

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA

Pablo A. Beneyto^a, Guillermo J. Gutierrez^a, Javier L. Mroginski^a, Héctor A. Di Rado^a y Armando M. Awruch^b

^a*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste.
Av. Las Heras 727, (3500) Resistencia, Chaco, Argentina.
pbeneyto@ing.unne.edu.ar, <http://ing.unne.edu.ar/mecap>*

^b*Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
Applied and Computational Mechanical Center (CEMACOM).
Av Osvaldo Aranha 99, 3er Andar, Porto Alegre (RS), Brazil*

Palabras Clave: Estabilidad de taludes, Equilibrio límite, Optimización heurística, Algoritmo Genético, MEF.

Resumen. El problema de la estabilidad de taludes es de gran importancia en obras de Ingeniería, dicha estabilidad es cuantificada a través del factor de seguridad, el cual depende de las cargas actuantes, y de las características geométricas y físicas de la masa de suelo. La determinación del factor de seguridad puede ser abordada mediante el empleo de teorías simplificadas de resistencia de materiales, como los métodos de equilibrio límite, o bien, mediante técnicas más precisas como el Método de los Elementos Finitos, conduciendo, en ambos casos, a soluciones determinísticas. Sin embargo la obtención de la superficie de deslizamiento crítica, o de menor factor de seguridad, de una estructura de suelo no puede ser obtenida en virtud del carácter heurístico de la misma.

En estos casos pueden emplearse técnicas iterativas de búsqueda donde la solución no es única, sino que está acotada en un intervalo. Específicamente el hallazgo de la superficie de deslizamiento crítica constituye un problema de optimización donde las variables son tan diversas como desconocidas. En este trabajo se plantea el desarrollo de un método de optimización basado en algoritmos genéticos aplicado a la obtención de la superficie de deslizamiento crítica, analizada mediante el método del equilibrio límite a través del MEF.

La función objetivo evaluada es el factor de seguridad de las superficies de deslizamiento propuestas, la cual se obtiene utilizando un programa de Elementos Finitos desarrollado específicamente para suelos (FECCUND) junto a un módulo para la determinación de Factores de seguridad (FACTF). Como ejemplo de aplicación se ensayó una masa de suelo con talud vertical y otra con talud inclinado. Los resultados numéricos indican, que existe un tamaño mínimo de la población inicial por debajo de la cual no se consigue la convergencia esperada. Sin embargo, superado este tamaño mínimo de población no se observa gran dependencia de la solución respecto del tamaño de la población inicial, mostrando además que a pesar de una lenta convergencia, la ubicación de la superficie de falla responde a lo esperado según las teorías de suelo.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se presenta la determinación de la superficie de deslizamiento crítica a través de la técnica de optimización denominada Algoritmo genético, dicha superficie posee el mínimo Factor de seguridad, el cual es obtenido mediante la aplicación del Método de Equilibrio límite utilizando elementos finitos.

Los métodos de análisis de equilibrio límite son ampliamente usados y sirven para la evaluación del fenómeno de estabilidad de taludes, sumando fuerzas y momentos en relación a una superficie de falla asumida que desliza con respecto al resto de la masa de suelo.

Se han publicado muchos artículos de investigación desde la aparición del primer método de análisis realizado por [Fellenius \(1936\)](#), que estaba relacionado con la estabilidad de taludes o el análisis de estabilidad de taludes.

Entre los métodos de equilibrio límite más comúnmente usados se destacan los de [Fellenius \(1936\)](#), [Taylor \(1937\)](#) y [Bishop \(1955\)](#) para superficies de deslizamiento circulares y Bishop modificado para superficies circulares y no circulares, entre otros, siendo sus principales ventajas la simplicidad y facilidad de usar, también se encuentran disponibles los métodos de equilibrio límite de las fajas, métodos de elementos de bordes, de elementos finitos y métodos de redes neuronales ([Fredlund y Scoular, 1999](#)).

Debido al gran número de posibles superficies de deslizamiento, se usan computadoras para facilitar su búsqueda y análisis. Cabe acotar que los factores de seguridad obtenidos a partir de métodos de análisis de estabilidad que satisfacen todas las condiciones de equilibrio límite están dentro del 6 % de los demás. Estos métodos incluyen el método del círculo de fricción, el de la espiral logarítmica, métodos de equilibrio límite riguroso y el método de los elementos finitos.

Una posible razón para esta diferencia, si se usa el mismo método de análisis de estabilidad, puede atribuirse a problemas numéricos en técnicas de búsqueda simplificada utilizada en el cálculo, donde todas las superficies de ensayo son preseleccionadas. Durante las últimas dos décadas se han propuesto técnicas de búsqueda dinámica más avanzadas y esto condujo a resultados más precisos y aceptables.

Las técnicas de búsqueda dinámicas abarcan el patrón de algoritmo de búsqueda, el método variable alternado, el método de programación dinámica, el método de búsqueda aleatoria y el método simplex entre otros. Los métodos de búsqueda dinámica son poco eficaces, pues generan un gran número de superficies de deslizamiento, conduciendo a una mayor exactitud en la localización de la superficie de deslizamiento con menor coeficiente de seguridad. Recientemente se han propuesto técnicas de búsqueda más avanzadas basadas en distintos métodos, entre las que pueden mencionarse las presentadas por [Zolfaghari et al. \(2005\)](#), que utiliza un mecanismo de búsqueda mediante algoritmo genético, [Kahatadeniya et al. \(2009\)](#) a través del algoritmo colonia de hormigas y finalmente [Innocente \(2010\)](#) con el desarrollo de optimización mediante Particle Swarm (PSO).

Los algoritmos genéticos (AG) son métodos adaptativos evolutivos que pueden ser utilizados para resolver problemas de búsqueda y optimización, están basados en el proceso genético de los organismos vivos, y a lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan de acuerdo a principios de selección natural y supervivencia del más fuerte, de esta manera se busca obtener mínimos o máximos de funciones.

Por analogía con la realidad, los AG buscan obtener una solución en el mundo real, la evolución hacia la solución correcta dependerá muchas veces de la adecuada codificación.

En el presente trabajo se realiza un análisis utilizando el método de los elementos finitos

mediante el cual se obtiene un modelo tensión-deformación para los suelos involucrados en el cálculo de tensiones de la masa de suelo, estas tensiones son usadas para computar el factor de seguridad. Se utilizaron elementos cuadriláteros de 8 nodos para construir mallas 2D, suponiendo condiciones de estado plano de deformaciones.

La implementación de algoritmos genéticos comienza con una población aleatoria de superficies de deslizamiento, los factores de seguridad de estas superficies son evaluados y asociados a una posibilidad de reproducción, una mejor solución significará mayor probabilidad de cruzamiento, teniendo más posibilidad de atraer compañeros y generar un gran número de descendientes, de esta manera las características de los individuos mejor adaptados se propagará en forma creciente en sucesivas generaciones (Mroginski et al., 2009).

2. EL PROBLEMA DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES

El problema de estabilidad de taludes puede ser abordado desde distintos aspectos. Cuando se habla de estabilidad, se trata de encontrar la altura crítica del talud o la carga de colapso aplicada sobre una porción del talud, para una geometría y características de suelo dados. Evaluar la estabilidad de un talud implica un estudio en el cual se debe, entre otros eventos: caracterizar la resistencia del suelo, establecer el perfil del talud así como las condiciones de filtración y agua subterránea, seleccionar una superficie de deslizamiento o falla y calcular su factor de seguridad, finalmente, a partir de este factor de seguridad (el cual se elige en base al destino del talud) se deberá determinar la superficie de falla crítica.

Más allá del problema de la modelación material del suelo, está presente el problema del estudio de los criterios de evaluación de sistemas estructurales. En este sentido es necesario, una vez calibrados y verificados la capacidad predictiva de los modelos computacionales desarrollados, llevar a cabo análisis computarizados de sistemas estructurales que involucren complejidades relevantes, frente a acciones estáticas y dinámicas a fin de contribuir al avance del conocimiento en lo referente a la formulación de criterios de diseño más eficientes y realistas.

Dentro de este marco, se estudió el comportamiento de suelos cohesivo-friccionales con distintos niveles de humedad y condiciones de borde. Los trabajos incluyen la extensión de las formulaciones de elementos finitos utilizadas en programas ya desarrollados, para tener en cuenta variaciones de la succión durante procesos de carga y deformaciones progresivas. La consolidación de suelos parcialmente saturados y el transporte de poluentes son temas abordados por el grupo de trabajo del departamento de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UNNE (Di Rado et al., 1998; Beneyto et al., 2005). El problema de la consolidación no será tratado durante este trabajo como un objetivo en sí, pero será necesaria su implementación para el conocimiento de las tensiones efectivas en la masa de suelo, necesarias para probar la eficiencia y eficacia del modelo de suelo descripto.

Los métodos para evaluar cuantitativamente la estabilidad de los taludes son diversos. Los llamados de equilibrio límite están basados en el método de las dovelas, en el cual la masa de suelo se divide en porciones o dovelas. Se asume condiciones de equilibrio estático para una superficie de deslizamiento supuesta y se busca la superficie de deslizamiento crítica para la cual el factor de seguridad es mínimo. La diferencia entre los distintos métodos de equilibrio límite radica en las simplificaciones para reducir la indeterminación de las fuerzas entre las dovelas.

Es así como surgen métodos para suelos granulares y métodos para suelos cohesivos, aquellos que utilizan una superficie de falla circular: el de las dovelas, Fellenius (1936) y Bishop (1955) y fallas no circulares: Janbu et al. (1956), del talud infinito, y los métodos que utilizan tablas. También podemos dividir a los métodos de equilibrio límite de acuerdo a las ecuaciones de equilibrio que satisfagan. El método de las Dovelas, el de Bishop y el "Sueco modificado" no

satisfacen todas las ecuaciones de equilibrio estático. Los métodos como el de [Morgenstern y Price \(1965\)](#) y el de [Spencer \(1967\)](#) satisfacen todas las ecuaciones de equilibrio. Éstos últimos son referidos como métodos de equilibrio completo".

Aún así estos métodos llamados completos o de solución rigurosa ([Janbu et al., 1956](#); [Morgenstern y Price, 1965](#); [Spencer, 1967](#); [Fredlund y Krahn, 1977](#)) no pueden ser vistos como rigurosos en el sentido estrictamente mecánico, ya que las ecuaciones de equilibrio no se satisfacen para cada punto de la masa de suelo. Tampoco se satisface la regla de flujo ni las condiciones de compatibilidad ni las relaciones constitutivas pre-falla ([Kim et al., 1999](#)).

Durante las últimas dos décadas se han propuesto muchos métodos para analizar la estabilidad de taludes mediante elementos finitos. Entre aquellos métodos, el de incremento de la gravedad y el de reducción de resistencia, están considerados como los más ampliamente usados. En el método de incremento de la gravedad, las fuerzas gravitatorias son incrementadas en forma gradual hasta que el talud falla, aquí el factor de seguridad se define como la relación entre la aceleración gravitacional en la falla (g_f) y la aceleración gravitacional actual (g). En el método de reducción de resistencia, los parámetros de resistencia del suelo son reducidos hasta que el talud se vuelve inestable, por lo tanto, el factor de seguridad se define como la relación entre el parámetro de resistencia inicial y el parámetro de resistencia crítica. El método de incremento de la gravedad se usa para estudiar la estabilidad de terraplenes durante su construcción, debido a que proporciona resultados más confiables, mientras que el método de la reducción de resistencia se usa para estudiar la estabilidad de taludes existentes.

Se debe tener presente que aún hoy en día los métodos de resolución por análisis por elementos finitos se encuentran en desarrollo y evaluación permanente, dado que todavía se estudian diversos factores y modelos para utilizar en este tipo de análisis. La normativa norteamericana determina que el uso de los elementos finitos no se justifica para el sólo propósito de calcular el factor de seguridad sino que su uso debe servir para obtener también desplazamientos y tensiones causadas por las cargas aplicadas, dado el esfuerzo y tiempo que este análisis requiere.

El método de los elementos finitos es una herramienta computacional muy potente en ingeniería. Adquiere su poder de la capacidad de simular comportamientos físicos usando herramientas computacionales sin la necesidad de simplificar el problema, obteniéndose resultados más precisos y confiables. Actualmente, nuevos métodos de análisis propuestos en ingeniería pueden verificarse usando el método de los elementos finitos como punto de referencia.

Los problemas en la estabilidad de taludes resueltos usando el método de elementos finitos tienen dos importantes distinciones con los métodos de equilibrio límite originales. Primero, la ecuación de la estabilidad del talud por elementos finitos es determinada; por lo tanto, no es necesario que se hagan suposiciones para poder completar los cálculos. Segundo, la ecuación del factor de seguridad es lineal, porque la tensión normal en la base de la faja es conocida. Por otro lado, los métodos de equilibrio límite, empezando por el método simplificado de Bishop, han usado un factor de seguridad estimado para computar la fuerza normal en la base de la faja, hallando el factor de seguridad final a través de procesos iterativos.

El método de los elementos finitos puede usarse para estudiar la estabilidad de taludes usando una definición de falla similar a la de los métodos de equilibrio límite, éstos proponen en principio una superficie de deslizamiento para luego examinar el valor del coeficiente de seguridad de la misma, el cual se define como la relación entre la resistencia al corte disponible y la resistencia al corte movilizadora a lo largo de la superficie.

En este trabajo el mapa de tensiones de la masa de suelos se obtiene a través del programa FECCUND, desarrollado para resolver problemas de consolidación en suelos secos, saturados y parcialmente saturados con transporte de poluentes, luego, mediante el módulo FACTF se ana-

liza el desarrollo de tensiones actuantes y resistentes a lo largo de la superficie de deslizamiento propuesta con el objeto de determinar su factor de seguridad. Ambos programas fueron desarrollados por investigadores del Departamento de Mecánica aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UNNE (Di Rado et al., 1998; Beneyto et al., 2005; Mroginski et al., 2007).

3. OBTENCIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD

El estado tensional de la totalidad de la masa de suelo, a lo largo de la aplicación de la carga es obtenido mediante el análisis por elementos finitos donde las tensiones normales y de corte son computadas en relación a una superficie de falla seleccionada, utilizando un procedimiento para combinar un análisis de tensiones por elementos finitos en un talud con los conceptos del método de análisis por equilibrio límite, obteniendo un factor de seguridad general que expresa la estabilidad del talud basándose en las tensiones calculadas en la masa de suelo.

Las tensiones calculadas por elementos finitos son usadas para calcular las tensiones normal y de corte en la superficie de falla. Las tensiones efectivas del paso de carga analizado son usadas para calcular los factores de seguridad locales en el centro de la base de cada faja así como el factor de seguridad general de toda la superficie de deslizamiento.

El factor de seguridad general se define en concordancia con el método de elementos finitos para estabilidad de taludes descrito por [Kulhawy \(1969\)](#), y se expresa como la relación entre la suma de la resistencia incremental de la fuerza cortante, S_r , y la suma de la fuerza movilizadora al corte, S_m , a lo largo de la superficie de falla:

$$F_{fem} = \frac{\sum S_r}{\sum S_m} \quad (1)$$

donde S_r es la fuerza resistente sobre cada porción de superficie de deslizamiento propuesta y S_m la fuerza movilizadora.

La fuerza resistente para cada faja se calcula en términos del esfuerzo de corte resistente τ en el centro de la faja, multiplicada por la longitud de la misma, dv , la cual puede ser escrita para suelos saturados y no saturados como:

$$S_r = \tau dv = (c + \sigma' \tan \varphi) dv \quad (2)$$

siendo σ' la tensión efectiva normal a la dirección de la porción dv de superficie de deslizamiento, c la cohesión y φ el ángulo de fricción interna del suelo

La fuerza movilizadora de cada faja puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación:

$$S_m = \tau' dv \quad (3)$$

Donde τ' es la tensión efectiva tangencial a la dirección de la porción dv , actuando en el centro de la misma

El factor de seguridad local se define como la relación de la fuerza resistente al corte, S_r , en un punto a lo largo de la superficie de falla dividido por la fuerza al corte movilizadora, S_m , en el mismo punto ([Fredlund y Scoular, 1999](#)).

$$F_{local} = \frac{S_r}{S_m} \quad (4)$$

La fuerza al corte resistente, S_r , y la fuerza movilizadora de corte, S_m , son calculadas usando las tensiones computadas por medio del análisis a través del método de los elementos finitos.

A través de un algoritmo se determina el elemento al cual pertenece cada uno de los centros de las porciones de superficie de deslizamiento, los valores de tensión a partir de los puntos de Gauss del elemento pueden ser transferidos a los nudos del elemento considerado y consecuentemente al centro de la porción de superficie de deslizamiento analizada.

4. ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN

Los algoritmos genéticos (AG) deben su origen a la teoría de la evolución de Darwin, según la cual, los individuos más aptos de una población tienen mayores probabilidades de supervivencia (Goldberg, 1989). En un problema de optimización los individuos representan las distintas soluciones al problema, y su aptitud al medio está definida por la función de evaluación o *fitness* a optimizar (Mroginski et al., 2009).

En el tabla 1 se presenta el pseudocódigo elemental del AG implementado en este trabajo. Las características principales del mismo serán desarrolladas a continuación.

```

BEGIN Inicialización de variables
Generación de la población inicial
FOR Bucle sobre generaciones
    Evalúa la función objetivo
    Guardar Élite
    Selección
    IF Generacion impar
        Cruzamiento Intercalado
    ELSE
        Cruzamiento Single Point
    END IF
    Mutación
    Nueva Población = Pob.Cruzada + Élite
END FOR
END

```

Tabla 1: Pseudocódigo elemental del AG implementado

4.1. Población inicial

La población inicial es generada aleatoriamente respetando ciertas restricciones. Los individuos son definidos por el punto inicial de la superficie, el paso entre puntos, el ángulo inicial y el incremento entre ángulos. De este modo se evita la creación de superficies de falla irreales (Kahatadeniya et al., 2009; Zolfaghari et al., 2005)

$$ind = [x_i \ b_i \ \alpha_i \ \Delta\alpha_1 \ \Delta\alpha_2 \ \dots \ \Delta\alpha_n] \quad (5)$$

El ángulo inicial es medido respecto a la horizontal en sentido horario y su signo es negativo. Los incrementos son medidos en sentido antihorario, y son mayores que cero. El ángulo que describe un segmento con la horizontal es la suma del ángulo del segmento anterior más el correspondiente incremento (ver figura 1). Con esta formulación se asegura que las superficies no presenten puntos de inflexión.

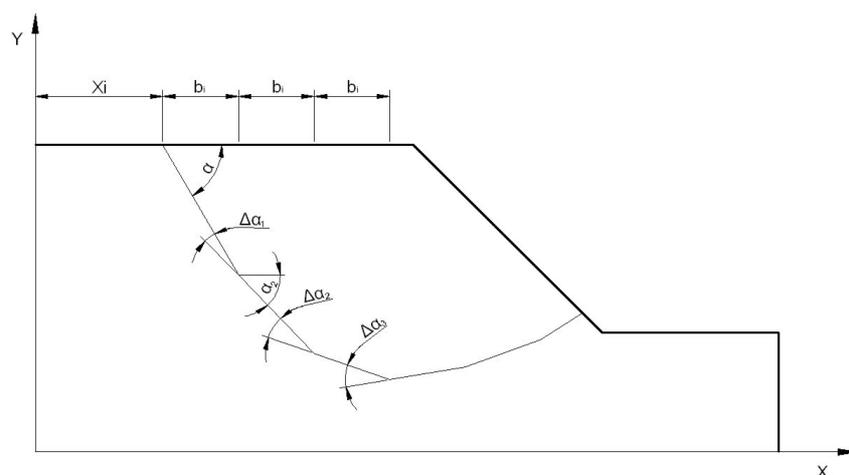


Figura 1: Superficie de deslizamiento probable

4.2. Selección

El proceso de selección empleado es del tipo *Simple Roulette*. Consiste en elegir a los individuos en función de las probabilidades de cada uno mediante tiros aleatorios. Las probabilidades son asignadas en función del valor del factor de seguridad, los más aptos (menor factor de seguridad) tienen mayores posibilidades de ser elegidos.

Las mejores soluciones son guardadas en la variable *Elit* y pasan a la siguiente generación sin ser modificadas. En este trabajo se adopta la élite como el 1 % de la población total.

4.3. Cruzamiento

En este módulo trabajo se implementa un procedimiento mixto de cruzamiento, donde la forma para generaciones impares es del tipo *Single Point Crossover* mientras que en generaciones pares se emplea un *Cruzamiento por máscara binaria*.

Este procedimiento mixto de cruzamiento introduce importantes mejoras cuando la población se ve copada rápidamente por los mejores individuos y cabe la posibilidad de que la solución encontrada corresponda a máximo/mínimo local.

En el Cruzamiento por máscara binaria, se genera un vector binario aleatorio de dimensión *numvars* (máscara) que sirve para establecer qué componentes de cada individuo serán cruzadas. Mientras que en el *Single Point Crossover* de las generaciones impares, se establecen 2 puntos de corte aleatoriamente en los vectores de cada individuo, y luego se combinan las partes de cada individuo con la del otro, obteniéndose los nuevos individuos (Goldberg, 1989).

4.4. Mutación

La finalidad de la mutación es evitar que el algoritmo quede atrapado en óptimos locales, esto se logra al modificar aleatoriamente parte de los individuos de la población (Belegundu y Chandrupatla, 1999). Para ello se define un porcentaje de probabilidad de mutación que determina si el individuo analizado sufrirá o no modificaciones por mutación. Este porcentaje debe ser pequeño, ya que un valor alto transformará al algoritmo en una búsqueda aleatoria (Zhang et al., 2008).

En un primer momento, la población conserva parte de las características de la población inicial, explorando gran parte del espacio de búsqueda.

A medida que avanza el algoritmo, la población comienza a ser copada por copias de los mejores individuos, limitando la exploración. Si el algoritmo cae atrapado en un óptimo local, la mutación ayuda a que salga del mismo. Es por ello que se decidió adoptar una función que varíe la probabilidad de mutación, desde valores del orden del 1 % en las primeras generaciones, hasta el valor máximo a partir de la generación $maxmut$, a partir de la cual se observó que se dificulta la optimización.

$$mut = \left[0,1 + 0,9 \sin \left(\frac{\pi \text{igen}}{2 \text{maxmut}} \right) \right] \text{probmut} \quad (6)$$

La mutación es del tipo *Step Mutation*, eligiendo aleatoriamente un elemento del vector del individuo y modificando luego según un coeficiente aleatorio que puede variar entre +1.50 y +0.50, respetando los límites impuestos en cada problema.

5. RESULTADOS

5.1. Ejemplo1: Talud vertical

El primer ejemplo de aplicación del algoritmo propuesto en este trabajo consiste en un talud vertical de suelo sometido a su propio peso (Fig. 2), con las características mecánicas y del algoritmo genético que se describen en Tabla 2.

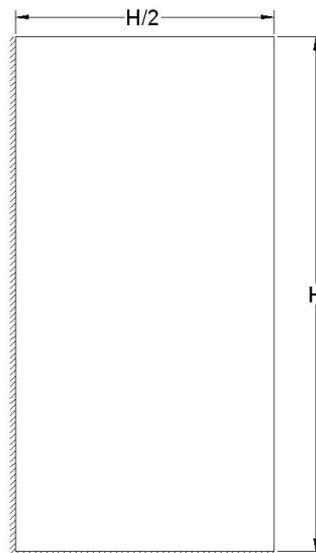


Figura 2: Geometría de la masa de suelo con talud vertical

Este perfil de suelo fue analizado en las condiciones seco y saturado, obteniéndose los siguientes resultados

5.1.1. Suelo seco

Para la condición de suelo seco se obtiene la superficie de falla graficada en la Fig. 3. Además puede observarse en la Fig. 4 la evolución del factor de seguridad a lo largo de la ejecución del programa.

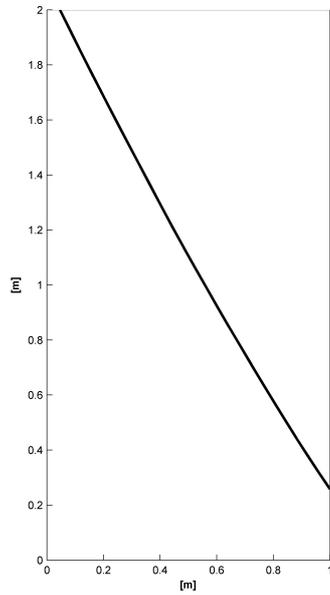


Figura 3: Superficie de deslizamiento crítica para un talud vertical de suelo seco

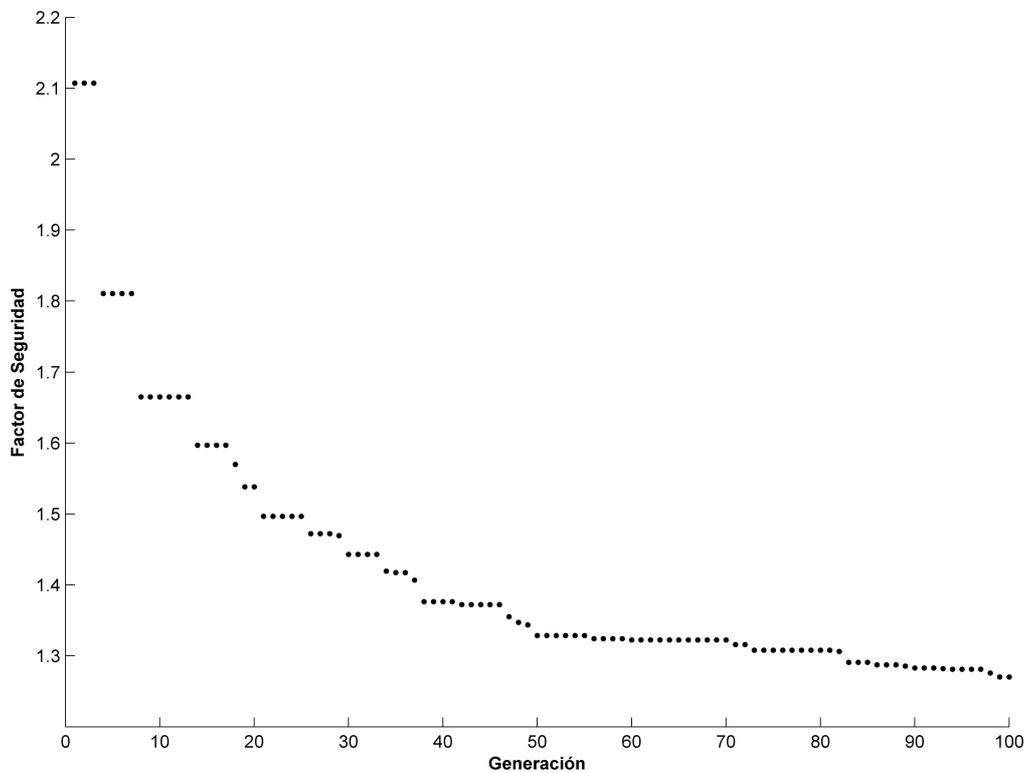


Figura 4: Evolución del factor de seguridad para un talud vertical de suelo seco a lo largo de la ejecución

Módulo de elasticidad	E	1,000kPa
Cohesión	c	5,00kPa
Ángulo de fricción interna	φ	30
Peso específico	γ	20,00kN/m ³
Tamaño de la población	$Popsize$	100
Número de variables	$numvars$	26
Número de generaciones	$numgen$	100
Probabilidad de mutación máxima	$probmut$	0,05
Generación con mutación máxima	$maxmut$	50

Tabla 2: Propiedades mecánicas y variables de control

5.1.2. Suelo saturado

En este caso el mapa de tensiones corresponde al instante en el que se aplica la totalidad de la carga (peso propio), la cual para el ejemplo ejecutado fue de 1 día.

La superficie de falla crítica se grafica en la Fig. 5 y la evolución del factor de seguridad a lo largo de la ejecución del programa en la Fig. 6.

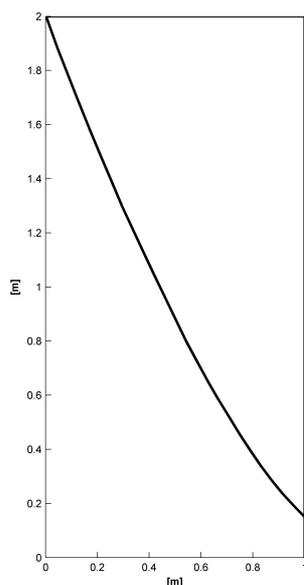


Figura 5: Superficie de deslizamiento crítica para un talud vertical de suelo saturado

5.2. Ejemplo 2: Talud inclinado

El segundo ejemplo consiste en un talud inclinado (Ver Fig. 7), en el cual se analizó la situación correspondiente a suelo seco, con características mecánicas similares al Ejemplo 5.1.

La superficie de falla crítica correspondiente se grafica en la Fig. 8 y la evolución del factor de seguridad a lo largo de la ejecución del programa en la Fig. 9.

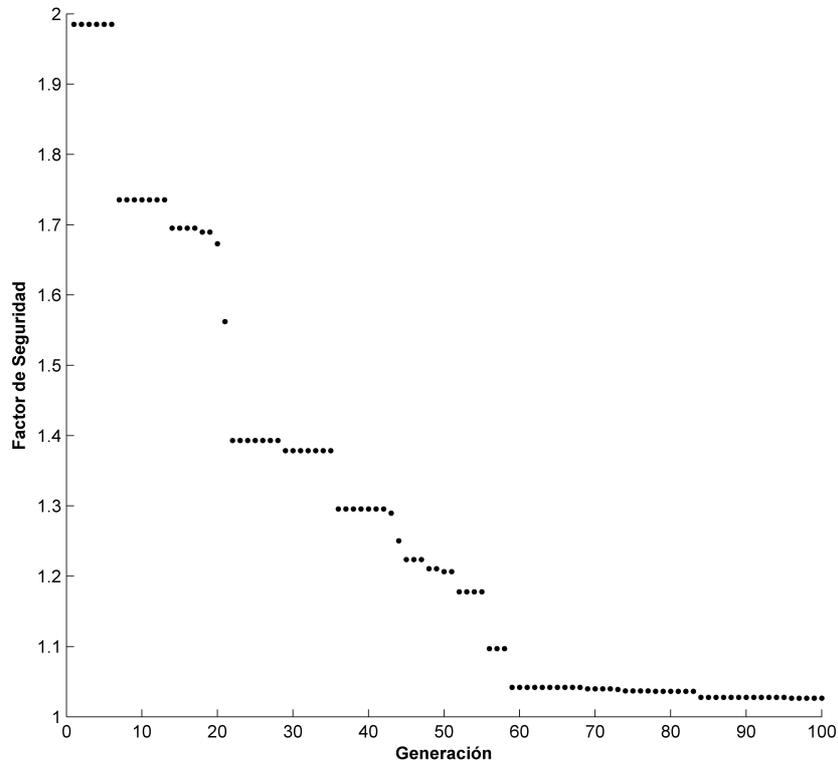


Figura 6: Evolución del factor de seguridad para un talud vertical de suelo saturado a lo largo de la ejecución

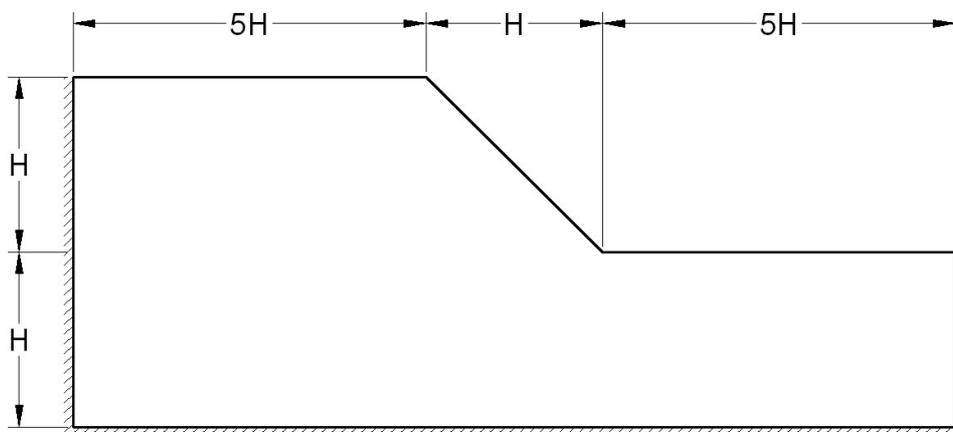


Figura 7: Geometría de la masa de suelo con talud inclinado

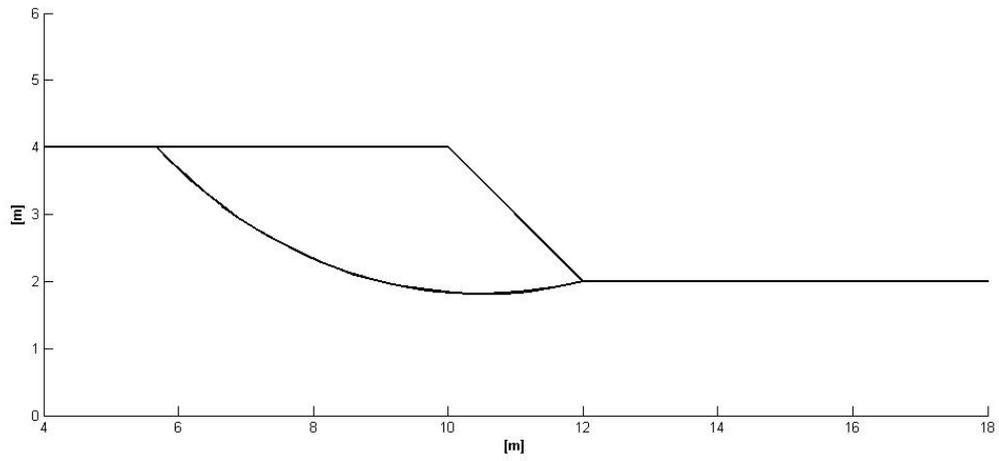


Figura 8: Superficie de deslizamiento crítica para talud inclinado de una masa de suelo seco

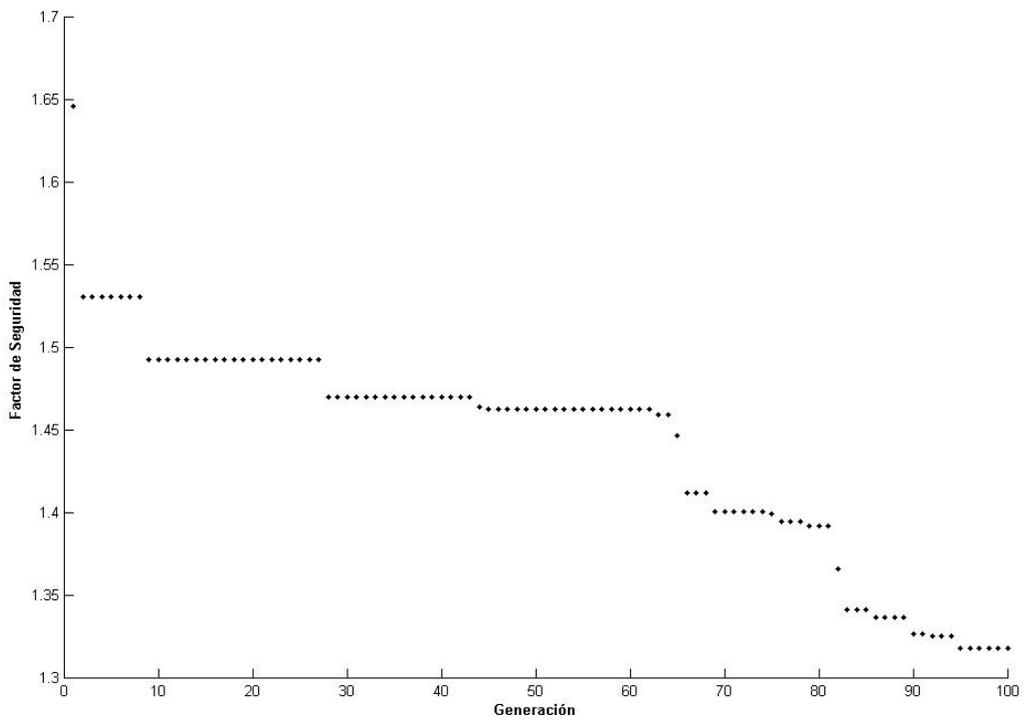


Figura 9: Evolución del valor del factor de seguridad para suelo seco a lo largo de la ejecución

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado un método evolutivo en base a algoritmos genéticos para la optimización de la superficie de deslizamiento de una masa de suelo. Para tal fin se implementó una técnica de cruzamiento mixta que disminuye, en parte, el riesgo de que la solución obtenida corresponda a un mínimo local.

Además, los individuos generados en cada población poseen curvatura monotónica, sin puntos de inflexión, resolviendo de esta manera uno de los inconvenientes más usuales en este tipo de problemas.

Finalmente se presentaron los resultados obtenidos, planteando con este trabajo la metodología a seguir para avanzar en la resolución del problema de estabilidad en taludes utilizando el método de los elementos finitos, verificando su funcionamiento para diferentes condiciones de humedad del suelo.

REFERENCIAS

- Belegundu A. y Chandrupatla T. *Optimization Concepts and Applications in Engineering*. Prentice Hall, 1999.
- Beneyto P., Di Rado H., Mroginski J., y Awruch A. A model for the analysis of consolidation in unsaturated soils based in state combinations (in spanish). *Mecánica Computacional*, 24:515–527, 2005.
- Bishop A. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5:7–17, 1955.
- Di Rado H., Awruch A., y Beneyto P. Consolidation in saturated porous media. implementation and numerical problems. *Computational Mechanics. New Trends and Applications. IACM. Buenos Aires. Argentina.*, 2:1066–1084, 1998.
- Fellenius W. Calculation of the stability of earth dams. *Proceedings of the Second Congress on Large Dams*, 4:445–463, 1936.
- Fredlund D. y Krahn J. Comparison of slope stability method of analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(3):429–439, 1977.
- Fredlund D. y Scoular R. Using limit equilibrium concepts in finite elemen slope stability analysis. *International Symposium on Slope Stability Engineering*, páginas 31–47, 1999.
- Goldberg D. *Genetic Algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley, 1989.
- Innocente M.S. *Development and testing of a Particle Swarm Optimizer to handle hard unconstrained and constrained problems*. Phd thesis, civil and computational engineering centre, College of Engineering, Swansea University, Swansea, United Kingdom, 2010.
- Janbu R., Bjerrum L., y Kjaernsli B. Stabilitetsberegning for fyllinger skjaeringer og naturlige skraninger. *Norwegian Geotechnical Publication No. 16*, 1956.
- Kahatadeniya K., Nanakorn P., y Neaupane K. Determination of the critical failure surface for slope stability analysis using ant colony optimization. 108:133–141, 2009.
- Kim J., Salgado R., y Yu H. Limit analysis of soil slopes subjected to pore-water pressures. *J. Geotech. Geoenv. Engrg. ASCE*, 125:49–58, 1999.
- Kulhaway F. Finite element analysis of the behavior of embankments. *Ph.D.Thesis-Univ. of California*, 1, 1969.
- Morgenstern N.R. y Price V.E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15:70–93, 1965.
- Mroginski J., Di Rado H.A., Beneyto P., y Awruch A. Pollutant transport modelling in partially

- saturated deformable porous media. *Mecánica Computacional*, páginas 3614–3631, 2007.
- Mroginski J., Gutierrez G., Beneyto P., y Di Rado H.A. Optimización topológica de sistemas estructurales bidimensionales discretos mediante algoritmos genéticos. *Mecánica Computacional*, páginas 2657–2674, 2009.
- Spencer E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17:11–26, 1967.
- Taylor D. Stability of earth slopes. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 24(3):197–247, 1937.
- Zhang Y., Sakamoto M., y Furutani H. Effects of population size and mutation rate on results of genetic algorithm. In *Proceedings - 4th International Conference on Natural Computation, ICNC*, páginas 70–75. 2008.
- Zolfaghari A., Heath A., y McCombie P. Simple genetic algorithm search for critical non circular failure surface in slope stability analysis. *Computers and Geotechnics*, 32:139,152, 2005.