

Análisis paramétrico de la influencia de las variables morfología y aceleración sísmica, en la estabilidad de taludes cohesivos y friccionantes a partir de modelos de equilibrio límite.

Felberth Flechas Velasco¹; Henry Moreno Osorio¹; Carlos Torres Romero²

¹ Estudiante Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
felberthflechas@usantotomas.edu.co; henrymoreno@usantotomas.edu.co

² Docente Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
carlos.torresr@usantotomas.edu.co

Resumen - Se presentan los resultados obtenidos a partir de la realización de 280 modelos de equilibrio límite de diferentes tipos de taludes, en los que se varió tanto las variables morfológicas como la aceleración sísmica horizontal, para un estado seco y saturado. Se realizó un análisis de los datos obtenidos mediante el Software Slide®, de los cuales algunos fueron omitidos, ya que no influían en la estabilidad de los taludes, lo cual se pudo deducir mediante métodos estadísticos. Se obtuvieron cartas de estabilidad tanto para taludes cohesivos como friccionantes, para diferentes valores de coeficiente sísmico. Se encontró que la geometría vista en términos de la altura e inclinación del talud influyen en la estabilidad geotécnica, disminuyendo los factores de seguridad en la medida que estas aumentan. De la misma forma, se encontró que cuando aumenta la aceleración sísmica horizontal, disminuyen los factores de seguridad, lo cual es consecuente con lo que expone la literatura al respecto. Los resultados obtenidos son relevantes, ya que aporta a la práctica de la ingeniería dado que se logró la obtención de ábacos de estabilidad que permiten hacer estimaciones rápidas para taludes regulares, especialmente útiles para determinar alturas críticas en taludes constructivos; resaltando que su aplicación es limitada y no pretende reemplazar el análisis geotécnico detallado de taludes con geoformas irregulares y condiciones complejas de agua, esfuerzos y resistencia. Las limitaciones del trabajo se detallan en el cuerpo del artículo.

Palabras clave: Talud, factor de seguridad, coeficiente sísmico horizontal, aceleración sísmica, variables morfológicas.

Abstract - It presents the results obtained from the realization of 280 limit equilibrium models of different types of slopes, in which both morphological variables and horizontal seismic acceleration were varied, for a dry and saturated state. An analysis of the data obtained using the Slide® Software was carried out, of which some were omitted, since they did not influence the stability of the slopes, which could be deduced by statistical methods. Stability charts were obtained for both cohesive and frictional slopes, for different values of seismic coefficient. It was found that the slope and height influence the geotechnical stability, decreasing the safety factors as they increase. Likewise, it was found that when the horizontal seismic acceleration increases, the safety factors decrease, which is consistent with the literature. The results obtained are relevant, since it contributes to the practice of engineering since stability chart were obtained that allow quick estimations for regular slopes, especially useful to determine critical heights in constructive slopes; emphasize that its application is limited and it is not intended to replace detailed geotechnical analysis of slopes with irregular geoforms and difficult water, stress and resistance conditions. The limitations of the work are detailed in the corpus of the article.

Key words: Slope, safety factor, seismic coefficient horizontal, seismic acceleration, morphological variables.

INTRODUCCIÓN

Colombia ha sido marcada por una serie de sismos que han desencadenado en deslizamientos, principalmente sobre las cordilleras y la zona noroccidental del país, que han dado lugar a catástrofes y pérdidas económicas de gran magnitud (SGC, 2021). Tanto así, que el 21 de abril de 2019 en Rosas Cauca, en el suroeste de Colombia, fueron encontrados sin vida al menos 30 cuerpos de personas que habían desaparecido tras los deslizamientos de tierra ocurridos allí, según informó la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD).

La actividad sísmica en Colombia es tanta, que entre el 26 y el 28 de enero del 2019, el Servicio Geológico Colombiano registró más de 5.100 sismos de diferentes magnitudes, según un reporte realizado por Marta Calvache, directora de geoamenazas de esa entidad (Velásquez, 2019).

El proyecto es relevante para el estado de la práctica del análisis de taludes en proyectos de consultoría, específicamente en la validación de cortes temporales con geometrías regulares, dado que hoy en día se continúan usando métodos simplificados como el de (Taylor, 1937) y (Janbu, 1954), donde se analiza una única superficie de falla que en muchos casos no es la más crítica.

La aceleración sísmica es importante en el análisis geotécnico de estabilidad de taludes ya que es uno de los detonantes, así como lo son el nivel freático y la actividad antrópica; sin embargo, debido a que hoy en día es complejo determinar los valores sísmicos, no se les da mucha importancia a estos. Revisando los registros del servicio geológico colombiano (SGC, s.f.), importantes sismos como los ocurridos en Santander en el 2015, en Nariño en el 2013 o en el Chocó en el 2004, han dado lugar a deslizamientos que han afectado de manera significativa la zona urbana de estas regiones. Dadas estas estadísticas, se busca determinar la influencia de la altura y la inclinación en taludes de materiales cohesivos y friccionantes, para diferentes coeficientes de aceleración sísmica horizontal, a partir de modelos de equilibrio límite, con

el fin de obtener cartas de estabilidad, para su posterior uso en los proyectos de consultoría.

OBJETIVOS

General

Evaluar la influencia en la estabilidad geotécnica de las variables altura e inclinación de taludes en materiales cohesivos y friccionantes para diferentes valores de aceleración sísmica a partir de modelos de equilibrio límite.

Específicos

- Establecer las condiciones geométricas críticas para el estudio de estabilidad de taludes, así como los rangos de aceleración sísmica relevantes para el contexto colombiano.
- Modelar mediante el método de equilibrio límite los diferentes escenarios de geometría y aceleración sísmica en términos del factor de seguridad.
- Analizar los resultados en términos de las variables morfología y aceleración como funciones del factor de seguridad.

METODOLOGÍA

Se realiza una investigación cuantitativa, donde los resultados finales se presentarán en forma de ábacos o cartas de estabilidad.

Se definen las variables de morfología y aceleración sísmica (variables independientes) que van a ser evaluadas mediante el software Slide®, para de este modo determinar el factor de seguridad (F.S.)

En la Tabla 1, se presentan las actividades realizadas o el paso a paso que se llevó a cabo para cumplir los objetivos planteados.

Objetivo	Actividad	Descripción
Establecer las variables independientes (morfológicas y actividad sísmica)	Los actores llegarán a un acuerdo para definir las variables independientes	Las variables independientes son las encargadas de definir las características de los diferentes modelos de taludes
Realizar los modelos con las variables establecidas	Una vez definidas las variables morfológicas (altura e inclinación del talud) y de actividad sísmica (Aceleración horizontal), se van a modelar diferentes taludes en el software.	Los modelos se harán por medio del software Slide, y de los resultados que arroje éste, se usará el más crítico, recopilando la información en Excel
Elaborar las cartas de estabilidad	Luego de tener los datos organizados en una base de datos, se procederá a la construcción de las cartas de estabilidad.	Las cartas de estabilidad construidas servirán de ayuda para el análisis de la influencia de la fuerza sísmica en la estabilidad de taludes.

Tabla 1 Metodología desarrollada en el proyecto

ESTADO DEL ARTE

El estudio de estabilidad de taludes inicio con el nacimiento mismo de la mecánica de los suelos a partir de la publicación del libro de Terzaghi (1925) *Erdbaumechanik*. Posteriormente, Fellenius (1936) realiza uno de los primeros métodos de análisis para la estabilidad de taludes denominado método de dovelas, el cual divide toda la masa de suelo que está sobre la superficie de falla en tajadas verticales, y éste se haya por medio de métodos de equilibrio límite, el cual supone que, a lo largo de la superficie de falla, las fuerzas resistentes y actuantes son iguales, y su factor de seguridad tiene un valor de uno (1.0). Autores como Taylor (1937), Janbu (1954), Bishop (1955), Morgentern & Price (1965), Spencer (1967) y Bell (1968), Terzaghi, Peck, & Mesri, (1996) han estudiado y propuesto variaciones sobre el método de equilibrio límite, perfeccionándolo con el tiempo hasta llegar a las versiones más recientes del mismo. Uno de los trabajos más importantes en cuanto a los ábacos o cartas de estabilidad se refiere es el publicado por (Taylor, 1937) titulado “Stability of Earth Slopes”, donde concluye que para encontrar el factor de seguridad de un talud, es necesario determinar un número de estabilidad, esto mediante una serie de ábacos simplificados y una ecuación, sin embargo, con este análisis, sólo se puede

determinar el factor de seguridad de algunos taludes, con las siguientes características:

- El suelo debe ser homogéneo
- El suelo debe estar apoyado sobre un manto rígido
- El suelo tiene un ángulo de fricción igual a cero

Posteriormente, Scott, Sitar, Lysmer, & Deng (1997) publican un artículo, en el cual tratan la influencia que tiene la topografía en la respuesta sísmica que presentan los taludes. Dichos autores estudian la forma en cómo las ondas sísmicas se amplifican desde el pie hasta la corona del talud, y mencionan que la respuesta sísmica de éste se puede normalizar, ya que la longitud de la onda y la altura del talud tienen una relación directa, algo que May (1980) había denotado para las ondas SH años atrás, las cuales, son las que generan esfuerzos de corte en las capas de suelo y producen efectos en la superficie, denominadas ondas secundarias horizontales. Este artículo sirve como base para entender el comportamiento de las ondas sísmicas, más no cómo afecta la resistencia misma del talud, ya que está enfocado hacia la ingeniería sísmica.

Luego, con la invención de nuevas tecnologías y la implementación de los sistemas de información geográficas (SIG), Alzate, Guevara, & Valero (1999) realizaron la zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa, donde se tuvieron en cuenta factores detonantes como lo son el agua y la sismicidad. Para ello se empleó una fórmula establecida por Van Westen (1993), la cual permite determinar el factor de seguridad con base en el periodo de recurrencia de lluvia y de sismo, se asumieron 9 escenarios, cada uno con un periodo de retorno de sismo y de precipitación diferente. En este se determinó que estos dos factores incidían en gran manera en el deslizamiento de un talud, mostrando que, en varios taludes, el riesgo era muy alto, y el talud era prácticamente inestable.

Osorio (2012) realiza un trabajo de grado en el cual estudia la estabilidad que presentan taludes de 5, 15 y 30 m de altura, influenciados por el contenido frecuencial de cargas dinámicas, a partir de elementos finitos. En sus resultados menciona que los taludes de 15 y 30 m de altura muestran amplificación, mientras

que el de 5 m atenúa en la mayoría de los casos. También dice que los taludes de materiales blandos y medios amplifican hasta 4 veces la señal de entrada, mientras que los firmes la amplifican máximo hasta 2.5 veces. Su aporte más importante es que los esfuerzos cortantes críticos se presentan en la parte media del talud, ya que es donde en un tiempo específico, se encuentran las señales del sismo y las señales reflejadas por la cara del talud hacia el interior. Así mismo, en la corona del talud, se encuentra el punto mínimo de corte.

En la actualidad se están realizando análisis, en su mayoría pseudoestáticos, de taludes en condición sísmica que estén en riesgo de colapso, como es el caso de la tesis presentada por Cevallos & Castro (2016), titulada, “Evaluación de la estabilidad de taludes de la presa “El Azúcar” mediante el método pseudoestático y Newmark de desplazamientos en condición sísmica”, en el que evalúan la condición de los taludes, cuando hay presencia de sismos, todo esto con ayuda del software Slide 7.0, en el cual analizaron la probabilidad de ocurrencia de un sismo en esta zona, que tiene una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, donde concluyeron que no existirían deslizamientos.

VARIABLES DE ANÁLISIS

Al ser el estudio de una estructura geotécnica, las variables necesarias para el análisis de estos son las características y propiedades del tipo de suelo, y la geometría del talud. Se decidió establecer un único valor de peso específico, con el fin de disminuir las variables aleatorias del modelo y dado que es un valor promedio tanto para suelos cohesivos como friccionantes. Las variables de geometría se variaron, basados en las alturas e inclinaciones más comunes que se usan al realizar cortes para taludes temporales; así mismo, la aceleración sísmica se varió en el rango presentado en la Tabla 2 y la Tabla 3, ya que, para un análisis pseudoestático, es común variar el coeficiente sísmico entre 0.0 g y 0.4 g dada la respuesta de los materiales naturales presentes en el territorio colombiano, según menciona Suárez-Díaz (2017). Adicionalmente, se tuvo en cuenta la presencia o ausencia del nivel freático dentro de los modelos.

Los diferentes métodos que existen en la actualidad para estudiar la estabilidad de los taludes tienen en cuenta estos valores, por lo que su precisión depende de los mismos.

En la Tabla 2 se presentan las variables adoptadas para suelos cohesivos:

Suelos cohesivos				
γ (KN/m3)	C (Kpa)	H (m)	β (°)	Sismo (g)
16	10 20 30	5	30	0
		10	45	0,1
		15	60	0,2
		20	75	0,3
		20	90	0,4

Tabla 2 Variables adoptadas para suelos cohesivos

En las figuras 1 y 2 se presenta el modelo geométrico analizado de algunos taludes de suelos cohesivos secos realizados en el software Slide ®:

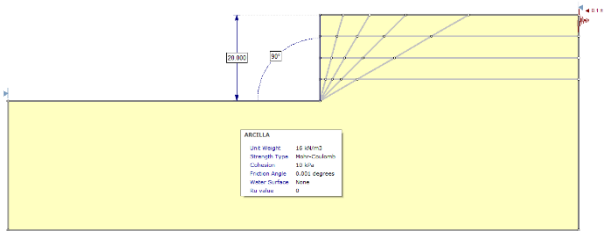


Figura 1 Modelo de talud cohesivo, seco y más crítico por su geometría (H=20 m, $\beta=90^\circ$)

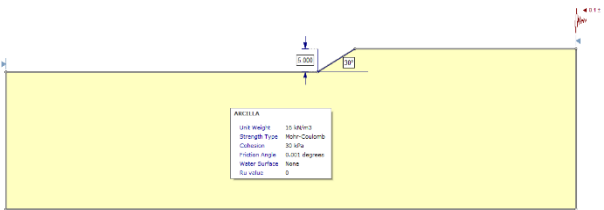


Figura 2 Modelo de talud cohesivo, seco y menos crítico por su geometría (H=5 m, $\beta=30^\circ$)

La representación gráfica de algunos taludes de suelos cohesivos saturados realizados en el software Slide, se presentan en las figuras 3 y 4:

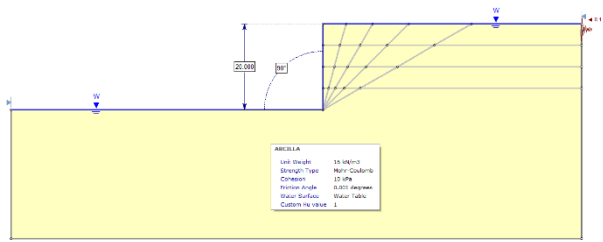


Figura 3 Modelo de talud cohesivo, saturado y más crítico por su geometría ($H=20\text{ m}$, $\beta=90^\circ$)

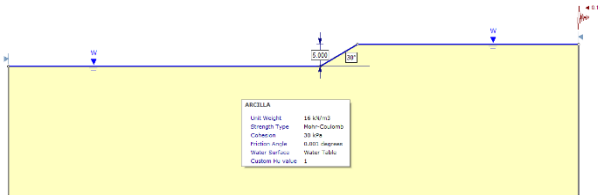


Figura 4 Modelo de talud cohesivo, saturado y menos crítico por su geometría ($H=5\text{ m}$, $\beta=30^\circ$)

En la Tabla 3 se presentan las variables adoptadas para suelos friccionantes:

Suelos friccionantes				
γ (kN/m ³)	ϕ (°)	H (m)	β (°)	Sismo (g)
16	10	5	30	0
	20	10	45	0,1
	30	15	60	0,2
	40	20	75	0,3
			90	0,4

Tabla 3 Variables adoptadas para suelos friccionantes

La representación gráfica de algunos taludes de suelos friccionantes secos realizados en el software Slide se presentan en las figuras 5 y 6:

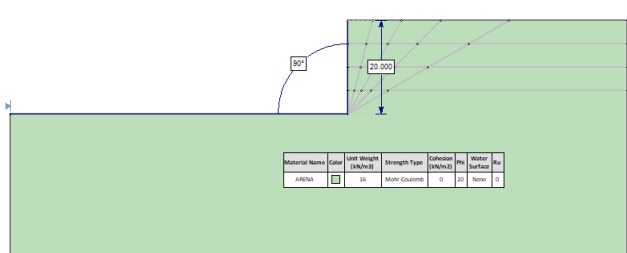


Figura 5 Modelo de talud friccionante, seco y más crítico por su geometría ($H=20\text{ m}$, $\beta=90^\circ$)

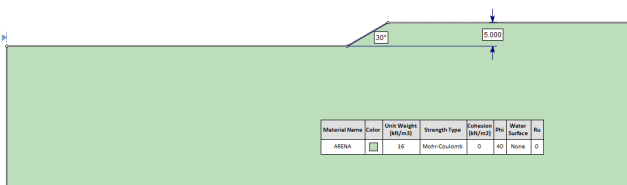


Figura 6 Modelo de talud friccionante, seco y más crítico por su geometría ($H=20\text{ m}$, $\beta=30^\circ$)

La representación gráfica de algunos taludes de suelos friccionantes saturados realizados en el software Slide se presentan en las figuras 7 y 8:

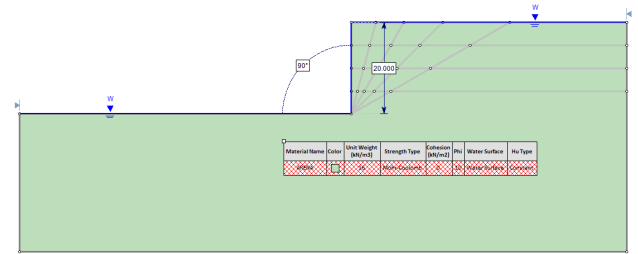


Figura 7 Modelo de talud friccionante, saturado y más crítico por su geometría ($H=20\text{ m}$, $\beta=90^\circ$)

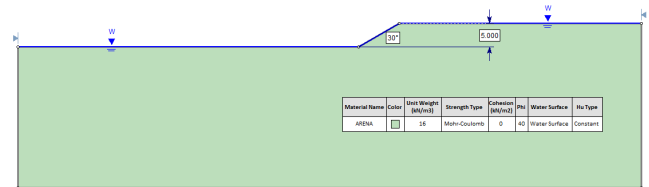


Figura 8 Modelo de talud friccionante, saturado y menos crítico por su geometría ($H=5\text{ m}$, $\beta=30^\circ$)

El software Slide permitió realizar el modelo para un total de 50 valores de coeficiente sísmico horizontal (entre 0 g y 0.4 g). Para la realización de los ábacos, se usaron las variables sísmicas ya mencionadas en las tablas 2 y 3.

Para poder generar las cartas de estabilidad, y que estas sean fáciles de interpretar, se decidió dividir la morfología, el nivel freático y el sismo, en los siguientes escenarios de análisis:

- Suelo cohesivo - sin sismo - seco.
- Suelo cohesivo - sin sismo - con nivel freático en la superficie.
- Suelo cohesivo - con sismo - seco.
- Suelo cohesivo - con sismo - con nivel freático en la superficie.
- Suelo friccionante - sin sismo - seco.
- Suelo friccionante - con sismo - seco.
- Suelo friccionante - con sismo - con nivel freático en la superficie.

RESULTADOS

Mediante el software Slide, se realizaron 280 modelos de taludes con presencia de sismo horizontal, variando las morfología, la geometría y la presencia o ausencia del nivel freático.

De estos modelos, se obtiene el valor del factor de seguridad (F.S) para cada combinación de variables, dependiendo de la magnitud del sismo horizontal, la cual varía entre 0 g y 0.4 g; donde g es la aceleración de la gravedad = 9.81 m/s^2

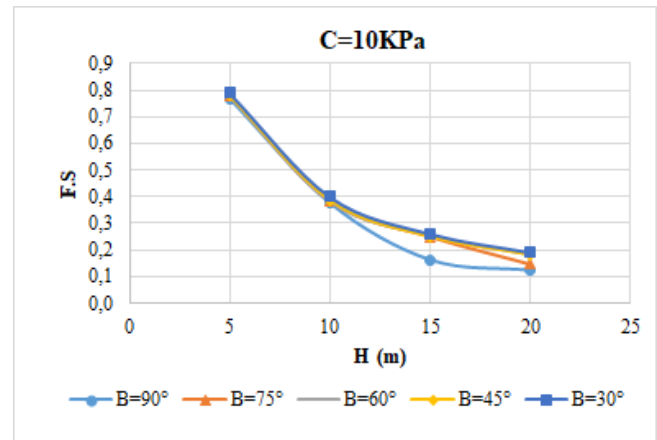
Suelos cohesivos

a. Suelo cohesivo, sin sismo y seco.

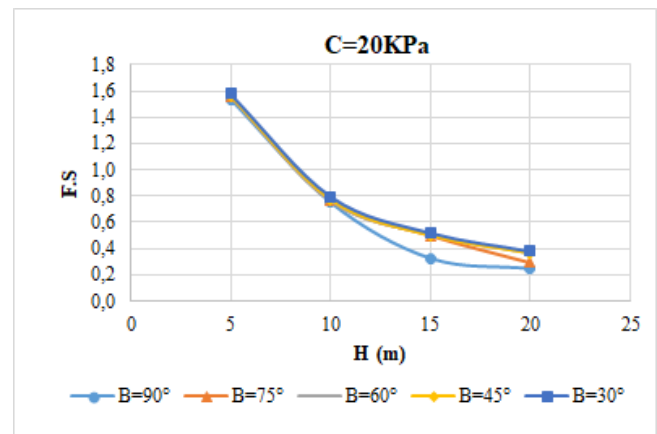
A partir de los resultados arrojados por medio de los modelos, se obtienen los valores de factor de seguridad (F.S.), que resultan de las combinaciones de las variables cohesión, altura e inclinación, además, estando seco y sin ser influenciado por la presencia de sismo.

A partir de estos resultados, se realizan diferentes gráficas para poder llegar a la carta de estabilidad. Como, por ejemplo, las mostradas en las gráficas 1 a la 9.

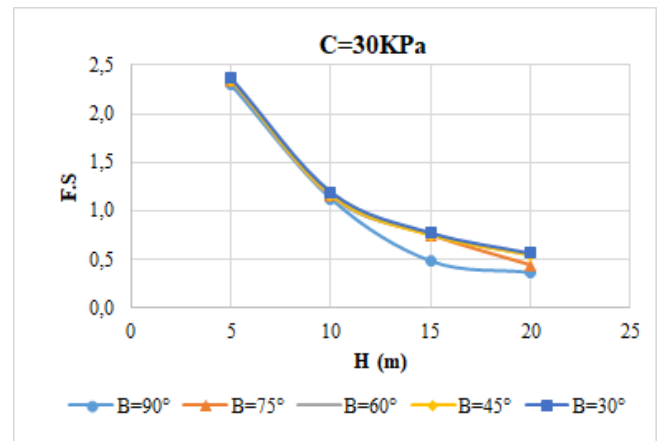
Las gráficas 1, 2 y 3 son las correspondientes a los resultados obtenidos de los modelos sin sismo, en una condición seca, con cohesión única, altura e inclinación variable, donde se puede evidenciar que el ángulo de inclinación no tiene influencia en la estabilidad del talud, observándose que todas las curvas convergen a los mismos valores; excepto para alturas mayores a 10.0m y con una inclinación de 90° , ya que el F.S disminuye con respecto a las otras inclinaciones.



Gráfica 1 F.S. Vs Altura, variando la inclinación y manteniendo la cohesión constante (10 Kpa)



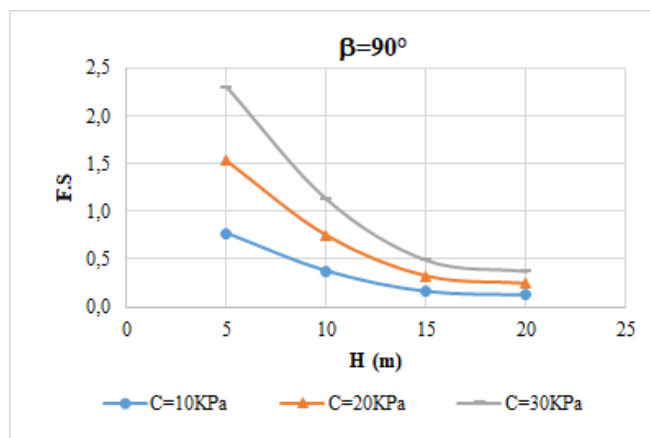
Gráfica 2 F.S. Vs Altura, variando la inclinación y manteniendo la cohesión constante (20 KPa)



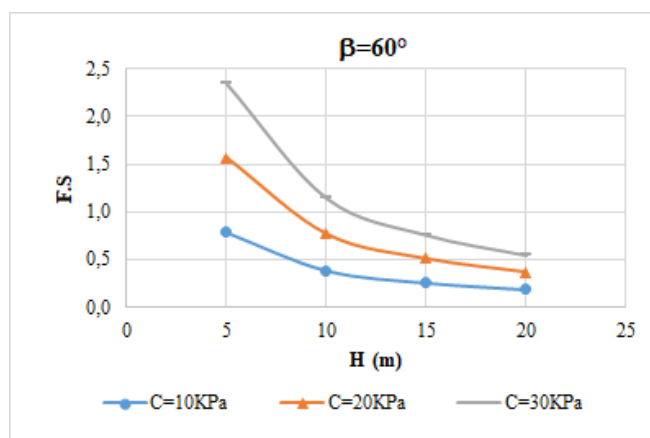
Gráfica 3 F.S. Vs Altura, variando la inclinación y manteniendo la cohesión constante (30 KPa)

Las gráficas 4, 5 y 6 son las correspondientes a los resultados obtenidos de los modelos sin sismo, en una condición seca, con inclinación única, altura y cohesión variable, donde se observa que la cohesión aumenta el factor de seguridad de manera proporcional y que la

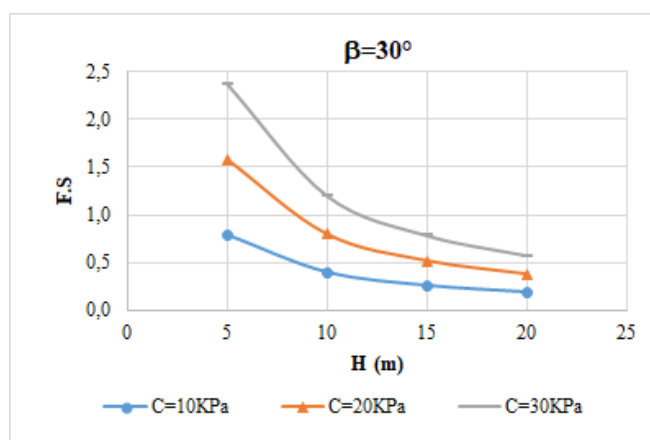
altura es el factor que más influye en la estabilidad de estos.



Gráfica 4 F.S. Vs Altura, variando la cohesión y manteniendo la inclinación constante ($\beta=90^\circ$)



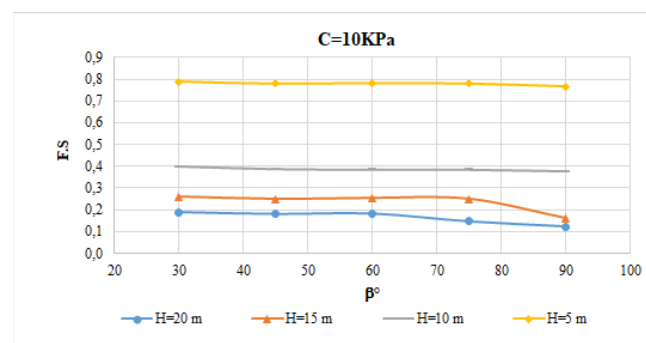
Gráfica 5 F.S. Vs Altura, variando la cohesión y manteniendo la inclinación constante ($\beta=60^\circ$)



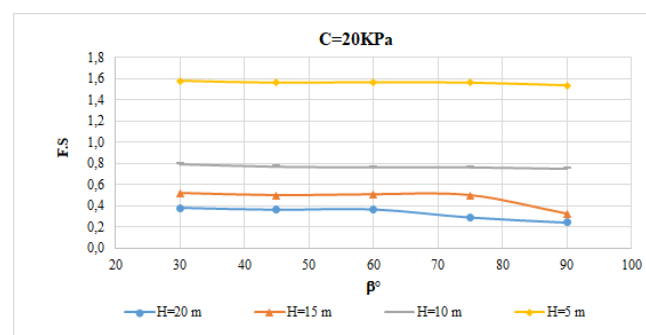
Gráfica 6 F.S. Vs Altura, variando la cohesión y manteniendo la inclinación constante ($\beta=30^\circ$)

Las gráficas 7, 8 y 9 son las correspondientes a los resultados obtenidos de los modelos sin sismo, en una condición seca, con cohesión única, altura e inclinación

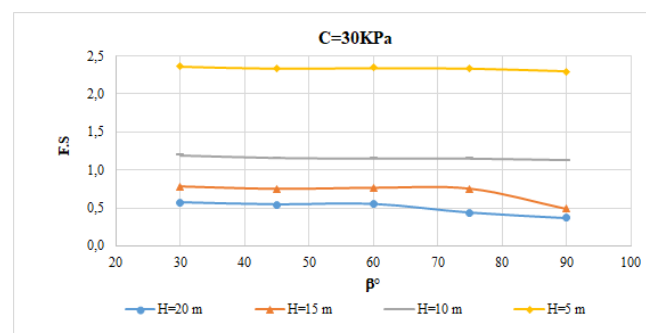
variable, donde se muestra que, sin importar la inclinación del talud, las gráficas presentan una tendencia horizontal, teniendo el mismo factor de seguridad para todas las inclinaciones, y se evidencia que decrecen en el mismo punto que las gráficas 1, 2 y 3, sin importar su cohesión, ya que, con inclinación de 75° , decrece a partir de una altura de 15.0m, mientras que para una inclinación de 90° , decrece a partir de una altura de 10 m. .



Gráfica 7 F.S. Vs Inclinación, variando la altura y manteniendo la cohesión constante ($C=10 \text{ KPa}$)



Gráfica 8 F.S. Vs Inclinación, variando la altura y manteniendo la cohesión constante ($C=20 \text{ KPa}$)



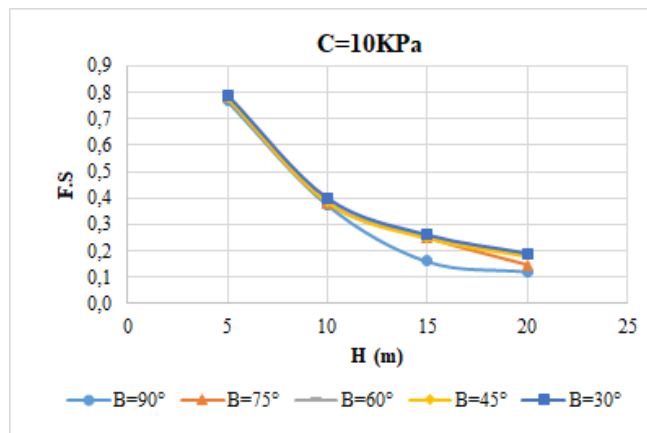
Gráfica 9 F.S. Vs Inclinación, variando la altura y manteniendo la cohesión constante ($C=30 \text{ KPa}$)

- b. Suelo cohesivo, sin sismo y con nivel freático en la superficie.

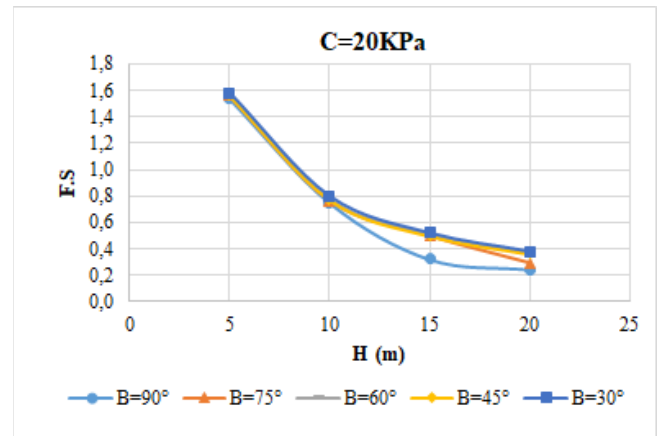
A partir de los resultados arrojados por medio de los modelos, se obtienen los valores de factor de seguridad (F.S.) que resultan de las combinaciones de las variables cohesión, altura e inclinación, además, con la presencia del nivel freático en la superficie y sin ser influenciado por la presencia de sismo.

A partir de estos resultados, se realizan diferentes gráficas para poder llegar a los resultados mostrados en las gráficas 10 a la 18.

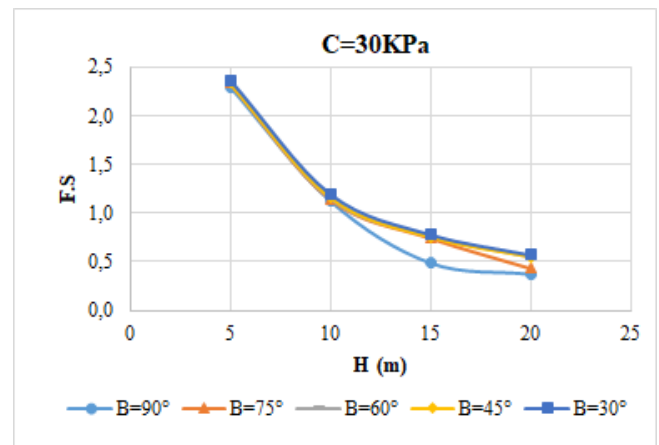
En las gráficas 10, 11 y 12, se presentan los resultados del análisis sin sismo, con nivel freático en la superficie, cohesión única, altura e inclinación variable. Se observa que presentan gran similitud con las gráficas 1, 2 y 3, siendo prácticamente iguales, lo cual indica que, para un suelo no drenado, la presencia o ausencia de agua no tiene influencia en la estabilidad de los taludes. Se evidencia al igual que estas gráficas, el ángulo de inclinación sólo afecta cuando es de 90° (vertical) y tiene alturas mayores a 10 m.



Gráfica 10 F.S. Vs Altura, variando la inclinación y manteniendo la cohesión constante (10 KPa)

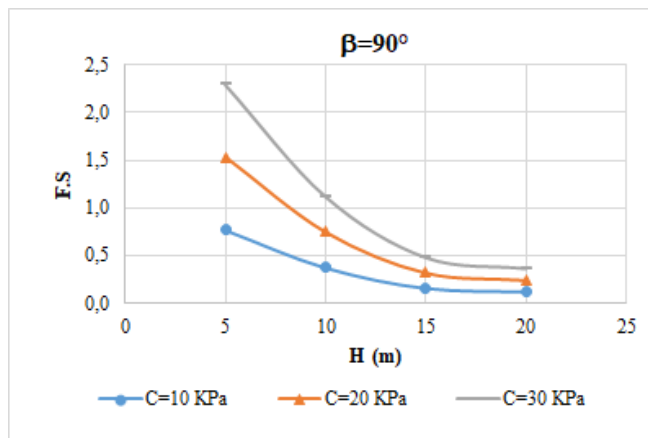


Gráfica 11 F.S. Vs Altura, variando la inclinación y manteniendo la cohesión constante (20 KPa)

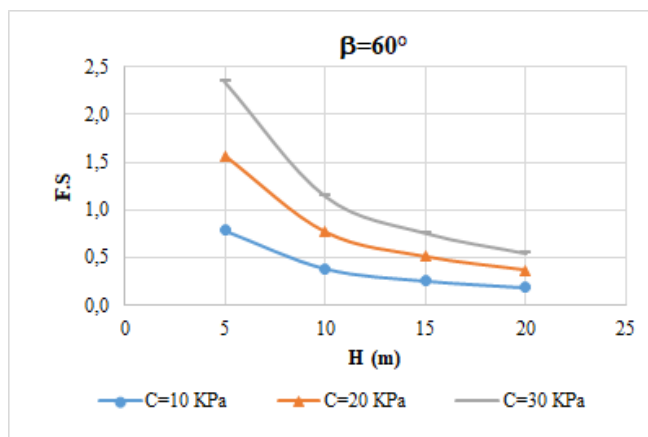


Gráfica 12 F.S. Vs Altura, variando la inclinación y manteniendo la cohesión constante (30 KPa)

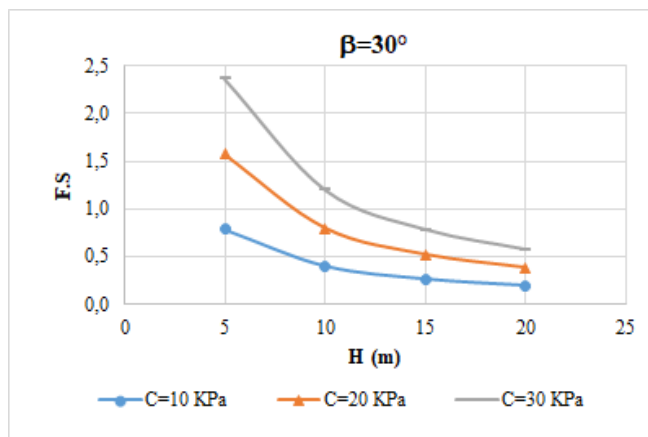
En las gráficas 13, 14 y 15, se presentan los resultados del análisis sin sismo, con nivel freático en la superficie, inclinación única, altura y cohesión variable. Se evidencia que el ángulo de inclinación tampoco afecta la estabilidad de los taludes cohesivos saturados, y al igual que en las gráficas 4, 5 y 6, la altura sigue siendo la variable más importante, ya que es inversamente proporcional al F.S.



Gráfica 13 F.S. Vs Altura, variando la cohesión y manteniendo la inclinación constante ($\beta=90^\circ$)

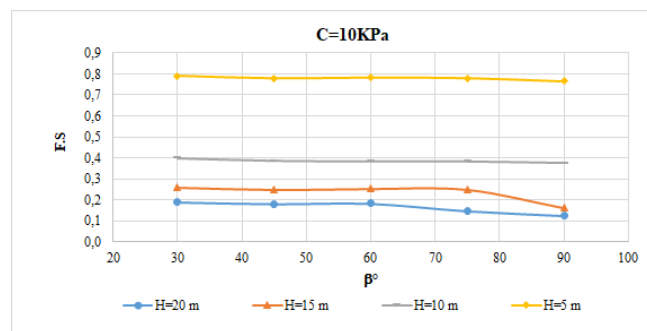


Gráfica 14 F.S. Vs Altura, variando la cohesión y manteniendo la inclinación constante ($\beta=60^\circ$)

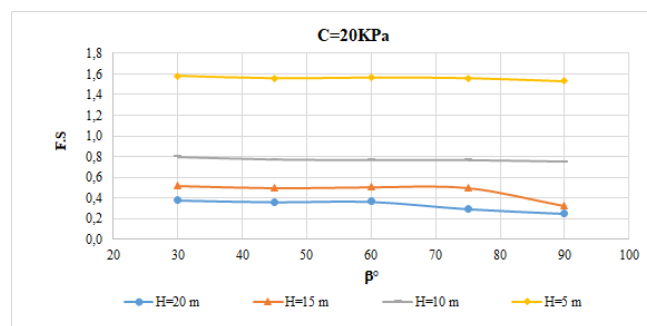


Gráfica 15 F.S. Vs Altura, variando la cohesión y manteniendo la inclinación constante ($\beta=30^\circ$)

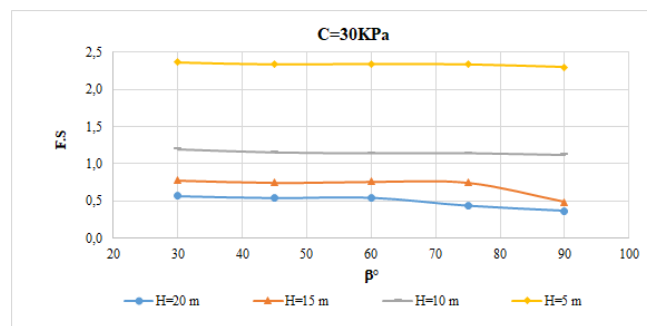
En las gráficas 16, 17 y 18, se presentan los resultados del análisis sin sismo, con nivel freático en la superficie, cohesión única, altura e inclinación variable. Se evidencia que la inclinación del talud no afecta la estabilidad, ya que presentan una tendencia horizontal igual que lo observado para las gráficas 7, 8 y 9.



Gráfica 16 F.S. Vs Inclinación, variando la altura y manteniendo la cohesión constante ($C=10 \text{ KPa}$)



Gráfica 17 F.S. Vs Inclinación, variando la altura y manteniendo la cohesión constante ($C=20 \text{ KPa}$)



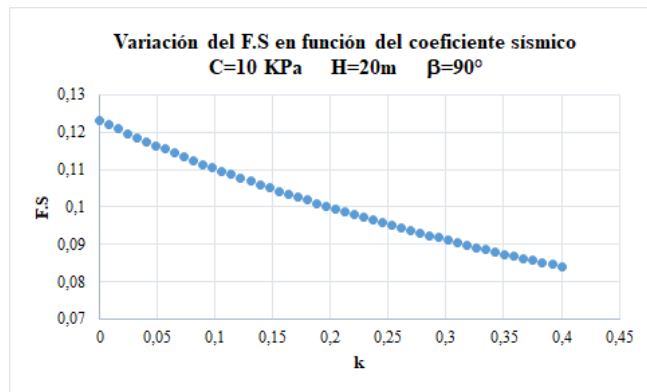
Gráfica 18 F.S. Vs Inclinación, variando la altura y manteniendo la cohesión constante ($C=30 \text{ KPa}$)

c. Suelo cohesivo, con sismo y seco.

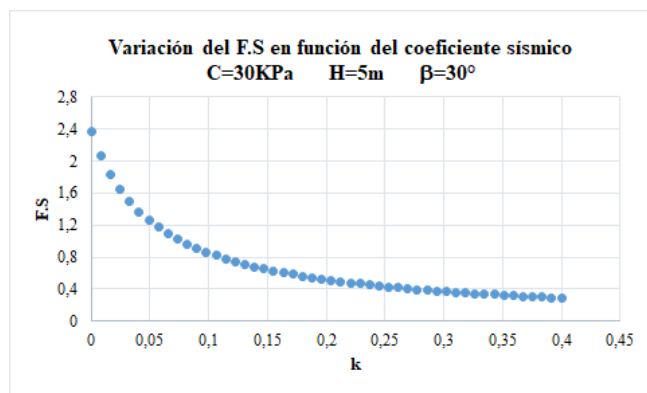
A partir de los resultados obtenidos por medio de los modelos realizados en Slide, es posible generar gráficas que relacionen el F.S. Vs Coeficiente de sismo horizontal, como las que se muestran en las gráficas 19 y 20.

En la 19 se muestra la variación del factor de seguridad en función del coeficiente sísmico horizontal k_h (variación entre 0.0g a 0.4g), con las variables morfología y geometría más críticas en este estudio ($C=10 \text{ KPa}$, $H=20 \text{ m}$ y $\beta=90^\circ$). En la 20 se muestra la

variación del factor de seguridad en función del coeficiente sísmico horizontal k_h (variación entre 0.0g a 0.4g), con las variables menos críticas en este estudio ($C=30\text{KPa}$, $H=5\text{m}$ y $\beta=30^\circ$). Se observa en la Gráfica 19 que el F.S es demasiado pequeño y varía muy poco (entre 0.124 y 0.084), y tiende a ser una recta; esto debido al poco rango de variación y a sus variables poco incidentes. Por el contrario, en la Gráfica 20, la variación del F.S es grande (entre 2.4 y 0.3) y presenta una variación potencial decreciente, debido a que el sismo afecta en gran medida la estabilidad de los taludes ya que, solamente con un coeficiente sísmico de 0.05 g, el F.S disminuye a la mitad de lo que sería sin la presencia de este.



Gráfica 19 Variación del F.S en función del coeficiente sísmico horizontal con variables más críticas

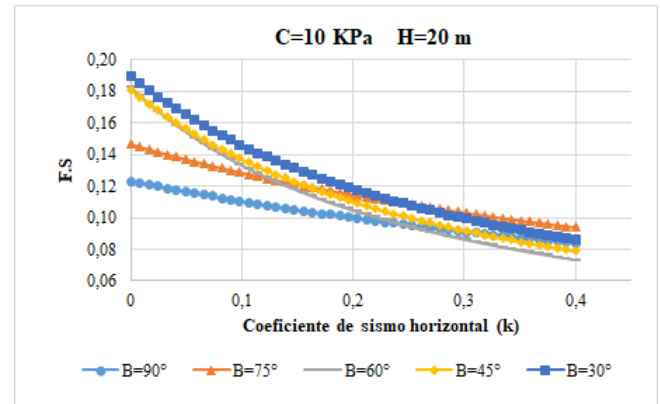


Gráfica 20 Variación del F.S en función del coeficiente sísmico horizontal con variables menos críticas

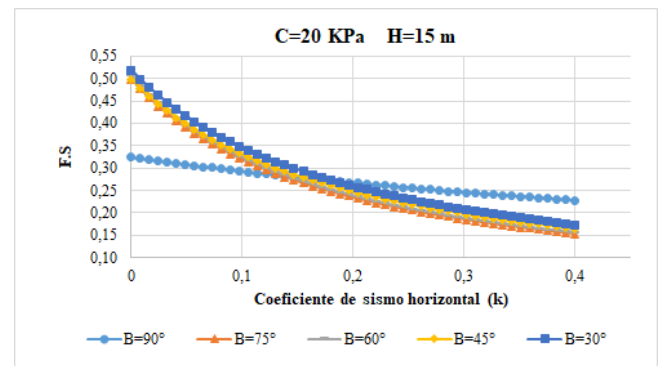
De las 60 gráficas similares a las presentadas en las gráficas 19 y 20 y que tengan dos variables iguales, se sobrepone para generar nuevas, manteniendo dos variables constantes y modificando la restante. Por ejemplo, cohesión y altura igual, pero variando la inclinación. Para así, poder evidenciar la diferencia que presentan por el cambio en un sólo parámetro. El

resultado de este análisis se presenta en las gráficas 21 a la 31.

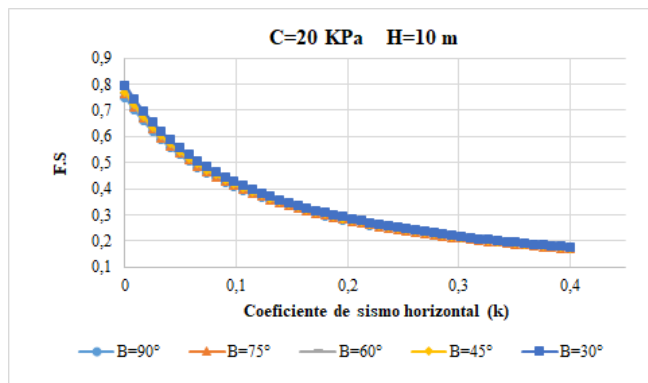
En las gráficas 21, 22, 23 y 24, se presentan los resultados del análisis con sismo, en condición seca, cohesión y altura única e inclinación variable. Se evidencia que sin importar el sismo que se presente, el ángulo de inclinación para taludes de alturas iguales o menores a 10 m, no afectan la estabilidad de estos teniendo cualquier valor de cohesión. Además, se evidencia que los taludes con alturas de 15 m e inclinación de 90° muestran diferencias con respecto a los demás, ya que sin aceleración horizontal se genera el menor factor de seguridad frente a las demás inclinaciones con 15 m, y toma una tendencia lineal decreciente, mientras que las demás muestran una tendencia potencial decreciente.



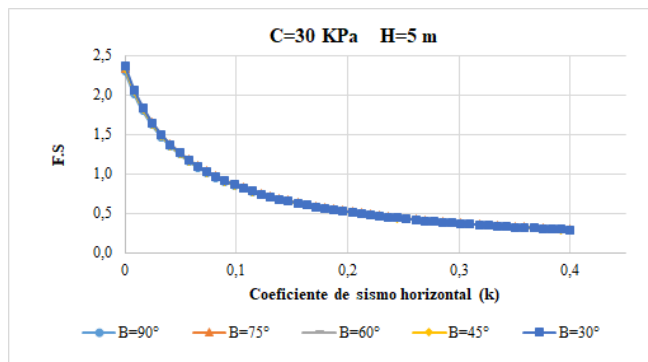
Gráfica 21 F.S Vs k , manteniendo constante la cohesión ($C=10\text{ KPa}$) y la altura ($H=20\text{ m}$), y variando la inclinación (β)



Gráfica 22 F.S Vs k , manteniendo constante la cohesión ($C=20\text{ KPa}$) y la altura ($H=15\text{ m}$), y variando la inclinación (β)



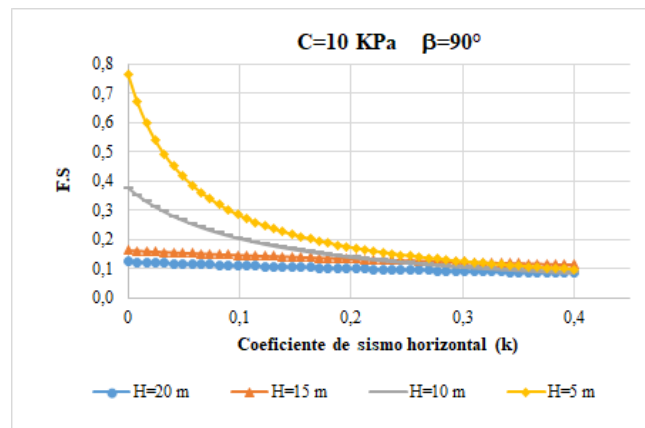
Gráfica 23 F.S Vs k, manteniendo constante la cohesión ($C=20$ KPa) y la altura ($H=10$ m), y variando la inclinación (β)



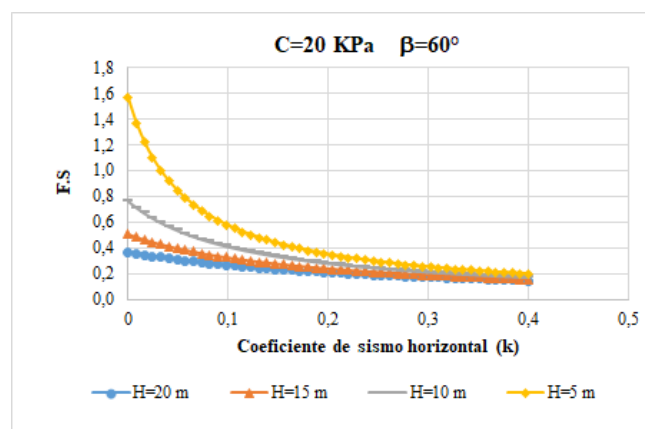
Gráfica 24 F.S Vs k, manteniendo constante la cohesión ($C=30$ KPa) y la altura ($H=20$ m), y variando la inclinación (β)

En las gráficas 25, 26 y 27, se presentan los resultados del análisis con sismo, en condición seca, cohesión e inclinación única y altura variable. Se puede evidenciar que al presentarse el caso de taludes cohesivos, secos y sin presencia de sismo, la altura afecta en gran medida la estabilidad de estos, pero si la magnitud del sismo aumenta, la altura deja de ser el factor principal de inestabilidad. Ahora, es correcto afirmar que la altura es inversamente proporcional al factor de seguridad, sin importar la magnitud del sismo. De estas mismas gráficas, se puede observar que a partir de un valor de 0,3g en el coeficiente sísmico horizontal, el factor de seguridad toma una tendencia horizontal, lo que indica que a partir de ese valor la estabilidad del talud será igual para cualquier sismo de mayor magnitud.

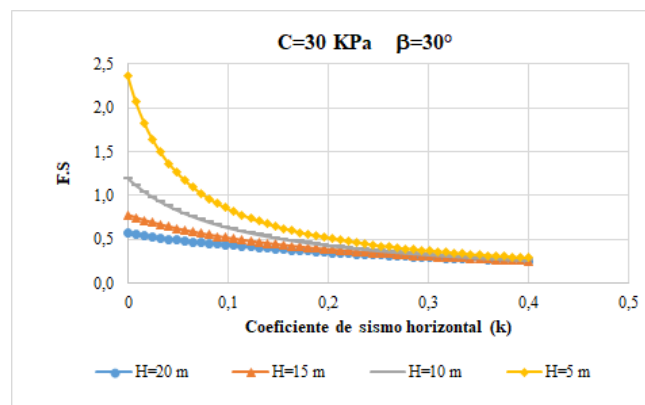
La cohesión sigue teniendo la misma influencia proporcional con cualquier magnitud de sismo, una influencia de forma lineal en la estabilidad, similar en todos los valores, como la presentada en la **Gráfica 55** en la sección de análisis de resultados.



Gráfica 25 F.S Vs k, manteniendo constante la cohesión ($C=10$ KPa) y la inclinación ($\beta=90^\circ$), y variando la altura (H)



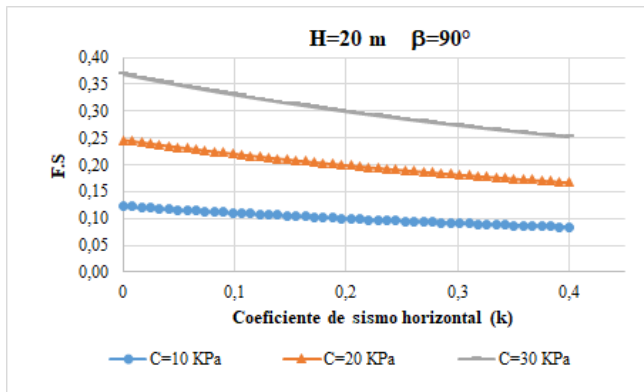
Gráfica 26 F.S Vs k, manteniendo constante la cohesión ($C=20$ KPa) y la inclinación ($\beta=60^\circ$), y variando la altura (H)



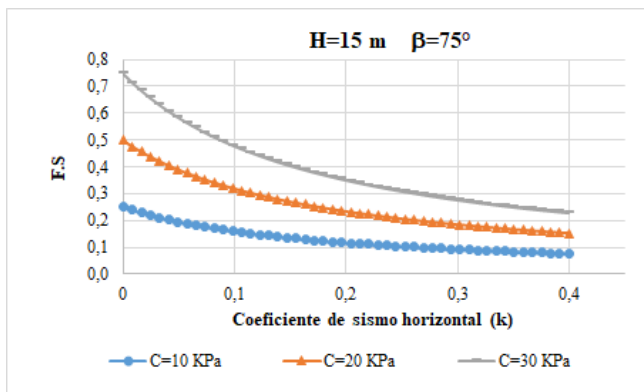
Gráfica 27 F.S Vs k, manteniendo constante la cohesión ($C=30$ KPa) y la inclinación ($\beta=30^\circ$), y variando la altura (H)

En las gráficas 28, 29, 30 y 31, se presentan los resultados del análisis con sismo, en condición seca, altura e inclinación única y cohesión variable. Se puede evidenciar que la cohesión afecta de manera proporcional la estabilidad del talud, con o sin la

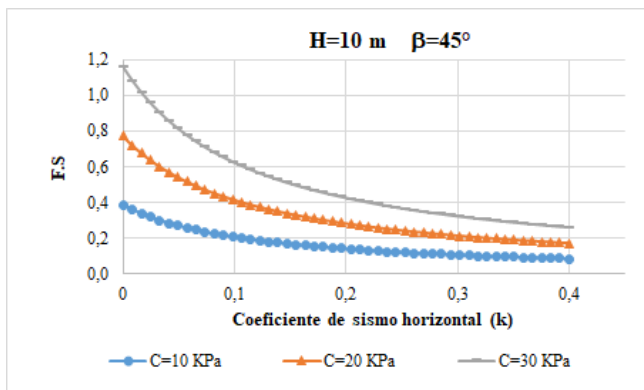
presencia de sismo. Además, se observa que la altura es inversamente proporcional al factor de seguridad, teniendo como base que la inclinación no afecta la estabilidad de estos.



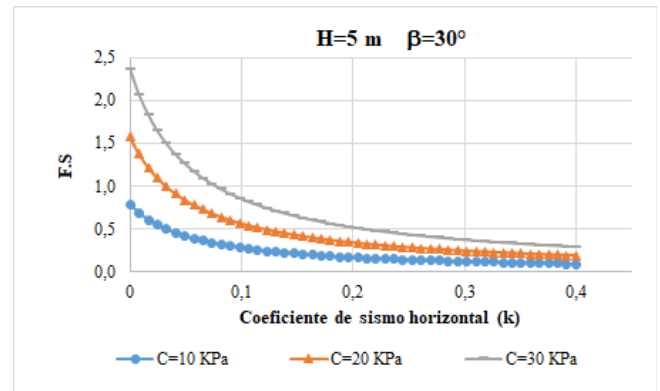
Gráfica 28 F.S Vs k, manteniendo constante la altura ($H=20\text{ m}$) y la inclinación ($\beta=90^\circ$), y variando la cohesión (C)



Gráfica 29 F.S Vs k, manteniendo constante la altura ($H=15\text{ m}$) y la inclinación ($\beta=75^\circ$), y variando la cohesión (C)



Gráfica 30 F.S Vs k, manteniendo constante la altura ($H=10\text{ m}$) y la inclinación ($\beta=45^\circ$), y variando la cohesión (C)



Gráfica 31 F.S Vs k, manteniendo constante la altura ($H=5\text{ m}$) y la inclinación ($\beta=30^\circ$), y variando la cohesión (C)

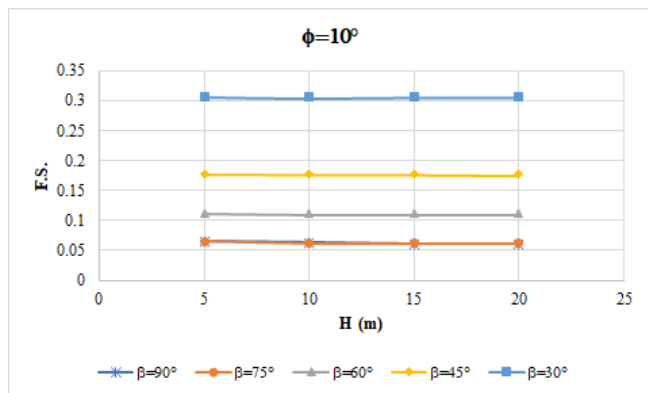
- d. Suelo cohesivo, con sismo y con presencia del nivel freático en la superficie.

Los resultados obtenidos para esta condición son prácticamente iguales (el F.S. cambia de valor a partir del tercer o cuarto decimal) a los presentados en el párrafo c Suelo cohesivo, con sismo y seco., ya que, el agua, aún con la presencia de sismo, sigue siendo un factor que no afecta la estabilidad del talud, debido a que es una condición no drenada. Por esta razón, se omiten los gráficos y resultados, debido a que prácticamente son los mismos mostrados anteriormente.

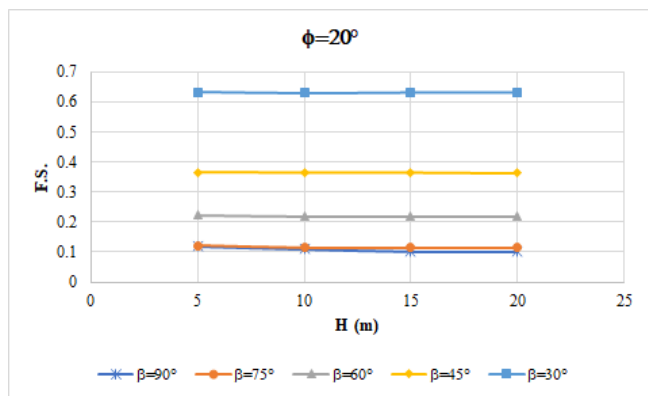
Suelos friccionantes

- a. Suelo friccionante, sin sismo y seco.

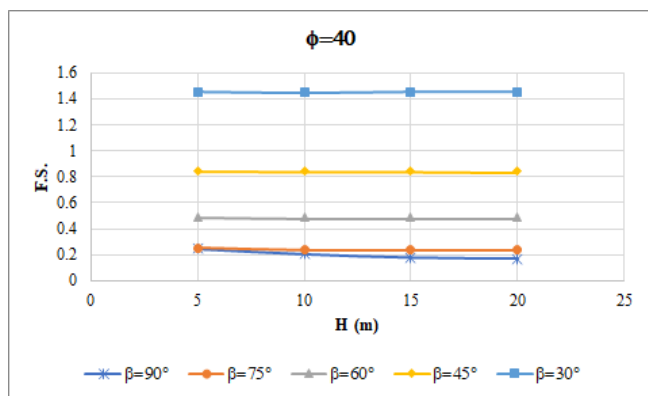
Las gráficas 32, 33 y 34, son las correspondientes a los resultados obtenidos de los modelos sin sismo, en condición seca, con ángulo de fricción único, altura e inclinación variable, donde se evidencia que la altura no es un factor determinante en la estabilidad del talud, ya que, se muestra que las líneas mantienen una tendencia horizontal sin importar su altura.



Gráfica 32 F.S Vs H, manteniendo constante el ángulo de fricción ($\Phi=10^\circ$) y variando el ángulo de inclinación (β)



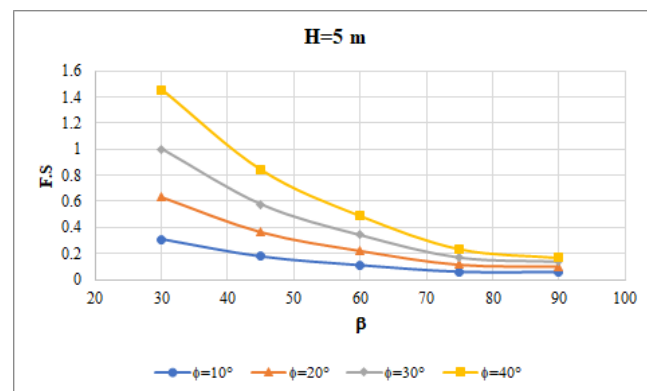
Gráfica 33 F.S Vs H, manteniendo constante el ángulo de fricción ($\Phi=20^\circ$) y variando el ángulo de inclinación (β)



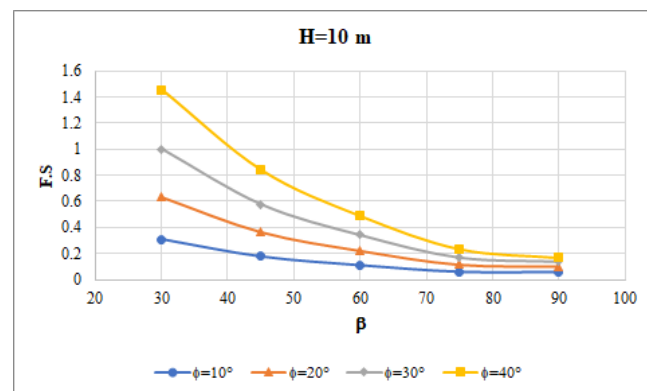
Gráfica 34 F.S Vs H, manteniendo constante el ángulo de fricción ($\Phi=40^\circ$) y variando el ángulo de inclinación (β)

Las gráficas 35, 36 y 37, son las correspondientes a los resultados obtenidos de los modelos sin sismo, en condición seca, con altura única, ángulo de fricción e inclinación variable, donde se evidencia que el factor de seguridad es inversamente proporcional al ángulo de inclinación, y las tres gráficas presentan una tendencia similar, a pesar de tener alturas diferentes. Del mismo modo, se presenta una relación directamente proporcional entre el F.S y el ángulo de fricción, debido

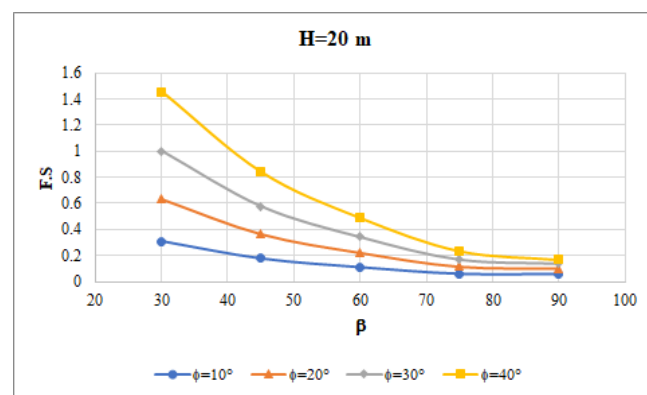
a que el ángulo de fricción es la única propiedad de resistencia interna de los suelos granulares.



Gráfica 35 F.S Vs β , manteniendo constante la altura ($H=5\text{ m}$) y variando el ángulo de fricción (Φ)



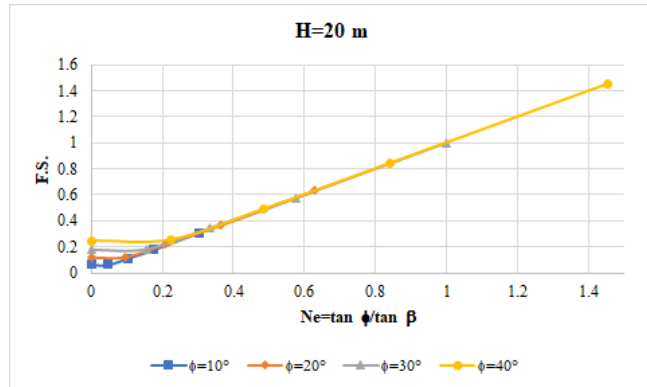
Gráfica 36 F.S Vs β , manteniendo constante la altura ($H=10\text{ m}$) y variando el ángulo de fricción (Φ)



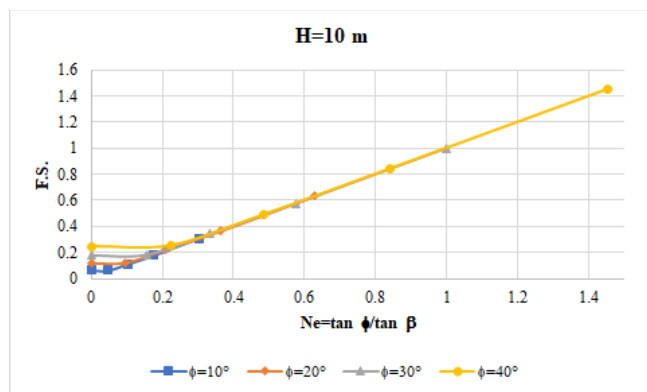
Gráfica 37 F.S Vs β , manteniendo constante la altura ($H=20\text{ m}$) y variando el ángulo de fricción (Φ)

Las gráficas 38, 39 y 40 corresponden a los resultados obtenidos de los modelos sin sismo, en una condición seca, donde se representa la variación del factor de seguridad en función del número de estabilidad, para diferentes valores de ángulo de fricción, donde se puede observar una clara convergencia cuando el número de estabilidad; definido como la razón entre la

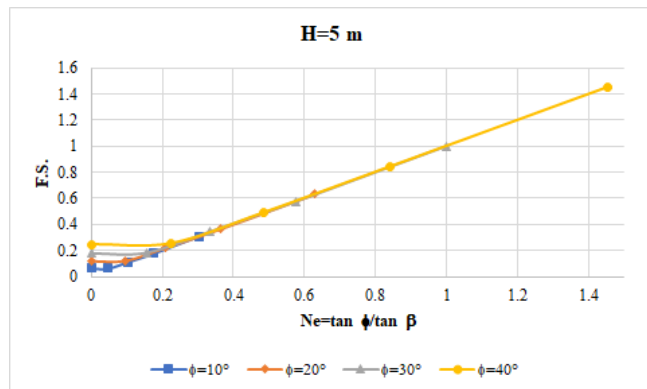
tangente del ángulo de fricción interna y la tangente del ángulo de inclinación del talud, es aproximadamente 0.2. Además, se puede evidenciar que la altura sigue siendo un valor que no influye en la estabilidad, ya que, los gráficos tienen la misma tendencia.



Gráfica 38 F.S Vs N_e , manteniendo constante la altura ($H=20\text{ m}$) y variando el ángulo de fricción (Φ)



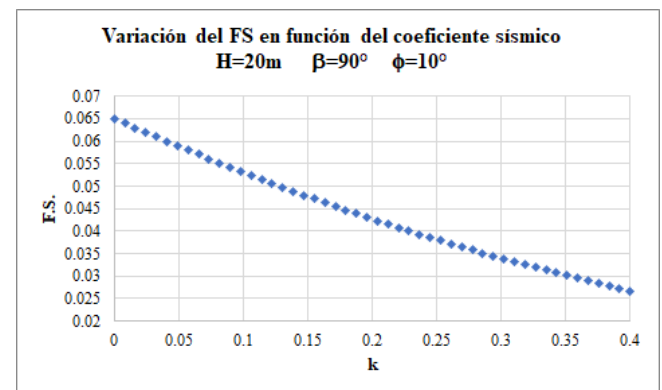
Gráfica 39 F.S Vs N_e , manteniendo constante la altura ($H=10\text{ m}$) y variando el ángulo de fricción (Φ)



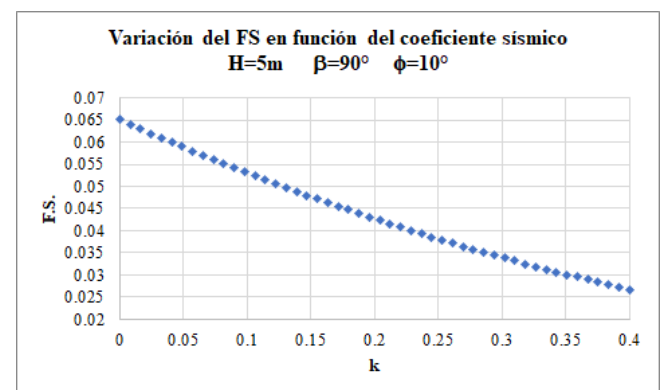
Gráfica 40 F.S Vs N_e , manteniendo constante la altura ($H=5\text{ m}$) y variando el ángulo de fricción (Φ)

b. Suelo friccionante, con sismo y seco.

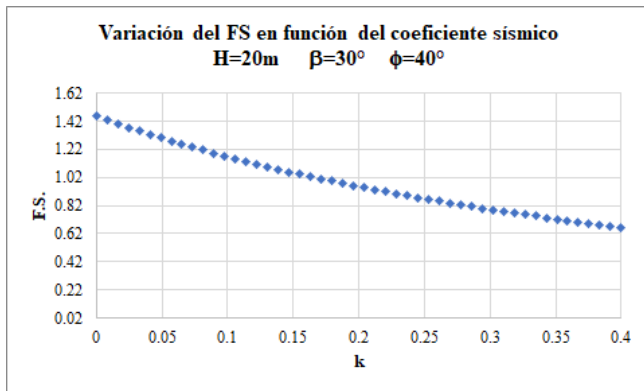
Con la ayuda del software Slide se determinó el factor de seguridad (F.S.) para diferentes valores de coeficiente sísmico, variando en cada modelo su morfología y la geometría del talud. Dichos valores se presentan en las gráficas 41, 42, 43 y 44, donde se evidencia que la altura en esta condición de análisis no es un factor que afecte la estabilidad del talud, esto se puede observar en las gráficas 41 y 42, o las gráficas 43 y 44, además de que el F.S. es inversamente proporcional al coeficiente sísmico. También se puede observar que las tendencias de las gráficas tienden a ser rectas, sin embargo, puede ser que con un coeficiente sísmico más grande a los que se esperan en el contexto colombiano, la curva cambie.



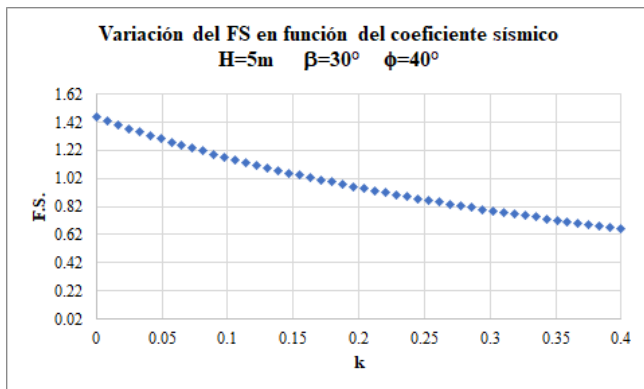
Gráfica 41 F.S Vs k , Altura ($H=20\text{ m}$), ángulo de inclinación ($\beta=90^\circ$) y ángulo de fricción ($\Phi=10^\circ$) son constantes



Gráfica 42 F.S Vs k , Altura ($H=5\text{ m}$), ángulo de inclinación ($\beta=90^\circ$) y ángulo de fricción ($\Phi=10^\circ$) son constantes

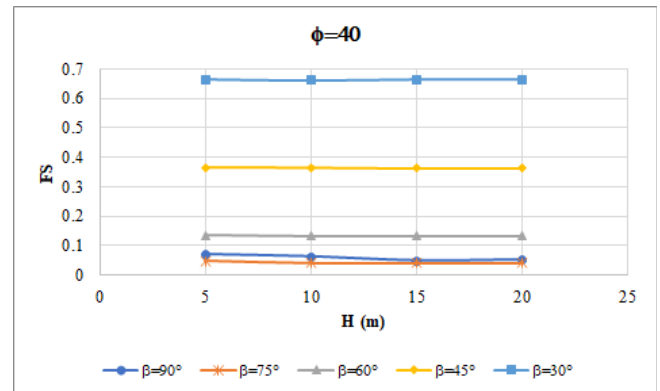


Gráfica 43 F.S Vs k, Altura ($H=20$ m), ángulo de inclinación ($\beta=30^\circ$) y ángulo de fricción ($\Phi=40^\circ$) son constantes

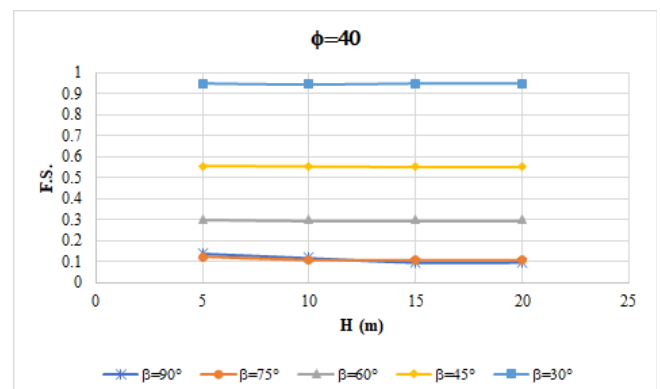


Gráfica 44 F.S Vs k, Altura ($H=5$ m), ángulo de inclinación ($\beta=30^\circ$) y ángulo de fricción ($\Phi=40^\circ$) son constantes

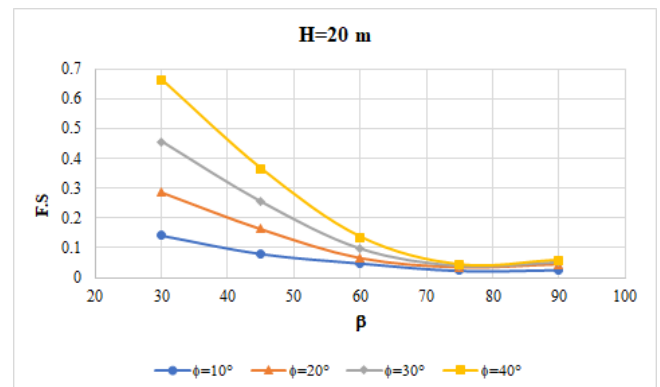
A partir de esto, se decidió analizar el escenario mostrado anteriormente “Suelo friccionante, sin sismo y seco.”, incluyendo ahora el coeficiente sísmico. Las gráficas 45 a la 50 muestran los resultados obtenidos para dos valores de coeficiente sísmico ($k=0.4g$ y $k=0.2g$), en donde al compararlas con el análisis sin sismo, se puede observar que tienen una tendencia similar; sin embargo, el factor de seguridad se ve disminuido, esto es debido a que es inversamente proporcional al coeficiente sísmico.



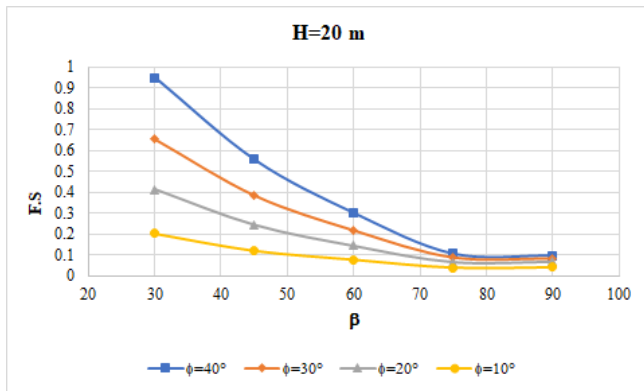
Gráfica 45 F.S Vs H (m), manteniendo constante el coeficiente sísmico ($k=0.4g$) y el ángulo de fricción ($\Phi=40^\circ$), variando el ángulo de inclinación (β)



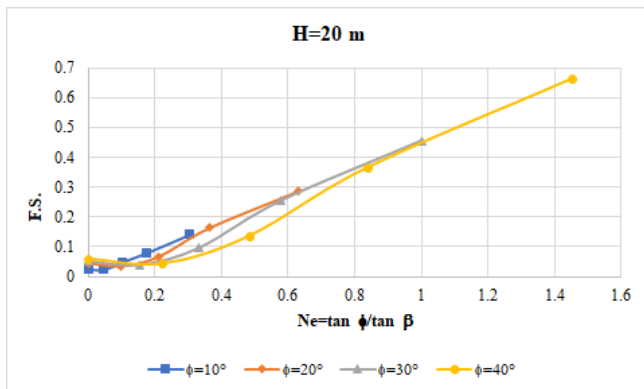
Gráfica 46 F.S Vs H (m), manteniendo constante el coeficiente sísmico ($k=0.2g$) y el ángulo de fricción ($\Phi=40^\circ$), variando el ángulo de inclinación (β)



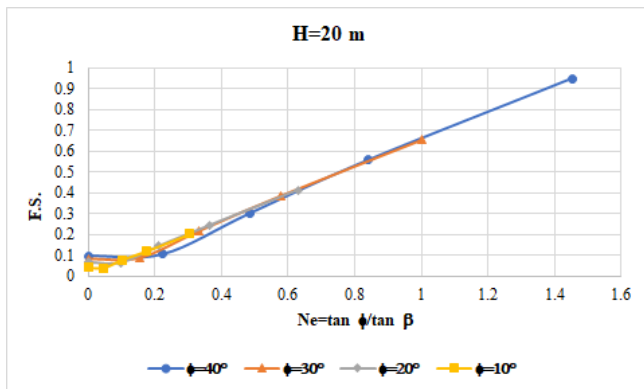
Gráfica 47 F.S Vs β , manteniendo constante el coeficiente sísmico ($k=0.4g$) y la altura ($H=20$ m), variando el ángulo de fricción (Φ)



Gráfica 48 F.S Vs β , manteniendo constante el coeficiente sísmico ($k=0.2g$) y la altura ($H=20\text{ m}$), variando el ángulo de fricción (Φ)



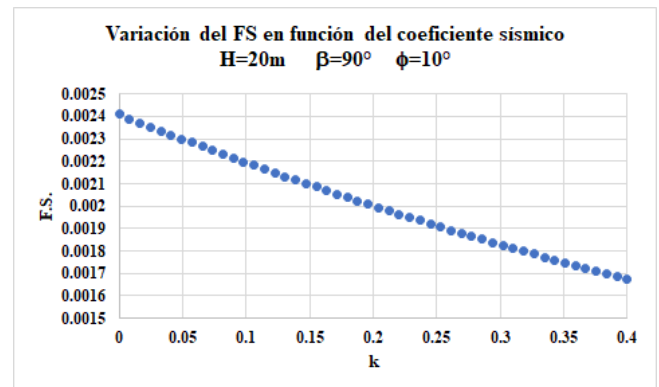
Gráfica 49 F.S Vs N_e , manteniendo constante el coeficiente sísmico ($k=0.4g$) y la altura ($H=20\text{ m}$), variando el ángulo de fricción (Φ)



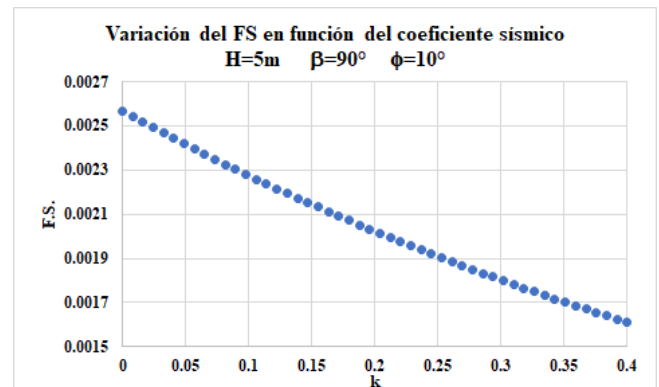
Gráfica 50 F.S Vs N_e , manteniendo constante el coeficiente sísmico ($k=0.2g$) y la altura ($H=20\text{ m}$), variando el ángulo de fricción (Φ)

c. Suelo friccionante, con nivel freático en la superficie.

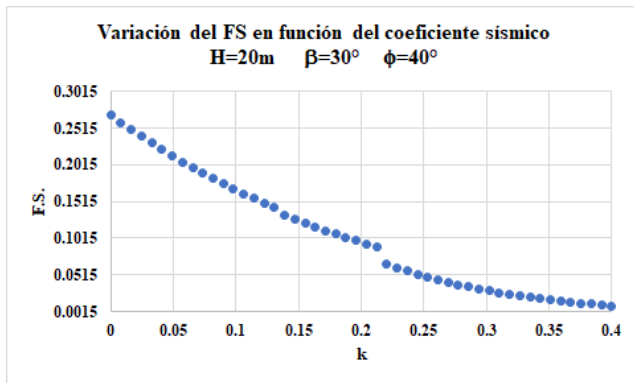
Del mismo modo, cuando hay presencia de sismo y se encuentra en una condición saturada, se obtuvieron los resultados presentados en las gráficas 51 a la 54, donde el factor de seguridad está en función del coeficiente sísmico. Se puede observar que los factores de seguridad obtenidos en esta condición son muy bajos (inferiores en todo caso a la unidad), y en el mejor de los escenarios encontrado y presentado en la Gráfica 54 ($H=5\text{ m}$, $\beta=30^\circ$ y $\Phi=40^\circ$), el F.S. tiene un valor de 0.27 sin presencia de sismo; y con presencia de este, su valor disminuye hasta llegar a un valor de 0.0015. Esta condición se constituye como la más crítica de las encontradas en el presente trabajo y deberá ser analizada con más detalle en trabajos futuros y específicos en el análisis de la interacción de estas dos variables en suelos granulares.



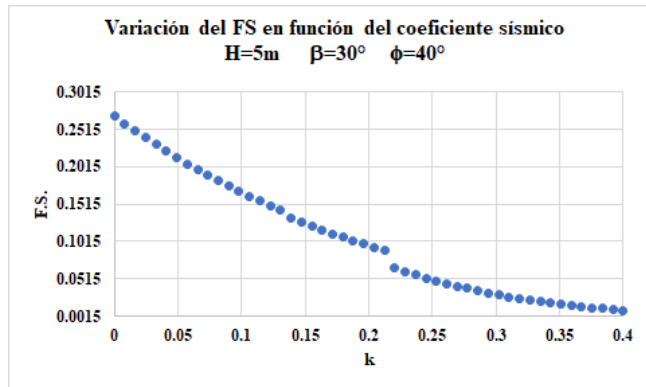
Gráfica 51 F.S Vs k , Altura ($H=20\text{ m}$), ángulo de inclinación ($\beta=90^\circ$) y ángulo de fricción ($\Phi=10^\circ$) son constantes, en condición saturada



Gráfica 52 F.S Vs k , Altura ($H=5\text{ m}$), ángulo de inclinación ($\beta=90^\circ$) y ángulo de fricción ($\Phi=10^\circ$) son constantes, en condición saturada



Gráfica 53 F.S Vs k, Altura ($H=20\text{ m}$), ángulo de inclinación ($\beta=30^\circ$) y ángulo de fricción ($\Phi=40^\circ$) son constantes, en condición saturada

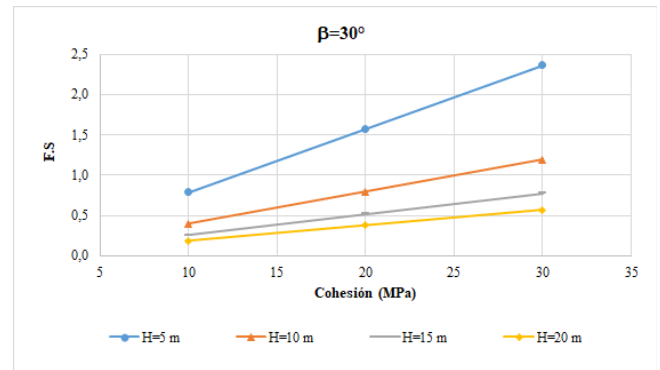


Gráfica 54 F.S. VS k, Altura ($H=5\text{ m}$), ángulo de inclinación ($\beta=30^\circ$) y ángulo de fricción ($\Phi=40^\circ$) son constantes, en condición saturada

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Suelos cohesivos

A partir de los resultados obtenidos, se puede evidenciar en los análisis sin sismo (Gráficas 1 a la 18), que la cohesión afecta de manera proporcional la estabilidad del talud tanto para suelos cohesivos secos como suelos cohesivos saturados, ya que su F.S. aumenta de forma lineal con la cohesión. Por ejemplo, para los taludes de alturas de 5 m e inclinación de 30° , el F.S. para cohesión de 10 KPa es de 0.79 y para cohesión de 20 KPa es de 1.58, siendo el doble que el anterior; y para cohesión de 30 KPa es de 2.37, siendo tres veces el valor del F.S. de 10 KPa. Además, se evidencia que la tasa de crecimiento notada con la letra “m”, disminuye conforme aumenta la altura del talud, lo cual se muestra en la Gráfica 55.



Gráfica 55 Influencia de la cohesión en la estabilidad de taludes cohesivos

a. Suelo cohesivo, seco y sin sismo.

Para analizar la interacción de las variables propuestas en el presente estudio, se configuró una carta de estabilidad, la cual presenta en eje de las ordenadas el factor de seguridad y en el eje de las abscisas el número de estabilidad modificado, el cual se propone según la expresión mostrada en la Ecuación 1:

$$N_e = \frac{N}{\tan \beta} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$N = \frac{C}{\gamma H} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde;

N_e : Número de estabilidad modificado

N : Número de estabilidad.

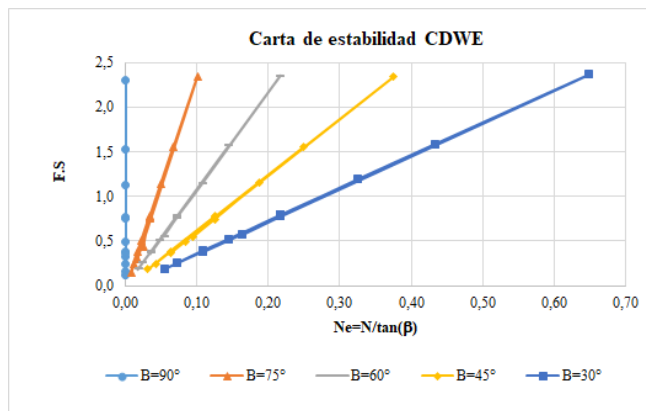
β : Ángulo de inclinación del talud [$^\circ$]

C : Cohesión [KPa]

γ : Peso específico [KN/m^3]

H : Altura del talud [m]

En la Gráfica 56 se observa la influencia combinada del número de estabilidad y de la pendiente del talud en condición no drenada, sin sismo y talud seco. A este ábaco se le asigna el nombre de CDWE (cohesivo, seco y sin sismo por sus siglas en inglés).



Gráfica 56 Carta de estabilidad suelo cohesivo, seco y sin sismo CDWE

Se sugiere entrar con el número de estabilidad modificado (N_e) y buscar una curva con la inclinación del talud β . A la izquierda se encuentra el factor de seguridad ($F.S.$).

b. Suelo cohesivo, saturado y sin sismo

La carta de estabilidad propuesta para la condición de análisis de suelo cohesivo, saturado y sin sismo (CSWE por sus siglas en inglés), presenta en el eje de las ordenadas el factor de seguridad y en el eje de las abscisas el número de estabilidad modificado, el cual se halla de la siguiente manera:

$$N_e = \frac{N}{\tan \beta} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$N = \frac{C}{\gamma H} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde;

N_e : Número de estabilidad modificado

N : Número de estabilidad.

β : Ángulo de inclinación del talud [$^\circ$]

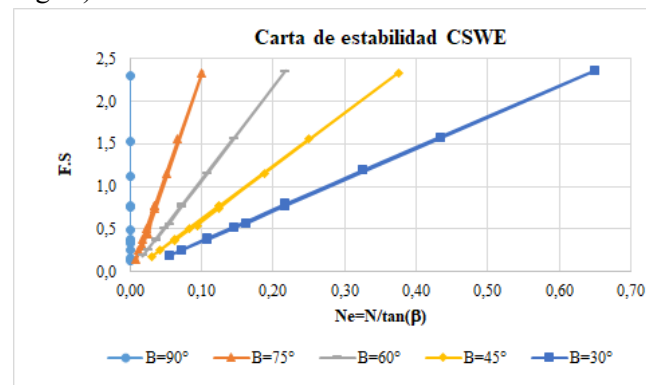
C : Cohesión [KPa]

γ : Peso específico [KN/m³]

H : Altura del talud [m]

Se observa en la Gráfica 57 la influencia combinada del número de estabilidad y de la pendiente del talud en condición no drenada, sin sismo y con presencia del nivel freático en la superficie. Como se mencionó

anteriormente, a este ábaco se le asigna el nombre de Carta de estabilidad suelo cohesivo, saturado y sin sismo CSWE (cohesivo, saturado y sin sismo por sus siglas en inglés).



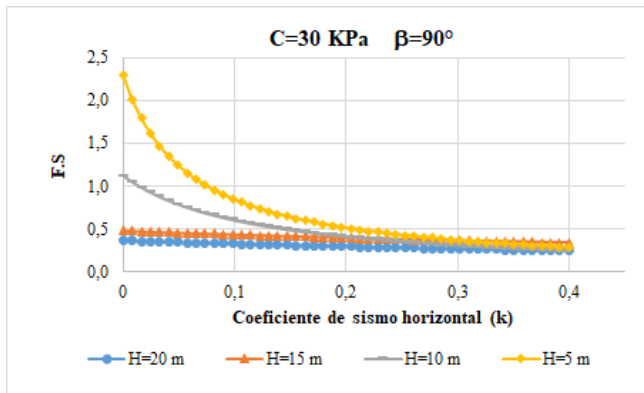
Gráfica 57 Carta de estabilidad suelo cohesivo, saturado y sin sismo CSWE

Se sugiere entrar con el número de estabilidad modificado (N_e) y buscar una curva con la inclinación del talud β . A la izquierda se encuentra el factor de seguridad ($F.S.$).

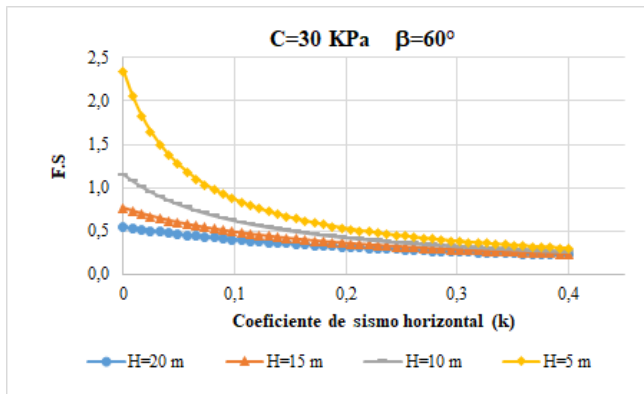
Al hacer un comparativo entre los resultados obtenidos para taludes de suelo cohesivo seco y saturado, se puede evidenciar que prácticamente no varían, esto debido a que, al ser un suelo no drenado, el agua no tiene influencia dentro de la estabilidad de este y hace que el $F.S.$ varíe muy poco, siendo esta variación en el tercer o cuarto decimal del $F.S.$ Lo que indica, que para taludes cohesivos secos y saturados, es conveniente trabajar sólo con una de las cartas de estabilidad presentadas anteriormente (Ábaco CDWE o Ábaco CSWE), ya que, sus valores son prácticamente iguales.

c. Suelo cohesivo, seco y con presencia de sismo.

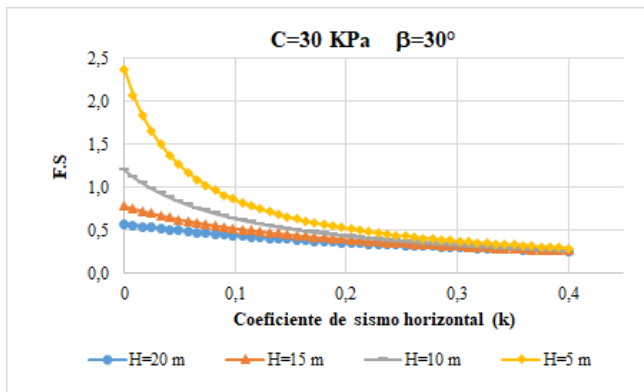
Para poder llegar a la carta de estabilidad en este escenario, es necesario identificar de las gráficas 58, 59 y 60, que el ángulo de inclinación para la estabilidad de taludes cohesivos no tiene influencia, ya que las curvas de las 3 gráficas presentadas son prácticamente iguales, como se muestra a continuación:



Gráfica 58 Influencia del ángulo de inclinación en la estabilidad de taludes de suelos cohesivos secos y saturados



Gráfica 59 Influencia del ángulo de inclinación en la estabilidad de taludes de suelos cohesivos secos y saturados



Gráfica 60 Influencia del ángulo de inclinación en la estabilidad de taludes de suelos cohesivos secos y saturados

Basados en esto, es posible omitir la variable de inclinación del talud, ya que, no afecta la estabilidad de este. Además, para poder incluir la variable de sismo, es necesario agregar al número de estabilidad ($N = C/(\gamma \cdot H)$) un múltiplo que relacione dicha variable, normalizada por el valor de la aceleración de la gravedad, para mantener las unidades adecuadas en el

análisis, y así crear un nuevo número de estabilidad en función del coeficiente sísmico horizontal, denominado N_k . Con esto, se simplifican los datos y la información, y a partir de la misma es posible proponer el ábaco de diseño de la Gráfica 61 para la condición de suelos cohesivos con presencia de sismo (CDE por las siglas en inglés de cohesivo, seco y sismo).

La carta de estabilidad CDE presenta en el eje de las ordenadas el factor de seguridad sobre la altura del talud, y en el eje de las abscisas, el número de estabilidad en función del coeficiente sísmico horizontal, el cual se halla de la siguiente manera:

$$N_k = \frac{C \left(\frac{k_h}{g} \right)}{\gamma H} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde;

N_k : Número de estabilidad en función del coeficiente sísmico horizontal.

C : Cohesión [KPa]

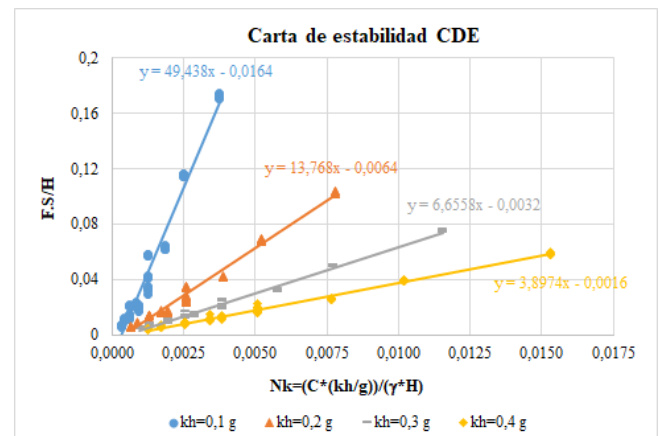
k_h : Coeficiente sísmico horizontal [g]

g : Aceleración de la gravedad [m/s^2]

γ : Peso específico del suelo [KN/m^3]

H : Altura del talud [m]

Se observa en la Gráfica 61 la influencia combinada del número de estabilidad en función del coeficiente sísmico horizontal, en condición no drenada y en estado seco. Se encontró el ábaco de diseño para dicha condición.



Gráfica 61 Carta de estabilidad suelo cohesivo, seco y con sismo CDE

Se sugiere entrar con el número de estabilidad en función del coeficiente de sismo horizontal (N_k) y buscar una recta o utilizar la ecuación que representan las mismas, teniendo en cuenta el coeficiente sísmico horizontal que quiere ser estudiado. A la izquierda se encuentra el factor de seguridad sobre la altura del talud ($F.S/H$), dado que la altura es la variable que más influye en la estabilidad para taludes de suelos cohesivos. Al obtener este valor, es necesario despejar esta igualdad, multiplicando el valor obtenido, por la altura del talud que se está estudiando, encontrando así el factor de seguridad ($F.S$).

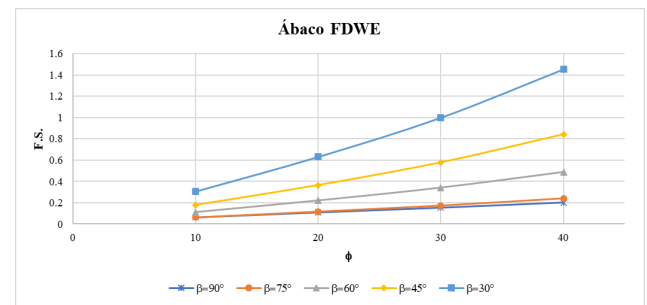
- d. Suelo cohesivo, con sismo y con presencia del nivel freático en la superficie.

Los resultados obtenidos para esta condición son prácticamente iguales al escenario mostrado en el numeral inmediatamente anterior, ya que como se ha dejado en claro a lo largo del documento, el agua aún con la presencia de sismo, sigue siendo un factor que no afecta la estabilidad del talud. Se sugiere en todo caso, para taludes cohesivos con sismo utilizar el ábaco CDE propuesto en la Gráfica 61.

Suelos friccionantes

- a. Suelo friccionante, sin sismo y seco

A partir de los resultados obtenidos en las gráficas donde se analiza la estabilidad del talud sin sismo, (gráficas 32 a la 40), se puede evidenciar que la altura no es una variable que afecte la estabilidad del talud, por lo que es posible omitirla, obteniendo un $F.S$. promedio para las 4 alturas ($H=20$ m, $H=15$ m, $H=10$ m, $H=5$ m). De esta manera se obtuvo el ábaco Carta de estabilidad suelo friccionante, seco y sin sismo FDWE (friccionante, seco y sin sismo por sus siglas en inglés), en el cual, se puede evidenciar que las diferentes curvas tienen una tendencia lineal, y que cada una tiene un origen cuando el ángulo de fricción y el factor de seguridad son cero (0.0), de manera que se puede determinar el factor de seguridad ($F.S$.) mediante la Ecuación 6 como sigue:



Gráfica 62 Carta de estabilidad suelo friccionante, seco y sin sismo FDWE

Se sugiere entrar con un ángulo de fricción (Φ) y buscar una curva con el ángulo de inclinación (β). A la izquierda se encuentra el factor de seguridad ($F.S$.)

$$F.S. = m \varphi$$

Ecuación 6

Donde;

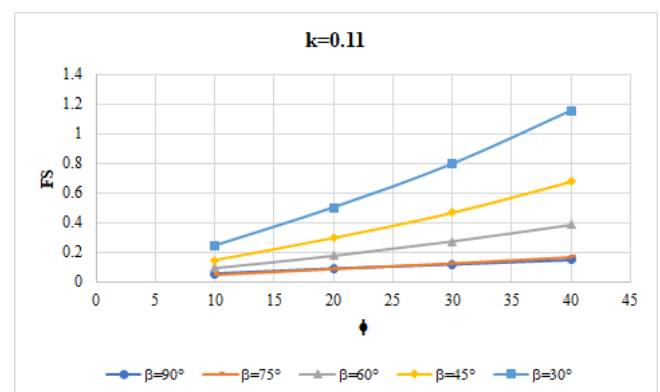
$F.S.$: Factor de seguridad

m : Factor que representa la pendiente de cada curva

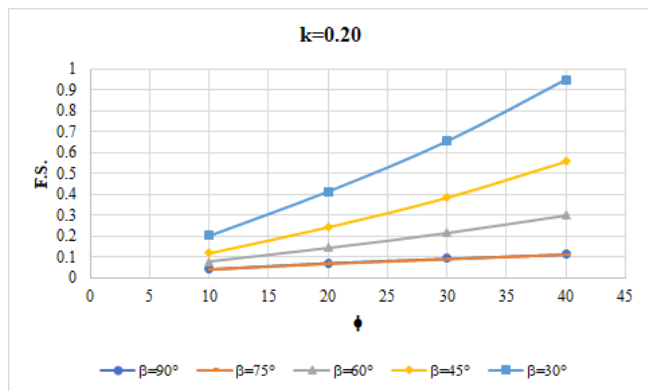
φ : Ángulo de inclinación

- b. Suelo friccionante, con sismo y seco

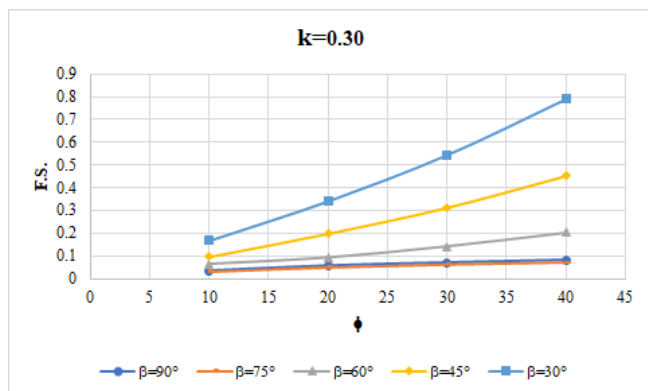
En las gráficas 63 a la 66, se puede observar que todas tienen una tendencia lineal al igual que el Ábaco de la Gráfica 62, por lo que se puede realizar la misma hipótesis planteada anteriormente, como se muestra a continuación.



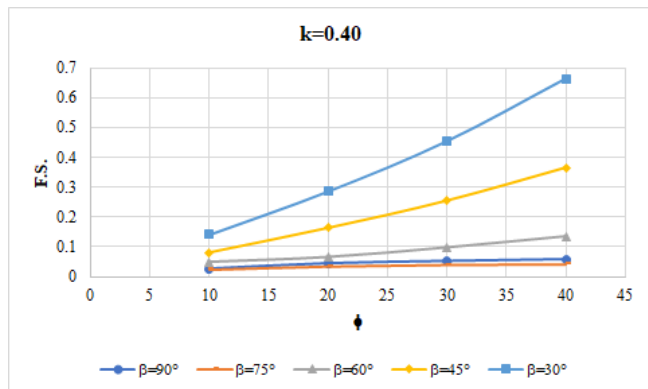
Gráfica 63 $F.S$ Vs ángulo de fricción (Φ), manteniendo constante el coeficiente sísmico ($k=0.11$) y variando el ángulo de inclinación (β)



Gráfica 64 F.S Vs ángulo de fricción (Φ), manteniendo constante el coeficiente sísmico ($k=0.20$) y variando el ángulo de inclinación (β)

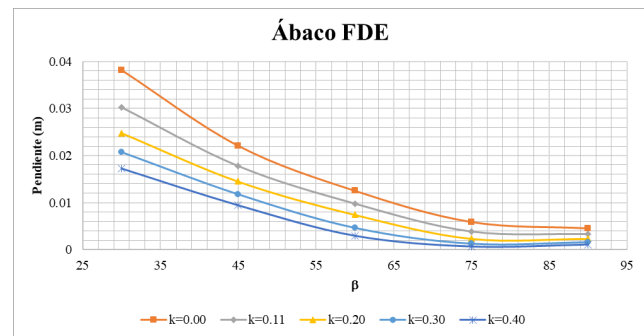


Gráfica 65 F.S Vs ángulo de fricción (Φ), manteniendo constante el coeficiente sísmico ($k=0.30$) y variando el ángulo de inclinación (β)



Gráfica 66 F.S Vs ángulo de fricción (Φ), manteniendo constante el coeficiente sísmico ($k=0.40$) y variando el ángulo de inclinación (β)

De este modo, se pudo obtener el Ábaco FDE (friccionante, seco y con sismo por sus siglas en inglés), donde se evidencia que cada curva pertenece a un valor de coeficiente sísmico diferente ($k=0.00$, $k=0.11$, $k=0.20$, $k=0.30$, $k=0.40$)



Gráfica 67 Carta de estabilidad suelo friccionante, seco y con sismo FDE

Se recomienda entrar con un ángulo de inclinación (β), y buscar una curva con el coeficiente sísmico (k), a la izquierda se encuentra la pendiente de cada curva de la Gráfica 62. El factor de seguridad se halla usando la Ecuación 6.

- c. Suelo friccionante, con presencia del nivel freático en la superficie.

Se puede observar en las gráficas 51 a la 54 que el factor de seguridad se ve disminuido en gran medida cuando el talud se encuentra en una condición saturada, dando valores menores a 0.25, es decir, la resistencia de este se ve reducida aproximadamente en un 96% para el caso particular de un talud vertical y un ángulo de fricción de 10°. Se observa nuevamente que esta condición resulta ser la más desfavorable y requiere de un análisis detallado y particular que no se incluye en el alcance del presente documento y se sugiere como trabajo futuro.

LIMITACIONES

- Dentro del alcance inicial definido no se establece el estudio de la influencia del nivel freático y la saturación en la estabilidad de los taludes, dado que esto incrementa ostensiblemente la cantidad de modelos y de variables en el estudio. Este análisis debe ser abordado en trabajos futuros
- Se estudian dos condiciones extremas relacionadas con la saturación de los taludes: completamente saturados y secos. Cualquier otra condición diferente relacionada con el nivel freático debe ser abordada de forma

particular y no está incluida en el presente documento.

- Como es común en la investigación en mecánica de suelos y de la misma forma en como se ha abordado el problema de los análisis paramétricos y ábacos de estabilidad a lo largo de la historia (Fellenius, 1936; Taylor, 1937; Bishop, 1955; Morgenstern & Price, 1965; Hoek & Bray, 1981), se analizan dos condiciones extremas para la determinación del factor de seguridad: taludes friccionantes ($c=0\text{KPa}$) y cohesivos ($\phi = 0^\circ$). Es bien sabido que estas dos condiciones no corresponden a la realidad del comportamiento de los suelos y de los taludes; sin embargo, se constituyen como un forma práctica de abordar el problema y permiten plantear relaciones sencillas que se aproximan desde un punto de vista conservador al resultado real. Nunca un análisis de estabilidad por medio de cartas y abacos reemplazará el análisis detallado y particular de la resistencia de un talud.
- Los taludes analizados tienen una forma regular, con pendiente constante, por lo que, este análisis no puede ser usado en el estudio de geoformas irregulares.
- Para taludes netamente cohesivos, el peso específico es inversamente proporcional al factor de seguridad, sin embargo, la diferencia no es tan grande, aunque hay que tener en cuenta este aspecto al momento de usar los ábacos, ya que estos se analizaron con un peso específico de $16 \text{ KN}/\text{m}^3$. Por otro lado, para los taludes netamente granulares, el factor de seguridad no se ve afectado cuando se varía el peso específico, teniendo concordancia con lo que dice la literatura y revisando la ecuación de factor de seguridad de los métodos de dovelas.

CONCLUSIONES

- En primera medida se realizó el análisis de los taludes usando el software Slide, aplicando el método de Spencer (conocido por ser el más riguroso en su cálculo); sin embargo, como es de conocimiento y se reporta en diferentes textos académicos, este método presenta problemas de convergencia cuando se combinan algunas variables morfológicas con el sismo, razón por la cual se optó por analizar los modelos por el método de Bishop (1955).
- La altura no es una variable influyente en la estabilidad de un talud friccionante para las alturas analizadas en el presente documento. Por otro lado, para un talud cohesivo, la altura es el factor que más incide en la estabilidad, ya que es inversamente proporcional al factor de seguridad.
- La presencia de agua en los taludes cohesivos no afecta la estabilidad para las condiciones analizadas, esto debido a que la resistencia se da en una condición de carga no drenada. Este aspecto se puso de manifiesto en los resultados obtenidos, ya que no importa si el talud está seco o saturado, el factor de seguridad en ambos casos es similar.
- El ángulo de inclinación, con presencia o ausencia de sismo o de nivel freático, es una variable que no afecta la estabilidad de los taludes de suelos cohesivos, en las condiciones analizadas en el presente documento.
- Los diferentes números de estabilidad para suelos cohesivos (modificado o en función del coeficiente sísmico) son directamente proporcionales al F.S, debido a que la única fuerza resistente que se presenta es la cohesión, la cual está presente en el numerador de dichos números de estabilidad.
- A partir de un valor de 0,3 g en el coeficiente sísmico horizontal para taludes de suelos cohesivos, el factor de seguridad toma una tendencia horizontal, lo cual indica que, a partir de ese valor, la estabilidad del talud será igual para cualquier sismo de mayor magnitud.
- Se encontró que para los taludes en suelo granular la combinación crítica de saturación y sismo hace que los factores de seguridad se

reduzcan considerablemente al punto de que este análisis particular deberá realizarse en trabajos futuros. Se pone de manifiesto la importancia del control del drenaje de taludes en suelos de composición mayormente granular.

- Dependiendo del coeficiente sísmico (k), si este es nulo o es cercano a 0, se recomienda usar la Gráfica 62. Ábaco FDWE, ya que, debido a que este al tener menos variables a analizar, se facilitan los cálculos para el diseño de un talud.
- Los coeficientes de correspondencia obtenidos al realizar los ábacos de suelos no drenados están por encima de 0.96, lo cual indica que las tendencias que se tomaron para relacionar los valores obtenidos son adecuadas.
- Los resultados del presente trabajo deben entenderse como una aproximación teórica a la estabilidad de taludes regulares y se deben usar con cuidado en el análisis de cortes temporales. De ninguna manera un análisis paramétrico puede reemplazar el estudio riguroso de un talud de corte o ladera natural.

REFERENCIAS

- Alzate, B., Guevara, C., & Valero, J. (1999). Zonificación a escala grande de amenazas por fenómenos de remoción en masas, empleando las herramientas del SIG. Bogotá.
- Bell, J. M. (1968). General slope stability analysis. *J. Soil Mech and Found*.
- Bishop, A. W. (1955). *The use of slip circle in the stability analysis of slopes*. Geotechnique.
- Cevallos, W., & Castro, K. (2016). Evaluación de la estabilidad de taludes de la presa "El Azúcar" mediante el método pseudoestático y Newmark de desplazamientos en condición sísmica. Guayaquil, Ecuador.
- Fellenius, W. (1936). Calculation of the Stability of Earth Dams. *Congress on Large Dams, International Commission on Large Dams of the World*.
- Janbu, N. (1954). Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis. *Proc. European Conference Stability of Earth Slopes*. Stockholm.
- May, T. W. (1980). The effectiveness of trenches and scarps in reducing seismic energy. Berkeley, California.
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique.
- Osorio, E. (2012, Mayo). Influencia del contenido frecuencial de ondas sísmicas en la estabilidad de taludes. Bogotá.
- Scott, A., Sitar, N., Lysmer, J., & Deng, N. (1997). Topographic effects on the seismic response of steep slopes. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- SGC. (n.d.). *Servicio Geológico Colombiano*. Retrieved from <https://www.sgc.gov.co/>
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability analysis of general slip surfaces. Geotechnique.
- Taylor, D. (1937). *Stability of Earth Slopes*. Journal of the Boston Society of Civil Engineers.
- Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage*. Leipzig u. Wien, F. Deuticke.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Van Westen, C. J. (1993). *Application of geographic systems to landslide hazard zonation*.
- Velásquez, M. (2019, Enero 29). *CNN español*. Retrieved from <https://cnnespanol.cnn.com/2019/01/29/se-registraron-mas-de-5-100-sismos-en-colombia-en-un-fin-de-semana-por-que-esta-temblando-tanto/>