

Modelación computacional de deslizamientos de tierra masivos inducidos por sismos usando el Método del Punto Material

Computational modeling of earthquake-induced massive landslides using by the Material Point Method

Fecha de entrega: 24 de octubre 2023

Fecha de aceptación: 1 de marzo 2024

Luis Lemus^{1,2}, Jaime Rodríguez¹, Vicente Cáceres¹ y Diego Mery¹

¹ Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, La Serena, Chile, llemus@userena.cl, jrodrigu@userena.cl, vcacersp@alumnosuls.cl, dmery@alumnosuls.cl

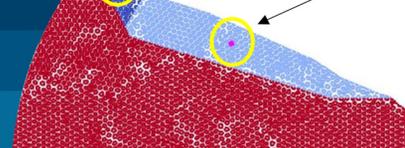
² Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, Barcelona, España

Los deslizamientos de tierra representan uno de los riesgos naturales más frecuentes y destructivos en los últimos años. En países altamente sísmicos, la ocurrencia de sismos de gran magnitud es un relevante factor desencadenante en la generación de estos deslizamientos. Bajo este contexto, es de interés para diversas disciplinas de la ingeniería civil, el estudio de estos fenómenos mediante análisis empíricos, métodos analíticos y modelación numérica, que permitan reproducir o predecir estos complejos problemas. Para avanzar en el entendimiento de este tipo de deslizamientos, en este trabajo, se desarrolla una modelación computacional que permita describir la dinámica de un deslizamiento de tierra y/o roca producto de una acción sísmica, utilizando el Método de Punto Material (MPM). Actualmente, el uso del MPM resulta de gran interés al tratarse de un método numérico desarrollado con la capacidad de modelar grandes deformaciones. Esto a diferencia de los métodos tradicionales, como por ejemplo el Método de los Elementos Finitos (MEF), el cual no logra representar de manera precisa este tipo de problemas debido a que en el proceso se generan errores asociados a distorsión de la malla. En este trabajo, se lleva a cabo una modelación sobre un caso real y documentado, consistente en el deslizamiento masivo ocurrido en la localidad de Daguangbao, China, provocado por el terremoto de Wenchuan el año 2008. Los resultados obtenidos logran capturar la dinámica del deslizamiento en términos de velocidades, deformaciones y distancia de recorrido según los reportes existentes y otros trabajos de investigación. Las velocidades máximas alcanzadas del deslizamiento, del orden de los 100 km/h, corroboran la categoría catastrófica de este evento.

Palabras clave: deslizamientos masivos, Método Punto Material, problema de grandes deformaciones

Landslides represent one of the most frequent and destructive natural hazards in recent years. In highly seismic countries, the occurrence of large earthquakes is a significant triggering factor in the generation of these landslides. Therefore, it is of interest to various disciplines within civil engineering to study these phenomena through empirical analysis, analytical methods, and numerical modelling, aiming to provide a more accurate representation of these complex phenomena. For this purpose, a computational modelling approach is developed to describe the dynamics of a landslide or rockslide induced by seismic loading, using the Material Point Method (MPM). Presently, the utilization of MPM holds considerable significance because it is a numerical method engineered to simulate large deformations. This stands in contrast to conventional methods like the Finite Element Method (FEM), which struggles to precisely deal with this type of problems due to the generation of errors related to mesh distortion. In this study, it is performed a modelling process involving a real and documented scenario—a massive landslide occurrence in the vicinity of Daguangbao, China, triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake. The obtained results successfully capture the landslide dynamics in terms of velocities, deformations, and travel distances in accordance with existing reports and other research endeavours. The maximum attained velocities of the landslide are approximately 100 km/h, affirming the catastrophic nature of this event.

Keywords: massive landslides, Material Point Method, large deformation



Introducción

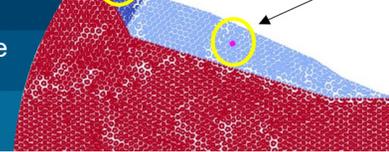
Los deslizamientos de tierra masivos son por definición grandes masas de suelo y/o roca, que posterior al colapso, movilizan el material a elevadas velocidades desarrollando un gran potencial destructivo. La predicción de este tipo de deslizamientos toma relevancia producto del carácter catastrófico que manifiesta si existiese interacción con las comunidades o la infraestructura civil. Un deslizamiento puede ser analizado considerando diversos aspectos, entre los que destacan, los factores desencadenantes, el tipo de falla, y la forma en cómo se moviliza la masa de suelo y/o roca posterior al colapso. Diversos métodos de cálculo son capaces de predecir la inestabilidad de un talud en condiciones estáticas y sísmicas, abordando también la respuesta dinámica de la masa de suelo en diferentes condiciones de drenaje y de carga, con el objetivo de evaluar el proceso hasta la falla (e.g. Angeli *et al.*, 1996; Prieto *et al.*, 2020). Sin embargo, evaluar una etapa posterior a la rotura es inviable para los métodos analíticos tradicionales e incluso para métodos numéricos que se basan en, por ejemplo, el método de elementos finitos (FEM). Actualmente, se hace necesario estudiar qué ocurre con el deslizamiento posterior a la rotura, para eventualmente, generar un mapa de riesgo o preparar medidas de mitigación. En este sentido, los modelos computacionales toman relevancia, y principalmente, los métodos que permiten modelar procesos de tierra sólida que manifiestan grandes deformaciones, como lo son, el método del punto material (MPM), el método de elementos discretos (DEM), Smoothed-Particle Hydrodynamic (SPH), Discontinuous deformation analysis (DDA), entre otros métodos.

La selección de un método que sea capaz de modelar adecuadamente las grandes deformaciones producto de un colapso, es parte de los desafíos de este trabajo. Además, se busca desarrollar un modelo que integre las ventajas que proporciona el MEF y la capacidad de modelar grandes deformaciones. Bajo este contexto, el MPM proporciona esta dualidad, y se utilizará para modelar un talud de grandes dimensiones sujeto a una acción sísmica. El MPM fue desarrollado en 1968 por Harlow F., en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, EEUU, en donde desarrolló las bases del método permitiendo describir la dinámica de un flujo de fluido a través de una malla fija, este método

inicialmente se llamó PIC (Particle-in-Cell). Luego, Sulsky *et al.* (1994) y Sulsky y Schreyer (1996) extendieron el enfoque para resolver problemas relacionados con la mecánica de sólidos.

En las últimas décadas, el uso de este método en problemas geomecánicos ha sido de gran interés. Diversos problemas de este tipo han sido abordados, por ejemplo, flujos granulares, llenado de silos, fallas de muros de contención, procesos de corte y excavaciones (Wieckowski, 2004; Beuth, 2012). La modelación de deslizamientos de masas de suelo de distintas tipologías también ha sido objeto de estudio (Andersen y Andersen, 2010; Yerro *et al.*, 2013). En esta misma línea, y considerando además la interacción acoplada entre las presiones de fluido y las partículas sólidas, se han implementado diversas formulaciones matemáticas (Al-Kafaji, 2013; Jassim *et al.*, 2013; Zabala y Alonso, 2011). Por otro lado, una serie de modelos numéricos sobre casos reales han sido realizados, entre los que desatacan el deslizamiento de la presa de Aznalcóllar (Zabala y Alonso, 2011), el gran deslizamiento de Vaiont (Pinyol *et al.*, 2018) y el deslizamiento de Oso en EEUU en el año 2014, entre otros casos. El uso del MPM en problemas de deslizamientos considerando una carga sísmica es relativamente nuevo. Estudios recientes en esta materia corresponden a las investigaciones enfocadas en la implementación de condiciones de borde (Alsardi y Yerro, 2023; Kohler *et al.*, 2022).

Este trabajo se enfoca inicialmente solo en la aplicación de la carga sísmica en la base del modelo, la cual genera fuerzas sísmicas inerciales desestabilizadoras en la masa de suelo. Uno de los objetivos es poder verificar que la incorporación de la carga sísmica de un caso real puede iniciar el movimiento y eventualmente provocar el deslizamiento de una gran masa de material. El código numérico que se utiliza corresponde a Anura3D (Anura3D MPM Research Community), el cual ha sido modificado para incluir la acción sísmica. El modelo computacional no considera la respuesta dinámica del suelo en términos de amortiguamiento y degradación del módulo de corte, más bien, el suelo de fundación es utilizado principalmente como la base elastoplástica en donde la masa de suelo que colapsa pueda moverse o “fluir”. El suelo de fundación se considera linealmente elástico, sin embargo, dada la naturaleza de la formulación dinámica del MPM, es capaz



de transmitir las ondas adecuadamente.

El modelo seleccionado y que se presenta en este trabajo corresponde al caso de deslizamiento masivo de Daguangbao, ocurrido en China, en el año 2008, el cual se reconoce que fue inducido por el gran terremoto de Wenchuan. El modelo considera el registro de aceleraciones, las propiedades geotécnicas de los materiales involucrados y condiciones de borde absorbentes. La configuración del modelo se plantea considerando los siguientes ítems: geometría del modelo, registro de aceleraciones, condiciones de borde, parámetros geomecánicos, etapas y consideraciones de cálculo.

Modelo computacional

Conceptos generales del MPM

El MPM combina los métodos de partículas y las ventajas del MEF. Por lo anterior, se puede describir como un método híbrido o una extensión del MEF en donde se utiliza una malla fija de fondo para resolver las ecuaciones de gobierno (momentum), mientras que el continuo o el material se representa mediante partículas Lagrangianas de masa fija (ver Figura 1). La información que transportan las partículas (movimiento, tensión, deformación, densidad, entre otras) se proyecta en la malla a través de sus nodos en cada paso de solución con el fin de cubrir íntegramente el dominio del problema y en la cual, se imponen las condiciones de contorno. Posteriormente, en la malla Euleriana fija se resuelve las ecuaciones de gobierno o de equilibrio de forma discreta para así dar paso a la actualización de la posición de las partículas y la transferencia de la información. En cada paso la malla es descartada o reseteada, ya que toda la información la transporta las partículas que definen el estado del subdominio que representan. En la Figura 2, se ilustra de manera resumida el ciclo de cálculo del método.

Las ecuaciones de gobierno para problemas acoplados considerando interacción fluido-sólido en MPM se definen como un problema de 2 fases en medio poroso saturado (Jassim *et al.*, 2013), y dependiendo de la formulación se pueden describir el balance de masa para cada fase de forma independiente dando origen a formulaciones de 1, 2 ó 3 puntos. A continuación, y de manera resumida, se indican, por ejemplo, las ecuaciones de balance de momentum en (1) y (2), y balance de masa en (4) y (5), para fase sólida

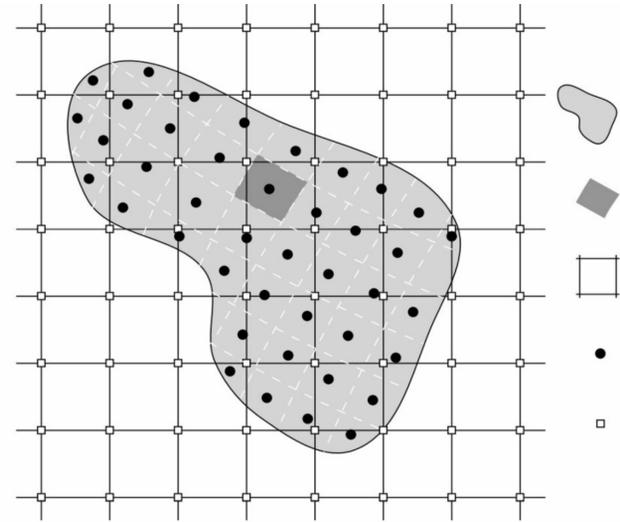


Figura 1: Discretización espacial de un cuerpo continuo con nodos de la malla computacional y puntos materiales (modificada de Alonso, 2021)

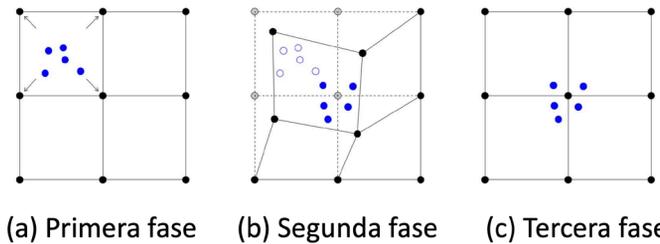


Figura 2: Fases de cálculo para un incremento de tiempo en MPM.

y líquida, respectivamente, considerando una formulación de 2 fases – 1 punto.

$$\rho_L \mathbf{a}_L = \nabla p_L - \frac{n\mu_L}{k_L} (\mathbf{v}_L - \mathbf{v}_S) + \rho_L \mathbf{b} \quad (1)$$

$$(1 - n)\rho_S \mathbf{a}_S + n\rho_L \mathbf{a}_L = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho_m \mathbf{b} \quad (2)$$

$$\rho_m = \rho_S(1 - n) + \rho_L n \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} - (1 - n)\nabla \cdot \mathbf{v}_S = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dp_L}{dt} = \frac{K_L}{n} [\nabla \cdot \mathbf{v}_L + (1 - n)\nabla \cdot \mathbf{v}_S] \quad (5)$$

Donde, \mathbf{a}_L es la aceleración de la fase líquida; \mathbf{v}_S y \mathbf{v}_L son las velocidades del líquido y sólido, respectivamente; \mathbf{b} es

el vector de fuerza de cuerpo; p_L es la presión del líquido, ρ_L es la densidad del líquido, μ_L es la viscosidad cinemática del líquido; K_L es la permeabilidad intrínseca del líquido; n es la porosidad; a_s es la aceleración de las partículas sólidas; σ es el tensor de tensiones totales de Cauchy de la mezcla; ρ_s es la densidad de las partículas sólidas y ρ_m es la densidad de la mezcla.

Antecedentes del deslizamiento Daguangbao

En este apartado se aborda la modelación y el análisis realizado sobre un caso real seleccionado, el que consiste específicamente en un talud de grandes dimensiones ubicado en la zona de Wenchuan, en la región de Sichuan, China. Este talud fue afectado por un deslizamiento masivo producto de un terremoto de magnitud 8.0 M_w ocurrido el 12 de mayo del año 2008. Este deslizamiento se denominó con el nombre de “Daguangbao” y consistió en el deslizamiento de mayores dimensiones entre los ocurridos luego del terremoto de Sichuan. La distancia total de recorrido del material colapsado se aproxima a un valor de 4.5 km (Zhang *et al.*, 2015). Esto se ve representado en la Figura 3, además de resaltar la topografía original del talud previo a la ocurrencia del deslizamiento (destacada en color verde), se muestra la topografía generada posterior al deslizamiento (destacada en color morado).

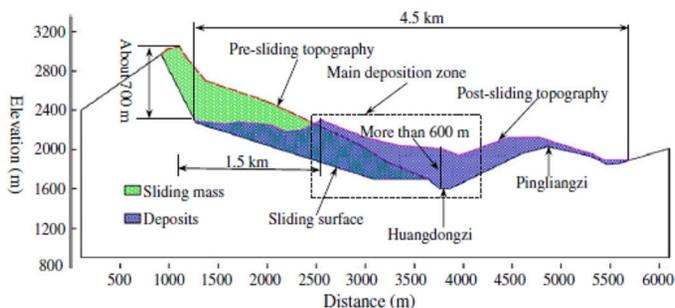


Figura 3: Geometría antes y posterior al colapso (Song *et al.*, 2016)

Durante el deslizamiento, y antes de llegar a la zona final de Pingliangzi, se genera una zona de acumulación de material en la zona del valle de Huangdongzi en donde el material depositado alcanzó una altura incluso superior a los 600 m, alterando drásticamente la topografía del lugar. Fotografías de dichas zonas se muestra en la Figura 4.

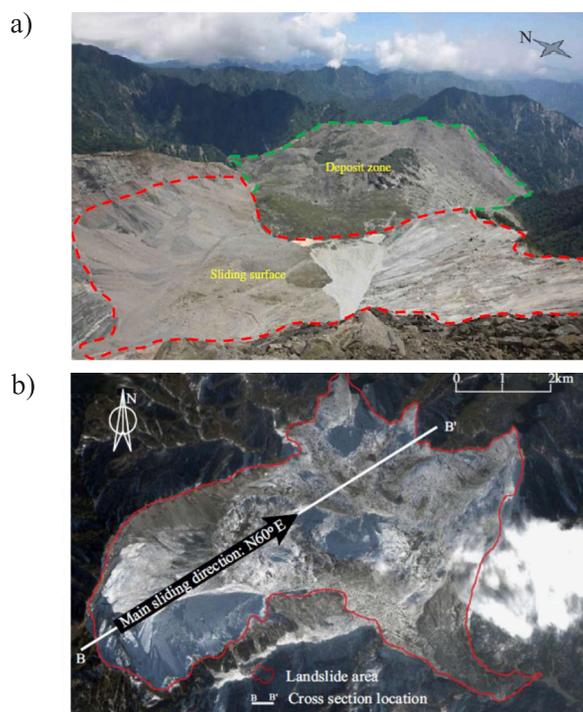


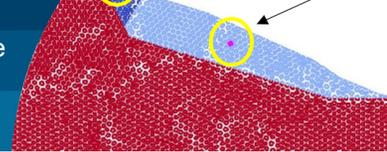
Figura 4: Deslizamiento de Daguangbao: a) superficie de falla (Song *et al.*, 2016) y b) depositación y dirección de deslizamiento (Zhang *et al.*, 2015)

Estos cambios topográficos producto del deslizamiento de Daguangbao se cuantifican en un área afectada estimada entre 7.3 a 10 km², con un volumen de material desplazado que se estima entre 750 a 840 x 10⁶ m³ (Zhang *et al.*, 2015). Al tratarse de un caso real documentado por diversos autores, se tiene a disposición una serie de parámetros geotécnicos, así como la geometría específica, y otros antecedentes relevantes para el modelo.

Geometría del modelo

Respecto de la geometría del modelo, se tiene que el talud en el cual ocurre el deslizamiento masivo de Daguangbao corresponde a material rocoso de dimensiones considerables. Específicamente presenta una altura máxima de 2250 m y una longitud de aproximadamente 6000 m.

De acuerdo con Song *et al.* (2016), el talud está compuesto por tres materiales diferentes, consistentes todos en rocas de diversas características. Para efectos prácticos de modelación e identificación, estos materiales se han denominado como Material 1, Material 2 y Material 3 respectivamente, siendo el Material 1 y el Material 2 los materiales que deslizan por sobre el Material 3.



Adicionalmente, para esta modelación se toma como parámetro de referencia la superficie de falla propuesta por Song *et al.* (2016).

Una representación de la geometría descrita, incluyendo la superficie de falla estimada, se presenta a en la Figura 5.

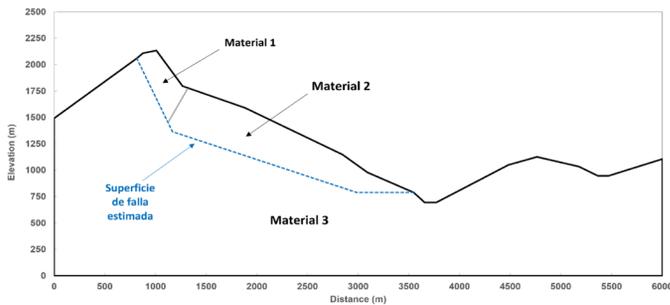


Figura 5: Geometría del modelo caso deslizamiento de Daguangbao

En el modelo se considera la incorporación del registro sísmico asociado al terremoto de Sichuan, correspondiente al terremoto que desencadenó el deslizamiento masivo de Daguangbao. Este sismo fue generado por el movimiento de la zona de fallas de Longmenshan, provocando la compresión de las fallas de Maoxian-Wenchuan, Yingxiu-Beichuan y Jianguyou-Guanxian (Song *et al.*, 2016).

El sismo tuvo una magnitud de $8.0 M_w$ y el acelerograma considerado corresponde al registrado por la estación sísmica 51MZQ de China (<https://www.strongmotioncenter.org/>), el que se muestra en la Figura 6. Este sismo tuvo una duración de aproximadamente 60 s y alcanzó una aceleración máxima de 0.8g, la cual fue alcanzada luego de transcurridos alrededor de los primeros 20 s.

Es importante mencionar que el código Anura3D no trabaja directamente con el registro de aceleraciones, sino que, con velocidades prescritas, por lo que se realiza un paso previo

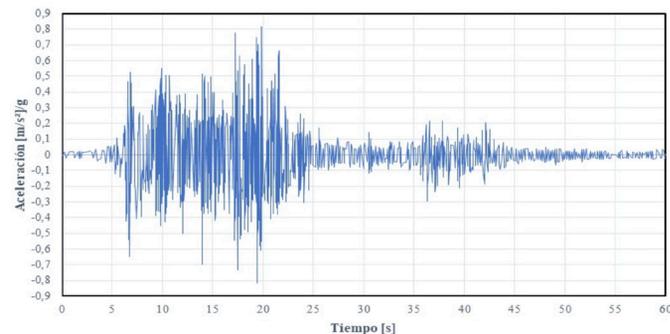


Figura 6: Registro de aceleraciones del sismo Sichuan 2008.

de integración para obtener el registro de velocidades, las cuales se presentan en la Figura 7.

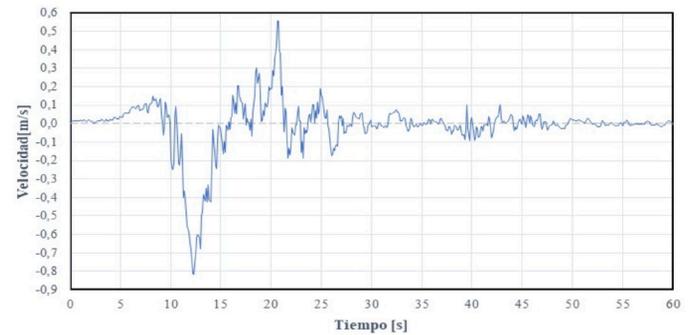


Figura 7: Registro de velocidades del sismo Sichuan 2008.

Parámetros geotécnicos y configuración del análisis

El modelo tal como se mostró previamente en la Figura 3, se conforma principalmente por tres materiales, correspondientes a materiales de tipo rocoso. Además, se considera una base rígida que se incorpora exclusivamente con la finalidad de aplicar en ella el registro sísmico del terremoto. Cabe mencionar, que en este método las velocidades se aplican en los puntos materiales de cada elemento que forma la base rígida.

Cada uno de los materiales presenta parámetros geotécnicos particulares. Para definir estos parámetros se recopilaron y analizaron diversos documentos de trabajos con temáticas relacionadas al deslizamiento de Daguangbao, en los cuales se presentaban valores propuestos para la caracterización del talud.

Los parámetros geotécnicos que finalmente fueron definidos para cada material y utilizados en la confección del modelo, fueron tomados con base en lo propuesto por Song *et al.* (2016). Estos parámetros se detallan en la Tabla 1.

La malla de elementos finitos está constituida por elementos triangulares considerando tres puntos materiales por elemento. El tamaño de todos los elementos corresponde a 50 m. En la Figura 8 se puede apreciar la malla configurada de tal forma que se dispone de una zona vacía (sin material) que será la zona por donde el material colapsado puede moverse. También se puede apreciar los distintos materiales que componen el modelo y particularmente se puede observar en color azul una base rígida que es donde es aplicada la carga sísmica. Respecto de las condiciones

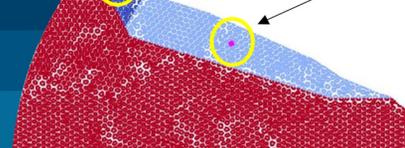


Tabla 1: Parámetros geotécnicos de los materiales

Caracterización de materiales			
Nombre	Material 1	Material 2	Material 3
Tipo de material (estado)	Seco	Seco	Seco
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Parámetro			
Porosidad	0.1	0.1	0.1
Densidad del sólido ρ_s , kg/m ³	2700	2700	2600
Densidad del líquido ρ_L , kg/m ³	1000	1000	1000
Coef. de empuje en reposo K_0	0.5	0.5	0.5
Ángulo de fricción ϕ , °	10.8	12.2	23.5
Cohesión c , kPa	1276	1576	30000
Módulo de elasticidad E , kPa	1.86×10^6	2.63×10^6	14.8×10^6
Coeficiente de Poisson ν	0.2	0.2	0.2
Resistencia a la tracción, kPa	12	32	557

de borde, para una primera etapa de cálculo, la fase estática, se consideran las clásicas condiciones de borde asignadas en los bordes del modelo. Esto es, fijas en la dirección horizontal y vertical en el borde inferior de la base rígida, fija en dirección horizontal en los bordes laterales y fija en dirección vertical en el borde superior del modelo. Para una segunda etapa de cálculo (fase dinámica), de manera simplificada, se consideran condiciones de bordes absorbentes (elementos Kelvin Voigt) en las zonas laterales del modelo, tal que, disminuyan en parte el rebote de las ondas sísmicas aplicadas en la base y las ondas producto del propio movimiento que pudiese provocar deslizamiento. Cabe mencionar que en este caso no se considera la presencia de agua al interior de material, vale decir, se trabaja en condición de suelo seco, lo que sería un caso particular de un modelo bifásico.

En el modelo, inicialmente se establece las condiciones de tensiones correspondientes al estado de tensiones geostáticas o etapa 1 de cálculo, en donde se aplica la carga de gravedad en dos pasos de tiempo para todo el dominio. En esta etapa se realiza un análisis cuasi-estático considerando un amortiguamiento local homogéneo de 0.8, con el objetivo de mejorar la estabilidad numérica y convergencia del modelo. Para la fase dinámica, que es cuando se aplica la carga sísmica y eventualmente comenzará a movilizarse el talud, se configura con un paso

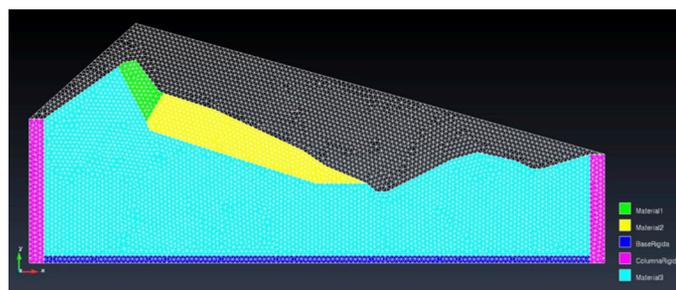


Figura 8: Malla de elementos finitos y materiales involucrados en el modelo.

de tiempo equivalente a 0.1 s y un total de 600 pasos de tiempo, para completar la duración total del sismo (60 s). Para esta etapa, el amortiguamiento local se reduce drásticamente a 0.05. El análisis incorpora también la interacción existente en el contacto entre materiales, ingresando los coeficientes de fricción respectivos.

Finalmente, la implementación computacional del caso se realiza en un computador de alto rendimiento con las características que se detallan en Tabla 2.

Tabla 2: Principales características de CPU utilizado.

Procesador	Intel® Xeon® Gold 5218 CPU@2.25GHz
Almacenamiento	40 GB (HDD) + 200 GB (SSD)
Memoria RAM	40 GB
N° de núcleos	20 Cores
Sistema Operativo	Windows 10® (64 bits)
Servidor	SynergyGrid, FIULS 2030

Resultados

En la Figura 9 se puede visualizar los resultados correspondientes a las tensiones geostáticas horizontales y verticales al finalizar la aplicación de la carga de gravedad. Respecto de la fase dinámica, el análisis de resultados está enfocado en el comportamiento de tres variables en función del tiempo, las cuales consisten en los desplazamientos, velocidades y deformaciones volumétricas.

En la Figura 10 se muestra de forma general el comportamiento que tiene cada material durante toda la duración del evento sísmico. En color azul se muestra el Material 1, en color celeste el Material 2 y en color rojo el Material 3.

De manera adicional, se define un conjunto de puntos materiales representativos de los Materiales 1 y 2, con el fin de realizar un seguimiento del comportamiento de los

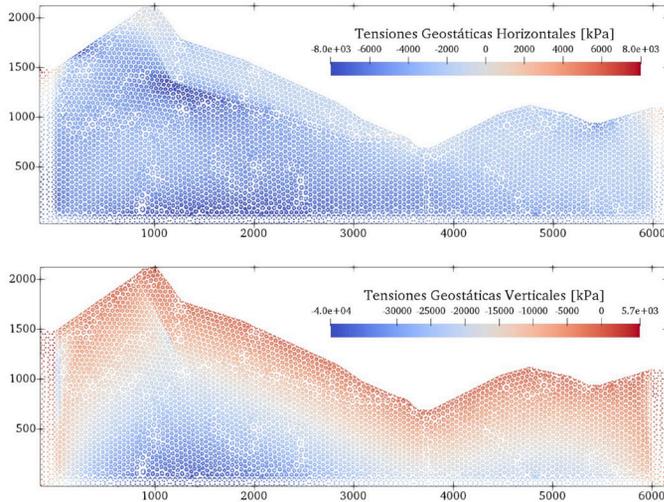
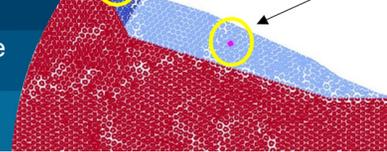


Figura 9: Tensiones geostáticas Etapa 1. Aplicación de la carga de gravedad.

desplazamientos presentados por dichos materiales durante todo el cálculo. Estos conjuntos de puntos representativos se definen en la zona central de la respectiva superficie que abarca tanto el Material 1 como el Material 2. A

continuación se presenta la Figura 11 que muestra los puntos seleccionados.

Los resultados mostrados en la Figura 12 indican que los desplazamientos máximos horizontales son aproximadamente 1237 m para el Material 1 y de 1450 m para el Material 2, además se observa entre ambos materiales una distancia total de material desplazado de aproximadamente 3500 m. También, se registraron velocidades máximas horizontales de aproximadamente 43 m/s para ambos materiales, alcanzadas alrededor de los primeros 25 a 30 s de iniciado el deslizamiento. Adicionalmente, se obtuvo una acumulación de deformaciones volumétricas en la zona del valle de Huangdongzi, específicamente en la interface de la superficie de contacto.

Conclusiones

Teniendo en consideración la magnitud de los resultados, se observa que el sismo es suficiente para generar la falla,

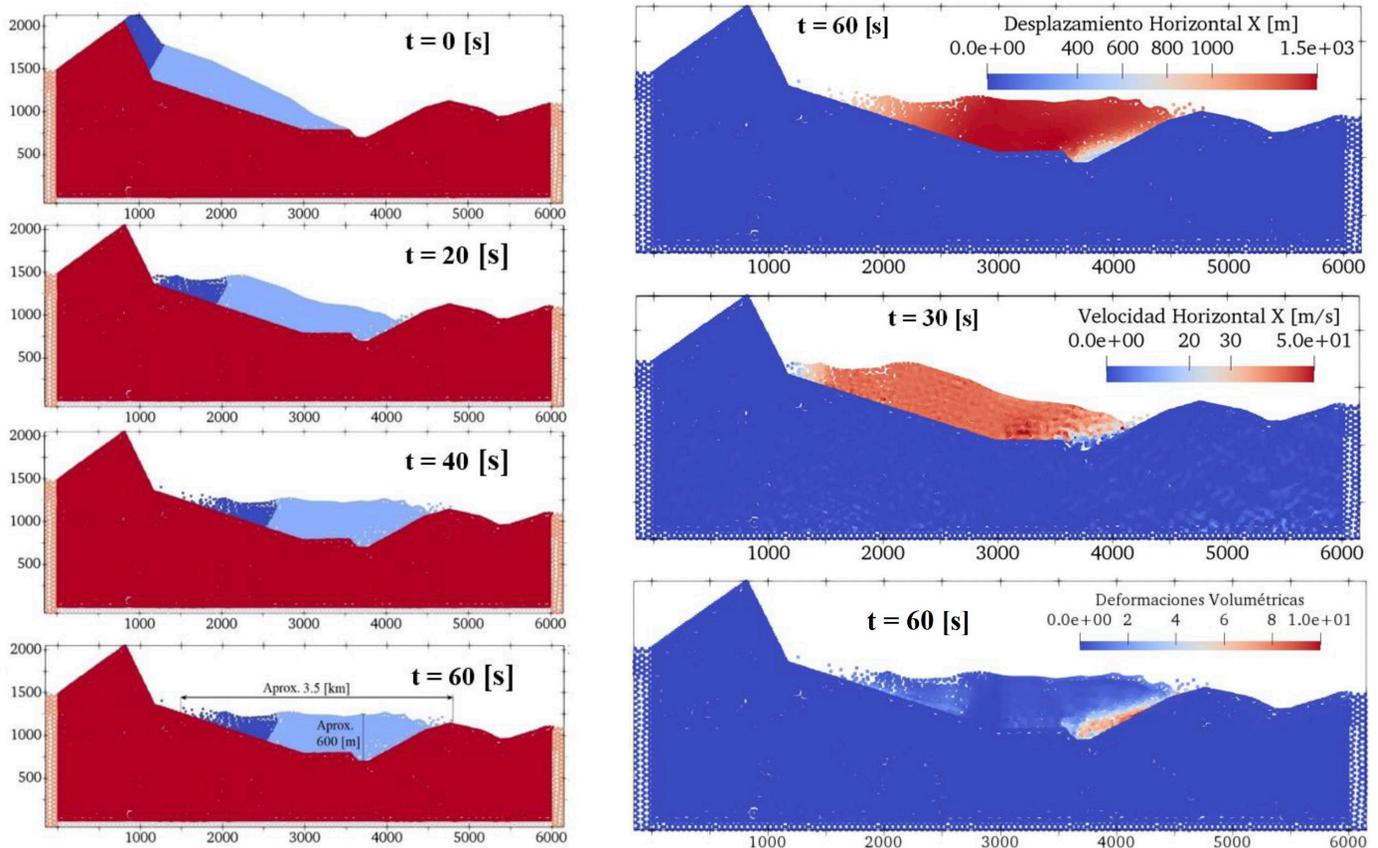


Figura 10: Evolución del deslizamiento posterior a la falla (fase dinámica).

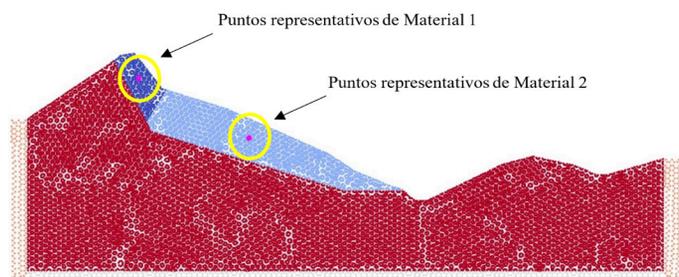


Figura 11: Conjuntos de Puntos Materiales seleccionados para cada material.

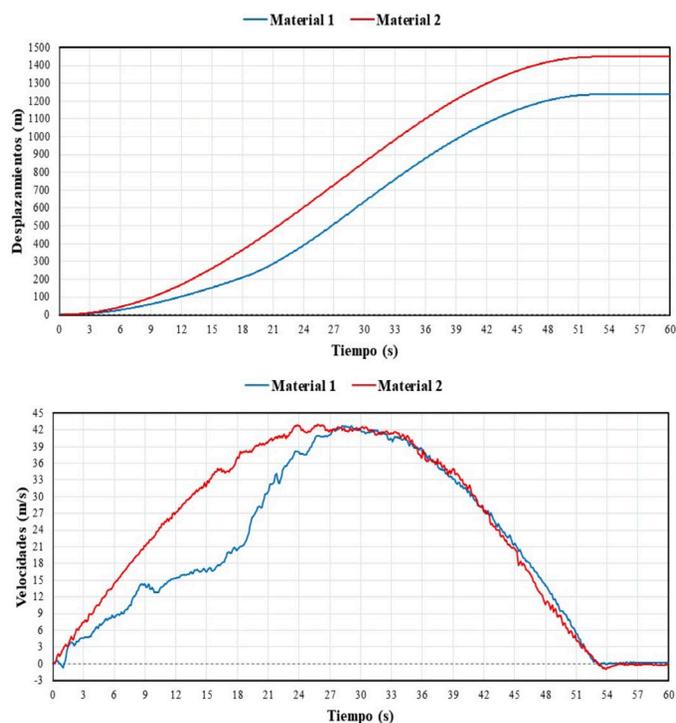


Figura 12: Desplazamientos y velocidades respecto de los puntos de control.

resultando en desplazamientos del orden de kilómetros y velocidades superiores a los 150 km/h (~ 42 m/s). Además, se puede concluir que estos resultados reafirman la categoría de deslizamiento masivo y catastrófico que se asigna a Daguangbao. Esto realza el peligro que representan este tipo de deslizamientos cuya ocurrencia puede provocar graves daños en infraestructuras e incluso la pérdida de vidas humanas. Un aspecto también relevante son las velocidades calculadas en el modelo, las cuales como se indica son de gran magnitud, por tanto, el deslizamiento también puede clasificarse, desde este punto de vista, como un deslizamiento rápido.

Por otro lado, si bien los resultados obtenidos están dentro de los rangos esperados, la precisión de la

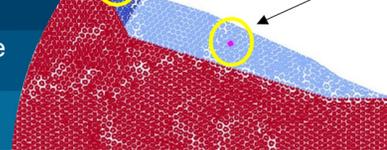
modelación realizada podría mejorar llevando a cabo dicha modelación de manera tridimensional, opción que se descartó inicialmente debido a la complejidad y los altos requerimientos computacionales asociados. Se debe indicar también que la modelación de deslizamientos masivos con características catastróficas, corresponde a una línea de investigación activa dentro de la ingeniería geotécnica, que intenta avanzar en el conocimiento de: mecanismos de falla desencadenantes; la dinámica de los deslizamientos; y la predicción y/o modelación de este tipo de problemas. Esto con el objetivo de poder generar información relevante para las actualizaciones de los planes de urbanización territorial, medidas de protección y/o mitigación, así como también monitoreo en tiempo real. En cuanto al proceso fenomenológico de los deslizamientos masivos catastróficos, en este trabajo se ha podido capturar la dinámica de estos, respecto de las velocidades que pueden alcanzar y los volúmenes de material movilizado. Sin embargo, el proceso físico que explique el aumento repentino de las velocidades es actualmente materia de investigación y se instala como futuras líneas de trabajo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería en Obras Civiles de la Universidad de La Serena por el apoyo brindado en este trabajo. El autor Luis Lemus agradece a ANID del Gobierno de Chile por la Beca de doctorado en el extranjero (CONICYT-PCHA/Doctorado Internacional/2017-72180231).

Referencias

- Al-Kafaji, I.K.J. (2013). *Formulation of a Dynamic Material Point Method (MPM) for Geomechanical problems*. PhD thesis, Stuttgart University, Germany
- Alonso, E.E. (2021). Triggering and motion of landslides. *Géotechnique* 71(1), 3-59
- Alsardi, A. and Yerro, A. (2023). Coseismic site response and slope instability using periodic boundary conditions in the material point method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 15(3), 641-658
- Andersen, S. and Andersen, L. (2010). Modelling of landslides with the material-point method. *Computational Geosciences* 14(1):137-147



- Angeli, M.G., Gasparetto, P., Menotti, R.M., Pasuto, A. and Silvano, S. (1996). A visco-plastic model for slope analysis applied to a mudslide in Cortina d'Ampezzo, Italy. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* **29**(3), 233-240
- Beuth, L. (2012). *Formulation and application of a quasi-static material point method*. PhD thesis, Stuttgart University, Germany
- Jassim, I., Stolle, D. and Vermeer, P. (2013). Two-phase dynamic analysis by material point method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* **37**(15), 2502–2522
- Kohler, M., Stoecklin, A. and Puzrin, A.M. (2022). A MPM framework for large-deformation seismic response analysis. *Canadian Geotechnical Journal* **59**(6), 1046-1060
- Pinyol, N.M., Alvarado, M., Alonso, E.E. and Zabala, F. (2018). Thermal effects in landslide mobility. *Géotechnique* **68**(6), 528-545
- Prieto, A.F., Cantor, L.C. and Rodríguez, C.E. (2020). Modelo de bloque deslizante para analizar el comportamiento cinemático de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite. *Obras y Proyectos* **27**, 64-77
- Song, Y., Huang, D. and Cen, D. (2016). Numerical modelling of the 2008 Wenchuan earthquake triggered Daguangbao landslide using a velocity and displacement dependent friction law. *Engineering Geology* **215**, 50-68
- Sulsky, D., Chen, Z. and Schreyer, H.L. (1994). A particle method for history-dependent materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **118**(1-2), 179-196
- Sulsky, D. and Schreyer, H.L. (1996). Axisymmetric form of the material point method with applications to upsetting and Taylor impact problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **139**(1-4), 409-429
- Wieckowski, Z. (2004). The material point method in large strain engineering problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **193**(39-41), 4417–4438
- Yerro, A., Alonso, E. and Pinyol, N. (2013). The Material Point Method: A promising computational tool in Geotechnics. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, France, 853–856
- Zabala, F. and Alonso, E.E. (2011). Progressive failure of Aznalcóllar dam using the material point method. *Géotechnique* **61**(9), 795–808
- Zhang, Y., Zhang, J., Chen, G., Zheng, L. and Li, Y. (2015). Effects of vertical seismic force on initiation of the Daguangbao landslide induced by the 2008 Wenchuan earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **73**, 91-102