

# Modelización tridimensional de presas de hormigón por el MEF

CARLOS RUBIO ARÉVALO (\*)  
MANUEL PASTOR PÉREZ (\*)

**RESUMEN** Este artículo describe la modelización tridimensional de presas por medio del Método de los Elementos Finitos (MEF). Partiendo de los datos básicos como son la topografía del terreno y la definición de la presa se obtendrá una malla de elementos finitos junto con sus condiciones de contorno y cargas sobre las que se realizará el cálculo para posteriormente analizar los resultados obtenidos.

## 3D MODELING OF CONCRETE DAMS BY THE FINITE ELEMENT METHOD

**ABSTRACT** This paper describes the 3D modeling of dams by the Finite Element Method (FEM). Starting from basic data such as topography and the geometrical definition of dam a finite element mesh will be obtained as well as boundary conditions and load vector. Finite element calculations will be performed on this mesh and final results will be analyzed.

**Palabras clave:** Presas; Método de los Elementos Finitos; Modelo numérico.

## 1. INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de estructuras singulares como son las presas ha motivado el desarrollo y puesta a punto de aplicaciones informáticas que nos permitan modelar la estructura con sus singularidades básicas junto con el terreno de cimentación sobre el que se construyen, todo ello asociado a procedimientos de bajo coste y de rapidez de ejecución. El presente artículo se enmarca dentro de los trabajos realizados por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) impulsados por la Dirección General de Obras Hidráulicas del MOPOMA para el desarrollo de "Métodos Numéricos para el Análisis de Obras Hidráulicas". El gran avance que se ha producido en los equipos informáticos y el desarrollo de programas específicos asociados a la versatilidad del procedimiento generan la necesidad de establecer líneas de procedimiento para el diseño y cálculo de presas<sup>(1)</sup>, de tal forma que se obtenga la máxima automatización de las labores de ingeniería (diseño, análisis y construcción).

La utilización del MEF<sup>(2)</sup> para el análisis de presas conlleva la necesidad de: selección del programa de cálculo, modelización de la presa y del terreno, selección del tipo de elemento a utilizar en el análisis, interpretación de los resultados y validez del cálculo.

En general todo el proceso lo podemos esquematizar en tres fases: modelar la presa junto con el terreno de cimentación tanto en su vertiente geométrica como de comportamiento, analizar la estructura según el modelo definido y las condiciones de contorno finalizando con la obtención y estudio de los resultados del cálculo.

## 2. MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Las presas son estructuras tridimensionales que en muchos casos por sus características geométricas, mecánicas o de estados de cargas deben ser modeladas como tales sin que sea posible la utilización de modelos simplificados, esto produce que la obtención del modelo requiera en algunos casos la mayor parte del esfuerzo a realizar.

En la obtención de un modelo matemático para la simulación del comportamiento de una presa pueden distinguirse dos apartados básicos: la realización de los trabajos para la obtención a la malla de elementos finitos correspondiente al dominio de estudio y la definición de las ecuaciones constitutivas o modelos de comportamiento de los materiales.

### + MODELIZACIÓN GEOMÉTRICA

El avance de los sistemas informáticos permite el modelar de forma más exacta las estructuras a analizar: las limitaciones en cuanto a tamaño de los modelos disminuyen rápidamente y la integración de los paquetes de cálculo junto con paquetes de diseño asistido por ordenador permite que los modelos se ajusten cada vez más a la realidad. Esto ha motivado la generación de mallas de elementos finitos en las que ya es posible definir singularidades propias de la estructura (considerar la intersección de diferentes capas de material) e introducir el efecto escala por medio de la utilización de submodelos (estudio particular de galerías, desagües, etc.), lo que ha producido que el proceso de generación de malla suponga en algunos casos la parte más costosa de todo el análisis.

Se describe un metodología básica para la obtención de la malla de elementos finitos utilizados en el análisis. En general existen dos procedimientos: el primero de ellos se corresponde con la definición directa de los nodos y elementos y el segundo con la definición de unas entidades geométricas que nos sirven de base para la realización del mallado. El pri-

(\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX (MOPOMA).

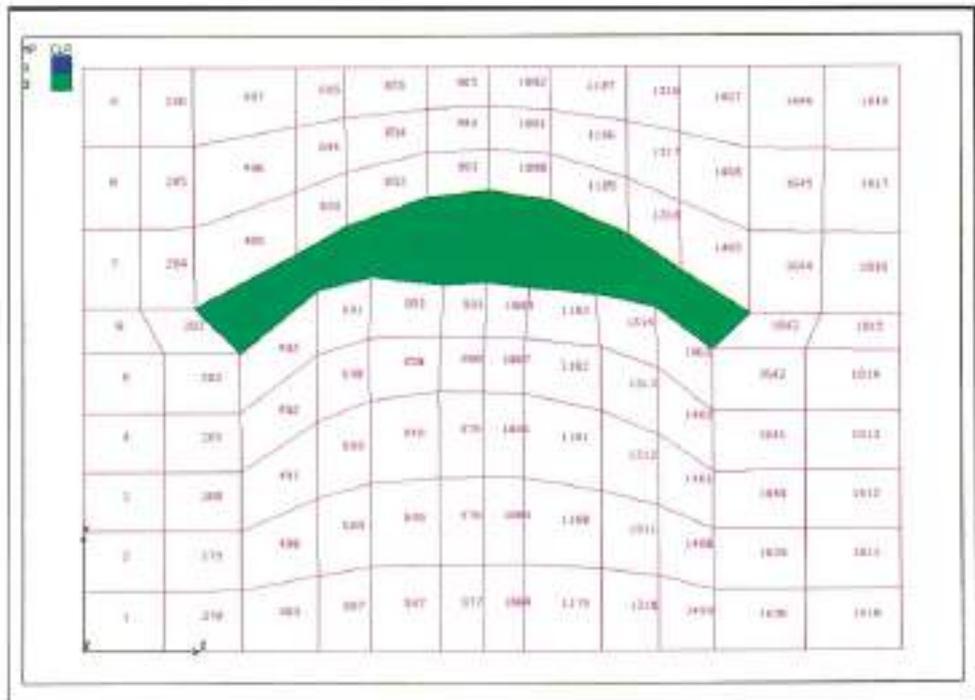
mero de ellos tiene la ventaja de rapidez de ejecución de malla y compatibilidad entre los diferentes programas de cálculo mientras que el segundo destaca por la versatilidad para la modificación de geometrías y cotas de la estructura y poco espacio necesario para almacenar toda la información del modelo. La utilización del segundo procedimiento se impone en aquellos cálculos en los que es posible la definición paramétrica de la geometría de la presa y se dispone del modelo digital del terreno junto con procedimientos que nos permiten la obtención automática de la caja de cimentación, con ello se procede a la realización de cálculos para la obtención de secciones óptimas de la presa en función de alguna variable de estado definida (mínimo volumen, tracciones máximas, etc.)

A continuación describimos los puntos fundamentales de todo el proceso para la construcción de las mallas de cálculo utilizando el segundo procedimiento:

- El modelo geométrico estará formado por los puntos, curvas, superficies y volúmenes, recomendándose la utilización de entidades inferiores para la generación de las demás, por ejemplo, que todo el modelo esté basado únicamente en puntos geométricos.
- Obtención de la topografía del terreno tanto en su estado original como en el estado previo a la construcción de la presa. El movimiento de grandes volúmenes de terreno en fase previa puede introducir modificaciones significativas en el estado tensional inicial del terreno.
- Dados los planos de topografía o modelos digitales del terreno se trazará una cuadrícula en la que habrá que definir los afloramientos de las diferentes capas de material existente así como la geometría de la caja de cimentación y las distintas juntas de la estructura. (Figura 1.)
- La existencia de una marcada heterogeneidad en el terreno de cimentación puede producir una disminución drástica del factor de seguridad de la presa según estudios

realizados por el LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal)<sup>23</sup>. Lo que motiva que en algunos supuestos sea necesario la realización de modelos complejos que contengan todo el conjunto de singularidades.

- A partir de la cuadrícula base definida se procederá a la generación de paralelepípedos por medio de procesos de extrusión hasta alcanzar la cota real del terreno o la definición de la caja de cimentación. Al alcanzar la cota del terreno se degenerarán los volúmenes de mallaado a cuñas y prismas acoplándonos a la topografía existente.
- Una vez definido el modelo correspondiente al terreno de cimentación se procederá a ajustar las cotas de la caja de cimentación según las dadas en los planos de replanteo; esto se realizará por medio de la definición de la superficie de referencia y de las secciones de la presa. Con este proceso se eliminarán los errores producidos en el proceso de digitalización. (Figura 2.)
- A continuación se procederá a la definición de los volúmenes elementales de mallaado correspondientes al cuerpo de la presa, para ello se parte de la cuadrícula correspondiente a la caja de la cimentación y de las definiciones de las secciones dadas de la presa junto con sus singularidades. De esta forma la malla obtenida nos permitirá simular el proceso de construcción de la presa por medio de los bloques definidos entre las juntas.
- Una vez definido el conjunto de volúmenes elementales de mallaado se procederá a la obtención de los elementos. La utilización de generadores de malla avanzados nos permite la obtención de mallas más densas en aquellas zonas en las que los gradientes sean mayores y la aplicación de técnicas de remallaje autoadaptativo para la obtención de las superficies de rotura. (Figura 3.)
- La definición de tipo, tamaño y orientación del elemento es pieza clave para la captura de superficies de rotura apareciendo los problemas de: suavizado de la superficie,



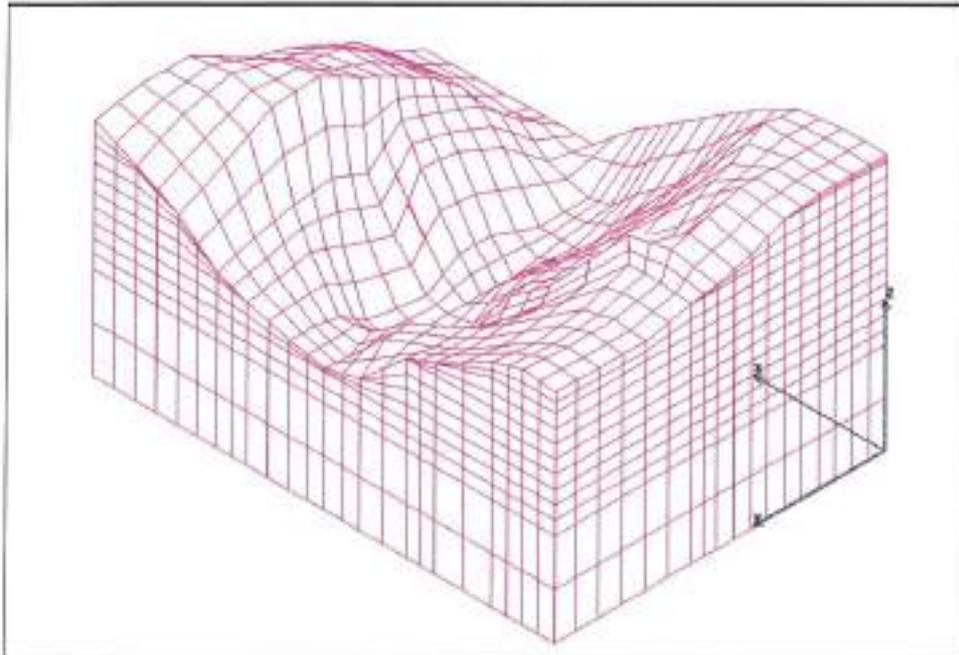


FIGURA 2. Modelo del terreno de cimentación.

dependencia de la alineación y del tamaño de los elementos<sup>4)</sup>. Los diferentes programas de cálculo contienen librerías de elementos que nos permiten la elección del más adecuado en función del comportamiento que se pretende simular<sup>4b), 6)</sup>.

- Otro punto a destacar en la obtención de la malla es la necesidad de coincidencia de los nodos correspondientes a elementos frontera entre los volúmenes, lo que complica el problema en los supuestos de análisis de optimización o en la modelización de complicadas geometrías. Para subsanar en estos casos los problemas que se plantean es posible la utilización de superficies comunes asociadas a los volúmenes e introduciendo restricciones adicionales a los nodos de los contactos.

- En la Figura 4 se presenta un nuevo ejemplo en el que se observan las diferentes zonas de material y sus afloramientos según sus direcciones y buzamientos asociados.

• **MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES**

El modelar el comportamiento por un lado del terreno de cimentación y por otro del hormigón de la presa introduce una de las mayores complejidades de todo el proceso de análisis dado su carácter no lineal.

La característica fundamental del hormigón es su baja resistencia cuando se le somete a esfuerzos de tracción lo que motiva la aparición de fisuras. El tratamiento de la fisuración dentro de la formulación del MEF se produce con la aparición de dos modelos: el modelo de fisura discreta que se ajusta a la simulación de fisuras singulares y el modelo de

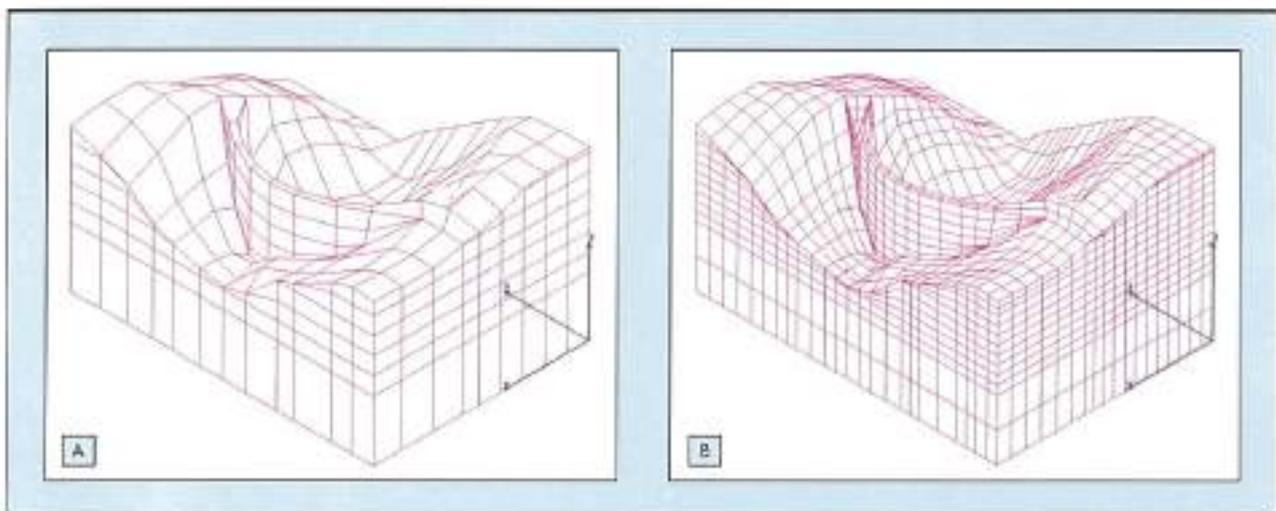


FIGURA 3. A) Volúmenes elementales. B) Malla de elementos finitos generada.

fisuración distribuida que se ajusta a la fisuración generalizada. La obtención de un modelo que nos permita simular el comportamiento real del hormigón en toda su vida útil deberá de considerar los siguientes aspectos: comportamiento instantáneo, comportamiento diferido y efecto de las acciones internas (reacciones químicas, variaciones térmicas estacionales, presión intersticial, etc.)

### 3. PROCESO DE ANÁLISIS

En términos generales el análisis completo de una presa lo podemos realizar por medio de las siguientes etapas:

- Obtención del estado tensional inicial del terreno al comienzo de la construcción: en general la única posibilidad es suponer únicamente el efecto de la gravedad, aunque si el movimiento de tierras ha sido considerable se puede realizar un estudio de los procesos de excavación y construcción producidos, así como la simulación de la excavación de las galerías.
- Simulación de la construcción de la presa: el haber modelado la estructura por medio de bloques que coinciden con las juntas de la estructura nos permite analizar el proceso de construcción, considerando cada bloque independiente.

- Simulación del efecto térmico: el introducir el efecto de las cargas térmicas se realiza en dos fases. La primera de ellas consiste en un cálculo térmico de la presa en la que las condiciones de contorno son las variaciones de temperatura en los paramentos, obteniéndose un campo de temperaturas en todo el dominio. La segunda fase es considerar este campo de temperaturas como un estado inicial del cálculo estructural.
- Simulación del llenado de la presa: se introducirá como una carga de presión en los elementos correspondiente a la altura de la lámina de agua. Asociado a esta carga se encuentra el efecto de la subpresión que puede ser introducido en el modelo ya sea considerando una ley estacionaria en función de la existencia de los drenajes<sup>(7)</sup> o por medio de un modelo basado en una formulación acoplada sólido-fluido.

### 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La realización de la discretización de continuo en pequeños elementos produce la generación de gran cantidad de información como resultado del análisis, en general el estudio de esta información nos plantea una serie de incógnitas con respecto a la fiabilidad del modelo y a los valores obtenidos.

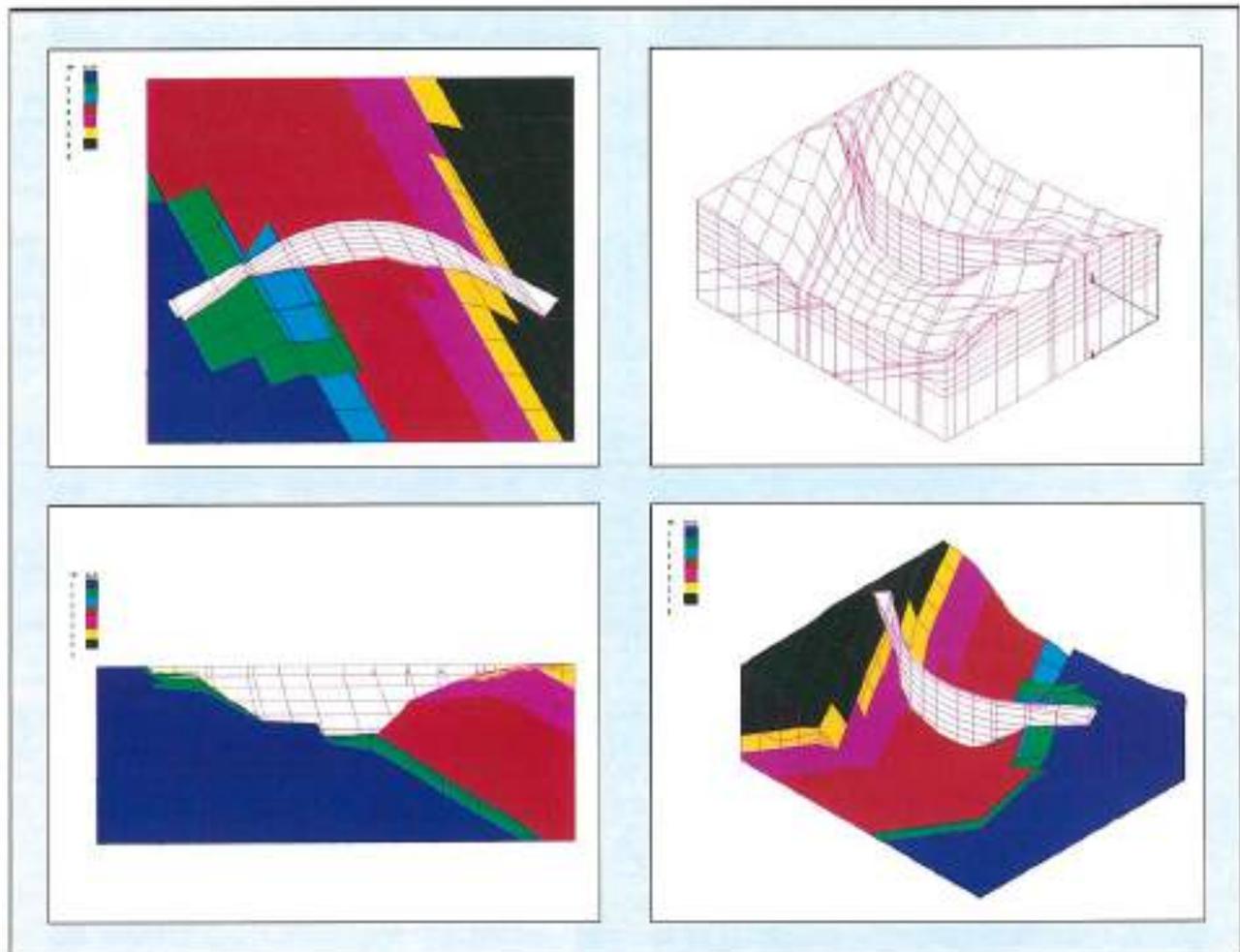


FIGURA 4. Modelización del comportamiento de los materiales.

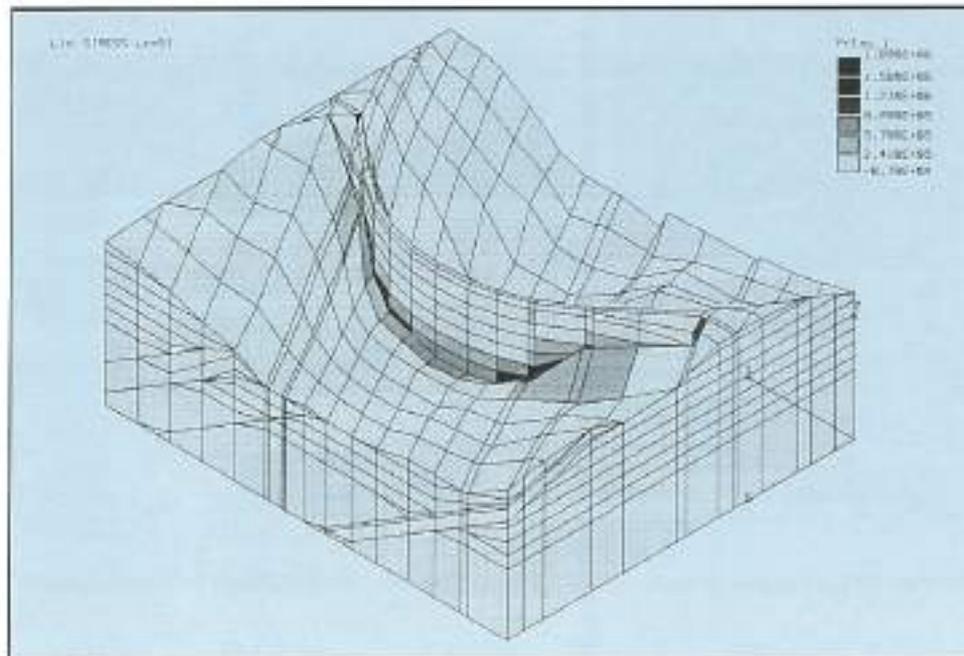


FIGURA 5. Visualización de resultados.

El análisis de los resultados lo podemos realizar en dos etapas: una etapa previa de selección de la información a procesar y otra etapa posterior de visualización.

- En un cálculo genérico toda esta información se almacena para cada etapa del análisis lo que en el caso de mallas con una gran cantidad de grados de libertad y cálculos no lineales o dinámicos, genera una cantidad enorme de información que en algunos casos puede suponer el fallo de los sistemas informáticos por falta de espacio.
- Otro aspecto importante es la visualización de los resultados de entornos de diseño asistido que nos permitan establecer distintos puntos de vista, realizar cortes en el modelo, seleccionar los distintos materiales, etc. (Figura 5.)

## 5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

- El Método de los Elementos Finitos se presenta como una de las herramientas más potentes para la simulación del comportamiento de estructuras singulares como son las presas.
- La utilización de modelos tridimensionales produce un considerable incremento del tiempo de cálculo, asociado a un esfuerzo mayor en la preparación de datos e interpretación de los resultados.
- Dada la complejidad en la visualización del modelo y de los resultados, la realización de estos cálculos sólo es posible con la ayuda de entornos gráficos interactivos que permitan al técnico obtener el modelo según se va generando y le permite la modificación y control de las diversas entidades generadas.
- La obtención de la malla de elementos finitos debe apoyarse en un modelo geométrico, que permita la modificación de las densidades de mallado y de las cotas generales.

- La realización del mallado deberá tener en cuenta los siguientes aspectos: tipo, tamaño y orientación del elemento.
- La utilización de técnicas de frontera para la no coincidencia de nodos entre distintas zonas no se debe aplicar cuando las rigideces de las zonas sean muy diferentes.
- En aquellos cálculos en los que existan materiales con distintas propiedades la recuperación de valores nodales para la obtención de gráficos de contornos se debe limitar a cada material por separado para evitar el enmascarar los valores en las distintas fronteras.
- La utilización de modelos de comportamiento simplificados sólo pueden ser considerados válidos como una primera aproximación y siempre que los estados de tensión-deformación estén dentro de los rangos admisibles.

## 6. REFERENCIAS

1. ICOLD. Finite Element Methods in analysis and design of dams (1987).
2. ZIENKIEWICZ, O. C. y TAYLOR, R. L. The Finite Element Method, 4ª Ed., Mc Graw Hill, Vol I, 1989, Vol. II, 1991.
3. SILVEIRA, A. F.; PINA, C. A. B.; COSTA, C. A. P. y TEIXEIRA DIREITO, F. (1991). Influence of foundation heterogeneity on safety of arch dams. Proc. ICOLD, Vienna, 1991.
4. PASTOR, M.; RUBIO, C. y MIRA, P. (1994). Rotura por localización en geomateriales. III. Aspectos numéricos. Ing. Civil, 94, 51-66.
5. COSMOS/M. (1994). Finite Element Analysis System.
6. ABAQUS. (1993). User's Manual, Vol I, Vol II.
7. Federal Energy Regulatory Commission (FERC) (1991). Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects. Tech. Rep.

# INTERCAMBIADOR DE TRANSPORTES. MADRID-MONCLOA



## AUXINI CONSTRUYE SOLUCIONES



Cada obra requiere una solución concreta  
y un equipo con profesionales y recursos  
técnicos capaces de llevarla a cabo.

Auxini construye soluciones con un firme

compromiso de calidad que nos conduce a la mejora de nuestras infraestructuras.



SOLUCIÓN A GRANDES OBRAS