

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL



Análisis comparativo de estabilidad de Taludes mediante las ecuaciones de equilibrio límite: método de Morgenstern-Price, Spencer, Sarma

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER EN INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**

AUTOR

Edgar Alonso Becerra Carrillo

ASESOR

Angel Antonio Ruiz Pico

<https://orcid.org/0000-0003-2638-0593>

Chiclayo, 2023

Análisis de estabilidad del talud del Cerro Chalpón utilizando las ecuaciones de equilibrio límite.

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | rocksoilmech.researchcommons.org Fuente de Internet | 4% |
| 2 | revistas.unal.edu.co Fuente de Internet | 2% |
| 3 | Lihang Hu, Akihiro Takahashi, Kiyonobu Kasama. "Effect of spatial variability on stability and failure mechanisms of 3D slope using random limit equilibrium method", Soils and Foundations, 2022 Publicación | 1% |
| 4 | hal.archives-ouvertes.fr Fuente de Internet | 1% |
| 5 | www.ijrte.org Fuente de Internet | 1% |
| 6 | Shijian Zhou, John Stormont, Zhen Chen. "Simulation of geomembrane response to settlement in landfills by using the material point method", International Journal for | 1% |

Índice

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Resumen | 4 |
| Abstract | 5 |
| Introducción..... | 6 |
| Revisión de Literatura | 9 |
| Materiales y Métodos | 13 |
| Resultados y Discusión..... | 15 |
| Conclusiones | 21 |
| Recommendations | 22 |
| Referencias..... | 23 |

Resumen

Esta investigación tiene por finalidad Comparar las ecuaciones de equilibrio limite Morgenstern-Price, Spencer, Sarma aplicado a la estabilidad del talud del cerro Chalpón, distrito de Motupe y buscar una solución de estabilización del talud, el factor de seguridad del talud se obtendrá mediante el modelado en el software Slide, los datos que el software necesita son el perfil topográfico del talud, la cohesión, ángulo de fricción y peso específico de los materiales que lo conforman, para encontrar estos datos se debe hacer algunos ensayos de laboratorio cómo el ensayo de corte, el ensayo de peso específico y el ensayo de compresión de la roca.

Se clasifico el macizo rocoso mediante índices de Bieniawski (R.M.R) con índices desde 47% hasta 63% mientras índice de calidad “Q” (Q de Barton) oscilo entre 0.325 a 2.375.

Se elaboró 6 perfiles y cada perfil con 3 escenarios, de los cuales 4 perfiles tuvieron un factor de seguridad menor a 1.3, y se optó por las soluciones de estabilidad para el perfil “B” usar material de relleno (afirmado), para el perfil “C” se consideró 7 micropilotes de 5 m con diámetro de 13 cm distribuidos cada 1.5 m transversal y en el eje longitudinal estás distribuido cada 1 m, para perfil de “D” también necesita un muro de contención, y se debe rellenar como se muestra en el detalle con afirmado de las mismas características que el perfil C, para el perfil E se necesita 9 micropilotes de 13 cm de diámetro y 4 m de longitud y en el eje longitudinal estás distribuido cada 1 m, todos los micro pilotes serán clavados perpendicular al terreno.

La solución beneficiará a que no haya deslizamientos de rocas ni de terrenos, lo que hará mantener su forma del cerro, evitando así el movimiento de tierra o escombros debido a deslizamientos.

Palabras clave: Ecuaciones de equilibrio límite, Morgenstern-Price, Spencer, Sarma, pendientes, Factor de seguridad.

Abstract

The purpose of this research is to compare the equations of limit equilibrium Morgenstern-Price, Spencer, Sarma applied to the stability of the slope of Chalpon hill, district of Motupe and to look for a solution of slope stabilization, the safety factor of the slope will be obtained by modeling in the Slide software, The data that the software needs are the topographic profile of the slope, the cohesion, friction angle and specific weight of the materials that conform it, to find these data some laboratory tests must be done how the shear test, the specific weight test and the rock compression test.

The rock massif was classified by means of Bieniawski indexes (R.M.R) with indexes from 47% to 63% while quality index "Q" (Barton's Q) ranged between 0.325 to 2.375.

Six profiles were elaborated and each profile with three scenarios, of which four profiles had a safety factor lower than 1.3, and stability solutions were chosen for profile "B" using backfill material, for profile "C" 7 micropiles of 5 m with a diameter of 13 cm were considered, distributed every 1.5 m transversely and in the axis of the profile "C". 5 m transverse and in the longitudinal axis you are distributed every 1 m, for profile "D" also needs a retaining wall, and should be filled as shown in the detail with affirmed of the same characteristics as profile C, for profile E is needed 9 micropiles of 13 cm in diameter and 4 m in length and in the longitudinal axis you are distributed every 1 m, all micro piles will be nailed perpendicular to the ground.

The solution will benefit that there will be no sliding of rocks or land, which will maintain the shape of the hill, thus avoiding the movement of earth or debris due to landslides.

Keywords: Limit equilibrium equations, Morgenstern-Price, Spencer, Sarma, slopes

Introducción

Actualmente el cerro Chalpón presenta desprendimientos del talud ocasionando daño a las viviendas contiguas, además el cerro presenta un talud empinado, las situaciones meteorológicas como viento y lluvia ha generado erosión y abrasión al cerro lo que ocasiona estos desprendimientos y poco a poco generan la inestabilidad del talud.

Debido a toda la situación actual se elaboró la siguiente pregunta ¿Cuál método tiene mayor factor de seguridad que asegure la estabilidad del talud del cerro Chalpón cuando este análisis se realiza mediante las ecuaciones de equilibrio límite Morgenstern-Price, Spencer y Sarma?, para poder responder esta pregunta se hará un análisis del talud mediante el software Slide para verificar el grado de inestabilidad, actualmente el talud no se encuentra en movimiento pero eso no indica que sea un talud estable, se considera un talud estable cuando los factores de seguridad son mayores a 1.3, por lo tanto el objetivo principal será encontrar el factor de seguridad actual del talud mediante las ecuaciones de equilibrio límite Morgenstern-Price, Spencer, Sarma.

El factor de seguridad del talud se obtendrá mediante el modelado en el software Slide, los datos que el software necesita son el perfil topográfico del talud, la cohesión, ángulo de fricción y peso específico de los materiales que lo conforman. Para encontrar estos datos se debe hacer algunos ensayos de laboratorio como el ensayo de corte, el ensayo de peso específico y el ensayo de compresión de la roca mediante el esclerómetro.

El talud está compuesto por una roca o macizo rocoso y con materiales térreos, por ende, se recolectará datos de campo para analizar la calidad de la roca, estos serán procesados por el método de Bianowski y Q de Batrón.

Si el talud fuese estable con las 3 ecuaciones, teniendo en cuenta que durante el tiempo progresivamente el talud es erosionado llegara un punto donde será inestable dónde el talud empieza a deslizarse o tener movimiento.

En el último año el cerro Chalpón ha tenido serios problemas con el desprendimiento de rocas y material pétreo lo que ocasiona daños a las viviendas contiguas, a infraestructuras públicas como vías peatonales, además se vio afectado la construcción del mirador que está debajo del cerro, a continuación, se muestra algunas fotos como evidencia de la situación actual.



Figura 1. Daños a estructuras públicas debido al desprendimientos del talud del cerro Chalpón

Los desprendimientos que se pueden apreciar son muy grandes de dimensiones que superan dos m^3 , esto es un peligro para población y para los niños que se encuentra estudiando dentro del colegio. Las situaciones meteorológicas como viento y lluvia han generado erosión y abrasión al cerro lo que ocasiona estos desprendimientos y poco a poco generan la inestabilidad del talud.



Figura 2. Vista general del deslizamiento en el cerro Chalpón



Figura 2. Vista general del deslizamiento en el cerro Chalpón

-Condiciones del agua subterránea o humedad del macizo (Bieniawski, 1973)

1.2 Índice Q de Barton

El índice Q varía entre 0,001 y 1.000, va de los valores bajos a rocas malas y los altos a las rocas buenas [3]

Se calcula mediante 6 parámetros geotécnicos según la siguiente expresión:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \quad (1)$$

Donde:

J_n: Es el índice de número de familias.

J_r: Es el índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas.

J_a: Es el índice de alteración de las discontinuidades.

J_w: Factor de reducción por la presencia de agua

SRF: significa Stress Reduction Factor en inglés y es un factor que evalúa el estado tensional del macizo rocoso.

2. Método de equilibrio límite

El método de equilibrio límite que se usó es un análisis en 2D, este método reduce el tiempo de análisis, porque se discretiza en cortes verticales, y las fuerzas, momentos, o tensiones que resisten el movimiento de la masa dentro del se evalúan las rebanadas para facilitar el análisis [4] el método Bishop [5] y Morgenstern-Price sustituye los cortes verticales por columnas rectangulares y calcula las integrales de las fuerzas y momentos de cada dovela [6]

Spencer [7] estuvo de acuerdo con la ecuación de Bishop porque iguala los momentos respecto al centro de rotación del peso del suelo dentro de círculo de deslizamiento y el momento de las fuerzas externas que actúan sobre la superficie deslizante.

Mientras tanto Sarma lado Sarma afirmó que los valores de las fuerzas resultantes entre rebanadas siguen ciertas pautas predeterminadas. Cualquier superficie de deslizamiento [8]

El método de del equilibrio límite se basa en dividir la masa el número finito de dovelas. Después cada ecuación de fuerza de momentos se aplica en cada dovela. Las dovelas verticales como se muestra en la Figura , se emplea para dividir la masa del suelo y las horizontales o inclinadas no son aplicadas usualmente [9]

Los métodos numéricos son los únicos con los que se puede calcular desplazamientos, estabilidad y el comportamiento estructuras adyacentes, el método estudia el desplazamiento, la zona plástica y el factor de seguridad del talud de suelo rocoso, se analiza la estabilidad del talud de macizo rocoso [10]

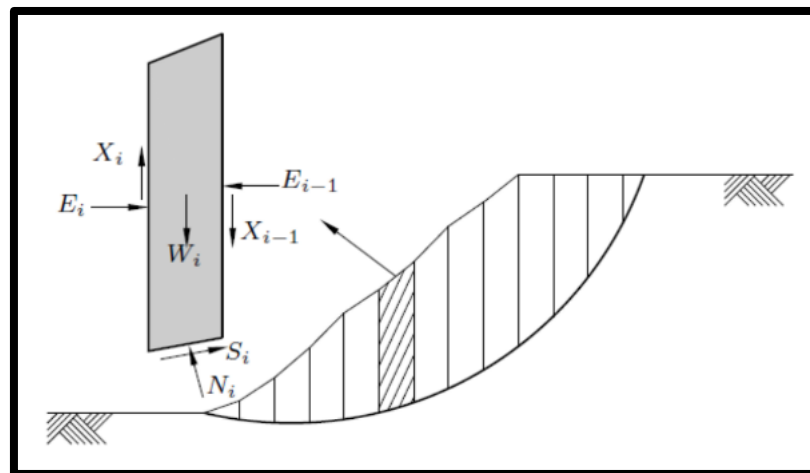


Figura 5. Fuerzas aplicadas en una dovela

2.1 Consideraciones Generales en el método de equilibrio limite

Se divide el macizo rocoso en dovelas para luego caer cada una de ellas ser analizadas, esto conlleva a tener las siguientes consideraciones:

- La masa potencial de la falla se divide en un número finito de dovelas
- La falla actúa como un cuerpo rígido y no como un cuerpo elástico
- La falla tendrá las mismas características que el suelo o el macizo pero con una cohesión cero
- La resistencia en la superficie es distribuida con el mismo factor de seguridad

El factor de seguridad es calculado a partir de las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos

2.2 Condiciones de borde

Las condiciones de borde definirán el problema geotécnico de la investigación, estas condiciones son: desplazamientos impuestos, cargas estáticas y/o dinámicas aplicadas, procesos de excavación y construcción, o un cambio en la presión de agua de poros, entre los más importantes. En la Tabla 1 se muestran los métodos y análisis en los que se puede aplicar condiciones de contorno.

Tabla 1 Requerimientos que satisfacen los diferentes métodos modificados [11]

| Método de análisis | Requerimientos en la solución | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|-----------------|
| | Equi | Compatibilidad | Ley constitutiva | Condiciones de | |
| | libri | | | Fuerzas | Desplazamientos |
| | o | | | | |
| Solución analítica | A | A | Elástico-lineal | A | A |
| Equilibrio Límite | A | NA | Rígido con criterio de falla | A | NA |
| Campo Tensorial | A | NA | Rígido con criterio de falla | A | NA |
| Análisis Límite (Límite-Inferior) | A | NA | Plasticidad perfecta con ley | A | NA |
| Análisis Límite (Límite-Superior) | NA | A | de fluencia asociativa | NA | A |
| Métodos numéricos | A | A | Cualquiera | A | A |

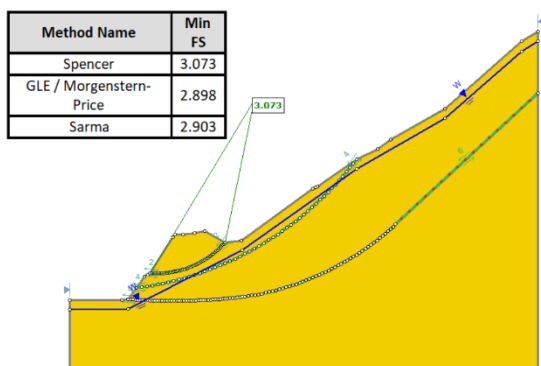
Leyenda: A: aplicable, NA: no aplicable

Materiales y Métodos

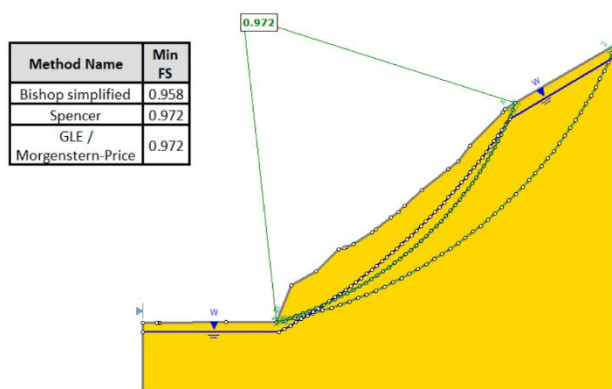
Se analizó 6 perfiles topográficos, mediante el software es Slide, se usó los métodos de equilibrio límite Morgenstern-Price, Spencer y Sarma. El análisis se realizó en 6 perfiles o cortes con 3 escenarios diferentes para cada uno de ellos, en total se fueron 18 análisis, los 3 escenarios fueron:

- Capa superficial de 1 m de suelo saturado
- Salud de superficie seca
- Nivel freático por debajo de 1 m del terreno natural

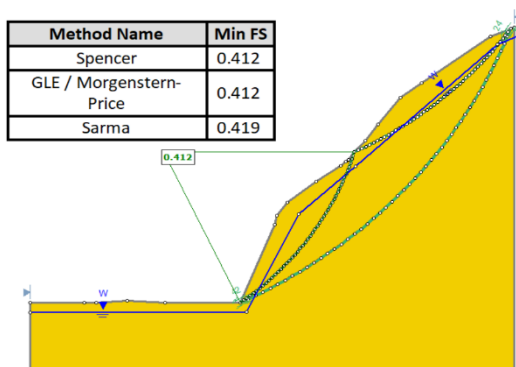
Siendo los más críticos los que tuvieron el nivel freático, con excepción del perfil a que en todos los escenarios tuvo un factor de seguridad favorable mayor a 2



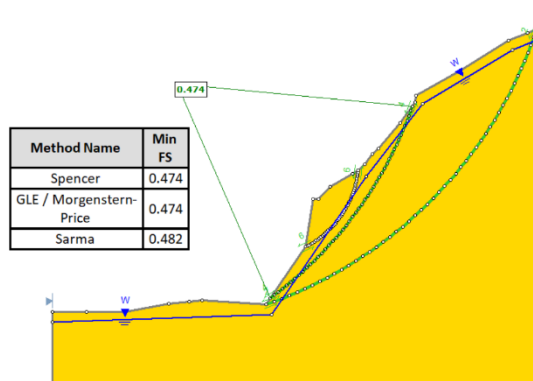
(a) Perfil A



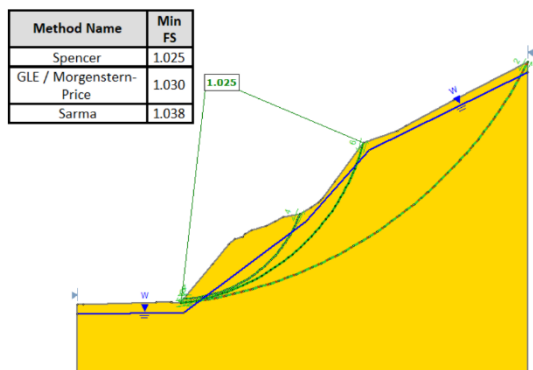
(b) Perfil B



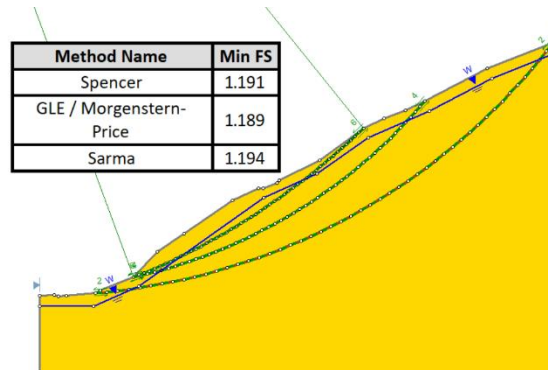
(c) Perfil C



(d) Perfil D



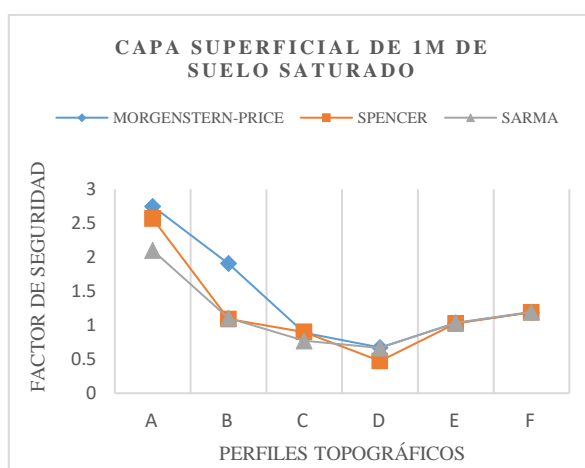
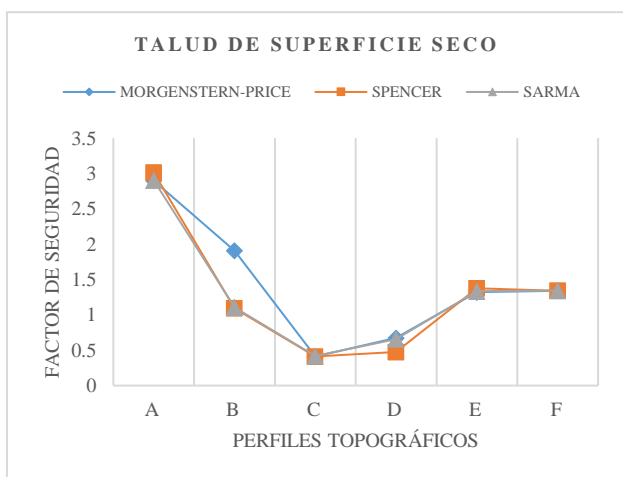
(e) Perfil E



(f) Perfil F

Fig.7 Análisis de los 6 perfiles transversales del macizo rocoso, con excepción del perfil A todas las laderas de los 5 perfiles restantes tienen un factor de seguridad menor a 1.5

La superficie de rotura se tuvo que asumir como por qué el macizo rocoso ya presenta discontinuidades que han hecho desprenderse el macizo, cuando se hizo el levantamiento topográfico se tomó en cuenta estas roturas y se plasmó en los perfiles, como medida de precaución sobre el análisis, también sí hizo un escenario donde no existiera esta superficie, los resultados fueron factores de seguridad mayores a 8 e incluso 13, en la realidad esto no es cierto por qué se tiene desprendimientos constantes y más cuando llueve. A continuación, en la Fig. 4 se muestran el factor de seguridad de todos los escenarios en los 3 m de equilibrio límite, se aprecia que el método Sarma es más conservador y el menos conservador es Morgenstern-Price.



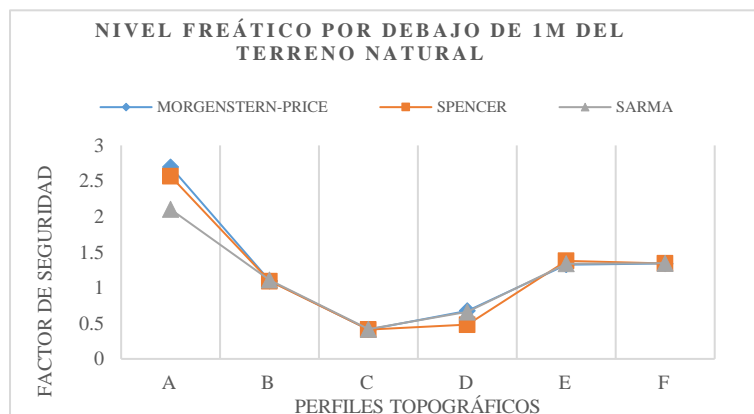


Fig. 8 . gráfico del factor de seguridad por los métodos Morgenstern-Price, Spencer y Sarma de los 3 escenarios en los 6 diferentes perfiles

Resultados y Discusión

En el proceso de análisis así necesita propiedades físicas y mecánicas del suelo o roca, en el laboratorio se ensayó las muestras extraídas de 3 zonas, en la zona dos se extrajo muestra de diamantina adicional para obtener la cohesión y el Phi de ruptura de la roca. En la tabla 2 está clasificado los 6 perfiles a qué zona pertenece, estos perfiles se aprecian en la Fig. y Fig. , la zona del perfil C y D son las más afectadas.

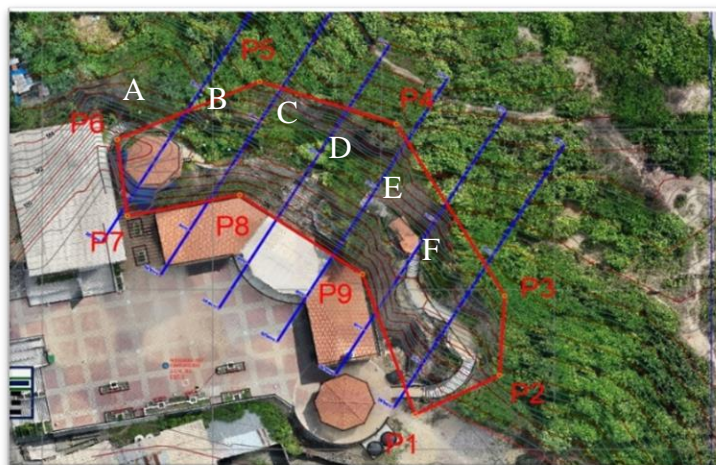


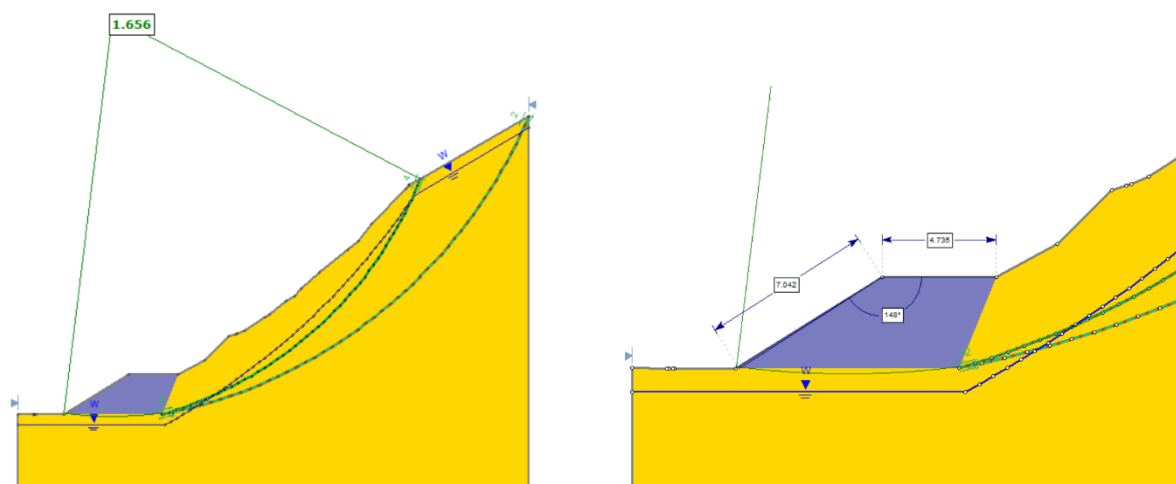
Fig. 9. Ubicación de los perfiles A, B, C, D, E y F

Para el cálculo y solución se considerò micropilotes y muros de contención, solo se dio solución a los perfiles B, C, D, E y F, se recalca que los más críticos son B, C, D porque su F.S es menor a uno, lo que indica que el talud esta en movimiento, las velocidades son pequeñas porque no es perceptible a simple vista.

Tabla 2 Resultados de ensayos físicos y mecánicos del macizo rocoso

| Zonas | Perfiles | absorción | P.e. masa (g=9.81) | P.e. saturado | Cohesión Kpa | Phi |
|-------|----------|-----------|--------------------|---------------|--------------|-------|
| Z1 | C, D | 2.61% | 25.752kN/m3 | 26.42 kN/m3 | 1086.57 Kpa | 38.5° |
| Z2 | A, B | 2.51% | 26.478 kN/m3 | 26.61 kN/m3 | 1086.57 Kpa | 38.5° |
| Z3 | F, E | 2.59% | 25.448kN/m3 | 26.11 kN/m3 | 1086.57 Kpa | 38.5° |
| Z2 | ROCA | 2.50 % | 26.478 kN/m3 | 26.61 kN/m3 | 1086.57 Kpa | 38.5° |

Para estas soluciones no se hizo un back análisis, porque no estábamos buscando parámetros en específico, lo que se buscaba es entender que tan grave era el problema del deslizamiento y encontrar una solución posible, sin embargo, el back análisis es muy útil cuando estamos estabilizando el talud porque nos permite modificar los soportes para acercarse más a la solución.

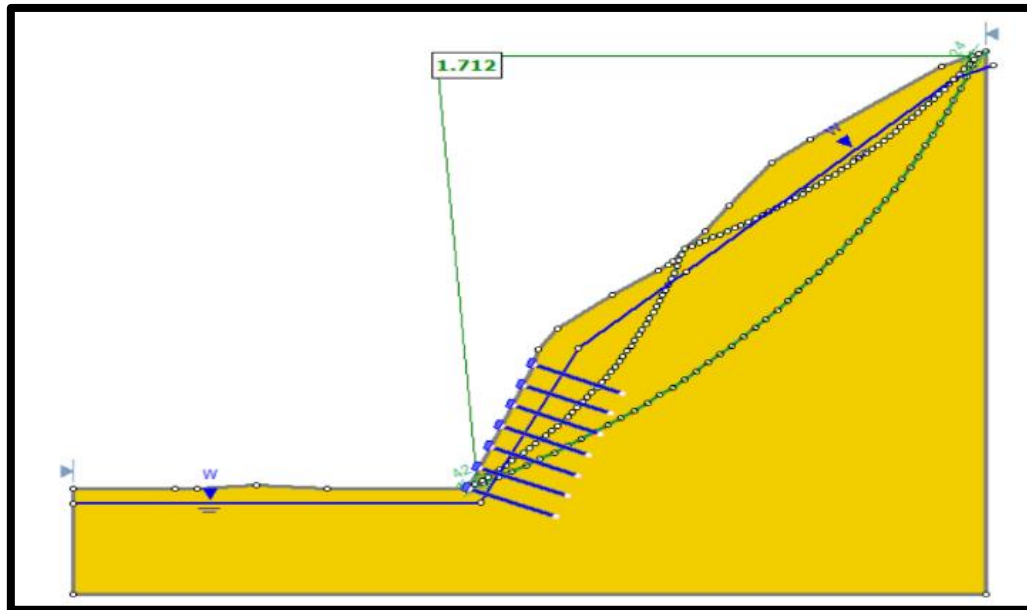


(a) Perfil B con el relleno de afirmado

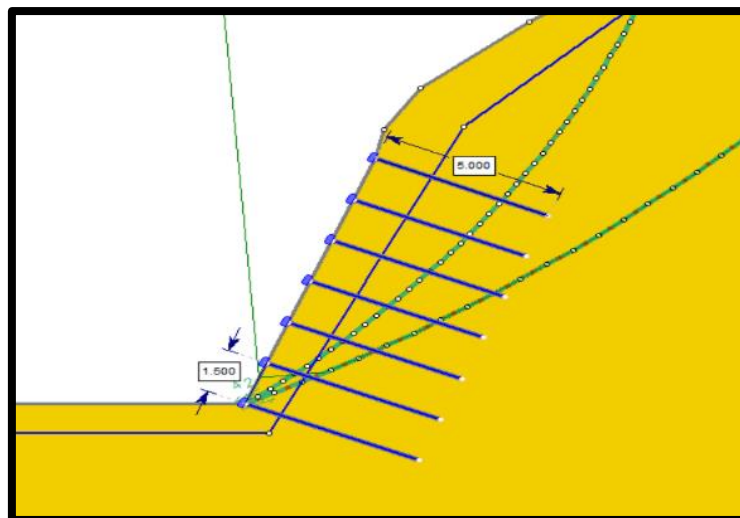
(b) Detalle del relleno de afirmado

Fig. 10. Solución del perfil B

Para el perfil B fue más apropiado usar material de relleno (afirmado) de propiedades: peso específico 22 Kn/m^3 , cohesión 40 kPa , y ángulo de fricción interna (ϕ) de 35° (**Fig.**). Para el perfil se consideró 7 micropilotes de 5 m con diámetro de 13 cm distribuidos cada 1.5 m transversal cómo se muestra en la **Figura** y en el eje longitudinal estás distribuido cada 1 m. Los micro pilotes serán clavados perpendicular al terreno.

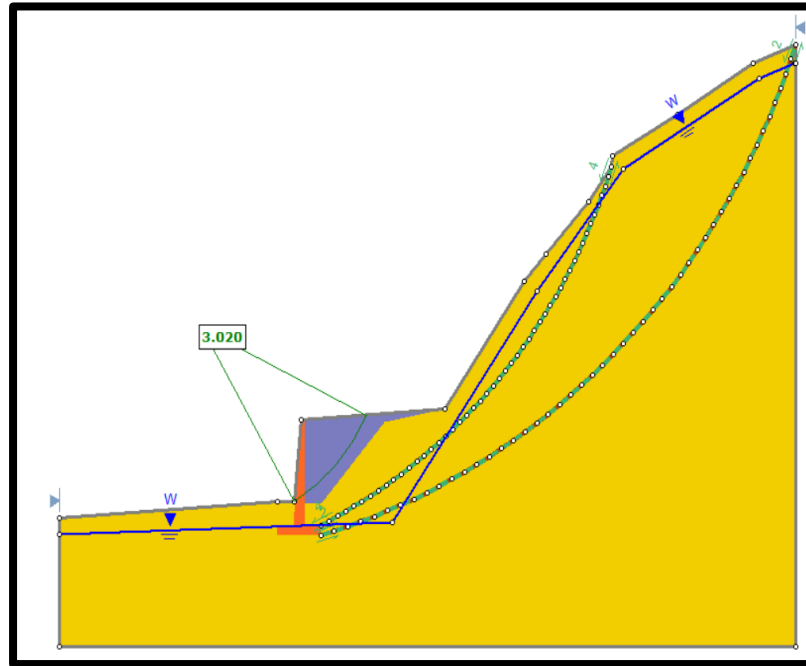


a) Perfil C con micropilotes

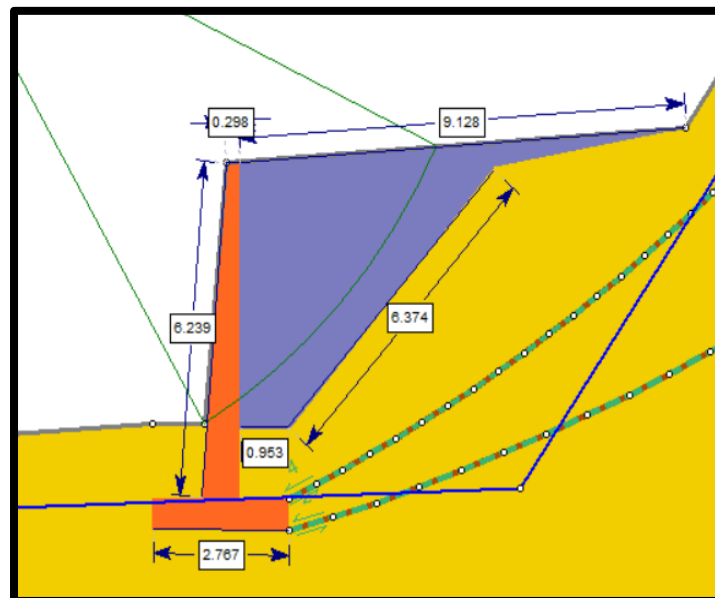


(b) Detalle del relleno de micropilotes

Figura 11. Solución del perfil C

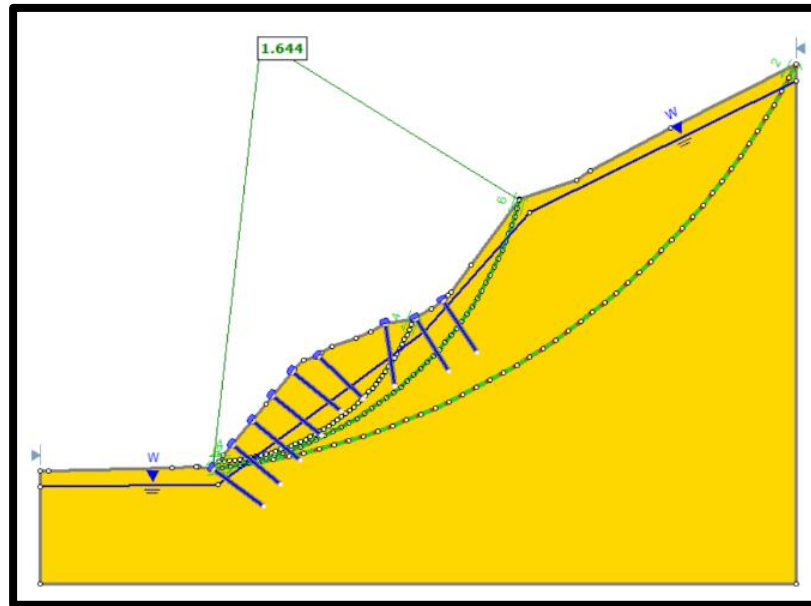


a) Perfil D con muro de contención y relleno de afirmado

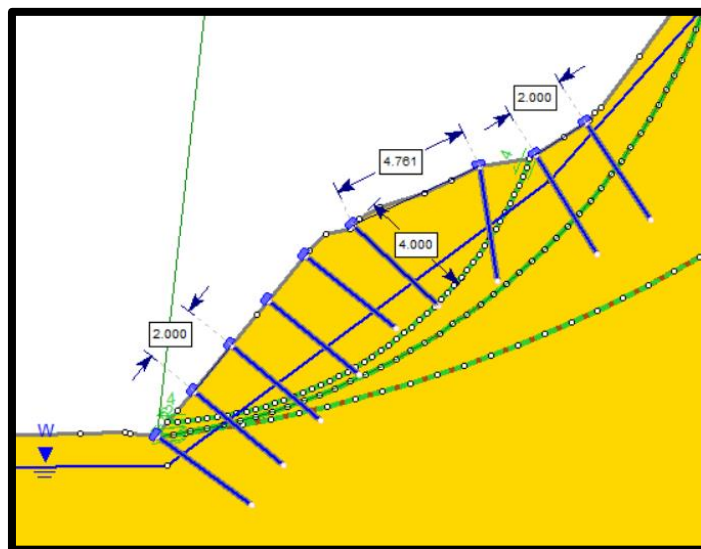


(b) Detalle del muro y relleno

Figura 12. Solución del perfil D



a) Perfil E con micropilote



(b) Detalle de micropilotes

Figura 13. Solución del perfil E

El perfil de D (Figura) también necesita un muro de contención, y se debe rellenar como se muestra en el detalle con afirmado de las mismas características que el perfil C.

Por otra parte, el perfil es necesita 9 micropilotes de 13 cm de diámetro y 4 m de longitud (Figura).

Los perfiles con factores de seguridad más crítico B, C, D y E obtuvieron en su mayoría dos tipos de solución, el perfil B obtuvo como solución el relleno con material de préstamo, el perfil C tiene como solución muro de contención y relleno con material de préstamo como el perfil D y E tiene como solución micropilotes de diámetro 13 cm por 4 m de largo.

Los perfiles tienden a fallar en la falda de la ladera esto es porque ahí está la superficie de Falla y además es donde soporta el mayor peso del talud.

Todo el material de préstamo debe tener las siguientes características: afirmado de peso específico 22 Kn/m³, cohesión 40 kPa, y ángulo de fricción interna (ϕ) de 35 °.

Discusiones

Durante el desarrollo del análisis, puede ser contradictorio pensar que un micropilote con menor fuerza cortante da como resultado un factor de seguridad menor a lo buscado o incluso inestabiliza la ladera, es por ello que siempre se hace un previo diseño y luego se modela en algún software, especialmente que use los métodos numéricos.

Conclusiones

Al comparar las ecuaciones de Morgenstern-Price, Spencer y Sarma, se obtuvieron que los métodos Morgenstern-Price y Spencer los valores de factores de seguridad son muy similares y diferenciándose solamente por uno o dos decimales, además se afirma que el método de Sarma es más conservador, como se nota en casi todos los escenarios propuestos, mientras que el método Morgenstern-Price es el menos conservador.

Estabilizar este talud como un proyecto real será todo un reto, porque a pesar de haber modelado en el software e incluido las soluciones que en este caso hay micropilotes, o muros de contención y relleno el mayor reto será hacer los micro pilotes coma porque para esto se necesita maquinaria especial y el acceso es un poco complicado.

Cuando se modeló se intentó colocar todos los detalles en especial las fisuras o superficies de rotura existentes para que el resultado sea lo más cercano a la realidad, sin embargo la geotecnia necesita estudios más profundos para dar una solución más certera, en este caso el software analiza al macizo como una masa no elástica, otra limitación es no poder modelar una estratificación tan pequeña como la tiene esta roca, ni tampoco podemos modelar todas las discontinuidades existentes, es recomendable hacer el uso de otros software para comparar los resultados.

Recommendations

El material de préstamo (afirmado) debe tener las siguientes propiedades aproximadas: peso específico 22 KN/m³, cohesión 40 kPa, y ángulo de fricción interna (ϕ) de 35 °.

El material de préstamo debe ser compactado hasta obtener una densidad insitu debe tener un grado de compactación del 98% ensayo Proctor estándar.

Para la rotura de la roca es recomendable usar un martillo hidráulico y no aditivos expansivos, porque la roca no es compacta y perderá presión el aditivo por la estratificación y diaclasas.

Referencias

- [1] B. Celada, I. Tardáguila y A. Rodríguez, «Actualización y mejora del RMR,» *INGEOPRESS*, vol. 234, 2014.
- [2] A. Kumar, L. Gopeshwor y P. Jain, «Rock Mass Characterization and Support Design for Underground Additional Surge Pool Cavern—A Case Study, India,» *Geomaterials*, vol. 7, n° 2, pp. 335-344, 2017.
- [3] N. Bartron, R. Gravamen y J. Lund, «Clasificación ingenieril de macizos rocosos para el diseño de soporte de túneles,» *Mecánica de rocas*, vol. 6, pp. 189-236, 1974.
- [4] O. Hugur, An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions. *Géotechnique*, vol. 37, 1987, pp. 113-117.
- [5] A. W. Bishop, The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes. *Géotechnique*, vol. 5, 1995, pp. 7-17.
- [6] W. Ouyang, S.-W. Liu y Y. Yang, «An improved morgenstern-price method using gaussian quadrature,» *Computers and Geotechnics*, vol. 148, 2022.
- [7] E. Spencer, A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. *Géotechnique*, vol. 17, 1968, pp. 11-26.
- [8] S. Sarma, No Access Stability analysis of embankments and slopes. *Géotechnique*, vol. 23, 1973, pp. 423-433.
- [9] J. Bojorque, Métodos para el análisis de la estabilidad de pendientes, vol. 2, Universidad de Cuenca, 2011.
- [10] Z. Wan y M. Lin, «Finite Element Analysis Method of Slope Stability based on Fuzzy Statistics,» *EARTH SCIENCES RESEARCH JOURNAL*, vol. 25, n° 1, 2021.
- [11] D. Potts, Numerical analysis: a virtual dream or practical reality?. *Géotechnique*, vol. 53, 2003, pp. 535-573.
- [12] Z. Wang y M. Lin, «Finite element analysis method of slope stability based on fuzzy statistics,» *Earth Sciences Research Journal*, vol. 25, n° 1, p. 9, Marzo 2021.
- [13] Z. Bieniawski, «Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Transaction of the South African Institution of Civil Engineers,» vol. 15, pp. 335-344, 1973.