

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE LADERAS MEDIANTE MACRO-ELEMENTOS A ESCALA REGIONAL

J. SÁNCHEZ FORNIA (1), J. VAUNAT (2)

(1) Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)

Universidad Politècnica de Catalunya (UPC)

jatnna.alexandra.sanchez@upc.edu

(2) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSCCP)

Universidad Politècnica de Catalunya (UPC) – Centro Internacional de Métodos

Numéricos en Ingeniería (CIMNE)

jean.vaunat@upc.edu

RESUMEN

La modelación numérica de la respuesta de laderas naturales bajo acciones climáticas a escala regional requiere una capacidad de cálculo actualmente fuera de alcance. Una alternativa consiste en usar modelos reducidos, entre ellos los llamados “macro-elementos”, propuestos inicialmente por Nova & Montrasio (1991) para evaluar asientos en cimentaciones. En este artículo, se presenta un modelo preliminar de macro-elemento que permite evaluar la estabilidad de taludes reduciendo la ladera a un punto sometido a un esquema de fuerzas actuantes y resistentes, considerando una ley constitutiva basada en la teoría de la plasticidad asociada con endurecimiento. El modelo se valida mediante comparación con cálculos elementos finitos (FEM). Los resultados obtenidos abren la posibilidad de considerar este tipo de modelo para analizar a bajo coste zonas a roturas en áreas amplias.

Nova, R. & Montrasio, L. 1991. Settlements of shallow foundations on sand. Géotechnique, vol. 41, No 2, pp. 243–256.

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de laderas representan el tercer riesgo natural más importante en el mundo, después de los sismos e inundaciones. Significan pérdidas en vidas humanas y económicas de gran trascendencia para las sociedades de muchos países. La reducción de ese riesgo requiere diversas actuaciones: adaptación de las estructuras e infraestructuras amenazadas para limitar las consecuencias del desastre, sistemas de prevención temprana para evacuar las zonas en peligro, reforzamiento de las laderas para reducir la probabilidad de ocurrencia de las roturas, medidas de contención de los factores desencadenantes (infiltración, caídas de bloques, etc.), entre otras. En todos los casos, la efectividad de estas medidas se ve reforzada cuando su diseño se basa en un conocimiento previo de las características de la amenaza frente a los factores desencadenantes en el contexto del entorno climático, geológico, hidrogeológico y geotécnico existente (mecanismo interno de evolución de la ladera hacia la rotura, área afectada por la rotura inicial, volumen y velocidad de la masa que desliza, alcance del movimiento, ...).

A escala de un talud, el estudio de la evolución de la ladera hacia la rotura, las condiciones de rotura y el posterior movimiento involucra actualmente el uso de herramientas sofisticados (MEF, MPM, SPH, ...) capaz de considerar aspectos tales con la geometría tridimensional, el

mecanismo de rotura progresiva, el efecto de las variables atmosféricas y ambientales o los grandes desplazamientos pos-rotura. Si bien se puede considerar que estas herramientas proporcionan en este momento métodos de cuantificación precisos a la escala mencionada, implican realizar cálculos con costes computacionales altos, incompatibles con el uso de estas mismas herramientas a una escala mayor, sea cuenca o región.

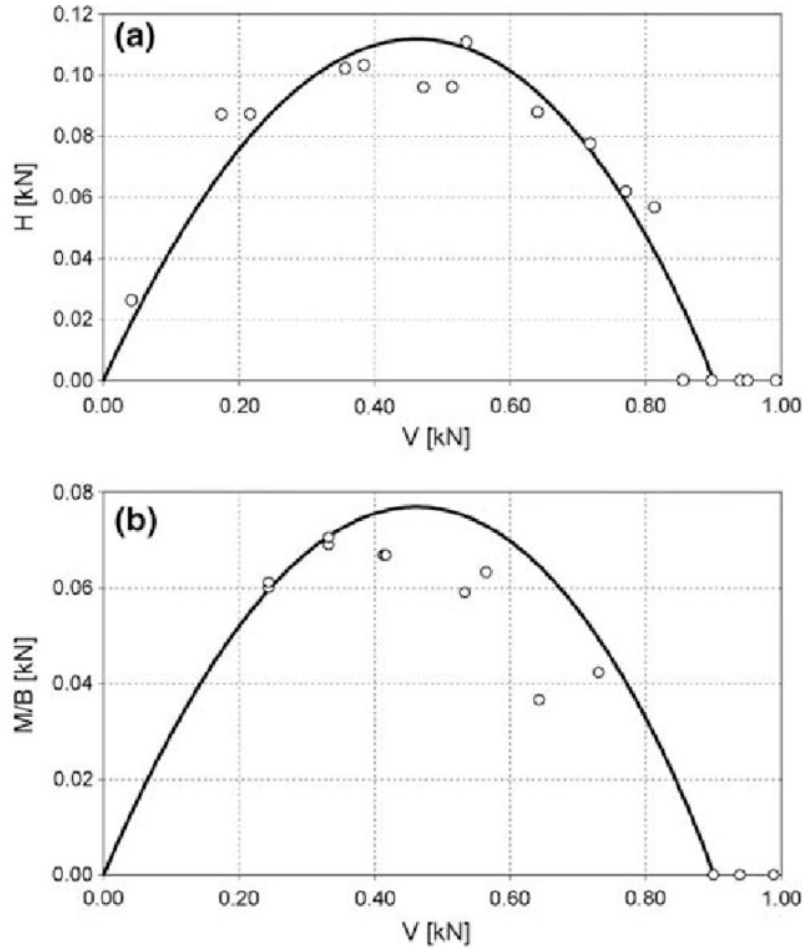
En consecuencia, la evaluación de las posibles amenazas y sus características a la escala de una cuenca o de una región se sigue basando esencialmente en métodos de búsqueda de combinaciones de factores (tipo de suelo, inclinación del talud, uso del terreno, ...) con diversos grados de sofisticación (ponderación heurística, estadística, redes neurales, machine learning,...). Una problemática recurrente a este tipo de método reside en la estimación del contorno de zona a rotura a partir del mapa pixelada de la combinación de factor.

En este artículo, se propone un método para proporcionar un puente entre la evaluación de las características de la amenaza a la escala de un talud, tratada mediante la resolución de un problema de contorno, y la evaluación regional. Se basa en la definición de un modelo mecánico reducido, donde el talud se considera con un punto sometido a un esquema de fuerzas. Este método adapta técnicas existentes enmarcados en la teoría de los macroelementos, propuesta por Nova & Montrasio (1991) para estimar los desplazamientos de una cimentación sometido a un esquema de fuerzas y momentos, y posteriormente aplicada a varias problemáticas: interacción suelo-estructura bajo sollicitación sísmica (Mylonakis & Gazetas, 2000; Grange et al. 2009), respuesta 3D cíclica de cimentaciones superficiales (Salciarini & Tamagnini, 2009), comportamiento de pilotes en arena (Li et al., 2014), comportamiento de cimentaciones tipo cajón (Jin et al., 2019).

El método del macroelemento para taludes presentado en este artículo, tiene como objetivo de estimar la estabilidad del talud, la superficie afectada y el volumen potencialmente a rotura, Se describe el método, las ecuaciones y se muestra primeros ejercicios de validación mediante comparación con cálculos elementos finitos (FEM).

2. METODOS BASADO EN MACRO-ELEMENTOS

El concepto de macro elemento ha sido utilizado en diversas ramas de la ingeniería, donde ofrece un enfoque basado en la descomposición de dominios para modelizar de forma eficiente efectos locales en problemas grandes (Snack et al., 1998). En geotécnica, esa técnica se desarrolló por primera vez como una herramienta cómoda para la predicción rápida y concisa de la respuesta de fundaciones poco profundas (Nova & Montrasio, 1991). Consiste en considerar la cimentación como un punto sometido a un esquema de fuerza horizontal H , vertical V y a un momento M cuya aplicación por encima de un cierto umbral provoca un desplazamiento horizontal u , un desplazamiento vertical v y una rotación θ . El problema se formaliza como un problema plástico en el espacio de las fuerzas generalizadas (H, V, M) y de los desplazamientos generalizados (u, v, θ) . La figura 1 muestra la proyección en los diagramas $V-H$ y $V-M$ de la envolvente plástica considerada por Nova & Montrasio (1991). Esta envolvente define el sitio de inicio de desplazamientos generalizados (u, v, θ) bajo esquemas de carga (H, V, M) .



(adaptado de Nova y Montrasio, 1991)

Figura 2 Envolvente plástica en el diagrama: a) V (fuerza vertical) - H (fuerza horizontal) y b) V - M (momento normalizado).

La forma de la envolvente plástica se definió con base en criterios existentes de fallo de cimentación bajo carga inclinada e excéntrica:

$$F(H, V, M, V_c) = H^2 + M^2 - \alpha V^2 (1 - V/V_c)^{2\beta} = 0 \quad (1)$$

dónde α y β son dos parámetros característicos de la cimentación y V_c es la fuerza vertical máxima aplicada durante la historia de la cimentación. El desplazamiento horizontal, vertical y la rotación se expresan considerando una ley de flujo asociada:

$$\begin{aligned} u &= \partial F / \partial H \, d\lambda \\ v &= \partial F / \partial V \, d\lambda \\ \theta &= \partial F / \partial M \, d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

dónde λ es el multiplicador plástico, medida de la magnitud de los desplazamientos generalizados. El modelo se completa finalmente por la ley de endurecimiento que asocia la magnitud del desplazamiento generalizado a la fuerza máxima histórica V_c :

$$V_c = 1 - \exp(-\sqrt{Au^2 + Bv^2 + C\theta^2}) \quad (3)$$

Los desplazamientos se calculan siguiendo el formato clásico de la plasticidad. Una vez verificado que el esquema de fuerza se encuentra en la envolvente plástica, se calcula el incremento de multiplicador plástico usando la condición de consistencia $dF = 0$. A partir de $d\lambda$, se calculan los incrementos de desplazamiento horizontal, vertical y el incremento de rotación y se actualiza el sistema. La no linealidad se suele resolver mediante un esquema de Newton Raphson.

Este esquema pionero fue enriquecido en trabajos posteriores mediante la consideración de una ley elástica en el interior de la envolvente plástica, la generalización del procedimiento al caso 3D (Cremer et al., 2001, 2002; Grange et al., 2009; Li et al, 2014) y la consideración de leyes hipoplásticas por modelizar efectos cíclicos (Salciarini & Tamagnini, 2009). En todos estos trabajos, la ecuación de la envolvente plástica se definió, o con base en resultados experimentales, particularmente en centrifuga, o mediante derivación analítica usando análisis límite.

La aplicación de este concepto al caso de un deslizamiento tiene una problemática añadida: el peso de la masa a rotura, que depende del mecanismo de rotura, debe entrar como fuerza destabilizadora. Se presenta a continuación una formulación que toma en cuenta esta característica para el caso de un deslizamiento planar en un material regida por la ley de fricción de Mohr-Coulomb.

3. FORMULATION DE UN MACROELEMENTO EN EL CASO DE UNA ROTURA PLANAR

Con fines de ilustración, se considera el caso sencillo de un mecanismo de rotura planar ocurriendo en un talud caracterizado por dos pendientes β_1 y β_2 (Figura 2). ψ corresponde al ángulo de la base de la cuña a rotura.

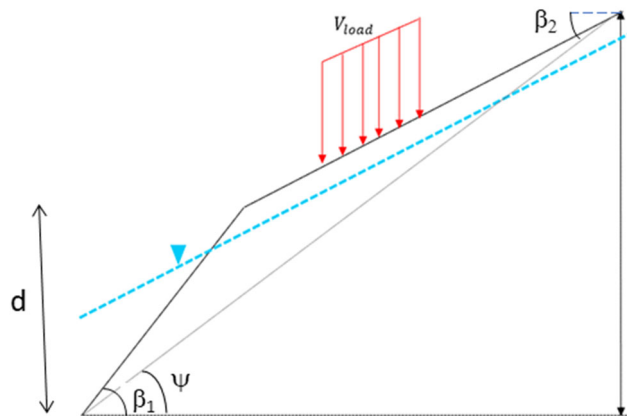


Figure 2 Geometria del talud y esquema de rotura considerado para el macro-elemento.

En este caso, la fuerzas y los desplazamientos generalizados se limitan a sus componentes horizontales y verticales:

$$\{Q\} \equiv \begin{pmatrix} H \\ V \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\{q\} \equiv \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

En caso de un material sin cohesión, el criterio de rotura a lo largo del plano AC se escribe:

$$T = N \tan \phi \quad (5)$$

dónde T y N son respectivamente las fuerza tangente y normal al plano. Ecuación (5) se puede expresar en función de las fuerzas horizontales y verticales:

$$H = V \tan(\psi - \phi) = V \frac{\tan \psi - \tan \phi}{1 + \tan \psi \tan \phi} \quad (5)$$

dónde H y V incluyen las componentes del peso de la cuña, de las fuerzas aplicadas sobre el talud y de la presión de agua. Existe además una relación entre $\tan \psi$ y el peso de la cuña V_c :

$$\tan \psi = \frac{a_1 V_c + b_1}{V_c + b_2} \quad (6)$$

a_1 , b_1 y b_2 son coeficientes que dependen de los ángulos β_1 , β_2 y del peso volumétrico del material. Introduciendo (6) en (5) resulta en la siguiente expresión para la envolvente plástica.

$$F(H, V, V_k) = H - V \left[\frac{V_c A_1 + B_1}{V_c A_2 + B_2} \right] = 0 \quad (7)$$

dónde A_1 , A_2 , B_1 y B_2 son coeficientes de forma del talud que incluyen además el peso volumétrico del material. V_k es la variable de historia del modelo y representa el peso de la cuña a rotura. La Figura 3 muestra la forma resultante de la envolvente plástica para el caso de un material de fricción 30° y peso específico 16.8 kN/m^3 . H representa la fuerza necesaria para la contención del talud.

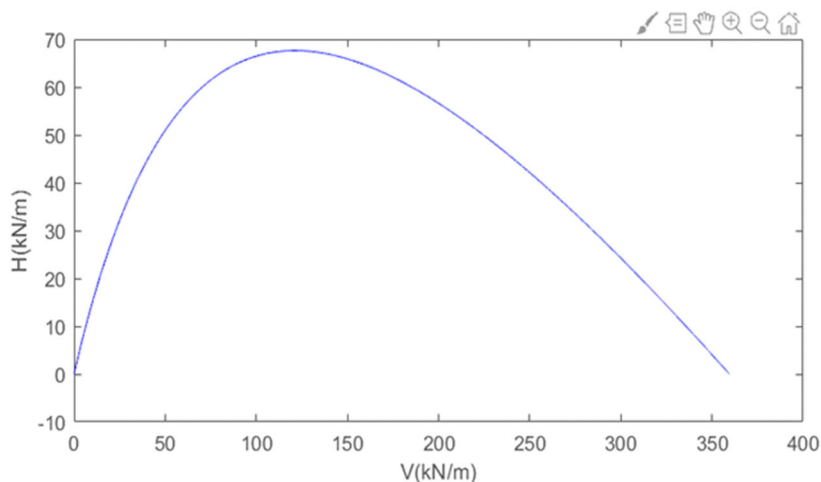


Figure 3 Envolvente plástica del macro-elemento para un material no cohesivo, con fricción de 30° y peso específico de 16.8 kN/m^3 .

La ley de flujo proporciona los desplazamientos y se considera asociada.

$$du = \frac{\partial F}{\partial H} d\lambda$$

$$dv = \frac{\partial F}{\partial V} d\lambda \quad (8)$$

El modelo se completa con la ley de endurecimiento:

$$dV_k = \chi dv \quad (9)$$

La formulación se extiende fácilmente al caso de un material con cohesión y un talud con presiones de agua:

$$f(Q, V_k) \equiv (H_{ad} + H_c + H_{wp}) - (V_k + V_{ad} + V_c + V_{wp}) \left[\frac{V_k A_1 + B_1}{V_k A_2 + B_2} \right] = 0 \quad (10)$$

H_c, H_{wp}, V_c, V_{wp} son las componentes horizontales y verticales de la cohesión y presión de agua.

El modelo desarrollado se puede usar en un procedimiento de análisis plástica incremental, calculando desplazamientos resultando de la aplicación de fuerzas o *vice-versa*. En este caso los resultados se ven controlados por ley de endurecimiento (9).

El modelo puede también usarse en un procedimiento de análisis límite, aplicando incrementos de desplazamiento horizontal hasta tener estabilización de la fuerza horizontal. En este caso, el resultado final es independiente de la ley de endurecimiento que controla únicamente la velocidad de convergencia al estado estacionario. Es este procedimiento que se considera para definir las zonas potenciales a rotura en una ladera y que se ilustra en la sección siguiente.

El procedimiento de análisis límite consiste en usar la ley de flujo (8) para calcular $d\lambda$ y dv a partir de du y la ley de endurecimiento para calcular el incremento asociado del peso de cuña dV_c (que corresponde también a una rotación del ángulo ψ). El cálculo se para cuando $dv = 0$, sea en el vértice superior de la envolvente plástica. De esta forma, se ha encontrado el mecanismo de rotura que maximiza la disipación. El procedimiento se ha verificado con la solución de Coulomb.

4. CASO ILUSTRATIVO

Para ilustrar el método propuesto se ha seleccionado una ladera tipo cuya geometría se muestra en la Figura 4. El cálculo se realiza en un proceso iterativo, en la búsqueda de cuñas a rotura ($H = 0$) saliendo de los distintos quiebres de la geometría. La cuña puede ser simple (cuña 1) o múltiple (cuña 2). En este último caso, el peso de la cuña cumula el peso de las cuñas simples que la componen.

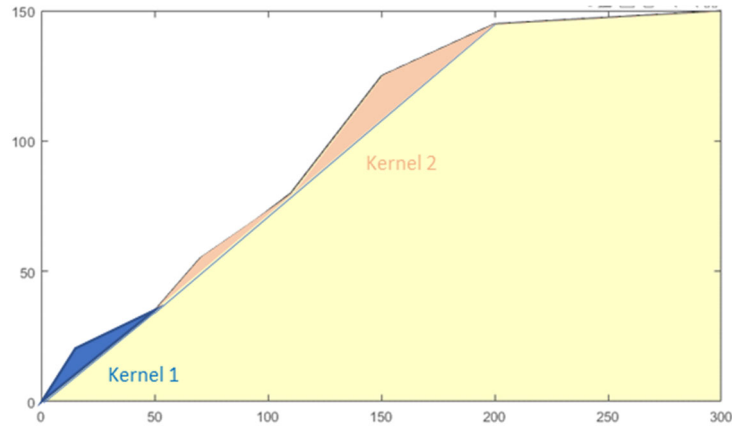


Figure 1 Geometría de la ladera considerada para ilustrar el método.

E (kPa)	C (kPa)	ψ (°)	ϕ (°)	ν (-)	γ_{soil} (kN/m ³)	$\gamma_{sat-soil}$ (kN/m ³)
15,500	3.50	38	38	0.30	20.0	21.0

Tabla 1 Parametros del material

Los parámetros del material se indican en la Tabla 1. Los resultados obtenidos con el macroelemento se comparan con un análisis por Elementos Finitos usando parámetros elásticos rígidos.

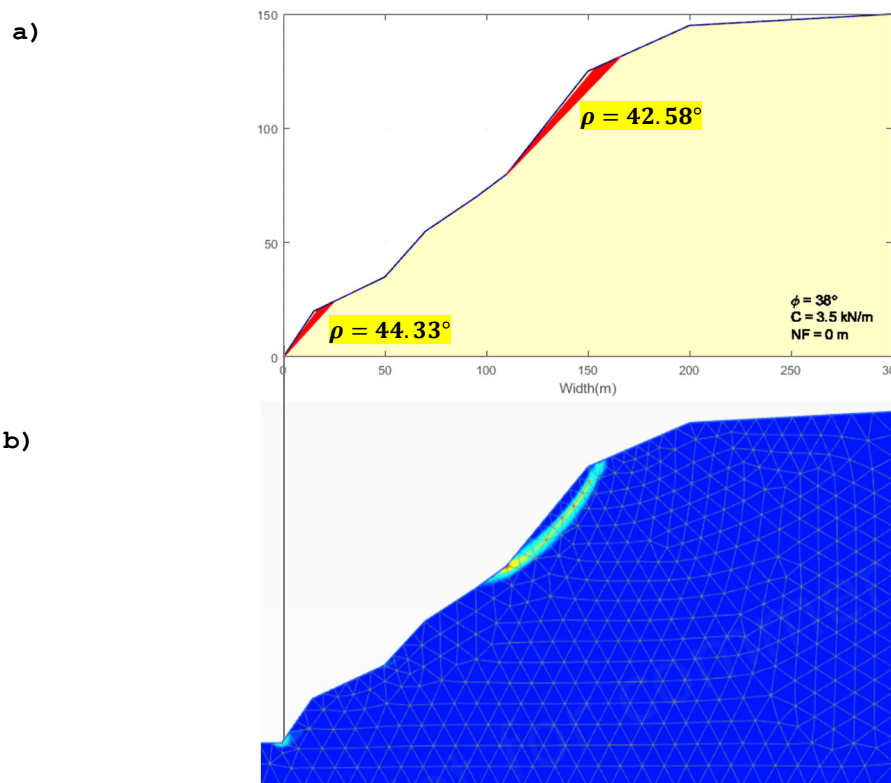


Figure 2 Superficies de deslizamientos críticas obtenidas en el caso de suelo cohesivo -friccionante con nivel freatico en el pie de la ladera: a) macroelemento, b) FEM

En el primer caso, con el nivel freatico en el pie del talud, las superficies de rotura obtenidas mediante ambos métodos identifican varias zonas de falla en la ladera. En la evaluación de

estabilidad de taludes mediante MEM los planos potenciales de deslizamiento se encuentran a diferentes ángulos de aproximadamente 44.33° y 42.5° respecto a la horizontal en diferentes zonas de la ladera de estudio (en el pie y próxima al escarpe superior). El área de masa de suelo a rotura es de aproximadamente $1,322.8 \text{ m}^2$ y $4,603.9 \text{ m}^2$ respectivamente de masa de suelo susceptible a deslizarse. En el análisis mediante FEM se identifica una zona a rotura en la zona alta de la ladera que concuerda razonablemente con la obtenida con el macro elemento. En la base del talud, el análisis Elementos Finitos muestra una zona plástica incipiente.

En una segunda etapa, se evaluaron las zonas a rotura para distintas profundidades del nivel freático, considerado paralelo a la superficie del talud. Las zonas a rotura no se ven visiblemente afectadas cuando el nivel freático se encuentra a 3 m, 2m o 1m. Con un nivel de agua en superficie, aparece una nueva zona a rotura, situada en la parte intermedia del talud.

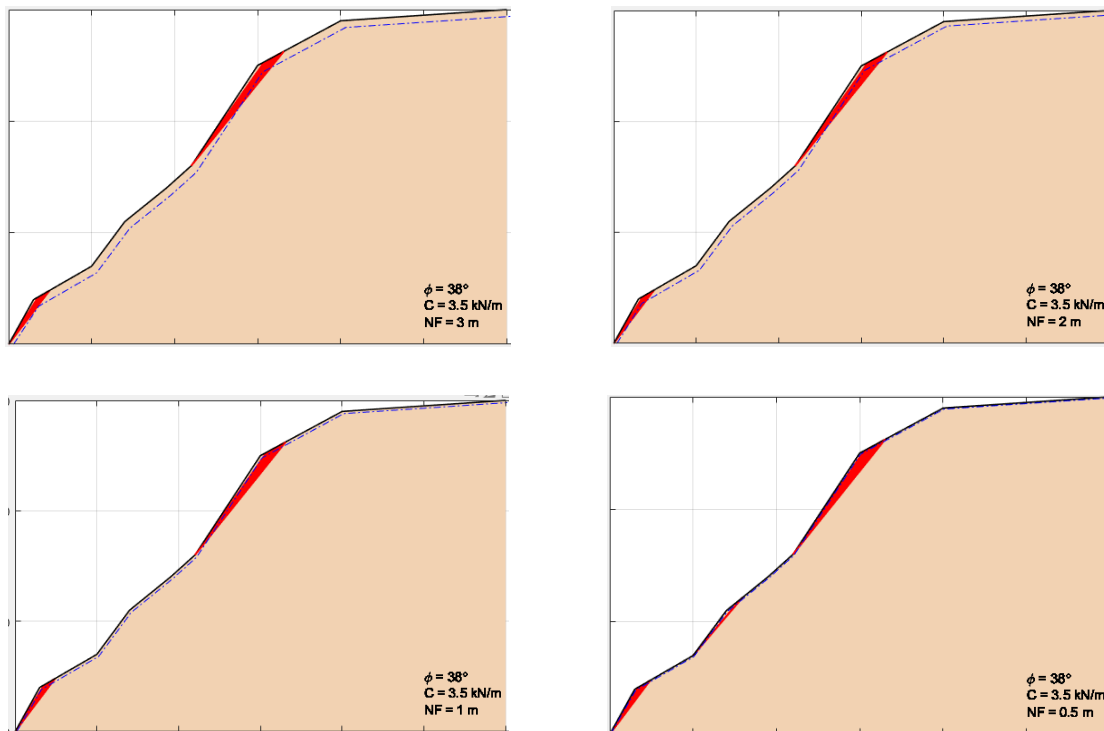


Figure 6 Zonas a roturas obtenidas para distintos niveles freáticos.

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha presentado un modelo reducido basado en el concepto de macroelemento para analizar zonas potenciales de rotura a una escala que supera la capacidad computacional de los análisis numéricos basados en problemas de contorno.

El modelo se basa en una envolvente plástica expresada en términos de fuerzas que se define a partir del criterio a rotura por corte de Mohr -Coulomb y que hace intervenir el peso de la cuña a rotura como variable de historia. El modelo se ha aplicado al caso de roturas planas bidimensionales en laderas cuya geometría se define por segmentos y con nivel de agua variable. Los resultados se comparan favorablemente con los obtenidos por un cálculo Elementos Finitos. Estos resultados preliminares permiten considerar futuros desarrollos orientados a la inclusión de superficie de rotura no planar, del momento y rotación en las variables de control y de modelos tridimensionales.

REFERENCIAS

- Cremer, C., Pecker, A., and Davenne L. 2001. Cyclic macro-element for soil structure interaction - Material and geometrical non linearities. *Num. Methods in Geomech.*, 25:1257-1284.
- Cremer, C., Pecker, A., and Davenne, L. (2002). Modelling of nonlinear dynamic behavior of a shallow strip foundation with macro-element. *Journal of Earthquake Engineering*, 06:175–211.
- Grange S., Kotronis P. and Mazars J. 2009. A macro-element to simulate 3D soil-structure interaction considering plasticity and uplift. *International Journal of Solids and Structures*, 46(20):3651-3663.
- Jin Z., Yin Z-Y, Kotronis P., Li Z. and Tamagnini C. 2019 A hypoplastic macroelement model for a caisson foundation in sand under monotonic and cyclic loadings. *Marine Structures*, 66, 2019, 16-26.
- Li Z., Kotronis P. & Escoffier S. 2014. Numerical study of the 3D failure envelope of a single pile in sand. *Computers and Geotechnics*, 62:11–26.
- Mylonakis G. and Gazetas G. 2000. Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?, *Journal of Earthquake Engineering*, 4(3):277-301.
- Nova, R. and Montrasio, L. (1991). A complete three-dimensional failure envelope for shallow footings on sand. *Géotechnique*, 41:243–256.
- Salciarini D and Tamagnini, C. 2009. A hypoplastic macroelement model for shallow foundations under monotonic and cyclic loads. *Acta Geotechnica*, 4:163-176.
- Snack, E, Srikai, Sz. and Türke, K. 1998. Local effects in engineering with macro-elements. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 157: 299.

- Cremer, C., Pecker, A., and Davenne L. 2001. Cyclic macro-element for soil structure interaction - Material and geometrical non linearities. *Num. Methods in Geomech.*, 25:1257-1284.
- Cremer, C., Pecker, A., and Davenne, L. (2002). Modelling of nonlinear dynamic behavior of a shallow strip foundation with macro-element. *Journal of Earthquake Engineering*, 06:175–211.
- Grange S., Kotronis P. and Mazars J. 2009. A macro-element to simulate 3D soil-structure interaction considering plasticity and uplift. *International Journal of Solids and Structures*, 46(20):3651-3663.
- Jin Z., Yin Z-Y, Kotronis P., Li Z. and Tamagnini C. 2019 A hypoplastic macroelement model for a caisson foundation in sand under monotonic and cyclic loadings. *Marine Structures*, 66, 2019, 16-26.
- Li Z., Kotronis P. & Escoffier S. 2014. Numerical study of the 3D failure envelope of a single pile in sand. *Computers and Geotechnics*, 62:11–26.
- Mylonakis G. and Gazetas G. 2000. Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?, *Journal of Earthquake Engineering*, 4(3):277-301.
- Nova, R. and Montrasio, L. (1991). A complete three-dimensional failure envelope for shallow footings on sand. *Géotechnique*, 41:243–256.
- Salciarini D and Tamagnini, C. 2009. A hypoplastic macroelement model for shallow foundations under monotonic and cyclic loads. *Acta Geotechnica*, 4:163-176.
- Snack, E, Srikai, Sz. and Türke, K. 1998. Local effects in engineering with macro-elements. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 157: 299-309