

Determinar el comportamiento y distribución de esfuerzos de un talud de relleno antrópico, ante la acción de cargas sísmicas empleando el software QUAKE/W.

Fabián Sneyder Fonseca Suárez

Didier Duván Rodríguez Barón

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Hebenly Celis Leguizamo

M. Sc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento a la directora de esta tesis, Msc. Hebenly Celis Leguizamo, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Así mismo, agradezco a mis compañeros por su apoyo personal y humano con quienes he compartido proyectos e ilusiones durante estos años. Gracias a mi familia y a mis padres por su apoyo incondicional. Gracias a mis amigos, que siempre me han prestado un gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo y esta profesión.

Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Marco Teórico.....	11
1.1 Análisis de efectos de sitio.....	11
1.2 Quake/W	12
1.2.1 Modelo Lineal Elástico	13
1.2.2 Modelo Lineal Equivalente.....	13
1.3 Módulo de corte G	14
1.4 Función de reducción de G	15
1.5 Función relación de amortiguamiento	16
1.6 Tensión cíclica equivalente.....	17
1.7 Función número de ciclos	18
1.8 Función de corrección de sobrecarga, K_s	20
1.9 Función de corrección de esfuerzo cortante, K_a	21
1.10 Slope/W.....	22
1.10.1 Método del equilibrio límite (MEL)	23
1.10.2 Método de SPENCER.....	23
1.11 Método de Morgenstern y Price.....	24
2. Metodología	24
2.1 Características del suelo.....	24

2.1.1 Geometría.....	24
2.1.2 Propiedades del suelo.....	25
2.2 Modelamiento en QUAKE/W.....	26
2.2.1 Modulo cortante (Gmax).....	26
2.2.2 Nivel de confinamiento.....	26
2.2.3 Sismo de análisis.....	26
2.3 Condiciones límite de los modelos	27
2.4 Modelos.....	28
2.5 Modelamiento en SLOPE/W	28
3. Resultados y Discusión.....	29
3.1 Resultados.....	29
3.1.1 Slope/w superficie de deslizamiento por cuadrícula y radio	29
3.1.2 Slope/w superficie de deslizamiento especificada completamente	31
3.2 Discusión.....	34
4. Conclusiones.....	35
Referencias Bibliográficas	37
Apéndices.....	39

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Variación de modulo G.	14
Figura 2. Función de reducción de G.....	15
Figura 3. Función de relación de amortiguamiento.	17
Figura 4. Ejemplo de variación de esfuerzos de corte.	17
Figura 5. Ejemplo de variación de esfuerzos de corte uniforme.....	18
Figura 6. Función de número de ciclos.....	19
Figura 7. Función de numero de ciclos para arena suelta, media, medio densa y arena.	20
Figura 8. Geometría y dimensiones del talud.	25
Figura 9. Acelerograma sismo del Quindío.	27
Figura 10. Factores de seguridad falla variable.	30
Figura 11. Factores de seguridad falla variable.	31
Figura 12. Superficie de falla constante.....	32
Figura 13. Factores de seguridad falla constante.....	33
Figura 14. Factores de seguridad falla constante.....	34

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Características del suelo.....	25
Tabla 2. Valores a incluir en Quake/w.....	28

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A - Tablas	39
Apéndice B - Resultados de Slope/w por la metodología de cuadrícula y radio.....	42
Apéndice C - Resultados de Slope/w por la metodología de superficie de deslizamiento especificada completamente	51

Resumen

Título: Determinar el comportamiento y distribución de esfuerzos de un talud de relleno antrópico, ante la acción de cargas sísmicas empleando el software QUAKE/W*.

Autores. Fabian Sneyder Fonseca Suarez
Didier Duván Rodríguez Barón**

Palabras Clave: Relleno antrópico, cargas sísmicas, Quake/w, Slope/w, esfuerzo, factor de seguridad, talud.

Los taludes son superficies inclinadas, de tipo natural o artificial, los problemas más comunes que presentan este tipo de estructuras son hundimientos, erosión y deslizamientos. Debido a la importancia que representa la estabilidad de un terreno ante la presencia eventual de una carga accidental, este trabajo se realizó para determinar el comportamiento de un talud conformado por un suelo de relleno suelto antrópico, ante la presencia de un evento sísmico de magnitud 6.3 ocurrido en el departamento del Quindío con epicentro en Córdoba, empleando un modelamiento en el software Quake/W y Slope/W, de geostudio. El presente estudio permite obtener información sobre este tipo de suelos, creados por la mano del hombre, pero que poco se les ha realizado investigaciones que permitan darles un aprovechamiento constructivo. Se obtuvo como resultado una variación en la estabilidad del talud, determinada por el factor de seguridad obtenido del análisis realizado en Slope/w a partir de los esfuerzos generados de Quake/w y de un análisis por equilibrio límite por Spencer y Morgensterns variando las propiedades del suelo, específicamente su módulo cortante G_{max} y su nivel de confinamiento. Este estudio también se hizo analizando una falla variable en cada modelo por la metodología de superficie de deslizamiento cuadrícula y radio y por una falla constante definida empleando la metodología de superficie de deslizamiento completamente especificada.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director: Hebenly Celis Leguizamo. M. Sc.

Abstract

Title: Determine the behavior and stress distribution of an anthropic fill slope, under the action of seismic loads using the software QUAKE/W*.

Authors. Fabian Sneyder Fonseca Suarez
Didier Duván Rodríguez Barón**

Keywords: Anthropic filling, seismic loads, Quake/w, Slope/w, stress, safety factor, slope.

The slopes are inclined surfaces, natural or artificial type, the most common problems that present this type of structures are subsidence, erosion and landslides. Due to the importance that represents the stability of a terrain in the presence of an accidental load, this work was carried out to determine the behavior of a slope formed by a loose anthropic fill soil, in the presence of a seismic event of magnitude 6.3 occurred in the department of Quindio with epicenter in Cordoba, using a modeling in the software Quake/W and Slope/W, of geostudy. The present study allows obtaining information about this type of soils, created by the hand of the man, but that little research has been carried out to give them a constructive use. It was obtained as a result a variation in the stability of the slope, determined by the safety factor obtained from the analysis carried out in Slope/w from the efforts generated from Quake/w and from an analysis by limit equilibrium by Spencer and Morgensterns varying the properties of the soil, specifically its Gmax cutting module and its level of confinement. This study was also done by analyzing a variable failure in each model by the gridded and radius slip surface methodology and by a defined constant failure using the fully specified slip surface methodology.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director: Hebenly Celis Leguizamo. M. Sc.

Introducción

Un talud es una superficie inclinada respecto de la horizontal que adoptan las estructuras de tierra, donde la mecánica de suelos y la geología analiza, aplica diseño y genera criterios conforme a la norma (Geoseismic, 2018). Un talud de relleno antrópico en geotecnia hace referencia a cuando hay predominancia de restos de obra y similares, lo que denominamos escombros (San Juan Hernández, 2017). Los rellenos son muy susceptibles a agrietarse en el momento de un sismo o a deformarse vertical y horizontalmente, sufriendo asentamientos diferenciales, algunos de los rellenos más susceptibles son los rellenos de suelos residuales compactados (Suarez, 1998).

Los deslizamientos presentados por terremotos pueden causar grandes pérdidas, por ejemplo, el terremoto ocurrido en El Salvador el 13 de enero de 2001 de magnitud 7.7 provocó que 150 mil metros cúbicos de tierra se desprendieran de la Cordillera del Bálsamo, sepultando alrededor de 200 casas (Red Sísmica, 2019), es por esto que surge la necesidad de determinar el comportamiento de este tipo de estructuras ante un evento sísmico para así implementar soluciones mediante el uso de la ingeniería. En este trabajo, se pretende encontrar como responde un talud de relleno antrópico ante la presencia eventual de un terremoto.

Se inicia por determinar la geometría de la estructura, luego de hacer un recuento de las características del suelo de relleno que conforma el talud, tales como peso específico, ángulo de fricción, cohesión, coeficiente de poisson, nivel confinamiento, índice de plasticidad y modulo cortante máximo (G_{max}). Se continua con la realización de los modelos empleando elementos

finitos por medio de un análisis lineal equivalente, para lo cual se establece un evento sísmico de gran magnitud y se usa el software Quake/w, de geostudio, donde en cada modelo se varían los niveles de confinamiento y los valores de Gmax, los resultados obtenidos se usan para determinar el factor de seguridad, en el software Slope/w, de geostudio, el cual nos indica la estabilidad del talud.

1. Marco Teórico

1.1 Análisis de efectos de sitio

Los estudios de la respuesta de sitio son esenciales para definir y entender el papel que juega el perfil geológico, las propiedades estáticas y dinámicas del suelo y la topografía en la respuesta sísmica de un sitio. Los efectos de sitio han contribuido enormemente a las muertes humanas y a los daños en las construcciones en los terremotos (Alcaldía de Palmira, s.f.).

Las metodologías propuestas en la actualidad para la evaluación de estos efectos pueden ser teóricas. Estos modelos teóricos, permiten el análisis de sensibilidad de diferentes factores y posibilitan el estudio de respuesta ante diferentes señales de entrada que representarían sismos hipotéticos futuros. Sin embargo, este tipo de análisis requiere información geotécnica detallada y métodos computacionales avanzados (Alcaldía de Palmira, s.f.).

1.2 Quake/W

Es una herramienta informática de gran alcance que permite realizar modelos y análisis dinámicos de suelos que son afectados por movimientos vibratorios repentinos, ya sean sismos, explosiones con dinamita, hincado de pilotes, etc. Este programa permite solucionar analíticamente los principales problemas relacionados con la respuesta de estructuras de suelos sometidos a cargas sísmicas, tales como los movimientos relativos, las fuerzas de inercia que se producen durante el sismo, la generación de un exceso en las presiones de agua en los poros, la reducción de la resistencia al esfuerzo cortante a medida que aumentan las deformaciones, etc. (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

Los parámetros principales que se necesitan para realizar un análisis dinámico son el módulo de rigidez del suelo o módulo de corte y el factor de amortiguamiento o la capacidad que tiene el terreno de disipar la energía que se genera por el impacto del sismo. El programa permite ingresar parámetros como el módulo de corte y el factor de amortiguamiento como constante o función, según el tipo de modelamiento (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014). Estas dos propiedades dinámicas se relacionan entre sí por medio de ecuaciones que se mostrarán más adelante.

Quake/w permite el análisis de suelos por medio de diferentes modelos donde se relacionan los esfuerzos y las deformaciones, dos de los cuales son:

1.2.1 Modelo Lineal Elástico

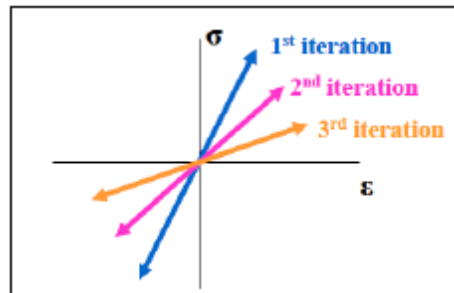
Es un modelo simple y conservador, en el cual los esfuerzos actúan de forma lineal con la deformación, donde la pendiente de la recta es el módulo de Young, E, según la ley de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \qquad \text{Ecuación 1}$$

este modelo se aleja un poco de la realidad y proporciona resultados conservadores, por lo cual es para aprender, probar y verificar algunos propósitos desde que no haya problemas de convergencia (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

1.2.2 Modelo Lineal Equivalente

Este modelo es paralelo al lineal equivalente, con la diferencia que el módulo de corte, G, varía con las deformaciones cíclicas. El programa lo que hace es iniciar un análisis dinámico de la rigidez del suelo, luego realiza iteraciones, modificando el valor del módulo cortante, G, de acuerdo con una función de reducción especificada. Este proceso iterativo continúa hasta que las modificaciones requeridas de G, están dentro de una tolerancia especificada llamada convergencia. El cual se ilustra en la siguiente imagen la variación de G durante un terremoto (ver figura 1) (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

Figura 1.*Variación de modulo G.*

Nota. Tomado de: Imágenes Dynamic Modeling with QUAKE/W.

Los principales parámetros usados en este modelo son el peso unitario, γ , módulo de Poisson, ν , la cohesión, c , el ángulo de fricción, Φ , factor de amortiguamiento, ξ , funciones K_a y K_s , función número de ciclos y el módulo de corte o cizallamiento, G_{max} y la función G reducción que denota la variación del G con el movimiento (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

1.3 Módulo de corte G

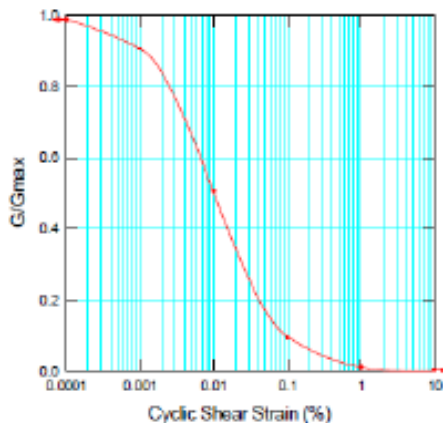
Para caracterizar la rigidez del suelo se utilizan dos conceptos que son la relación de amortiguamiento y el módulo cortante. Este última muestra la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado. A partir del módulo cortante se puede generar un modelo que permita generalizar mediante curvas de degradación la variación de la rigidez del suelo y que tenga en cuenta el efecto de la deformación, la relación de vacíos y el confinamiento (Ortiz Pulido, Gaitán Serrano, & Camacho Tauta, 2014).

1.4 Función de reducción de G

Esta función se define como la variación de la resistencia máxima al corte, G_{max} , a medida que aumenta las deformaciones generadas por los esfuerzos cortantes. En cada una de las iteraciones, se calculan nuevos valores del módulo de corte G , a partir de la deformación por esfuerzo cortante y la función del valor de G_{max} calculados conjuntamente tal como se ilustra en la gráfica de función de reducción de G el valor de G_{max} en Quake/w es un valor establecido por el usuario o calculado de los esfuerzos iniciales (ver figura 2) (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

Figura 2.

Función de reducción de G.



Nota. Tomado de: Imágenes Dynamic Modeling with QUAKE/W.

Ishibashi y Zhang (1993) desarrollaron una experiencia para determinar G/G_{max} las dos principales variables son índice de plasticidad (PI) y presión de confinamiento de la siguiente manera:

$$\frac{G}{G_{Max}} = K(\gamma, PI)(\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_o} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.0012 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$K(\gamma, PI) - m_o = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\}^{(-0.0145 PI^{1.3})} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$n(PI) = 0.00 \quad \text{for } PI = 0$$

$$n(PI) = 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} \quad \text{for } 0 < PI < 15$$

$$n(PI) = 7.00 \times 10^{-7} PI^{1.976} \quad \text{for } 15 < PI < 70$$

$$n(PI) = 2.70 \times 10^{-5} PI^{1.115} \quad \text{for } PI > 70$$

Nota. Tomado de: Imágenes Dynamic Modeling with QUAKE/W.

Las unidades son en Kpa. con estas ecuaciones empíricas, los rangos de los valores de deformación angular, le valor índice de plasticidad y el esfuerzo de confinamiento, se puede calcular G/Gmax y establecer una función de reducción de G (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

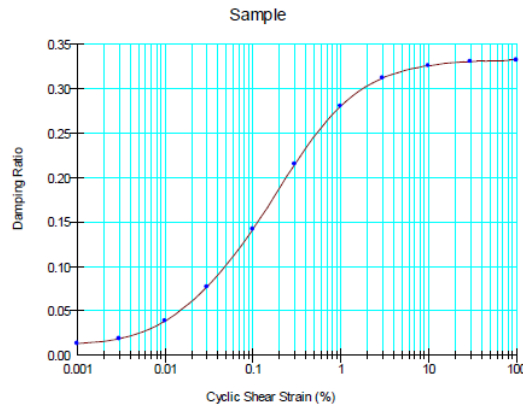
1.5 Función relación de amortiguamiento

Al igual que Gmax, el coeficiente de amortiguamiento en QUAKE/W se puede especificar como constante o una función.

Si se utiliza como una función, esta depende de la deformación por esfuerzos cortantes. De igual forma que para la función de reducción de G, Ishibashi y Zang en 1993 desarrollaron una expresión donde se puede estimar la función de factor de amortiguamiento. Las variables de la fórmula son el índice de plasticidad, IP, el módulo de corte, G, la relación G/Gmax y la presión de confinamiento de forma indirecta (ver figura 3) (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

Figura 3.

Función de relación de amortiguamiento.



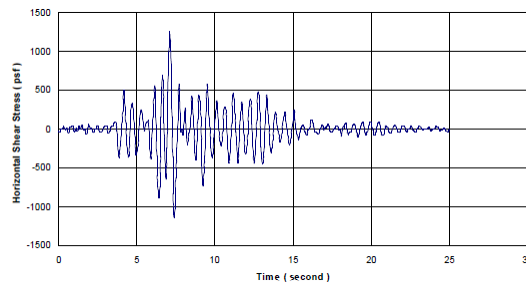
Nota. Tomado de: Imágenes Dynamic Modeling with QUAKE/W.

1.6 Tensión cíclica equivalente

Un sismo es muy variable y actúa de forma irregular, generando esfuerzos de corte muy variables e irregulares en el suelo. Un ejemplo de cómo varían los esfuerzos de corte se muestra (ver figura 4):

Figura 4.

Ejemplo de variación de esfuerzos de corte.



Nota. Tomado de: Imágenes Dynamic Modeling with QUAKE/W.

Pero las pruebas de laboratorio, usualmente se realizan aplicando repetidamente ciclos de tensiones uniformes, por lo cual es la base de la comprensión del comportamiento del suelo bajo cargas dinámicas.

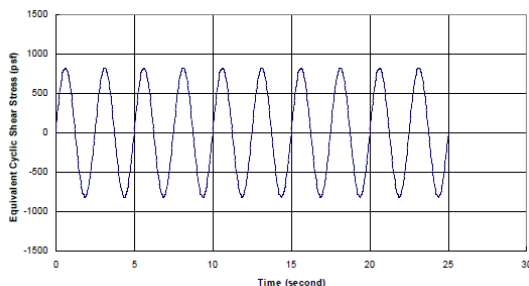
Con base en la investigación de Seed (1975), el método más viable consiste en establecer la amplitud cíclica de cizalla uniforme al 65% del esfuerzo cortante pico en el histograma de cizallamiento (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014), la ecuación es la siguiente:

$$\tau_{\text{cycle}} = 0.65 \tau_{\text{peak}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Al aplicar este método, la variación del esfuerzo de corte con el tiempo mostrada en la figura 5 se vuelve uniforme. Como se ilustra a continuación (ver figura 5).

Figura 5.

Ejemplo de variación de esfuerzos de corte uniforme.



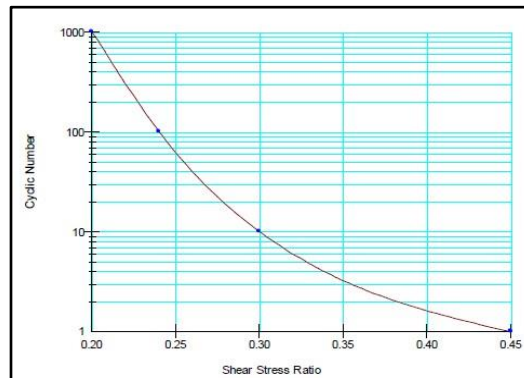
Nota. Tomado de: Imágenes Dynamic Modeling with QUAKE/W

1.7 Función número de ciclos

Una función típica que ofrece QUAKE/W es la que se presenta (ver figura 6):

Figura 6.

Función de número de ciclos.



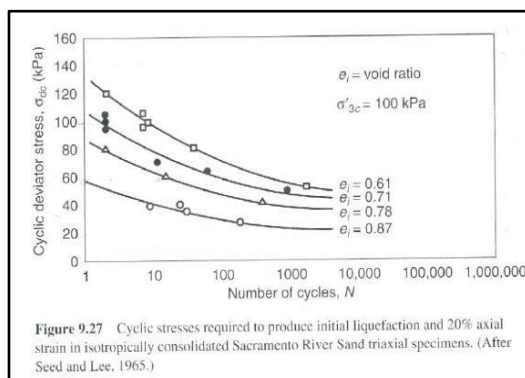
Nota. Tomado de: Imágenes Dynamic Modeling with QUAKE/W.

Los investigadores Seed y Lee (1965) realizaron pruebas cíclicas en Sacramento Sand River, donde una síntesis de sus resultados se presentan en la figura 7, siendo estos datos utilizados para crear cuatro funciones de ejemplo para el programa. Estas funciones se denominan: arena suelta, arena media suelta, arena media densa y arena (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

De igual manera que con todas las funciones de ejemplo que ofrece QUAKE/W, las funciones nombradas anteriormente únicamente se proporcionan como una guía pedagógica para el usuario. Estas funciones no son confiables para análisis de proyectos reales (ver figura 7) (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

Figura 7.

Función de numero de ciclos para arena suelta, media, medio densa y arena.



Nota. Tomado de: Imágenes Dynamic Modeling with QUAKE/W.

Una aplicación interesante de QUAKE/W es el trabajo en conjunto con los demás programas del paquete de Geostudio, un caso específico es el SLOPE/ W que se puede utilizar establecer la estabilidad del talud mediante el análisis de esfuerzos (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

1.8 Función de corrección de sobrecarga, Ks

En la investigación que se realizó para comprender y usar los valores de CSR para estimar generación de excesos de presión de poro, se reconoció que la magnitud del estrés limitante tiene un efecto sobre la respuesta del suelo. Para explicar esto, se invocó la idea de un factor de corrección. El factor de corrección se conoce como factor de corrección de sobrecarga. En QUAKE / W este factor de corrección es dado el símbolo Ks (s significa estrés o sigma). El esfuerzo cortante cíclico requerido para desencadenar la licuefacción aumenta a medida que aumenta el esfuerzo de confinamiento. QUAKE / W le permite dar cuenta de esto definiendo una función Ks, QUAKE /

W incluye una función de muestra para arena y grava. Estas funciones de muestra fueron adaptadas de datos presentados por Kramer para Referencia conveniente. Estas funciones de muestra, como todas las funciones de propiedad en QUAKE / W, se pueden ajustar para cumplir con el sitio condiciones específicas si es necesario (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

1.9 Función de corrección de esfuerzo cortante, K_a

Al igual que con la influencia del esfuerzo de sobrecarga en la licuefacción, los esfuerzos de cizallamiento estático in situ iniciales también influir en el estrés cíclico requerido para desencadenar la licuefacción. Para ser coherente con otros parámetros similares y para la aplicación en casos 2D, QUAKE / W utiliza una variación de esto. En QUAKE / W α se define como, donde q es el estrés desviatorio. En una prueba triaxial $\tau_{max} = q / 2$. Esto hace que α sea numéricamente el estático (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

Las funciones de muestra se denominan Arena muy suelta, arena suelta, arena medianamente densa y arena densa. El valor de corrección de la relación de esfuerzo cortante se designa como K_a , donde a significa alfa. Las tensiones dinámicas calculadas QUAKE / W pueden considerarse como las tensiones de campo después de las correcciones (CSR campo corregido). La función Número cíclico especificada por el usuario generalmente representa la relación de tensión cíclica de campo (Campo CSR) antes de la corrección. Por lo tanto, en QUAKE / W, los valores CSR calculados de elementos finitos son dividido por K_a para obtener un valor correspondiente a los valores especificados en la función Número cíclico (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014).

1.10 Slope/W

Calcula el factor de seguridad de las pendientes de tierra y roca. SLOPE / W puede analizar eficazmente problemas simples y complejos para una variedad de formas de superficie de deslizamiento, condiciones de presión de agua de poro, propiedades del suelo, métodos de análisis y condiciones de carga (Seequent Limited, 2015). Usando el equilibrio límite, SLOPE / W puede modelar tipos de suelo heterogéneos, geometría compleja de estratigrafía y superficie de deslizamiento, y condiciones de presión variable de poro-agua usando una gran selección de modelos de suelo. Los análisis se pueden realizar utilizando parámetros de entrada deterministas o probabilísticos (Seequent Limited, 2015).

Está formulado en términos de ecuaciones de seguridad de momento y factor de equilibrio de fuerza, y es compatible con una lista exhaustiva de métodos de equilibrio límite, incluidos Morgenstern-Price, Spencer, Bishop, Janbu y el método ordinario. El método Morgenstern-Price, por ejemplo, satisface tanto el equilibrio de fuerza como el de momento. Esta formulación general facilita el cálculo del factor de seguridad para una variedad de métodos y para comprender fácilmente las relaciones y diferencias entre todos los métodos (Seequent Limited, 2015).

SLOPE / W también puede realizar análisis de estabilidad dinámica y de estabilidad de elementos finitos. Utiliza tensiones calculadas de elementos finitos de SIGMA / W o QUAKE / W (GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.), 2014), para calcular un factor de estabilidad calculando tanto la resistencia al corte total como el esfuerzo de corte movilizado a lo largo de toda la superficie de deslizamiento. SLOPE / W luego calcula un factor de estabilidad local para cada segmento (Seequent Limited, 2015).

1.10.1 Método del equilibrio límite (MEL)

El método del equilibrio límite consiste en estudiar el equilibrio de un cuerpo rígido, constituido por el talud y por una superficie de deslizamiento de cualquier forma (línea recta, arco circular, espiral logarítmica). Con tal equilibrio se calculan las tensiones de corte y se comparan con la resistencia disponible, valorada según el criterio de rotura de Coulomb; de tal comparación se deriva la primera indicación sobre la estabilidad con el coeficiente de seguridad (Lopez Pineda, 2017).

1.10.2 Método de SPENCER

El método se basa en la afirmación: Las fuerzas de conexión a lo largo de las superficies de división de cada rebanada están orientadas paralelamente entre ellas e inclinadas con respecto a la horizontal de un ángulo θ . Todos los momentos son nulos, Sustancialmente el método satisface todas las ecuaciones de la estática y equivale al método de Morgenstern y Price cuando la función $f(x) = 1$ (Lopez Pineda, 2017). Imponiendo el equilibrio de los momentos respecto al centro del arco descrito por la superficie de deslizamiento se tiene fuerza de interacción entre las rebanadas. Imponiendo el equilibrio de las fuerzas horizontales y verticales se tiene respectivamente: Con la asunción de las fuerzas paralelas entre ellas, El método propone calcular dos coeficientes de seguridad: el primero (F_s) se obtiene de 1), ligado al equilibrio de los momentos; el segundo (F_{sm}) de 2) ligado al equilibrio de las fuerzas. En práctica se procede resolviendo la 1) y la 2) para un dado intervalo de valores del ángulo θ , considerando como valor único del coeficiente de seguridad aquel para el cual se tiene $F_s = F_{sm}$.

1.11 Método de Morgenstern y Price

Se establece una relación entre los componentes de las fuerzas de interconexión (E) de tipo $X = \lambda f(x)E$, donde λ es un factor de escala y $f(x)$, función de la posición de E y de X, define una relación entre las variaciones de la fuerza X y de la fuerza E al interno de la masa deslizante. La función $f(x)$ se escoge arbitrariamente (constante, senoide, semisenoide, trapecio, fraccionada...) e influye poco sobre el resultado, pero se debe verificar que los obtenidos para las incógnitas sean físicamente aceptables. La particularidad del método es que la masa se subdivide en franjas infinitésimas, a las cuales se imponen las ecuaciones de equilibrio en la traslación horizontal y vertical y de rotura en la base de las franjas mismas. El método de cálculo satisface todas las ecuaciones de equilibrio y se aplica a superficies de cualquier forma, pero implica necesariamente el uso de una hoja de cálculo o como mínimo de una calculadora (Lopez Pineda, 2017).

2. Metodología

2.1 Características del suelo

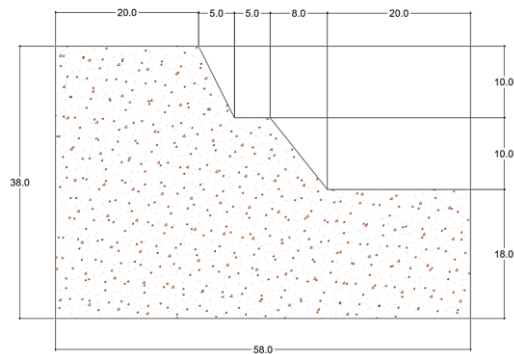
2.1.1 Geometría

Se utilizó una geometría tipo similar a la de los taludes que se encuentran en “El Carrasco”, en la vía Girón, donde se definió que las dimensiones del talud serían 38 m de alto y 58 m de

ancho, con una pendiente de 45° respecto a la horizontal. A continuación, se muestra la forma del talud y sus dimensiones mencionadas (ver figura 8).

Figura 8.

Geometría y dimensiones del talud.



2.1.2 Propiedades del suelo

Las características del suelo se tomaron a partir de una tesis de grado realizada en “El carrasco” (Pérez & Rojas, 2019). De esta manera las propiedades del material utilizado en la presente investigación son las siguientes:

Tabla 1.

Características del suelo.

Peso específico	17.5 KN/m ³
Ángulo de fricción	30 °
Cohesión	15 KPA
Coefficiente de poisson	0.4
Índice de plasticidad	9
Tipo de suelo	Relleno Suelto

Para determinar el tipo de suelo, el valor de N (número de golpes de ensayo SPT), esta entre 2 y 13 (Pérez & Rojas, 2019), que, según la literatura, se clasifica como una arena suelta (ASTM International, 1996, pág. 3).

2.2 Modelamiento en QUAKE/W

2.2.1 Modulo cortante (Gmax)

En ese estudio encontraron además que los valores de Gmax se encuentran en el rango de 13 Mpa a 85 Mpa (Pérez & Rojas, 2019), por lo tanto, se utilizó un Gmax de 20 Mpa, 40 Mpa y 80 Mpa de manera que se encuentren incluidos entre los limites hallados.

2.2.2 Nivel de confinamiento

De acuerdo a la altura del talud que es 38 m y su peso específico definido de 17.5 KN/m³ su máximo nivel de confinamiento es de 665 Kpa, por lo tanto, se hicieron modelos para valores de 50 Kpa, 100 Kpa, 200 Kpa, 400 Kpa y 600 Kpa, que se encuentran dentro del rango máximo.

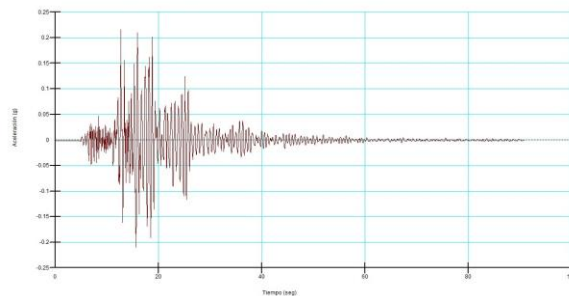
2.2.3 Sismo de análisis

Con base en la sismología histórica de la región, se analizaron los siguientes sismos caracterizados por su alta magnitud y aceleración pico efectiva (PGA) (ver tabla 3 - Anexo A).

Se usó el sismo del Quindío, ocurrido el 25 de enero de 1999, con epicentro en Córdoba y una aceleración pico efectiva de 0.21602g, captada por la estación Castanare, ubicada en la ciudad de Pereira, con una magnitud de 6.3 y una duración de 90.88 segundos, en el siguiente acelerograma se puede evidenciar (ver figura 9).

Figura 9.

Acelerograma sismo del Quindío.



Nota. Tomado de: Software Quake/w.

2.3 Condiciones límite de los modelos

Estudios realizados sugieren que para realizar un modelamiento dinámico en QUAKE/W, las restricciones laterales se hacen en el sentido vertical permitiendo el movimiento horizontal, y las restricciones en la base se hacen en el sentido vertical y horizontal, asumiendo que el talud se encuentra apoyado sobre un estrato competente (Morales & Rincón, 2013).

2.4 Modelos

Con base en la información recopilada anteriormente se realizaron 15 modelos en Quake/w, donde se varió de un modelo a otro el nivel de confinamiento y el valor de Gmax, de la siguiente manera.

Tabla 2.

Valores a incluir en Quake/w.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)
1	50	20
2	50	40
3	50	80
4	100	20
5	100	40
6	100	80
7	200	20
8	200	40
9	200	80
10	400	20
11	400	40
12	400	80
13	600	20
14	600	40
15	600	80

2.5 Modelamiento en SLOPE/W

Con los esfuerzos obtenidos de cada modelo de Quake/w, se hizo un análisis en Slope/w para determinar la estabilidad del talud de acuerdo al factor de seguridad obtenido a partir del análisis dinámico. Este factor también fue determinado por la metodología de equilibrio límite de

Spencer y Morgensterns, bajo una carga sísmica horizontal de 0.21602g ($g = 9.807 \text{ m/s}^2$), correspondiente al sismo utilizado.

Con cada uno de los modelos se determinó el factor de seguridad de dos maneras, uno por la metodología de cuadrícula y radio donde la zona de falla es variable y hallada por el software, y otro factor de seguridad por la metodología de superficie de deslizamiento especificada completamente, donde la falla es la misma para todos los modelos.

3. Resultados y Discusión

3.1 Resultados

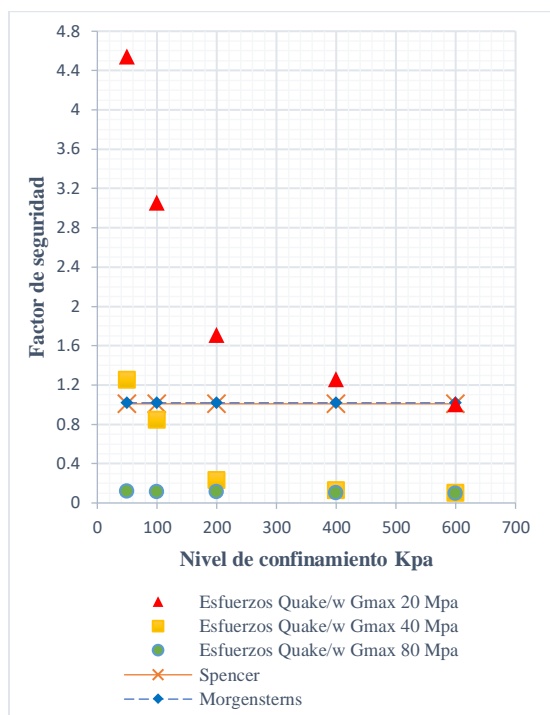
Los modelos de Quake/w, en los que se obtuvieron los resultados de esfuerzos generados en el talud, a partir de la carga sísmica aplicada, se importaron a Slope/w para efectuar un análisis de estabilidad con el fin de obtener los factores de seguridad. Después se hizo una comparación de estos resultados con los obtenidos de un análisis de equilibrio límite por la metodología de Spencer y Morgensterns.

3.1.1 Slope/w superficie de deslizamiento por cuadrícula y radio

Se realizaron los modelos en los cuales para cada nivel de G_{max} constante se hizo una variación del confinamiento (ver tablas 4 – 6 Anexo A y figura 10).

Figura 10.

Factores de seguridad falla variable.

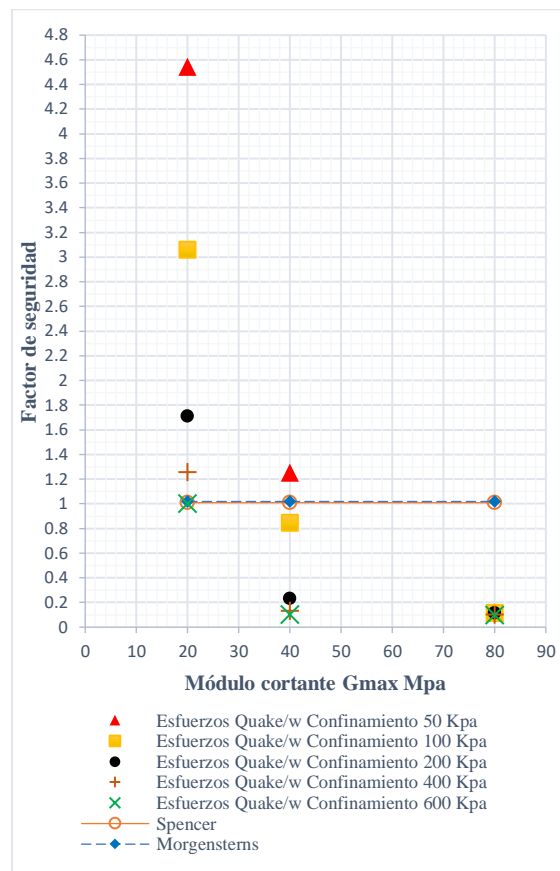


El comportamiento de los valores obtenidos de factor de seguridad para cada nivel de Gmax, es inversamente proporcional al nivel de confinamiento, y a su vez entre mayor es Gmax menor es la estabilidad del talud.

Podemos observar los resultados del comportamiento para cada nivel de confinamiento constante, pero variando Gmax (ver tablas 7 – 11 Anexo A y figura 11).

Figura 11.

Factores de seguridad falla variable.



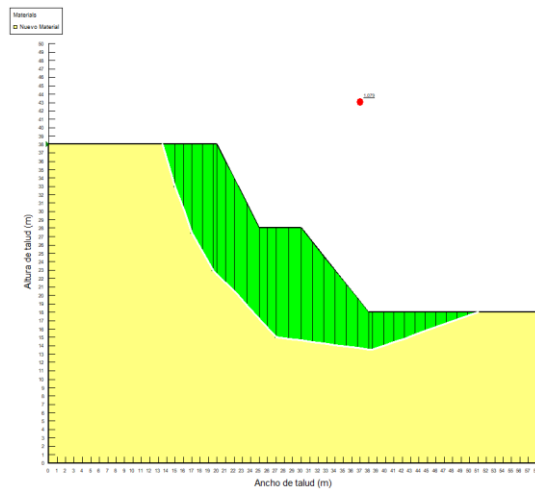
Los resultados anteriores corresponden a los análisis realizados con diferentes planos de falla, por lo cual se procedió a realizar un análisis con la superficie de falla constante.

3.1.2 Slope/w superficie de deslizamiento especificada completamente

A continuación, se presenta la superficie de falla constante que se usó en los modelos para este análisis.

Figura 12.

Superficie de falla constante.

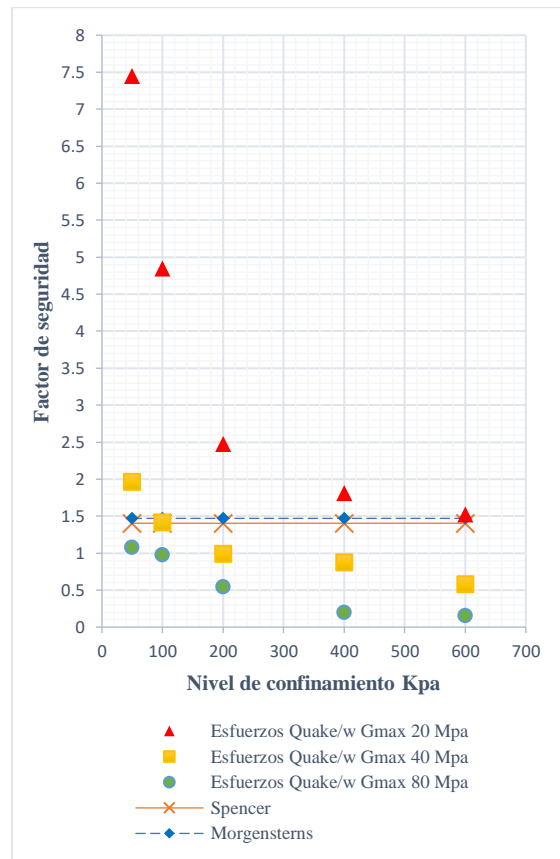


Nota. Tomado de: Slope/w.

En este análisis para cada G_{max} constante se hace una variación del confinamiento (ver tablas 12 – 14 Anexo A y figura 13).

Figura 13.

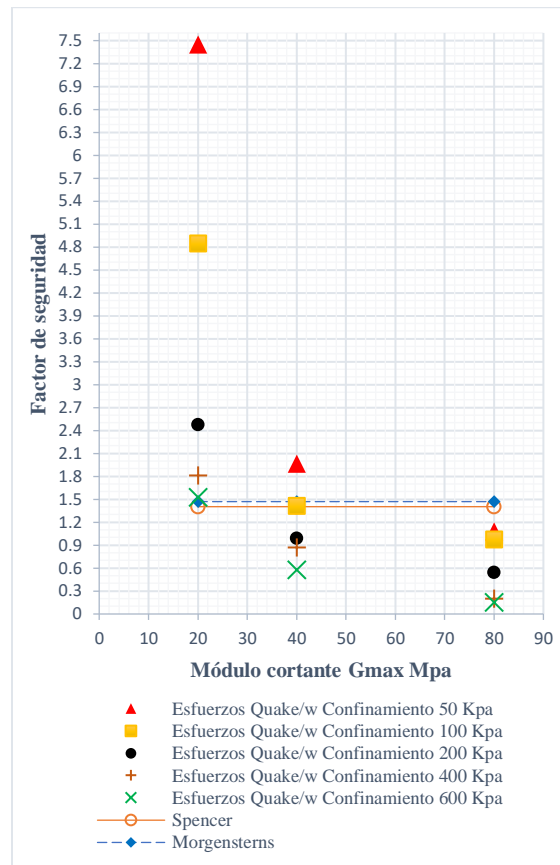
Factores de seguridad falla constante.



Con una falla constante el comportamiento del factor de seguridad es inversamente proporcional al nivel de confinamiento, es decir, mantiene la misma tendencia que en el análisis con una falla variable. Ahora se muestra el análisis para cada nivel de confinamiento constante, pero variando Gmax (ver tablas 15 – 19 Anexo A y figura 14).

Figura 14.

Factores de seguridad falla constante.



El factor de seguridad es menor a medida que el Gmax se aumenta, y presenta su mayor valor cuando el nivel de confinamiento es mínimo.

3.2 Discusión

- Para el análisis a partir de los esfuerzos obtenidos de Quake/w con una superficie de deslizamiento por cuadrícula y radio, el mayor valor de factor de seguridad es de 4.542 y el menor valor es de 0.100.

- Para el análisis a partir de los esfuerzos obtenidos de Quake/w con una superficie de deslizamiento completamente especificada, el mayor valor de factor de seguridad es de 7.448 y el menor valor es de 0.155.
- Para el análisis por la metodología de Spencer con una superficie de deslizamiento completamente especificada, el factor de seguridad es constante con un valor de 1.404.
- Para el análisis por la metodología de Morgensterns con una superficie de deslizamiento completamente especificada, el factor de seguridad es constante con un valor de 1.470.
- Para el análisis por la metodología de Spencer con una superficie de deslizamiento por cuadrícula y radio, el factor de seguridad es constante con un valor de 1.009.
- Para el análisis por la metodología de Morgensterns con una superficie de deslizamiento por cuadrícula y radio, el factor de seguridad es constante con un valor de 1.019.

4. Conclusiones

En el análisis de Slope/w, el talud presento una variación en la zona de falla, se observó que si G_{max} y el confinamiento son altos, la falla es relativamente pequeña concentrándose en la parte superior del talud, y en el caso contrario, cuando estos valores son bajos, el plano de falla es mayor abarcando casi en su totalidad las dos terrazas.

El factor de seguridad evaluado en el software Slope/w, a partir de los resultados de esfuerzos obtenidos de Quake/w, tuvo un comportamiento variable, este factor tuvo su valor más

alto para G_{max} de 20 Mpa y confinamiento de 50 Kpa, y su valor más bajo, es decir, cuando menos estable se comportó el talud, para G_{max} de 80 MPa y confinamiento de 600 Kpa.

El comportamiento del factor de seguridad no tiene la tendencia esperada, cuando G_{max} y el confinamiento son altos, debería tener el mayor valor y cuando G_{max} y el confinamiento son bajos, debería tener el menor valor. Esta anomalía puede atribuirse a que para el modelamiento no se tenía información experimental o real de la función de reducción de G , función de número cíclico (CYC), índice de esfuerzo de corte (K_a) y tensión de sobrecarga (K_s), las cuales fueron definidas por el software. Por esta razón se recomienda realizar un análisis más profundo, haciendo ensayos experimentales u otros que permitan obtener esta información asumida.

El software Slope/w trabaja con equilibrio límite por lo tanto se recomienda también hacer la verificación de este factor de seguridad con otros programas que trabajen otras metodologías de análisis. De igual manera se sugiere en una próxima modelación considerar la existencia de presión de poros en el terreno y analizar en factor de amplificación.

Referencias Bibliográficas

- Alcaldía de Palmira. (s.f.). *Microzonificación sísmica y estudios generales de riesgo sísmico para las ciudades de Palmira, Tuluá y Buga*. . Obtenido de <https://www.palmira.gov.co/attachments/article/816/RESPUESTA%20DIN%20c3%81MIC A%20DEL%20SUBSUELO%20Y.PDF>
- ASTM International. (1996). *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils: ASTM D 1586*. New York: ASTM.
- Geoseismic. (enero de 2018). *La Importancia De Los Taludes En El Mundo De Hoy. Chile*. Obtenido de <http://www.geoseismic.cl/taludes/>
- GEO-SLOPE International Ltd. (Ed.). (2014). *Dynamic Modeling With QUAKE/W (6.a ed., Vol. 1)*. Calgary, Alberta. Canadá: Copyright.
- Lopez Pineda, G. (2017). *Introducción al programa Slope/W 2012*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/321319365_Introduccion_al_programa_Slope_W_2012.
- Morales, C., & Rincón, M. (2013). *Utilización del programa Quake/W para el modelamiento de suelos de cimentación sometidos a sismos*. . Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander.
- Ortiz Pulido, M., Gaitán Serrano, J., & Camacho Tauta, J. (2014). *Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba*. DYNA.
- Pérez, N., & Rojas, A. (2019). *Caracterización geotécnica del sitio de disposición final de residuos “el carrasco” sector “la escombrera” mediante el uso de métodos geofísicos*.

Red Sísmica. (2019). *Efectos*. Obtenido de <http://redsismica.uprm.edu/Spanish/educacion/terremotos/efectos.php>

San Juan Hernández, C. (2017). *¿Qué es un relleno antrópico? Construcción Patología Rehabilitación*. Obtenido de <https://www.patologiasconstruccion.net/2017/02/que-es-un-relleno-anthropico>

Seequent Limited. (octubre de 2015). *GEOSLOPE*. Obtenido de <https://www.geoslope.com/>

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos: Análisis Geotécnico*. Bucaramanga, Colombia: Ingeniería de suelos Ltda.

Apéndices

Apéndice A - Tablas

Tabla 1. Eventos sísmicos.

Sismo	Fecha	Lugar de Epicentro	Magnitud	Estación que Capta los Datos	Lugar de Ubicación de la Estación	Tiempo Duración (S)	Aceleración Pico (g)
LOS SANTOS	10/03/2015	LOS SANTOS	6.4	VEREDA ACAPULCO	GIRON	112	0.07571
CHOCÓ	15/11/2004	BAUDO	6.7	CANCHAS PANAMERICANA	CALI	176	0.07553
QUINDÍO	25/01/1999	CÓRDOBA	6.3	CASTANARE	PEREIRA	90.88	0.21005
CALIMA	8/02/1995	VALLE	6.6	TRUJILLO	CALIMA	99.84	0.11092
BETÚLIA	23/02/1995	BETÚLIA	5.4	PLAYAS	LA PLAYA	20.48	0.01004

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Factores de seguridad falla variable.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	50	20	1.019	1.009	4.542
2	100	20	1.019	1.009	3.058
3	200	20	1.019	1.009	1.709
4	400	20	1.019	1.009	1.257
5	600	20	1.019	1.009	1.003

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Factores de seguridad falla variable.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	50	40	1.019	1.009	1.254
2	100	40	1.019	1.009	0.847
3	200	40	1.019	1.009	0.233
4	400	40	1.019	1.009	0.133
5	600	40	1.019	1.009	0.101

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Factores de seguridad falla variable.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	50	80	1.019	1.009	0.119
2	100	80	1.019	1.009	0.117
3	200	80	1.019	1.009	0.117
4	400	80	1.019	1.009	0.104
5	600	80	1.019	1.009	0.1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Factores de seguridad falla variable.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	50	20	1.019	1.009	4.542
2	50	40	1.019	1.009	1.254
3	50	80	1.019	1.009	0.119

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Factores de seguridad falla variable.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	100	20	1.019	1.009	3.058
2	100	40	1.019	1.009	0.847
3	100	80	1.019	1.009	0.117

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Factores de seguridad falla variable.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	200	20	1.019	1.009	1.709
2	200	40	1.019	1.009	0.233
3	200	80	1.019	1.009	0.117

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Factores de seguridad falla variable.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	400	20	1.019	1.009	1.257
2	400	40	1.019	1.009	0.133
3	400	80	1.019	1.009	0.104

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Factores de seguridad falla variable.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	600	20	1.019	1.009	1.003
2	600	40	1.019	1.009	0.101
3	600	80	1.019	1.009	0.1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Factores de seguridad falla constante.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	50	20	1.47	1.404	7.448
2	100	20	1.47	1.404	4.849
3	200	20	1.47	1.404	2.478
4	400	20	1.47	1.404	1.811
5	600	20	1.47	1.404	1.523

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Factores de seguridad falla constante.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	50	40	1.47	1.404	1.966
2	100	40	1.47	1.404	1.416
3	200	40	1.47	1.404	0.992
4	400	40	1.47	1.404	0.873
5	600	40	1.47	1.404	0.579

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Factores de seguridad falla constante.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	50	80	1.47	1.404	1.079
2	100	80	1.47	1.404	0.977
3	200	80	1.47	1.404	0.546
4	400	80	1.47	1.404	0.2
5	600	80	1.47	1.404	0.155

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Factores de seguridad falla constante.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	50	20	1.47	1.404	7.448
2	50	40	1.47	1.404	1.966
3	50	80	1.47	1.404	1.079

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Factores de seguridad falla constante.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	100	20	1.47	1.404	4.849
2	100	40	1.47	1.404	1.416
3	100	80	1.47	1.404	0.977

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Factores de seguridad falla constante.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	200	20	1.47	1.404	2.478
2	200	40	1.47	1.404	0.992
3	200	80	1.47	1.404	0.546

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Factores de seguridad falla constante.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	400	20	1.47	1.404	1.811
2	400	40	1.47	1.404	0.873
3	400	80	1.47	1.404	0.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Factores de seguridad falla constante.

Modelo	Confinamiento (Kpa)	Gmax (Mpa)	FACTOR DE SEGURIDAD		
			Morgensterns	Spencer	Esfuerzos Quake/W
1	600	20	1.47	1.404	1.523
2	600	40	1.47	1.404	0.579
3	600	80	1.47	1.404	0.155

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice B - Resultados de Slope/w por la metodología de cuadrícula y radio.

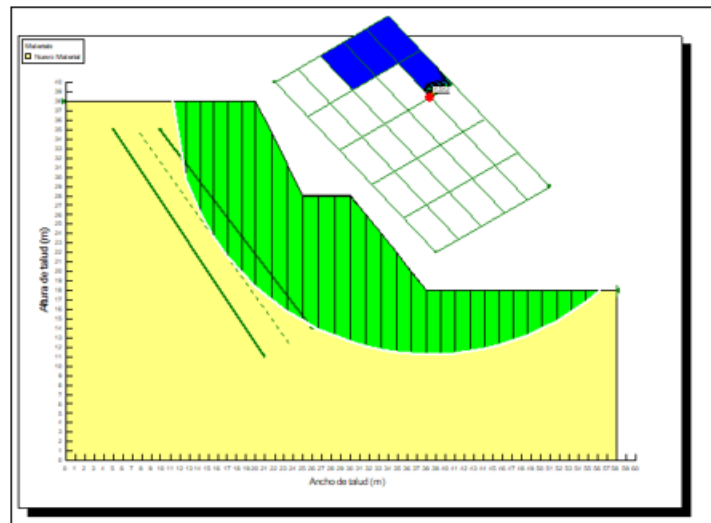


Figura 1. Modelo con Gmax de 20 Mpa y 50 Kpa de confinamiento efectivo.

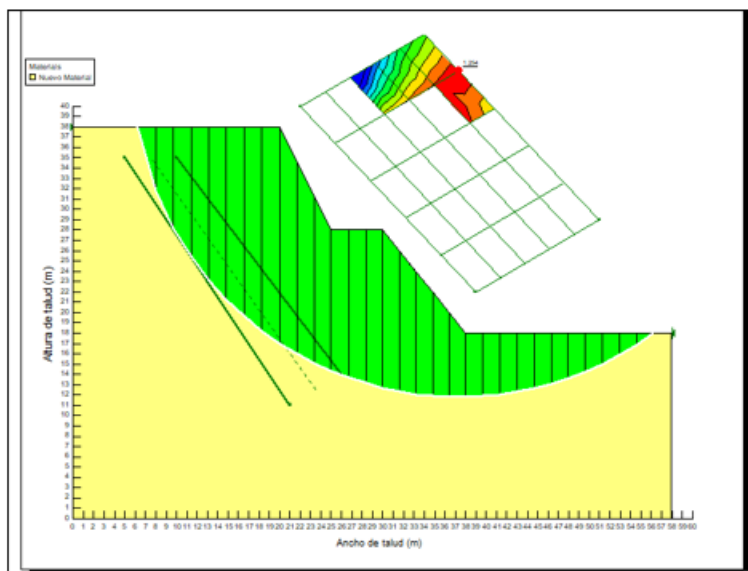


Figura 2. Modelo con Gmax de 40 Mpa y 50 Kpa de confinamiento efectivo.

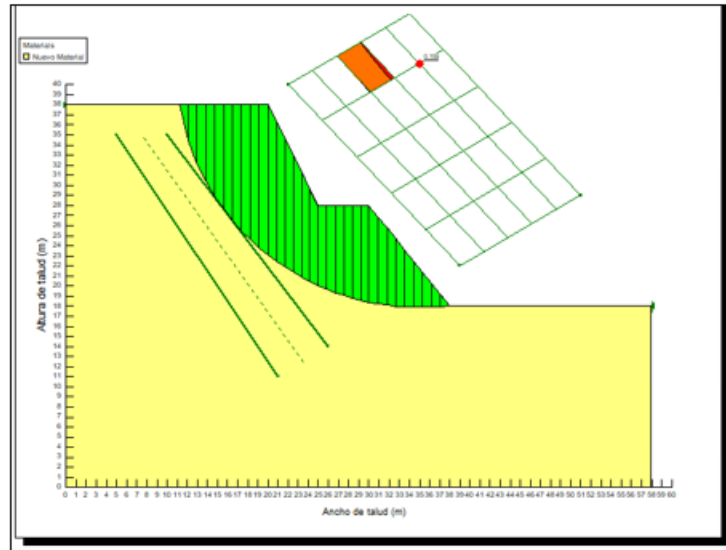


Figura 3. Modelo con G_{max} de 80 Mpa y 50 Kpa de confinamiento efectivo.

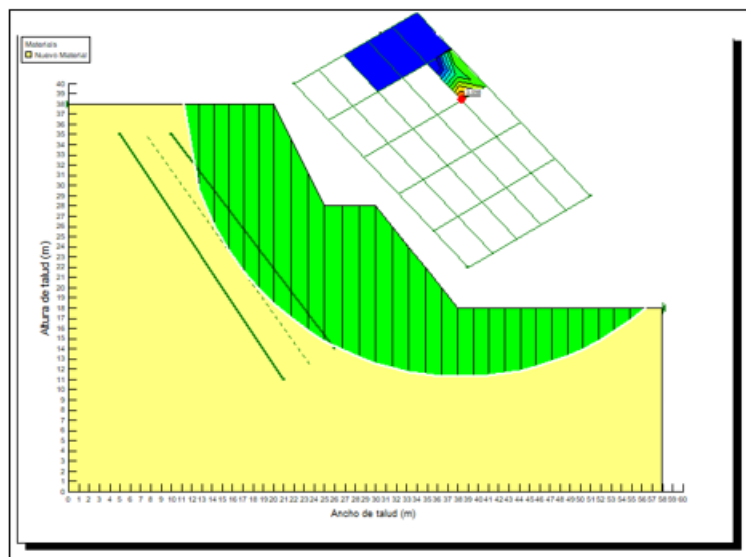


Figura 4. Modelo con G_{max} de 20 Mpa y 100 Kpa de confinamiento efectivo.

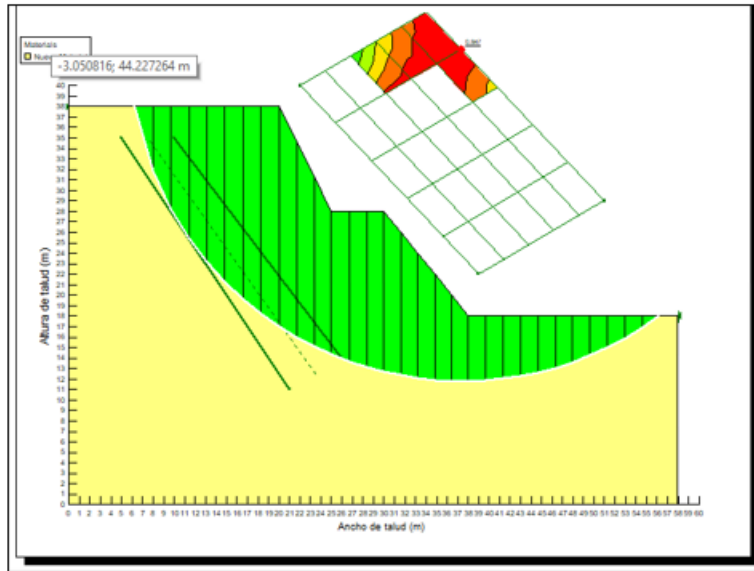


Figura 5. Modelo con G_{max} de 40 Mpa y 100 Kpa de confinamiento efectivo.

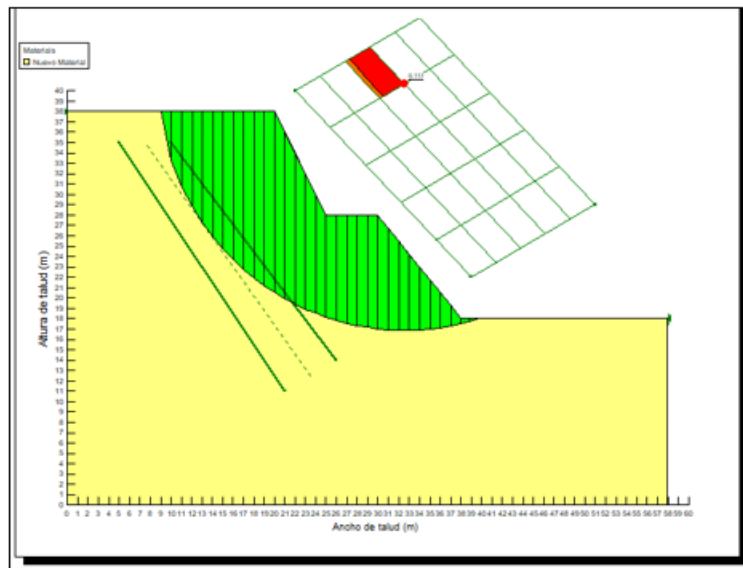


Figura 6. Modelo con G_{max} de 80 Mpa y 100 Kpa de confinamiento efectivo.

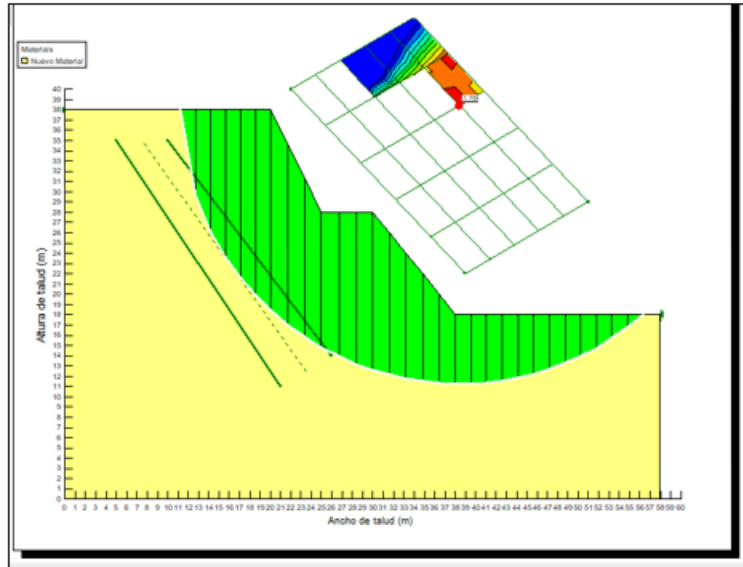


Figura 7. Modelo con Gmax de 20 Mpa y 200 Kpa de confinamiento efectivo.

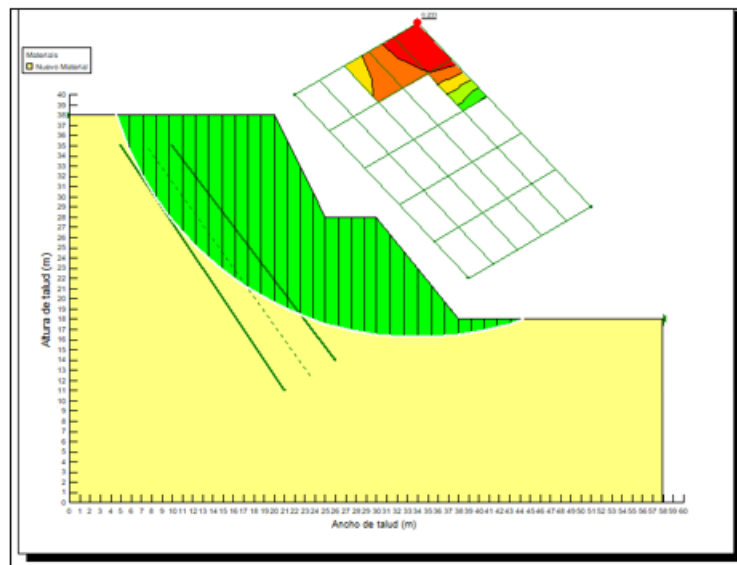


Figura 8. Modelo con Gmax de 40 Mpa y 200 Kpa de confinamiento efectivo.

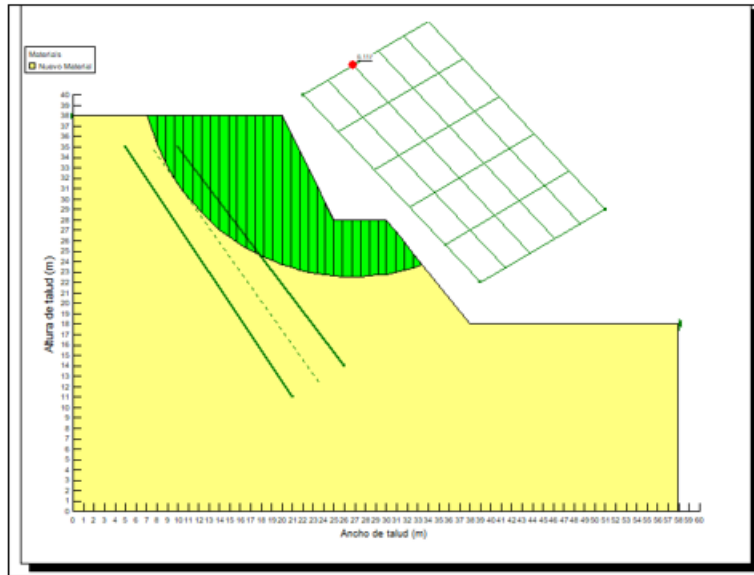


Figura 9. Modelo con G_{max} de 80 Mpa y 200 Kpa de confinamiento efectivo.

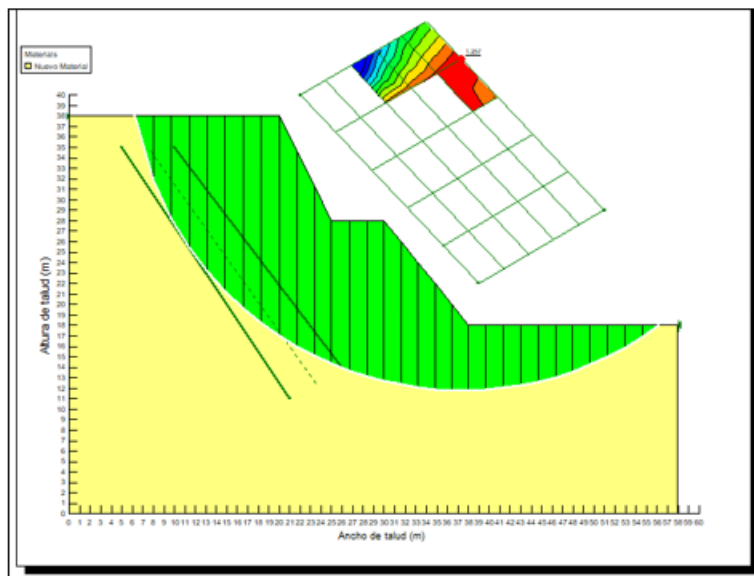


Figura 10. Modelo con G_{max} de 20 Mpa y 400 Kpa de confinamiento efectivo.

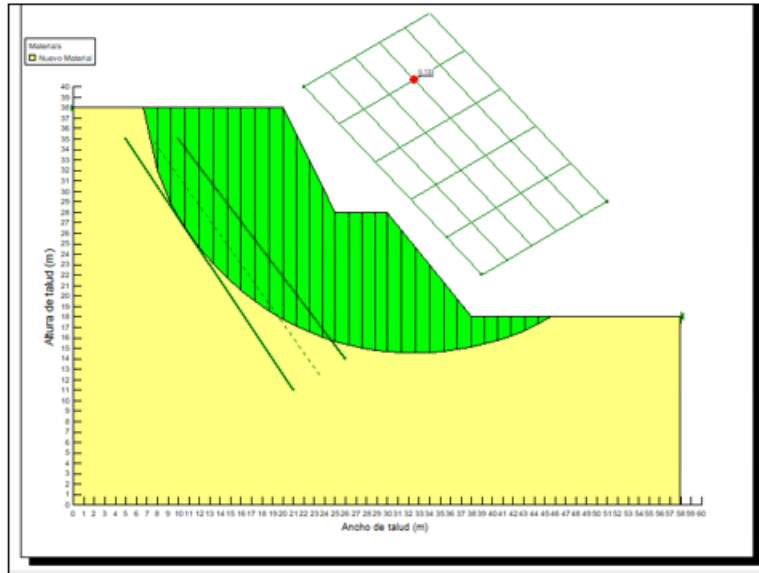


Figura 11. Modelo con G_{max} de 40 Mpa y 400 Kpa de confinamiento efectivo.

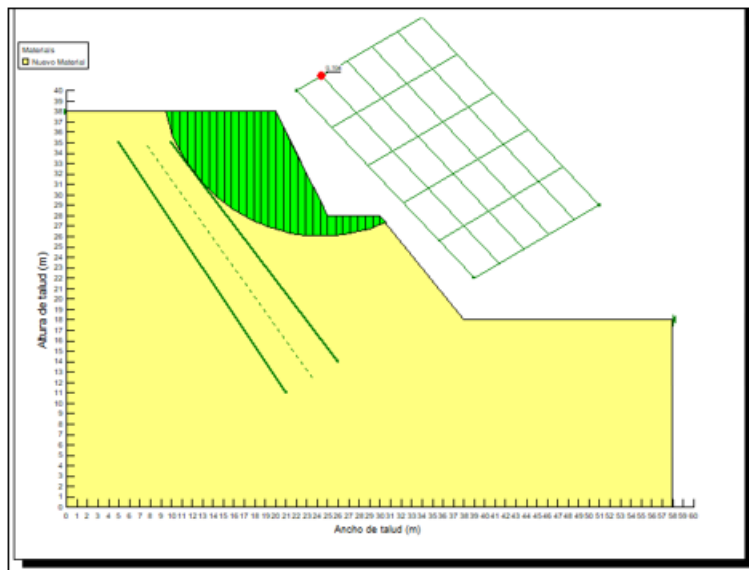


Figura 12. Modelo con G_{max} de 80 Mpa y 400 Kpa de confinamiento efectivo.

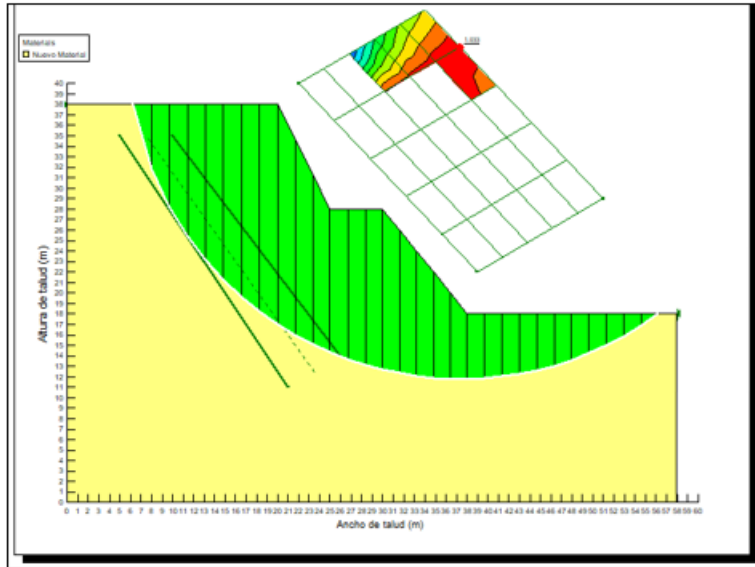


Figura 13. Modelo con G_{max} de 20 Mpa y 600 Kpa de confinamiento efectivo.

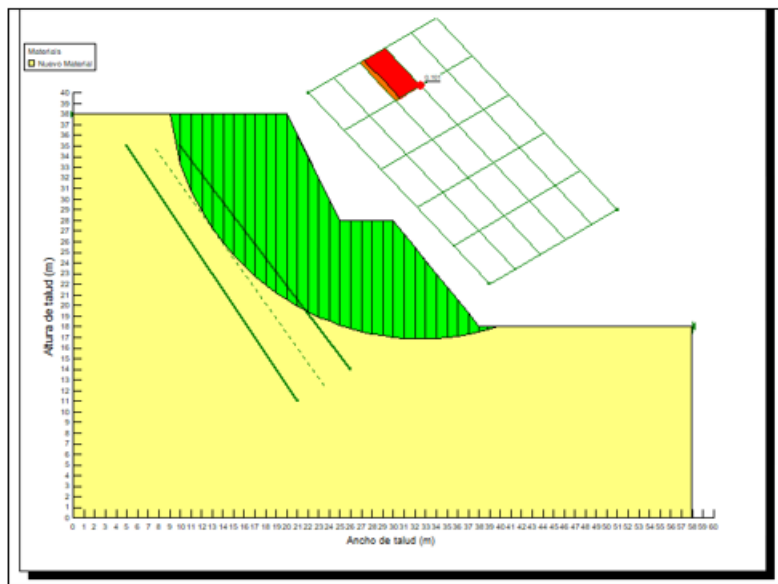


Figura 14. Modelo con G_{max} de 40 Mpa y 600 Kpa de confinamiento efectivo.

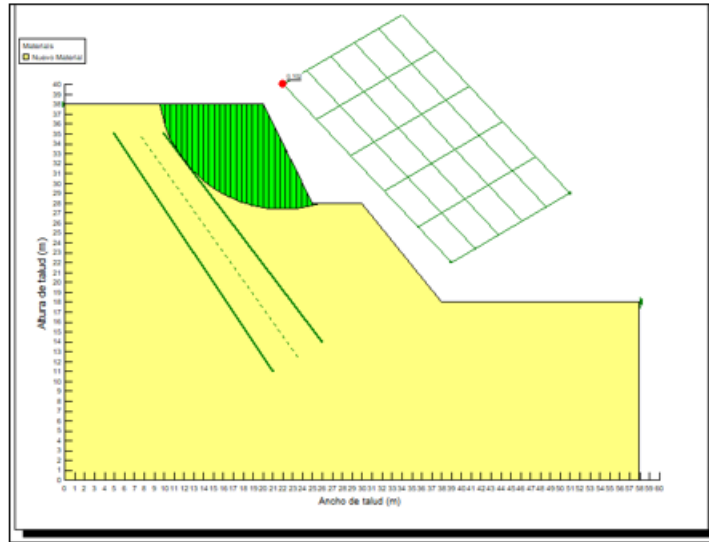


Figura 15. Modelo con G_{max} de 80 Mpa y 600 Kpa de confinamiento efectivo.

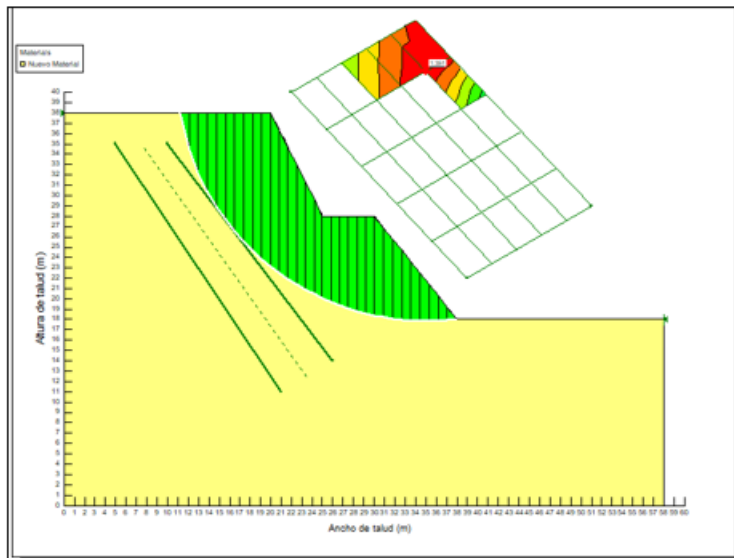


Figura 16. Modelo por la metodología de Spencer.

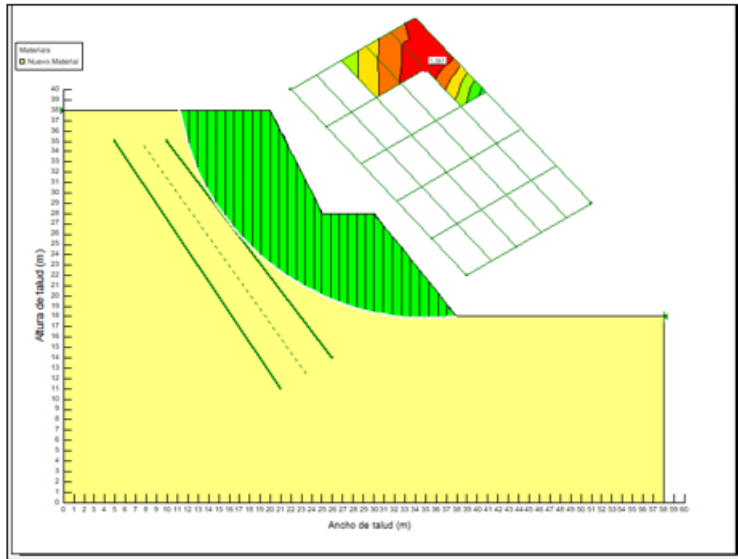


Figura 17. Modelo por la metodología de Morgenstern.

Apéndice C - Resultados de Slope/w por la metodología de superficie de deslizamiento especificada completamente.

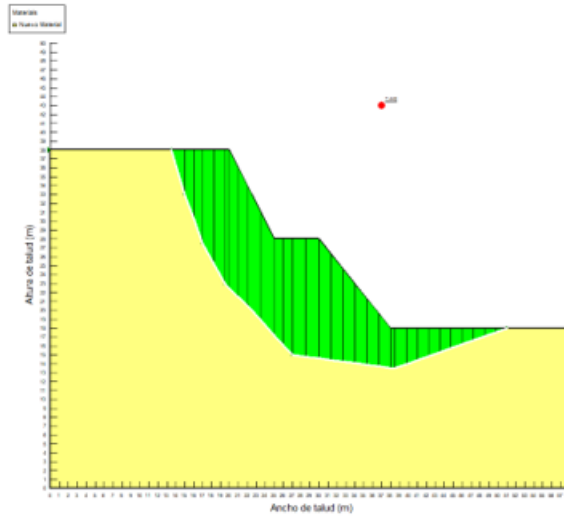


Figura 18. Modelo con Gmax de 20 Mpa y 50 Kpa de confinamiento efectivo.

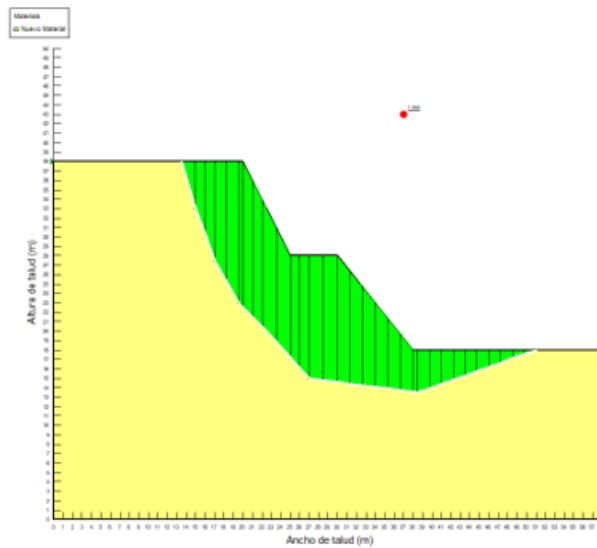


Figura 19. Modelo con Gmax de 40 Mpa y 50 Kpa de confinamiento efectivo.

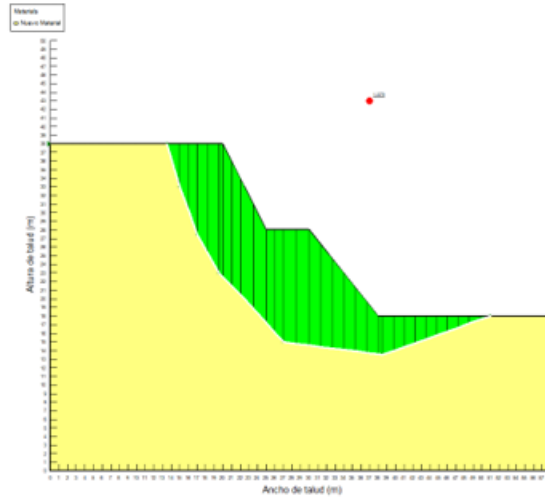


Figura 20. Modelo con G_{max} de 80 Mpa y 50 Kpa de confinamiento efectivo.

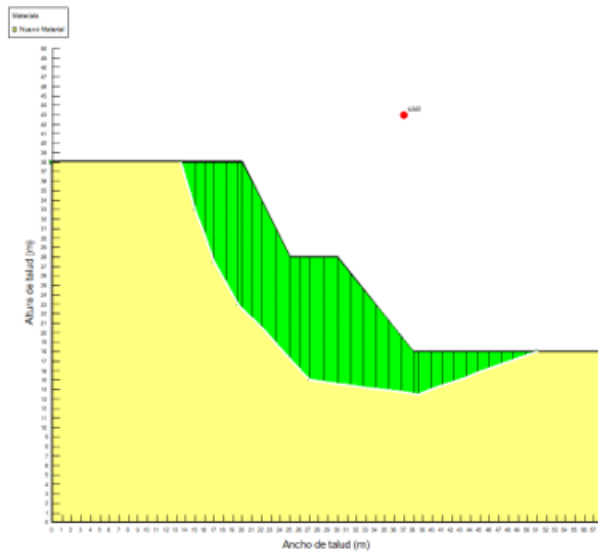


Figura 21. Modelo con G_{max} de 20 Mpa y 100 Kpa de confinamiento efectivo.

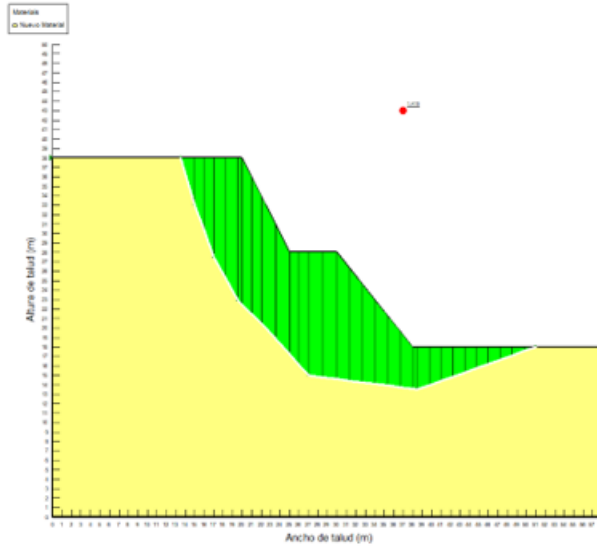


Figura 22. Modelo con G_{max} de 40 Mpa y 100 Kpa de confinamiento efectivo.

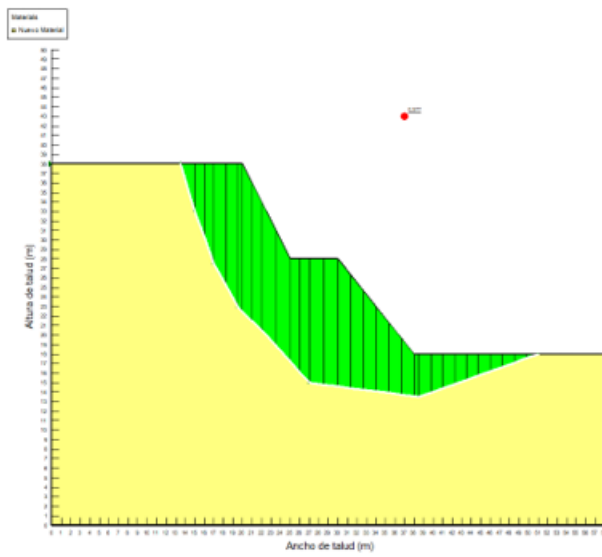


Figura 23. Modelo con G_{max} de 80 Mpa y 100 Kpa de confinamiento efectivo.

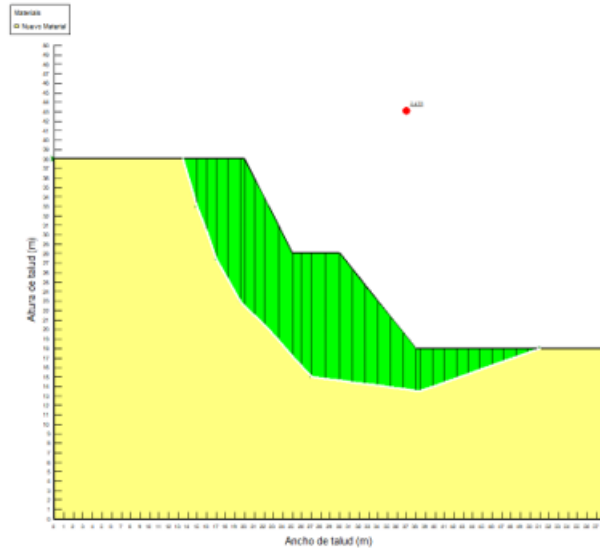


Figura 24. Modelo con G_{max} de 20 Mpa y 200 Kpa de confinamiento efectivo.

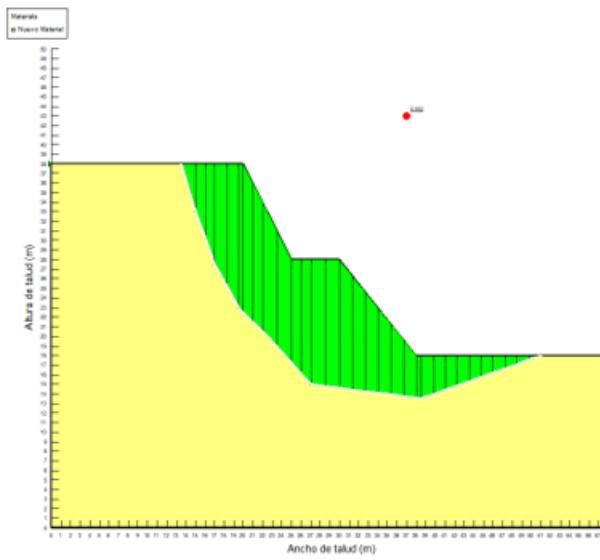


Figura 25. Modelo con G_{max} de 40 Mpa y 200 Kpa de confinamiento efectivo.

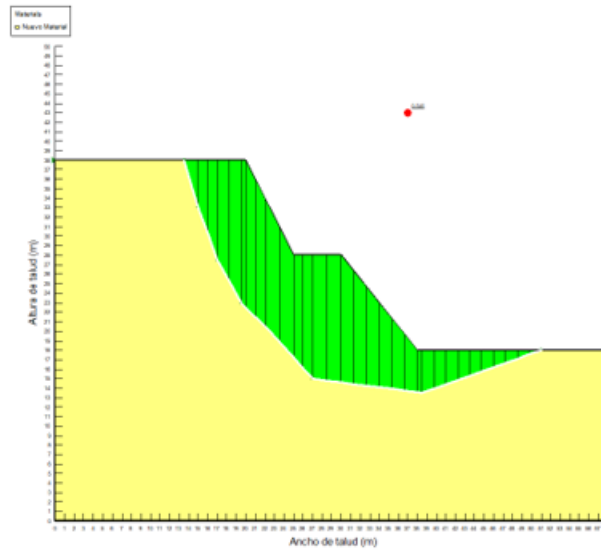


Figura 26. Modelo con G_{max} de 80 Mpa y 200 Kpa de confinamiento efectivo.

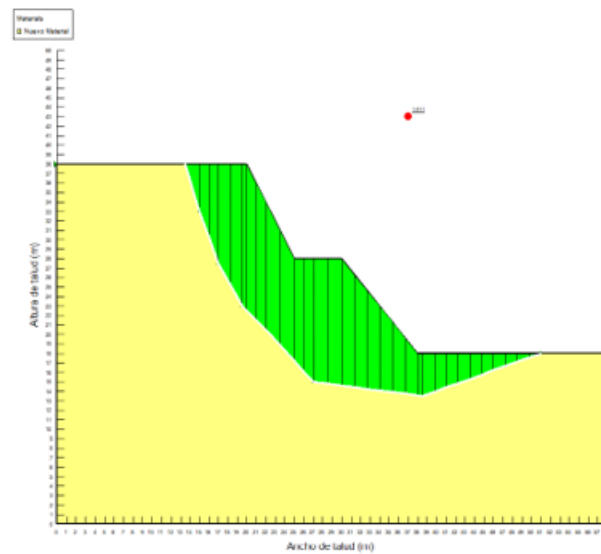


Figura 27. Modelo con G_{max} de 20 Mpa y 400 Kpa de confinamiento efectivo.

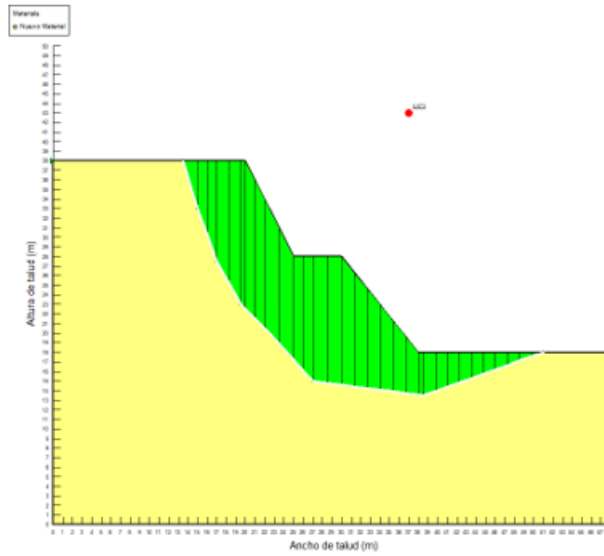


Figura 28. Modelo con G_{max} de 40 Mpa y 400 Kpa de confinamiento efectivo.

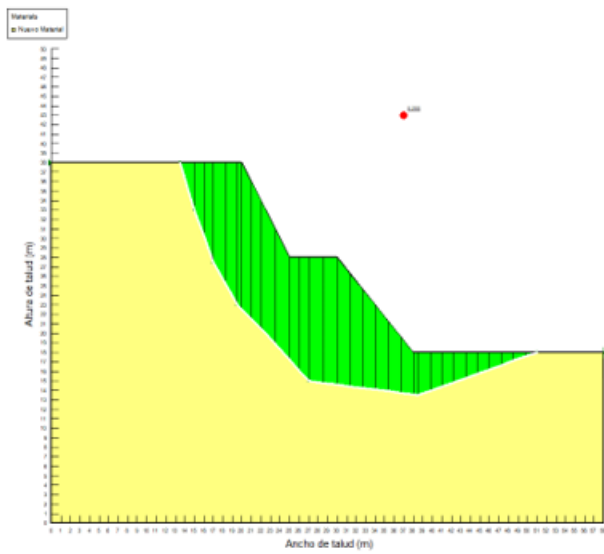


Figura 29. Modelo con G_{max} de 80 Mpa y 400 Kpa de confinamiento efectivo.

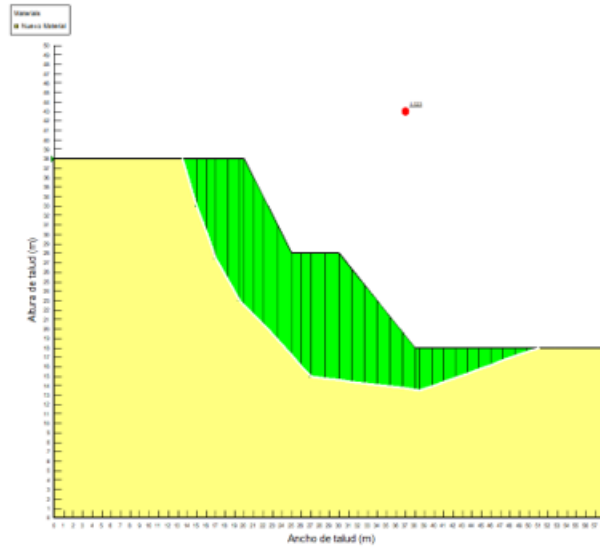


Figura 30. Modelo con Gmax de 20 Mpa y 600 Kpa de confinamiento efectivo.

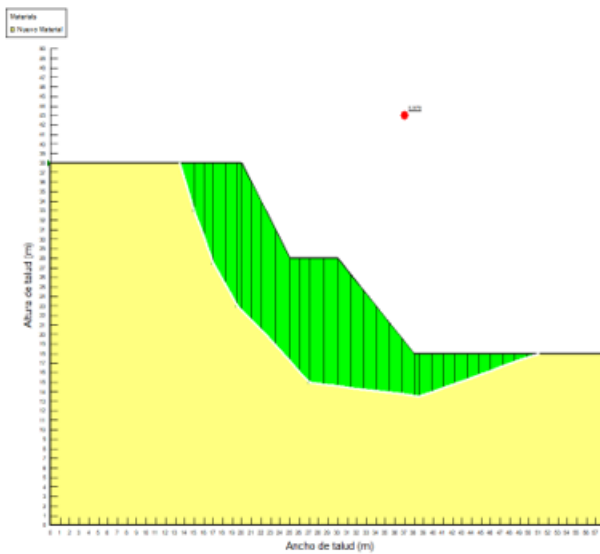


Figura 31. Modelo con Gmax de 40 Mpa y 600 Kpa de confinamiento efectivo.

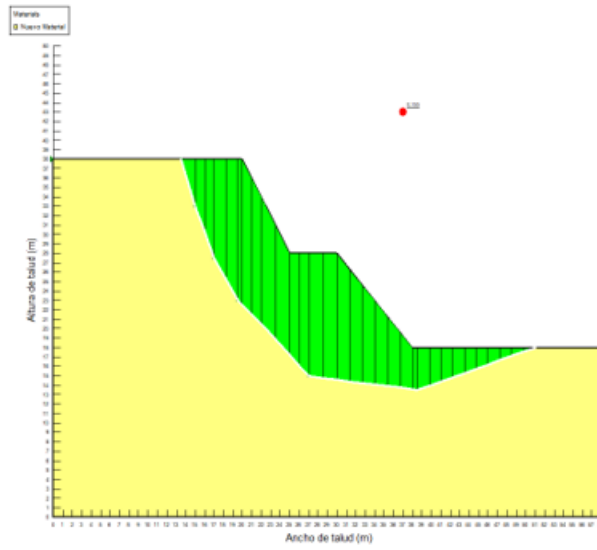


Figura 32. Modelo con G_{max} de 80 Mpa y 600 Kpa de confinamiento efectivo.

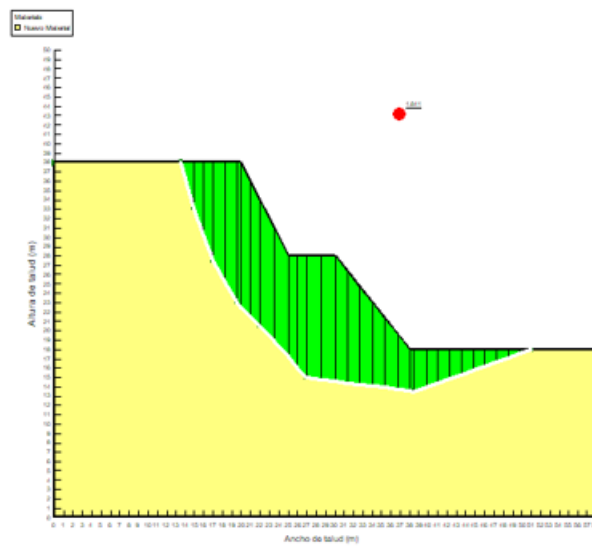


Figura 33. Modelo por la metodología de Spencer.

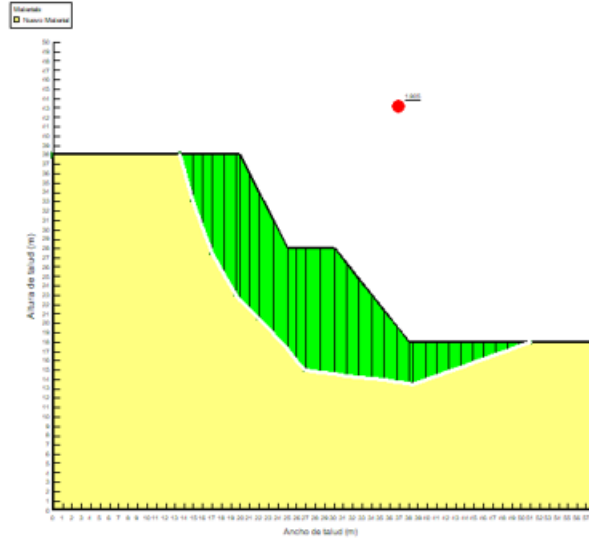


Figura 34. Modelo por la metodología de Morgensterns.