



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

*Dr. Jesús Enrique Lossada - Primer rector en la reapertura de LUZ 1946.
Abogado, docente, poeta, escritor, ensayista, dramaturgo,
traductor, parlamentario, periodista y profesor universitario zuliano.*

Ubicación y Profundidad de la Grieta de Tracción en Taludes con el Empleo de Modelos Numéricos

Johannes Enrique Briceño Balza^{1,2*} , Norly Thairis Belandria Rodriguez^{2,3} ,
Francisco Manuel León Oviedo⁴ 

¹Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. C.P. 5101.

²Postgrado de Ingeniería Vial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. C.P. 5101.

³Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA), Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. C.P. 5101.

⁴Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. C.P. 5101.

*Autor de correspondencia: ingjebb@gmail.com, johannes@ula.ve

<https://doi.org/10.22209/rt.v45n2a04>

Recepción: 22 de mayo 2020 | Aceptación: 25 de febrero de 2022 | Publicación: 01 de mayo de 2022

Resumen

En la estabilidad de taludes, un factor importante a considerar es la presencia de grietas de tracción. Con los años, la estabilidad se ha analizado utilizando el método analítico de equilibrio límite y más recientemente con el uso de métodos numéricos. En investigaciones anteriores, la ubicación y/o la profundidad de la grieta, se fijaron previamente como un dato conocido. En esta investigación, utilizando el método de elementos finitos, se simuló el comportamiento de la superficie de rotura en suelos, se establecieron las propiedades de los materiales y se asignaron las condiciones geométricas (inclinación y altura del talud), evaluando su influencia en la deformación por cortante, con la finalidad de visualizar la aparición de la superficie de rotura conformada por la grieta de tracción, y de esta manera se determinó su ubicación y profundidad. Se demostró que al aumentar las condiciones geométricas, la profundidad de la grieta aumenta, la distancia de ubicación disminuye, al igual que el factor de seguridad. Finalmente, se concluye que se producen grietas de tracción en el caso de los suelos finos estudiados, que las condiciones geométricas son determinantes en la ubicación y profundidad de la grieta de tracción, así como en la estabilidad del talud.

Palabras clave: elementos finitos; estabilidad de taludes; grieta de tracción; modelos numéricos; simulación.

Location and Depth of the Traction Cracks in Slopes with the Use of Numerical Models

Abstract

In slope stability, an important factor to be considered is the presence of tension crack. Over the years, stability has been analyzed using the limit equilibrium analytical method and more recently with the use of numerical methods. In previous investigations, the location and/or the depth of the crack were previously set. In this investigation, using the finite element method, the behavior of the failure surface in soils was simulated, the properties of the materials were established, the geometric conditions (inclination and height of the slope) were assigned, evaluating their influence

on the deformation by shear, in order to visualize the appearance of the fracture surface formed by the tensile crack, and in this way its location and depth were determined. It was shown that as the geometric conditions increase, the depth of the crack increases, the location distance decreases, as does the safety factor. Finally, it is concluded that tensile cracks occur in the case of the fine soils studied, that the geometric conditions are decisive in the location and depth of the tensile crack, as well as in the stability of the slope.

Key words: finite elements; numerical models; simulation; slope stability; tension crack.

Localização e profundidade da fissura de tração em taludes com o uso de modelos numéricos

Resumo

Na estabilidade de taludes, um fator importante a ser considerado é a presença de trincas de tração. Ao longo dos anos, a estabilidade tem sido analisada pelo método analítico de equilíbrio limite e, mais recentemente, por métodos numéricos. Em investigações anteriores, a localização e/ou profundidade da fissura foram previamente estabelecidas como dados conhecidos. Nesta investigação, por meio do método dos elementos finitos, foi simulado o comportamento da superfície de ruptura em solos, estabelecidas as propriedades do material e atribuídas as condições geométricas (inclinação e altura do talude), avaliando sua influência na deformação por cisalhamento, com o objetivo de visualizar a aparência da superfície de ruptura formada pela trinca de tração, e assim determinar sua localização e profundidade. Foi demonstrado que à medida que as condições geométricas aumentam, a profundidade da fissura aumenta, a distância de localização diminui e o fator de segurança diminui. Por fim, conclui-se que as fissuras de tração ocorrem no caso dos solos finos estudados, que as condições geométricas são determinantes na localização e profundidade da fissura de tração, bem como na estabilidade do talude.

Palavras-chave: elementos finitos; Estabilidade da inclinação; rachadura de tração; modelos numéricos; simulação

Introducción

El movimiento de tierra necesario para la construcción de obras civiles genera cortes en el terreno natural, produciendo taludes sobre materiales diversos, sometidos a condiciones ambientales y geotécnicas distintas, lo que muy probablemente podría generar desprendimientos de roca o deslizamiento de suelo, según el caso, debido a la inestabilidad de los taludes, afectando el emplazamiento de una obra civil y sus implicaciones tanto económicas, como de comunicación, entre otras. Estos deslizamientos se caracterizan típicamente por una inestabilidad repentina y pueden causar muchas víctimas y pérdidas considerables, debido a su gran velocidad y larga distancia de afectación (Chen *et al.*, 2021).

Un problema importante en la estabilidad de taludes, es la presencia de grietas de tracción (Ramírez y Alejano, 2014). El proceso evolutivo de los deslizamientos, está estrechamente relacionado con el desarrollo de la grieta de tracción (Chen *et al.*, 2021). En la práctica de la ingeniería, se ha demostrado la presencia de grietas en la parte superior del talud o terraplén antes de producirse la falla, las cuales facilitan la penetración de agua de lluvia, aumentando la tensión lateral y las fuerzas desestabilizadoras. Antes del deslizamiento se producen repentinamente numerosas grietas en viviendas, hundimiento de los cimientos y grietas en la superficie, las cuales se desarrollaron rápidamente (Zhang *et al.*, 2021). A pesar de la influencia potencialmente significativa de las grietas de tracción, casi todos los métodos existentes no las toman en cuenta o las tratan de una manera simplista; la formación de grietas de tracción aumentará significativamente el empuje de la masa de tierra (Abdollahi *et al.*, 2021) y por tanto la inestabilidad del talud. La superficie de rotura en un talud, no se produce solo por esfuerzos de corte, también influyen los esfuerzos de tracción, que no se pueden despreciar, generando las grietas de tracción (Tang *et al.*, 2019).

El método de equilibrio límite (MEL) es la técnica convencional más utilizada para analizar la estabilidad de taludes, suponiendo en la mayoría de los casos una superficie de rotura circular. En el caso de suelos, para simplificar el análisis, las fuerzas actuantes y resistentes como la cohesión, es considerada constante a lo largo de la

superficie de rotura, analizando el total de la misma o dividiendo la masa deslizada en dovelas o tajadas. El factor de seguridad (FS) es determinado sobre una superficie de deslizamiento crítica, que genera el menor valor del mismo, este se obtiene satisfaciendo el equilibrio estático en cada rebanada (Fellenius, 1936). Para el análisis de estabilidad, se supone que las fuerzas entre las dovelas son horizontales y sin tener en cuenta las fuerzas cortantes, se considera que la superficie de rotura no necesariamente es circular, se establece un factor de corrección de la curvatura de la superficie, hallando así el FS (Janbu, 1954). Cuando se analizan las fuerzas que actúan entre las dovelas, no se consideran las fuerzas cortantes, se realiza un proceso de iteración para obtener el FS (Bishop, 1955), y las mismas se consideran paralelas (Spencer, 1967). Para hallar el FS, debe suponerse que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas (Morgenstern y Price, 1965).

El MEL y el método de análisis de límite superior, han sido utilizados de forma analítica y empírica para el estudio de la estabilidad de taludes, con presencia de grietas de tracción. Las grietas de tracción se presentan típicamente en taludes de suelos cohesivos (arcilla, limo y arenas cementadas) o de roca (Utili, 2013). Estas grietas se propagan en forma vertical y se encuentran a menudo en la parte superior del talud, antes de la falla. En taludes de suelo la superficie de rotura está formada por una superficie por cortante y una superficie por tracción (Tang *et al.*, 2019). Esta superficie o plano de falla está compuesto por la grieta de tracción y el plano de deslizamiento en espiral logarítmica (Yong-xin y Xiao-li, 2016). Asimismo, Ucar (1992) indica que la superficie de rotura con presencia de grieta de tracción, está constituida por dos bloques con inclinaciones diferentes, además; en la parte superior adyacente a la corona o cresta del talud, se presenta la grieta de tracción vertical o casi vertical, y por otra parte, el resto de la superficie de rotura (bloque inferior), está representada por una fractura por cizallamiento. En cuanto a la profundidad de la grieta de tracción, no es más de la mitad de la altura del talud en condición seca (Cousins, 1980), mientras que la ubicación de la grieta desde la cresta del talud, puede estar entre el 20 y 50 % de la altura (Coats, 1981).

Para el análisis de estabilidad, el FS es función de la inclinación de la cara del talud, inclinación del plano de falla, profundidad de la grieta, profundidad del agua en la grieta, sobre carga, parámetros de resistencia, entre otros; el deterioro de la estabilidad puede ser bastante rápida, dependiendo de la combinación de factores en consideración (Shukla *et al.*, 2009). Otros factores a considerar en la estabilidad, es la disminución de los parámetros mecánicos, aumentando el rango de colapso y formando así fallas generales (Law y Lumb, 1978). Por tanto, la estabilidad de los taludes disminuye mucho en presencia de agua, grietas de tracción y fuerzas sísmicas (Shariati y Fereidooni, 2021).

Hoy en día se ha impulsado como herramienta poderosa el uso de los métodos numéricos, para el estudio de la presencia de grietas de tracción en taludes, al igual que otros problemas geotécnicos. En tal sentido, al analizar la estabilidad de taludes utilizando esta herramienta, se ha demostrado que esta se ve afectada por las grietas de tracción, con ubicación y profundidad conocida, no conocida, o no especificada (Lian-Heng *et al.*, 2016). De igual forma, otro aspecto relacionado con la estabilidad es la profundidad de la grieta de tracción, no solo está relacionada con la altura del talud, sino también con otros parámetros geométricos y mecánicos (Chen *et al.*, 2021). Por otro lado, la inclinación del talud y el tipo de suelo tienen alta sensibilidad en la estabilidad, mientras más empinado es más propenso a la inestabilidad (Sengani y Mulenga, 2021).

En el método analítico convencional, por lo general, se cambia una variable a la vez (análisis paramétrico), debido a que su capacidad de análisis es limitada, en algunos casos se pre-fijaba la profundidad (δ) y la ubicación (X) de la grieta de tracción, al igual que la superficie de deslizamiento crítica, llegando en algunos casos a presentar ecuaciones desarrolladas de forma analítica o empírica (Utili, 2013; Akram, 2014; Cheng y Xie, 2014; Lian-Heng *et al.*, 2016; Wei *et al.*, 2017). En cambio, la simulación por métodos numéricos a través del MEF, tiene la ventaja de poder observar la presencia, δ y X de la grieta, así como el desarrollo de la superficie crítica de rotura, sin fijar alguna previamente, pudiendo realizar un análisis paramétrico o multi-variable.

En esta investigación se simuló a través de un programa comercial, la influencia de las condiciones geométricas (β y H) en la formación, ubicación y profundidad de la grieta de tracción; estas se variaron de forma individual (análisis paramétrico) en las simulaciones realizadas. En estas simulaciones se observó la formación de la superficie de rotura, incluyendo en ella la presencia de grieta de tracción, es decir, la trayectoria dibujada por la superficie de rotura en la simulación, que permitió evidenciar con el cambio de trayectoria de la misma, la presencia de la grieta de tracción. Como objetivo final se determinó, con los resultados de cada simulación, δ y X de la grieta de tracción, sin imponer δ y/o X previamente, y se evaluó la estabilidad a través del FS.

Materiales y Métodos

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó un programa comercial de análisis por el método de elementos finitos (MEF), para realizar simulaciones del comportamiento de la superficie de rotura en casos particulares de taludes de material de suelo, con presencia de grieta de tracción, variando parámetros geométricos (β y H), con el propósito de obtener X y δ de la grieta de tracción, al igual que evaluar la estabilidad del talud a través del FS. Cabe aclarar que, aunque las propiedades elásticas y mecánicas de los materiales tienen influencia en la estabilidad, X y δ de la grieta de tracción, no se evaluó la variación ni la influencia de los mismos en los resultados, solo se variaron condiciones geométricas del talud (inclinación de la cara del talud, β y su altura, H).

También se estudió el desarrollo de la superficie de rotura, con la finalidad de notar el cambio en la trayectoria de la misma, formada por dos bloques constituidos por la grieta de tracción casi vertical adyacente a la corona del talud y el resto por un bloque inferior por fractura rotacional. Por tanto, la simulación permite determinar el punto de intersección entre la grieta de tracción y la corona del talud, logrando de esta manera determinar X y con el cambio de inclinación en la trayectoria de la superficie de rotura se determina δ de la grieta de tracción.

Obtención de la ubicación (X) y profundidad (δ) de la grieta de tracción

Para determinar por simulación X y δ de la grieta de tracción, se establecieron diferentes condiciones geométricas del talud; los parámetros de resistencia de los materiales se tomaron de la base de datos del programa. Dicho programa computacional utiliza el MEF para el cálculo por simulación de deformaciones, esfuerzos y estabilidad de diferentes casos de aplicación geotécnica; el mismo está diseñado para modelación mediante el MEF de problemas con deformaciones planas, en geometrías con sección transversal uniforme, donde se pueda suponer que los estados tensionales y de carga, son uniformes a lo largo de la dirección perpendicular a la sección transversal. Una ventaja importante que presenta el programa es la utilización de una interfaz gráfica (sistema CAD), que permite generar un modelo geométrico de forma rápida y sencilla.

Evaluación de la estabilidad del talud

El programa evalúa la estabilidad de taludes a través del FS por el MEF, utilizando el método que se conoce como reducción de resistencia al cortante o método de reducción *phi-c*, basado en el criterio de Mohr-Coulomb (Coulomb, 1776), donde los parámetros originales de resistencia del suelo, cohesión (C_o) y ángulo de fricción interna (ϕ_o), generan la envolvente inicial que no causará la falla del talud. Estos valores de C_o y ϕ_o son afectados por un factor de reducción, comenzando con el aumento de este factor en valores modestos, reduciendo así C y ϕ hasta generar la envolvente de falla que se intercepta con la envolvente inicial, obteniendo así C_f y ϕ_f , cuando esto sucede; el factor de seguridad final es determinado por el factor de reducción (Dyson, 2018).

En esta investigación se estudiaron 2 materiales (Tabla 1), tomados de la base de datos del programa; evaluando su comportamiento a través del modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb (Coulomb, 1776).

Tabla 1. Propiedades elásticas y mecánicas de los materiales en estudio, tomadas de la base de datos del programa de simulación.

*Material N°	Descripción	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ϕ (°)	C (kN/m ²)	E (kN/m ²)	ν	Kx=Ky (m/día)
1	Arcilla	16,00	17,00	25,00	60,00	$4,80 \times 10^4$	0,40	$1,30 \times 10^{-5}$
2	Arcilla	15,00	16,00	20,00	50,00	$4,30 \times 10^4$	0,35	$1,30 \times 10^{-5}$

* γ : peso unitario del material, γ_{sat} : peso unitario saturado, ϕ : ángulo de fricción interna, C: cohesión del material, E: módulo de elasticidad, ν : coeficiente de Poisson, Kx y Ky: coeficientes de permeabilidad en dirección (x,y), respectivamente.

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 de la Figura 1, además; se fijó una distancia de $5H$ en dirección horizontal desde la cresta del talud y H en dirección vertical y en la dirección 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. Esta distancia H es variable, puede aumentar dependiendo del tipo de material, especialmente en la base del talud.

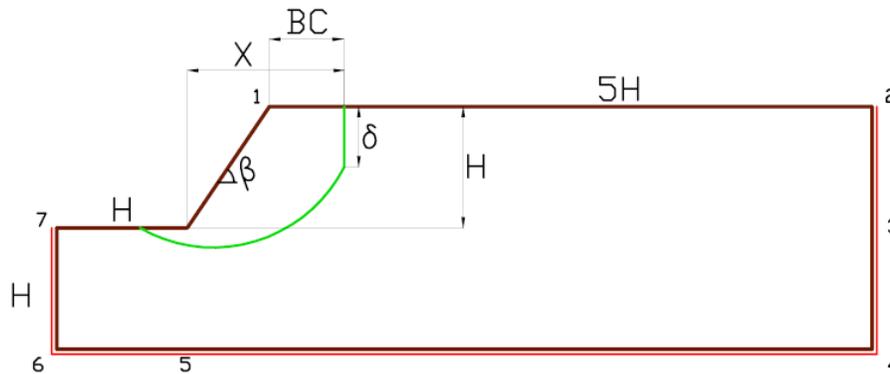


Figura 1. Geometría, condiciones de contorno del talud, profundidad y ubicación de la grieta de tracción.

X: ubicación de la grieta de tracción, BC: distancia desde la cresta del talud a la grieta de tracción, H: altura del talud, β : inclinación de la cara del talud, δ : profundidad de la grieta de tracción, números (1-7): puntos de limitación geométrica del modelo, línea verde: superficie de rotura.

Una vez establecido el material que conforma el talud, la geometría y las condiciones de contorno, se procedió para los diferentes casos a simular y se evaluó la deformación por cortante, con la finalidad de visualizar la aparición de la superficie de rotura conformada por la grieta de tracción, X y δ . Se realizaron simulaciones utilizando valores de β y H, que permitieron la formación de la grieta de tracción, sin producir colapso ($FS > 1$), variando β ($40^\circ \leq \beta \leq 75^\circ$) y H (10, 15 y 20 m). Cabe destacar que las variaciones de H se hicieron en incrementos de 5 m y hasta una altura de talud de $H = 20$ m, mientras que las variaciones de β se hicieron en incrementos de 5° entre valores donde se observó evidentemente la formación de la grieta de tracción. Dichas variaciones de H y β se realizaron en estos rangos, porque en incrementos menores el cambio observado en los resultados es poco significativo. La investigación se limitó al estudio de taludes con presencia de grieta de tracción en suelos homogéneos, haciendo un análisis paramétrico (cambio de una variable por vez); no se consideró anisotropía ni se hizo un análisis probabilístico.

A continuación, en las Figuras 2a y 2b, se muestra la deformación por cortante correspondiente a la simulación con los materiales 1 y 2, respectivamente, donde se pudo observar la aparición de la superficie de rotura definida por escala de colores (sombras), evidenciando el cambio de trayectoria de la misma. Esta superficie se presenta en dos bloques de inclinación diferente, en la parte superior adyacente a la corona o cresta del talud se presenta la grieta de tracción vertical o casi vertical, el resto de la superficie de rotura (bloque inferior) está representada por una fractura por cortante, como lo indican Ucar (1992), Yong-xin y Xiao-li (2016), Tang *et al.* (2019) y que se resalta en la Figura 2c para el material 2.

En la Figura 2d se muestra en imagen ampliada el bloque de trayectoria casi vertical correspondiente a la grieta de tracción, se señala la numeración de los puntos de esfuerzos analizados por el programa. Además, en la Figura 2e se presenta el estatus de los esfuerzos en puntos suministrados por el programa a lo largo de la superficie de rotura (en los dos bloques), donde se pueden observar esfuerzos de tracción en la trayectoria casi vertical (puntos del N° 681 al 3853) adyacente a la cresta del talud, el punto de cambio de trayectoria y el resto de puntos ubicados en el bloque inferior (puntos del N° 3694 al 382).

Con ayuda del programa, se simuló, variando los parámetros geométricos, inclinación de la cara del talud (β) y su altura (H), la superficie de rotura del talud. Se nota por observación, en las imágenes resultantes de la simulación, el cambio de trayectoria de la superficie de rotura, al igual que el cambio en los esfuerzos a lo largo de la misma, lo que indica la presencia de grieta de tracción. A continuación, con los resultados de la simulación se ubicó la grieta de tracción, obteniendo así su ubicación con respecto a la base del talud (x) y su profundidad (δ), además, se analiza la estabilidad del talud bajo estas condiciones, con el factor de seguridad (FS).

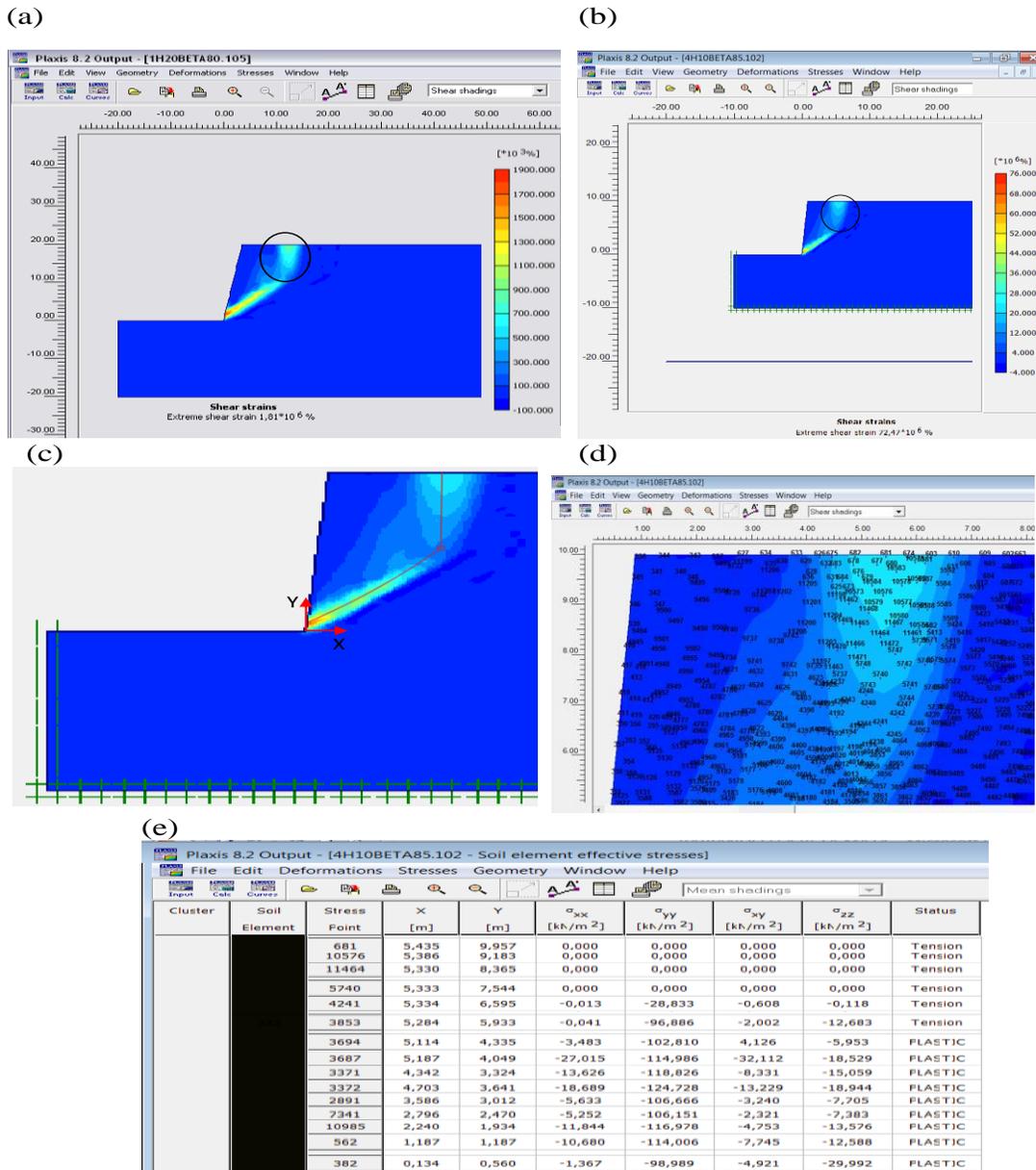


Figura 2. a) Deformación por cortante: material 1, presencia de grieta de tracción, b) Deformación por cortante: material 2, presencia de grieta de tracción, c) Bloques que conforman la superficie de rotura con presencia de grieta de tracción: material 2, d) Puntos donde se analizaron los esfuerzos, cresta del talud: material 2, e) Estatus de los esfuerzos a lo largo de la superficie de rotura: material 2.

Resultados y Discusión

Una vez culminadas las simulaciones, se obtuvieron los resultados de los materiales 1 y 2, arcillosos, donde se pudo observar en la deformación por cortante (Figuras 2c) la presencia de grieta de tracción, debido al cambio de trayectoria de la superficie de rotura, como lo indican Ucar (1992), Yong-xin y Xiao-li (2016), y Tang *et al.* (2019). La superficie de rotura con presencia de grieta de tracción está constituida, para el caso de rotura plana, por dos bloques con inclinaciones diferentes; en la parte superior adyacente a la corona o cresta del talud, se presenta la grieta de tracción vertical (es una aproximación al problema) o casi vertical, donde su estructura está representada por una fractura; y, por otra parte, el resto de la superficie de rotura (bloque inferior), está representada por una

fractura por cizallamiento (Ucar, 1992). Considerar que la inclinación de la grieta de tracción es vertical ($\psi=90^\circ$), es una aproximación al cálculo de la estabilidad para determinar el FS, caracterizada por esfuerzos normales de tracción que actúan sobre la grieta por la pérdida de cohesión (no existe resistencia al corte) (Ucar, 1992). En la zona donde se desarrolla la grieta, existe una combinación de esfuerzos principales de tracción y compresión que varían con la profundidad, y por ende generan la presencia de esfuerzos cortantes (Ucar, 1992).

Seguidamente, se detalla en las Tablas 2 y 3, los resultados obtenidos de X y δ de la grieta de tracción, así como del FS. Los mismos muestran que, a medida que se aumentan los parámetros geométricos (β y H), aumenta la profundidad de la grieta (δ), disminuye la distancia X y disminuye el factor de seguridad. Esto era de esperarse, ya que los parámetros geométricos son factor importante en la estabilidad, el aumento de ellos desmejora la misma, incrementando las fuerzas desestabilizantes y los esfuerzos, esto produce el aumento de δ y hace que la grieta se acerque a la cara del talud, en este caso.

Tabla 2. Resultados de ubicación y profundidad de la grieta de tracción, factor de seguridad: material 1.

Simulación					
$\beta(^{\circ})$	H(m)	X(m)	δ(m)	BC(m)	FS
60	10,00	12,25	1,98	4,79	2,51
	15,00	14,94	3,60	7,15	1,89
	20,00	20,56	4,10	8,43	1,56
65	10,00	11,67	2,50	4,61	2,33
	15,00	14,42	3,75	7,05	1,74
	20,00	20,21	4,79	8,31	1,45
70	10,00	8,91	3,30	4,17	2,15
	15,00	13,68	3,95	7,03	1,60
	20,00	17,79	5,64	8,56	1,31
75	10,00	7,90	3,72	3,95	1,96
	15,00	11,53	4,65	5,71	1,45
	20,00	15,25	6,42	7,82	1,21
80	10,00	6,61	4,59	3,56	1,77
	15,00	9,46	6,39	5,01	1,32
	20,00	12,05	8,41	6,54	1,09

β : inclinación de la cara del talud, H: altura del talud, X: ubicación de la grieta de tracción desde la base del talud, δ : profundidad de la grieta de tracción, BC: ubicación de la grieta de tracción desde la cresta del talud, FS: factor de seguridad.

En la Figuras 3 se muestra de forma gráfica los resultados presentados en las tablas 2 y 3, donde igualmente, a medida que se aumentan los parámetros geométricos (β y H), aumenta la profundidad de la grieta (δ), tanto para el material 1 como para el 2. Por ejemplo: i) en el material 1, para una inclinación de 60° con una altura de 20 m el valor de la profundidad de la grieta es 4,10 m, cuando esa inclinación se llevó a 80° con igual altura, la profundidad pasó a ser 8,41 m, lo que representa un incremento mayor al 100 %. De igual forma, si la inclinación es 70° con altura 10 m, la profundidad es de 3,30 m, si la altura se aumentó a 20 m la profundidad es 5,64 m, para un aumento del 70 %, aproximadamente; ii) en el material 2, para una inclinación de 60° con una altura de 20 m el valor de la profundidad de la grieta es 4,90 m, cuando esa inclinación se llevó a 75° con igual altura, la profundidad pasó a ser 5,79 m, lo que representa un incremento mayor al 18 %. De igual forma, si la inclinación es 70° con altura 10 m, la profundidad es de 2,68 m, si la altura se aumentó a 20 m la profundidad es 5,56 m, para un aumento del 108 %, aproximadamente.

Tabla 3. Resultados de ubicación y profundidad de la grieta de tracción, factor de seguridad: material 2.

Simulación					
$\beta(^{\circ})$	H(m)	X(m)	δ (m)	BC(m)	FS
40	10,00	20,01	1,95	6,44	2,82
	15,00	28,55	2,30	8,61	2,14
	20,00	36,04	2,74	11,09	1,78
45	10,00	17,22	1,95	6,15	2,63
	15,00	24,78	2,43	9,03	1,98
	20,00	29,56	2,90	10,70	1,64
50	10,00	15,53	2,13	6,22	2,47
	15,00	21,36	2,44	8,25	1,85
	20,00	28,92	3,72	9,71	1,54
55	10,00	14,17	2,34	6,04	2,33
	15,00	19,96	2,98	8,07	1,73
	20,00	25,98	4,77	9,67	1,43
60	10,00	12,22	2,50	5,45	2,17
	15,00	18,15	3,53	7,66	1,62
	20,00	23,20	4,90	9,24	1,33
65	10,00	10,97	2,61	5,04	2,02
	15,00	16,11	3,65	7,03	1,50
	20,00	20,55	5,38	9,10	1,23
70	10,00	9,74	2,68	4,76	1,86
	15,00	13,66	4,48	6,50	1,37
	20,00	17,92	5,56	7,95	1,13
75	10,00	8,14	3,75	4,32	1,70
	15,00	12,17	5,12	6,22	1,25
	20,00	15,65	5,79	7,10	1,03

β : inclinación de la cara del talud, H: altura del talud, X: ubicación de la grieta de tracción desde la base del talud, δ : profundidad de la grieta de tracción, BC: ubicación de la grieta de tracción desde la cresta del talud, FS: factor de seguridad.

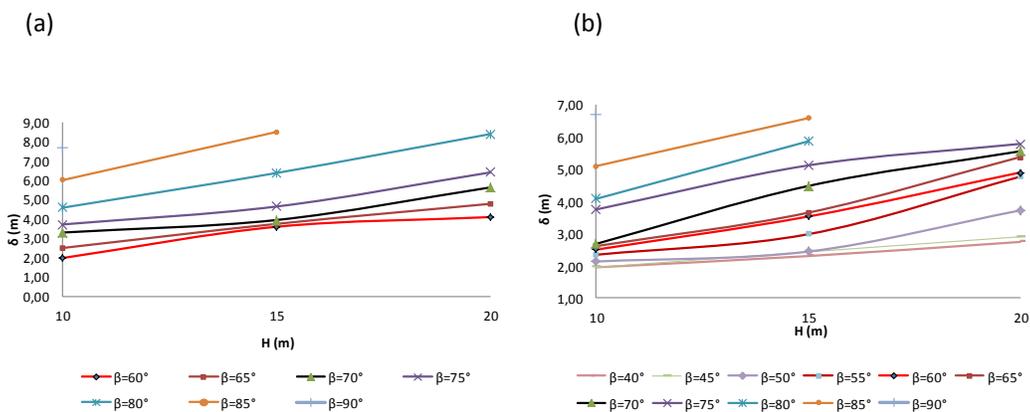


Figura 3. a) Profundidad de la grieta de tracción (δ): material 1, b) Profundidad de la grieta de tracción (δ): material 2.

Para la ubicación de la grieta (X), se puede notar en la Figura 4, que a medida que aumenta H y β , disminuye X , es decir, la distancia BC disminuye en la corona del talud (Figura 1), por lo que la grieta de tracción se acerca a la cara del talud, tanto para el material 1 como para el 2. La causa es la misma, los parámetros geométricos, se incrementan las fuerzas desestabilizantes y los esfuerzos, esto hace que la grieta se acerque a la cara del talud. Por ejemplo: i) en el material 1, para una inclinación de 60° con una altura de 20 m el valor de la ubicación de la grieta es 20,56 m, cuando esa inclinación se llevó a 80° con igual altura la ubicación pasó a ser 12,05 m, lo que representa un decrecimiento del 41 % aproximadamente; ii) en el material 2, para una inclinación de 60° con una altura de 20 m el valor de la ubicación de la grieta es 23,20 m, cuando esa inclinación se llevó a 75° con igual altura, la ubicación pasó a ser 15,65 m, lo que representa un decrecimiento del 32 % aproximadamente.

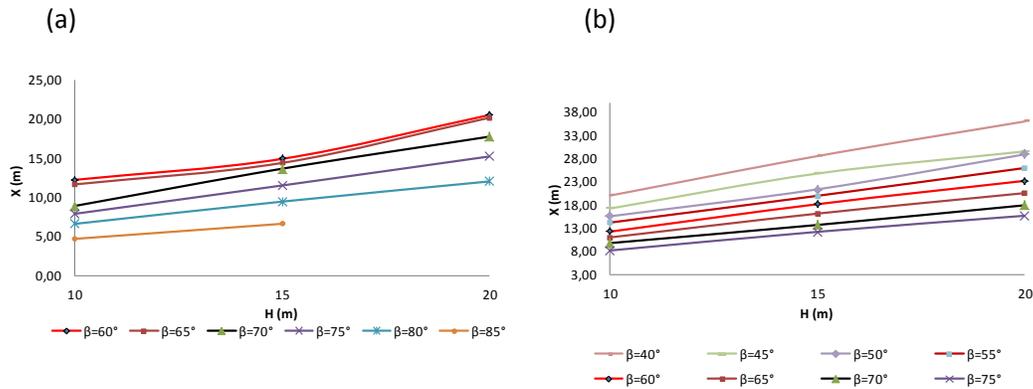


Figura 4. a) Ubicación de la grieta de tracción (X): material 1, b) Ubicación de la grieta de tracción (X): material 2.

En las Tablas 2 y 3, cuando se evalúa el FS, se puede ver que a medida que aumenta H y β , en presencia de la grieta de tracción, el FS disminuye, tanto en el material 1 como en el 2. La causa de esto es la desmejora de la estabilidad con el aumento de los parámetros geométricos. Por ejemplo: i) en el material 1, para una inclinación de 60° con una altura de 20 m el valor del FS es 1,56 m, cuando esa inclinación se llevó a 80° con igual altura, la ubicación pasó a ser 1,09 m, lo que representa un decrecimiento del 30 % aproximadamente; ii) en el material 2, para una inclinación de 60° con una altura de 20 m el valor de la ubicación de la grieta es 1,33 m, cuando esa inclinación se llevó a 75° con igual altura, el FS pasó a ser 1,03 m, lo que representa un decrecimiento del 22 % aproximadamente. Por tanto, para ambos materiales, δ y X de la grieta de tracción, al igual que el FS, se ven afectados al aumentar β y H . A medida que aumenta β y H , se ve afectada la estabilidad del talud, aumenta δ , X se acerca a la cara del talud y el FS disminuye.

Finalmente, al comparar los resultados con algunas referencias, tanto en el material 1 como en el 2, la profundidad de la grieta de tracción en ningún caso superó el máximo estimado en la ecuación analítica de Rankine (1857), referencia todavía usada. De igual forma, la profundidad de la grieta es menor que la mitad de la altura del talud, propuesta por Cousins (1980). En cuanto a la ubicación de la grieta de tracción con respecto a la cresta del talud (BC), se mantiene en el rango propuesto por Coats (1981).

Conclusiones

La aparición de la grieta de tracción y comportamiento de la superficie de rotura se modelaron utilizando el método de elementos finitos, permitiendo determinar la ubicación y profundidad de la misma. Los resultados muestran que los materiales arcillosos analizados, evidenciaron la presencia de grieta de tracción. En tal sentido, la distancia BC disminuye en la corona del talud, es decir, a medida que aumenta la inclinación de la cara del talud (β) y la altura (H), disminuye su ubicación (X) con respecto a la base del talud, por lo que la grieta de tracción se acerca a la cara del talud. Así mismo, a medida que aumenta la inclinación de la cara del talud y la altura, aumenta la profundidad de la grieta de tracción (δ), es decir, cuanto mayor sea la inclinación de la cara del talud y la altura, mayor será la profundidad de la grieta de tracción. Por su parte, la estabilidad de la pendiente se debilita

gradualmente ante la presencia de grietas de tracción, ya que a medida que aumenta la inclinación de la cara del talud y la altura en presencia de la grieta de tracción, el factor de seguridad (FS) disminuye.

De manera general, con las condiciones planteadas y simulaciones realizadas en esta investigación, se desprende que, la profundidad y ubicación de las grietas de tracción están relacionadas con las condiciones geométricas (inclinación (β) y altura (H)), factores determinantes en la estabilidad del talud. El aporte principal de esta investigación es haber obtenido la presencia, ubicación y profundidad de la grieta de tracción a través de una simulación, sin tener que fijar su ubicación y profundidad previamente.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, por la formación brindada.

Referencias Bibliográficas

- Abdollahi, M., Vahedifard, F., Abed, M. (2021). Effect of tension crack formation on active earth pressure encountered in unsaturated retaining wall backfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147, 2.
- Akram, H. A. (2014). *Seismic displacement of geosynthetic-reinforced slopes subject to cracks*. Tikrit University, Tikrit, Iraq, International symposium on geohazards and geomechanics. Series: Earth and Environmental Science 26 (2015), 012045.
- Bishop, A. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5, 7-17.
- Chen, G., Tang, P., Huang, R. (2021). Critical tension crack depth in rockslides that conform to the three-section mechanism. *Landslides*, 18, 79-88.
- Cheng, M., Xie, C. (2014). Investigation on the stability of slopes with cracks subjected to seismic effect, *Bund. R.*, 19.
- Coats, D. (1981). Rock mechanics principles. *Energy and Resources*, 874, 6, 6-52.
- Coulomb, C. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. *De l'Imprimerie Royale*, 7, 343-387.
- Cousins, B. (1980). *Stability charts for simple earth slopes allowing for tension cracks*. Proc. 3^o Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, Wellington, 101-105.
- Dyson, A. P., Tolooiyan, A. (2018). Optimisation of strength reduction finite element method codes for slope stability analysis. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3, 38.
- Fellenius, W. (1936). *Calculation of stability of earth dams*. Transactions, Second Congress, Large Dams, 4, 445.
- Janbu, N. (1954). *Stability analysis of slopes with dimensionless parameters*. Doctoral thesis. Cambridge: Harvard University.
- Law, K., Lumb, P. (1978). A limited equilibrium analysis of progressive failure in the stability of slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 15, 2, 113-122.
- Lian-Heng, Z., Xiao, C., Yingbin, Z., Liang, L., De-Jian, L. (2016). Stability analysis of seismic slopes with cracks. *Computers and Geotechnics*, 77, 77-90.
- Morgenstern, N., Price, V. (1965). The analysis of stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15, 79-93.
- Palmer, A., Rice, J. (1973). The growth of slip surfaces in the progressive failure of overconsolidated clay. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A332*, 527-548.

- Ramírez, P., Alejano, L. (2014). *Mecánica de rocas, fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid: Red DESIR.
- Rankine, W. (1857). On the stability of loose earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, 147, 9-27.
- Sengani, F., Mulenga, F. (2020). Application of limit equilibrium analysis and numerical modeling in a case of slope instability. *Sustainability*, 12(21), 8870.
- Shariati, M., Fereidooni, D. (2021). Rock slope stability evaluation using kinematic and kinetic methods along the Kamyaran-Marivan road, west of Iran. *Journal of Mountain Science*, 18, 779-793.
- Shukla, S. K., Khandelwal, S., Verma, V. N., Sivakugan, N. (2009). Effect of surcharge on the stability of anchored rock slope with water filled tension crack under seismic loading condition. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27, 4, 529-38.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis for stability of the embankment using parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17, 11-26.
- Tang, L., Zhao, Z., Luo, Z., Sun, Y. (2019). What is the role of tensile cracks in cohesive slopes?. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11, 314-324.
- Ucar, R. (1992). *Determinación del mínimo factor de seguridad en taludes rocosos con grieta de tracción*. XII Seminario Venezolano de Geotecnia, 156-166.
- Utili, S. (2013). Investigation by limit analysis on the stability of slopes with cracks. *Géotechnique*, 63, 2, 140-154.
- Wei, G., Shuang, D., Ting, X., Tianyang, H. (2017). Failure process of rock slopes with cracks based on the fracture mechanics method. *Engineering Geology*, 231, 190-199.
- Yong-xin, L., Xiao-li, Y. (2016). Stability analysis of crack slope considering nonlinearity and water pressure. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20, 6, 2289-2296.
- Zhang, L., Wang, X., Xia, T., Yang, B., Yu, B. (2021). Deformation characteristics of Tianjiaba landslide induced by surcharge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10, 4, 221.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Vol. 45. N°2, Mayo - Agosto, 2022_____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada
en abril y mayo 2021, por el **Fondo Editorial Serbiluz,**
Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientificaluz.org