

Maeso Fortuny, O.

Departamento de Ingeniería Civil

E.S.I.I. de Las Palmas. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Edificio Departamental de Ingenierías I. Campus Universitario. Las Palmas 35017. Tfn (928) 451918. FAX (928) 451879

Dominguez Abascal, J.

Departamento de Mecánica de los Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno

E.S.I.I. de Sevilla. Universidad de Sevilla.

Av. Reina Mercedes s/n. Sevilla 41012. Tfn (95) 4557998. FAX (95) 4557997

Resumen.- En esta comunicación se presenta un modelo basado en la formulación elastodinámica y en la formulación en mecánica de fluidos con pequeñas perturbaciones de Método de los Elementos de Contorno, para estudiar el comportamiento dinámico de un sistema que consta de diversas regiones de distinta fase que actúan de forma acoplada. El modelo recoge los fenómenos de propagación de ondas que tienen lugar en cada una, así como los efectos de interacción que ocurren en las interfases correspondientes. La geometría se modela desde su realidad tridimensional mediante el uso de elementos isoparamétricos de doble curvatura y aproximación parabólica. Se presentan resultados correspondientes al análisis sísmico de una presa bóveda cimentada sobre un semiespacio infinito, que cierra un embalse de geometría irregular que puede suponerse, o no, se extiende indefinidamente.

Abstract.- In this paper a numerical model based on the elastodynamic and the linear fluids mechanics formulation of the Boundary Element Method, to study the dynamic behaviour of a system including several coupled solids and fluids regions, is presented. The model takes into account the traveling waves phenomena in each region, and the interaction effects along their interfaces. The geometries are discretized by three-dimensional quadratic isoparametric elements. Results corresponding to an arch dam on an infinite half-space and an irregular, boundless or finite, reservoir, are presented.

1.- INTRODUCCIÓN

Existen en la ingeniería multitud de problemas en los que el sistema en estudio presenta dominios sólidos y líquidos que pueden ser alcanzados simultáneamente por algún tipo de excitación dinámica. Ejemplos típicos son los grandes sistemas de contención de agua y en particular el análisis sísmico de presas, problema al que se ha dedicado especial atención durante las últimas décadas y que se ha convertido en un clásico dentro de la dinámica de estructuras.

En general, sea cual fuere el problema estudiado, la coexistencia de fases le confiere una considerable complejidad; se trata de medios diversos, de características y comportamiento dinámico claramente diferenciados, que ante la sollicitación dinámica interaccionan entre sí conformando un sistema acoplado (fluido-estructura, o suelo-fluido-estructura en el caso de presas) en el que ninguna de las partes puede ser estudiada aisladamente.

Si se trata de un estudio sísmico además, la flexibilidad del suelo y el tamaño de este tipo de estructuras obliga a considerar el efecto que tiene la naturaleza espacial de la excitación, y por tanto de todos aquellos factores con influencia directa en la

definición de la misma: características geológicas, discontinuidades subterráneas, irregularidades topográficas, etc. Del mismo modo, una correcta modelización de la región líquida necesita recoger todos aquellos factores que afectan al estado hidrodinámico de presiones (compresibilidad del agua, definición precisa de la geometría del vaso, etc).

Finalmente, los efectos de propagación y radiación de ondas en cada medio, especialmente en aquellos que son infinitos (suelo,embalse) tienen una importancia crucial.

Varios han sido los modelos propuestos para abordar el estudio dinámico de un sistema acoplado de estas características, y deben destacarse especialmente los trabajos de Fok y Chopra (1986), que hacen uso del Método de los Elementos Finitos. Estos autores abordan el análisis sísmico de una presa bóveda cimentada sobre un semiespacio uniforme, que cierra un embalse modelado como un canal infinito de sección constante. Sin embargo, a pesar del extraordinario avance que supusieron estos estudios en su contexto científico, muchos de los factores enumerados con anterioridad como decisivos a la hora de determinar la respuesta no pueden ser recogidos, o no de una forma rigurosa, con este

modelo.

Como contrapartida, en esta comunicación se presenta un modelo numérico basado en el Método de los Elementos de Contorno (MEC), que ya ha puesto de manifiesto su buena aptitud para problemas dinámicos con presencia de regiones infinitas, en las que se produce amortiguamiento por radiación que no puede ser tenido en cuenta de forma sencilla con los métodos de dominio. El modelo propuesto permite el estudio dinámico acoplado de dominios sólidos y líquidos, incluyendo los efectos de propagación de ondas en cada uno y los fenómenos de interacción conjunta y simultánea.

Admitiendo un estado dinámico en régimen armónico, los sólidos se modelan como medios viscoelásticos lineales y el agua como un medio fluido compresible no viscoso gobernado por la ecuación de Helmholtz.

El objetivo de esta comunicación es presentar algunos aspectos de la formulación que tienen que ver con la implementación del algoritmo. Se trata de ver cómo pueden ser modelados numéricamente los principales fenómenos físicos involucrados en el problema, a la vez que aportar ciertas recomendaciones útiles a la hora de elegir el tipo de mallas empleadas. Como problema de referencia se ha escogido el análisis sísmico de una presa bóveda, del que al final se presentan algunos resultados.

2.- ASPECTOS DE LA FORMULACIÓN

En un dominio elástico, la representación integral del desplazamiento de un punto en función de los movimientos *u* y tracciones *t* en puntos exclusivamente del contorno viene dada por la expresión ya conocida

$$C^i u^i + \int_{\Gamma} T^* u d\Gamma = \int_{\Gamma} U^* t d\Gamma \quad (1)$$

donde *T* y *U* son las funciones de la solución fundamental, habiéndose despreciado las fuerzas másicas.

De forma parecida, las presiones *p* y flujos normales $\partial p / \partial \eta$ en el contorno de las regiones líquidas están ligadas por la representación

$$C^i p^i + \int_{\Gamma} p \frac{\partial p^*}{\partial \eta} d\Gamma = \int_{\Gamma} \frac{\partial p}{\partial \eta} p^* d\Gamma \quad (2)$$

En este trabajo las superficies tridimensionales se discretizan mediante una combinación de elementos de contorno de doble curvatura, cuadriláteros y triangulares, de nueve y seis nodos respectivamente. En ellos, tanto la geometría como las variables de campo se aproximan a partir de los valores nodales mediante funciones de interpolación parabólicas en

dos direcciones.

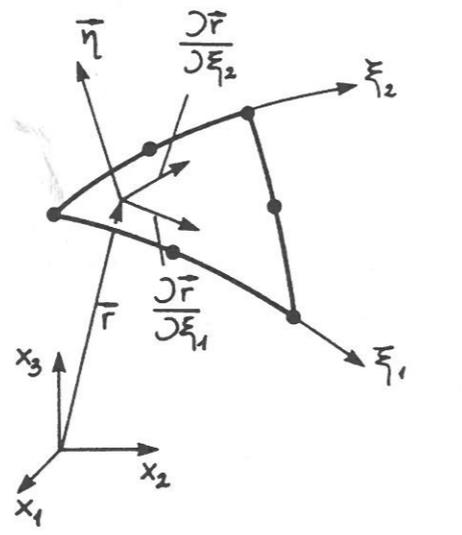
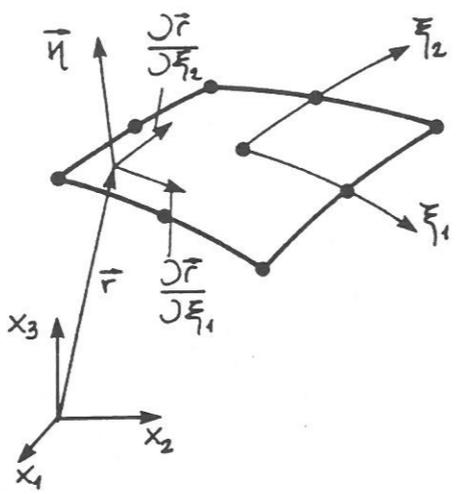


Fig. 1.- Tipología de elementos de contorno

Las coordenadas *x* de un punto del elemento *j* vienen determinadas por

$$x = \Phi(\xi_1, \xi_2) x^j \quad (3)$$

donde *x^j* es un vector que contiene las tres coordenadas globales de los *Q* nodos del elemento, y Φ es la matriz de funciones de forma, escritas en términos de las coordenadas adimensionales ξ_1 y ξ_2 . Como ya se ha expuesto, el mismo tipo de interpolación se emplea para representar desplazamientos y tracciones en el caso elástico, y presiones y movimientos en el caso de medios fluidos

$$u = \Phi \frac{u^j}{t^j} \quad \text{ó} \quad p = \Phi \frac{p^j}{w^j} \quad (4)$$

donde *w* representa el movimiento normal, que en el caso de régimen armónico está relacionado con el flujo mediante

$$\frac{\partial p}{\partial \eta} = \rho \omega^2 w \quad (5)$$

Esta aproximación permite llegar hasta la ecuación integral discretizada que para el medio elástico resulta ser

$$C^i u^i + \sum_{j=1}^E \left\{ \int_{\Gamma} T^* \Phi d\Gamma_j \right\} u^j = \sum_{j=1}^E \left\{ \int_{\Gamma} U^* \Phi d\Gamma_j \right\} t^j \quad (6)$$

obteniéndose una ecuación semejante para el medio fluido.

En el caso del agua, la aplicación del método de las imágenes permite contemplar de forma automática la inexistencia de presiones en la superficie libre, con lo que ésta no tiene que ser discretizada.

Criterios de integración numérica

En cuanto a las integrales de la solución fundamental, éstas se han resuelto numéricamente mediante de cuadraturas Gauss-Legendre. El caso más comprometido corresponde a la integración sobre un elemento al que pertenece el punto de aplicación. Se producen entonces singularidades que son del orden de $O(1/r^2)$ en las tracciones (o flujos) y $O(1/r)$ en los desplazamientos (o presiones). La estrategia utilizada en estos casos se basa en la descomposición del elemento en triángulos desde el punto de aplicación, y posterior degeneración de cada uno de ellos hacia cuadrados para la aplicación de una cuadratura estándar. El jacobiano asociado se anula en el vértice donde está la singularidad y por lo tanto disminuye en una unidad el orden de la misma.

Condiciones de contorno

En los contornos exteriores se imponen las condiciones de contorno conocidas. En las interfaces entre sólidos existirá igualdad de movimientos y equilibrio de tracciones.

Finalmente, en las interfaces sólido-agua se impone igualdad de presión en el fluido con la tracción normal al sólido y ausencia de tensiones tangenciales, mientras que el movimiento normal debe ser igual para ambos. Matemáticamente estas condiciones se expresan como

$$w = u_x \eta_x + u_y \eta_y + u_z \eta_z \quad \begin{matrix} t_x = p \eta_x \\ t_y = p \eta_y \\ t_z = p \eta_z \end{matrix} \quad (7)$$

Evaluación de los términos singulares

En el cálculo de los términos de la diagonal principal de la matriz *H*, especialmente en el caso de las subregiones sólidas, se producen singularidades que no pueden ser integradas eficientemente con el procedimiento general. En este caso se emplea un procedimiento indirecto, basado en la idea del movimiento de sólido rígido, para integrar la parte estática de la solución fundamental. El resto, esto es, una nueva solución fundamental que surge de restar la parte estática a la solución armónica, no es singular y por tanto su evaluación no plantea problemas.

$$h_{ii} = C + \hat{h}_{ii} = (C + \hat{h}_{ii}^s) + (\hat{h}_{ii} - \hat{h}_{ii}^s) = - \sum_{i \neq j} \hat{h}_{ij}^s + (\hat{h}_{ii} - \hat{h}_{ii}^s) \quad (8)$$

Cuando se trata de regiones infinitas la aplicación de este procedimiento requiere acotar el contorno puesto que las tensiones en el infinito no están determinadas. La subregión se cierra en este caso con un nuevo contorno que no introduce nuevas incógnitas y que sólo tiene como misión poder integrar sobre él la solución fundamental estática. Por lo tanto la forma de este "contorno ficticio" puede ser cualquiera, eligiéndose en general la más sencilla.

Un planteamiento similar al anterior puede hacerse para la región líquida si se tiene en cuenta que un campo equipotencial estático produce flujos nulos en el contorno. De esta manera se puede evitar el engorroso cálculo de los términos libres.

Consideración de embalses infinitos

En numerosas ocasiones la magnitud de la región líquida hace inviable extender la discretización hasta sus verdaderos límites. La principal dificultad entonces radica en una consideración correcta de los fenómenos de propagación de ondas de presión que se producen más allá desde donde se corta la discretización.

En el caso de embalses, una idealización corriente de esta situación consiste en simular que a partir de cierta distancia desde el muro de contención el embalse continúa indefinidamente como una canal de sección uniforme. El cabeceo de la presa producido por la excitación sísmica provoca en el fluido compresible un tren de ondas de presión cuyo desarrollo contiene términos complejos del tipo e^{-kx} que no se amortiguan con la distancia a la presa (Dominguez y Meise (1991)). Para modelar la radiación de ondas se hace uso de un nuevo contorno (perpendicular a la dirección del canal) que se coloca donde se corta la discretización. En él se impone como condición de contorno la relación que existe entre la presión y los movimientos normales que

corresponde al mecanismo de propagación que existiría si el canal realmente fuese infinito. La principal misión de este nuevo contorno es absorber la energía correspondiente a los modos no amortiguados del desarrollo de presiones, por lo que (ante la infinitud de posibles geometrías posibles) la modelización numérica de la situación puede llevarse a cabo haciendo uso de un canal de sección rectangular, para el cual el desarrollo de la ley de presiones tiene una expresión conocida:

$$p = \sum_1^{\infty} \sum_1^{\infty} A_{nm} e^{K_{nm}x} \cos \lambda_z^n z \cos \lambda_y^m y \quad (9)$$

con

$$\lambda_z^n = \frac{2n-1}{2H} ; \lambda_y^m = \frac{m-1}{B} ; n, m = 1, 2, 3, \dots$$

$$K_{nm} = \sqrt{(\lambda_z^n)^2 + (\lambda_y^m)^2 - \frac{\omega^2}{c^2}} \quad (10)$$

donde H y B son la profundidad y el ancho del canal respectivamente. Así pues el modelo de elementos de contorno de embalses abiertos incluye a cierta distancia de la presa una zona de transición hacia una geometría rectangular donde se sitúa el contorno absorbente. Escogido un número NxM de términos del desarrollo (en función del rango de frecuencias de estudio), es posible obtener una relación p-w en NxM puntos de dicho contorno, escribiendo (10) y su derivada con NxM términos en cada uno y eliminando A_{nm} .

3.- CRITERIOS DE GENERACIÓN DE MALLAS EN PROBLEMAS DE INTERACCIÓN SUELO-AGUA-ESTRUCTURA

La formulación anterior ha sido aplicada para abordar el caso correspondiente al estudio sísmico de una presa bóveda sobre un semiespacio. El problema se visualiza en las figuras 2 a y 2 b, habiéndose considerado un problema simétrico de manera que sólo sea necesario discretizar la mitad de la geometría. En el próximo apartado se presentan los resultados obtenidos, pero antes conviene hacer algunos comentarios acerca de las mallas utilizadas.

La infinitud de la región suelo obliga a plantear en ella el problema dinámico en campo difractado, de manera que sólo es necesario discretizar los contornos interiores y la parte cercana a la presa de aquellos que se extienden indefinidamente. La cuestión se centra en evaluar qué cantidad de superficie libre debe ser discretizada. Numéricamente se comprueba que existen dos situaciones claramente

distintas según se considere el embalse vacío o lleno.

- Embalse vacío

En este caso la naturaleza tridimensional del problema permite que el campo difractado por la presa se amortigue rápidamente. Diversas pruebas permiten deducir que es suficiente alejarse de la presa distancias del orden de dos veces su altura, de tal forma que cambios en la geometría del suelo situados más allá apenas influyen en la respuesta de la bóveda. De hecho la naturaleza finita o infinita del embalse no aportó diferencias en los resultados cuando aquél se consideró vacío.

En cuanto al tamaño de los elementos, éste viene determinado por la velocidad de propagación de las ondas en el medio y por el rango de frecuencias de estudio. La aproximación parabólica que se está usando permite recoger una variación espacial de la señal aproximadamente igual a una semilongitud de onda en cada elemento, de manera que ésta ha sido la regla usada para acotar el tamaño de aquellos. De nuevo la existencia de amortiguamiento por radiación permite ir usando elementos de mayor tamaño a medida que uno se aleja de la presa, no sólo por la mayor distancia a la zona de interés sino porque los errores numéricos que se cometen van teniendo progresivamente menor influencia en el entorno de aquella.

- Embalse lleno

El agua y los medios sólidos presentan un comportamiento dinámico sensiblemente distinto, lo cual acarrea algunas dificultades numéricas. En concreto la velocidad de las ondas de presión en el agua (1438.6 m/s) resulta muy inferior a la de las ondas S en el hormigón o la roca (un valor típico es del orden de 2500 m/s). La primera consecuencia es que en las interfases sólido-agua el tamaño de los elementos, (según la regla dada anteriormente) vendrá determinado por la menor longitud de las ondas en el fluido. En segundo lugar, la diferencia de velocidades de propagación conduce a que en el sistema de ecuaciones los coeficientes de las regiones sólidas y líquida sean de diferente orden de magnitud, lo que dificulta su resolución numérica.

Por último, el embalse se comporta como un medio menos amortiguado que el suelo, por lo que no sólo será necesario aumentar la distancia de embalse discretizada, sino también cuidar que no se produzcan errores numéricos manteniendo constante el tamaño de los elementos. Para el problema abordado el embalse se ha continuado hasta una distancia del orden de tres veces la altura de la presa. Para uniformizar los resultados la discretización correspondiente a la mayor frecuencia se ha empleado en todo el rango.

Cuando el embalse se modela como un canal infinito, el número de nodos a considerar en el

contorno absorbente dependerá del número de términos a considerar en el desarrollo de presiones, debiéndose recoger al menos todos los modos no evanescentes para cada frecuencia.

4.- RESULTADOS DE UN PROBLEMA COMPLETO CON INTERACCIÓN SUELO-AGUA-ESTRUCTURA

Se trata del análisis de la presa de Morrow-Point que ha sido estudiada con el modelo ya comentado de Fok y Chopra (1986). Por razones de espacio tan sólo se presenta un resumen de los resultados. Un análisis más completo, para otras condiciones de interacción y excitaciones diferentes, puede encontrarse en los artículos de Maeso y Dominguez, y Dominguez y Maeso (1993). Las discretizaciones empleadas de elementos de contorno se ilustran en las figura 2 a y 2 b para los casos de embalse abierto y cerrado. Para la presa se adoptan las propiedades del hormigón: densidad = 2481.55 Kg/m³; coeficiente de Poisson 0.2; módulo de elasticidad transversal = 11500 MPa y coeficiente de amortiguamiento del 5%. El suelo tiene las siguientes propiedades: densidad = 2641.65 Kg/m³, coeficiente de Poisson = 0.2, módulo de elasticidad transversal = 11500 MPa y un coeficiente de amortiguamiento del 5%.

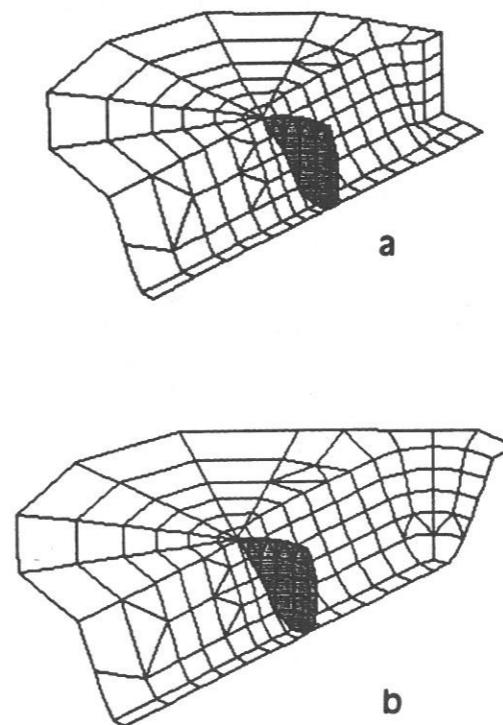


Fig. 2.- Geometría y discretización de elementos de contorno. (a) embalse abierto; (b) embalse cerrado

La excitación se modela como un tren de ondas armónicas planas SV que incide verticalmente, provocando en las zonas alejadas de la superficie libre un movimiento unitario según la dirección de la cerrada. Las curvas de respuesta representan la amplificación del movimiento anteroposterior en la coronación de la presa frente a la frecuencia de excitación.

La figura 3 corresponde a la situación de embalse vacío. En este caso se obtienen resultados prácticamente iguales para las dos discretizaciones. La figura muestra la influencia de la flexibilidad del suelo frente a la situación de base rígida. La distribución espacial de la excitación, la existencia de amortiguamiento por radiación y el efecto de la interacción mutua produce la disminución de las frecuencias naturales del sistema y de los picos de amplificación.

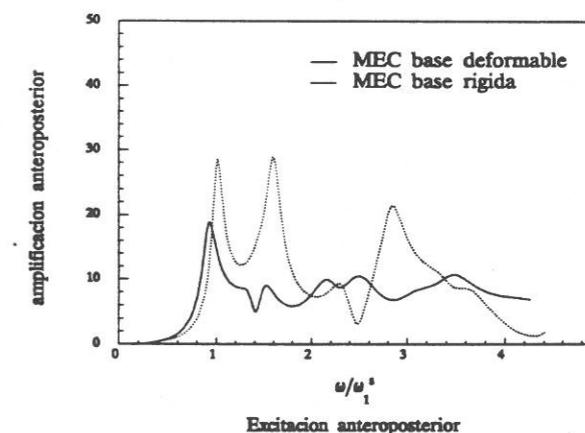


Fig. 3.- Influencia de la flexibilidad del suelo. Embalse vacío

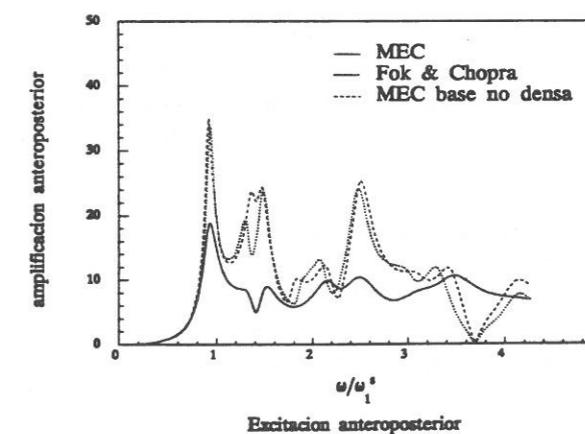


Fig. 4.- Base deformable. Embalse vacío

La figura 4 presenta la comparación entre estos resultados y los obtenidos por Fok y Chopra mediante el MEF, para los que el suelo es una región acotada sin masa. Se demuestra que las graves

diferencias se deben a esta drástica simplificación, puesto que el MEC reproduce estos resultados cuando se adopta para la roca un valor de densidad del orden de mil veces inferior al real.

Cuando se considera el embalse lleno los resultados presentan diferencias importantes dependiendo de la geometría del vaso. En la figura 5 se aprecia que la suposición de embalse abierto (modelo que puede estar lejos de la realidad en muchos casos) presenta unos picos de amplificación sensiblemente menores al modelo de embalse que se cierra a una distancia de tres veces la altura de la presa. Esto se debe a que el modelo abierto introduce en el sistema un mecanismo de expulsión de energía aguas arriba del canal, que no existe en el cerrado, donde sólo la radiación a través del suelo introduce cierto amortiguamiento.

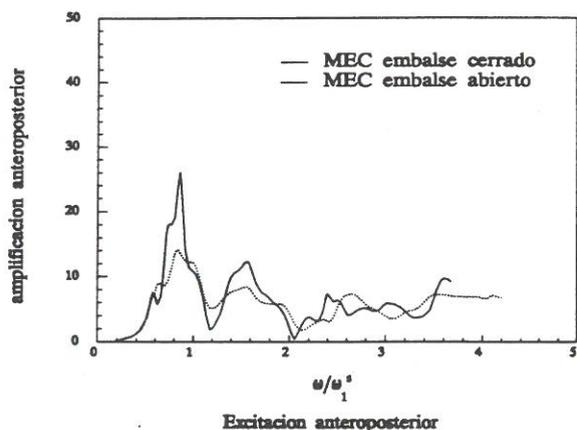


Fig. 5.- Base flexible y embalse lleno.
Influencia de la geometría del vaso

Por último, en la figura 6 se comparan los resultados del modelo abierto con los del MEF. Éste supone, además de un suelo sin densidad, un mecanismo de interacción entre el embalse y la base basado en un coeficiente de absorción, según una teoría monodimensional de propagación. Las diferencias entre ambos modelos son importantes, y de nuevo se puede demostrar se deben a las simplificaciones que hace el MEF, pues si el código de elementos de contorno se modifica para tener en cuenta la interacción suelo-embalse de esta manera, y se elimina la densidad de la roca, los resultados entonces presentan un buen acuerdo.

5.- SUMARIO

Se ha presentado un modelo tridimensional de elementos de contorno para el estudio en régimen armónico de sistemas con interacción suelo-agua-estructura. El modelo es capaz de contemplar de forma rigurosa y simultánea la distribución espacial

de la excitación, los efectos de interacción mutua, los fenómenos de propagación de ondas en cada medio y la geometría real de las superficies en una gran extensión. Todos ellos son factores esenciales para definir correctamente la respuesta y no podían ser tenidos en cuenta de forma completa o precisa por otros procedimientos de modelado numérico.

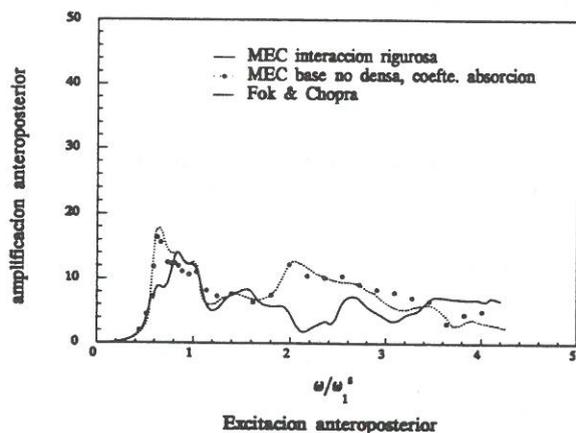


Fig. 6.- Base flexible y embalse abierto lleno de agua

Se han repasado los aspectos más importantes de la formulación, haciendo hincapié en las consideraciones a tener en cuenta a la hora de generar discretizaciones para abordar un problema de estas características. Finalmente se presentan algunos resultados para un problema completo de interacción que permiten poner de manifiesto la mejor aptitud del modelo frente a otros procedimientos numéricos existentes.

6.- REFERENCIAS

- 1 Fok, K. y Chopra, A.K. "Earthquake analysis of arch dams including dam-water interaction, reservoir boundary absorption and foundation flexibility". *Earth.Eng.Struct.Dyn.* 14 (1986) 159-184
- 2 Dominguez, J. y Meise, T. "On the use of the BEM for wave propagation in infinite domains". *Eng.Anal. with B.E.* 8, No. 3 (1991) 132-138
- 3 Maeso, O. "Modelo para el análisis sísmico de presas bóveda incluyendo los efectos de interacción suelo-agua-estructura". Tesis Doctoral. (1992) ULPGC
- 4 Maeso, O. y Dominguez, J. "Earthquake analysis of arch dams. Part I: Dam-foundation rock interaction and traveling waves effects". *J.of Eng.Mech.* (1993) (En prensa)
- 5 Dominguez, J., y Maeso, O. "Earthquake analysis of arch dams. Part II: Combine dam-water-foundation rock interaction and traveling wave effects". *J.of Eng.Mech.* (1993) (En prensa)