

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE DESLIZAMIENTOS TIPO FLUJO INDUCIDOS POR LICUEFACCIÓN

Gaia Di Carluccio^(1,2) y Núria Pinyol^(1,2)

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería civil y Ambiental
Universitat Politècnica de Catalunya

⁽²⁾ Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)

gaia.di.carluccio@upc.edu
nuria.pinyol@upc.edu

RESUMEN

Los deslizamientos de tierras tipo flujo se caracterizan por recorrer grandes distancias y alcanzar grandes velocidades. La simulación numérica de este tipo de problemas que involucran la dinámica de suelo saturado y no saturado, licuefacción y grandes deformaciones es, en la actualidad, un desafío. En este trabajo se presenta un análisis numérico para simular deslizamientos de tipo flujo inducidos por licuefacción estática durante el movimiento. Para ello se elige el método del punto material (MPM) que permite simular problemas de grandes deformaciones y desplazamientos sin las limitaciones del método de los elementos finitos estándar extensamente utilizado en la práctica. La licuefacción se modela mediante un modelo constitutivo avanzado capaz de simular este proceso bajo cargas estáticas y dinámicas implementado en un código MPM. Los desarrollos llevados a cabo se aplican a la simulación de un deslizamiento ocurrido en Catalunya. La comparación de los resultados bajo otras hipótesis confirma la necesidad de adoptar un modelo constitutivo capaz de simular la pérdida de resistencia del material durante el movimiento hasta valores significativamente bajos, típicamente asociados a procesos de licuefacción, para poder explicar el alcance del deslizamiento observado.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los fenómenos causantes de los deslizamientos de tierras de tipo flujo es la generación de presión intersticial durante la etapa posterior a la rotura y la consecuente reducción de la resistencia. Este comportamiento se observa comúnmente en el caso de suelos saturados y no saturados relativamente poco densos que presentan un comportamiento contractante. Otros factores como la geometría del deslizamiento o el estado de saturación inicial también determinan el movimiento del volumen de masa inestable.

La dificultad en simular este tipo de problemas recae en diferentes cuestiones: las limitaciones de los métodos numéricos y modelos constitutivos para modelar procesos dinámicos con grandes deformaciones y desplazamientos; las complejas y variables características cinemáticas durante la fase de rotura y de propagación de la masa movilizada que exhibe un comportamiento de transición entre sólido y fluido; y la identificación de las causas desencadenantes. Entre los métodos numéricos disponibles en literatura, el método del punto material (MPM) (Sulsky *et al.*

1994, 1995) presenta ventajas en la modelación de este tipo de problemas porque permite simular grandes desplazamientos y deformaciones y permite, de manera relativamente sencilla, considerar modelos constitutivos de suelo dependientes de variables de historia.

El objetivo de este trabajo es simular el proceso dinámico de deslizamientos de tipo flujo inducidos por licuefacción estática desde el desencadenamiento de la rotura, su evolución y hasta su deposición final. Para ello, se utiliza el MPM y en concreto el programa Anura3D (www.anura3d.com). Se trata de un código libre programado en FORTRAN y desarrollado por la “MPM Research Community”, comunidad constituida por universidades y centros de investigación internacionales. La comunidad trabaja con el objetivo común de avanzar el estado del arte de la modelación numérica de problemas de grandes deformaciones e de la interacción entre suelo-agua-estructura en el marco del MPM. El código fuente se pone a disposición a través de la plataforma GitHub (https://github.com/Anura3D/Anura3D_OpenSource) y puede ser distribuido y/o modificado bajo la GNU Lesser General Public License. Para realizar una simulación numérica con Anura3D se requiere la creación de datos de entrada que pueden ser generados con el programa de pre- y post-procesamiento GiD (<https://www.gidhome.com/>). Para ello, además del código fuente, se distribuye los archivos requeridos para el uso específico de GiD en Anura3D. Una vez ejecutado el cálculo, los resultados se pueden visualizar con el programa de código libre ParaView (<https://www.paraview.org/>) o con el mismo GiD.

Con el fin de simular el proceso de licuefacción de la masa movilizada durante el deslizamiento existen diferentes tipos de modelos constitutivo. Se citan como ejemplo el modelo de plasticidad multi-superficie (Prevost, 1977, 1978), la plasticidad generalizada (Pastor *et al.*, 1990), el Nor-Sand (Jefferies, 1993); el UBCSAND (Beatty y Byrne, 1998) y el SANISAND (Taiebat y Dafalias, 2008). En concreto, se elige en este trabajo, el modelo Ta-Ger (Tasiopoulou y Gerolymos, 2016a, 2016b) capaz de reproducir el potencial de licuefacción de suelos en condiciones estáticas y dinámicas. Los aspectos más relevantes de este modelo se describen en §4.

Una vez implementado y validado el modelo Ta-Ger en Anura3D, se analiza el caso de un deslizamiento inspirado en un caso real ocurrido en Val d'Aran (Cataluña, España). A continuación, se describe el caso y, posteriormente, su modelización numérica en 2 dimensiones y en MPM. Con el objetivo de presentar un análisis comparativo y destacar la importancia del modelo constitutivo elegido, se modela el caso para dos modelos constitutivos distintos: Mohr-Coulomb con reblandecimiento y el modelo Ta-Ger. En el primer caso, se tiene en cuenta un ablandamiento del comportamiento del suelo con las deformaciones de corte. Sin embargo, no se incluye la pérdida de resistencia debido a la propagación de las presiones intersticiales por la tendencia del suelo a contraer, aspecto que se analiza en la segunda simulación con el modelo Ta-Ger.

2. DESCRIPCIÓN DEL DESLIZAMIENTO ESTUDIADO

Se trata de un deslizamiento de tierra tipo flujo que ocurrió el 11 de mayo de 2018 en Val d'Arán (Cataluña, España) después de un período de lluvias significativas (Figura 1a) (Perdices, 2019). El escarpe superior se encuentra a 1380 m.s.n.m., a 150 m de altura desde el lecho del río Valarties. El deslizamiento involucró un volumen estimado de 50.000 m³ de material glaciar y coluvial, lo que lo convierte en el mayor derrumbe de talud registrado en el sur de los Pirineos en las últimas décadas. No se produjeron daños importantes, pero un camino secundario se cubrió de sedimentos y fue afectado el suministro de agua de los pueblos río abajo.

Aunque se desconoce la evolución del nivel freático y de las presiones intersticiales previas a la rotura, una de las hipótesis que podría explicar su desencadenamiento es el aumento de presión intersticial en la parte superior de la ladera debido a la presencia de una fuente kárstica. Observaciones de campo sugieren que la superficie de rotura se desarrolló en el contacto con el sustrato rocoso como se muestra en la Figura 1b donde aparece su afloramiento. El material movilizado se transformó rápidamente en un movimiento similar al de un flujo e incorporó suelo adicional recorriendo unos

280 m hasta el fondo del valle y ascendiendo unos 80 m por la ladera opuesta (Institut Cartogràfic I Geològic De Catalunya, 2018). El potencial a la licuefacción del material involucrado en la rotura, puede explicar este mecanismo. Si el suelo exhibe un comportamiento contractante, la generación de un exceso de presión intersticial durante el movimiento se asocia a una disminución de la tensión efectiva, lo que afecta la velocidad y el comportamiento en la fase posterior a la rotura.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Vista frontal del deslizamiento (cortesía del Conselh Generau d'Aran); (b) afloramiento del sustrato rocoso (salida de campo del 03/11/2021.)

3. EL METODO DEL PUNTO MATERIAL

El MPM fue desarrollado para modelar la dinámica de fluidos por Harlow *et al.* (1964) y luego extendido a materiales dependientes de variables de historia por Sulsky *et al.* (1994) y Sulsky *et al.* (1995). El método discretiza el medio continuo en un conjunto de puntos materiales lagrangianos que pueden moverse con el material a través de una malla computacional que permanece fija durante el cálculo. Cada punto material representa una porción del dominio y lleva toda la información del material mientras que las ecuaciones de gobierno se resuelven en los nodos de la malla computacional

(Figura 2). Esta doble discretización permite simular grandes desplazamientos y deformaciones sin problemas debidos a la distorsión de la malla, como ocurre en los elementos finitos. Los cálculos realizados en este artículo se han llevado a cabo en el software de código libre Anura3D (www.anura3d.com).

En este trabajo, los suelos saturados y parcialmente saturados se discretizan mediante un único conjunto de puntos materiales y se utiliza la formulación presentada en Ceccato *et al.* (2021) (2 fases – 1 punto con efecto de la succión) que permite resolver problemas no saturados sin incluir explícitamente la fase gaseosa: se desprecia la ecuación de balance de masa del gas y se supone que la presión del gas permanece constante.

Los cálculos se realizan utilizando la integración mixta MPM (Zabala y Alonso, 2011; Al-Kafaji, 2013) para controlar las inestabilidades numéricas cuando los puntos materiales cruzan los límites de los elementos. El amortiguamiento artificial propuesto por Cundall (1987) se incluye en el cálculo para simular la disipación de energía natural debido a la fricción interna en el material durante el análisis dinámico y para acelerar la convergencia en etapas de cálculo cuasi estático. MPM puede sufrir de bloqueo cinemático que consiste en la acumulación de rigidez ficticia debido a la incapacidad de un elemento para deformarse correctamente cuando está restringido por elementos vecinos. En este trabajo, para limitar este problema se utiliza la Discretización Nodal Mixta propuesta por Detournay y Dzik (2006), que consiste en suavizar las deformaciones volumétricas sobre las celdas vecinas.

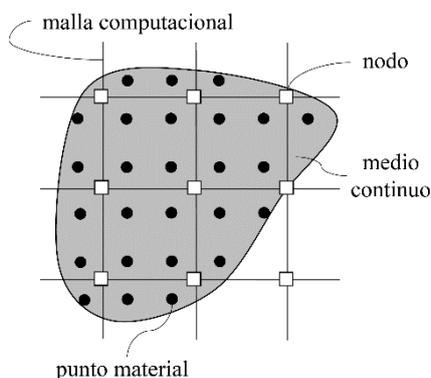


Figura 2. Esquema de discretización. Nodos de la malla computacional y puntos material.

4. MODELO CONSTITUTIVO TA-GER

El modelo constitutivo Ta-Ger fue desarrollado por Tasiopoulou y Gerolymos (2016a, b) con el objetivo de reproducir la licuefacción del suelo bajo carga estática y dinámica. El modelo se basa en la teoría del estado crítico y en una reformulación de la perfecta elastoplasticidad que atribuye características de endurecimiento/ablandamiento a sus capacidades. La calibración de los parámetros del modelo se puede realizar a partir de datos de ensayos de laboratorio convencionales drenados y no drenados según el procedimiento propuesto en Tasiopoulou y Gerolymos (2016b).

El Ta-Ger muestra ventajas en la implementación numérica ya que el número de parámetros se reduce al mínimo al incorporar el estado inicial del suelo a través del índice de dilatancia relativa I_r (Bolton 1986) que depende de la densidad relativa D_r , la presión de confinamiento p' y dos parámetros de ajuste Q y R :

$$I_r = D_r(Q - \ln(p')) - R \quad (1)$$

Este parámetro define el potencial de licuefacción del suelo ya que asume valores negativos o positivos según que el comportamiento sea contractante ($I_r < 0$) o dilatante ($I_r > 0$) y es igual a cero en condiciones de estado crítico.

El Ta-Ger se ha implementado en el software de código libre Anura3D como un modelo externo en el formato UMAT (Bienen *et al.*, 2014).

5. MODELO NUMÉRICO

La geometría del problema y la malla computacional se muestran en la Figura 3. La malla computacional se compone de elementos triangulares con tamaño mínimo de 2.5 m. En la configuración inicial se distribuyen tres puntos materiales en cada elemento en la posición de los puntos de Gauss. Se aplican condiciones de contorno para las fases sólida y líquida en los límites izquierdo y derecho para restringir los desplazamientos horizontales; en la parte superior del modelo para restringir los verticales y en la parte inferior donde no se permiten desplazamientos.

En el modelo se definen dos materiales: el lecho rocoso que se modela como elástico lineal ya que no está involucrado en la rotura y el material que forma el talud. En una primera simulación este material se describe con un modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb con reblandecimiento. En la segunda, se adopta el modelo Ta-Ger para incluir el potencial a la licuefacción del material y la pérdida de resistencia debido al aumento de la presión intersticial en la fase posterior a la rotura. En ambos casos, la conductividad hidráulica del suelo se asume igual a 10^{-3} m/s.

Las simulaciones numéricas empiezan de la condición crítica de estabilidad del talud. Esto se calcula mediante un análisis de equilibrio límite que proporciona la profundidad del nivel freático correspondiente a un factor de seguridad igual a 1. La distribución inicial de presiones intersticiales se supone hidrostática por debajo del nivel freático crítico y la succión por encima varía linealmente siguiendo el mismo gradiente hidrostático. La distribución de tensiones inicial resulta de un cálculo casi estático que parte de una distribución de tensiones de prueba calculada mediante un procedimiento K_0 . En esta etapa se aplica un coeficiente de amortiguamiento local de 0.75. En una segunda etapa de cálculo, se aplica un exceso de presión intersticial p_w en la parte superior del talud (Figura 3) para desencadenar la rotura y se reduce el coeficiente de amortiguamiento local a 0.05.

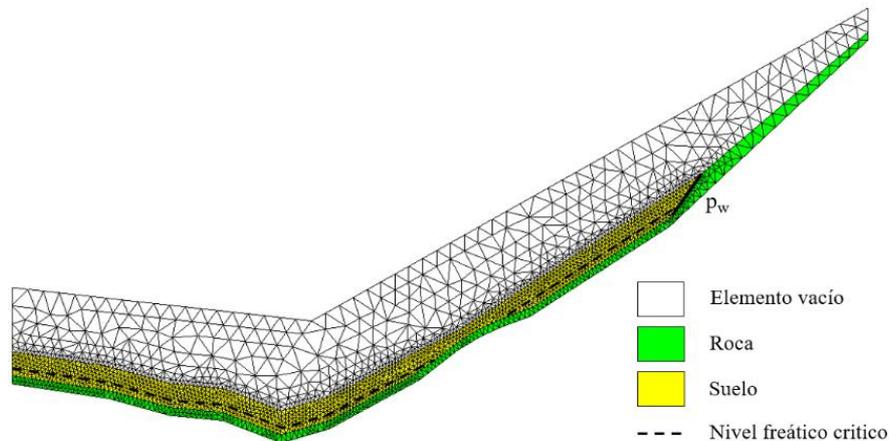


Figura 3. Malla computacional, materiales, nivel freático crítico y condición de contorno hidráulica aplicada para desencadenar la rotura (p_w).

6. RESULTADOS

Mohr-Coulomb con reblandecimiento

Como primera aproximación, se realiza una simulación MPM en la cual el suelo que forma el talud se describe con un modelo de Mohr-Coulomb con reblandecimiento por deformación. La idea es de comprobar, en ausencia de licuefacción, el efecto de una deformación que ablanda el comportamiento del suelo dando lugar a un fenómeno de rotura progresiva y a la aceleración de una masa crítica de suelo.

Los parámetros del modelo seleccionados se resumen en la Tabla 1. El ángulo de fricción residual de 34° procede de los datos de pruebas de corte anular y se considera un ángulo de fricción de pico de 37° , que podría aceptarse para el suelo intacto. El reblandecimiento se simula reduciendo los parámetros de resistencia efectivos con la deformación plástica equivalente acumulada. Siguiendo la hipótesis asumida anteriormente, se impone la posición del nivel freático para simular un estado de equilibrio límite antes de la etapa de desencadenamiento de la rotura. Para el ángulo de pico de 37° , el nivel freático crítico se encuentra a una profundidad de 10 m con respecto a la superficie del talud.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Porosidad inicial	n	-	0.45
Módulo de Young	E	kPa	10000
Coefficiente de Poisson	ν	-	0.15
Angulo de fricción de pico	ϕ'_{pico}	$^\circ$	37
Angulo de fricción residual	ϕ'_{res}	$^\circ$	34
Cohesión de pico	c'_{pico}	kPa	0
Cohesión residual	c'_{res}	kPa	0
Factor de forma	β	-	100

Tabla 1. Parámetros del modelo Mohr-Coulomb con reblandecimiento.

Los resultados (Figura 4) muestran que, al introducir el comportamiento de reblandecimiento del suelo, lo grandes desplazamiento y el mecanismo de flujo observados no se pueden reproducir con un modelo de Mohr-Coulomb. La masa inestable se desplaza moderadamente y permanece en la parte superior del talud.

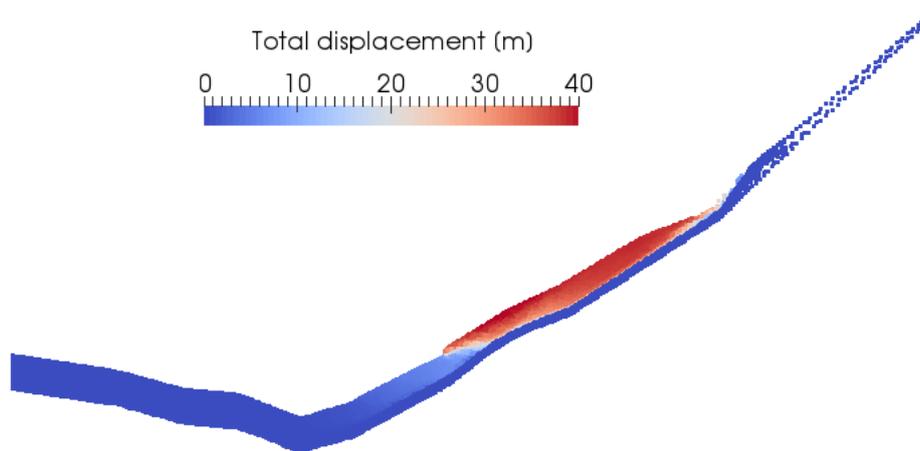


Figura 4. Desplazamientos totales calculados utilizando el modelo Mohr-Coulomb con reblandecimiento.

Ta-Ger

Para caracterizar el suelo movilizado con el modelo Ta-Ger, se simulan ensayos de compresión triaxial no drenados para muestras consolidadas isotrópicamente a diferentes tensiones de confinamiento p' (50, 100 and 250 kPa) y una densidad relativa muy baja $D_r = 0.05\%$ que corresponde a índices de dilatancia relativa inicial $I_{r0} < 0$. Los parámetros del modelo adoptados se resumen en la Tabla 2 y los resultados de las simulaciones se muestran en la Figura 5.

Los resultados muestran la ocurrencia de la licuefacción estática del suelo debido a su comportamiento contractante ($I_r < 0$) que en condiciones no drenadas se traduce en un incremento de las presiones intersticiales positivas y una disminución de las tensiones efectivas.

Símbolo	Unidad	Valor	Notas
D_{r0}	%	0.5	Densidad relativa inicial
Q	-	8.5	Parámetros de Bolton (1986).
R	-	1	
G_0	-	1500	Parámetro del módulo de corte
m	-	0.33	Exponente del módulo de corte
ν	-	0.15	Coefficiente de Poisson
ϕ_{cs}	°	34	Angulo de fricción de estado crítico
ϕ_{s0}	°	$\phi_{s0} = 1.1\phi_{cs} + 5I_{r0}$	Angulo de fricción inicial
c	-	$c = 6 + I_{r0}$	Coefficiente del modelo
n	-	$0.4D_{r0} + 0.14$	Exponente de endurecimiento

Tabla 2. Parámetros del modelo Ta-Ger adoptados en las simulaciones.

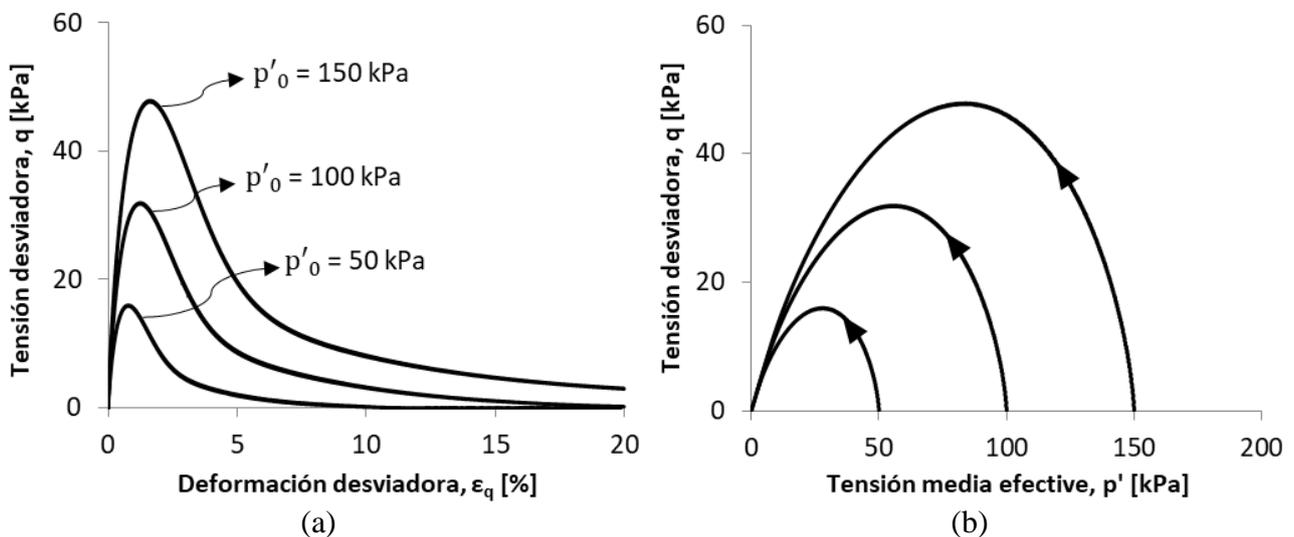


Figura 5. Simulaciones de ensayos de compresión triaxial saturados y no drenados a diferentes tensiones de confinamiento. a) Curva de tensión-deformación desviadoras; (b) trayectoria tensional en el plan triaxial $p' - q$.

Una vez caracterizado el material, se define la posición inicial del nivel freático correspondiente a la condición crítica de estabilidad del talud. El análisis de equilibrio límite se realiza para un ángulo de fricción de 34° y cohesión nula. La profundidad del nivel freático resultante de este cálculo es de 11.5 m con respecto a la superficie del talud. La Figura 6 muestra los resultados en términos de desplazamiento acumulados al final de la simulación MPM.

Se observa que, al incluir la susceptibilidad a la licuefacción del suelo los desplazamientos calculados son notablemente mayores respecto al caso anterior. Cuando la densidad relativa y la tensión de confinamiento son tales que $I_r < 0$ (Ecuación 1), el comportamiento del suelo es contractante y la generación de exceso de presión intersticial durante el movimiento produce una disminución de la resistencia capaz de desarrollar el mecanismo de transición de deslizamiento a flujo.

Sin embargo, el recorrido final calculado es menor que lo observado. Varios son los aspectos que pueden explicar esta discrepancia: (1) las incertidumbres sobre el desencadenamiento real del deslizamiento; (2) una afluencia lateral de suelo que incrementó el volumen de suelo inestable; (3) la rápida disipación del exceso de presión intersticial debido al uso de un valor de permeabilidad del

suelo mayor que la real.

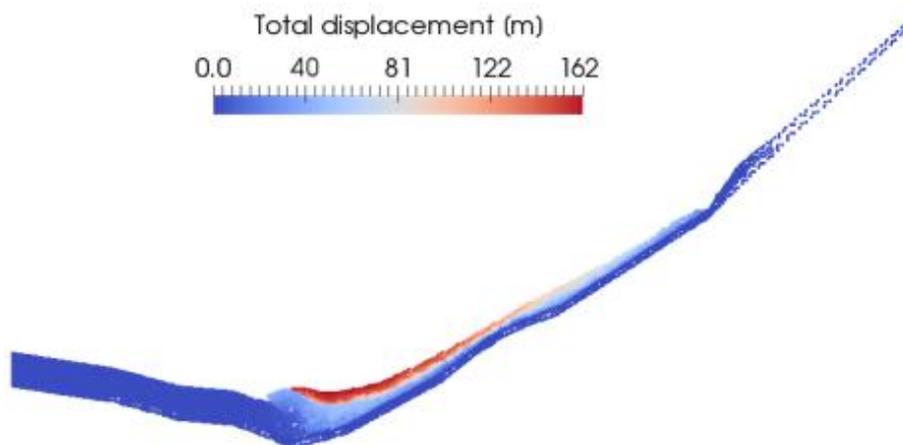


Figura 6. Desplazamientos totales calculados utilizando el modelo Ta-Ger.

7. CONCLUSIONES

Los deslizamientos de tierras tipo flujo están caracterizados por grandes desplazamientos y velocidades como resultado de un mecanismo de transición entre sólido y fluido de la masa movilizada. La susceptibilidad a la licuefacción del suelo involucrado es uno de los factores que pueden generar este tipo de fenómeno.

Este trabajo presenta la modelización de deslizamientos tipo flujo mediante el método del punto material y un modelo constitutivo desarrollado para reproducir el proceso de licuefacción estática.

La importancia de adoptar un modelo constitutivo avanzado se ha confirmado con los resultados de una simulación en la que se ha descrito el suelo con un modelo de Mohr-Coulomb con reblandecimiento por deformación. En este caso, no se puede reproducir la pérdida de resistencia debido a la propagación de las presiones intersticiales en la etapa posterior a la rotura y los grandes desplazamientos resultantes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero a CIMNE proporcionada por el programa CERCA/ Generalitat de Catalunya, la asistencia de la comunidad de investigación MPM y el equipo de desarrollo de software de Anura3D.

El segundo autor, profesor Agregado Serra Húnter, agradece la financiación del Departament de Recerca i Universitats de la Generalitat de Catalunya.

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i RTI2018-097365-B- financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, “FEDER Una manera de hacer Europa”.

REFERENCIAS

- Al-Kafaji, I. K. J., 2013. *Formulation of a Dynamic Material Point Method (MPM) for Geomechanical Problems*. PhD Thesis, Universität Stuttgart, Germany.
- Beatty, M. & Byrne, P. M., 1998. An effective stress model for predicting liquefaction behaviour of sand. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE Geotechnical Special Publication*. ASCE, pp. 766–777.
- Bienen, B., Stanier, S., Vulpe, C. & Mašin, D., 2014. *Interface enabling constitutive models coded as user materials to be employed in explicit analysis*. Research Report.
- Bishop, A W., 1959. The Principle of Effective Stress. *Teknisk Ukeblad*, 106 (39): 859–63.
- Bolton, M. D., 1986. The strength and dilatancy of sands. *Gèotechnique*, 36(1): 65–78.
- Ceccato, F., Yerro, A., Girardi, V. & Simonini, P., 2021. Two-Phase Dynamic MPM Formulation for

- Unsaturated Soil. *Computers and Geotechnics* 129. Elsevier Ltd.
- Cundall, P. A., 1987. Distinct element models of rock and soil structure. *Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*, 4: 129–163.
- Detournay, C. & Dzik, E., 2006. Nodal mixed discretization for tetrahedral elements. In *4th international FLAC symposium, numerical modeling in geomechanics*. Minnesota Itasca Consulting Group, Inc. Paper, Number 07-02.
- Harlow, F. H., Ellison, M. A. & Reid, J. H., 1964. The Particle-in-Cell Computing Method for Fluid Dynamics. *Methods in Computational Physics*, 3 (3): 319–43.
- Institut Cartogràfic I Geològic De Catalunya, 2018. Nota tècnica de la visita realitzada al flux ocorregut a «Era Abelha» de la val de Valarties, Arties, Val d’Aran.
- Jefferies, M. G., 1993. Nor-Sand: a simple critical state model for sand. *Géotechnique*, 43(1): 91–103.
- Pastor, M., Zienkiewicz, O. C. & Chan, A. H. C., 1990. Generalized plasticity and the modelling of soil behaviour. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 14: 151–190.
- Perdices, P., 2019. *Análisis de un deslizamiento en el Valle de Arán y simulación mediante el método del punto material*. Trabajo Final de Máster, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Prevost, J. H., 1977. Mathematical modelling of monotonic and cyclic undrained clay behaviour. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. doi: 10.1002/nag.1610010206.
- Prevost, J. H., 1978. Anisotropic undrained stress–strain behavior of clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 104(8): 1075–1090.
- Sulsky, D., Chen, Z. & Schreyer, H. L., 1994. A Particle Method for History-Dependent Materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 118 (1–2): 179–96. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(94\)90112-0](https://doi.org/10.1016/0045-7825(94)90112-0).
- Sulsky, D., Zhou, S. & Schreyer, H. L., 1995. Application of a Particle-in-Cell Method to Solid Mechanics. *Computer Physics Communications*, 87: 236–52.
- Taiebat, M. & Dafalias, Y. F., 2008. SANISAND: Simple anisotropic sand plasticity model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32, pp. 915–948. doi: 10.1002/nag.651.
- Tasiopoulou, P., & Gerolymos, N., 2016a. Constitutive Modelling of Sand: Formulation of a New Plasticity Approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82: 205–221.
- Tasiopoulou, P., & Gerolymos, N., 2016b. Constitutive Modelling of Sand: A Progressive Calibration Procedure Accounting for Intrinsic and Stress-Induced Anisotropy. *Géotechnique*, 66 (9): 754–770.
- Zabala, F. & Alonso, E. E., 2011. Progressive failure of Aznalcóllar dam using the material point method. *Géotechnique*, 61(9): 795–808.