

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE PRESAS DE ESCOLLERA FRENTE A UN SOBREVERTIDO

Antonia Larese¹
Riccardo Rossi²
Eugenio Oñate³,
Miguel Ángel Toledo⁴

RESUMEN Con el objetivo de llegar a un mejor conocimiento del principio del proceso de rotura de las presas de material suelto y obtener una herramienta que permita un análisis más riguroso de este fenómeno, se está desarrollando el proyecto XPRES financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia [XPRES 2007-2010]. El proyecto consta de una parte experimental, llevada a cabo por CEDEX y UPM conjuntamente, y de una parte numérica, desarrollada en el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).

En el presente trabajo se quiere presentar lo que CIMNE está realizando para crear una herramienta de cálculo para el análisis del comportamiento de una presa de escollera durante un sobrevuerto, que, por su incidencia en la seguridad de la presa y su entorno, merece un tratamiento más preciso.

La nueva metodología permite analizar con detalle el estado de tensión y deformación de la presa y su posible rotura parcial, o catastrófica, bajo la acción del flujo de agua y combina métodos de elementos finitos avanzados con métodos de partículas.

-
- 1 *CIMNE International Center for Numerical Methods in Engineering, Barcelona, España*
antoldt@cimne.upc.edu
 - 2 *CIMNE International Center for Numerical Methods in Engineering, Barcelona, España.*
 - 3 *CIMNE International Center for Numerical Methods in Engineering, Barcelona, España.*
 - 4 *ETS de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. España*

Se analiza con particular interés el principio de la rotura por sobrevertido al pie de la presa cuando el agua empieza a filtrar generando fenómenos conjuntos de arrastre de partículas y deslizamiento en masa.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los avances en el conocimiento de los materiales que se utilizan en la construcción de las presas de materiales sueltos, junto con su bajo coste, hacen de estas estructuras una elección a menudo más competitiva respecto a las presas de hormigón. Si a esto se añade que este tipo de presas presentan gran facilidad de construcción, con una clara reducción del coste de mano de obra, se entiende porqué las presas más altas del mundo son de materiales sueltos. Frente a estas evidentes ventajas, hay no obstante que tener en cuenta la gran vulnerabilidad de estos tipos de estructuras frente a vertidos por coronación que, de acuerdo con el Boletín ICOLD 99, son la causa principal de su rotura. En muchos países de la Unión 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.

Por otro lado 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 [Toledo, 1998]. 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 estas y obtener una herramienta que permita un análisis más riguroso de este fenómeno el Ministerio de Educación y Ciencia está financiando el proyecto XPRES. En el proyecto participan el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y la ETS de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid responsables de la parte experimental y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) como coordinador y desarrollador de la parte numérica [XPRES, 2007-2010]. En esta comunicación, después de una breve descripción de la modelación física, se presentarán los detalles del método de análisis numérico desarrollado en CIMNE.

2. MODELIZACIÓN FÍSICA LLEVADA A CABO POR CEDEX Y UPM

La campaña experimental llevada a cabo por CEDEX y UPM consta de más de 70 ensayos.

Se han ido variando por un lado una serie de parámetros cuya influencia en el proceso de rotura podía ser relevante como el tamaño de la escollera, los taludes aguas abajo y el tipo de impermeabilización y, por otro lado, se han utilizado principalmente tres canales de ensayo que se muestran en la figura 1.



a) Canal pequeño (CEDEX): 0,40 m de anchura; 0,60 m de altura y 12,0 m de longitud

b) Canal mediano (CEDEX): 1,0 m de anchura; 1,1 m de altura y 16,0 m de longitud

c) Canal grande (UPM): 2,48 m de anchura; 1,4 m de altura y 13,7 m de longitud.

Fig.1 Canales de ensayo CEDEX y UPM.

Para más detalles sobre la campaña experimental se recomienda la consulta de la comunicación: “*Estudios sobre el comportamiento de presas de escollera ante vertidos por coronación*”, C. Lechuga et al., presentada a estas mismas jornadas.

3. MODELACIÓN MATEMÁTICA

El objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta de aplicabilidad general que ayude en el estudio de la estabilidad y seguridad de una presa de escollera en una avenida extraordinaria que origina un sobrevertido. Se combinan métodos Eulerianos para el cálculo del flujo de agua fuera y dentro de la presa con métodos Lagrangianos de elementos finitos y partículas para analizar el comportamiento tenso-deformacional de la presa y su posible rotura y eventual desmoronamiento bajo la acción del agua.

El cálculo de la evolución del flujo en el medio poroso y fuera de este se hace de manera unificada utilizando las clásicas ecuaciones de Navier Stokes oportunamente modificadas siguiendo la formulación generalizada presentada por Nithiarasu [Nithiarasu, 2006]. De esta manera se tiene en cuenta el efecto debido a la presencia del medio poroso permitiendo obtener, en caso de porosidad igual a 1, la forma tradicional de las ecuaciones de Navier Stokes para flujos libres. Se utiliza una función de level set para la identificación de la superficie libre.

La presa se calcula como un continuo y las características mecánicas y materiales se definen por un medio equivalente sin la necesidad de simular cada grano [Zienkiewicz et al. 1998].

La nueva técnica para el estudio de la respuesta estructural, denominada PFEM (Particle Finite Element Method) [Oñate et al., 2004,2008, Idelsohn et al., 2004, Larese et al., 2008], 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 [Oñate et al., 2006, Anthiniac et al., 1998]. Las características específicas del PFEM lo hacen particularmente apropiado para el estudio de la disgregación de los materiales del paramento aguas abajo de la

presa, donde aparece una transferencia de cantidad de movimiento entre el flujo de agua por sobrevertido y el flujo interior en la presa debido a la filtración.

El método Euleriano de cálculo del fluido trabaja sobre un volumen de control y una malla fija. Sin embargo 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 finalmente, un algoritmo que permite la proyección de información entre mallas no coincidentes.

3.1. Simulación de la filtración en la escollera y comportamiento del agua

Para la simulación del comportamiento del agua en condiciones extremas se ha desarrollado un algoritmo que, modificando las tradicionales ecuaciones de Navier Stokes que gobiernan el problema de fluido libre, tenga en cuenta de la presencia del medio poroso. Por un lado se añade el término de la Ley de Darcy (en su forma no lineal) y por otro lado, el equilibrio se impone sobre un volumen de control que está relacionado con el volumen de los huecos mediante la porosidad n ($dV_{tot} = n dV_{Empty}$). Como se comentó brevemente en la introducción, esto conlleva a considerar como variables de nuestro problema la presión del agua y la velocidad de Darcy (promediada en el volumen total) \mathbf{u}_f , que se define como $\mathbf{u}_f = n \cdot \bar{\mathbf{u}}_f$ (donde $\bar{\mathbf{u}}_f$ es la velocidad del fluido promediada sobre el volumen de los huecos).

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. Se eligió entonces utilizar una expresión cuadrática de la velocidad donde los coeficientes numéricos de determinan utilizando la formulación de Ergun [Ergun, 1954].

Las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento y de continuidad en su forma continua quedan entonces:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u}_f = 0; \\ \rho_f \partial_t \mathbf{u}_f + \rho_f \bar{\mathbf{u}}_f \cdot \nabla \mathbf{u}_f + n \nabla p + -\mu \Delta \mathbf{u}_f - \rho_f \mathbf{b} n + D_y = 0; \end{cases} \quad (1)$$

Donde ρ_f es la densidad del fluido, μ es la viscosidad cinemática, k la permeabilidad, y \mathbf{b} es el aceleración de gravedad y D_y es el termino de Darcy, que siguiendo la formulación de Ergu queda definido como

$$D_y = \frac{\mu}{k} \mathbf{u}_f + \frac{1.75}{\sqrt{150}} \frac{\rho_f}{\sqrt{k}} \frac{|\mathbf{u}_f|}{n^{3/2}} \mathbf{u}_f; \quad (2)$$

Las ecuaciones de Navier Stokes modificadas se escriben en su forma matricial para poderlas resolver numéricamente por el MEF. Para la simulación del comportamiento del agua se utiliza un método Euleriano de malla fija [Donea and Huerta, 2003]. La evolución de la superficie libre se calcula utilizando una función de level set [Osher and Fedkiw, 2001].

Se utiliza un esquema de paso fraccionado para la solución del sistema. La presión se integra implícitamente, mientras que para la integración de la velocidad se utiliza un esquema explícito de Runge Kutta de 4° orden.

En las figuras 2 se puede ver la evolución de la línea de filtración dentro de la presa (o superficie libre fuera de ella), en el caso de imponer un caudal de entrada de 0.46l/s en la parte izquierda. La presa que se considera está compuesta de material homogéneo con un $D_{50} = 1$ cm. La porosidad es de 0.45.

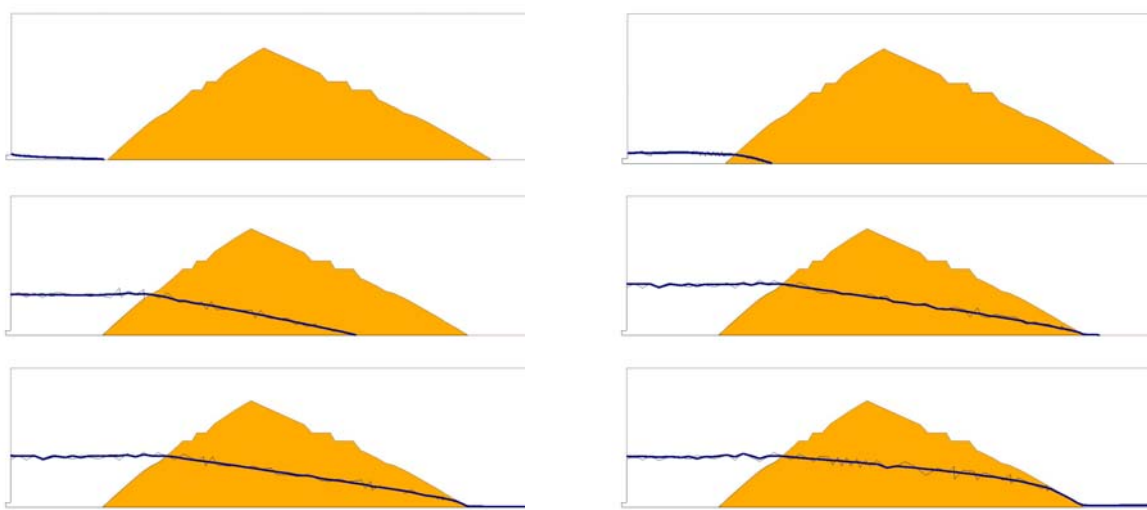


Fig. 2. Evolución de la línea de filtración en una presa de material homogéneo (porosidad 0.45, $D_{50} = 1$ cm) con un caudal de entrada de 0.46l/s

Finalmente en la figura 3 se puede ver una comparación numérica experimental por dos caudales de entrada diferentes.

3.2. Respuesta estructural

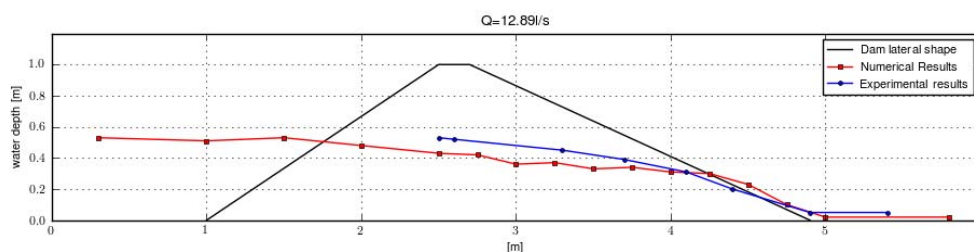
Para poder evaluar la respuesta estructural hace falta reflexionar sobre los principales mecanismos de rotura que actúan en forma alternada y combinada durante un vertido por coronación.

En función principalmente del talud aguas abajo, pueden ser predominantes fenómenos de arrastre de partículas (erosión), o bien de deslizamiento de porciones masivas (deslizamiento en masa). Para poder bien simular el principio de la rotura de la presa se debe tener en cuenta de ambos fenómenos simultáneamente.

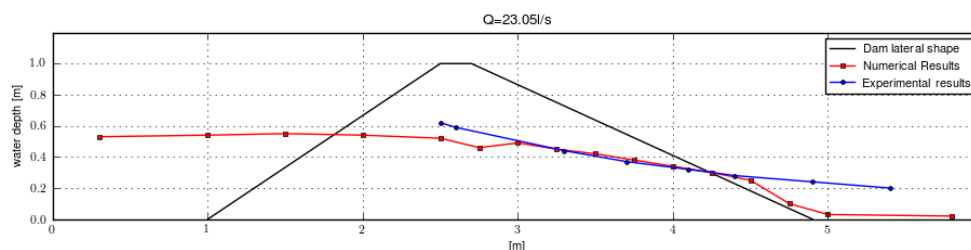
Para el análisis de este fenómeno se utiliza el método de elementos finitos y partículas (PFEM) desarrollado en CIMNE por Idelsohn, Oñate y colaboradores [Idelsohn et al. 2004, y Oñate et el. 2004, 2007, Larese et al. 2008]. El PFEM

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].



a) Caudal de 12.891/s



b) Caudal de 23.051/s

Fig 3. Trazado de la línea de filtración en una presa de porosidad 0.425 y $D_{50} = 1.0\text{cm}$ (Canal grande UPM). Comparación numérico-experimental por dos caudales.

El campo de presiones previamente calculado en el fluido será necesario en el cálculo estructural para poder evaluar las tensiones efectivas en la presa. Por otro lado el término de Darcy actuará como fuerza externa en la matriz sólida. Finalmente la velocidad del flujo de agua tendrá un papel esencial en los mecanismos de arrastre. Estos valores se tendrán que transferir de la malla Euleriana de cálculo de fluido y la malla Lagrangiana de la estructura. Para ello se desarrolló un algoritmo de proyección entre mallas no coincidentes.

3.2.1. Erosión

Para la evaluación de la erosión superficial se utiliza un criterio energético. Se proyecta el campo de velocidades del agua, previamente calculado, sobre la malla Lagrangiana de la presa. Si un nudo tiene una velocidad mayor que un dado

umbral crítico, empieza a acumular trabajo de fricción. Cuando este nudo llega a un valor crítico de trabajo de fricción cambia sus características materiales y empieza a moverse bajo la fuerza de arrastre del agua.

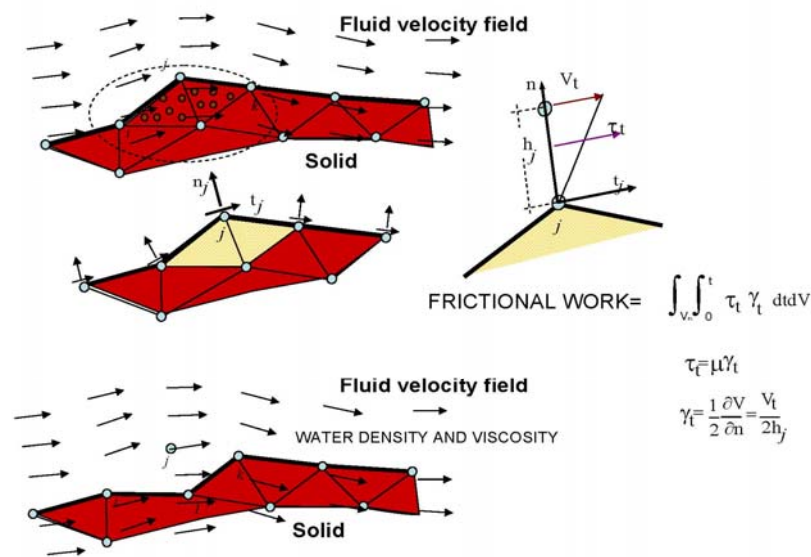


Fig.4. Representación esquemática de la metodología de simulación del proceso de erosión.

Es importante destacar que el trabajo crítico será el que se necesita para mover las partículas materiales que se encuentran dentro de los elementos a los cuales dicho nudo pertenece. Cada elemento no coincide con un único grano sino con un conjunto de ellos. En la figura 4 se presenta esquemáticamente el mecanismo aquí descrito.

3.2.2. Deslizamiento en masa

Para la simulación del deslizamiento en masa se considera que la presa se comporta como un material plástico de Bingham. Un material plástico no manifiesta deformaciones hasta alcanzar un determinado nivel de tensión, superado el cual el material fluye. Sin embargo un material plástico tradicional tiene la capacidad de recuperar las deformaciones elásticas en el proceso de descarga.

Los plásticos de Bingham, al contrario, son fluidos no-newtonianos que manifiestan un comportamiento perfectamente rígido hasta alcanzar un dado nivel de tensión tangencial y luego se portan como fluidos viscosos. La viscosidad del material, al alcanzar este límite sufre una variación de tipo exponencial en función de la velocidad de deformación, como se detalla en Papanastasiou [1987] y Matsoukas [2003].

En la figura 5 se puede ver una secuencia temporal del proceso donde se simula solamente el talud aguas abajo y una entrada de agua por coronación. La salida del agua al pie de la presa genera un transporte de material que vuelve luego a depositarse aguas abajo.

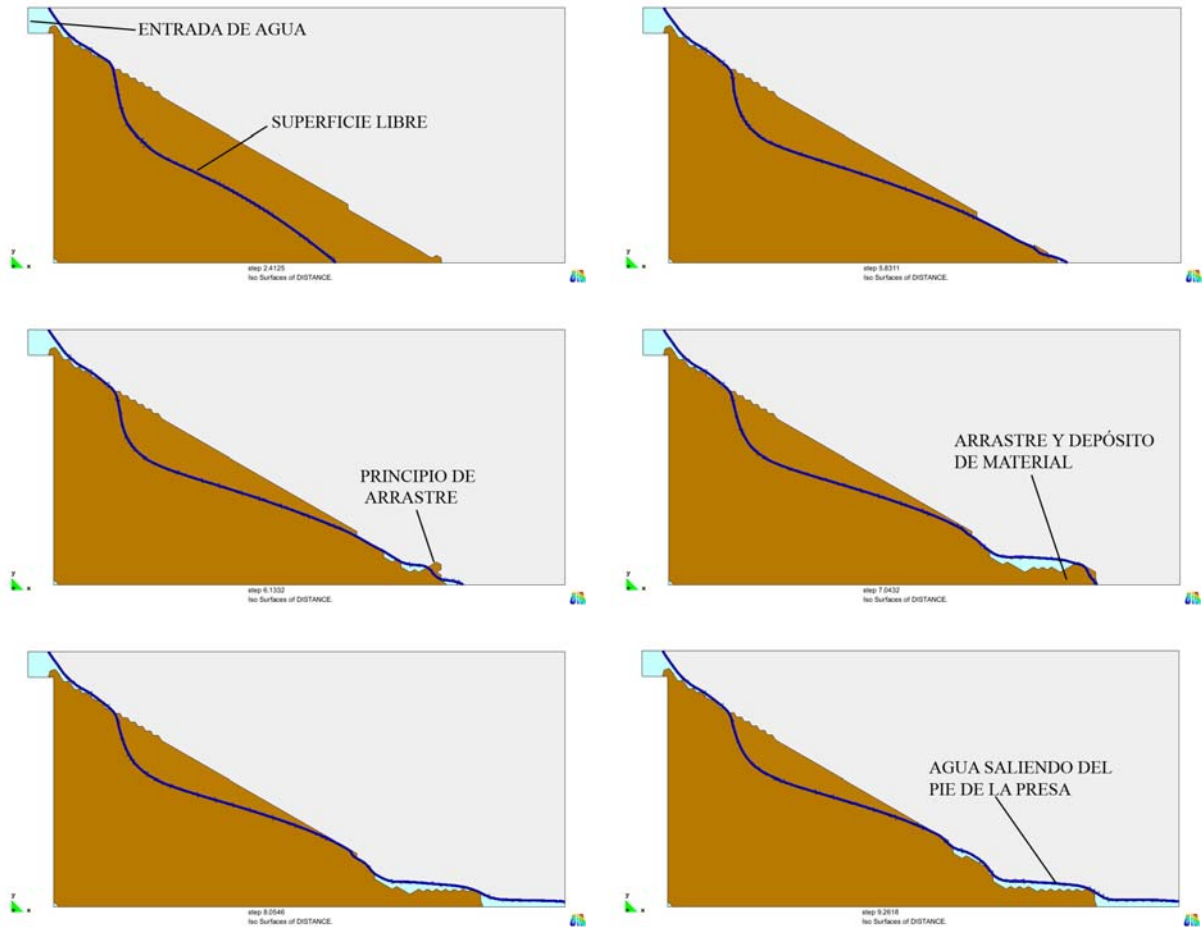


Fig. 5. Respuesta estructural debida al acción transitoria del agua.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente trabajo se ha presentado un nuevo instrumento que permite evaluar las consecuencias de un vertido por coronación en una presa de escollera.

Los puntos clave de la nueva herramienta se resumen esquemáticamente en la figura 6.

Por cada paso de tiempo las etapas básicas de cálculo son:

El cálculo del campo de velocidad y presiones del agua se realiza sobre una malla fija en un volumen de control utilizando una versión modificada de las ecuaciones de Navier Stokes para tener en cuenta de la presencia del medio poroso.

El campo de presiones del agua y el término de Darcy no lineal actúan como condiciones de contorno de la presa y se proyectan sobre la malla Lagrangiana que representa la estructura.

La respuesta estructural se evalúa utilizando el PFEM. Un criterio energético permite de simular los fenómenos de erosión superficial mientras que una ley constitutiva plástica de Bingham nos permite evaluar la relación tensión-deformación.

Finalmente la nueva configuración geométrica de la presa se proyecta sobre la malla fija en términos de porosidad para poder volver a calcular el punto 1 con la nueva distribución de porosidad.

Las etapas futuras prevén una definición y validación del modelo constitutivo para la presa. Se llevará a cabo una amplia validación con modelos 3D de filtración y respuesta estructural utilizando los datos de CEDEX y UPM. Se prevé seguir con el desarrollo del análisis de todo el mecanismo de rotura, analizando posibles fallos del núcleo o de los elementos de protección.

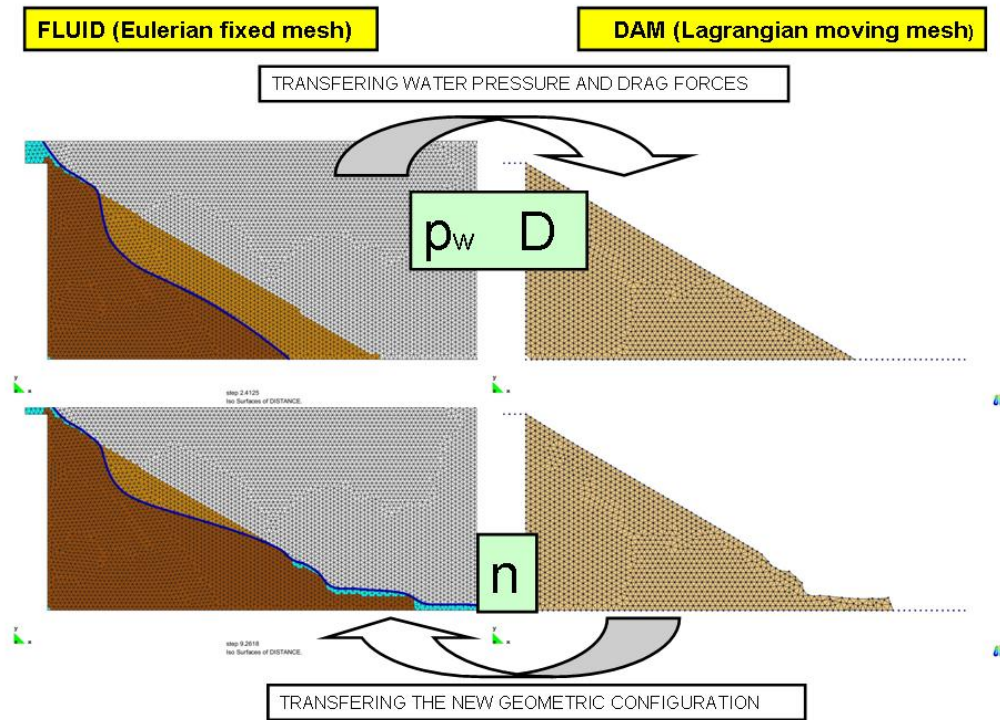


Fig. 6. Resumen de las etapas básicas de la metodología.

AGRADECIMIENTOS

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.

Matsoukas, A. and Mitsoulis, E., Geometry effects in squeeze flow of Bingham plastics, *Journal of Non Newtonian Fluid Mechanics*, 2003, Vol 109, p. 231-240.

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 and 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 free surface 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, *Computational methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 197, 1777-1800.

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

Papanastasiou, T.C., *Flows of materials with yield*, *Journal of Rheology*, 1987, Vol. 31, p 385-407.

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).

Zienkiewicz, O.C., Chan, A.H.C., Pastor, M., Schrefler, B.A., Shiomi, T. 1998, *Computational geomechanics, with special reference to earthquake engineering*, Ed. Wiley.