

Análisis experimental y numérico del oleaje producido por la inestabilidad de laderas de embalses

R.M. Alves, R. Morán, M.Á. Toledo

*Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y Medio Ambiente.
Universidad Politécnica de Madrid. ETSI de Caminos, Canales y Puertos. 28040 Madrid.*

J. Irazábal, F. Salazar, A. Larese

*Centre Internacional de Metodes Numerics en Enginyeria (CIMNE)
Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Norte. CIMNE Edificio C1. 08034 Barcelona.*

1. Introducción

El fenómeno del oleaje causado por deslizamientos de laderas de embalse un escenario formado por dos procesos, uno de tipo geo-mecánico y otro, hidrodinámico. El primero está relacionado con el origen de la inestabilidad de la ladera y las características del deslizamiento mientras que el segundo se refiere fundamentalmente a la generación del oleaje y su propagación, dependiendo el proceso hidrodinámico del geo-mecánico así como de las características del embalse.

El efecto inmediato de un deslizamiento de ladera sobre una superficie de agua estática es la generación de un tren de olas que se propaga tridimensional o bidimensionalmente de acuerdo a las condiciones del cuerpo que delimita el agua, pudiendo describirse el proceso en cinco etapas: desprendimiento del material de ladera, generación de ola, propagación de ola, interacción con embalse y márgenes y propagación de onda aguas abajo y efecto sobre estructuras (Garrote and Laguna 2007).

Para estudiar este fenómeno, se ha realizado una campaña de ensayos en modelo físico en el Laboratorio de Hidráulica de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos de la UPM. Se han utilizado materiales con diferentes grados de fragmentación, variando parámetros como la pendiente del plano de deslizamiento y la altura de agua en el embalse. El principal objetivo de esta campaña consiste en analizar la influencia del grado de fragmentación del material deslizado sobre las características del oleaje generado.

En paralelo, se han desarrollado herramientas de cálculo numérico para simular el fenómeno. La modelación numérica del proceso completo es compleja, por la necesidad de considerar de forma acoplada las cinco etapas definidas anteriormente. A ello se suma que el deslizamiento puede presentar características geo-mecánicas muy diversas: puede ser un

único bloque, que se puede modelar como un sólido rígido, un conjunto de bloques de diversos tamaños (avalancha) o un material cohesivo con cierto contenido de humedad. Por tanto, resulta crítico seleccionar un modelo constitutivo adecuado a las propiedades del material en cuestión.

En todos los casos, se ha utilizado el método de partículas y elementos finitos (PFEM), que permite considerar la interacción fluido-suelo-partículas, así como la afección de elementos a estructuras (Oñate et al. 2011). Además, los materiales representados como medios continuos pueden considerarse con diferentes leyes de comportamiento.

En particular, se ha desarrollado un nuevo modelo constitutivo, similar al modelo de Bingham, con la particularidad de que la tensión de fluencia depende de la presión a través de un criterio de Mohr-Coulomb sin cohesión. La ventaja de este enfoque es que se basa únicamente en las propiedades geo-mecánicas del material deslizado (Larese et al. 2012).

2. Modelación física

2.1 Instalaciones de ensayo

Se ha construido una piscina de ensayos con 602 cm de longitud, 445 cm de anchura máxima, 294 cm de anchura mínima y 85 cm de profundidad. La rampa de deslizamiento es de aluminio, tiene la forma rectangular con 285 cm de longitud y 150 cm de ancho y reposa sobre un apoyo telescópico que permite la modificación del ángulo de deslizamiento. Una compuerta con 50 cm de altura y 150 cm de anchura colocada a 62 cm de la extremidad superior de la rampa permite una apertura rápida definiendo así espacial y temporalmente el inicio del deslizamiento. Una caja de aluminio con $60 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ se ha usado para acopiar el material más fragmentado.



Figura 1. Vista general de las instalaciones de ensayo.

2.2 Materiales ensayados

Para simular diferentes grados de fragmentación del material deslizado se han usado tres tipos de material: no fragmentado (M1), ligeramente fragmentado (M2) y muy fragmentado (M3). Para el material M1 se ha usado un bloque de hormigón (2.434 kg/m^3) con $60 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ mientras que el material M2 ha consistido en la misma pieza de hormigón dividida en 8 cubos. Para el material M3 se ha usado un material granular con diámetro medio (D_{50}) de

1,25 cm y coeficiente de uniformidad ($C_u=D_{60}/D_{10}$) de 1,55. La curva granulométrica del material granular se detalla en la Tabla 1. El material granular tiene una densidad seca de 1.458 kg/m^3 y una densidad de las partículas sólidas de 2.565 kg/m^3 . La porosidad y el índice de huecos son respectivamente de 41 y 69%. En la Figura 2 se muestran los materiales usados durante la campaña de ensayos en modelo físico.

Tamaño (mm)	14,00	13,00	12,50	12,00	10,00	8,00	6,35
Material pasado en peso (%)	100,00	65,03	43,92	22,82	18,6	8,11	4,76
Tamaño (mm)	5,00	4,00	3,20	2,50	2,00	1,00	0,50
Material pasado en peso (%)	3,18	2,23	1,90	1,56	1,41	1,11	0,00

Tabla 1. Datos granulométricos del material granular usado en los ensayos.



Figura 2. Materiales usados durante la campaña de ensayos en modelo físico. Material no fragmentado y ligeramente fragmentado (izquierda) y material muy fragmentado (derecha).

2.3 Mediciones

El oleaje se ha registrado mediante ocho sondas de nivel parcialmente sumergidas ubicadas en diferentes puntos de la piscina de ensayos que miden la corriente eléctrica en las varillas de acero inoxidable que las forman, conectadas al equipo Wave gauge system de HR Wallingford. Las sondas se han colocado sobre cinco guías cuyos ejes formaban ángulos de 0° , 15° , 30° , 45° y 60° con el eje longitudinal de la piscina de ensayos. Juntamente se han definido seis radios concéntricos que interceptan las guías espaciados 50 cm y sobre los cuales se ubican las ocho sondas. Los radios se han identificado del R1 al R6 y las guías de la G1 a la G5. La Figura 3 muestra la ubicación de las sondas de nivel en la piscina de ensayos.

2.4 Procedimiento de ensayo

Durante la campaña de ensayos en modelo físico, para cada uno de los materiales descritos anteriormente se ha variado el ángulo de la rampa de deslizamiento y la altura de agua en la piscina. Se han ensayado tres ángulos de deslizamiento (α), 35° , 40° y 45° y cuatro alturas de

agua (h), 30, 40, 50 y 60 cm. En total se han realizado treinta y seis ensayos, doce por cada ángulo de deslizamiento, doce por cada tipo de material y nueve por cada altura de agua.

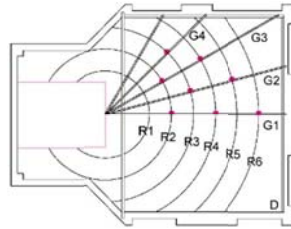


Figura 3. Ubicación de las sondas de nivel en la piscina de ensayos.

2.5 Resultados de la modelación física

El efecto del grado de fragmentación del material se ha analizado sobre las amplitudes de las dos primeras crestas del tren de olas. La altura máxima de onda (H) se asumió como la suma de amplitud de la primera depresión y el valor máximo de la amplitud entre las dos primeras crestas. Las longitudes de onda (L) se estimaron teniendo en cuenta dos celeridades dependiendo de la distancia al punto de impacto (x). Se usó la amplitud de la primera cresta registrada en las tres sondas situadas en la guía $G1$ y se aplicó el siguiente criterio a las demás sondas: radios del $R1$ al $R3$ se aplica la celeridad media entre las sondas $G1R2$ y $G1R4$; radios del $R4$ al $R6$ se aplica la celeridad media entre las sondas $G1R4$ y $G1R6$.

La mayoría de las ondas observadas son no lineales variando $0,031 < H/h < 0,459$, $0,0067 < H/L < 0,1085$ y $0,388 < U < 38,135$. Ondas lineales se definen para $H/h < 0,03$ y $H/L < 0,006$ (Heller 2007) resultando en números de Ursell (U) que tienden a cero (Fritz 2002). Para valores de $U < 10$ es aplicable la teoría de ondas tipo Stokes (Heller 2007). Para valores de $10 \leq U \leq 25$ son aplicables la teoría de Stokes y de ondas cnoidal (Sorensen 1993). El 86% de las ondas no lineales registradas en todas las sondas tienen valores de $U < 10$. Las ondas Stokes varían entre $2 \leq L/h \leq 20$ (Le Méhauté 1976) y para $L/h \leq 10$ (Keulegan 1950) variando las observaciones experimentales en el rango $3,1 \leq L/h \leq 8,8$. Aproximadamente el 9% de los datos cae entre $10 \leq U \leq 25$ variando el ratio L/h entre 4,8 y 9,4.

En la Figura 4 (izquierda) se muestra la variación del nivel del agua (η) con respecto a h para las tres sondas situadas sobre $G1$ siendo $X=x/h$. El tren de ondas registrado en la sonda $G1R2$ tiene valores de $H/h=0,100$, $H/L=0,023$ y de $U=1,919$. En la sonda $G1R4$ estos parámetros toman los valores 0,068, 0,015 y 1,366 y en la sonda $G1R6$ de 0,020, 0,004 y 0,418. Entre las amplitudes de las dos primeras crestas se observa que en la mayoría de los casos la segunda fue superior a la primera como se ve en la Figura 4 (derecha).

En Figura 5 se muestran algunos de los resultados obtenidos durante los ensayos. Se muestra la variación de la amplitud de la primera cresta registrada en cada ensayo y sonda con respecto a h (primera fila izquierda), a x (primera fila derecha), a la distancia de deslizamiento d (segunda fila izquierda) y a la velocidad de impacto v_s (segunda fila derecha), desglosando por tipo de material ensayado.

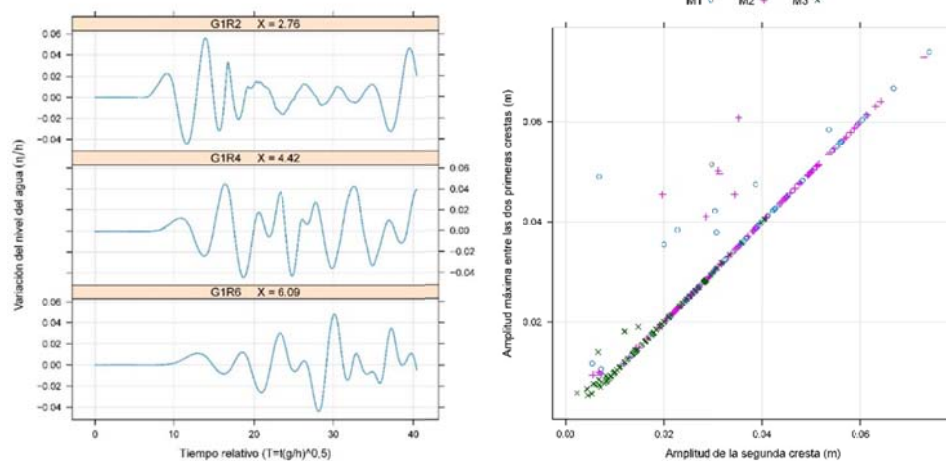


Figura 4. Tren de olas registrado en G1R2, G1R4 y G1R6 para $\alpha=45^\circ$, $h=60$ cm y M3 (izquierda). Amplitud de la segunda cresta vs. Amplitud máxima entre las dos primeras crestas (derecha).

De un modo general se puede observar que para mayores valores de h y x la amplitud de la primera cresta tiende a disminuir. En el primer caso la relación aparenta ser lineal mientras que en el segundo caso parece ser no lineal. Relativamente a d y a v_s se ha observado una relación directamente proporcional.

Los materiales M1 y M2 dan resultados semejantes a pesar de poder observarse amplitudes ligeramente superiores por parte del material M1. El material M3 resulta en amplitudes significativamente inferiores a los dos materiales anteriores. Mayores grados de dispersión se han observado para los materiales M1 y M2 comparativamente al material M3.

Con respecto la amplitud de la segunda cresta se ha observado el mismo comportamiento relativamente a los parámetros analizados aumentando, sin embargo, el grado de dispersión.

3. Modelación numérica

La modelación numérica del proyecto XLIDE se ha basado en el método de partículas y elementos finitos (PFEM), desarrollado en CIMNE y al que se han añadido funcionalidades específicas para el análisis de la generación de olas por deslizamiento (Salazar et al, 2015). Este enfoque tiene la ventaja de considerar de una forma natural la interacción entre el deslizamiento y la masa de agua, ya que la malla de elementos finitos varía a lo largo del cálculo, adaptándose a la posición de ambos materiales.

Muchos de los deslizamientos rápidos, que son los susceptibles de generar olas, se comportan como un fluido viscoso. Otros tienen características más propias de un material visco-plástico. En éstos, el umbral para el cese del movimiento es función de la viscosidad y

resistencia al corte del material: no sólo es un fluido más viscoso que el agua, sino que su viscosidad es variable y depende de la resistencia al corte.

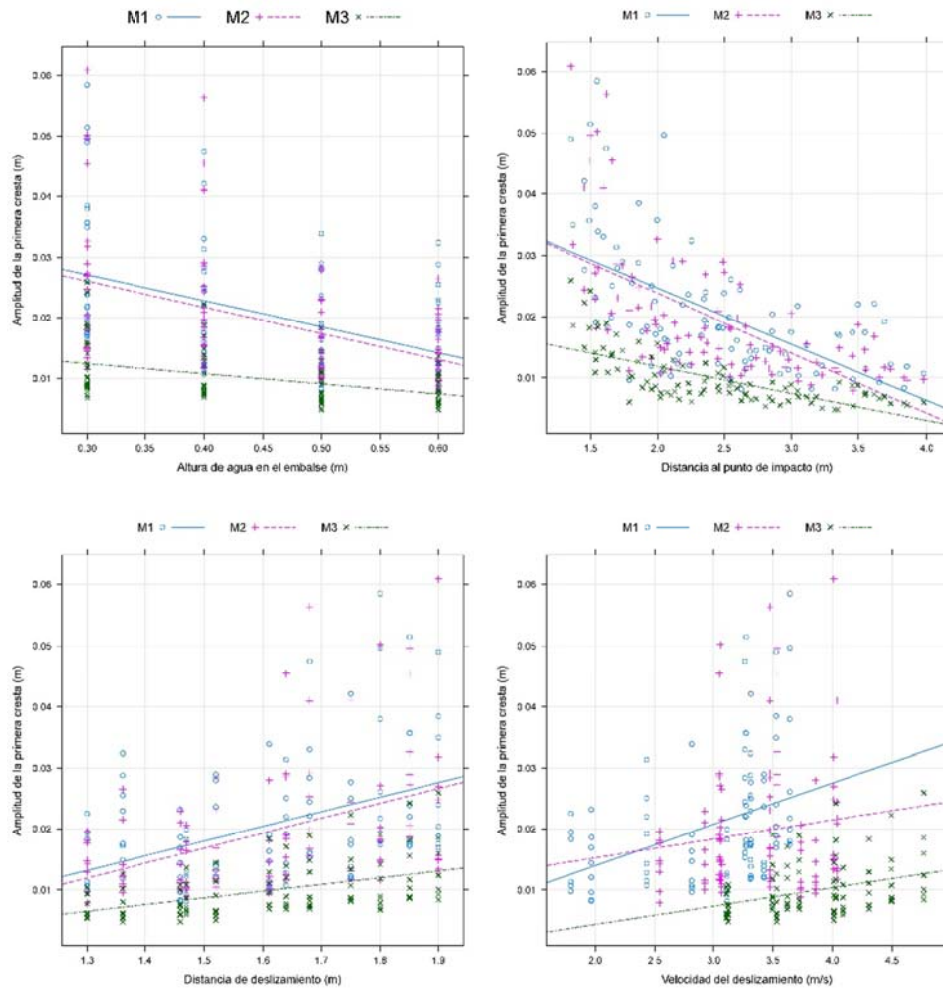


Figura 5. Variación de la amplitud de la primera cresta con h (primera fila izquierda), con x (primera fila derecha), con d (segunda fila izquierda) y v_s (segunda fila derecha), desglosando por material.

Podemos entonces concluir que en el caso general serán necesarios diferentes modelos constitutivos: el agua y algunos deslizamientos que se comporten propiamente como un fluido se tratarán como fluidos newtonianos, mientras que los deslizamientos cuya viscosidad dependa de la tensión cortante se modelarán como fluidos no-newtonianos. Además, los deslizamientos de bloques se considerarán sólidos rígidos que se mueven bajo la acción de la gravedad y que interactúan con la masa de agua.

3.1 Modelación numérica de casos reales de deslizamientos de laderas y de modelos físicos

Las tareas de calibración y validación de un modelo numérico que son típicamente necesarias durante el desarrollo del mismo para el análisis de cualquier fenómeno, en este caso resultan singulares. Debido a la gran variabilidad de comportamientos posibles de la masa deslizada, no es posible seguir un proceso único de calibración de los parámetros, sino que depende de las características propias del caso a analizar, y del modelo constitutivo empleado. Este proceso se ha descrito en casos de estudio publicados previamente donde se simulan casos reales y ensayos en laboratorio (Salazar, Oñate, and Morán 2012; Salazar et al. 2015).

3.2 Reproducción de la campaña de ensayos realizada en el ámbito del proyecto XLIDE

La geometría del recinto de ensayos y de la masa deslizada es bien conocida, con lo que puede trasladarse convenientemente al modelo numérico. La dificultad proviene de la relación entre la precisión requerida (centimétrica) y las dimensiones del dominio (del orden de metros), que es pequeña. Lo primero determina el tamaño de malla y lo segundo el número de elementos. En el caso general, se ha utilizado el dominio completo con un tamaño de malla variable a lo largo de la geometría del tanque.

En los resultados preliminares con el dominio completo se pudo observar que cuando la velocidad de entrada del bloque es elevada ($\alpha = 40^\circ$ y $\alpha = 45^\circ$), los resultados experimentales presentan formas irregulares del paso de la ola, principalmente en los sensores más próximos y en el primer máximo. En los ensayos se aprecia que en estos casos el impacto produce salpicaduras que saltan sobre los sensores, lo que puede perturbar la medición. Como alternativa, en estos casos se ha utilizado una malla más fina, sobre un dominio reducido.

En el caso del material granular, debido a las características del ensayo (granulometría, pendiente, cantidad de material), el impacto con la masa de agua es suave y la ola generada de poca entidad (del orden de 2 cm). Ello hace necesario utilizar una malla más pequeña y por tanto el dominio reducido.

El bloque (M1) se ha definido como un cuerpo rígido que se mueve en la dirección principal de la rampa. Para definir su movimiento se ha especificado la posición de su centro de gravedad en cada instante. Dentro del agua no se conoce con detalle el movimiento del bloque, por lo que en el modelo numérico se ha asumido que se mueve con velocidad constante desde el momento en que entra en contacto con la superficie del agua hasta que llega al fondo, momento en el que frena en seco.

Con respecto a la cinemática del material granular (M3) se ha realizado un ensayo previo dejando caer el material granular por la rampa inclinada a 30° en ausencia de agua. El

comportamiento del material en esa simulación ha permitido calibrar los parámetros del modelo constitutivo utilizado.

El material granular se ha planteado como un fluido, en algunos casos Newtoniano y en otros como un fluido de Bingham. Durante el proceso de calibración se varió la viscosidad en los fluidos Newtonianos y la viscosidad (μ), la tensión de fluencia (τ_0) y el parámetro regularizador (m) en los fluidos de Bingham. El parámetro regularizador evita las indeterminaciones numéricas que aparecerían si se utilizase el modelo de Bingham ideal (Larese 2012). A la vista de los resultados, se adoptaron unos valores de $\mu=0,5$ Pa s, $\tau_0=5$ Pa y $m=5$. En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos en algunos de los sensores en el caso con un $\alpha = 45^\circ$, $h = 60$ cm y usando el material M1, que son representativos de la campaña.

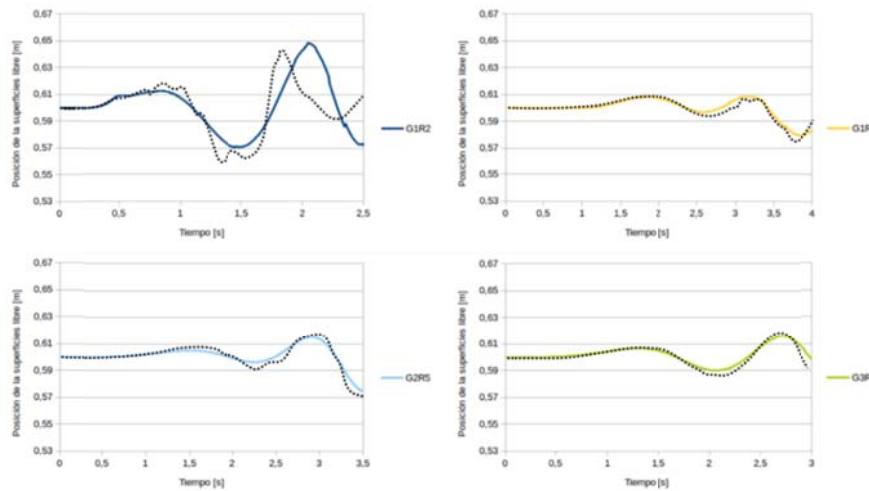


Figura 6. Comparación entre los resultados numéricos (línea continua) y experimentales (línea discontinua) para el caso con $\alpha=45^\circ$, $h=60$ cm y M1.

Se observa que el modelo numérico reproduce con gran precisión los resultados obtenidos en los sensores más alejados del impacto (G1R6, G2R5 y G3R4). La precisión es menor en los puntos más próximos (G1R2) en dos sentidos: a) la primera ola registrada en laboratorio presenta formas irregulares, mientras que en el modelo numérico es suave y b) hay discrepancia en la segunda ola, tanto en fase como en amplitud en algunos sensores.

El primer aspecto responde a las salpicaduras ya mencionadas. En cuanto a la segunda ola, está condicionada por el impacto de parte de la masa de agua que es desplazada por el bloque, cae sobre éste rellenando el hueco que deja y provoca un segundo máximo, que además es de mayor amplitud que el primero. Se trata en ambos casos de fenómenos locales, que conviene analizar con detalle en estos casos de prueba, pero que son muy poco

relevantes en un caso real, donde las afecciones se producen por el alcance del tren de olas en puntos relativamente alejados del impacto.

En los casos de deslizamiento granular, la geometría del ensayo hace que el impacto contra la masa de agua sea progresivo y a velocidad moderada y, por tanto, la ola generada es muy pequeña en relación con el dominio de análisis. En este caso, resulta más interesante la comparación de la velocidad del material en el momento del impacto. Se ha utilizado un modelo de Bingham con los parámetros definidos anteriormente. Con estos parámetros del material, la discrepancia entre los resultados numéricos y experimentales en cuanto a velocidad de impacto es inferior a un 10% en todos los casos (con diferentes inclinaciones de la rampa), como se observa en la Tabla 2.

Inclinación (°)	35	35	35	35	40	40	40	40	45	45	45	45
Altura de agua (cm)	30	40	50	60	30	40	50	60	30	40	50	60
Vel. impacto exp. (m/s)	3,5	3,6	3,1	3,1	4,0	3,7	4,0	3,7	4,8	4,5	4,3	4,1
Vel. impacto num. (m/s)	3,8	3,4	3,2	3,1	4,2	4,0	4,0	3,9	4,5	4,4	4,3	4,2

Tabla 2. Comparación numérico-experimental de las velocidades de impacto.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones de la campaña de ensayos en modelo físico realizada en el ámbito del proyecto XLIDE son las siguientes:

- El grado de fragmentación del material deslizado influye en las amplitudes de las dos primeras olas. En general, para mayores grados de fragmentación, menores han sido las amplitudes de la primera y segunda ola.
- Ambas amplitudes se atenúan cuanto mayor es la distancia al punto de impacto. El mismo comportamiento se ha observado para mayores profundidades de agua en el embalse.
- Ambas amplitudes se incrementan para mayores valores de la velocidad de impacto y de las distancias de deslizamiento.

En cuanto a la modelación numérica, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- En los casos de deslizamiento en bloque con velocidad moderada (menor de 3 m/s), el modelo numérico reproduce adecuadamente las dos primeras olas, tanto en amplitud como en fase, en especial en los sensores más alejados del punto de impacto. Esto avala la aplicabilidad del modelo en casos reales de grandes masas de agua, donde en general interesa evaluar las afecciones fuera de la zona de impacto.
- Cuando el deslizamiento en bloque impacta con velocidad alta, la discrepancia entre experimento y modelo aumenta, probablemente debido al efecto de chorreones y salpicaduras. Los resultados mejoran con malla fina.

- El movimiento del material granular se ha reproducido convenientemente con un modelo de Bingham tras un proceso de calibración de los parámetros.

Agradecimientos

Este trabajo se integra en el proyecto de investigación XLIDE (IPT-2011-1287-370000), del subprograma INNPACTO del Plan Nacional de I+D financiado por el MINECO.

Referencias

Fritz, H.M. 2002. "Initial Phase of Landslide Generated Impulse Waves." Swiss Federal Institute of Technology Zürich.

Garrote, L., and F. Laguna. 2007. "Generación de Olas Por Deslizamiento." In Jornadas Técnicas Sobre Estabilidad de Laderas En Embalses. Zaragoza.

Heller, Valentin. 2007. "Landslide Generated Impulse Waves: Prediction of near Field Characteristics." Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

Keulegan, G.H. 1950. Wave Motion. Engineering Hydraulics. New York: Wiley.

Larese, A. 2012. "A Coupled Eulerian-PFEM Model for the Simulation of Overtopping in Rockfill Dams." Universitat Politècnica de Catalunya.

Larese, A., R. Rossi, E. Oñate, and S. R. Idelsohn. 2012. "A Coupled PFEM-Eulerian Approach for the Solution of Porous FSI Problems." Computational Mechanics 50 (6): 805–19.

Le Méhauté, B. 1976. An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves. New York: Springer.

Oñate, Eugenio, Miguel Angel Celigueta, Sergio R. Idelsohn, Fernando Salazar, and Benjamín Suárez. 2011. "Possibilities of the Particle Finite Element Method for Fluid-Soil-Structure Interaction Problems." In Computational Mechanics, 48:307–18.

Salazar, F., J. Irazábal, A. Larese, and E. Oñate. 2015. "Numerical Modelling of Landslide-Generated Waves with the Particle Finite Element Method (PFEM) and a Non-Newtonian Flow Model." International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics (enviado).

Salazar, F., E. Oñate, and R. Morán. 2012. "Modelación Numérica de Deslizamientos de Ladera En Embalses Mediante El Método de Partículas Y Elementos Finitos (PFEM)." Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo Y Diseno En Ingenieria 28 (2): 112–23.

Sorensen, R.M. 1993. Basic Wave Mechanics: For Coastal and Ocean Engineers. John Wiley & Sons.