950). *Mechanism of Landslides*. Harvard University, Department of Engineering.