

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.*

# Evaluación de estabilidad de taludes compuestos por bimsoils/bimrocks mediante modelación computacional de superficies de falla tortuosas con el algoritmo A\*

Exneyder A. MONTOYA-ARAQUE<sup>a,1</sup> and Ludger O. SUAREZ-BURGOA<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Geotecnia, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia

<sup>b</sup>Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia

**Resumen.** Esta investigación aborda el problema general del análisis de estabilidad de taludes compuestos de bimsoil/bimrock y las superficies de falla tortuosas. El problema se resolvió mediante el desarrollo de un software de aplicación llamado pyBIMstab que puede generar aleatoriamente estructuras de bimsoil/bimrock dentro de un talud, definir de forma automática y computacionalmente óptima las superficies de falla óptimas que pasan rodeando los bloques aplicando un algoritmo de búsqueda de trayectorias llamado A\* y, además evaluar el factor de seguridad de dichas superficies mediante el método de equilibrio límite. pyBIMstab se usó para realizar miles de análisis para diferentes condiciones y se obtuvieron algunas conclusiones a partir de eso. Finalmente, se propone una metodología para realizar correctamente el análisis de taludes compuestos por bimsoil/bimrock mediante un enfoque estocástico (probabilístico) para lidiar con las incertidumbres sobre la dispersión del factor de seguridad para la misma proporción de bloques al no tener conocimiento exacto de la localización de estos dentro de la masa del talud.

**Palabras Clave.** Algoritmo A\*, superficie de falla tortuosa, bimsoil and bimrock, estabilidad de taludes, método de equilibrio límite.

## 1. Introducción

Un talud puede estar compuesto por muchos tipos de materiales, pudiendo ser enteramente definido por suelo o por un macizo rocoso. Entre ambos extremos existe un material intermedio definido por bloques resistentes embebidos en una matriz más débil; este material fue denominado inicialmente con el nombre de *bimrock* por Medley [1] refiriéndose inicialmente a un material rocoso en conjunto, pero con el tiempo se acuñó el término *bimsoil* cuando la matriz es suelo.

Al analizar la estabilidad de taludes, la geometría de la superficie de falla depende del material y sus propiedades geomecánicas. Por ejemplo, en taludes rocosos es común

---

<sup>1</sup> Autor para correspondencia, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia; Cl. 65 # 78-28, Bl. M1 Of. 320, Cod. Postal 050034, Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: eamontoyaa@unal.edu.co.

realizar análisis cinemáticos por la presencia de discontinuidades, mientras que, en taludes de suelo, es común evaluar el método de equilibrio límite (MEL) sobre superficies circulares o aproximadamente circulares o superficies planares con el método del talud infinito cuando la masa de suelo deslizante es delgada o existe una zona de debilidad superficial que permita esta condición.

En taludes definidos por bimsoils/bimrocks, la superficie de falla se desarrolla indiscutiblemente a lo largo de la matriz alrededor de los bloques a manera de un laberinto; este fenómeno fue denominado como la *tortuosidad* de la superficie de falla por Medley [1] luego de observar los resultados experimentales de Lindquist [2]. La relación de resistencia entre la matriz y los bloques y la proporción, orientación, tamaño y forma de los bloques son factores que influyen en el desarrollo de la superficie de falla tortuosa en un bimsoil/bimrock [3].

Como se mostrará en la siguiente sección, varios estudios han realizado acercamientos a la aplicación del concepto de la tortuosidad de la superficie de falla en el análisis de estabilidad de taludes compuestos de bimsoil/bimrock mediante el MEL. En estos estudios, las superficies de falla fueron trazadas visual y/o manualmente o en el mejor de los casos semiautomáticamente sin un criterio que se ajuste al fenómeno real; esta práctica implica un alto grado de subjetividad al momento de trazar la ruta óptima que define la superficie de falla dentro de la estructura del bimsoil/bimrock.

Por otra parte, una vez se han trazado las superficies de falla, estas fueron evaluadas en software comercial de código cerrado e incluso comúnmente se desprecia la presencia de los bloques localizados dentro de la masa deslizante, los cuales dependiendo del contraste de densidad con respecto a la matriz pueden tener significancia dentro de las ecuaciones de equilibrio del MEL.

Se ha establecido que al analizar materiales heterogéneos tales como bimsoils/bimrocks por el MEL, no se debe aplicar los métodos clásicos de búsqueda reticular con superficies circulares ya que ellas no se ajustan a la situación real en la práctica [4]. Con base a estos hechos, se adelantó la presente investigación con el objetivo de desarrollar un software de aplicación de código abierto que resuelve el problema de la definición automática de las superficies de falla tortuosas (SFT) basándose en el criterio del menor consumo energético expresado en este caso mediante trayectorias óptimas para las SFT a lo largo de las cuales es más probable el desarrollo del eventual movimiento en masa.

Dicho desarrollo computacional y la versatilidad que ofrece el hecho de ser de código abierto, permite concluir más robustamente sobre los resultados de la evaluación de estabilidad de taludes compuestos por bimsoils/bimrocks e incluso permite presentar una propuesta metodológica para abordar esta práctica eliminando los enfoques puramente determinísticos y trascender a los probabilísticos donde se considera la incertidumbre de la estructura del bimsoil/bimrock al interior del talud dándole más peso al término probabilidad de falla que al de factor de seguridad.

## 2. Antecedentes del MEL aplicado a SFT

Diferentes aproximaciones se han realizado para evaluar SFT mediante el MEL. En la Referencia [3] por ejemplo, se analizaron diferentes configuraciones de la estructura del bimsoil/bimrock para identificar el efecto de la proporción de bloques al evaluar la estabilidad de un talud específico. En la Referencia [5] se enunció que las superficies de

falla circulares tienden a interceptar los bloques de un material tipo bimsoil/bimrock a medida que su porcentaje incrementa y, por tanto, dicho modelo no representa la realidad.

Posteriormente, estos análisis se complementarían mediante el método de los elementos finitos (MEF). En la Referencia [6] por ejemplo, se realizó inicialmente una evaluación mediante el MEF para un talud compuesto de bimsoil/bimrock y se observó una zona de falla en lugar de una superficie de falla, la cual era afectada por la presencia espacial de los bloques tornándose tortuosa; esta zona de falla fue empleada para trazar una superficie de falla que la representara y posteriormente fue evaluada mediante el MEL. Finalmente, en la Referencia [4] se presenta otro análisis mediante MEF donde nuevamente se observó una SFT, sin embargo, al evaluar el mismo modelo en el MEL, se encontraba que las supuestas superficies de falla crítica eran muy superficiales, en la zona del talud con ausencia de bloques y no al interior del talud debido a que al interceptar los bloques, la resistencia al corte de la base de las dovelas se incrementa considerablemente.

En las anteriores investigaciones persistió la práctica de definir la SFT subjetivamente mediante la observación de máximas deformaciones de los resultados del MEF o simplemente asumiendo una trayectoria sin criterio. A pesar de esto, es interesante resaltar que existe un estudio que incluso es anterior a todos los mencionados el cual fue desarrollado en la Referencia [7]. Entre las múltiples actividades metodológicas realizadas para concluir sobre las variables que afectan al factor de seguridad en materiales heterogéneos de bloques y matriz como lo es el bimsoil/bimrock, se destaca un desarrollo computacional en el cual se estableció el modelo que se presenta en la Figura 1; con este modelo se definían SFT uniendo los vértices de las figuras rectangulares que representan la fracción gruesa. Este modelo se desarrolló computacionalmente en lenguaje *basic* bajo el nombre de INCL.bas y dentro de la revisión bibliográfica realizada, parece ser el único intento de automatizar el proceso, sin embargo, es un código sin mantenimiento actualmente, y por lo tanto no es usable. Adicionalmente, el criterio de simplemente unir los vértices de rectángulos vecinos pudiera no corresponder a la superficie de falla óptima, lo cual hace que dicho criterio no sea suficientemente robusto.

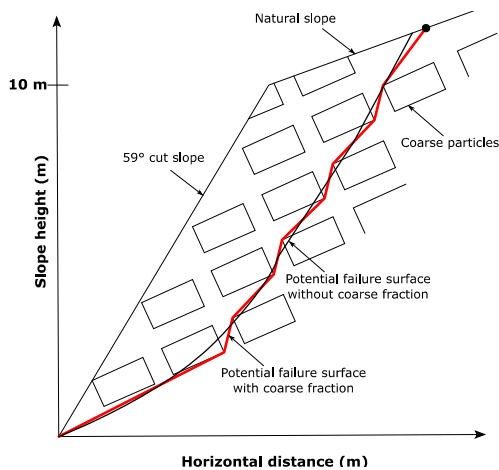


Figura 1. Modelo empleado en la Referencia [7] para automatizar la definición de SFT.

### 3. Definición automática de SFT

En la Referencia [8] se propone un criterio mucho más robusto para definir automáticamente las SFT en un bimsoil/bimrock mediante la implementación de un algoritmo clásico para la determinación de trayectorias óptimas denominado A\* [9]. Este algoritmo encuentra la trayectoria de menor costo incluyendo información heurística de la estructura en la que se desarrolla, lo cual garantiza que dicha trayectoria sea óptima en longitud y adicionalmente representa una mejora de eficiencia computacional con respecto a otro tipo de algoritmos de búsqueda de trayectorias.

Para que el algoritmo A\* pueda ser ejecutado, el medio donde se desea encontrar la trayectoria óptima debe ser representado como un *grafo*, es decir, como una estructura matemática, geométrica y relacional compuesta por nodos y aristas. Aunque la representación gráfica del grafo no es tan relevante como la información relacional de su estructura [10], se optó por tomar una representación reticular rectangular donde el centroide de cada celda es un nodo, y las aristas están implícitas por la vecindad entre celdas. La Figura 2 representa el funcionamiento del algoritmo A\* y el grafo en el que se desarrolla; allí se observa la eficiencia del algoritmo al no necesitar abrir todos los nodos existentes para definir la trayectoria óptima; esta cualidad lo hace altamente competitivo frente a otros algoritmos de su clase que no son tan eficientes.

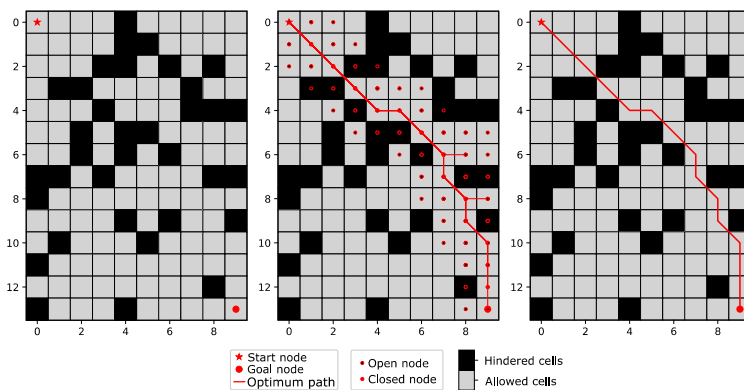


Figura 2. Aplicación del algoritmo A\*.

La concepción clásica del algoritmo A\* puede ser modificada para aplicaciones particulares, por ejemplo, en la presente investigación se estableció una modificación en la cual la trayectoria óptima tiende a seguir una trayectoria preferencial, lo cual resulta útil al momento de implementar el algoritmo para definir SFT en taludes, las cuales tienden a seguir una superficie de falla general aproximadamente circular. La Figura 3 muestra la aplicación del algoritmo A\* modificado para la definición de SFT con tendencia circular. El uso de este algoritmo para definir SFT es muy relevante para atender los problemas de subjetividad y manualidad vistos en los antecedentes.

Esta modificación al algoritmo A\* fue validada mediante la comparación de la SFT definida para el montaje de un modelo de elementos finitos de un ensayo de corte directo sobre una muestra de bimsoil/bimrock. La trayectoria preferencial en este caso consiste en la banda de máximas deformaciones que resulta de modelar el ensayo sobre una muestra homogénea, es decir sin los bloques. Como resultado, la SFT final encontrada con el algoritmo A\* coincide con la banda de máximas deformaciones de la modelación

del ensayo de corte directo sobre la muestra con los bloques como se muestra en la Figura 4.

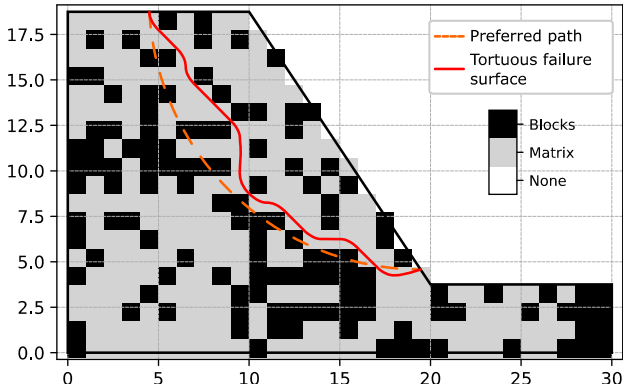


Figura 3. TFS en un talud definida mediante el algoritmo A\* modificado.

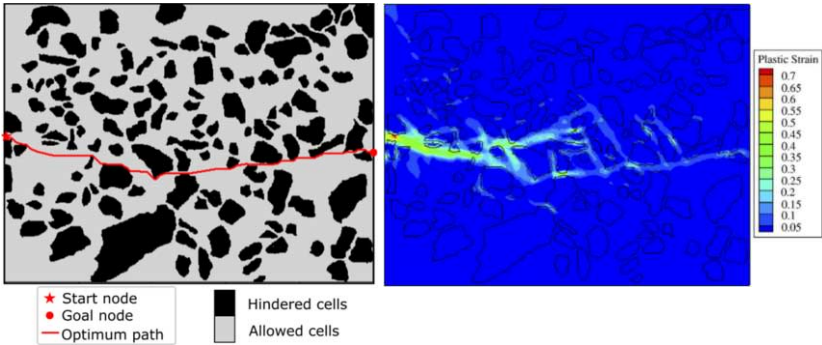


Figura 4. Validación del algoritmo A\* modificado.

#### 4. Desarrollo computacional del software de aplicación pyBIMstab

pyBIMstab es un software de aplicación (SA) de código abierto presentado en la Referencia [11]. Corresponde a un paquete escrito en Python 3 que implementa varios MEL para evaluar la estabilidad de taludes compuestos por bimsoils/bimrocks mediante la definición de SFT automáticamente mediante la implementación del algoritmo A\* clásico y el modificado con tendencias preferenciales.

pyBIMstab es capaz de ejecutar MEL tan básicos como el de Fellenius [12], pasando por el de Bishop [13], hasta los más robustos que satisfacen las ecuaciones de equilibrio en dos direcciones y de momentos como son los métodos de Morgenstern & Price [14] y Spencer [15] mediante el procedimiento del método de equilibrio limite general (GLE, por sus siglas en Inglés de *General Limit Equilibrium*) propuesto por Fredlund & Krahn [16].

Entre otras funcionalidades, este SA puede incluir dentro de los análisis el nivel freático, cargas externas a la superficie del talud, carga sísmica horizontal para análisis pseudoestático, y puede generar estructuras aleatorias para bimsoils/bimrocks simplificadas representadas como arreglos matriciales, los cuales pueden ser

modificados para definir estructuras más cercanas a la realidad. Adicionalmente, también es capaz de evaluar las típicas superficies de falla circulares en materiales homogéneos.

La Figura 5 muestra la salida del SA para una evaluación por el método GLE. Allí se observa el gráfico de convergencia del método y el talud con el modelo simplificado del bimsoil/bimrock y la SFT. En la misma Ref. [11], en [17] y en la documentación del SA, se detalla en temas concernientes a las limitaciones del mismo, al igual que muestra la validación de los cálculos de los factores de seguridad con respecto a ejemplos de literatura clásica; adicionalmente, se presentan ejemplos ilustrativos de cómo usarlo.

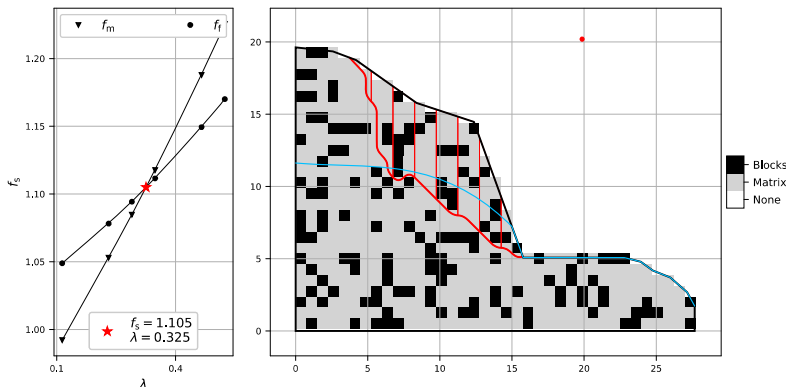


Figura 5. FFS en un talud definida mediante el algoritmo A\* modificado.

#### 4.1. Resultados encontrados con pyBIMstab

En la Referencia [17] se realizaron numerosos análisis utilizando pyBIMstab para observar el comportamiento del factor de seguridad (FS) ante diferentes situaciones tanto de estructura del bimsoil/bimrock generadas aleatoriamente, como de los parámetros de resistencia al corte de la matriz del mismo. Para presentar los resultados, se definió un FS normalizado ( $f_s^*$ ) que consiste en la relación entre el FS de la SFT considerando el peso de los bloques por encima de la superficie de falla y el FS obtenido sobre la superficie de falla circular crítica que se produce en ausencia de bloques, y por lo tanto, sin considerar el peso de los mismos; esto resultaba más consistente que comparar con respecto al FS de la superficie de falla circular usada como trayectoria preferencial, la cual ya se había considerado en otros estudios. Entre los hallazgos encontrados se tienen los siguientes:

1. Para proporciones volumétricas de bloques mayores al 20%,  $f_s^*$  incrementa a medida la proporción volumétrica y a su vez esto es más significativo para taludes de menor inclinación; en el caso de taludes de diferentes alturas no es tan manifiesto el comportamiento, pero  $f_s^*$  también tiende a ser ligeramente mayor para taludes de menor altura. En proporciones volumétricas menores al 20%, no se encontraron diferencias significativas.
2.  $f_s^*$  es sensible ante el contraste de los pesos unitarios de los bloques y la matriz. Se observó que éste aparenta ser más elevado cuando bloques y matriz tienen el mismo peso unitario; la diferencia entre valores de  $f_s^*$  obtenidos para diferentes contrastes es especialmente notable para valores altos del intercepto

- de cohesión, para matrices no cohesivas, no hay diferencias entre los valores de  $f_s^*$ .
3.  $f_s^*$  es función directa de la relación de longitud de tortuosidad (TLR, siglas del inglés Tortuosity Length Ratio) definido en la Ref. [18] como la relación de longitudes de la SFT y de la superficie formada en ausencia de bloques; valores altos de  $f_s^*$  se relacionan con valores altos de TLR y viceversa.
  4. Para grandes proporciones volumétricas de bloques se observa que en general los  $f_s^*$  tienden a aumentar, pero se genera una mayor dispersión de estos valores, es decir, para diferentes configuraciones de estructura del bimsoil/bimrock con la misma proporción volumétrica de bloques, se pueden encontrar  $f_s^*$  tan dispersos que varían entre 1.0 y 1.8.

Debido a esta última observación sobre el aumento en la dispersión de los datos para grandes proporciones volumétricas de bloques, se realizaron ensayos para observar el comportamiento del FS sin normalizar de diferentes taludes para proporciones volumétricas de bloques fijas con diferentes realizaciones de generación aleatoria de estructuras, y se encontró que los FS definen histogramas asimétricos, los cuales se puede ajustar ya sea a una distribución lognormal o una gamma. Con base a esto, se propone la siguiente propuesta metodológica para abordar en la práctica los problemas de estabilidad en taludes compuestos por bimsoils/bimrocks.

## **5. Propuesta metodológica para abordar problemas de estabilidad en taludes compuestos por bimsoils/bimrocks**

La siguiente propuesta se establece con el ánimo de sugerir a quienes se enfrentan a este tipo de problemas tanto en la práctica ingenieril como en la academia e investigación, que debido a la incertidumbre que se tiene sobre la distribución de los bloques en un bimsoil/bimrock, es más conveniente hablar en términos probabilísticos que puramente determinísticos cuando se evalúa la estabilidad de un talud. A continuación, se enumeran los pasos de la metodología:

1. Definir la geometría de la sección crítica del talud.
2. Caracterizar el bimsoil/bimrock. Esto comprende al menos los parámetros de resistencia al corte de la envolvente de Mohr-Coulomb de la matriz y el peso unitario de bloques y matriz además de las características geométricas de los bloques (tamaño, forma, orientación, entre otros).
3. Generar aleatoriamente una cantidad suficiente de posibles distribuciones del bimsoil/bimrock que se ajusten a las características estructurales/geométricas del mismo. Esta cantidad debería ser sujeto de un diseño experimental para determinar el tamaño de muestra adecuado, pero se sugiere inicialmente contemplar al menos 30 generaciones.
4. Encontrar la superficie de falla crítica del talud compuesto únicamente de la matriz del bimsoil/bimrock mediante métodos tradicionales.
5. Evaluar los FS de las SFT que resultan de las generaciones del paso 3 al usar la superficie de falla crítica del paso 4 como la trayectoria preferencial. Este paso puede ser fácilmente ejecutado con pyBIMstab.
6. Generar el histograma de los FS obtenidos en el paso 5; ajustar una distribución lognormal o gamma al mismo y con ella presentar el valor de la probabilidad de falla del talud con la distribución ajustada y su función de distribución

acumulada, es decir,  $\Pr(f_s \leq 1)$ . Adicionalmente se puede presentar el FS promedio como valor de referencia.

## 6. Conclusiones

Los bimsoils/bimrocks pueden ser representados como grafos para determinar las SFT óptimas mediante la implementación del algoritmo A\*. Esto elimina el problema de la subjetividad que se venía identificando de estudios previos al igual que el problema de tener que hacerlo manualmente. Se desarrolló un SA denominado **pyBIMstab** que tiene implementado el algoritmo A\* para generar automáticamente las SFT y su evaluación mediante MEL básicos y robustos los cuales fueron validados.

El FS normalizado  $f_s^*$  es sensible ante diferentes variables de un problema de estabilidad de taludes como lo es la geometría del talud, el contraste entre el peso unitario de los bloques y la matriz, y la estructura del bimsoil/bimrock.

Para una proporción volumétrica de bloques y una geometría de talud fija, se encontró que los FS obtenidos para diferentes distribuciones de los bloques del bimsoil/bimrock se distribuyen asimétricamente a los cuales se les puede ajustar distribuciones lognormal o gamma. Se propuso una metodología para abordar estos problemas desde un enfoque probabilista y no puramente determinista.

## Referencias

- [1] E. Medley, The engineering characterization of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks) [Ph.D. thesis], Berkeley, California: University of California at Berkeley, 1994.
- [2] E. Lindquist, The strength and deformation properties of mélange, Ph.D. thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, California, 1994.
- [3] E.W. Medley & P. F. Sanz, Characterization of bimrocks (rock/soil mixtures) with application to slope stability problems, In Proceedings: *EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquy*, Salzburg, Austria, 2004.
- [4] M. L. Napoli, M. Barbero, E. Ravera, & C. Scavia, A stochastic approach to slope stability analysis in bimrocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 101(2018), 41–49.
- [5] D. Minuto & L. Morandi, Geotechnical characterization and slope stability of a relict landslide in bimsoils (blocks in matrix soils) in downtown Genoa, Italy, *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2: Landslide Processes*, pp. 1083–1088. Springer International Publishing, 2015.
- [6] C. Guerra, J. Pinzón, L. Prada, & A. Ramos, Multiscale modelling of the slope stability of block-in-matrix materials, In Proceedings: *Geo-Chicago 2016: Sustainable Geoenvironmental Systems*, Chicago, Illinois, pp. 658–667, 2016.
- [7] T. Y. Irfan & K. Y. Tang, Effect of the coarse fraction on the shear strength of colluvium. Geo report No. 23 SPR 15/92, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, Hong Kong, 1993.
- [8] E. A. Montoya-Araque & L. O. Suarez-Burgoa, Automatic generation of tortuous failure surfaces in block-in-matrix materials for 2D slope stability assessments, *Computers and Geotechnics* 112(2019), 17–22.
- [9] P. Hart, N. Nilsson, & B. Raphael, A formal basis for the heuristic determination of minimum cost path, *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics* SSC-4(2)(1968), 100–107.
- [10] R. Diestel, *Graph Theory*, New York: Springer-Verlag, 2000.
- [11] E. A. Montoya-Araque & L. O. Suarez-Burgoa, pyBIMstab: Application software for 2d slope stability analysis of block-in-matrix and homogeneous materials, *SoftwareX* 7(2018) 383–387, doi: 10.1016/j.softx.2018.11.003.
- [12] W. Fellenius, Calculation of the stability of earth dams. In ICOLD (Ed.), *Transactions of the 2nd Congress on Large Dams*, Volume 4(1936), Washington D.C., pp. 445–459.
- [13] A. Bishop, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 5(1) (1955), 7–17.
- [14] N. R. Morgenstern & V. E. Price, The analysis of the stability of general slip surfaces, *Geotechnique* 15(1)(1965), 79–93.

- [15] E. Spencer, A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Geotechnique* 17(1) (1967), 11–26.
- [16] D. G. Fredlund & J. Krahn, Comparison of slope stability methods of analysis, *Canadian Geotechnical Journal* 14(3) (1977), 429–439.
- [17] E. A. Montoya-Araque, Slope stability assessment for block-in-matrix composite-materials by the tortuous surface method. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2019.
- [18] E. Medley, Observations on tortuous failure surfaces, *Felsbau Rock and Soil Engineering – Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunneling* 22(5)(2004), 35–43.