

Análisis comparativo de estabilidad en taludes utilizando métodos comprobados y modelos numéricos de simulación

Comparative analysis of slope stability using proven methods and numerical simulation models

Briceño, Johannes^{1,2*}; Villa, Junior¹; Gómez, Cristian¹; Belandria, Norly^{2,3}; León, Francisco⁴; Verjel, Victor⁵; Maldonado Marcelino^{5,6}

¹Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

²Postgrado de Ingeniería Vial, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

³Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA), Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

⁴Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

⁵Programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.

⁶Instituto Superior de Educación Rural de Pamplona (ISER), Colombia.
ingjebb@gmail.com, johannes@ula.ve

Resumen

Actualmente, los avances computacionales han evolucionando y despertado el interés por el manejo de software de modelación con aplicación en la geotecnia, que utilizan los modelos numéricos como el método de elementos finitos. La presente investigación tiene como objetivo comparar los resultados de factor de seguridad en taludes, hallados de forma analítica por métodos tradicionales comprobados basados en el método de equilibrio límite (Fellenius 1963, Bishop 1955, Janbu 1954) y a través de modelos numéricos, con el software Slide utilizando como base el método de equilibrio límite (Fellenius 1963, Bishop 1955, Janbu 1954, Spencer, 1967) y el software Plaxis utilizando el método de elementos finitos. La finalidad con los resultados es verificar el uso de los modelos numéricos mediante la utilización de software de aplicación geotécnica en comparación con los métodos tradicionales, para recomendar a la comunidad de ingenieros su utilización. Concluyendo que los modelos numéricos demostraron su eficiencia, simplicidad de aplicación, rapidez y exactitud de resultados, en comparación a la seguridad de los resultados que se puede obtener por medio de los métodos tradicionales.

Palabras Claves: Estabilidad de taludes, Factor de seguridad, Modelos numéricos, Elementos finitos.

Abstract

Currently, computational advances have evolved and aroused interest in the management of modeling software with application in geotechnics, which use numerical models as the finite element method. The objective of this research is to compare the safety factor results in slopes, found analytically by proven traditional methods based on the limit equilibrium method (Fellenius 1963, Bishop 1955, Janbu 1954) and through of numerical models, with the Slide software using the limit equilibrium method (Fellenius 1963, Bishop 1955, Janbu, 1954, Spencer, 1967) and the Plaxis software using the finite element method. The purpose of the results is to verify the use of numerical models by using geotechnical application software compared to traditional methods, to recommend their use to the engineering community. Concluding that the numerical models demonstrated their efficiency, simplicity of application, speed and accuracy of results, compared to the security of the results that can be obtained by means of traditional methods.

Keywords: Slope stability, Safety factor, Numerical models, Finite elements.

1 Introducción.

La estabilidad de taludes es uno de los factores críticos a considerar en el desarrollo de una obra civil, ya que afecta la economía, seguridad y comunicación de la sociedad. A una superficie de suelo o roca expuesta que se sitúa en un ángulo con la horizontal se le llama talud, este talud o pendiente puede ser natural o construida. Un componente de la gravedad actúa sobre la masa de suelo o roca, produciendo una superficie de rotura donde la fuerza motriz supera la resistencia del material al corte a lo largo de la superficie, generando la falla o rotura del talud, es decir, desprendimiento o deslizamiento del material.

En muchos casos, se espera que los ingenieros geotecnistas realicen cálculos para comprobar la seguridad de los taludes naturales, taludes de excavaciones y terraplenes compactados. Este proceso llamado análisis de estabilidad, implica la determinación y la comparación del corte desarrollado a lo largo de la superficie de ruptura más probable con la resistencia del material al corte.

El análisis de la estabilidad de un talud comprende la evaluación de variables tales como la estratificación, parámetros de resistencia del material, presencia de agua, fuerzas sísmicas, determinación de la superficie de rotura, entre otras; añadiendo complejidad al problema. Utilizando como parámetro para medir la estabilidad el factor de seguridad (FS).

La presente investigación se centra en la evaluación de la estabilidad de taludes de material suelo, homogéneos, sin presencia de agua, sin sobre carga y sin análisis sísmico; a través de la determinación de FS aplicando métodos comprobados tradicionales basados en el método de equilibrio límite (MEL) (Fellenius 1963, Bishop 1955, Janbu 1954) y a través de modelos numéricos por simulación; con el software Slide (Marca Registrada) utilizando como base el MEL (Fellenius 1963, Bishop 1955, Janbu 1954, Spencer 1967) y el software Plaxis V.8 (Marca Registrada) utilizando el método de elementos finitos (MEF).

Una vez obtenidos los resultados por las distintas metodologías, se comparan y se establecen los criterios de seguridad de acuerdo al valor obtenido de FS según recomendaciones de (Sowers y col., 1970) en cada caso, estableciendo algunas recomendaciones sobre el dimensionamiento del talud y medidas de estabilización.

2 Marco metodológico.

Para desarrollar esta investigación se estableció una metodología que comprende cuatro (4) etapas mediante las cuales fue posible lograr el objetivo. Estas etapas fueron: Caracterización de la geometría del talud, definición de los parámetros de resistencia del material en estudio y condiciones de borde del modelo. Luego, determinar el factor de seguridad utilizando los métodos tradicionales comprobados. Posteriormente, determinar el factor de seguridad utilizando software de simulación con aplicación en geotecnia. Finalmente, comparar resultados de factor de seguridad obtenidos por los métodos tradicionales y los obtenidos por software de aplicación geotécnica utilizando modelos numéricos para llegar a las conclusiones sobre la estabilidad y hacer recomendaciones.

En este orden de ideas se describe cada una de las etapas para lograr los objetivos planteados.

2.1 Caracterización del talud.

El estudio se realizó a tres (3) tipos de materiales de suelo, homogéneos, en condición drenada y sin acción sísmica, para simplificar el análisis. Material Tipo 1: Suelo arcilloso, Tipo 2: Suelo limo-arcilloso y Tipo 3: Suelo arena de media a fina. Cada tipo de material está definido por sus propiedades elásticas y mecánicas cuyas características se describen en la Tabla 1, valores tomados del manual del software Plaxis los cuales se usan como referencia y se consideran adecuados, sin embargo, se recomienda para casos prácticos particulares determinar las propiedades elásticas y mecánicas del material, ya que el material suelo es muy variable dependiendo de su origen y condiciones a la que esté sometido.

Tabla 1. Propiedades elásticas y mecánicas de los materiales en estudio

(*) Tipo de material	γ_h kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	$K_x=K_y$ m/d	E kN/m ²	ν	C kN/m ²	ϕ °
1	15	16	1,30E-5	4,30E4	0,35	50	20
2	16	18	1,70E-3	5,50E4	0,40	6	30
3	18	21	8,64	1,50E4	0,25	0	36

* γ , es el peso específico del suelo en condición húmeda, γ_{sat} , es el peso específico del suelo saturado, K_x y K_y , representa el coeficiente de permeabilidad del suelo, E, representa el modulo de Young, ν , es el coeficiente de Poisson, C, define la cohesión del material, ϕ , representa el ángulo de fricción interna del suelo.

Sobre la geometría de los modelos de talud se utilizaron diferentes ángulos de inclinación de la cara del talud (β) y dos (2) alturas (H) (10m y 20m).

Para el análisis fue necesario establecer condiciones de contorno, limitando el desplazamiento y la rotación en las caras comprendidas por los puntos 2, 3, 4, 5, 6 y 7; que se muestran en la Figura 1. Además, se fija una distancia de $5H$ en dirección horizontal desde la cresta del talud y H en dirección vertical y horizontal desde el pie del talud, para evitar que la rigidez del contorno antes descrito afecte el área de estudio en las cercanías de la cara del talud. En este sentido, es recomendable para el análisis de otros materiales como las arcillas blandas, que pueden sufrir desecación y grietas con más facilidad aumentar la distancia H al pie del talud.

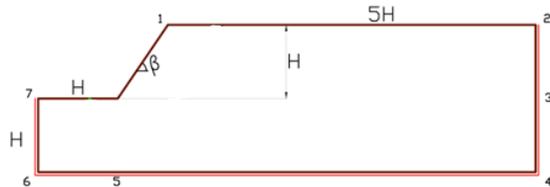


Figura 1. Geometría, condiciones de contorno del talud.

2.2 Determinación de factor de seguridad.

2.2.1 Utilizando métodos tradicionales comprobados.

Haciendo uso de las metodologías probadas para el análisis de estabilidad de taludes basadas en el MEL se obtiene el FS para cada uno de los casos, seleccionando para éste análisis los métodos (Fellenius 1963, Bishop 1955, Janbu 1954), por ser las metodologías tradicionales más sencillas de desarrollar por su simplicidad. Se utilizó el método de rebanadas o dovelas con un radio para la superficie de rotura de 25m y un número de treinta (30) dovelas.

2.2.2. Utilizando simulación con el programa Slide versión 6.0

El software de simulación Slide realiza un análisis de estabilidad de taludes en 2D, tiene como limitación la modelación en secciones transversales uniformes con deformaciones planas donde la carga y los estados tensionales se supongan uniformes, realizando un análisis paramétrico. El FS que se usa como parámetro de estabilidad se evalúa bajo el MEL, utilizando el criterio de Mohr-Coulomb se reducen los parámetros de resistencia al cortante de forma gradual, cohesión (C) y ángulo de fricción interna del suelo (ϕ), provocando la rotura inicial y finalmente la rotura global. Se utilizó las metodologías de (Fellenius 1963, Bishop 1955, Janbu 1954, Spencer

1967) para el análisis de FS.

A continuación, en la Figura 2 se detallan cuatro secciones de talud para la observación de los círculos de rotura generados a partir de los datos suministrados en el programa Slide y el FS.

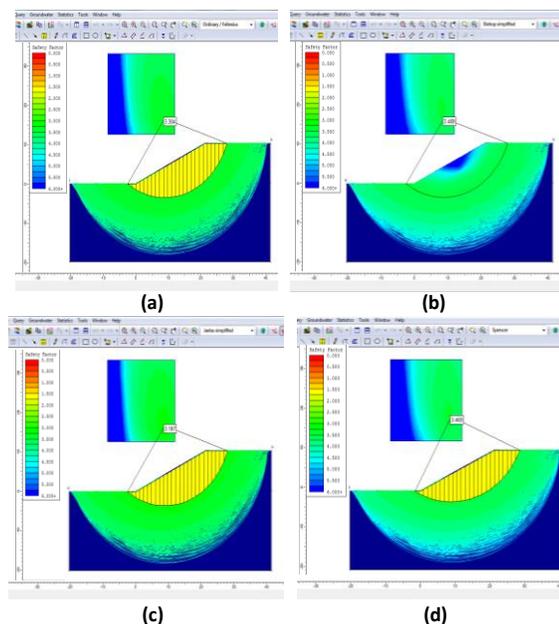


Figura 2. Imagen programa Slide. Factor de seguridad (FS), superficie de rotura. Material 1, altura $H=10\text{m}$ e inclinación del talud ($\beta=25^\circ$). (a) Método de (Fellenius, 1963). (b) Método de (Bishop, 1955) (c) Método de (Janbu, 1954). (d) Método de (Spencer, 1967)

2.2.3. Utilizando simulación con el software Plaxis versión 8.2.

El software Plaxis utiliza el MEF para el cálculo por simulación de deformaciones, esfuerzos y estabilidad, utilizando una interfaz gráfica (CAD) para generar los modelos geométricos. Tiene como limitación la modelación en secciones transversales uniformes con deformaciones planas donde la carga y los estados tensionales se supongan uniformes, realizando un análisis paramétrico.

El FS que se usa como parámetro de estabilidad, Plaxis lo evalúa utilizando el método que se conoce como modelo de elementos finitos, utilizando el criterio de Mohr-Coulomb se reducen los parámetros de resistencia al cortante de forma gradual, cohesión (C) y ángulo de fricción interna del suelo (ϕ), provocando la rotura inicial y finalmente la rotura global.

Para el análisis se crea un modelo geométrico del talud, tipo de material, parámetros de resistencia, condiciones de contorno, generación de la malla de elementos finitos, posición del nivel freático, presión

de poros y presiones efectivas iniciales; posteriormente se realiza el cálculo de deformaciones.

La Figura 3 muestra las deformaciones totales por cortante, la Figura 4 muestra la deformación de la malla de elementos finitos y la Figura 5 el factor de seguridad.

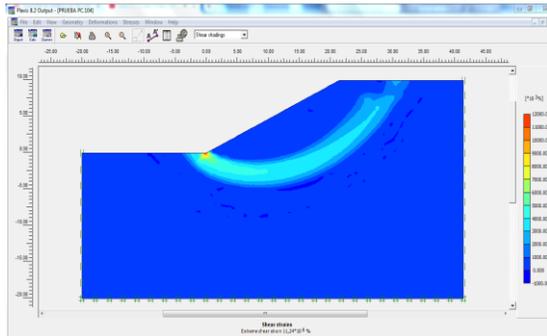


Figura 3. Imagen programa Plaxis. Deformación total por cortante. Material 1, altura H=10m e inclinación del talud ($\beta=25^\circ$).

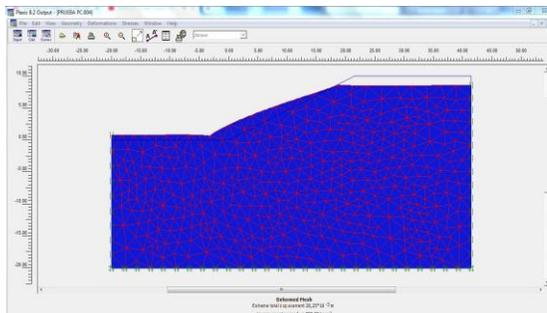


Figura 4. Imagen programa Plaxis. Deformación malla elementos finitos. Material 1, altura H=10m e inclinación del talud ($\beta=25^\circ$).

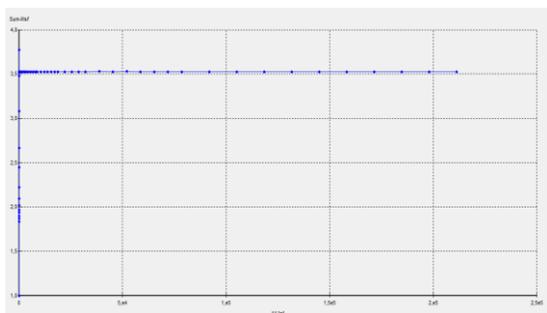


Figura 5. Imagen programa Plaxis. Factor de seguridad. Material 1, altura H=10m e inclinación del talud ($\beta=25^\circ$).

2.3 Comparación de resultados y recomendaciones.

Una vez calculado el FS utilizando las tres metodologías (Metodos tradicionales comprobados, programa Slide y Plaxis), se establecen criterios de seguridad según las recomendaciones de (Sowers y col., 1970) mostradas en la Tabla 2 en cada caso de análisis, estableciendo algunas recomendaciones

sobre el dimensionamiento del talud y medidas de estabilización.

Tabla 2. Recomendaciones de FS. (Sowers y col., 1970).

Rango del FS en taludes	
FS	Significado
< 1	(D) Inseguro
1 – 1,20	(C) Seguridad cuestionable
1,30 – 1,40	(B) Satisfactorio para: Corte y terraplenes
> 1,50	(A) Seguro para presas

3 Análisis de resultados.

El estudio comparativo desarrollado en esta investigación tiene la finalidad de establecer criterios de seguridad en la toma de decisiones al analizar la estabilidad de un talud presente en cualquier obra civil con menores probabilidades de falla.

A continuación, se detalla en la Tabla 3, los resultados obtenidos de FS utilizando los métodos tradicionales comprobados (Fellenius 1963, Bishop 1955, Janbu 1954); basados en el MEL y los del programa Plaxis basado en el MEF. De igual forma, la Tabla 4 los del programa computacional Slide utilizando las metodologías de (Fellenius 1963, Bishop 1955, Janbu 1954, Spencer 1967); igual basados en el MEL. Análisis realizado para cada talud y para cada material establecido.

Tabla 3. Valor de FS. Metodologías tradicionales y programa Plaxis.

Material	Geometría del talud			Metodologías tradicionales (*)			Programa Plaxis
	H (m)	β (°)	Caso	(1)	(2)	(3)	
1	10	25	1	6,05(A)	7,23(A)	6,64(A)	3,52(A)
		45	2	2,95(A)	3,24(A)	3,10(A)	2,65(A)
		90	3	3,55(A)	4,11(A)	3,94(A)	1,12(C)
	20	25	4	5,96(A)	6,66(A)	6,48(A)	2,34(A)
		45	5	1,81(A)	2,01(A)	1,91(A)	1,65(A)
		90	6	2,43(A)	2,84(A)	2,70(A)	<1(D)
2	10	35	7	3,11(A)	4,15(A)	3,66(A)	1,30(B)
		45	8	1,68(A)	2,12(A)	1,91(A)	1,06(C)
		90	9	2,29(A)	2,96(A)	2,51(A)	<1(D)
	20	35	10	2,44(A)	3,23(A)	2,80(A)	1,14(C)
		45	11	1,20(C)	1,46(A)	1,33(B)	<1(D)
		90	12	1,98(A)	2,41(A)	2,21(A)	<1(D)
3	10	40	13	2,41(A)	2,80(A)	2,46(A)	<1(D)
		45	14	2,08(A)	3,18(A)	2,41(A)	<1(D)
		90	15	2,88(A)	3,66(A)	3,38(A)	<1(D)
	20	40	16	2,49(A)	3,26(A)	2,78(A)	<1(D)
		45	17	1,32(B)	1,64(A)	1,48(A)	<1(D)
		90	18	2,35(A)	2,90(A)	2,63(A)	<1(D)

* (1) Fellenius, (2) Bishop, (3) Janbu. (A),(B),(C) y (D) criterios de seguridad según las recomendaciones de (Sowers y col., 1970) Tabla 2.

Tabla 4. Valore de FS. Programa Slide.

Material	Geometría del talud			Metodologías (*)					
	H (m)	β (°)	Caso	(1)	(2)	(4)	(5)	(6)	
1	10	25	1	3,33(A)	3,49(A)	3,19(A)	3,45(A)	3,47(A)	
		45	2	2,74(A)	2,78(A)	2,77(A)	2,96(A)	2,77(A)	
		90	3	0,86(D)	0,79(D)	0,92(D)	0,96(D)	0,98(D)	
	20	25	4	2,32(A)	2,19(A)	2,11(A)	2,27(A)	2,32(A)	
		45	5	1,71(A)	1,67(A)	1,77(A)	1,71(A)	1,68(A)	
		90	6	0,96(D)	0,92(D)	1,00(C)	1,02(C)	1,04(C)	
2	10	35	7	1,30(B)	1,36(B)	1,28(B)	1,36(B)	1,36(B)	
		45	8	1,04(C)	1,10(C)	1,03(C)	1,10(C)	1,10(C)	
		90	9	0,59(D)	0,57(D)	0,59(D)	0,61(D)	0,61(D)	
	20	35	10	1,11(C)	1,15(C)	1,11(C)	1,15(C)	1,16(C)	
		45	11	0,87(D)	0,93(D)	0,86(D)	0,91(D)	0,92(D)	
		90	12	0,45(D)	0,44(D)	0,46(D)	0,47(D)	0,45(D)	
3	10	40	13	0,88(D)	0,88(D)	0,88(D)	0,89(D)	0,89(D)	
		45	14	0,73(D)	0,74(D)	0,74(D)	0,75(D)	0,73(D)	
		90	15	0,45(D)	0,44(D)	0,46(D)	0,47(D)	0,45(D)	
	20	40	16	0,88(D)	0,88(D)	0,89(D)	0,90(D)	0,90(D)	
		45	17	0,74(D)	0,74(D)	0,75(D)	0,75(D)	0,75(D)	
		90	18	0,14(D)	0,17(D)	0,14(D)	0,14(D)	0,13(D)	

* (1) Fellenius, (2) Bishop, (4) Janbu Simplified, (5) Janbu Corrected, (6) Spencer
(A),(B),(C) y (D) criterios de seguridad según las recomendaciones de (Sowers y col., 1970) Tabla 2.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos de FS utilizando los métodos tradicionales comprobados.

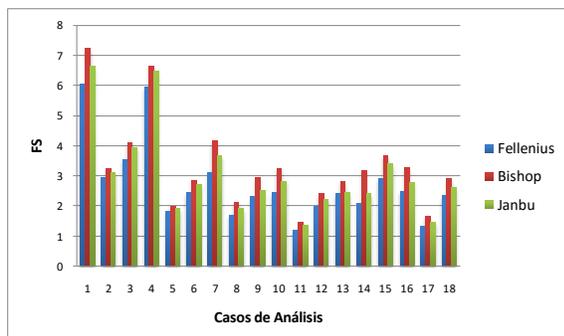


Figura 6. Factor de seguridad (FS), utilizando los métodos tradicionales comprobados (Fellenius, 1963), (Bishop, 1955) y (Janbu, 1954); basados en el MEL.

En la Figura 6 se puede apreciar que en todos los casos, por el método de (Bishop 1955) el FS es mayor en comparación a los métodos de (Janbu 1954 y Fellenius 1963). También se observa que el método de (Janbu 1954) muestra FS mayores al método de (Fellenius 1963). Se compararon los resultados con la escala de (Sowers y col., 1970) mostradas en la Tabla 2, donde la mayoría de los casos se encuentran en un rango de seguridad (A) seguro y (B) satisfactorio, con excepción del caso 11 donde para el método de (Fellenius 1963) se encuentra en el rango (C) seguridad cuestionable.

Asimismo, la Figura 7 muestra los resultados obtenidos de FS utilizando el programa

computacional Slide.

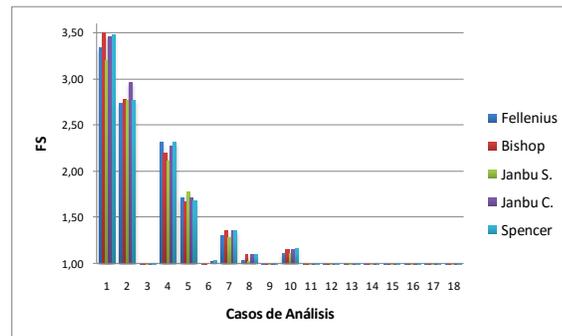


Figura 7. Factor de seguridad (FS), programa computacional Slide utilizando las metodologías de (Fellenius, 1963), (Bishop, 1955), (Janbu, 1954) y (Spencer, 1967); basado en el MEL.

En la Figura 7 podemos observar que los resultados obtenidos por simulación con el software Slide a través de los diferentes métodos son muy parecidos en magnitud para cada caso. De igual forma, se compararon los resultados con la escala de (Sowers y col., 1970), donde muchos de los casos se encuentran en un rango de seguridad (A) seguro, (B) satisfactorio y (C) seguridad cuestionable; pero se debe tomar con especial atención aquellos casos donde el rango se encuentra en (D) inseguro, ya que el hecho de que el FS<1 quiere decir en términos reales que la seguridad no existe, por lo que hay que tomar medidas de estabilización como: modificar si es posible la geometría del talud, implementación de estabilización vegetal, terrazo, fajas de coronamiento, contrafuertes, pantallas atirantadas, entre otros; replanteando el análisis.

La Figura 8 muestra los resultados obtenidos de FS utilizando el programa computacional Plaxis.

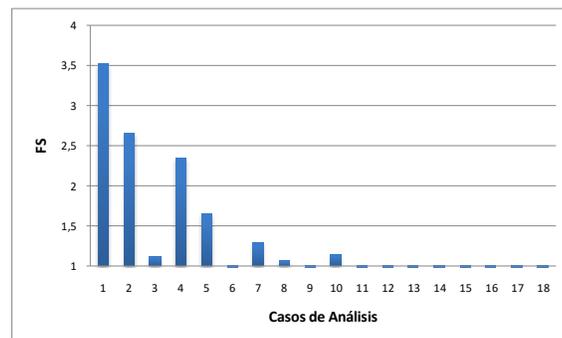


Figura 8. Factor de seguridad (FS), utilizando programa computacional Plaxis; basado en el MEF.

De la misma manera, los resultados mostrados en la Figura 8 se compararon con la escala de (Sowers y col., 1970), donde muchos de los casos se encuentran en un rango de seguridad (A) seguro, (B) satisfactorio y (C) seguridad cuestionable; pero se

debe tomar con especial atención aquellos casos donde el rango se encuentra en (D) *inseguro*, donde se puede tomar medidas de estabilización y evaluar nuevamente el talud para garantizar seguridad.

A modo de resumen, comparando resultados, en la mayoría de los casos los métodos tradicionales comprobados muestran valores de FS mayores que los obtenidos por modelos numéricos.

4 Conclusiones.

Finalizado el proceso de análisis de los resultados de los diferentes casos mostrados, se obtienen las siguientes conclusiones:

Utilizando métodos tradicionales comprobados.

El método de (Bishop 1955) arroja factor de seguridad (FS) mayores en comparación a los métodos de (Janbu 1954) y este mayores al de (Fellenius 1963), es decir, que el método (Fellenius 1963) es un método más conservador ya que muestra factores más bajos, en un rango intermedio el método de (Janbu 1954), mientras que el método (Bishop 1955) es el menos conservador, para todos los casos analizados.

Utilizando simulación con el programa Slide versión 6.0

Los resultados obtenidos con el uso de este programa son muy similares en magnitud para los diferentes métodos utilizados. Presentando algunos casos donde la estabilidad del talud está comprometida, es decir, se produce la falla ya que los materiales considerados son arenas con cohesión igual a cero lo que no aporta estabilidad, por lo que se recomienda tomar medidas de estabilización.

Utilizando simulación con el software Plaxis versión 8.2.

De igual forma, en algunos casos se ve comprometida la estabilidad debido a las propiedades elásticas y mecánicas de los materiales, por lo que se recomienda tomar medidas de estabilización.

Comparando resultados de FS obtenidos tanto por los métodos tradicionales comprobados como por modelos numéricos, se observa que en los resultados por el método tradicional el valor obtenido es mayor en comparación a los de simulación. Podemos notar que para todos los casos el método tradicional es el menos conservador porque presenta factores de seguridad mayores.

El método tradicional muestra FS satisfactorios, mientras que por los métodos de simulación arrojan valores de FS en el rango de inseguro para algunos casos, es decir, presentan fallas. Esto ocurre ya que por el método tradicional posiblemente no se está

considerando la superficie de rotura más crítica, mientras que por el método de simulación se consideran un número mayor de posibles superficies de rotura.

El FS obtenido por modelos numéricos presenta resultados similares, siendo este mucho más conservadores que el método tradicional.

Cabe destacar, que la estabilidad de los taludes va a depender de las propiedades físicas y elásticas del material, como de la geometría del talud (altura e inclinación del talud). Otros aspectos que intervienen son la sobre carga, fuerzas sísmicas, ubicación del nivel freático y condiciones particulares de meteorización y erosión del material.

Por tanto, para analizar la estabilidad de taludes homogéneos, en condición drenada y sin acción sísmica ni sobre cargas; tal como se consideró en esta investigación, es factible utilizar modelos numéricos con mayor seguridad que el método tradicional comprobado, ya que los resultados son más conservadores, es decir, arrojan FS menores lo que garantiza estabilidad y seguridad.

Al mismo tiempo, la utilización de modelos numéricos trae como ventaja la rapidez del análisis al igual que permite estudiar varios aspectos a la vez, como son las deformaciones laterales y distribución de esfuerzos.

Para finalizar, al analizar la estabilidad de taludes se pueden utilizar estas herramientas basadas en los métodos numéricos, tanto como método complementario a los métodos tradicionales, como sustitutivo con la prudencia que esto implica.

Recomendaciones

En los casos donde el FS sea muy alto en magnitud se puede considerar alcanzar alturas e inclinaciones mayores en los taludes, con la debida evaluación de estabilidad.

Por otra parte, en los casos donde el FS es menor a 1, se recomienda tomar medidas de estabilización donde se puede evaluar las siguientes opciones: cambiar la geometría del talud, implementación de estabilización vegetal, terracedo, fajas de coronamiento o descabezado del talud, contrafuertes, pantallas atirantadas, entre otros. El cambiar la geometría del talud para favorecer la estabilidad (disminuir inclinación o altura) trae como consecuencia inconvenientes al momento de su construcción, incomodidad, mayor movimiento de tierra, mayores gastos de ejecución y mayor impacto ambiental; aspectos importantes a considerar.

Ahora bien, como la presente investigación consideró casos sencillos de análisis, es conveniente

al realizar un análisis de estabilidad de talud evaluar las condiciones particulares del material en la zona de estudio, como lo es la presencia de agua en el talud, es decir, condición de saturación por presencia del nivel freático, actividad sísmica, sobre cargas, meteorización y estratificación.

En definitiva, se recomienda a la comunidad de geotecnistas para el análisis de estabilidad de taludes donde el parámetro a evaluar sea el FS, la utilización de modelos numéricos ya sea como método sustitutivo o complementario, porque muestran resultados de forma eficiente y de manera conservadora.

Finalizando, se recomienda continuar esta línea de investigación evaluando otras condiciones que afectan la estabilidad, tales como: sobre carga, estratificación, fuerzas sísmicas, posición del nivel freático, entre otras.

Referencias

- Belandria N, 2015, Desarrollo de un método para el cálculo generalizado de estabilidad de taludes, basado en técnicas innovadoras del cálculo matemático y computacional. Tesis doctoral Universidad de Los Andes, Venezuela.
- Belandria N, Herrera F, 2018, Vulnerabilidad geotécnica del borde de la terraza de Mérida. Venezuela. Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela.
- Bishop A, 1955, The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Geotechnique*, Vol. 5, 7-17.
- Briceño J, Uzcategui A, Belandria N, León F y Verjel V, 2020, Asentamientos en fundaciones continuas con modelos numéricos de simulación con elementos finitos, Artículo de Investigación. *Revista Ciencias e Ingeniería*, Vol. 41, N° 2. Universidad de Los Andes, Venezuela, 157-166, ISSN 1316-7081, ISSN Elect. 2244-8780.
- Bustamante A, 2011, Modelaje geotécnico por elementos finitos y comprobación instrumental de la exactitud lograda. Universidad Católica Andrés Bello de Chile, [Página Web en Línea], Disponible en: <http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAS0664.pdf>, [Consulta: 2020, Febrero 10].
- Cheng M and Xie C, 2014, Investigation on the stability of slopes with cracks subjected to seismic effect, Vol. 19, *Bund. R.*.
- Díaz Y, López E, 2008, Plaxis como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arenas, Universidad de Magallanes de Punta Arenas Chile, [Página Web en Línea], Disponible en: http://www.umag.cl/biblioteca/tesis/diaz_diaz_2008.pdf, [Consulta: 2020, Marzo 09].
- Fellenius W, 1936, Calculation of Stability of Earth Dams, *Transactions, Second Congress, Large Dams*, Vol. 4, 445.
- Janbu N, 1954, Stability analysis of slopes with dimensionless parameters, PhD thesis, Cambridge, Massachusetts, Harvard University, 81.
- Lian-Heng Z, Xiao C, Yingbin Zh, Liang L and De-Jian L, 2016, Stability analysis of seismic slopes with cracks, *Computers and Geotechnics*, Vol 77, 77-90.
- Mehdipour I, Ghazavi M, Moayed R, 2013, Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 37, N° 4, 23-34, DOI: 10.1016/j.geotextmem.2013.01.001.
- Membreño D, 2012, Análisis de estabilidad de taludes por el método de elementos finitos, Universidad Politécnica de Cataluña, [Página Web en Línea], Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/41808854.pdf>, [Consulta: 2020, Enero 28].
- Mendoza J, 2016, Análisis de estabilidad de taludes de suelos de gran altura en la mina Antapaccay, Pontificia Universidad Católica del Perú, [Página Web en Línea], Disponible en: <https://www.coursehero.com/file/25899412/MENDOZA-JOEL-ESTABILIDAD-TALUDESpdf/>, [Consulta: 2020, Abril 05].
- Michalowski R, 2013, Stability assessment of slopes with cracks using limit analysis, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 50, N° 10, 1001-1021, DOI: 10.1139/cgj-2012-0448.
- Noguera V, 2018, Análisis geotécnico de la estabilidad de taludes a lo largo del río Albarrégas desde el sector El Rodeo hasta el viaducto Campo Elías, Mérida, Venezuela, Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela.
- Orozco K, 2013, Estabilidad de taludes en suelos residuales evaluado en corto y largo plazo, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Peña G, 2012, Estudio probabilístico de la estabilidad del talud de la terraza de Mérida Venezuela, Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela.
- Pereira M, 2012, Modelos de análisis de estabilidad de taludes, Universidad Central de Venezuela, Caracas Venezuela.
- Programa computacional Plaxis V.8.2 bidimensional, editado por R.B.J Brinkgreve Delft University of Technology & PLAXIS b.v. The Netherlands.
- Rosales E, 2018, Análisis probabilístico de la estabilidad del talud alto chama de la ciudad de Mérida Venezuela, Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela.
- Rocscience, 2004, Slide, Software.
- Shuwei Z, 2018, Adaptive phase field simulation of quasi-static crack propagation in rocks, *Underground Space*, DOI: 10.1016/j.undsp.2018.04.006

Sowers and Sowers, 1970, Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones.

Spencer E, 1967, A method of analysis for stability of the embankment using parallel inter-slice forces, *Geotechnique*, Vol. 17, 11-26.

Tang S, Huang R, Tang C, Liang Z and Heap M, 2017, The failure processes analysis of rock slope using numerical modelling techniques, *Engineering Failure Analysis*, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.06.029.

Tardeo C, 2016, Análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos en la zona de Huayllapampa del distrito de Cuenca – Huancavelica”. Universidad Nacional de Huancavelica, Perú.

Utili S, 2013, Investigation by limit analysis on the stability of slopes with cracks, *Géotechnique*, Vol. 63, N° 2, 140–154, DOI: 10.1680/geot.11.P.068.

Wei G, Shuang D, Ting X and Tianyang H, 2017, Failure process of rock slopes with cracks based on the fracture mechanics method, *Enggeo*, DOI:10.1016/j.enggeo.2017.10.020.

Yong-xin L and Xiao-li Y, 2016, Stability analysis of crack slope considering nonlinearity and water pressure, *KSCE Journal of Civil Engineering* 20(6):2289-2296 Copyright 2016 Korean Society of Civil Engineers, DOI: 10.1007/s12205-015-0197-3.

Florida (USF), Tampa, FL, USA. Investigador y Profesor de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: fleon@ula.ve

Víctor Hugo Verjel Tarazona: Ingeniero Civil, Magister en Gestión de Proyectos. Profesor programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona, República de Colombia. Correo electrónico: victor.verjel@unipamplona.edu.co

Marcelino Maldonado Trigos: Ingeniero Civil, Magister en Gerotecnia. Profesor programa de Ingeniería Civil, Departamento de Geotecnia Universidad de Pamplona, República de Colombia. Profesor Instituto Superior de Educación Rural de Pamplona (ISER), República de Colombia. Correo electrónico: mmtrigos@unipamplona.edu.co, marcelinotrigos.docente@iser.edu.co

Recibido: 13 de noviembre de 2019

Aceptado: 12 de marzo de 2020

Johannes Enrique Briceño Balza: Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Vial. Profesor Asistente investigador de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela, Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida Venezuela.

Junior J. Villa S.: Ingeniero Civil, Egresado de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: juniorvilla2311@gmail.com.

Cristian Gómez: Ingeniero Civil, Egresado de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: cristian-2223@hotmail.com.

Norly Belandria: Ingeniero Geólogo. Magister en Matemática aplicada a la ingeniería. Doctora en Ciencias Aplicadas. Coordinadora del grupo de investigación en Geología Aplicada (GIGA). Profesor agregado e investigadora de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: norlyb@gmail.com

Francisco León Oviedo: Ingeniero Mecánico, ULA. PhD in Mechanical Engineering University of South