

ACELERACIÓN DE DESLIZAMIENTOS POR EFECTOS TÉRMICOS. MODELACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DEL PUNTO MATERIAL

Mauricio ALVARADO*[†], Núria M. PINYOL*[†] y Eduardo E. ALONSO*[†]

* Centre de Metodes Numerics en Enginyeria (CIMNE)

[†] Departament de Ingenieria Civil y Ambiental, Universtitat Politècnica de Catalunya (UPC)

RESUMEN

La ocurrencia de deslizamientos rápidos se ha ligado a la pérdida de resistencia efectiva a lo largo de la superficie de rotura debido a excesos de presión de agua inducidos por el calor generado durante el propio movimiento. La simulación numérica de estos procesos se ha enfocado resolviendo la ecuación de la dinámica del movimiento de forma acoplada con la resolución de las ecuaciones de balance de masa y temperatura a la escala de la banda de corte. Para ello se debe definir a priori la geometría y la posición de la superficie de rotura. En este artículo se presenta la simulación numérica de deslizamientos incluyendo los efectos térmicos utilizando el Método del Punto Material, método numérico bien adaptado a la simulación de grandes desplazamientos. Ello permite simular de manera general el proceso de inestabilidad y el comportamiento post-rotura sin la necesidad de definir a priori la posición de la superficie de rotura crítica. Las ecuaciones de equilibrio dinámico y las de balance de masa y de energía se plantean de manera acoplada y se resuelven mediante el MPM en todo el dominio.

A partir del análisis del comportamiento de un talud, se evalúa el efecto del calor en el movimiento de la masa inestable y se presenta un análisis de sensibilidad del efecto de la permeabilidad, parámetro clave en la acumulación de la presión de agua y, por tanto, en la reducción de la resistencia friccional.

Con ello se presenta una herramienta numérica potente para la simulación integral de deslizamientos incluyendo los efectos térmicos.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las causas de la ocurrencia de la aceleración de los deslizamientos es la acumulación de excesos de presión debidos al incremento de temperatura generado por la disipación en forma de calor del trabajo friccional. Las principales contribuciones se enmarcan en el estudio del deslizamiento de Vajont (Hendron & Patton 1985), probablemente porque se trata de uno de los deslizamientos más estudiados de la historia. Sin embargo, el número de deslizamientos rápidos y catastróficos incrementa año a año (Alcántara-Ayala, I. Domínguez-Morales 2008; Tang et al. 2009; Yang et al. 2014).

El proceso físico que explica la aceleración es el siguiente: una vez se inicia la inestabilidad, el trabajo friccional generado durante la deformación, generalmente concentrada en bandas de corte, se disipa en forma de calor y aumenta la temperatura. Los incrementos de temperatura tienden a dilatar el medio poroso formado por partículas sólidas y agua. El incremento de volumen del agua se puede transformar en presión intersticial, la magnitud de la cual dependerá de las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo. La acumulación de los excesos de presión generados por calor induce una pérdida de resistencia efectiva que lleva a la aceleración del deslizamiento. A medida que aumenta la aceleración, aumentan la magnitud de las deformaciones y por consiguiente el calor generado, la temperatura y los excesos de presión. De este modo, el proceso puede retroalimentarse e inducir la aceleración brusca del deslizamiento.

Los trabajos publicados hasta el momento enfocados a la simulación numérica de los deslizamientos incluyendo el efecto del calor generado por el propio movimiento (Voight & Faust, 1982; Uriel Romero & Molina, 1977; Vardoulakis, 2002; Veveakis et al., 2007; Cecinato et al., 2010; Pinyol & Alonso, 2010a, b; Alonso et al., 2016) han resuelto el problema planteando las ecuaciones de gobierno y resolviéndolas para el caso de una masa inestable que desliza sobre una superficie plana. La resolución de las ecuaciones se realiza mediante soluciones analíticas o utilizando diferencias finitas. La principal limitación de estos análisis es que la geometría del deslizamiento, y en particular la posición de la superficie de rotura, deben ser definida a priori.

Pinyol et al. (2017) presenta el análisis de deslizamientos mediante el Método del Punto Material (MPM) (Sulsky et al. 1995) incluyendo los efectos térmicos por disipación del trabajo friccional. En el artículo se extiende la formulación $u-p$ (Zienkiewicz et al. 1980) a condiciones no isotérmicas mediante la resolución del balance de energía e imponiendo que el trabajo plástico generado en el dominio de cálculo se disipa en forma de calor. Las ecuaciones se integran en el contexto del MPM que permite, a diferencia de los elementos finitos clásicos, la simulación de grandes desplazamientos. El resultado es una herramienta de cálculo numérico potente que permite la simulación de procesos termo-hidro-mecánicos acoplados para grandes desplazamientos (THM-MPM). Su aplicación a deslizamientos rápidos permite la simulación

integral del movimiento desde su inicio hasta la respuesta post-rotura sin tener que definir a priori la posición de la superficie de deslizamiento.

En este artículo se presenta la aplicación del código THM-MPM para el caso de un talud homogéneo y se analiza el efecto de la permeabilidad como parámetro relevante que controla la generación de los excesos de presión inducidos por el incremento de temperatura.

2. SIMULACIÓN THM-MPM

La Figura 1 representa la geometría de un talud homogéneo saturado (nivel freático en superficie). El suelo se describe como un material perfectamente plástico según una ley Mohr-Coulomb caracterizada por un ángulo de fricción de 28° y una cohesión efectiva de 2 kPa. El resto de parámetros del suelo se indican en la Tabla 1. El dominio de cálculo se discretiza con una malla cuadrada de 12.5×12.5 cm e inicialmente se ubican cuatro puntos materiales por elemento. La inestabilidad del talud se inicia al reducir la cohesión de 2kPa a 1 kPa.

Parámetros	Valores	Unidades
<i>Agua</i>		
Densidad	1000	kg/m ³
Módulo de deformación volumétrico	2200	MPa
Coefficiente de dilatación térmica	0.00034	1/°C
Calor específico	4186 1	N·m/(kg·°C) cal/(kg·°C)
<i>Partículas sólidas</i>		
Densidad	2700	kg/m ³
Coefficiente de dilatación térmica	0.00003	1/°C
Calor específico	837 0.2	N·m/(kg·°C) cal/(kg·°C)
<i>Suelo</i>		
Porosidad	0.4	-
Permeabilidad	1.00E-11	m/s
Módulo de Young	20000	kPa
Coefficiente de Poisson	0.33	-

Tabla 1. Parámetros de cálculo

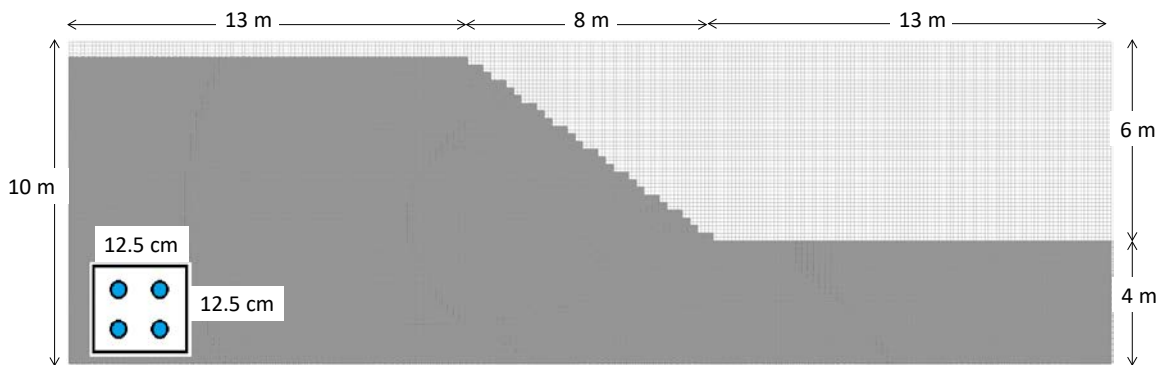


Figura 1. Geometría y malla de talud analizado en MPM.

Como referencia se considera el caso isotérmico (en el que no se resuelve la ecuación del balance de energía). La Figura 2a muestra el desplazamiento acumulado al final del movimiento (una vez el talud restablece el equilibrio) después de cinco segundos de movimiento. El desplazamiento total, calculado como la distancia entre la posición inicial del pie y la final, es de 1.7 m.

De acuerdo con los trabajos previos (Goren & Aharonov 2009; Pinyol & Alonso 2010a,b), los efectos del calor en el movimiento dependen en gran medida de la disipación de los excesos de presión, principalmente controlados por la permeabilidad del material de la banda de corte y su entorno. En estos trabajos, el problema se resolvió para casos con geometrías sencillas definida a priori. La conclusión obtenida a partir de análisis de sensibilidad es clara: dado un talud, existe un rango de valores de permeabilidad que separa los deslizamientos con potencial de aceleración de los deslizamientos que se mantienen “lentos”. Para valores relativamente bajos de la permeabilidad, los excesos de presión generados durante el movimiento no pueden disiparse y su acumulación induce la aceleración del deslizamiento. Por lo contrario, valores relativamente altos de permeabilidad permiten la disipación de los excesos de presión y el movimiento se mantiene sin un efecto relevante de los efectos térmicos.

El efecto térmico en función de la temperatura se puede observar en la Figura 2b y c para un caso general en el que no se ha impuesto a priori la posición de la superficie de deslizamiento. Para el caso más permeable ($k = 10^{-5}$ m/s) los resultados son prácticamente iguales a los observados en el caso isotérmico. Sin embargo, el efecto del calor se observa claramente en el movimiento en la Figura 2c ($k = 10^{-11}$ m/s).

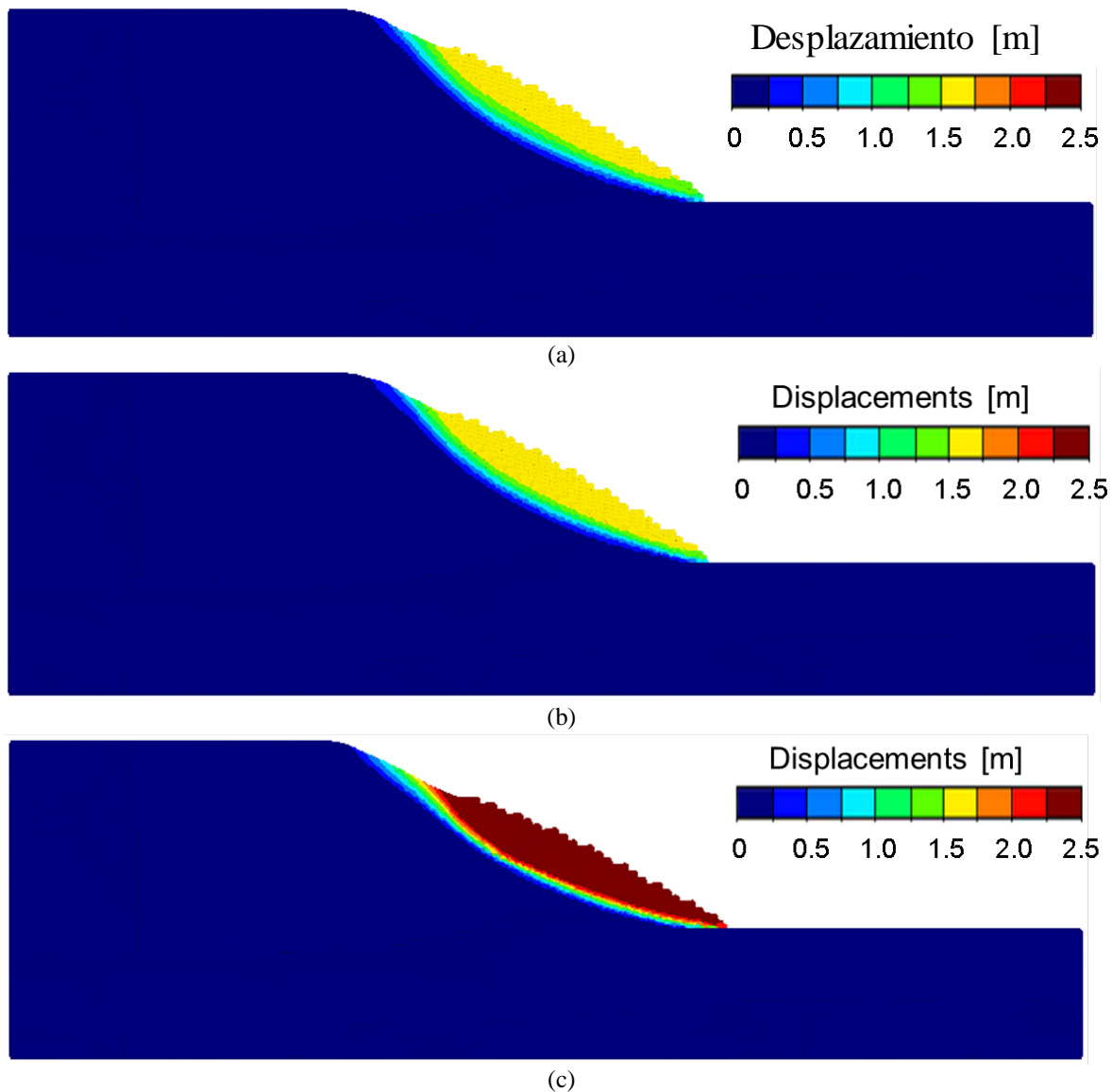


Figura 2. Desplazamientos acumulados al final del movimiento. (a) Caso isotérmico; (b) caso no isotérmico, permeabilidad de 10^{-5} m/s; (c) caso no isotérmico, permeabilidad 10^{-11} m/s.

La Figura 3a muestra la evolución del desplazamiento en un punto localizado inicialmente en la superficie en el punto medio del talud. Se evalúa la respuesta del talud para valores de la permeabilidad entre 10^{-5} m/s y 10^{-11} m/s. En la Figura 3b se muestran los excesos de presión calculados en un punto central de la superficie de deslizamiento. Para el caso más permeable, los valores calculados son insignificantes. Cuando la permeabilidad disminuye ($k = 10^{-7}$ m/s), la presión de poros crece inicialmente y se reduce durante el propio movimiento. A medida que aumenta el valor de la permeabilidad, la velocidad máxima y el desplazamiento aumentan debido a la acumulación de los excesos de presión en la banda de corte. La Figura 4 muestra la distribución de las deformaciones plásticas y los excesos de presión para el caso de $k = 10^{-11}$

m/s. Los incrementos de la deformación de corte se localizan en una banda definida por uno o dos elementos de la malla computacional.

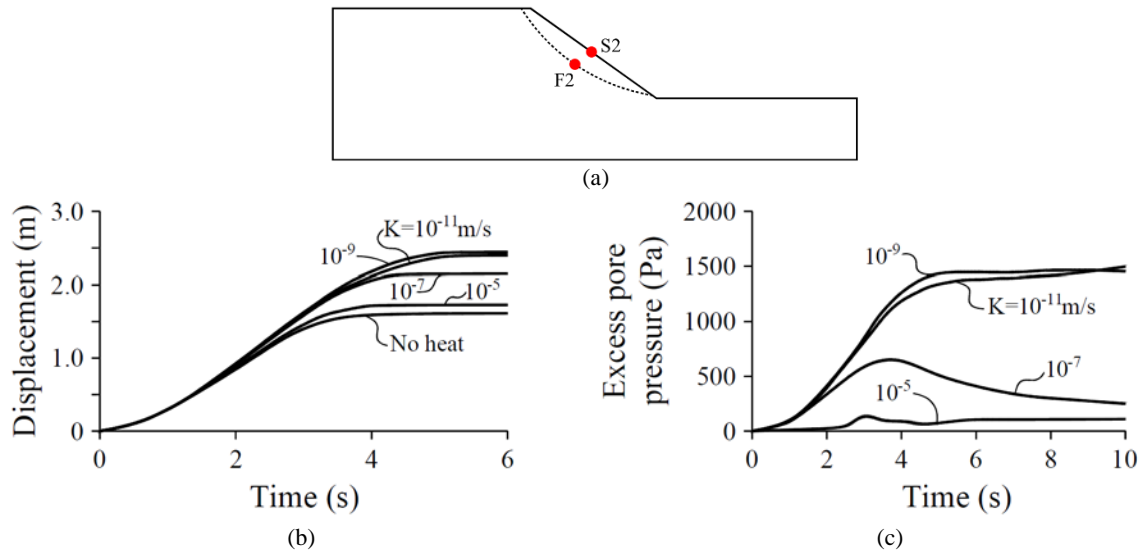


Figura 3. Posición de los puntos analizados; (b) velocidad del punto S2 y (c) excesos de presión de agua en el punto F2 para diferentes valores de la permeabilidad.

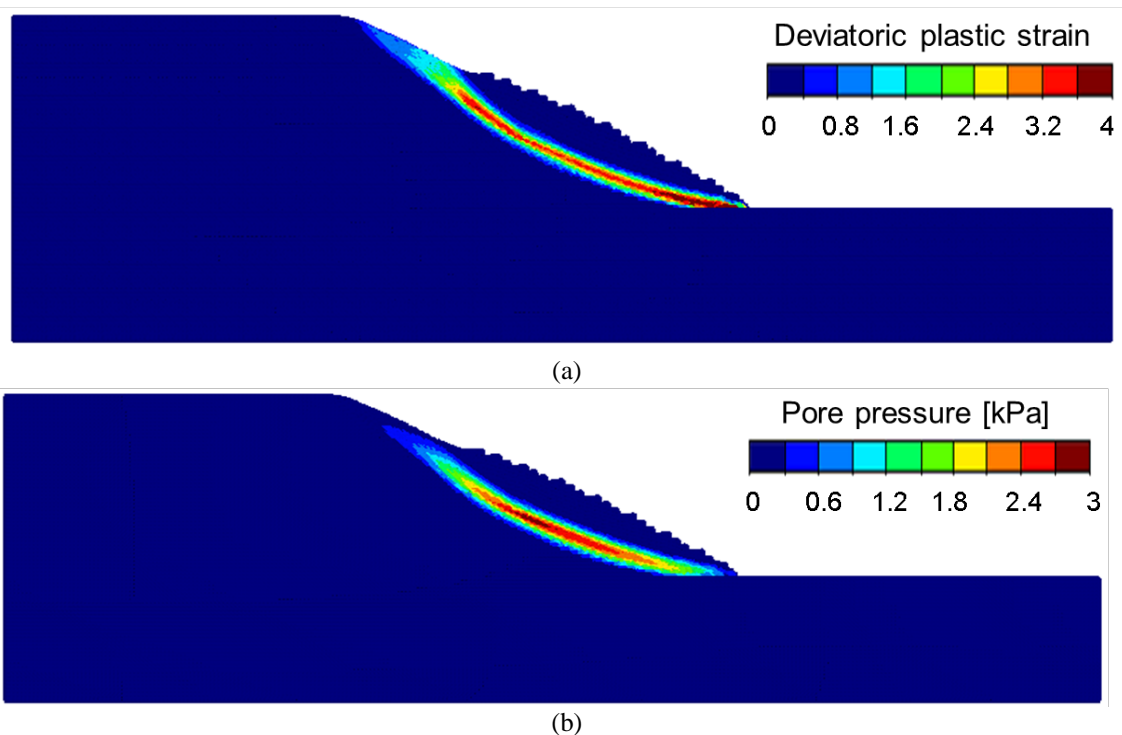


Figure 4. Distribución de (a) la deformación plástica desviadora y (b) excesos de presión al final del movimiento. Permeabilidad de 10^{-11} m/s.

3. CONCLUSIONES

El análisis de aceleración de deslizamientos por el efecto del calor generado durante el propio movimiento se ha llevado a cabo en el pasado para geometrías de taludes sencillas (en la mayoría de los casos deslizamientos planos) en los que la posición de la superficie de rotura era definida a priori. Este artículo presenta los resultados de una herramienta numérica capaz de simular de manera integral la inestabilidad en un talud desde la generación de la rotura hasta el comportamiento posterior incluyendo la interacción termo-hidro-mecánica. Para ello, las ecuaciones de gobierno se han integrado en el marco del MPM, lo que permite la simulación de grandes desplazamientos.

El artículo muestra las capacidades del método mediante la simulación del caso de un talud homogéneo saturado. Los resultados obtenidos mediante un análisis de sensibilidad para evaluar los efectos de la permeabilidad corroboran las conclusiones obtenidas previamente para geometrías predefinidas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda económica a CIMNE recibida del programa CERCA/Generalitat de Catalunya y al Gobierno de España por la beca (BES-2014-068284) y la ayuda (IJC1-2015-26342) al primer y segundo autor respectivamente.

REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I. Domínguez-Morales, L., 2008. The San Juan de Grijalva Catastrophic Landslide , Chiapas , Mexico : Lessons Learnt. In V. T. Nicola Casagli, Riccardo Fanti, ed. *Web Proceedings of the First World Landslide Forum. International Consortium on Landslides. United Nations International Strategy for Disaster Reductions*. Tokyo, Japan, pp. 96–99.
- Alonso, E.E., Zervos, A. & Pinyol, N.M., 2016. Thermo-poro-mechanical analysis of landslides: from creeping behaviour to catastrophic failure. *Géotechnique*, 66(3), pp.202–219.
- Cecinato, F., Zervos, A. & Veveakis, E., 2010. A thermo-mechanical model for the catastrophic collapse of large landslides. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(14), pp.1507–1535.
- Goren, L. & Aharonov, E., 2009. On the stability of landslides: A thermo-poro-elastic approach. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(3–4), pp.365–372.
- Hendron, A.J. & Patton, F.D., 1985. *The Vaiont slide, a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface. Technical Report GL-85-5*, Washington, DC, USA.
- Pinyol, N.M. & Alonso, E.E., 2010a. Fast planar slides. A closed-form thermo-hydro-mechanical solution. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34, pp.27–52.
- Pinyol, N.M. & Alonso, E.E., 2010b. Criteria for rapid sliding II. Thermo-hydro-mechanical

- and scale effect in Vaiont case. *Engineering Geology*, 114(3–4), pp.211–227.
- Pinyol, N.M., Alvarado, M. & Alonso, E.E., Zabala, F. 2017 Thermal effects in landslide mobility. A MPM approach. *Géotechnique*. Accepted.
- Sulsky, D., Zhou, S.-J. & Schreyer, H.L., 1995. Application of a particle-in-cell method to solid mechanics. *Computer Physics Communications*, 87(1–2), pp.236–252.
- Tang, C.L. et al., 2009. The Tsaoling landslide triggered by the Chi-Chi earthquake, Taiwan: Insights from a discrete element simulation. *Engineering Geology*, 106(1–2), pp.1–19.
- Uriel Romero, S. & Molina, R., 1977. Kinematic aspects of Vaiont slide. In *Proceedings of the 3rd international conference of the ISRM*. Denver, CO, USA: National Academy of Sciences 2B, pp. 865–870.
- Vardoulakis, I., 2002. Dynamic thermo-poro-mechanical analysis of catastrophic landslides. *Géotechnique*, 52(3), pp.157–171.
- Veveakis, E., Vardoulakis, I. & Di Toro, G., 2007. Thermoporomechanics of creeping landslides: The 1963 Vaiont slide, northern Italy. *Journal of Geophysical Research*, 112(F3), p.F03026.
- Voight, B. & Faust, C., 1982. Frictional heat and strength loss in some rapid landslides. *Géotechnique*, 32, pp.43–54.
- Yang, C. et al., 2014. Initiation , movement , and run-out of the giant Tsaoling landslide — What can we learn from a simple rigid block model and a velocity – displacement dependent friction law ? *Engineering Geology*, 182, pp.158–181.
- Zienkiewicz, O.C., Chang, C.T. & Bettess, P., 1980. Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils. *Géotechnique*, 30(4), pp.385–395.