

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## MODELACIÓN NUMÉRICA DE DESLIZAMIENTOS DE LADERA EN EMBALSES MEDIANTE EL MÉTODO DE PARTÍCULAS Y ELEMENTOS FINITOS (PFEM)

**Fernando Salazar<sup>1</sup>**

**Rafael Morán<sup>2</sup>**

**Miguel Ángel Toledo<sup>3</sup>**

**Daniel Rodríguez<sup>4</sup>**

**Eugenio Oñate<sup>5</sup>**

*RESUMEN: Se presentan resultados preliminares obtenidos mediante la aplicación del método de partículas y elementos finitos (PFEM) en la simulación de deslizamientos de ladera en embalses. Es un fenómeno complejo, por la interacción entre el material deslizado, la masa de agua del embalse, y la presa. PFEM es un esquema numérico original con el que se ha afrontado con éxito la resolución de problemas de interacción fluido-estructura. Combina un enfoque lagrangiano con la resolución de las ecuaciones de elementos finitos mediante la generación de una malla, que se actualiza en cada paso de tiempo. Los resultados presentados corresponden a unos casos simplificados que se han comparado con ensayos en laboratorio disponibles en la bibliografía técnica. Se muestran también los resultados de la modelación tridimensional del deslizamiento ocurrido en Lituya Bay (Alaska) en 1958. Una vez calibrados y validados experimentalmente, los modelos PFEM pueden ser una herramienta útil en el análisis de riesgos frente a este tipo de fenómenos, ofreciendo una buena aproximación de las afecciones potenciales, lo que puede servir de ayuda a las administraciones y organismos explotadores de las presas.*

---

<sup>1</sup> Ingeniero de Caminos, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)

<sup>2</sup> Ingeniero de Caminos, UPM

<sup>3</sup> Doctor Ingeniero de Caminos, UPM

<sup>4</sup> Ingeniero Industrial, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)

<sup>5</sup> Doctor Ingeniero de Caminos, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)

## 1. INTRODUCCIÓN

Suele utilizarse el término deslizamiento de ladera para referirse a un buen número de fenómenos de diferente naturaleza, por la velocidad con que se producen (desde centímetros por año hasta metros por segundo), por la naturaleza de los materiales involucrados (rocas, material granular, coladas de barro, etc.), y por las causas que lo provocan (meteorización, erosión interna, variación del nivel freático, etc.).

Los deslizamientos de ladera son fenómenos que a lo largo de la historia han provocado la rotura de varias presas y la pérdida de un gran número de vidas humanas. Aunque la probabilidad de ocurrencia es muy baja, su importancia en lo referente a pérdidas humanas y materiales es importante, constituyendo el tercer riesgo natural por víctimas, tras terremotos e inundaciones (Ayala, 2002).

El presente trabajo se centra en el análisis de los deslizamientos rápidos, que son los más peligrosos, por la ausencia de tiempo de aviso y evacuación de la población potencialmente afectada. No se analizan ni las causas que los provocan, ni se trata de predecirlos ni de estimar su probabilidad de ocurrencia. Se estudian las posibles consecuencias de un deslizamiento con características (geometría, material) definidas.

La herramienta utilizada para tal fin es un código de cálculo desarrollado en CIMNE durante los últimos años denominado PFLOW. Está basado en la técnica de partículas y elementos finitos (PFEM), y constituye un método innovador para el análisis de problemas de fluidos, así como para estudiar la interacción entre fluidos y estructuras. Puede encontrarse información detallada sobre los fundamentos del método en Larese *et al.* (2008), Idelsohn *et al.* (2006) y Oñate *et al.* (2004).

El código de cálculo se ha validado para su aplicación a diferentes problemas de ingeniería hidráulica, en concreto en ingeniería de presas (Larese *et al.*, 2008). Ya es posible modelar con él el movimiento de sólidos bajo la acción del agua, o el fenómeno de la erosión (Oñate *et al.*, 2008). Con esa base, se ha aplicado al análisis de diferentes casos de deslizamientos de ladera documentados en la bibliografía técnica, tanto de ensayos de laboratorio como de casos reales. Los resultados se presentan en la comunicación.

## 2. EL MÉTODO DE PARTÍCULAS Y ELEMENTOS FINITOS (PFEM)

En la técnica PFEM, tanto el dominio del fluido como del sólido se modelan utilizando una formulación Lagrangiana actualizada. Se utiliza el método de los elementos finitos (MEF) tradicional para resolver las ecuaciones de gobierno en ambos dominios, y para ello debe generarse una malla que los discretiza. Se destaca que los nodos que discretizan los dominios del fluido y del sólido pueden interpretarse como partículas cuyo movimiento se sigue durante la solución transitoria.

La calidad de la solución numérica depende, obviamente, de la discretización utilizada, como sucede en el MEF estándar. Con PFEM es posible definir diferentes tamaños de malla en diversas zonas del dominio de análisis, para

mejorar la solución en zonas donde ocurran grandes movimientos del fluido o de la estructura, o bien donde se quiera obtener mayor precisión.

Como se ha explicado, la formulación Lagrangiana permite seguir el movimiento de cada partícula individual del fluido (un nodo). Esto es útil para modelar la separación de las partículas del líquido del dominio principal del fluido y para seguir su movimiento como partículas individuales con una velocidad inicial y sometidas a las fuerzas de gravedad.

En resumen, una solución típica con el PFEM sigue las etapas siguientes:

1. Discretizar los dominios del fluido y de la estructura con una malla de elementos finitos. En este trabajo se utiliza un esquema de generación de malla innovador basado en una teselación extendida de Delaunay (Idelsohn *et al.*, 2003; 2004).

2. Identificar los contornos externos para los dominios del fluido y del sólido. En este trabajo se utiliza el método denominado Alpha Shape para la definición de los nodos del contorno.

3. Resolver las ecuaciones acopladas del movimiento Lagrangiano para los dominios del fluido y de la estructura. Calcular las variables de estado relevante en ambos dominios en cada paso de tiempo: las velocidades, la presión y las tensiones viscosas en el fluido, y los desplazamientos, las deformaciones y las tensiones en la estructura.

4. Mover los nodos de la malla a una nueva posición en función del tamaño del paso del tiempo. Esta etapa es típicamente una consecuencia del proceso de solución de la etapa 3.

5. Generar una nueva malla en caso necesario.

6. Volver a la etapa 2 y repetir el proceso de solución para el paso de tiempo siguiente.

### **3. APLICACIÓN DE PFEM AL ANÁLISIS DE DESLIZAMIENTOS DE LADERA EN EMBALSES**

#### **3.1. MOTIVACIÓN**

Por las características explicadas del método PFEM, parecía razonable pensar que era factible utilizarlo para estudiar el fenómeno de generación de olas por deslizamientos, su propagación y la afección producida sobre la presa. Para ello se planteó el trabajo seleccionando unos casos de validación de entre los múltiples existentes en la literatura técnica, que habían sido utilizados previamente con el mismo propósito.

De entre todos los eventos de generación de olas por deslizamiento, el más conocido en la comunidad científica y que ha sido objeto de más profundo análisis es sin duda el deslizamiento de Lituya Bay (Alaska). Es el caso en el que se produjo la máxima altura de ola conocida, que ascendió por la ladera opuesta hasta una cota máxima de 524 m. Muchos investigadores han estudiado este evento, no sólo por su magnitud, sino también por el hecho de que

puede estimarse con bastante precisión el alcance de la ola en los diferentes puntos de la bahía a partir de la marca de destrucción que dejó. Además, por la geometría del deslizamiento y de la bahía en la zona de impacto, se ha considerado aceptable estudiar el problema en dos dimensiones. Por último, la realización de ensayos bidimensionales en modelo reducido bien documentados ha permitido a los programadores de códigos numéricos utilizar los resultados para validación.

### 3.2. VALIDACIÓN BIDIMENSIONAL CON DESLIZAMIENTO GRANULAR

Para la primera validación del método se ha seleccionado el caso de Lituya Bay en su versión bidimensional. Como se ha indicado anteriormente, se trata del evento más estudiado en todo el mundo, con modelos tanto numéricos como físicos. Se ha seleccionado el modelo físico de Fritz *et al.* (2001), y el modelo numérico de Quecedo *et al.* (2004) para comparar los resultados obtenidos con PFEM.

En el ensayo de Fritz se analizó el deslizamiento mediante un canal prismático a escala 1:675. Teniendo en cuenta la geometría de la bahía, se consideró que la propagación lateral de la onda era poco importante, con lo que se podían esperar buenos resultados de un modelo bidimensional. La figura 1 muestra la geometría esquemática en que se basó el modelo físico, que es la utilizada en los modelos numéricos. En el modelo físico, el deslizamiento fue modelado mediante un material granular artificial de 4 mm de diámetro, con una densidad de  $2,64 \text{ t/m}^3$ , de acuerdo con la densidad estimada del material real.

El modelo de Quecedo *et al.* considera los tres medios involucrados (aire, agua y masa deslizada) por separado, como si fueran inmiscibles. Se repitió el cálculo modificando los valores de la densidad y del coeficiente de fricción, concluyendo que los resultados no varían de manera sustancial.

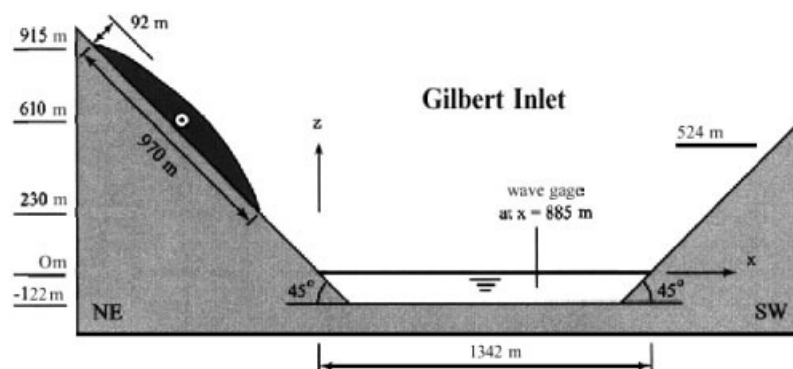


Figura 1. Geometría del análisis en dos dimensiones (fuente: Fritz *et al.*, 2001).

El cálculo con PFEM es más simplificado, porque la masa deslizada se trata como un fluido denso, y no se tiene en cuenta la presencia del aire. Los mejores resultados se han obtenido asignando al material deslizado una densidad de  $1,6 \text{ t/m}^3$ , que corresponden con la densidad real del material del ensayo, teniendo en cuenta el índice de huecos. En la tabla 2 se resumen los resultados de los tres modelos comparados. Las variables que se incluyen son las que se midieron en el modelo físico.

	Medido (Fritz)	Quecedo <i>et al.</i>	PFEM
Duración del deslizamiento (s)	7	9	9,5
Velocidad de impacto (m/s)	110	85	83
Longitud del deslizamiento en el momento del impacto (m)	748	1092	1052
Altura de ola máxima (m)	>200	226	234
Tiempo de ola máxima (s)	11	21	26,3
Coordenada x de la ola máxima (m)	600	600	814
Altura de ola en x=885	152	266	232
Tiempo de ola máxima en x=885 (s)	16	26,8	27,1

Tabla 2. Resultados de la modelación bidimensional del deslizamiento de Lituya Bay

La figura 2 muestra distintas imágenes de los modelos comparados. Puede apreciarse que el fenómeno físico se reproduce cualitativamente con el modelo numérico: la formación de la ola, la creación y posterior colapso de una cavidad en el trasdós de la ola, y el ascenso por la margen opuesta.

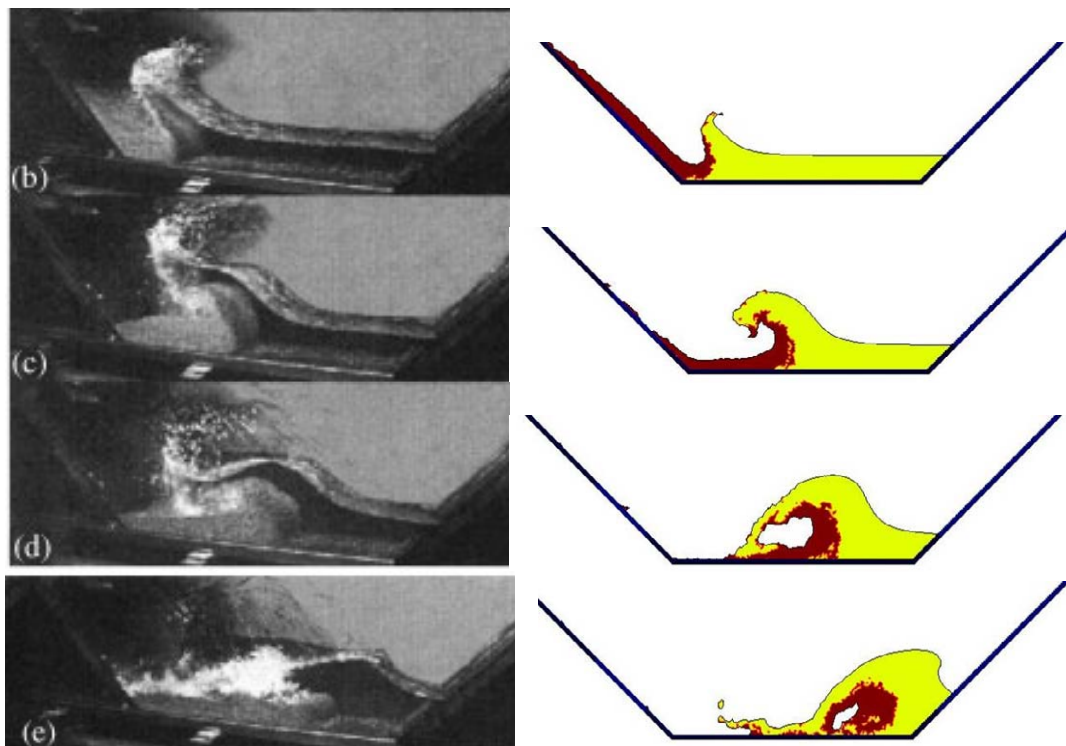


Figura 2. Resultados del modelo físico (izquierda) y del cálculo con PFEM (derecha) en instantes de tiempo correspondientes.

Sin embargo, las alturas de ola obtenidas difieren de manera apreciable, siendo las obtenidas con el modelo numérico mayores en todos los casos. Este hecho podría ser consecuencia de la no consideración de la mezcla agua-deslizamiento-aire, lo que hace que no se tenga en cuenta la disipación de energía que se produce. Otra causa de discrepancia es la cinemática del deslizamiento. En el modelo físico se utilizó un mecanismo para acelerar la masa y controlar su forma, mientras que en nuestro cálculo únicamente se deja caer la masa deslizada por acción de la gravedad. Ello se traduce en una diferencia

en la forma del deslizamiento en el momento del impacto.

### 3.3. VALIDACIÓN BIDIMENSIONAL CON DESLIZAMIENTO DE BLOQUES

El segundo experimento seleccionado para validación se ha tomado de Sælevik *et al.* (2009). Consiste en un canal prismático similar al descrito anteriormente. La diferencia principal estriba en la masa deslizada, que en este caso se reproduce mediante bloques rígidos que se aceleran sobre unos railes. En la figura 3 se muestra un esquema del experimento.

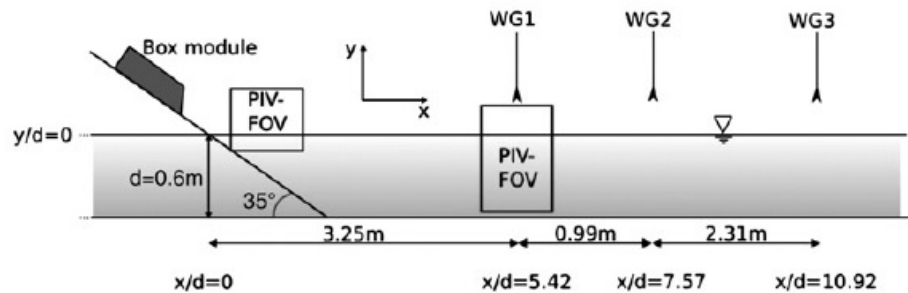


Figura 3. Experimento de Sælevik *et al.*, con la situación de las estaciones de medida.

Como en el caso anterior, se muestran los resultados mediante instantáneas comparativas (figura 4).

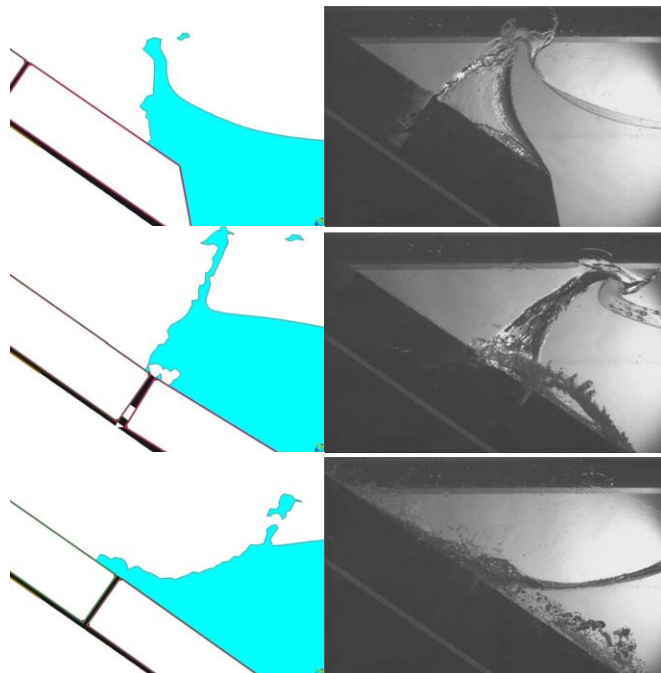


Figura 4. Comparación entre el resultado del PFEM (izquierda) y el modelo físico (derecha) en la fase de formación de la ola.

En este caso, además, se presentan en la figura 5 los gráficos comparativos de la evolución de la superficie libre en los puntos de medida.

Puede apreciarse que el modelo numérico reproduce los resultados del experimento, aunque se subestima la altura de ola. Hay que aclarar que el experimento no puede reproducirse con total fidelidad numéricamente, ya que únicamente se conoce una estimación de la velocidad de los bloques hasta el instante en que entran en el agua. Esta es la razón más probable de la discrepancia, especialmente la que se observa en el segundo máximo (ver gráfico correspondiente al sensor 1 de la figura 5).

No obstante, en este caso, en el que el deslizamiento se asemeja a un bloque rígido que desliza, PFEM también reproduce el fenómeno de generación de la ola y ofrece una aproximación al resultado del experimento.

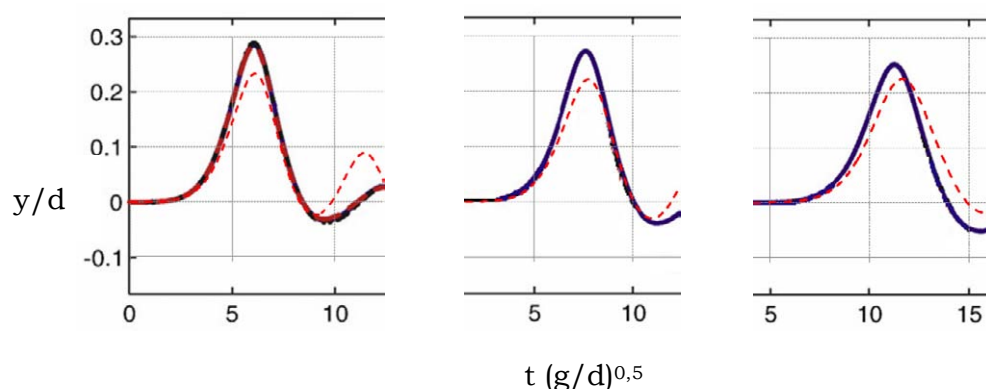


Figura 5. Comparación entre los resultados del modelo físico (tomado de Sælevik *et al.*; línea continua), y el cálculo con PFEM (línea discontinua). De izquierda a derecha, sensores 1, 2 y 3 (ver figura 3).

### 3.4. SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL DEL DESLIZAMIENTO DE LITUYA BAY

El 9 de julio de 1958, se produjo un deslizamiento de 90 millones de toneladas de rocas, generado por un gran terremoto, que se precipitaron sobre la bahía de Lituya y formaron una ola que alcanzó una cota máxima sobre la ladera opuesta de 524 m de altura. En la figura 6 se muestra un esquema de la geometría del deslizamiento. En la revisión bibliográfica que se ha realizado, no se ha encontrado un trabajo en el que se describa una modelación completamente tridimensional del deslizamiento de Lituya Bay<sup>6</sup>. Este es el objetivo planteado. Como base de partida se tomó el trabajo de Fritz *et al.* (2001), que probablemente es el artículo que describe con más detalle el citado evento.

La cartografía se ha obtenido de la página web del U. S. Geological Survey (<http://eros.usgs.gov/>). Tras algunas transformaciones utilizando herramientas GIS, se obtiene la malla de elementos finitos inicial, que se muestra en la figura 7.

<sup>6</sup> De hecho, en uno de los últimos artículos publicados sobre el evento (Fritz *et al.*, 2009), se sugiere la necesidad de realizar este experimento, tanto en modelo físico como numéricamente.

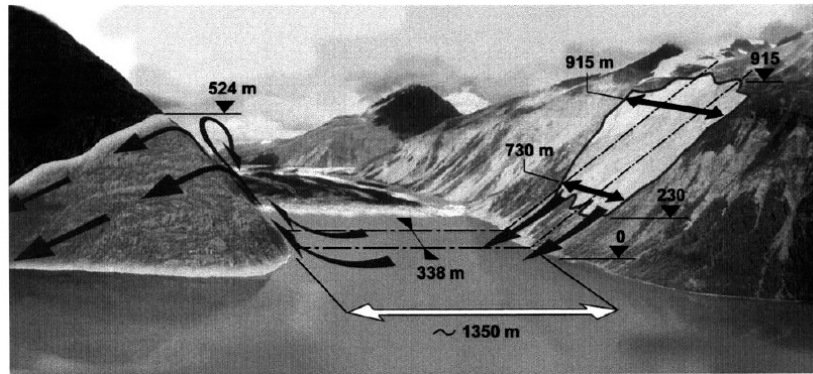


Figura 6. Esquema del deslizamiento de Lituya Bay. La destrucción del bosque de la ladera izquierda corresponde con la cota alcanzada por el deslizamiento (fuente: Fritz *et al.*, 2001).

Hay algunas incertidumbres sobre la situación en el momento del deslizamiento que no permiten obtener un modelo con el máximo detalle, como la propia geometría de la masa deslizada, la forma del frente del glaciar, o la batimetría. Por ejemplo, Fritz *et al.* desprecian el efecto de los depósitos existentes junto al frente del glaciar. Por otra parte, en el caso real se desconoce hasta qué punto el deslizamiento en bloque se rompió antes del impacto, y si su movimiento pasó de un deslizamiento puro a una avalancha completamente desarrollada en algún momento.

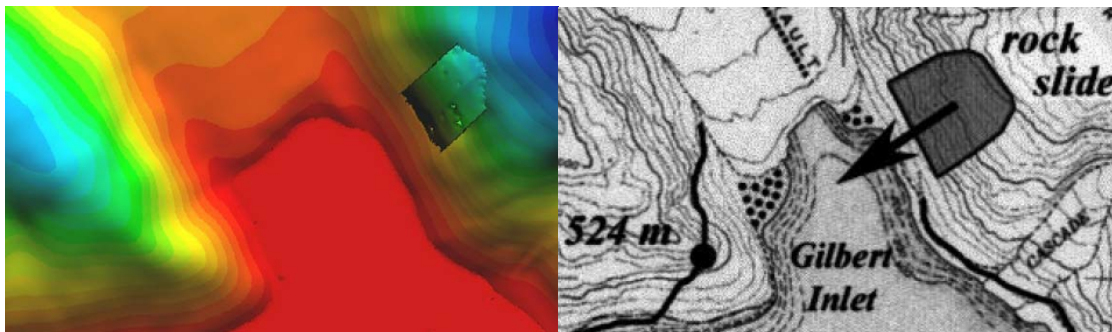


Figura 7. Cartografía utilizada en el modelo (izquierda), y detalle de la cartografía de la situación anterior al deslizamiento (derecha), según Fritz (2001), indicando el alcance máximo (524 m).

La geometría inicial del deslizamiento se ha generado a partir de la información de las figuras 1 y 6. En la figura 8 se muestran algunos de los instantes más representativos del cálculo. Como en el caso bidimensional, se aprecia la formación de la ola, su propagación, y el ascenso por la margen opuesta. Se han comparado con los datos existentes relativos a la máxima cota alcanzada por la ola, así como con el plano de la afección producida (Fritz *et al.*, 2001).

El alcance máximo obtenido sobre la ladera opuesta con PFEM es de 480 m, algo inferior al observado (524 m), lo que supone un error relativo del 8 %. En cuanto a la ladera sur de la bahía, el máximo alcance fue de 208 m, mientras que con el PFEM se ha obtenido un valor de 195 m (error relativo del 6 %).



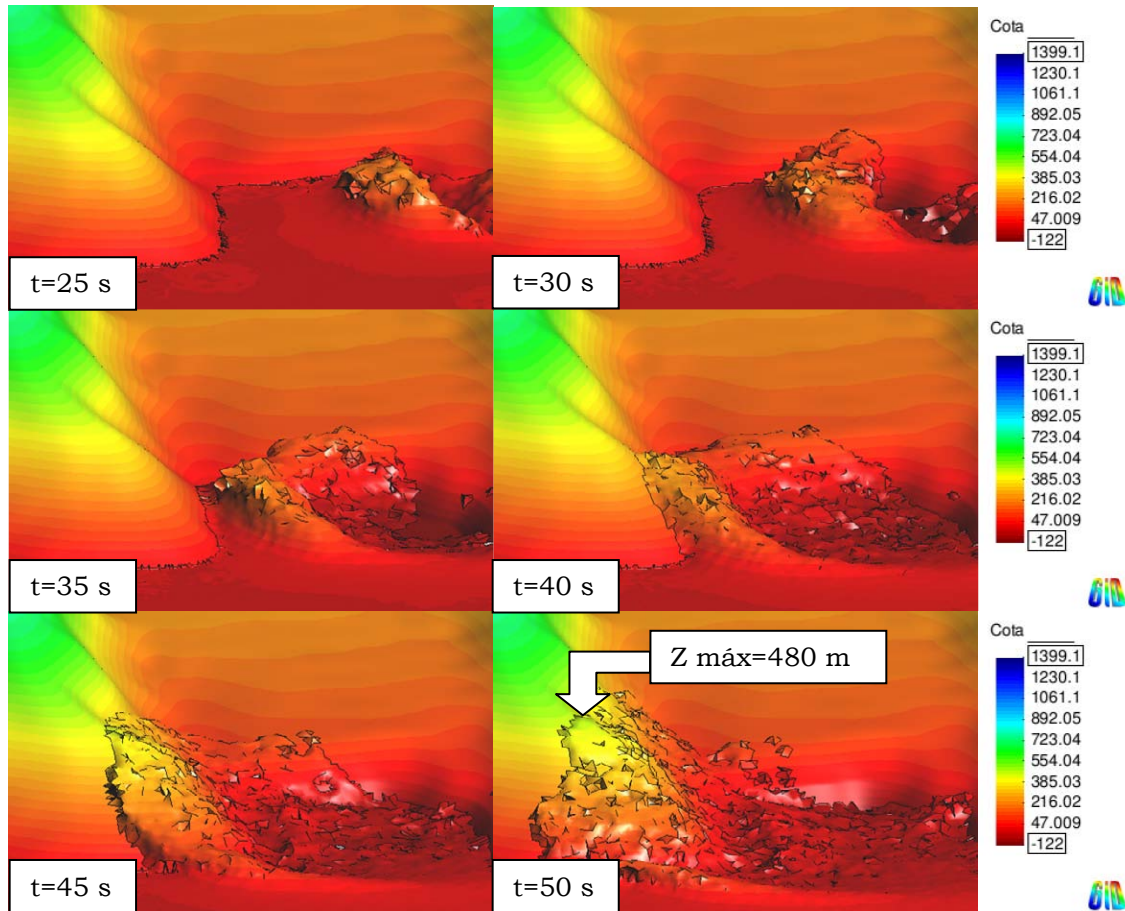


Figura 8. Instantáneas de los resultados más significativos del cálculo, que representan la formación de la ola, su propagación, y el máximo alcance en la margen opuesta.

#### 4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Se han presentado los resultados obtenidos en la aplicación del método PFEM al análisis de deslizamientos de ladera en embalses. La masa deslizada se ha considerado, dependiendo del caso, como un sólido rígido o como un fluido denso.

Los modelos numéricos deben basarse en simplificaciones del fenómeno, por lo que sus resultados sólo pueden considerarse aproximaciones. Por ejemplo, en la versión actual de PFEM no se tiene en cuenta la presencia del aire ni su mezcla con el agua.

No obstante lo anterior, los resultados del análisis tridimensional del deslizamiento de Lituya Bay permiten concluir que el método puede ser útil en la estimación de las afecciones producidas por deslizamientos de ladera en embalses, con lo que podría ser utilizado en el análisis de riesgos relacionados con este tipo de fenómenos.

En la actualidad, en CIMNE ya se está trabajando en un proyecto orientado a reducir el tiempo de cálculo, lo que permitirá en el futuro afrontar problemas de dimensiones aún mayores con mallas más finas. Así mismo, se está perfeccionando el módulo de erosión, con el objetivo de simular fenómenos acoplados como el aumento de masa que se incorpora al deslizamiento durante la caída, o el efecto del sobrevertido que podría producir la ola sobre la estabilidad de presas de materiales sueltos.

## REFERENCIAS

- Ayala, F. J. y Olcina, J., coordinadores (2002). *Análisis de riesgos por movimientos de ladera*. Riesgos Naturales, ISBN 84-344-8034-4, pp 379-410.
- Fritz, H. M., Hager, W. H., y Minor, H. E. (2001). *Lituya Bay Case: Rockslide impact and wave run-up*. Science of Tsunami Hazards, Vol 19, N° 1 (2001).
- Fritz, H. M., Mohammed, F., y Yoo, J. (2009). *Lituya Bay landslide impact generated mega-tsunami 50<sup>th</sup> anniversary*. Pure appl. Geophys. 166 153-175
- Idelsohn S. R., Oñate E., Calvo, N. y Del Pin F. (2003). *The meshless finite element method*. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 58 (6) 893-912.
- Idelsohn S. R., Oñate E. y Del Pin F. (2004). *The particle finite element method: a powerful tool to solve incompressible flows with free surfaces and breaking waves*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol 61, pp 964-84.
- Idelsohn S. R., Oñate E., Del Pin F. y Calvo N. (2006). *Fluid-structure interaction using the particle finite element method*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 195, pp. 2100-2123
- Larese, A., Rossi, R., Oñate, E. and Idelsohn, S.R. (2008). *Validation of the particle finite element method (PFEM) for simulation of free surface flows*. Int. J. for Computer-aided Engineering and Software. Vol. 25, n° 4, pp 385-425.
- Oñate E, Idelsohn S. R., Del Pin F. y Aubry, R. (2004). *The particle finite element method: an overview*. International Journal on Computational Methods. 1:267-307, 2004.
- Oñate, E., Idelsohn, S.R., Celigueta, M.A., Rossi, R. (2008). *Advances in the particle finite element method for the analysis of fluid-multibody interaction and bed erosion in free surface flows*. Comp. Methods in Appl. Mech. and Eng., Vol. 197, 1777-1800, (2008).
- Pastor, M., Herreros, I., Fernández Merodo, J. A., Mira, P., Haddad, B., Quecedo, M., González, E., Álvarez-Cedrón, C., y Drempetic, V. (2009). *Modelling of fast catastrophic landslides and impulse waves induced by them in fjords, lakes and reservoirs*. Engineering Geology 109 (2009) 124-134.
- Quecedo, M., Pastor, M., Herreros, M.I., 2004. *Numerical modelling of impulse wave generated by fast landslides*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 59: 1633-1656
- Sælevik, G., Jensen, A. Pedersen, G. (2009) *Experimental investigation of impact generated tsunami; related to a potential rock slide, Western Norway*. Coastal Engineering. 56 (2009) pp: 897-906