

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DINÁMICO SOBRE LA ESTABILIDAD DE UN
TALUD POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**JOSE EDUARDO RIVERA LAITON
RODOLFO OSWALDO VILLAMIZAR SALAZAR**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACUTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DINÁMICO SOBRE LA ESTABILIDAD DE UN
TALUD POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**JOSE EDUARDO RIVERA LAITON
RODOLFO OSWALDO VILLAMIZAR SALAZAR**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

**Director
HEBENLY CELIS LEGUIZAMO
I.C., M.I.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACUTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2013

"Desafortunadamente, los suelos se fabricaron por la naturaleza y no por el hombre, y los productos de la naturaleza son siempre complejos... Tan pronto como se pasa del acero y el concreto al suelo, la omnipotencia de la teoría deja de existir. El suelo natural nunca es uniforme. Sus propiedades cambian de punto a punto, mientras que nuestro conocimiento de sus propiedades se limita a los pocos sitios en que las muestras han sido recogidas. En la mecánica de suelos la exactitud de los resultados calculados nunca supera a la de una estimación aproximada, y la función principal de la teoría consiste en que nos enseña qué y cómo observar en el campo."

Karl Terzaghi

DEDICATORIA

A mi padre que siempre ha sido un amigo y ha depositado toda su confianza y fe en mí y mis capacidades para poder culminar esta etapa.

A mi hermana porque fue el principal motivo para alcanzar esta meta y siempre ha conseguido robarme una sonrisa cuando más la necesite.

A mi madre en especial porque siempre luché incansablemente para que fuera posible la materialización de este sueño. Por todo su apoyo, su comprensión, su paciencia y porque ha sido el mejor ejemplo a seguir en todos estos años. Siempre estaré muy agradecido y orgulloso de ser su hijo.

A los demás miembros de mi familia, tíos, primos y abuelos que siempre creyeron en este proceso y supieron brindarme palabras de aliento en los momentos más difíciles.

JOSE EDUARDO RIVERA LAITON

DEDICATORIA

A mi madre Gladys Mercedes Salazar Melgarejo, y a mi padre Pedro Alfonso Villamizar Acevedo, por su cariño apoyo y sacrificio.

Rodolfo Oswaldo Villamizar Salazar

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander que ha sido nuestro segundo hogar durante toda la carrera, a la Escuela de Ingeniería Civil y los docentes que en todo este tiempo se esforzaron por formar personas integra y con la mentalidad de brindar el mejor servicio para la sociedad.

A la Msc. Hebenly Celis Leguizamo por su amable colaboración, orientándonos y compartiendo todos sus conocimientos para enriquecer este trabajo de investigación. Para ella los mejores deseos y muchos éxitos en su vida.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	20
OBJETIVO GENERAL	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1. MODELADO DEL PROBLEMA	21
1.1 ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL PROBLEMA	21
1.2 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE PLAXIS	22
1.3 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE GEOSTUDIO	23
1.4 PROCESO DE MODELADO EN <i>PLAXIS</i>	24
1.4.1 Geometría	24
1.4.2 Estratificación y propiedades de los materiales	24
1.4.3 Configuración general	25
1.4.4 Modelo geométrico	26
1.4.5 Cargas externas y condiciones de contorno	26
1.4.6 Malla de elementos finitos	28
1.4.7 Condiciones iniciales	28
1.4.8 Cargas dinámicas	28
1.5 PROCESO DE MODELADO EN GEOSTUDIO	29
1.5.1 Configuración general	29
1.5.2 Modelo geométrico	30
1.5.3 Propiedades de los materiales	31
1.5.4 Cargas externas y condiciones de contorno	32
2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS	34
2.1 PARÁMETROS FÍSICOS Y ELASTOPLÁSTICOS	34
2.1.1 Ensayo de penetración estándar	34

2.1.2 Software <i>Dynamic</i>	34
2.2 PARÁMETROS DE RESISTENCIA	35
2.2.1 Ensayo de corte directo	36
2.2.2 Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT	36
3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	39
3.1 ANÁLISIS ESTÁTICO DE ESTABILIDAD	39
3.2 ANÁLISIS DINÁMICO DE ESTABILIDAD	43
4. LICUEFACCIÓN	46
4.1 COEFICIENTE DE ESFUERZOS	46
4.2 ZONAS DE POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN	48
4.3 EXCESOS EN LA PRESIÓN DE POROS	49
4.4 DESLIZAMIENTOS POR LICUEFACCIÓN	51
5. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFIA	56
ANEXOS	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Perfil tipo a modelar	24
Figura 2. Estratificación del terreno	25
Figura 3 Condiciones de contorno del modelo geométrico	27
Figura 4. Malla de elementos finitos del modelo geotécnico	28
Figura 5. Configuración inicial del modelo	29
Figura 6. Configuración total del modelo	30
Figura 7. Propiedades de los materiales en Slope/W	31
Figura 8. Propiedades de los materiales en Quake/W	32
Figura 9. Condiciones de frontera, presión de agua	33
Figura 10. Factor de seguridad y superficie de falla del perfil en estado natural, sin ningún tipo de intervención	40
Figura 11. Obras de contención propuestas	41
Figura 12. Factor de seguridad y superficie de falla del perfil con obras de contención	41
Figura 13. Acelerograma utilizado para el análisis sísmico del modelo	43
Figura 14. Puntos de análisis del espectro elástico de respuesta	44
Figura 15. Espectro de respuesta del talud (Punto 1)	45
Figura 16. Espectro de respuesta del talud (Punto 2)	45
Figura 17. Espectro de respuesta del talud (Punto 3)	45
Figura 18. Trayectoria por esfuerzo cíclico del punto B a la superficie de colapso.	47
Figura 19. Relación q/p' para el estado inicial	48
Figura 20. Relación q/p' para el estado inicial del talud solo arena	48
Figura 21. Zonas potencialmente licuables	49
Figura 22. Zonas potencialmente licuables	49

Figura 23. Excesos en la presión de poros, sismo magnitud 3.9	50
Figura 24. Excesos en la presión de poros, sismo magnitud 6.4	50
Figura 25. Exceso de presión de poros, sismo magnitud 3.9	50
Figura 26. Exceso de presión de poros, sismo magnitud 6.4	51
Figura 27. Superficie de licuefacción y zonas potencialmente licuables, sismo magnitud 3.9	52
Figura 28. Superficie de licuefacción y zonas potencialmente licuables, sismo magnitud 6.4	52
Figura 29. Exceso de presión de poros, sismo magnitud 3.9	52
Figura 30. Exceso de presión de poros, sismo magnitud 6.4	53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros geotécnicos por estrato	25
Tabla 2 Tabla comparativa: escenario natural versus estabilizado con obras (caso estático)	42
Tabla 3 Tabla comparativa: escenario variación del nivel del río (caso estático con obras de estabilización)	42

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Resultados del modelo del sondeo 1 con el programa Dynamic	57
ANEXO B. Resultados del modelo del sondeo 2 con el programa Dynamic	61
ANEXO C. Regresión lineal para el cálculo de parámetros efectivos estrato 1	64
ANEXO D. Regresión lineal para el cálculo de parámetros efectivos estrato 2	65
ANEXO E. Regresión lineal para el cálculo de parámetros efectivos estrato 3	66
ANEXO F. Regresión lineal para el cálculo de parámetros efectivos estrato 6	67

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DINÁMICO SOBRE LA ESTABILIDAD DE UN TALUD POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS*

AUTORES: JOSE EDUARDO RIVERA LAITON**
RODOLFO OSWALDO VILLAMIZAR SALAZAR

PALABRAS CLAVE: Geotecnia, estabilidad de taludes, mecánica de suelos, sismología, modelos matemáticos, licuefacción, obras de mitigación, protección civil.

DESCRIPCIÓN

En el presente artículo de investigación se realizó el análisis de estabilidad estático y dinámico de un talud típico de las zonas ribereñas colombianas, conformado principalmente por suelo aluvial arcilloso y sometido a problemas de erosión e inestabilidad asociados a la dinámica fluvial de un río adyacente. Para el desarrollo del análisis se plantean los escenarios estático y dinámico con y sin obras de estabilización y dos escenarios adicionales donde se tiene en cuenta la variación del nivel de agua del río. Se presenta la metodología llevada a cabo por los autores para el desarrollo de los modelos geotécnicos y los análisis realizados con estos (considerando eventos sísmicos de diferentes magnitudes) que condujeron a la determinación de las posibles zonas de licuefacción, el espectro dinámico de respuesta, y los factores de seguridad asociados a este fenómeno. Como parte del análisis, se incluyó la determinación de los parámetros de resistencia y de la estructura estratigráfica del suelo a partir de un estudio de exploración geotécnica (ensayos de penetración estándar y sondeos eléctricos verticales, que son presentados dentro de los anexos). Los escenarios estático y dinámico con y sin obras de mitigación del análisis fueron modelados utilizando el método de elementos finitos, para esto se emplearon dos programas computacionales muy conocidos en la rama de la geotecnia: Plaxis y Geostudio, con lo que fue posible plantear las principales diferencias en el proceso de modelación y la eficiencia de cada software al realizar cada uno de los análisis, finalmente fueron comparados los resultados obtenidos por medio de tablas y gráficas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones. Director: HEBENLY CELIS LEGUIZAMO, I.C., M.I.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE DYNAMIC EFFECT ON THE STABILITY OF A SLOP BY FINITE ELEMENT METHOD*

AUTHORS: JOSE EDUARDO RIVERA LAITON**
RODOLFO OSWALDO VILLAMIZAR SALAZAR

KEYWORDS: Geotechnical, slope stability, soil mechanics, seismology, mathematical models, liquefaction, mitigation works, civil protection.

DESCRIPTION

In this research article was performed the static and dynamic stability analysis of a typical slope from a Colombian riparian area, composed mainly of alluvial clay soils subjected to erosion and instability problems because of fluvial dynamics associated to an adjacent river. For development of the analysis, were proposed static and dynamic scenarios with and without stabilization works and two additional scenarios which takes into account the variation of the water level of the river. It presents the methodology carried out by the authors for the development of geotechnical models and analysis performed with these (considering seismic events of different magnitudes) which led to identification of potential liquefaction areas, acceleration response spectrum, and safety factors associated with this phenomenon. As part of the analysis was included determination of strength parameters and soil stratigraphy from a geotechnical exploration (standard penetration tests and vertical electrical sounding, both are presented in Annexes). Static and dynamic scenarios with and without mitigation works were modeled using the finite element method, for it were used two different computer software well known in the field of geotechnics: Plaxis and GeoStudio, with which was possible to see the main differences in the modeling process and the efficiency of each software to perform each of the analyzes. Finally the results were compared by means of tables and graphs.

* Degree work

** School of Physics and Mechanical Engineering, School of Electrical Electronics and Telecommunications. Directed HEBENLY LEGUIZAMO CELIS, C. I., M.I.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, los desastres naturales han cobrado un gran número de vidas humanas y, por supuesto, enormes pérdidas materiales. Dichos desastres son ocasionados por fenómenos naturales como: tornados, tsunamis, sismos de gran intensidad, incendios forestales, entre otros.

En el caso de Colombia, su ubicación en el cinturón de fuego del Pacífico, y el hecho de encontrarse sobre dos áreas de fricción importantes, la zona de subducción de la placa de Nazca con la placa Sudamericana y la placa Sudamericana con la placa del Caribe, han generado una problemática de mucho cuidado para la ingeniería civil. La geotecnia, en especial la estabilidad de taludes se ha visto seriamente afectada por fenómenos sísmicos que han terminado provocando grandes deslizamientos.

Por otra parte el efecto que producen las ondas de corte que se propagan durante un sismo puede llegar a generar uno de los fenómenos más interesantes y complejos de la ingeniería geotécnica: la licuefacción. Este fenómeno se presenta cuando por efecto de la carga cíclica aumenta la presión de poros y se reduce a cero la resistencia del suelo a los esfuerzos cortantes, provocando que éste se comporte como un líquido viscoso.

El presente artículo tiene por objeto realizar el análisis de estabilidad estático y dinámico de un talud tipo de la región, y estudiar el fenómeno de licuefacción para determinar el comportamiento de la presión de poros durante determinados eventos sísmicos. Para todos estos estudios se utilizaran dos programas cuya base es el método de elementos finitos y que son muy conocidos en el ámbito de la geotecnia, GeoStudio y Plaxis.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar y analizar el efecto dinámico de estabilidad de un talud por el método de elementos finitos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir del análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos:

- Determinar los excesos de presión de poros en el talud debido a la acción sísmica.
- Examinar el comportamiento de los taludes antes y después del sismo.
- Analizar la deformación permanente del talud y las posibles zonas de licuefacción desarrolladas como resultado de la aplicación del sismo de diseño.
- Comparar los resultados obtenidos por medio de dos programas diferentes.

1. MODELADO DEL PROBLEMA

El análisis de estabilidad (estático y dinámico), se llevó a cabo por medio de un modelo geotécnico, que representa fielmente las características físicas del terreno natural, haciendo uso de dos programas de computador (*Geostudio* y *Plaxis*), con los cuales se hace un estudio independiente del problema, se verifican las diferentes condiciones de estabilidad y se realizan las comparaciones pertinentes.

El modelo fue realizado a partir del análisis de tres escenarios particulares: en primer lugar el suelo en estado natural sin ningún tipo de fuerza externa actuante; el siguiente corresponde al mismo suelo, pero con obras de contención, y el tercero aplicando una fuerza sísmica al caso anterior que puede consistir en una pareja de coeficientes de aceleración del suelo o un registro de datos de aceleración (acelerograma).

1.1 ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL PROBLEMA

Lo primero que se debe hacer para representar adecuadamente un problema geotécnico en un modelo matemático es definir los diferentes parámetros que lo caracterizan, por ejemplo la geometría del sitio (topografía), el tipo de suelo, su estratificación, los parámetros de resistencia de cada estrato, la posición del nivel freático, la sismicidad de la zona y los sistemas de fuerzas externas que actúan sobre el suelo.

Después seguir los siguientes pasos para la elaboración del modelo geotécnico:

- Indicar la configuración general.
- Construir la geometría del problema.
- Establecer las condiciones de contorno.

- Asignar las propiedades de los materiales.
- Generar la malla de elementos finitos.
- Precisar las condiciones iniciales.

A continuación se expone el procedimiento llevado a cabo por los autores para generar los modelos geotécnicos.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE PLAXIS

Plaxis es un software empleado para el análisis de aspectos como deformaciones y estabilidad en problemas geotécnicos de distinta naturaleza, haciendo uso del método de elementos finitos [5].

Para el estudio de un problema geotécnico a través de *Plaxis* se grafica la sección transversal del modelo geométrico del problema, de manera sencilla, por medio de un sistema CAD, el cual consiste en un amplio rango de herramientas computacionales que asisten y facilitan el diseño de los modelos en el programa. Acto seguido, mediante una malla de elementos finitos se discretiza el modelo, luego se asignan las condiciones iniciales, se efectúan los cálculos pertinentes y se entregan los reportes provenientes del problema estudiado.

Con la herramienta *Plaxis* es posible estudiar de modelos de problemas de deformación plana o axisimétricos, así como también análisis plásticos, de consolidación, de seguridad y dinámicos. *Plaxis* puede ser empleado para el modelamiento de muros de contención, pilotes, tablestacas, terraplenes, taludes, túneles, geo-mallas, entre otros.

Existen cuatro subprogramas que hacen parte de *Plaxis*, nombrados a continuación:

- *Input* (Entrada)
- *Calculations* (Cálculos)
- *Output* (Resultados)
- *Curves* (Curvas)

1.3 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE GEOSTUDIO

Para comparar y obtener mayor información sobre el fenómeno dinámico se utiliza el software GeoStudio, el cual contiene un conjunto de aplicaciones útiles para el modelamiento de problemas geotécnicos.

Las aplicaciones tenidas en cuenta para la realización de un análisis estático y dinámico de estabilidad de taludes, y para el estudio del efecto producido por la licuefacción fueron:

Slope/W:

Esta aplicación permite el cálculo del factor de seguridad por medio de un análisis de elementos finitos. [7]

Quake/W:

Con esta aplicación es posible realizar análisis dinámicos de estructuras de tierra que son sometidas a la acción de fuerzas sísmicas. De igual manera permite analizar movimientos de tierra, excesos de presión de poros, espectros de respuesta, zonas de potencial de licuefacción, entre otras. [8]

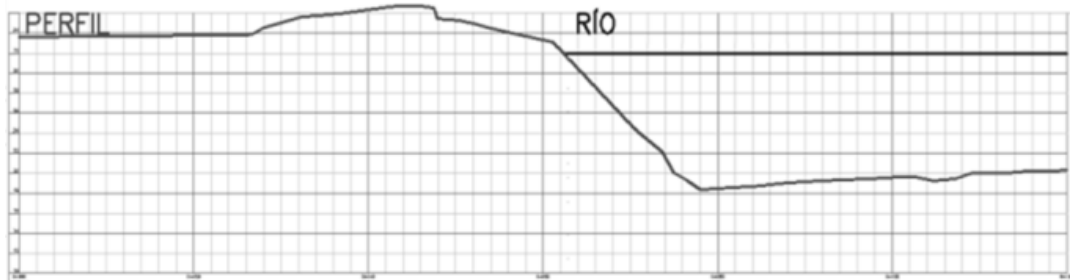
Lo más importante de estas aplicaciones es que permiten trabajar juntas y tomar las características principales de cada una para sacar sus propios análisis. En este caso el modelo en *Slope/W* dependerá del modelo en *Quake/W*.

1.4 PROCESO DE MODELADO EN *PLAXIS*

Se quiere realizar un análisis de estabilidad y potencial de licuefacción de un talud típico de las regiones ribereñas de Colombia, para esto se va a elaborar un modelo geotécnico en el software *Plaxis*, esta sección describe el procedimiento mediante el cual se elabora dicho modelo.

1.4.1 Geometría. A partir de un plano topográfico, se genera un perfil de la zona de estudio, como el que se muestra en la figura 1.

Figura 1 Perfil tipo a modelar



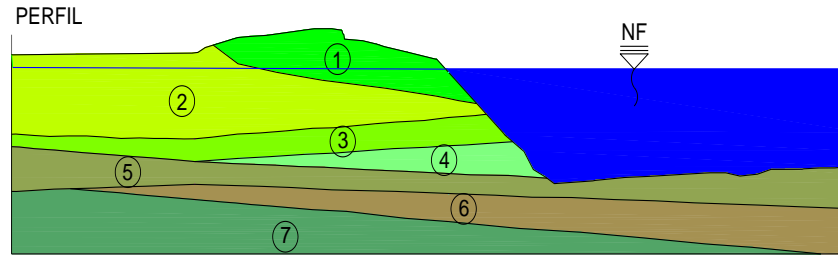
Fuente: Autores

1.4.2 Estratificación y propiedades de los materiales. Con base en unos ensayos de penetración estándar y siguiendo la metodología explicada más adelante en el capítulo 3, se define la estructura estratigráfica del terreno (figura 2), la posición del nivel freático, y los parámetros geotécnicos de cada uno de los estratos (tabla 1).

Los parámetros geotécnicos necesarios para la modelación en *Plaxis* son: el modelo de simulación de material, la densidad seca y saturada, el módulo de *Young* (E), el coeficiente de *Poisson* (ν), la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ).

El modelo de simulación de material utilizado en este caso es el de *Mohr-Coulomb*, pues se aproxima al comportamiento del suelo en general, incluyendo los parámetros nombrados en el párrafo anterior.

Figura 2. Estratificación del terreno



Fuente: Autores

Tabla 1. Parámetros geotécnicos por estrato

Estrato	γ [kN/m ²]	γ_{sat} [kN/m ²]	E [kN/m ²]	ν	C [kN/m ²]	ϕ
1	19.131	21.024	8336	0.45	1.69	24
2	19.031	20.924	8032	0.45	2.54	25
3	19.529	21.522	9620	0.45	15.42	20
4	20.127	22.120	11846	0.45	89.24	14
5	20.327	22.319	12798	0.45	16.67	23
6	20.426	22.419	13484	0.45	10.66	25
7	21.223	22.718	26478	0.45	2.94	31

Fuente: Autores

1.4.3 Configuración general. Se genera un nuevo proyecto de deformación plana con elementos de 15 nodos, se elige el modelo de deformación plana ya que este modelo se utiliza en problemas de geometría con sección transversal aproximadamente constante, donde se pueda suponer un estado uniforme de tensión y carga a lo largo del eje perpendicular a la sección transversal (eje coordenado z). Los desplazamientos y deformaciones en la dirección z se consideran nulos aunque se tienen en cuenta los esfuerzos en esa dirección. Por otra parte, la elección de elementos de 15 nodos proporciona mayor precisión de los cálculos.

Se debe tener en cuenta que el modelo de deformación plana no incluye la amortiguación geométrica dentro del análisis, por lo que se hace necesario incluirla dentro de los materiales, para obtener resultados realistas, ya que es generalmente la geometría, quien hace la contribución más importante de amortiguación del sistema.

1.4.4 Modelo geométrico. Después de haber efectuado la configuración inicial, se debe construir la geometría del modelo, para esto se utiliza el perfil tipo, y la estructura estratigráfica definida a partir de los ensayos de penetración estándar.

1.4.5 Cargas externas y condiciones de contorno. Tan pronto esté terminado el modelo geométrico, se hace necesario definir unas condiciones de contorno que simulen el estado de confinamiento, la situación de carga y de contorno sísmico del terreno natural.

Con la herramienta empotramientos estándar (*standard fixities*) se establecen las condiciones de confinamiento en el modelo geométrico, dicho confinamiento simula la restricción de desplazamientos en los bordes del modelo que en condiciones naturales posee el talud, con el fin de garantizar estabilidad y la continuidad del medio, en este caso se utilizó la restricción total de movimiento del borde inferior y la restricción de desplazamiento horizontal en los bordes laterales, tal como lo muestra la figura 10.

Otra condición de contorno que debe ser tenida en cuenta al realizar un análisis dinámico en *Plaxis* es el contorno sísmico estándar (*standard earthquake boundaries*) el cual contiene dos componentes: el perímetro absorbente (*Absorbent boundary*) y los desplazamientos prescritos (*prescribed displacements*).

El perímetro absorbente es necesario ya que en este tipo de problemas, la fuente de excitación dinámica (usualmente aplicada a lo largo del fondo del modelo) genera ondas de cortante que se propagan hacia arriba. Este perímetro tiene el propósito de absorber el incremento de esfuerzo causado por el sismo, evitando que las ondas cortantes puedan reflejarse en los bordes hacia el interior del modelo.

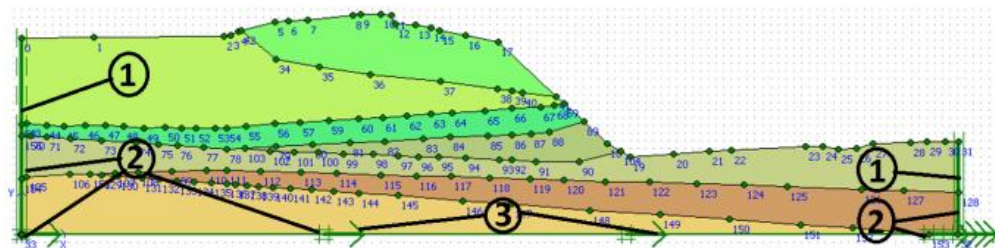
Por otra parte es necesario definir las cargas que afectan al modelo. Para el caso actual se tiene en consideración el peso propio de cada uno de los materiales, y la carga dinámica.

La introducción de la carga dinámica se hace por medio de un desplazamiento horizontal prescrito de 0.01 metros que luego se amplifica con un acelerograma en formato SMC (*Strong motion CD-ROM*), que es el formato usado por el servicio geológico de Estados Unidos (*US Geological Survey*).

El servicio geológico de Estados Unidos es la entidad encargada de registrar los sismos de las zonas de mayor densidad poblacional de los Estados Unidos y algunos sismos fuertes de diferentes partes del mundo, en su sitio web está disponible su amplia base de datos [6].

En la siguiente imagen se ve el modelo con las condiciones de contorno expuestas anteriormente:

Figura 3 Condiciones de contorno del modelo geométrico

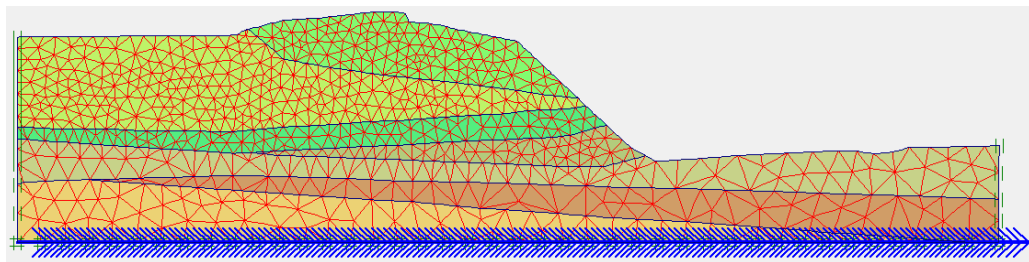


Fuente: Autores

En la imagen anterior, el número 1 corresponde a la ubicación de los contornos absorbentes, el número 2 a los empotramientos estándar y el número 3 a los desplazamientos prescritos.

1.4.6 Malla de elementos finitos. Ya cumplidas las fases anteriores, el siguiente paso es la creación de una malla de elementos finitos que subdivida la geometría con el fin de realizar cálculos. La malla puede ser generada automáticamente por el software, aunque es el usuario quien debe definir las zonas del modelo en donde pueda ser necesario un mayor refinamiento con el propósito de obtener más puntos de evaluación de desplazamientos y tensiones.

Figura 4. Malla de elementos finitos del modelo geotécnico



Fuente: Autores

1.4.7 Condiciones iniciales. El paso final para la elaboración del modelo geotécnico consiste en precisar las condiciones iniciales del problema, es aquí donde se especifica la posición del nivel freático para generar la presión de poros inicial, y donde se realiza la generación inicial de esfuerzos.

1.4.8 Cargas dinámicas. Para realizar un análisis dinámico es necesario introducir una carga dinámica que actúe sobre el modelo como ya se explicó previamente, la carga dinámica que se va a tener en cuenta es el producto del valor de la carga y el correspondiente multiplicador de carga dinámica.

$$Carga\ dinámica = Multiplicador\ dinámico * Desplazamiento\ prescrito$$

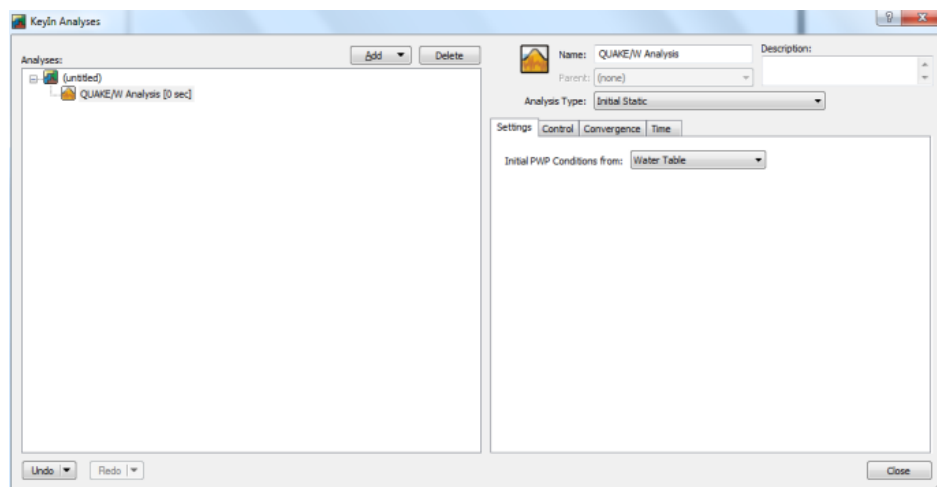
Donde el desplazamiento prescrito es el desplazamiento de un 0,01 [m] que se le aplica al modelo en la base y el multiplicador es un acelerograma de un sismo de determinada magnitud y profundidad.

1.5 PROCESO DE MODELADO EN GEOSTUDIO

Pensando en realizar un estudio más profundo de la situación del talud, es conveniente modelar con los dos programas al mismo tiempo Slope/W y Quake/W, todo lo que representa las características dinámicas del modelo se trabaja con Quake/W y la parte relacionada con la estabilidad del talud se analiza por medio del Slope/W.

1.5.1 Configuración general. Como la aplicación Slope/W dependerá de las características del modelo en Quake/W, se trabajo primero sobre este último programa. Al abrir Quake/W lo primero que aparece es el cuadro de inicio que se puede observar en la figura 5, donde se debe generar un proyecto del tipo de análisis inicial estático (*Initial Static*) el cual representara las condiciones iniciales del talud (antes de la acción sísmica).

Figura 5. Configuración inicial del modelo

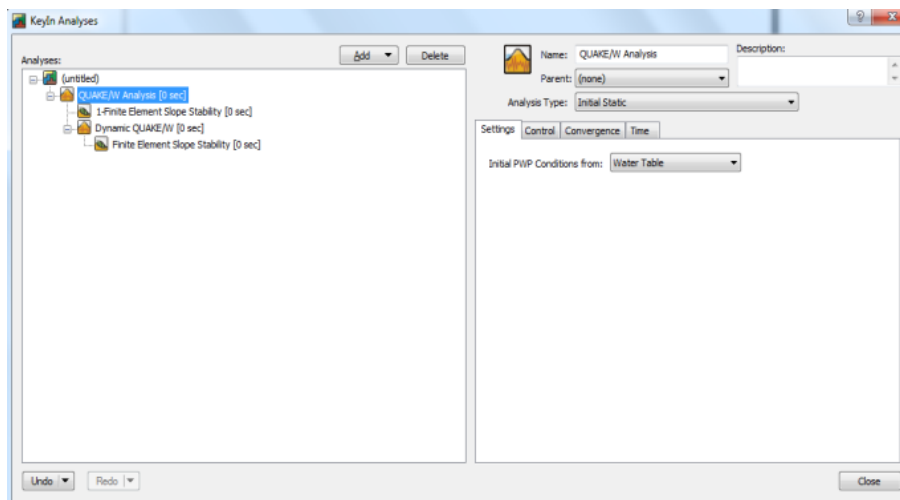


Fuente: Autores

Para las condiciones iniciales de presión de poros se utiliza la opción nivel freático (*Water Table*), con la cual se calculan las presiones de poros dependiendo de la distancia vertical desde el nivel freático.

Luego por medio de la opción Agregar (*Add*) se modela la situación antes del sismo con el programa Slope/W, al cual se le da la opción que dependa de las características del análisis inicial con Quake/W. Después por medio de la misma herramienta se genera otro de Quake/W pero esta vez del tipo lineal dinámico equivalente (*Equivalent Linear Dynamic*) para agregar el acelerograma del sismo a modelar, y finalmente se crea otro archivo en Slope/W para analizar la estabilidad después del sismo. En la parte izquierda de la figura 6 se puede observar cómo debe quedar la distribución de las situaciones antes y después del sismo.

Figura 6. Configuración total del modelo



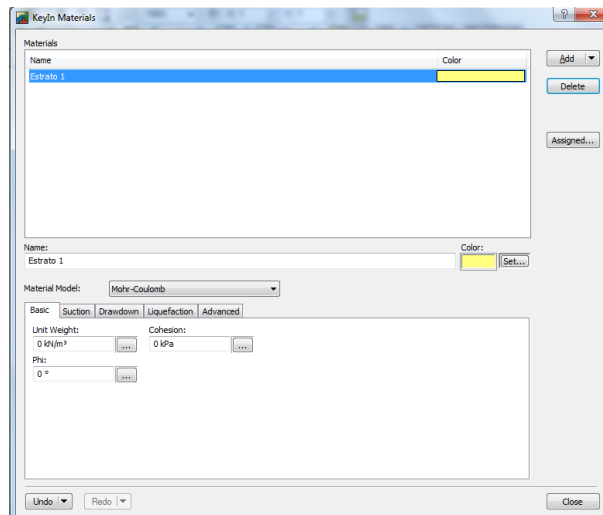
Fuente: Autores

1.5.2 Modelo geométrico. Al igual que el modelo realizado en *Plaxis* se introduce la geometría del problema importando el perfil creado en Auto CAD con la opción importar regiones (*Import Regions*) que se encuentra en la pestaña archivo (*File*).

1.5.3 Propiedades de los materiales. En los modelos constitutivos de los materiales radica una de las principales diferencias entre las dos aplicaciones del GeoStudio utilizadas.

Para Slope/W se debe utilizar el modelo de resistencia de Mohr-Coulomb en el cual se especifican el peso específico del material, el ángulo de fricción y la cohesión (figura 7).

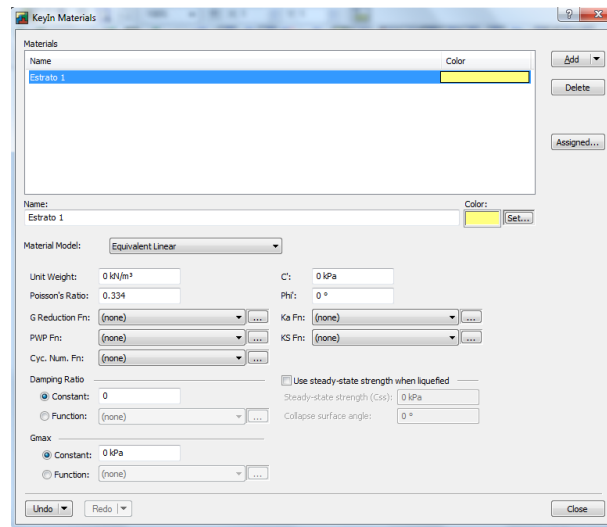
Figura 7. Propiedades de los materiales en Slope/W



Fuente: Autores

En Quake/W se utiliza el modelo lineal-equivalente, el cual utiliza las propiedades relacionadas con la rigidez del suelo, módulo de corte, módulo de amortiguamiento y módulo de *Poisson*, además permite establecer propiedades como la presión de poros del estrato y el número de ciclos que producen licuación. Todas estas opciones se pueden apreciar en la figura 8.

Figura 8. Propiedades de los materiales en Quake/W



Fuente: Autores

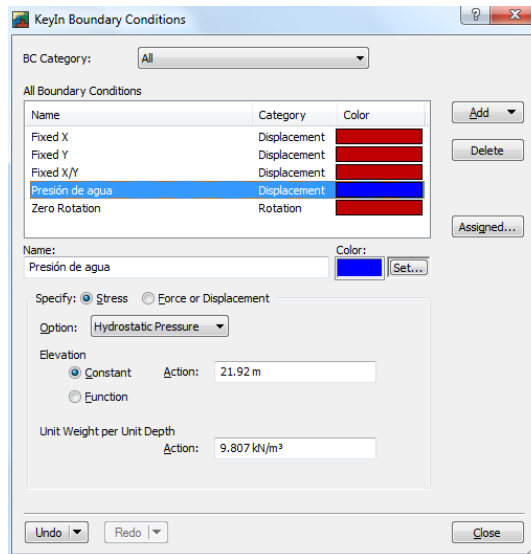
Los parámetros geotécnicos utilizados en estos dos programas son los calculados con los métodos explicados en el capítulo 2.

1.5.4 Cargas externas y condiciones de contorno. Las cargas externas que se introducen al modelo son las que genera el sismo utilizado, en este caso Quake/W funciona por medio de un acelerograma el cual debe estar en formato .acc, en la parte superior se colocan tres números, el primero fue el 1 para indicar que los datos son solo aceleraciones, el segundo también indicando que las unidades de estas aceleraciones son cm/seg^2 y el ultimo termino a colocar será el intervalo de tiempo entre cada dato de aceleración, para este caso fue 0.005.

Las condiciones de contorno se modelan solo en Quake/W, esto se realiza con la opción *Boundary Conditions*, la cual se puede observar en la figura 9. Para el estado inicial se deben restringir en los laterales del talud los movimientos en el eje X, y en la base se restringe tanto movimiento en X como movimiento en Y. En la fase dinámica del modelo en Quake/W se cambia la restricción en los laterales del talud por una restricción en la dirección Y, ya que debido a la acción sísmica se pueden presentar desplazamientos horizontales.

La presión del agua se modela también por medio de esta opción, se especifica que es un esfuerzo y el programa da la opción de establecer que es una presión hidrostática, luego se establece el nivel del agua y por último se dibuja en el modelo.

Figura 9. Condiciones de frontera, presión de agua



Fuente: Autores

Después en la ventana análisis actual (*Current Analysis*) se elige la opción del modelo en Slope/W antes del sismo y se adicionan los materiales a cada estrato, el programa automáticamente adiciona las condiciones del nivel freático y del rio definidas en el modelo inicial de Quake/W. De la misma forma se procede en las etapas especificadas en el numeral 1.5.1.

2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Los parámetros geotécnicos de cada estrato del suelo se determinaron por medio de dos métodos diferentes, un programa de computador y una regresión lineal con los esfuerzos presentes en el terreno. Para las metodologías utilizadas se trabajó con los resultados de dos sondeos cercanos a un río y de características similares a las presentadas en el modelo.

2.1 PARÁMETROS FÍSICOS Y ELASTOPLÁSTICOS

Los parámetros físicos del suelo (peso específico seco y peso específico saturado) y los parámetros elastoplásticos (módulo de Young y módulo de corte) se obtuvieron por medio del programa Dynamic el cual trabaja con los resultados encontrados en los ensayos de penetración estándar.

2.1.1 Ensayo de penetración estándar. El método de perforación utilizado para determinar las características del suelo fue el ensayo de penetración estándar SPT (*Standard Penetration Test*), el cual es uno de los más utilizados en la exploración de suelos por su sencillez de ejecución y bajo costo. Este método consiste en hincar un toma muestras de 18" que se coloca al extremo de una varilla, por medio de un peso que se deja caer desde determinada altura, con lo cual se van anotando los golpes necesarios para ir penetrando la muestra cada 6 pulgadas. El valor normalizado de penetración (N) se obtiene de sumar los dos últimos valores obtenidos durante la perforación, es decir para 12 y 18 pulgadas.

2.1.2 Software *Dynamic*. La empresa GeoStru se especializa en desarrollar software técnico profesional para ingeniería, geotécnica, geología, geo-mecánica, hidrología y ensayos en los terrenos, una de las herramientas desarrolladas por la empresa es Dynamic, un programa que permite elaborar, archivar y administrar

ensayos de penetración estándar, y que por medio de correlaciones define los respectivos parámetros de cada estrato de suelo. Dynamic se ha convertido en una herramienta de gran utilidad para geólogos y geotécnicos debido a su fácil manejo y rápida ejecución. [2]

Por medio de correlaciones estratigráficas entre los sondeos se obtuvo el perfil estratigráfico del suelo, y luego mediante el programa *Dynamic* se obtuvieron los valores aproximados de los parámetros geotécnicos.

Los resultados obtenidos con el programa se adjuntan en los anexos 1 y 2.

2.2 PARÁMETROS DE RESISTENCIA

La resistencia al corte de un suelo se ve directamente afectada por el comportamiento del agua, por esta razón se han establecido dos condiciones que dependen de la respuesta que puede presentarse debido a la acción de cargas externas en los suelos, la primera son las condiciones drenadas, las cuales se caracterizan por no presentar excesos en la presión de poros, y condiciones no drenadas, que son las que presentan excesos en la presión de poros debido a que no tienen el tiempo suficiente para drenar al momento de la aplicación de una carga.

Los programas utilizados trabajan con las condiciones drenadas del suelo. Esto debido a que resulta más conveniente trabajar con presiones efectivas ya que la resistencia del suelo es gobernado por estas, tanto en condiciones drenadas como en condiciones no drenadas.

En los sondeos encontrados se adicionaban los parámetros efectivos de resistencia para los estratos de suelo 4,5, y 7 del talud, para los demás estratos de suelo se utilizó el método establecido por el ingeniero civil y profesor de la

Universidad Nacional Álvaro J. González propuesto en la décima jornada geotécnica de ingeniería colombiana.

2.2.1 Ensayo de corte directo. Es un ensayo que se realiza para determinar los parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de fricción) de una probeta de suelo sometida a un determinado esfuerzo cortante. El ensayo consiste en aplicar sobre una muestra del suelo una carga vertical que genera un esfuerzo normal y una carga horizontal que genera un esfuerzo cortante, como los esfuerzos generados tienen el mismo significado en la construcción del círculo de *Mohr*, se pueden graficar los resultados obtenidos y ajustarlos a una línea recta donde la pendiente es el ángulo de fricción, y el corte con el eje vertical la cohesión del estrato de suelo.

El ensayo de corte directo para determinar parámetros efectivos de resistencia es del tipo consolidado drenado, ya que en este se permite el drenaje del suelo durante la aplicación de la carga vertical hasta finalizar la consolidación primaria, luego de forma muy lenta se procede a la rotura de la probeta para que no se originen presiones intersticiales y se pueda dar un libre drenaje del agua en los poros.

2.2.2 Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. Este método permite evaluar los parámetros efectivos de resistencia C' y ϕ' por medio de los valores encontrados en los ensayos de penetración estándar, dichos parámetros son más aproximados especialmente en suelos no cohesivos, en suelos cohesivos los resultados tienden a presentar una mayor variación pero sirven como estimativos para el análisis realizado con los programas. [3]

Corrección del número de golpes: A pesar de ser llamado "estándar", el ensayo presenta muchas variantes debido a diversos factores en el equipo de muestreo, en el tipo de terreno que se está analizando e incluso en el operario que está llevando a cabo el trabajo en campo.

Como todos los estratos encontrados en los sondeos son suelos cohesivos, se aplicaron únicamente las correcciones por confinamiento efectivo, energía del martillo, y por revestimiento interno del toma muestras.

El factor de corrección por confinamiento efectivo se aplica debido a que las presiones efectivas que se van presentando en el transcurso del ensayo generan un incremento ficticio en los valores normalizados de penetración. Para este estudio se aplicó la fórmula propuesta por *Kayen* [4]:

$$C_N = \frac{2.2}{1.2 + \frac{\sigma'_v}{Pa}}$$

Dónde:

Pa → Presión atmosférica

σ'_v → Presión efectiva de confinamiento

La energía del martillo es un factor que depende directamente del sistema de perforación, del tipo de martillo y de la energía que entrega el tubo saca muestras. Debido a las variaciones en los equipos y en los procedimientos utilizados es necesario aplicar un factor de corrección, para esto se debe tener en cuenta la relación de energía aceptada como referencia en todos los países que es del 60 %, y la relación del país donde se desarrolla el ensayo:

$$C_E = \frac{ER}{0.6}$$

Siendo ER la relación de energía definida por cada país. Para el caso de Colombia se acepta un valor de ER de 0.45.

El revestimiento interno del toma muestras influye también en los resultados obtenidos durante el ensayo, en el sondeo se utilizó una cuchara estándar por lo que el factor de corrección por revestimiento se toma de 1.

Una vez corregido el número de golpes se procede a calcular el valor del ángulo de fricción efectivo equivalente para cada valor normalizado de penetración corregido con la correlación de *Kishida* [3]:

$$\phi'_{eq} = 15 + (12.5 * N_{corr})^{0.45}$$

Se calculan los esfuerzos efectivos (σ') teniendo en cuenta los esfuerzos totales (σ) y la presión de poros (μ) con la siguiente ecuación:

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

Con el esfuerzo efectivo y el ángulo de de fricción efectivo equivalente se obtiene el valor de los esfuerzos cortantes [6]:

$$\tau = \sigma' * \tan(\phi'_{eq})$$

Se agruparon las parejas de valores de esfuerzos cortantes y esfuerzos cortantes efectivos por cada estrato y se ajustaron dichas parejas de datos a una recta por medio de una regresión lineal. El valor del corte con el eje de las ordenadas es el valor de la cohesión efectiva, mientras que con la pendiente se obtiene el valor del ángulo de fricción efectiva.

Los resultados se muestran en los anexos 3, 4, 5 y 6.

3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

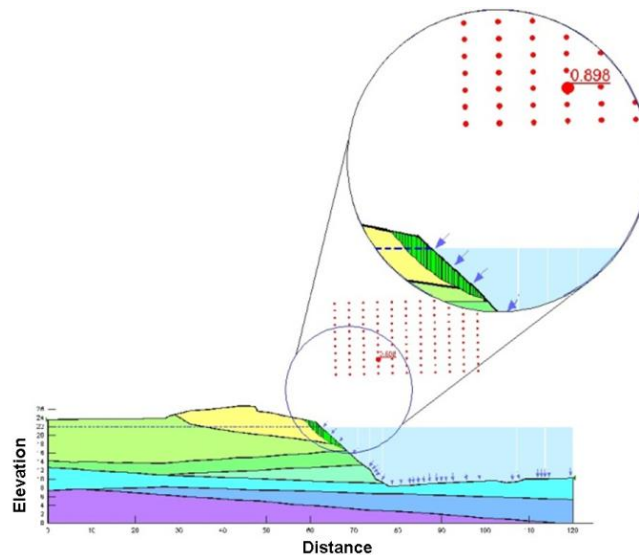
En el capítulo 1 se mostró el procedimiento de modelación del problema en los programas *Plaxis* y *Geostudio* (*Slope/w*, *Quake/w*), ahora este capítulo muestra los resultados obtenidos a partir de esos modelos en el análisis de estabilidad, para lo cual se va a tener en cuenta el espectro de respuesta dinámico del talud, la superficie de falla y los factores de seguridad, para dos casos: el talud natural sin ningún tipo de intervención, y el talud con algunas obras de estabilización propuestas.

3.1 ANÁLISIS ESTÁTICO DE ESTABILIDAD

Los cálculos convencionales para el análisis de estabilidad de taludes se basan en la teoría del equilibrio límite, la cual se incorpora a la estabilidad de taludes por medio del factor de seguridad, éste se define como la relación de todas las fuerzas que intervienen en la resistencia al deslizamiento sobre el total de las fuerzas que aportan al movimiento. Se dice que un talud es estable cuando las fuerzas resistentes son mayores a las fuerzas desestabilizadoras, de tal manera que el factor de seguridad debe ser mayor que uno, para que exista estabilidad.

En este tipo de procedimientos se requiere determinar un factor de seguridad a partir de la información disponible sobre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes del sistema, dicho factor de seguridad se supone constante a lo largo de toda la superficie de falla, es decir que es un factor de seguridad global. El factor de seguridad calculado con el software *Geostudio*, con la herramienta *Slope/w* es el que se muestra a continuación:

Figura 10. Factor de seguridad y superficie de falla del perfil en estado natural, sin ningún tipo de intervención

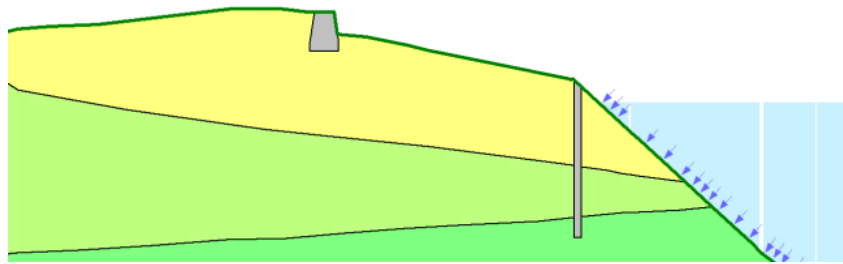


Fuente: Autores

Otra labor importante que cumplen estos métodos, es la búsqueda de la superficie de falla crítica. Ésta corresponde a la superficie de falla que presenta el menor factor de seguridad, y que según las propiedades y características del talud representa el estado más probable a deslizarse, la figura 17 deja apreciar el factor de seguridad asociado a la superficie de falla crítica.

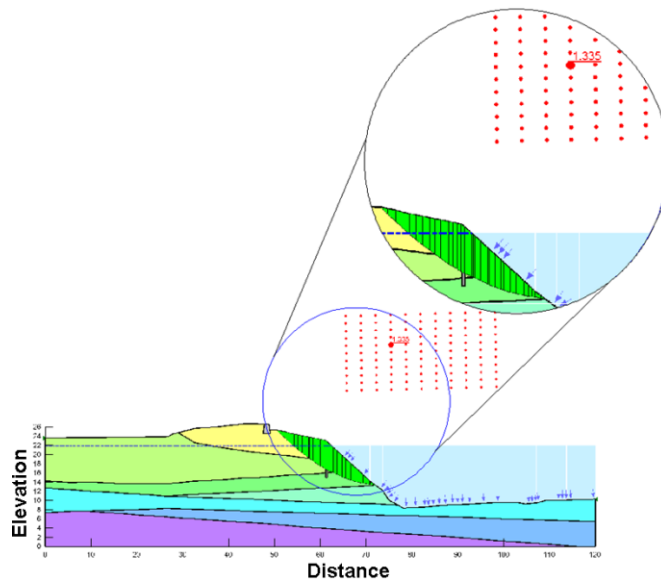
El resultado anterior deja claro que el talud es inestable y que necesita obras de contención que mejoren la condición de inestabilidad, por esta razón se plantea un segundo escenario donde el modelo se somete a la intervención de obras de mitigación (figura 11), las cuales para este caso consisten en un muro en concreto ciclópeo que pretende contener la corona frente al tránsito vehicular y un muro pantalla excavado para contener el material deslizable, los resultados obtenidos a partir de lo anterior se muestran en la figura 12:

Figura 11. Obras de contención propuestas



Fuente: Autores

Figura 12. Factor de seguridad y superficie de falla del perfil con obras de contención



Fuente: Autores

Como se puede ver en la figura anterior, ha mejorado la estabilidad del talud, viéndose reflejado en el aumento del factor de seguridad (de 0.898 a 1.335), lo cual es un indicador de la eficacia de la propuesta.

En la tabla 2 se comparan los factores de seguridad calculados con *Plaxis* y *Quake*, para los diferentes escenarios:

Tabla 2 Tabla comparativa: escenario natural versus estabilizado con obras (caso estático)

FACTORES DE SEGURIDAD		
Descripción	Slope/w	Plaxis
Sin Obras de estabilización	0.898	0.968
Con Obras de estabilización	1.335	1.149

Fuente: Autores

Otros escenarios planteados en el análisis, consideran la variación de los niveles de agua del río, ya que se debe tener en cuenta que la naturaleza es, por excelencia impredecible, haciendo necesario proponer modelos matemáticos que permitan, con cierto grado de confianza en algún rango de interés, hacer inferencias del comportamiento de la variable en estudio. Para el caso de la variación del nivel de agua del río en la presente investigación se proponen tres casos: nivel alto, medio y bajo del nivel de la profundidad del río.

Se muestra a continuación una tabla resumen de los resultados de los escenarios restantes:

Tabla 3 Tabla comparativa: escenario variación del nivel del río (caso estático con obras de estabilización)

FACTORES DE SEGURIDAD		
Nivel freático	Slope/w	Plaxis
Alto	1.335	1.149
Medio	0.752	0.901
Bajo	0.671	0.876

Fuente: Autores

La tabla 3 muestra que la disminución del nivel del río, afecta la estabilidad de los taludes de la orilla, tal vez esto responda a la dinámica natural producto de la interacción entre el río y el suelo. Las fuerzas aplicadas por el nivel actual del río hacen parte del estado de equilibrio de la topografía que lo acompaña, y todo

cambio que le ocurra a ese balance de fuerzas, se traduce en un movimiento de tierra, o en otras palabras es una alteración de la estabilidad del talud.

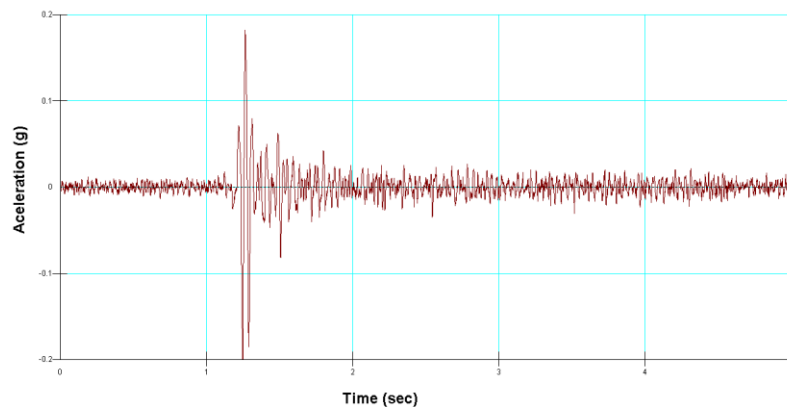
Estos cambios no ocurren de forma inmediata sino a lo largo de extensos periodos de tiempo, es decir si se cambiara instantáneamente el nivel del río Magdalena, indudablemente habría una descompensación de fuerzas que derivarían en una deformación inmediata de la estructura que acompaña al río (deslizamientos de tierra).

3.2 ANÁLISIS DINÁMICO DE ESTABILIDAD

A través de un registro sísmico de aceleraciones es posible aplicar al modelo un sismo con el cual se generen distribuciones de esfuerzo en la estructura para cada paso del acelerograma aplicado. Los programas computacionales utilizados permiten graficar aceleración, velocidad, desplazamiento, etc. de cada nodo seleccionado en función del tiempo.

Para este caso se va a incluir en el análisis dinámico el registro de aceleración de un sismo de magnitud 3,9 y profundidad 5 kilómetros, la figura 13 muestra la señal de registro del acelerograma después de introducirlo en el software *Quake*.

Figura 13. Acelerograma utilizado para el análisis sísmico del modelo



Fuente: Autores

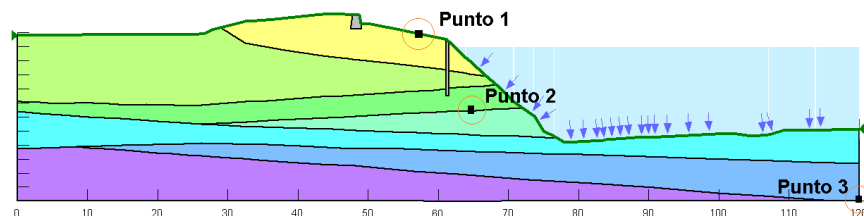
Básicamente el resultado más significativo que se puede obtener a partir del modelo en *Quake* es el espectro de respuesta dinámica del talud, marcando una diferencia entre los programas utilizados por lo menos en lo que a análisis dinámico se refiere. La elección del software a utilizar para el modelamiento de un problema sísmico dependerá de los resultados que se deseen analizar.

La señal sísmica varía desde la fuente de liberación de energía hasta la superficie del suelo durante un movimiento telúrico, esta variación está íntimamente relacionada con las características topográficas y geológicas del medio por el cual viaja, la proximidad de la fuente de origen y la atenuación de la aceleración pico. [9].

Las características geotécnicas que mayor influencia tienen sobre la variación de la señal sísmica encontramos: La variación de rigidez del suelo, el amortiguamiento y las velocidades de onda de corte

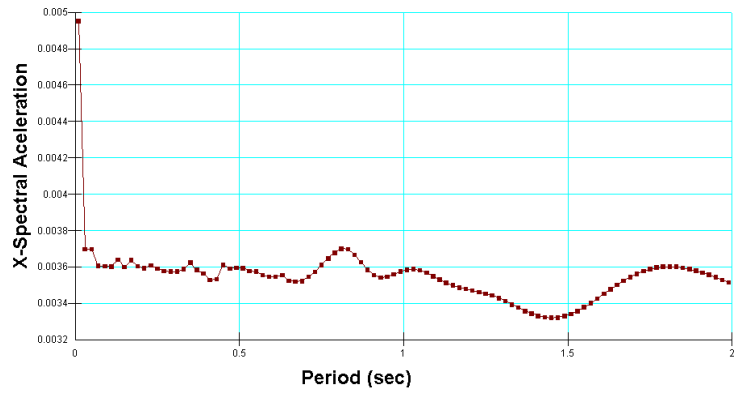
Las figuras 15 a 17 muestran respectivamente los espectros de respuesta de los puntos 1, 2 y 3 (ver figura 14) obtenidos por medio del análisis sísmico del modelo en *Quake*, con ellas se logra percibir la variación de la respuesta dinámica del suelo descrita anteriormente.

Figura 14. Puntos de análisis del espectro elástico de respuesta



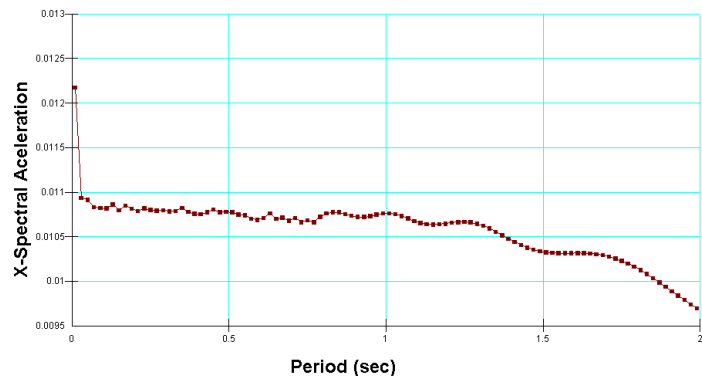
Fuente: Autores

Figura 15. Espectro de respuesta del talud (Punto 1)



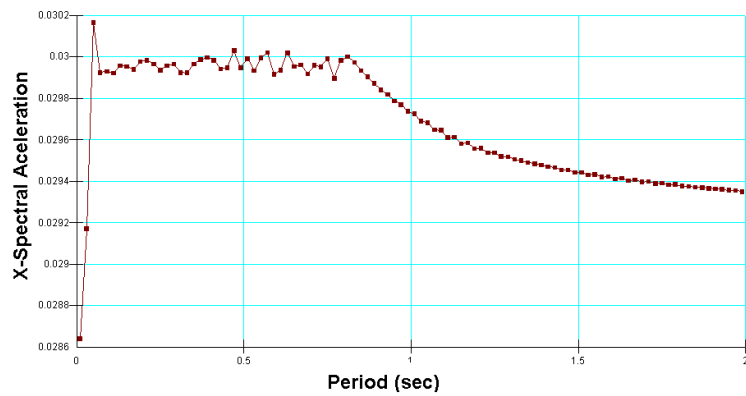
Fuente: Autores

Figura 16. Espectro de respuesta del talud (Punto 2)



Fuente: Autores

Figura 17. Espectro de respuesta del talud (Punto 3)



Fuente: Autores

4. LICUEFACCIÓN

El fenómeno de licuefacción ocurre cuando el suelo pierde su resistencia al esfuerzo cortante debido a la acción de las ondas de corte que se propagan durante un sismo y que provocan un aumento en la presión de poros. Los daños que se pueden producir debido a casos de licuefacción va desde pequeños hundimientos y desplazamientos laterales, hasta grandes movimientos de masa de suelo que terminan provocando catástrofes.

El programa Quake/W permite estudiar este fenómeno de una manera detallada, siendo de gran ayuda para la geotecnia porque permite realizar análisis de las zonas que pueden sufrir de problemas de licuefacción antes del sismo para poder tomar las medidas pertinentes.

Para el análisis de licuefacción se modelaron las siguientes situaciones con presencia de dos sismos, uno de Puerto Berrio y otro de Mulata, ambos del departamento de Antioquia y con magnitud en la escala de Richter de 3.9 y 6.4 respectivamente.

- Situación 1: Perfil con los estratos definidos en el numeral 2.5.2
- Situación 2: Perfil con un solo estrato de arena.

A continuación se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos mediante el programa.

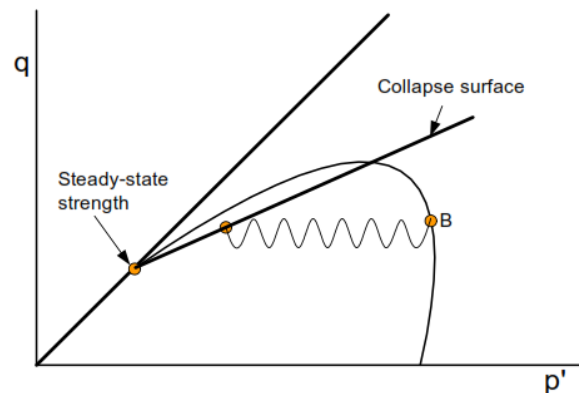
4.1 COEFICIENTE DE ESFUERZOS

Para determinar las zonas del talud donde se puede producir licuefacción el programa analiza la relación entre los esfuerzos q (esfuerzo desviador) y p'

(esfuerzo efectivo significativo) por medio de una gráfica donde se presenta la línea de estado crítico (CSL) y la superficie de colapso. En dicha gráfica se ubican los pares de puntos de los esfuerzos q y p' , y se analiza que tan cerca se encuentra de la recta de superficie de colapso y si al estar en presencia de alguna acción sísmica puede llegar a colapsar.

En la figura 18 se presentan las dos rectas mencionadas anteriormente y un ejemplo de un punto B el cual al ser sometido a una fuerza sísmica presenta un aumento en la presión de poros que le genera un desplazamiento hacia la superficie de colapso.

Figura 18. Trayectoria por esfuerzo cíclico del punto B a la superficie de colapso.

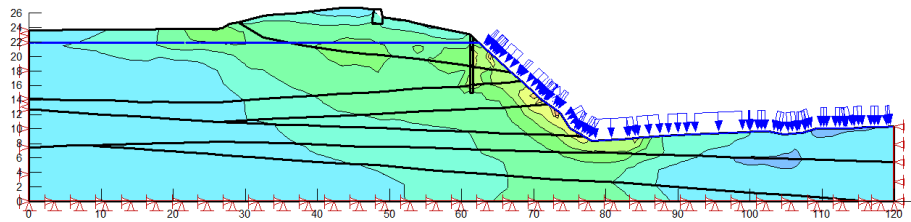


Fuente: Manual Quake/W

El software presenta el talud con líneas de contorno que representan los valores de una relación entre los esfuerzos q y p' y con los cuales se puede tener una idea de cuales zonas representan un mayor riesgo para la estabilidad del talud.

Para la situación 1 el resultado de la relación entre los esfuerzos q y p' se presenta en la figura 19. El programa utiliza el método del arcoíris para diferenciar los resultados de mayor a menor, en este caso las zonas delimitadas por los colores rojo, amarillo y verde son las zonas más propensas a presentar licuefacción ante la presencia de un sismo.

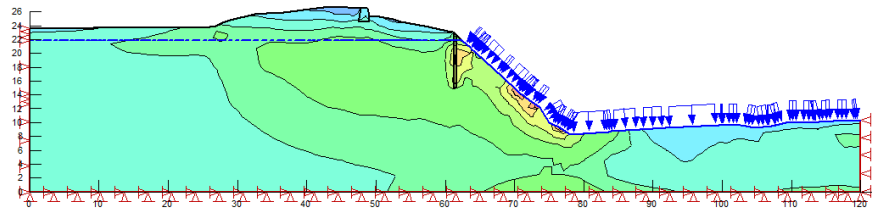
Figura 19. Relación q/p' para el estado inicial



Fuente: Autores

Para la situación del talud con presencia solo de un estrato de arena se puede observar en la figura 20 que la relación de esfuerzos tiene mayor incidencia en el talud presentando una mayor área en las zonas más susceptibles a sufrir de licuefacción.

Figura 20. Relación q/p' para el estado inicial del talud solo arena



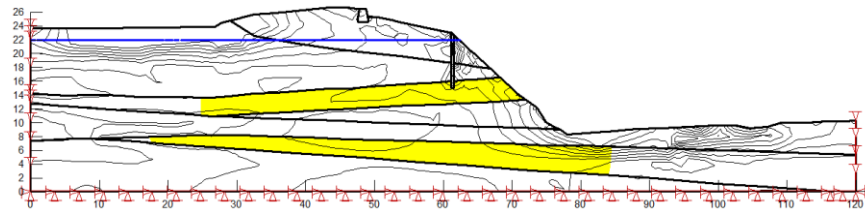
Fuente: Autores

4.2 ZONAS DE POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN

Quake/W tiene la opción de mostrar las zonas potencialmente licuables sombreando estas áreas de color amarillo, en la figura 21 se presentan los resultados para la primera situación.

El sismo de 3.9 y el sismo de 6.4 no presentan ninguna variedad en las zonas potencialmente licuables, la diferencia radica es en los excesos de presión de poros que se generan debido a cada sismo, los cuales se analizan en el siguiente numeral.

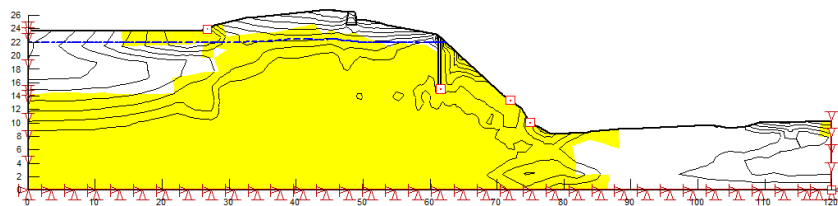
Figura 21. Zonas potencialmente licuables



Fuente: Autores

En la situación número dos se puede notar la diferencia tan amplia entre las zonas potencialmente licuables comparada con el caso anterior, esto debido a que el suelo presente en la figura 22 cuenta con gran presencia de suelo arcilloso, por lo tanto no sufre del fenómeno de licuefacción.

Figura 22. Zonas potencialmente licuables



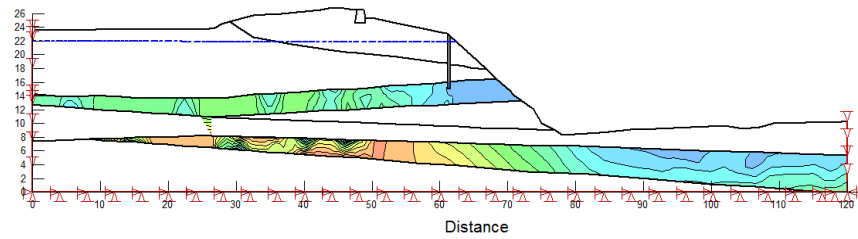
Fuente: Autores

4.3 EXCESOS EN LA PRESIÓN DE POROS

Para la gráfica que genera el Quake/W del exceso de presión de poros, el programa utiliza el método del arcoíris para diferenciar los valores obtenidos en cada tramo del contorno generado.

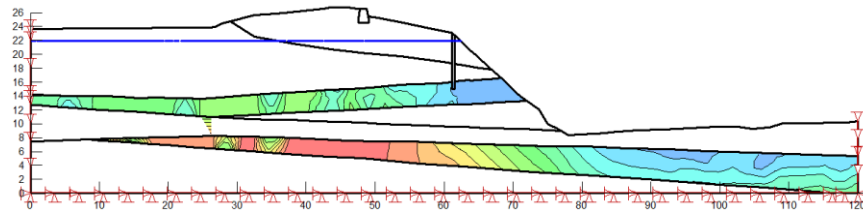
En las figuras 23 y 24 se presentan los resultados para la primera situación variando la magnitud del sismo. En estas graficas se puede observar que se genera un mayor aumento en la presión de poros en el estrato número 6 del talud, siendo evidente que con el sismo de mayor magnitud se obtuvieron zonas más amplias de aumento en la presión de poros.

Figura 23. Excesos en la presión de poros, sismo magnitud 3.9



Fuente: Autores

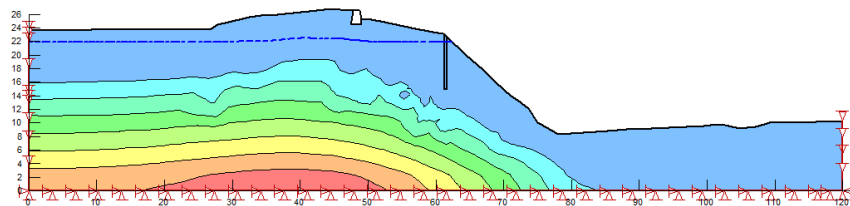
Figura 24. Excesos en la presión de poros, sismo magnitud 6.4



Fuente: Autores

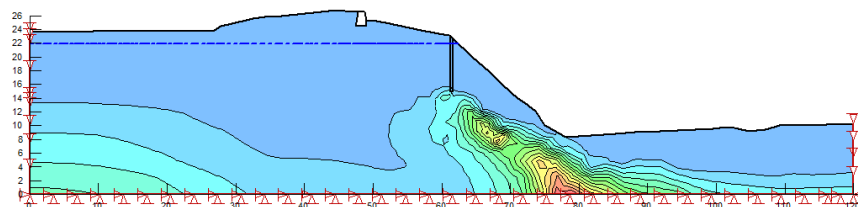
Para la situación con solo arena, se puede notar en la figura 25 que los excesos de presión de poros para el sismo de magnitud 3.9 disminuyen desde la base hasta la corona del talud donde desaparecen, y para el sismo de magnitud 6.4 (figura 26) ocurre algo muy similar solo que las variaciones debido al sismo se encuentran en la parte baja del talud en estudio, lo que ocasiona una situación más desfavorable debido a los aumentos que se generan en esta zona.

Figura 25. Exceso de presión de poros, sismo magnitud 3.9



Fuente: Autores

Figura 26. Exceso de presión de poros, sismo magnitud 6.4



Fuente: Autores

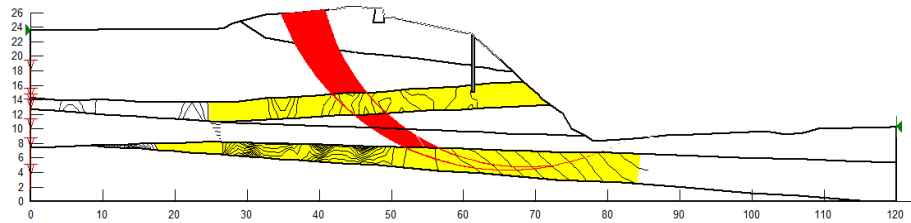
4.4 DESLIZAMIENTOS POR LICUEFACCIÓN

Cuando se analizan deslizamientos por el efecto de licuefacción se debe analizar la superficie de falla con las zonas propensas a fallar por licuefacción, si la posible superficie de falla se ve muy afectada por la región licuable, habría un gran porcentaje de ocurrencia de deslizamiento, pero si la licuefacción afecta un área muy pequeña, la posibilidad de deslizamientos por licuefacción sería muy baja.

Con la ayuda del Slope/W se puede obtener la posible superficie de falla, y al juntar estos resultados con las zonas descritas en el numeral anterior se obtuvieron los siguientes resultados.

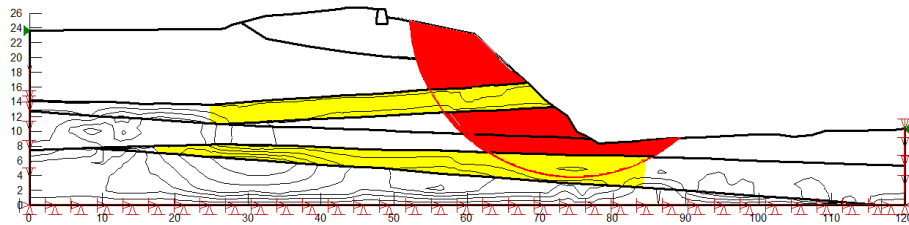
En las figuras 27 y 28 se muestran los resultados obtenidos en la primera situación, y en los cuales se puede apreciar que la zona de licuefacción es considerablemente grande en los estratos en los cuales se genera, pero sobre la posible superficie de falla no alcanza a representar ni la mitad, por lo tanto no es tan probable que ocurran deslizamientos por licuefacción, pero se debe tener cuidado porque el talud se ira debilitando con otros sismos y con las fuerzas que le genera el agua.

Figura 27. Superficie de licuefacción y zonas potencialmente licuables, sismo magnitud 3.9



Fuente: Autores

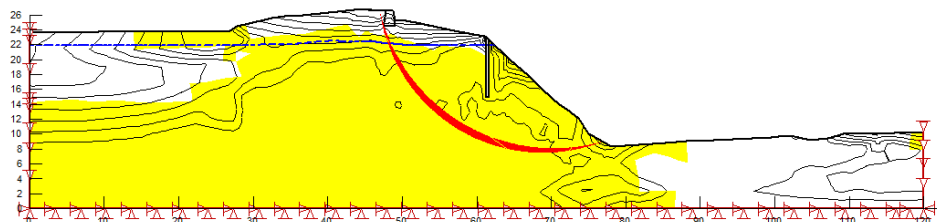
Figura 28. Superficie de licuefacción y zonas potencialmente licuables, sismo magnitud 6.4



Fuente: Autores

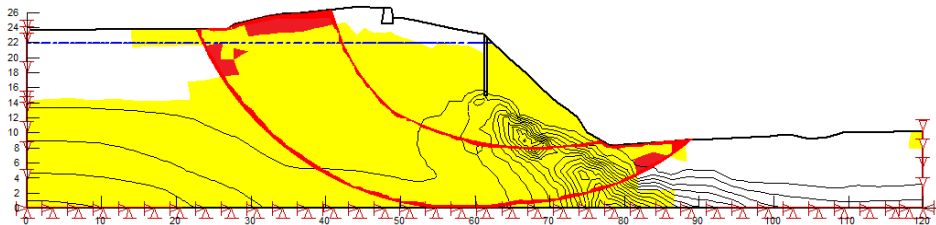
En el segundo caso el talud es más propenso a fallar por licuefacción por estar conformado por arena, y al comparar los resultados (figuras 29 y 30) se puede observar que la zona de potencial de licuefacción cubre casi en su totalidad la posible superficie de falla, con lo cual se puede asegurar que es muy probable que se presenten deslizamientos en el talud.

Figura 29. Exceso de presión de poros, sismo magnitud 3.9



Fuente: Autores

Figura 30. Exceso de presión de poros, sismo magnitud 6.4



Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se determina que la variación del nivel del río afecta la estabilidad de los taludes de la orilla, en respuesta a la dinámica natural producto de la interacción entre el río y el suelo. La fuerza hidrodinámica que ejerce el río sobre el talud, contribuye generando una fuerza de confinamiento que hace parte de su estado de equilibrio, toda variación que le ocurra a ese estado de equilibrio, se traduce en un movimiento de tierra, o en otras palabras en una alteración de la estabilidad del talud.

Es recomendable que antes de construir obras de estabilización se realice un análisis de susceptibilidad de licuefacción para conocer el comportamiento del suelo. Dicho análisis se puede hacer por medio de la gráfica de relación de esfuerzos, ya que con ella se obtiene una idea de las zonas más débiles del talud y se puede definir si los estratos de suelo cohesivo se pueden ver afectados por las variaciones en la presión de poros, convirtiéndolos en zonas potencialmente licuables, hecho que podría llevar al fallo de las obras de contención.

La señal sísmica varía desde la fuente de liberación de energía hasta la superficie del suelo durante un movimiento telúrico, esta variación está íntimamente relacionada con las características topográficas y geológicas del medio por el cual viaja, la proximidad de la fuente de origen y la atenuación de la aceleración pico.

Los dos programas Plaxis y GeoStudio muestran las mismas zonas posibles de ocurrencia de falla y los resultados en cuanto a la parte de estabilidad del talud también son muy similares, por facilidad y ser más práctico resulta más útil Plaxis, ya que con GeoStudio se deben manejar dos aplicaciones al mismo tiempo (Slope/W y Quake/W), pero si se requiere realizar un análisis detallado del fenómeno de licuefacción es más completo GeoStudio porque genera gráficas

como las posibles zonas de licuefacción que resultan mas practicas para analizar si pueden ocurrir deslizamientos en el talud por este fenómeno.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gobernación del departamento de Bolívar. (2012). BOLIVAR, Plan departamental de gestión del riesgo.
- [2] GeoStru software. (2013). Manual de usuario Dynamic Probing.
- [3] Gonzalez, Alvaro J. (1999). Estimativos de parametros efecivos de resistencia con el SPT.
- [4] Santibáñez Rodríguez, D. H. (2006). *Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar*. Valdivia.
- [5] PLAXIS BV. (2004). PLAXIS, Manual de referencia versión 8. Países Bajos.
- [6] U.S Geological survey. (1932). *National Strong-motion project*. Recuperado el Junio de 2013, de <http://nsmp.wr.usgs.gov/>
- [7] Geo-Slope International Ltd. (March de 2008). *Stability Modeling with Slope/W*. Canada.
- [8] Geo-Slope International Ltd. (March de 2008). *Dynamic Modeling with Quake/W*. Canada.
- [9] Boore, D. (1972). *A Note on the Effect of Simple Topography on Seismic SH Waves*.

ANEXOS

ANEXO A. Resultados del modelo del sondeo 1 con el programa Dynamic

Cohesión no drenada

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Cu (Kg/cm ²)
[1] - Arcilla limosa	8.5	3.10	Terzaghi-Peck	0.57
[2] - Arcilla	4.2	5.35	Terzaghi-Peck	0.26
[3] - Arcilla limosa	17.74	8.70	Terzaghi-Peck	1.20
[4] - Arcilla	12.08	12.00	Terzaghi-Peck	0.82
[5] - Arcilla	13.05	14.40	Terzaghi-Peck	0.88
[6] - Limo arcilloso	13.37	17.70	Terzaghi-Peck	0.90
[7] - Arcilla	27	20.00	Terzaghi-Peck	1.82

Qc (resistencia por punta penetrómetro estático)

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Qc (Kg/cm ²)
[1] - Arcilla limosa	8.5	3.10	Robertson (1983)	17.00
[2] - Arcilla	4.2	5.35	Robertson (1983)	8.40
[3] - Arcilla limosa	17.74	8.70	Robertson (1983)	35.48
[4] - Arcilla	12.08	12.00	Robertson (1983)	24.16
[5] - Arcilla	13.05	14.40	Robertson (1983)	26.10
[6] - Limo arcilloso	13.37	17.70	Robertson (1983)	26.74
[7] - Arcilla	27	20.00	Robertson (1983)	54.00

Módulo edométrico

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Eed (Kg/cm ²)
[1] - Arcilla limosa	8.5	3.10	Stroud e Butler (1975)	39.00
[2] - Arcilla	4.2	5.35	Stroud e Butler (1975)	19.27
[3] - Arcilla limosa	17.74	8.70	Stroud e Butler (1975)	81.39
[4] - Arcilla	12.08	12.00	Stroud e Butler (1975)	55.42
[5] - Arcilla	13.05	14.40	Stroud e Butler (1975)	59.87
[6] - Limo arcilloso	13.37	17.70	Stroud e Butler (1975)	61.34
[7] - Arcilla	27	20.00	Stroud e Butler (1975)	123.88

Módulo de Young

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Ey (Kg/cm ²)
[1] - Arcilla limosa	8.5	3.10	Apollonia	85.00
[2] - Arcilla	4.2	5.35	Apollonia	42.00
[3] - Arcilla limosa	17.74	8.70	Apollonia	177.40
[4] - Arcilla	12.08	12.00	Apollonia	120.80
[5] - Arcilla	13.05	14.40	Apollonia	130.50
[6] - Limo arcilloso	13.37	17.70	Apollonia	133.70
[7] - Arcilla	27	20.00	Apollonia	270.00

Clasificación AGI (Asoc. Italiana. Geolog.)

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Clasificación
[1] - Arcilla limosa	8.5	3.10	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
[2] - Arcilla	4.2	5.35	A.G.I. (1977)	MODERAT. CONSISTENTE
[3] - Arcilla limosa	17.74	8.70	A.G.I. (1977)	MOLTO CONSISTENTE
[4] - Arcilla	12.08	12.00	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
[5] - Arcilla	13.05	14.40	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
[6] - Limo arcilloso	13.37	17.70	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
[7] - Arcilla	27	20.00	A.G.I. (1977)	MOLTO CONSISTENTE

Peso específico

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Peso específico (t/m ³)
[1] - Arcilla limosa	8.5	3.10	Meyerhof ed altri	1.92
[2] - Arcilla	4.2	5.35	Meyerhof ed altri	1.71
[3] - Arcilla limosa	17.74	8.70	Meyerhof ed altri	2.09
[4] - Arcilla	12.08	12.00	Meyerhof ed altri	2.02
[5] - Arcilla	13.05	14.40	Meyerhof ed altri	2.04
[6] - Limo arcilloso	13.37	17.70	Meyerhof ed altri	2.04
[7] - Arcilla	27	20.00	Meyerhof ed altri	2.13

Peso específico saturado

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Peso específico saturado (t/m ³)
[1] - Arcilla limosa	8.5	3.10	Meyerhof ed altri	2.11
[2] - Arcilla	4.2	5.35	Meyerhof ed altri	1.87
[3] - Arcilla limosa	17.74	8.70	Meyerhof ed altri	2.30
[4] - Arcilla	12.08	12.00	Meyerhof ed altri	2.22
[5] - Arcilla	13.05	14.40	Meyerhof ed altri	2.24
[6] - Limo arcilloso	13.37	17.70	Meyerhof ed altri	2.24
[7] - Arcilla	27	20.00	Meyerhof ed altri	2.28

Velocidad ondas de corte

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Velocidad ondas de corte (m/s)
[1] - Arcilla limosa	8.5	3.10	Ohta & Goto (1978) Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	107.81
[2] - Arcilla	4.2	5.35	Ohta & Goto (1978) Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	115.81
[3] - Arcilla limosa	17.74	8.70	Ohta & Goto (1978)	161.64

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Velocidad ondas de corte (m/s)
			Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	
[4] - Arcilla	12.08	12.00	Ohta & Goto (1978) Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	165.27
[5] - Arcilla	13.05	14.40	Ohta & Goto (1978) Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	175.55
[6] - Limo arcilloso	13.37	17.70	Ohta & Goto (1978) Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	183.06
[7] - Arcilla	27	20.00	Ohta & Goto (1978) Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	204.17

ANEXO B. Resultados del modelo del sondeo 2 con el programa Dynamic

Cohesión no drenada

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Cu (Kg/cm ²)
[1] - Arcilla	8.19	10.20	Terzaghi-Peck	0.55
[2] - Limo arcilloso	9.81	12.90	Terzaghi-Peck	0.66
[3] - Arcilla	10.57	15.60	Terzaghi-Peck	0.71
[4] - Limo arcilloso	13.75	17.40	Terzaghi-Peck	0.93
[5] - Arcilla	18.28	20.50	Terzaghi-Peck	1.23

Qc (resistencia por punta penetrómetro estático)

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Qc (Kg/cm ²)
[1] - Arcilla	8.19	10.20	Robertson (1983)	16.38
[2] - Limo arcilloso	9.81	12.90	Robertson (1983)	19.62
[3] - Arcilla	10.57	15.60	Robertson (1983)	21.14
[4] - Limo arcilloso	13.75	17.40	Robertson (1983)	27.50
[5] - Arcilla	18.28	20.50	Robertson (1983)	36.56

Módulo edométrico

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Eed (Kg/cm ²)
[1] - Arcilla	8.19	10.20	Stroud e Butler (1975)	37.58
[2] - Limo arcilloso	9.81	12.90	Stroud e Butler (1975)	45.01
[3] - Arcilla	10.57	15.60	Stroud e Butler (1975)	48.50
[4] - Limo arcilloso	13.75	17.40	Stroud e Butler (1975)	63.09
[5] - Arcilla	18.28	20.50	Stroud e Butler (1975)	83.87

Módulo de Young

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Ey (Kg/cm ²)
[1] - Arcilla	8.19	10.20	Apollonia	81.90
[2] - Limo arcilloso	9.81	12.90	Apollonia	98.10
[3] - Arcilla	10.57	15.60	Apollonia	105.70
[4] - Limo arcilloso	13.75	17.40	Apollonia	137.50
[5] - Arcilla	18.28	20.50	Apollonia	182.80

Clasificación AGI (Asoc. Italiana. Geolog.)

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Clasificación
[1] - Arcilla	8.19	10.20	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
[2] - Limo arcilloso	9.81	12.90	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
[3] - Arcilla	10.57	15.60	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
[4] - Limo arcilloso	13.75	17.40	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
[5] - Arcilla	18.28	20.50	A.G.I. (1977)	MOLTO CONSISTENTE

Peso específico

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Peso específico (t/m ³)
[1] - Arcilla	8.19	10.20	Meyerhof ed altri	1.91
[2] - Limo arcilloso	9.81	12.90	Meyerhof ed altri	1.96
[3] - Arcilla	10.57	15.60	Meyerhof ed altri	1.98
[4] - Limo arcilloso	13.75	17.40	Meyerhof ed altri	2.05
[5] - Arcilla	18.28	20.50	Meyerhof ed altri	2.09

Peso específico saturado

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Peso específico saturado (t/m ³)
[1] - Arcilla	8.19	10.20	Meyerhof ed altri	2.10
[2] - Limo arcilloso	9.81	12.90	Meyerhof ed altri	2.16
[3] - Arcilla	10.57	15.60	Meyerhof ed altri	2.18

Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Peso específico saturado (t/m ³)
[4] - Limo arcilloso	13.75	17.40	Meyerhof ed altri	2.25
[5] - Arcilla	18.28	20.50	Meyerhof ed altri	2.30

Velocidad ondas de corte

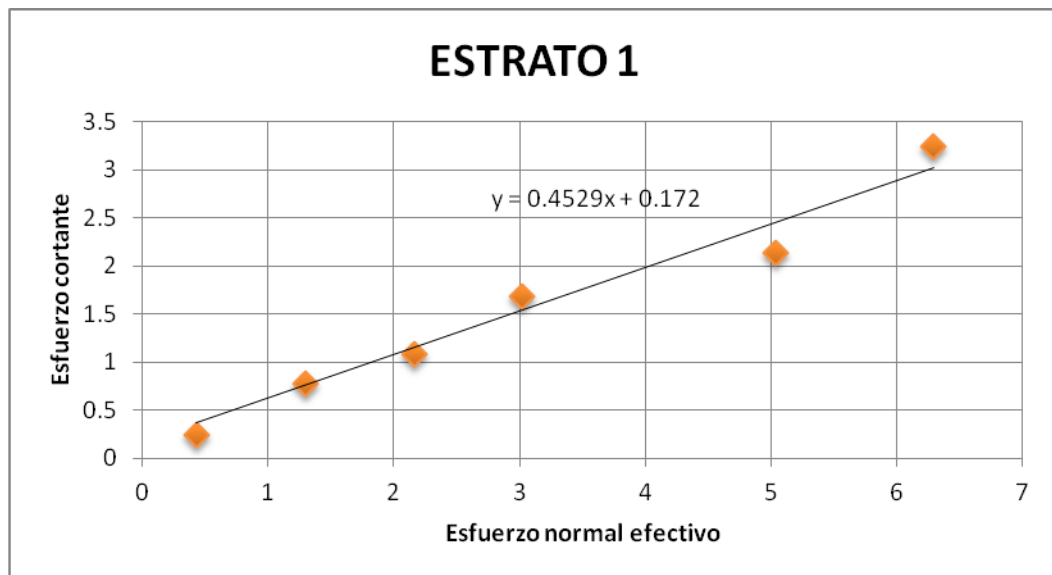
Descripción	Nspt	Prof. Estrato (m)	Correlación	Velocidad ondas de corte (m/s)
[1] - Arcilla	8.19	10.20	Ohta & Goto (1978) Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	134.8
[2] - Limo arcilloso	9.81	12.90	Ohta & Goto (1978) Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	162.84
[3] - Arcilla	10.57	15.60	Ohta & Goto (1978) Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	171.78
[4] - Limo arcilloso	13.75	17.40	Ohta & Goto (1978) Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	184.94
[5] - Arcilla	18.28	20.50	Ohta & Goto (1978) Arcillas limosas y arcillas de baja plasticidad	196.32

ANEXO C. Regresión lineal para el cálculo de parámetros efectivos estrato 1

Esfuerzos normales efectivos ($\sigma'v$) y esfuerzos cortantes (τ) en el estrato de suelo:

$\sigma'v$ [ton/m ²]	τ [ton/m ²]
0.432	0.245184614
1.296	0.772920232
2.16	1.087597084
3.024	1.686050811
5.04	2.129569637
6.288	3.238178549

Regresión lineal de los esfuerzos del estrato 1:



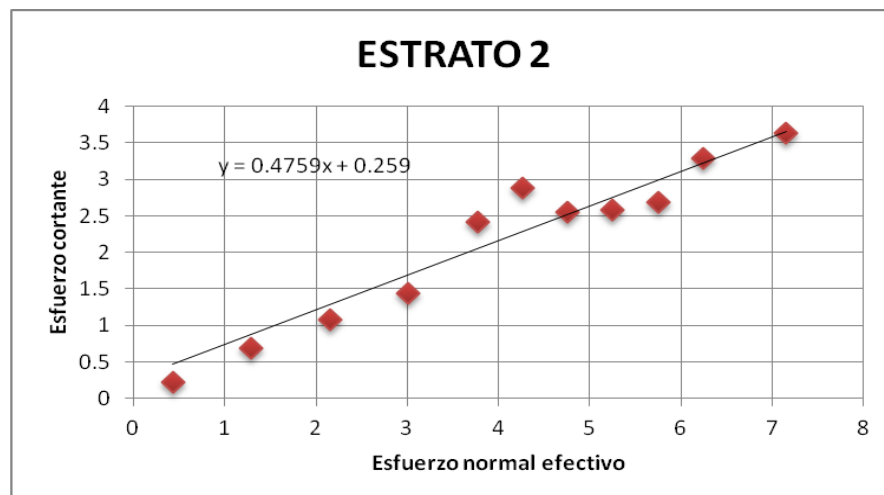
ANEXO D. Regresión lineal para el cálculo de parámetros efectivos estrato 2

Esfuerzos normales efectivos ($\sigma'v$) y esfuerzos cortantes (τ) en el estrato de suelo:

$\sigma'v$ [ton/m ²]	τ [ton/m ²]
0.42975	0.226078939
1.28925	0.692123115
2.14875	1.081932516
3.00825	1.441738109
3.7665	2.415977569
4.2615	2.878687283
4.7565	2.553487375
5.2515	2.581820466
5.7465	2.679636958
6.2415	3.283471077
7.14975	3.641341697

$\sigma'v$ [ton/m ²]	τ [ton/m ²]
8.00925	3.888607342
8.3865	4.590155168
8.6865	4.217422065
8.8815	4.672298064
9.1815	4.457751763
9.3765	4.108240265
9.6765	5.29620658
9.8715	4.171041006
12.0165	6.188227185
12.5115	6.299755056

Regresión lineal de los esfuerzos del estrato 2:

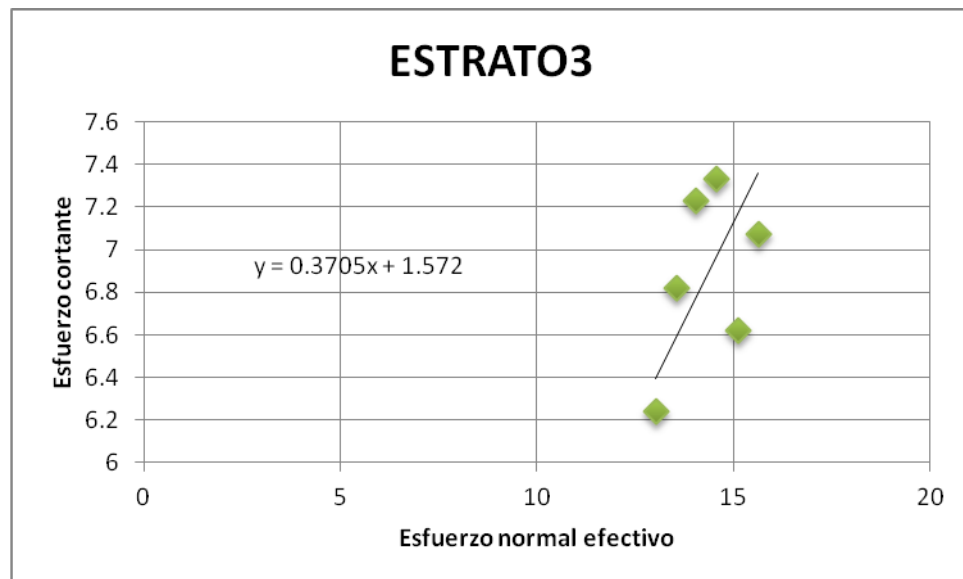


ANEXO E. Regresión lineal para el cálculo de parámetros efectivos estrato 3

Esfuerzos normales efectivos ($\sigma'v$) y esfuerzos cortantes (τ) en el estrato de suelo:

$\sigma'v$ [ton/m ²]	τ [ton/m ²]
13.02	6.239983438
13.542	6.818629498
14.035	7.227709278
14.557	7.329699424
15.108	6.61945224
15.63	7.075004406

Regresión lineal de los esfuerzos del estrato 3:



ANEXO F. Regresión lineal para el cálculo de parámetros efectivos estrato 6

Esfuerzos normales efectivos ($\sigma'v$) y esfuerzos cortantes (τ) en el estrato de suelo:

$\sigma'v$ [ton/m ²]	τ [ton/m ²]
19.35825	10.18381062
19.92075	9.793735132
20.48325	10.07027974
21.04575	10.34682435
21.56225	10.33395414
22.12475	10.87729836
24.56225	12.36751458
25.12475	14.7471086

Regresión lineal de los esfuerzos del estrato 6:

