

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## UN MÉTODO DE CÁLCULO PARA EL ESTUDIO DE LA SEGURIDAD DE PRESAS DE ESCOLLERA DURANTE UN SOBREVERTIDO

Antonia Larese,  
Riccardo Rossi,  
Eugenio Oñate<sup>1</sup>

*RESUMEN: El objetivo de este trabajo es desarrollar y validar un nuevo método de cálculo de aplicabilidad general para el estudio de la estabilidad y seguridad de una presa de escollera durante un sobrevertido. Esta nueva herramienta permite analizar con detalle el estado tenso-deformacional de la presa y su posible rotura y eventual desmoronamiento bajo la acción del flujo de agua y combina métodos de elementos finitos avanzados con métodos de partículas. Esta técnica, denominada PFEM (particle finite element method), permite tener en cuenta de las complejas no-linealidades geométricas y mecánicas en problemas de interacción fluido-estructura, incluyendo fenómenos de superficie libre y de erosión. En el trabajo se describen las características esenciales del PFEM y se detalla la aplicación de este método para modelar el sobrevertido en presas de escollera y su eventual desplome. Este trabajo numérico se combina con una parte experimental que se desarrolla en el CEDEX y en la ETS de Ingenieros de Caminos de Madrid en el marco del proyecto XPRES.*

---

<sup>1</sup> Centro Intenacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE),  
Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Gran Capitán s/n, 08034, Barcelona,  
E-mail: antoldt@cimne.upc.edu. Web: www.cimne.com

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se está evidenciando un interés creciente en el estudio del comportamiento de presas de material suelto frente a situaciones extremas. Esto se debe, en parte a los grandes avances en el estudio de los materiales que se utilizan en este tipo de estructuras, a la gran facilidad de encontrarlos y su bajo coste, y por otro lado a adaptabilidad para una gran variedad de lugares, razones que hacen de estas estructuras una frecuente elección frente a las más clásicas presas de hormigón. Un punto débil de las presas de material suelto sin embargo, es su vulnerabilidad frente a fenómenos de sobrevertido que pueden comprometer seriamente la estructura hasta causar su completo desplome. En muchos países de la Union Europea, y entre ellos España, se están revisando los criterios de proyecto en el sentido de exigir mayor seguridad de estos tipos de presas frente a un sobrevertido. Muchas estructuras pre-existentes tendrán que ser modificadas para cumplir las nuevas exigencias de seguridad. Hay que destacar que hasta ahora el conocimiento del fenómeno de la rotura por un sobrevertido no se conoce de forma detallada y todavía no se han podido estudiar a fondo las condiciones que desencadenan el derrumbamiento de la estructura. Esta incertidumbre en la definición del fenómeno conlleva una ausencia de optimización de los planes de emergencia y un consiguiente gasto económico que se podrían evitar si el conocimiento del fenómeno y la disponibilidad de una herramienta de cálculo, permitiesen racionalizar la enorme inversión necesaria para incrementar la seguridad de las presas de materiales sueltos.

Con el objetivo de llegar a un mejor conocimiento del proceso de rotura de las presas de material suelto y obtener una herramienta que permita un análisis más rigurosa de este fenómeno se ha puesto en marcha el proyecto XPRES financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia. El proyecto participan el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) como coordinador y desarrollador de la parte numérica, el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y la ETS de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid [XPRES, 2007-2010] responsables de la parte experimental.

En el presente artículo se presenta el trabajo que CIMNE está realizando para crear una herramienta numérica para el análisis del comportamiento de una presa de escollera durante un sobrevertido que por su incidencia en la seguridad de la presa y su entorno merece un tratamiento más preciso. En el apartado 2 se describe el problema de la filtración en el medio poroso y su tratamiento numérico. En el apartado 3 se exponen los principios básicos del método que se utiliza para el cálculo de la respuesta estructural para los problemas de erosión superficial y de deslizamiento en masa. Finalmente en el apartado 4 se explica el método para el acoplamiento fluido-estructura y en el apartado 5 se destacan las conclusiones.

## 2. EVOLUCIÓN DE LA LINEA DE FILTRACIÓN

Cuando se habla de filtración en el medio poroso se hace referencia a la clásica ley de Darcy que establece una relación lineal entre la velocidad del fluido en el medio poroso y el gradiente de la presión del mismo. Sin embargo hay que tener en cuenta que, en el caso de presas de material suelto, el flujo

de agua entre el material granular presenta fenómenos de turbulencia a nivel local. Esto se traduce en una relación no lineal entre velocidad y gradiente de presión. Brinkmann and Forchheimer (Nield and Bejan, 1992) han propuesto dos de las más famosas modificaciones a esta ley para tener en cuenta de esta no linealidad. No obstante estas hipótesis no son las más adecuadas para el problema de flujo en el espaldón de una presa, porque no puede considerarse un medio con porosidad variable e incluso las ecuaciones que se consideran para el cálculo no se reducen a las ecuaciones de un flujo puro cuando la porosidad vale la unidad.

Siguiendo el trabajo desarrollado por Nithiarasu et al. 2006 se han modificados las clásicas ecuaciones de Navier Stokes para el calculo del campo de tensiones y velocidad en un fluido, teniendo en cuenta el efecto de la porosidad en el medio. La modificación de la ley de Darcy que se ha elegido es la de Ergun que permite considerar porosidad variables y que, en caso de porosidad igual a 1, permite obtener la forma tradicional de las ecuaciones de Navier Stokes para fluidos libres (Ergun, 1954). Finalmente las ecuaciones que gobiernan el flujo del fluido fuera y dentro del medio poroso son las siguientes

$$\frac{1}{\varepsilon} \left( \partial_t \mathbf{v} + (\mathbf{v}) \cdot \frac{\nabla \mathbf{v}}{\varepsilon} \right) - \frac{\nu}{\varepsilon} \Delta \mathbf{v} + \frac{\nu}{k} \mathbf{v} + \frac{1.75}{\sqrt{150}} \frac{1}{\sqrt{k}} \frac{|\mathbf{v}|}{\varepsilon^{3/2}} \mathbf{v} + \nabla p = \mathbf{f}^{ext};$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad ;$$

donde  $\mathbf{v}$  es la velocidad de Darcy que representa un valor medio de la velocidad en el fluido ponderado con la porosidad ( $\varepsilon = dV_{empty}/dV_{tot}$ ) ( $\mathbf{v} = \varepsilon \mathbf{v}_f$ ),  $\mathbf{v}_M$  representa el valor de la velocidad de la malla que se utiliza para la discretización en elementos finitos,

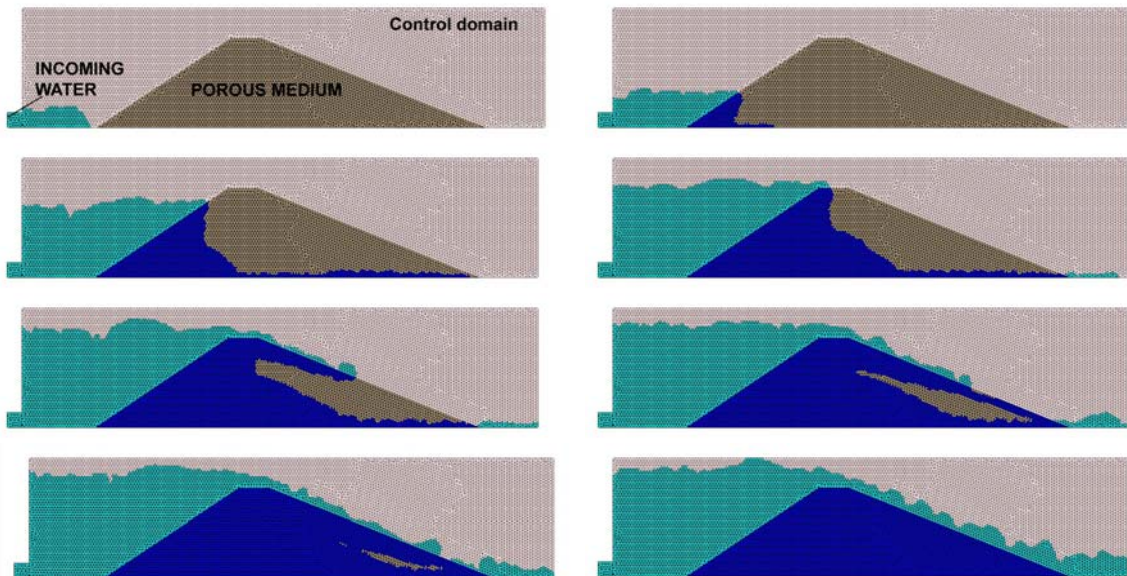


Fig.1 Evolución de la línea de filtración en una simulación de sobrevertido.

$\nabla p$  es el gradiente de presión,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $k$  la permeabilidad. Estas ecuaciones se discretizan por el MEF utilizando una formulación Euleriana donde la malla permanece fija a lo largo del proceso (Donea and Huerta, 2003). Se define un volumen de control dentro del cual se desarrolla el proceso como se puede ver en Fig. 1 y se usa una técnica de level set para seguir la evolución de la superficie libre del fluido en el cuerpo de la presa (Osher and Fedkiw, 2001).

### 3. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DE LA PRESA BAJO UN SOBREVERTIDO USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y PARTÍCULAS (PFEM)

En caso de fenómenos de sobrevertido en presas de material suelto se han observado dos mecanismos de rotura que actúan de manera alternada o combinada en función de las condiciones en la que se encuentra la estructura. Estos son el arrastre de partículas, debido a efectos erosivos del agua sobre la cara aguas abajo de la presa, y una pérdida de estabilidad de parte del cuerpo de la presa, que puede implicar fenómenos de deslizamiento en masa. Ambos fenómenos inducen variaciones de la forma de la presa que conducen a un proceso de deformación progresivo que puede acabar con un completo derrumbe de la estructura.

Para el análisis de este fenómeno se utiliza el método de elementos finitos y partículas (PFEM) desarrollado por Idelsohn, Oñate y colaboradores (Idelsohn et al. 2004, and Oñate et al. 2004). El PFEM combina técnicas de partículas con el método de elementos finitos para la solución de las ecuaciones que gobiernan el problema físico. El dominio está modelado utilizando una formulación Lagrangiana actualizada que implica que las variables se suponen conocidas en la configuración actual en el tiempo  $t$  y se llevan al paso de tiempo siguiente  $t+\Delta t$ . Todas las informaciones se guardan a nivel de los nodos que coinciden con las partículas materiales y se mueven en cada paso de tiempo. Para obviar a una excesiva deformación de la malla, debida a las grandes deformaciones del dominio de análisis, se utiliza un algoritmo de remallado muy eficiente para generar rápidamente una malla nueva en cada paso de tiempo sin comprometer la duración del proceso de cálculo (Calvo, 2005). Los nodos de la malla se tratan como partículas materiales cuyo movimiento viene descrito a lo largo de la simulación. Esto permite reproducir fenómenos complejos como la formación de una gota de agua o la rotura de una ola sobre un talud (Oñate et al. 2004). El PFEM ha sido utilizado y validado en problemas de mecánica de fluidos (Larese et al., 2008) y en problemas de interacción fluido-estructura (Oñate et al. 2007). También se está utilizando con éxito en simulaciones de procesos de erosión y en problemas en los que hay un violento cambio de las propiedades del material bajo análisis, induciendo un cambio en la relación constitutiva del mismo, como se detalla en el próximo apartado.

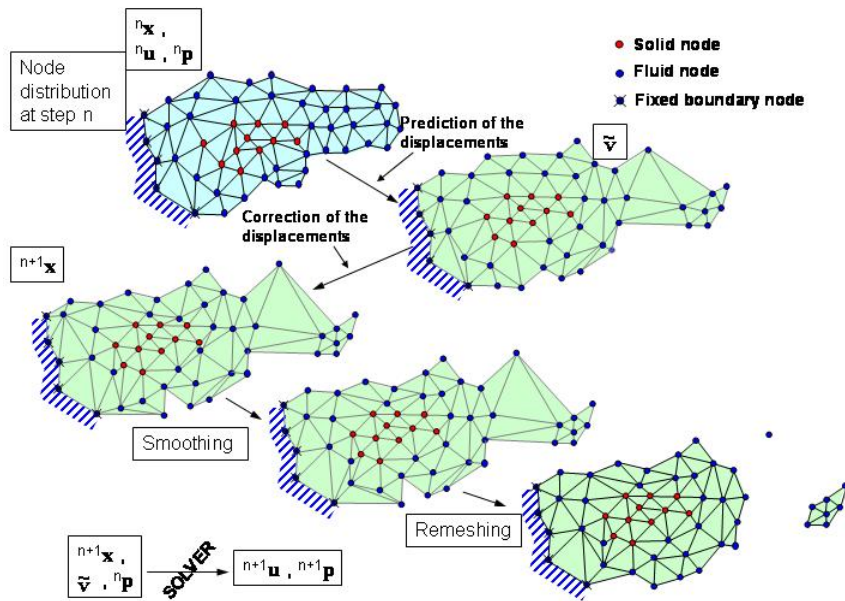


Fig.2. Vision esquemática de los pasos básicos del PFEM.

### 3.1. PROCESO DE EROSIÓN

El PFEM ha demostrado ser un método muy potente en la resolución de problemas que incluyen procesos de erosión. Su capacidad de seguir el movimiento de las partículas dentro del dominio, permitiendo que se separen del lecho si el trabajo de fricción supera un límite dado, hace de este método la estrategia ideal para modelar el fenómeno de erosión.

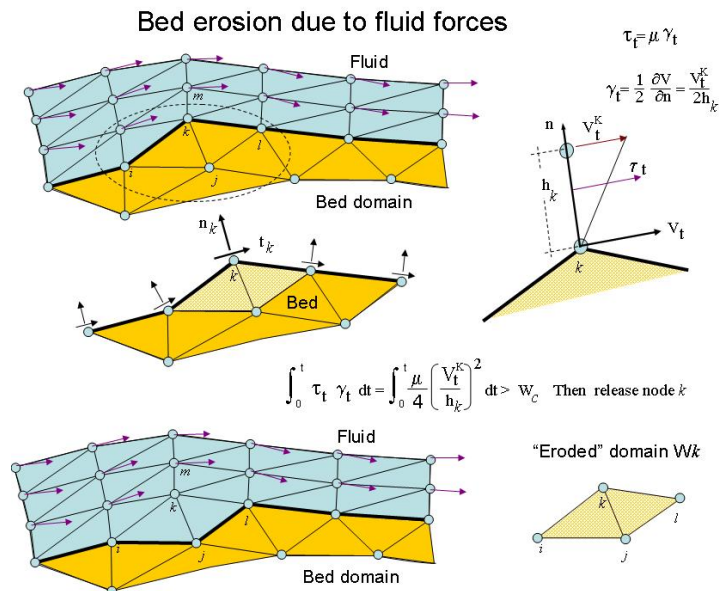


Fig.3. Vision esquemática del algoritmo de erosión. (Oñate et al 2008).

En cada paso de tiempo se calcula el valor del esfuerzo tangencial para cada nodo del lecho del fluido y se evalúa el trabajo de fricción como se muestra en la Figura 3. Si este trabajo supera un cierto valor, se permite la separación de las partículas del lecho y de los elementos vinculados a cada una. Se recomienda consultar los trabajos de Oñate et al, 2006 y 2008, para conocer el detalle de la aplicación del PFEM a procesos de erosión.

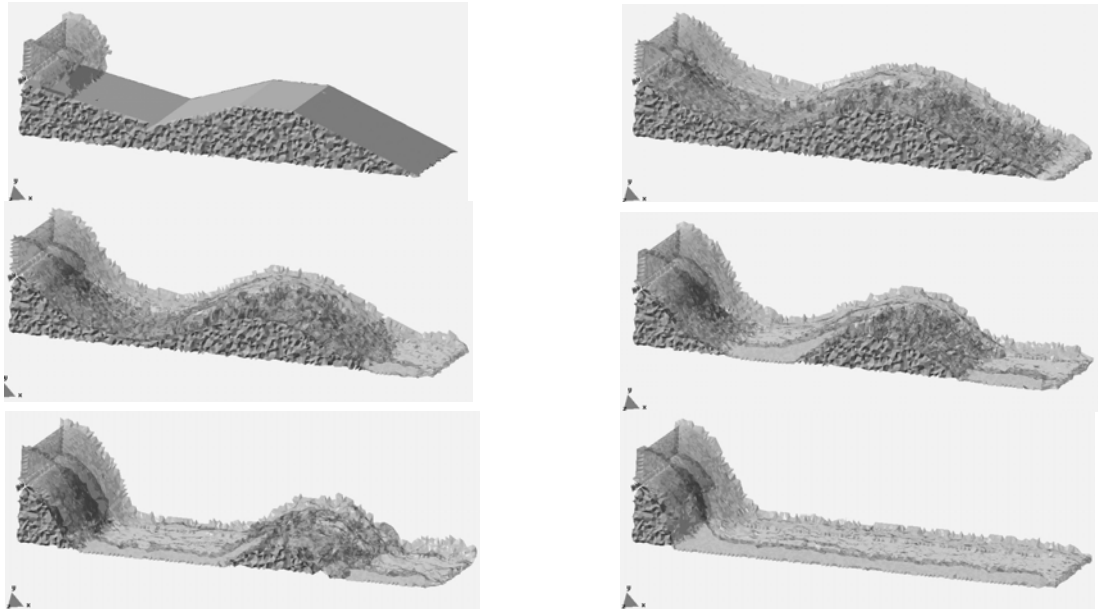


Fig.4. Desgaste de una banqueta de arena por erosión. (Oñate et al 2006).

En la Figura 4 se muestra una sucesión de imágenes de la simulación de un proceso de erosión de una banqueta de arena por sobrevvertido.

### 3.2. DESLIZAMIENTO EN MASA

El proceso de saturación puede inducir condiciones críticas en el material del paramento aguas abajo de la presa, porque el crecimiento progresivo del nivel del agua varía los valores de la presión en el interior de la estructura, cambiando las características propia del material. Más detalles sobre el fenómeno físico pueden encontrarse en Anthiniach et al. 1998 y Toledo, 1998.

Para el cálculo con PFEM se debe considerar el caso de un material con una ley constitutiva visco-plástica influenciada por la variación de presión en el interior de la estructura debida al aumento del nivel de agua.

El PFEM se ha utilizado recientemente el calculo de un problema diferente de deslizamiento en masa, donde se estudiaba un cambio de fase de un material polimérico debido a una fuente de calor externa (Oñate et al., 2008).

## 4. COMBINACIÓN DE LOS DIFERENTES FENÓMENOS

El último paso para completar el desarrollo de una herramienta de cálculo para el análisis del mecanismo de rotura de presas de material suelto, es la

combinación de la simulación del flujo del agua con el comportamiento estructural, que están intrínsecamente acoplados.

En los apartados anteriores se ha explicado como se calcula la evolución de la línea de filtración y como, de otra parte, se evalúa el proceso de erosión con el PFEM.

Se tiene que tener en cuenta que el método euleriano de cálculo del fluido trabaja sobre un volumen de control y una malla fija. Por otra parte el PFEM, por ser un método lagrangiano, trabaja sobre una malla donde los nodos coinciden con las partículas materiales y se deforman a lo largo del tiempo.

Estas dos mallas se han de comunicar paso a paso para permitir un acoplamiento del problema. Con este intento se ha desarrollado un algoritmo que permite la proyección de información entre mallas no coincidentes. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de esta técnica donde se ha calculado el desmoronamiento de una presa con el PFEM (notese que la malla coincide solo con el dominio material de la estructura), y luego se han proyectado los valores de velocidad sobre una malla fija (en este caso se ha mallado todo el volumen de control). Los resultados son coincidentes en ambos casos, lo que demuestra la exactitud del proceso de proyección.

#### 4.1 RESUMEN DE LAS ETAPAS DE CÁLCULO

Los pasos básicos en el estudio son los siguientes:

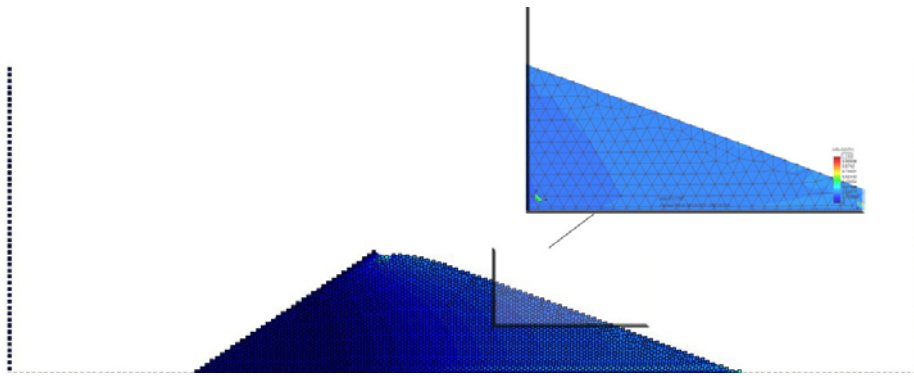
- 1) CÁLCULO de los campos de VELOCIDAD y PRESIONES en el agua dentro y fuera de la presa, utilizando una MALLA FIJA y una formulación Euleriana;
- 2) PROYECCIÓN de los resultados de la etapa 1 sobre la malla Lagrangiana que discretiza la presa en movimiento;
- 3) CÁLCULO del campo de desplazamientos, tensiones y deformaciones en la presa utilizando el PFEM (con una MALLA en movimiento);
- 4) PROYECCIÓN de los resultados de la etapa 3 sobre la malla fija;
- 5) Avanzar en el paso de tiempo y volver a la etapa 1;

#### 5. CONCLUSIONES

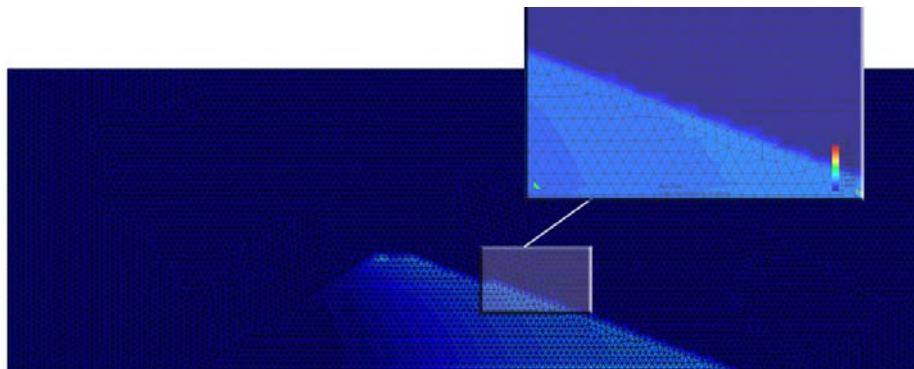
El presente trabajo presenta una metodología innovadora para la evaluación del comportamiento de una presa de material suelto durante un sobrevvertido.

Se ha desarrollado un método de cálculo que permite tratar de forma acoplada el flujo de agua fuera y dentro de la presa calculando los campos de velocidad y presiones a lo largo del proceso. Se consigue simular a la vez, la evolución de la línea de filtración y el flujo sobre el paramento de aguas abajo, como se muestra en la Figura 1.

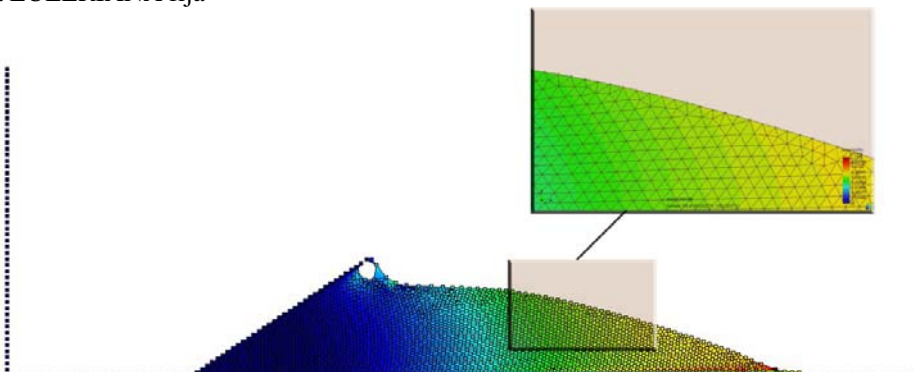




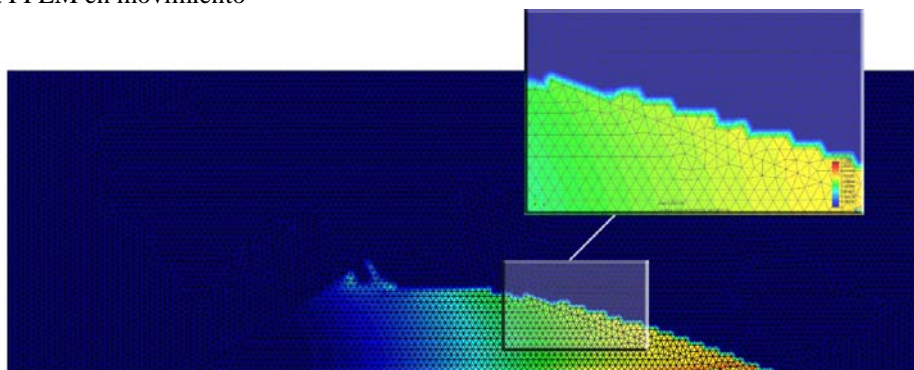
a) Malla PFEM en movimiento



b) Malla EULERIANA fija



a) Malla PFEM en movimiento



b) Malla EULERIANA fija

Fig.5. Desmoronamiento de una presa calculada con PFEM y proyectada sobre una malla fija.



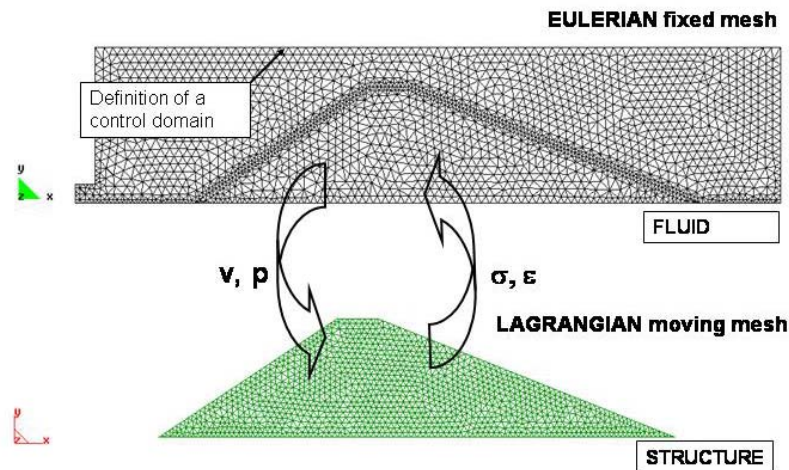


Fig.6. Vision esquemática del algoritmo de cálculo Euleriano-Lagrangiano para estudiar de forma acoplada el fenómeno de sobrevertido y deformación de la presa.

El cálculo del comportamiento tenso-deformacional de la presa se realiza con el método de elementos finitos y partículas (PFEM). Los nodos de la malla coinciden con las partículas que representan el material de la presa, cuyo movimiento se sigue a lo largo del proceso. La erosión superficial se simula con un criterio basado en la energía de deformación. Para tener en cuenta el posible deslizamiento en masa, se usa una ley constitutiva visco-plástica influenciada por la variación de presión.

Finalmente se realiza el acoplamiento del flujo del fluido con el de la deformación de la presa mediante un algoritmo que permite la proyección entre mallas no coincidentes.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Miguel Angel Celigueta por el trabajo sobre la erosión con el PFEM que se muestra en el apartado 3.

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia en el marco del proyecto XPRES Proyecto de Plan Nacional I+D, (Ref: BIA2007-68120-C03-01 (2007 -2010)).

## REFERENCIAS

Anthiniac, P., Bonelli, S., Carrère, A., Débordes, O., 1998, *Modelling saturation settlements in rockfill dams*, Dam safety (Proceeding of the International Symposium on new Trend in Dam Safety, Barcelona Spain 17-19 June 1998), Ed. Berga.

Calvo, N., 2005, PhD thesis: *Generación de mallas tridimensionales por métodos duales*. Univesidad Nacional del Litoral, Argentina.

Donea, J., Huerta, A., 2003, *Finite Elements Methods for Flow Problems*, Wiley.

Ergun, S. 1954, *Fluid Flow Throught Packed Columns*, Chemical Engineering Progress, 48, 89-94.

Idelsohn, S.R., Oñate, E. and 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*, 61, 964-984.

Larese, A., Rossi, R., Oñate, E., Idelsohn, S.R., 2008, Validation of the particle finite element method (PFEM) for simulation of free surface flows, *Engineering Computations*, 25, 385-425.

Nield, D.A. and Bejan, A., *Convection in porous media*, Springer, 1992.

Nithiarasu, P., Liu, C.B., 2006, An artificial compressibility based characteristic based split (CBS) scheme for steady an unsteady turbulent incompressible flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, 2961-2982.

Oñate, E., Idelsohn, S.-Del Pin F. and Aubry, R. 2004, The particle finite element method. An overview, *International Journal of Computational Methods* 1, 267-307.

Oñate, E., Celigueta, M.A., and Idelsohn, S.R, 2006, Modeling bed erosion in freesurface flows by the particle finite element. *Acta Geotechnica*, Vol 1, pp 237-252.

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, In press in: *Computational methods in Applied Mechanics and Engineering*,

Oñate, E., Rossi, R., Idelsohn, S.R., Prediction of melt flow and spread of thermoplastic objects with the particle finite element method, *Proceeding of the IAFSS Symposium, Karlsruhe, Germany, 2008*.

Osher, S. and Fedkiw, R.P., 2001, Level Set Methods: An Overview and some recent reults, *Journal of Computational Physics*, 169, 463-502.

Toledo, M.A., 1998, Safety of rockfill dams subject to overtopping, *Dam safety (Proceeding of the International Symposium on new Trend in Dam Safety, Barcelona Spain 17-19 June 1998)*, Ed. Berga.

XPRES “Desarrollo de un método para el estudio del proceso de rotura de presas de escollera por sobrevertido combinando técnicas de elementos finitos y partículas”, Proyecto de Plan Nacional I+D, (Ref: BIA2007-68120-C03-01 (2007 -2010)). Participantes CIMNE (coordinador), ETS Ingenieros de Caminos (UPM) y Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).