The book cover features a dark background with two large, white, curved shapes containing a grid pattern, resembling a mesh or a digital grid. Below these shapes, the title is printed in large, bold, white capital letters. At the bottom of the cover, there is a black and white photograph of a large, multi-story building with many windows, likely a university or government building, with trees in the foreground.

MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA V

Métodos Numéricos en Ingeniería V

Editores:

J. M. Goicolea
C. Mota Soares
M. Pastor
G. Bugeda

Publicado por:

SEMNI

Sociedad Española de Métodos
Numéricos en Ingeniería

Métodos Numéricos en Ingeniería V

Editores: J. M. Goicolea, C. Mota Soares, M. Pastor y G. Bugeda

Primera edición, Junio 2002

ã SEMNI, Sociedad Española de Métodos Numéricos en Ingeniería
www.cimne.upc.es/semni

Impreso por: Artes Gráficas Torres S.A., Morales 17, 08029 Barcelona, España

Depósito legal: B-27.295-02

ISBN: 84-95999-03-X

Estudio de la propagación de fisuras en materiales dúctiles <i>R. Flores y M. Astiz</i>	116
Análisis numérico de la influencia del Modo II en los ensayos de fractura en Modo mixto I/II de hormigón y morteros <i>J. Gálvez, D. Cendón y J. Planas</i>	117
Simulación de la estela plástica mediante elementos finitos en el crecimiento de grieta en fatiga <i>D. García, A. González, J. Zapatero, B. Moreno y J. Pascual</i>	118
Fisuración por fatiga en probetas CT mediante el uso de superficies cohesivas <i>O. López, J. Pérez y G. Maugin</i>	119
Una formulación de daño direccionado, basado en la similitud con la formulación cinemática de un problema elástico en grandes deformaciones <i>B. Luccioni y S. Oller</i>	120
El método de las discontinuidades fuertes en deformaciones finitas <i>J. Oliver, M. Pulido y A. Huespe</i>	121
Elementos finitos con discontinuidades internas. Estudios del bloqueo de tensiones y de sus posibles soluciones <i>J. Oliver, A. Huespe, M. Pulido, E. Chaves y E. Samaniego</i>	122
Modelización de fisuración y daño en hormigón generado por enfriamiento a muy bajas temperaturas <i>J. Planas y M. Elices</i>	123
Aplicação da simulação numérica no estudo da resistência à fractura de ligações soldadas <i>D.M. Rodríguez y L.F. Menezes</i>	124
Modelización numérica de pieza entalladas <i>A. Rodríguez, I. Morata y A. Huerta</i>	125
DIFERENCIAS Y VOLÚMENES FINITOS	
Esquemas centrados de alto orden que satisfacen el principio del máximo para leyes de conservación hiperbólicas <i>C. Conde y A. Balaguer</i>	129
Aplicación de técnicas de estabilización a la resolución mediante volúmenes finitos de problemas fuertemente convectivos <i>A. Hidalgo, A. López y J. Pérez</i>	130
Resolución mediante diferencias finitas de un sistema elíptico acoplado doblemente no lineal <i>U. Kindelán, E. Schiavi y A. Muñoz</i>	131
Algunos modelos numéricos en acústica no lineal <i>C. Vanhille</i>	132
DINÁMICA DE ESTRUCTURAS	
Mecapac: una aplicación de cálculo simbólico y numérico mediante Maple a sistemas dinámicos no lineales <i>J.J. Arribas y S. Muelas</i>	135
Difracción de ondas de Lamb por defectos <i>J. Galán y R. Abascal</i>	136
Modelos numéricos para cálculo dinámico de puentes de ferrocarril de alta velocidad <i>J. Goicolea, J. Domínguez y F. Gabaldón</i>	137
Formulación del método de los elementos de contorno para cargas móviles en medios viscoelásticos <i>J. González, F. Medina y R. Abascal</i>	138
Cálculo de factores de intensidad de tensiones dinámicos considerando contacto unilateral mediante el Método de Elementos de Contorno <i>J. Granados y R. Gallego</i>	139
Análisis de la respuesta sísmica de presas bóveda considerando el carácter espacial de la excitación y la influencia de los sedimentos de fondo <i>O. Maeso, J. Aznárez y J. Domínguez</i>	140

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS BÓVEDA CONSIDERANDO EL CARÁCTER ESPACIAL DE LA EXCITACIÓN Y LA INFLUENCIA DE LOS SEDIMENTOS DE FONDO

Orlando Maeso^{*}, Juan J. Aznárez^{*} y José Domínguez^{}**

^{*} IUSIANI

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Campus Universitario de Tafira, España
e-mail: maeso@cicei.ulpgc.es, jaznarez@cicei.ulpgc.es

^{**} Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092 Sevilla, España.
e-mail: pepon@cica.es

SUMARIO

En este trabajo se hace uso de un modelo de elementos de contorno tridimensional para el análisis de sistemas acoplados constituidos por agua y regiones de naturaleza viscoelástica y poroelástica sin ninguna limitación en su configuración geométrica. Este modelo será aplicado al estudio de la respuesta dinámica de presas bóveda teniendo en cuenta la influencia que en ella tienen el carácter espacial de la excitación y la existencia de sedimentos en el fondo del embalse. Así, las cuatro regiones (presa, agua, terreno circundante y sedimento) son discretizadas y la interacción entre ellas es considerada de forma rigurosa imponiendo condiciones de compatibilidad y equilibrio. La presa y el terreno serán consideradas regiones viscoelásticas y el agua como un fluido compresible no viscoso. El sedimento será considerado como un medio bifásico de naturaleza poroelástica (matriz sólida y agua) de acuerdo con la formulación de Biot. En primer lugar analizaremos el comportamiento del conjunto presa-agua-terreno donde la excitación se impone prescribiendo en el suelo un tren de ondas planas que atacan a la presa desde zonas alejadas con ángulo variable. Los resultados demuestran que el carácter espacial de la excitación, el ángulo de incidencia de las ondas y la geometría del cañón afectan de forma muy sensible la respuesta. En segundo término se analizará el efecto provocado por la existencia de sedimentos de naturaleza poroelástica en el fondo del embalse. Se estudiará esta influencia para excitaciones volumétricas que se propagan verticalmente. Se pondrá de manifiesto la importancia que el grado de saturación del medio poroelástico tiene en la respuesta. Asimismo se propondrán modelos monofásicos simplificados del sedimento con el objetivo de reducir el número de grados de libertad del problema. Estos modelos simplificados se validarán mediante comparativa con el modelo poroelástico bifásico.

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS BÓVEDA CONSIDERANDO EL CARÁCTER ESPACIAL DE LA EXCITACIÓN Y LA INFLUENCIA DE LOS SEDIMENTOS DE FONDO

Orlando Maeso*, Juan J. Aznárez* y José Domínguez**

* IUSIANI

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Campus Universitario de Tafira, España
e-mail: maeso@cicei.ulpgc.es ; jaznarez@cicei.ulpgc.es

** Escuela Superior de Ingenieros
Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092 Sevilla, España
e-mail: jose@us.es

Palabras clave: Dinámica, Ingeniería sísmica, Interacción suelo-agua-estructura, Presas bóveda, Elementos de Contorno.

Resumen. *Se presenta un modelo tridimensional de elementos de contorno para el estudio de la respuesta dinámica de presas bóveda teniendo en cuenta la influencia del carácter espacial de la excitación y la existencia de sedimentos de fondo. Presa, agua, terreno circundante y sedimento son discretizados y la interacción entre ellos se impone a través de condiciones de compatibilidad y equilibrio. La presa y el terreno se consideran regiones viscoelásticas lineales y el agua como un fluido compresible no viscoso. El sedimento será considerado como un medio bifásico de naturaleza poroelástica (matriz sólida y agua) de acuerdo con la formulación de Biot.*

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento sísmico de presas bóveda es uno de los campos clásicos dentro de la ingeniería estructural, para el que puede decirse con propiedad, a pesar del gran avance de conocimientos adquiridos sobre el tema en las dos últimas décadas, que sigue siendo en la actualidad objeto de numerosos estudios y desarrollos. Esto es debido a que existen todavía importantes factores del problema que, bien por desconocimiento exacto del fenómeno o bien por la gran dificultad que supone su correcta modelización, no están siendo aún incorporados en las metodologías más habituales de cálculo. Entre estos factores son destacables los relativos a la influencia del carácter espacial de la excitación sísmica, y los relacionados con la influencia de los sedimentos de fondo del embalse en el comportamiento dinámico de la presa. Ambos factores son los puntos de estudio abordados en este trabajo.

Un terremoto puede entenderse como un mecanismo de propagación de ondas elásticas a través del terreno, cuyas características dependen fuertemente del mecanismo de falla que origina el sismo y su profundidad, indudablemente también de aspectos geológicos y topográficos, así como de las características elásticas del suelo. En cualquier caso, la naturaleza propagatoria del fenómeno sísmico implica que puntos de la superficie del terreno distantes entre sí el orden de alguna de las longitudes de onda relevantes en un sismo, pueden estar excitados en un mismo instante con desplazamientos (y aceleraciones) diferentes, e incluso en desfase. Este efecto (que no está recogido en los métodos de cálculo usuales que suponen un desplazamiento uniforme de todos los puntos de cimentación) será importante en estructuras que por su tamaño puedan verse sometidas a sollicitaciones con variación espacial, ante el evento de un terremoto, como es el caso de una gran presa bóveda. Asumir una simplificación que suponga una excitación uniforme a lo largo de los estribos de la presa no sólo deja de representar los efectos de interacción presa-base rocosa, sino que afecta a la naturaleza misma de la sollicitación, y como veremos a lo largo de este artículo, puede llevar a conclusiones erróneas. La tipología de las ondas sísmicas así como el ángulo de ataque hacia el emplazamiento de la presa serán los aspectos recogidos en el análisis que se va a presentar.

El otro de los aspectos que será objeto de nuestra atención se refiere al efecto que puede tener la presencia de sedimentos de fondo en el embalse sobre el comportamiento dinámico de la presa. Los sedimentos alteran el campo de presiones hidrodinámicas en el embalse, y por tanto en el paramento aguas arriba de la presa, y este efecto es especialmente importante en el caso de sedimento parcialmente saturado.

La figura 1 esquematiza el tipo de problema que se va a resolver. Se considerarán cañones de diferentes geometrías. El nivel de llenado del embalse podrá asimismo ser variable, incluyendo o no la presencia en el fondo de una capa de sedimentos de espesor y longitud variable. Se desea conocer la respuesta dinámica de la presa ante una excitación consistente en una onda armónica plana que incide con ángulo variable desde zonas alejadas. Se trata por tanto de un problema que debe ser abordado en su realidad tridimensional, incluyendo los efectos de interacción conjunta entre cuatro regiones de distinta naturaleza (presa-agua-suelo-sedimento), y la naturaleza espacial de la excitación.

Los efectos de amplificación local del movimiento sísmico producidos por la presencia

del cañón o depósitos aluviales han sido objeto de numerosos estudios. La mayor parte plantean soluciones basadas en formulaciones integrales para modelos bidimensionales [1-3], o ciertas geometrías particulares tridimensionales [4], y en todos los casos los autores concluyen la importancia del efecto espacial de la onda viajera.

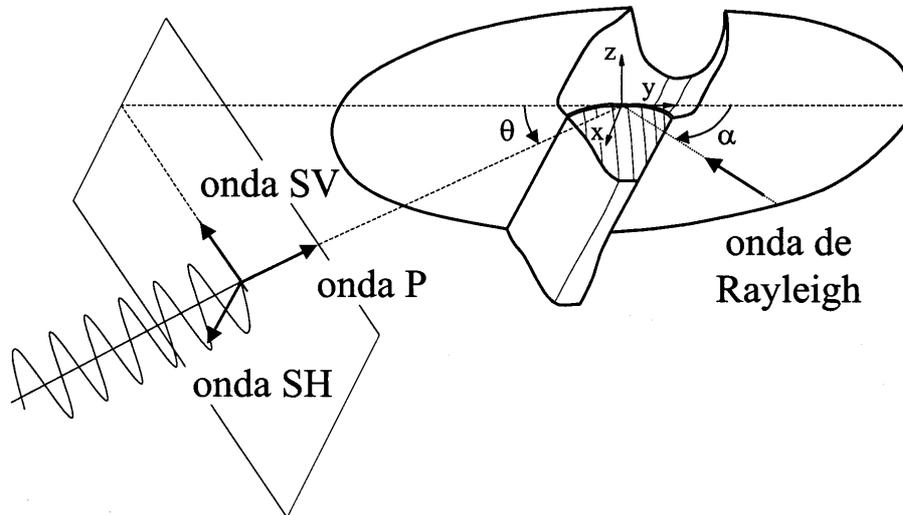


Figura 1. Descripción del problema

Con aplicación concreta al estudio tridimensional de presas citaremos los trabajos de Chen y Hou[5] y Zhan y Zhao[6]. Sin embargo, el primer modelo numérico tridimensional que incluyó los efectos de interacción suelo-agua-estructura fue desarrollado por Fok y Chopra[7][8]. Se trata de un modelo de elementos finitos que considera al agua como un fluido compresible, la presa como lámina delgada y el suelo como un continuo elástico sin masa que se extiende hasta cierta distancia de la presa. La interacción agua-suelo se aproxima a través de un coeficiente de absorción que debe estimarse a partir de las propiedades del fondo del embalse. Este modelo supuso un gran avance en la modelización del problema, pero presenta limitaciones importantes, especialmente las que derivan de la representación del suelo: medio acotado y sin masa. Con ello se altera seriamente tanto la naturaleza de la propagación como los efectos de acoplamiento. Trabajos más recientes (Zhang y Chopra[9][10] y Tan y Chopra[11][12]) han introducido mejoras respecto al modelo anterior, y consideran la base rocosa mediante una formulación bidimensional de elementos de contorno combinada con una expansión en serie a lo largo de la dirección axial del cañón. Sin embargo en esta nueva versión la geometría del cañón está restringida a cañones de sección uniforme según su dirección axial, por lo que la realidad tridimensional del problema no queda recogida cuando la base rocosa presenta una topografía que no admite tal simplificación. Otros autores [13][14] han presentado otros modelos que también consideran un cañón de sección constante usando para el suelo un modelo bidimensional de elementos de contorno.

Como alternativa, el trabajo que aquí se presenta está basado en el modelo tridimensional de elementos de contorno presentado por Maeso y Domínguez [15][16]. Dicho modelo permite el estudio dinámico armónico de regiones sólidas viscoelásticas (presa y suelo), regiones fluidas compresibles (agua embalsada), al tiempo que tiene en cuenta los efectos de interacción entre cualesquiera dos de estos dominios en sus interfases. También contempla la naturaleza no finita del suelo que es representado como un sólido continuo tridimensional con sus verdaderas propiedades. Así, no sólo tiene en cuenta la presencia de desplazamientos diferenciales que son importantes debido al tamaño de la estructura, sino que también permite representar otros factores (topográficos, geológicos, etc) que afectan a la definición de la excitación (Maeso et al.[17][18]).

El otro factor que abordaremos, con influencia contrastada en la respuesta dinámica de la presa, es la posible existencia de sedimentos en el fondo del embalse, y sus propiedades, especialmente si éstos están parcialmente saturados (Cheng[19]). Existen diversos trabajos que analizan esta influencia para el caso de presas de gravedad, bien a través de coeficientes absorción de fondo[20], bien modelando el sedimento como un medio viscoelástico cuasi-incompresible [21] acoplado con las regiones adyacentes. Otros modelos más realistas contemplan el sedimento como material poroelástico. Entre éstos, el ya citado de Cheng [19] presenta un estudio monodimensional para evaluar el efecto de los sedimentos sobre la fuerza hidrodinámica que soporta una presa rígida. Bouchaga y Tassoulas[22] también consideran un sedimento poroelástico en un modelo de elementos finitos para el estudio sísmico de presas de gravedad de hormigón. Para el mismo problema Domínguez et al. [23] presentaron más recientemente un modelo bidimensional de elementos de contorno con sedimentos poroelásticos, en el cual los efectos de interacción entre los diferentes medios (presa de gravedad-suelo-agua-sedimento) son tenidos en cuenta de forma rigurosa.

Los autores han ampliado el modelo 3-D de elementos de contorno [15-18] para incluir el efecto de los sedimentos de fondo del embalse [24]. Para ello se ha incorporado una nueva región de elementos de contorno acoplada con las demás, representando el sedimento como un medio poroelástico saturado o cuasi-saturado de agua, de acuerdo a la representación de Biot[25].

En la línea de otros trabajos recientes [18][24], en este artículo los autores estudian la influencia de la distribución espacial de la excitación, los efectos tridimensionales y la influencia de los sedimentos sobre el comportamiento dinámico de una presa bóveda. La excitación se impone prescribiendo en el suelo un tren de ondas armónicas planas que atacan a la presa desde zonas alejadas con ángulo variable. Se verá que la influencia de la distribución espacial de la excitación, la geometría real del cañón y el ángulo de incidencia de las ondas afectan sensiblemente a los desplazamientos de la presa para los tres tipos de onda considerados.

2. ECUACIONES BÁSICAS Y ELEMENTOS DE CONTORNO

El agua^(a) embalsada se va a modelar como un fluido compresible no viscoso, que se comporta en un rango lineal de pequeñas perturbaciones. En régimen armónico con pulso

ω , la ecuación que gobierna este comportamiento es la ecuación escalar de ondas:

$$\nabla^2 p^a + \frac{\omega^2}{c^2} p^a = 0 \quad (1)$$

donde p^a representa la presión hidrodinámica y c la velocidad de propagación.

La presa y el terreno se consideran sólidos viscoelásticos^(ve) lineales y comportamiento isótropo:

$$G^{ve} \nabla^2 \mathbf{u}^{ve} + (\lambda^{ve} + G^{ve}) \nabla(\nabla \mathbf{u}^{ve}) + \mathbf{X}^{ve} + \rho^{ve} \omega^2 \mathbf{u}^{ve} = 0 \quad (2)$$

siendo \mathbf{u}^{ve} la función compleja de desplazamientos, y λ^{ve} , G^{ve} , \mathbf{X}^{ve} y ρ^{ve} las constantes elásticas, el vector de fuerzas de volumen y la densidad del sólido, respectivamente.

El sedimento se modela como un medio poroelástico saturado o cuasi-saturado. La ecuación de equilibrio del esqueleto sólido^(e) es, de acuerdo con las ecuaciones de Biot[25]:

$$G \nabla^2 \mathbf{u}^e + (\lambda + G) \nabla e + \left(\frac{Q}{R} + \frac{i\omega b + \omega^2 \rho_{12}}{i\omega b - \omega^2 \rho_{22}} \right) \nabla \tau + \mathbf{u}^e \omega^2 \left(\frac{\omega^2 (-\rho_{11} \rho_{22} + \rho_{12}^2)}{i\omega b - \omega^2 \rho_{22}} + \frac{i\omega b (\rho_{11} + \rho_{22} + 2\rho_{12})}{i\omega b - \omega^2 \rho_{22}} \right) + \mathbf{X} + \frac{i\omega b + \omega^2 \rho_{12}}{i\omega b - \omega^2 \rho_{22}} \mathbf{X}' = 0 \quad (3)$$

siendo i la unidad imaginaria; \mathbf{u}^e representa los desplazamientos y e la dilatación volumétrica del esqueleto sólido; λ y G las constantes de Lamé como sólido drenado; \mathbf{X} y \mathbf{X}' representan las fuerzas de dominio en el esqueleto y el medio fluido, respectivamente; τ es la tensión equivalente en el fluido; Q y R las constantes de Biot, y b la constante de disipación. Notando ϕ la porosidad del medio, los términos de densidad son:

$$\begin{aligned} \rho_{11} &= (1 - \phi) \rho^s - \rho_{12} \\ \rho_{22} &= \phi \rho^a - \rho_{12} \end{aligned} \quad (4)$$

donde ρ^s es la densidad del sólido drenado, ρ^a la del agua que rellena los intersticios, y ρ_{12} la densidad añadida. Finalmente para la fase líquida escribimos la divergencia de la ecuación de equilibrio:

$$\nabla^2 \tau + \frac{\tau}{R} (-i\omega b + \omega^2 \rho_{22}) + e \left[i\omega b \left(1 + \frac{Q}{R} \right) + \omega^2 \left(\rho_{12} - \rho_{22} \frac{Q}{R} \right) \right] + \nabla \mathbf{X}' = 0 \quad (5)$$

El conjunto de ecuaciones (1), (2), (3) y (5), junto con las condiciones de contorno, completan el planteamiento diferencial del problema. El Método de los Elementos de Contorno (MEC) [26] surge de la representación integral de las variables del problema en el contorno de cada una de las regiones. Una vez discretizados los contornos en elementos (se han empleado elementos cuadráticos) pueden escribirse las ecuaciones para cada

medio. Así para la región agua^(a) obtenemos el sistema de N^a ecuaciones:

$$\mathbf{H}^a \mathbf{p}^a = \mathbf{G}^a \left[\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{n}} \right]^a \quad (6)$$

siendo N^a el número de nodos en el contorno del embalse. \mathbf{H}^a y \mathbf{G}^a contienen los coeficientes de integración de la solución fundamental. Los vectores \mathbf{p}^a y $[\partial \mathbf{p} / \partial \mathbf{n}]^a$ contienen los valores nodales de presión y flujo normal al contorno.

La formulación del MEC para el problema viscoelástico^(ve) es similar. Tanto para la presa como para el terreno se obtiene un sistema de $3N$ ecuaciones:

$$\mathbf{H}^{ve} \mathbf{u}^{ve} = \mathbf{G}^{ve} \mathbf{t}^{ve} \quad (7)$$

siendo N el número de nodos en el contorno (de presa o de superficie del suelo en cada caso), y \mathbf{u}^{ve} y \mathbf{t}^{ve} los desplazamientos y tracciones en esos nodos.

Para el sedimento poroelástico el sistema de ecuaciones es análogo:

$$\mathbf{H} \mathbf{u} = \mathbf{G} \mathbf{t} \quad (8)$$

donde ahora los vectores \mathbf{u} y \mathbf{t} incluyen en cada nodo j del contorno de sedimento los valores:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1^e \\ u_2^e \\ u_3^e \\ \tau \end{bmatrix}^j \quad \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_1^e \\ t_2^e \\ t_3^e \\ U_n \end{bmatrix}^j \quad (9)$$

siendo u_k^e y t_k^e son las componentes del desplazamiento y la tracción en el esqueleto sólido; τ y U_n representan, respectivamente, la tensión equivalente y el movimiento normal al contorno en la fase líquida.

3. MODELO NUMÉRICO

La representación del comportamiento acoplado presa-suelo-embalse-sedimento se obtiene a partir de las ecuaciones (6) para el agua, (7) para la presa y el terreno, y (8) para el sedimento. En los contorno exteriores se prescriben condiciones de superficie libre, y en las interfases entre regiones de igual o distinta naturaleza se imponen condiciones de equilibrio y compatibilidad. Detalles del modelo pueden encontrarse en [23] y [26].

Para el análisis se ha elegido la presa de Morrow Point (de 142 m de altura) que ya ha sido estudiada anteriormente por diferentes autores. Datos sobre la geometría de la presa y el embalse pueden encontrarse en [27]. La presa de hormigón y el suelo de cimentación se consideran medios viscoelásticos lineales e isotropos. El hormigón tiene densidad $\rho = 2481.5$ Kg/m³, coeficiente de Poisson $\nu = 0.2$, módulo de elasticidad transversal $G = 11500$ Mpa, y coeficiente de amortiguamiento interno $\beta = 0.05$. El suelo tiene una densidad $\rho = 2641.65$

Kg/m^3 , y el mismo módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y amortiguamiento interno que el hormigón. El agua está caracterizada por la velocidad de propagación de las ondas de presión $c = 1438 \text{ m/s}$ y una densidad $\rho^a = 1000 \text{ Kg/m}^3$.

En la situación de ausencia de sedimentos, las discretizaciones de elementos de contorno empleadas se muestran en las figuras 2, 3 y 4, que corresponden a tres cañones con diferentes geometrías (sólo se presenta la mitad de la geometría en cada caso al tratarse de modelos simétricos). Se han usado elementos de contorno cuadriláteros de nueve nodos y triangulares de seis, con aproximación parabólica tanto de la geometría como de la variables en el contorno.

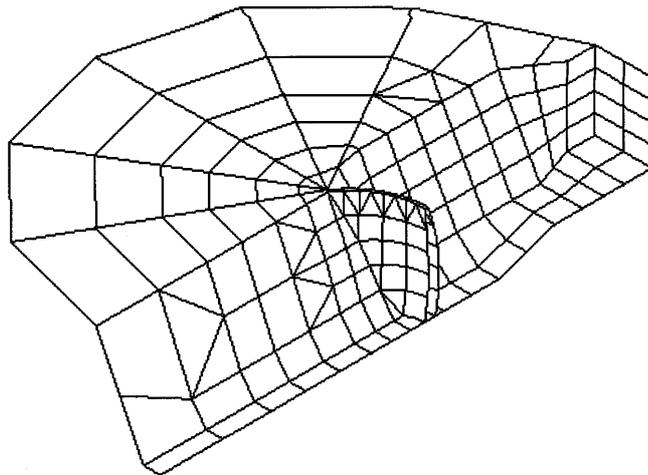


Figura 2. Discretización de elementos de contorno. Presa-agua-terreno. Cañón tipo 1

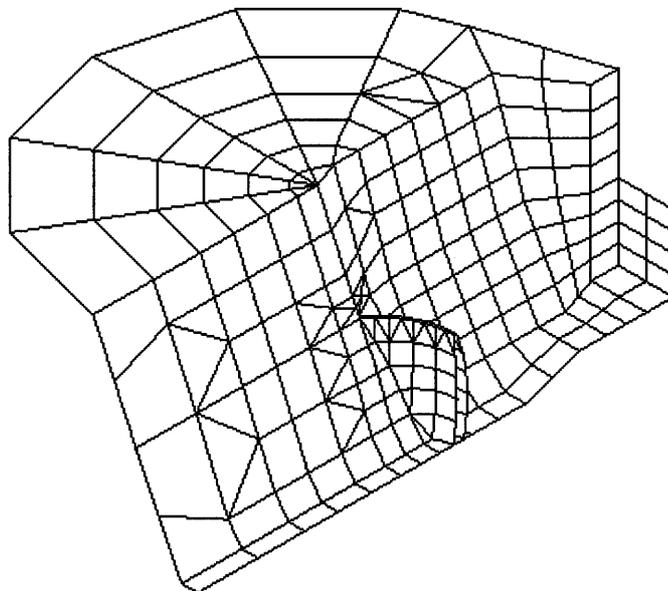


Figura 3. Discretización de elementos de contorno. Presa-agua-terreno. Cañón tipo 2

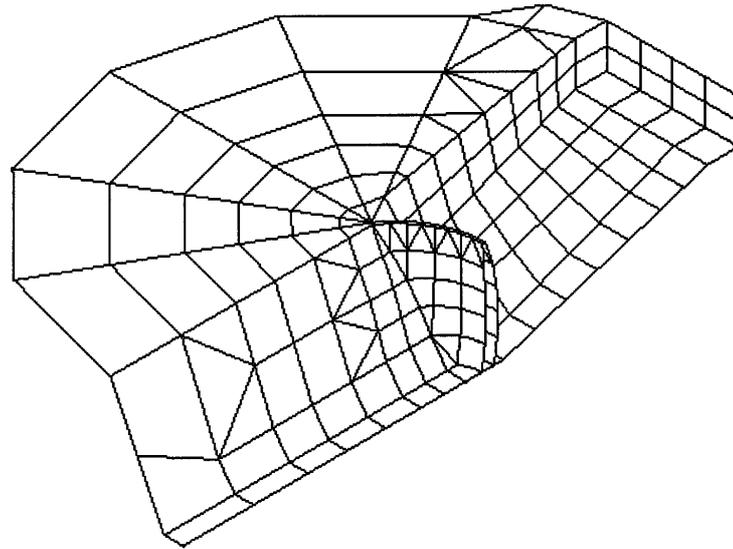


Figura 4. Discretización de elementos de contorno. Presa-agua-terreno. Cañón tipo 3

Las figuras 7 y 8 presentan las discretizaciones empleadas para estudiar la influencia del sedimento. Este se ha considerado como un medio poroelástico con porosidad $\phi = 0.6$, módulo de elasticidad transversal del esqueleto sólido $G = 7.7037 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, coeficiente de Poisson $\nu = 0.35$, coeficiente de amortiguamiento interno del esqueleto $\beta = 0.05$, densidad del esqueleto drenado $\rho^s = 2640 \text{ Kg/m}^3$, densidad del agua intersticial $\rho^f = 1000 \text{ Kg/m}^3$, y constantes de Biot $b = 3.5316 \times 10^6 \text{ Ns/m}^4$ (constante de disipación que corresponde a una permeabilidad de 10^{-3} m/s), $Q = 8.2944 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ y $R = 1.24416 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, correspondiendo estos valores a un sedimento completamente saturado de agua. Para un sedimento parcialmente saturado el coeficiente de compresibilidad del fluido cambia (Verruijt [28]). En este caso, admitiendo un grado de saturación del 99.5% se obtienen los valores $Q = 8.9328 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ y $R = 1.3399 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.

En el agua se ha empleado una solución fundamental que satisface automáticamente la condición de presión nula en su superficie, por lo que sólo es necesario discretizar las interfases agua-presa, agua-terreno y agua-sedimento. Para embalses cuya dimensión aguas arriba es muy grande en comparación con las dimensiones de la presa, se ha empleado una discretización que, tras una zona irregular cercana a aquella, se extiende indefinidamente como un canal de sección uniforme (figuras 2,3,4 y 7). Un nuevo contorno permite entonces modelar los efectos de radiación de ondas hidrodinámicas de campo lejano. Embalses no muy extensos en dirección aguas arriba pueden ser representados en su geometría real con elementos de contorno (figura 8).

La excitación sísmica se modela a través de un tren de ondas armónicas que inciden hacia la presa desde el infinito con ángulo variable. Las ecuaciones del MEC se plantean en el suelo en términos del campo difractado [18], que satisface automáticamente las condiciones de radiación por lo que a cierta distancia de la presa se habrá amortiguado. Sólo es necesario,

pues, discretizar superficie libre del terreno hasta una cierta distancia, que en los modelos presentados es del orden de 2.5 veces la altura de la presa. Discretizaciones más extensas no representan cambios apreciables en los resultados[15][16]. Asimismo, cambios en la topografía del cañón aguas abajo a distancias donde se trunca la discretización no produjeron diferencias significativas.

El tamaño de los elementos de contorno está determinado por la longitud de las ondas en cada medio. Las propiedades del sedimento empleado en este estudio fuerzan a utilizar elementos de menor tamaño para los contornos de sedimentos que para los de suelo, presa o agua.

4. RESULTADOS DEL MODELO

De acuerdo con la figura 1, se ha estudiado la influencia del ángulo θ de incidencia para ondas que se propagan en direcciones contenidas en el plano yz (perpendicular al eje longitudinal x del cañón). Por brevedad sólo se presentan resultados para ondas SH. Un estudio más amplio para otros tipos de onda puede encontrarse en [18]. La respuesta de la presa se representa mediante la amplitud de la respuesta compleja de la componente x del desplazamiento del punto del plano de simetría de la presa a cota de coronación, respecto al desplazamiento de campo libre en la superficie del suelo en zonas muy alejadas de la presa. La amplificación anteroposterior se representa frente a la frecuencia adimensional, normalizada con la frecuencia del primer modo simétrico de la presa sobre base rígida y embalse vacío (27.22 rd/s).

En primer lugar se va a analizar la influencia de la geometría del vaso y del ángulo de incidencia de las ondas (factores ambos que afectan a la naturaleza de la excitación). En el apartado siguiente la atención se centra en la influencia del sedimento y sus propiedades.

4.1. Influencia de la geometría del cañón

Ya se ha comentado la importancia que tiene la topografía local sobre los desplazamientos de campo libre que se registran durante un sismo. Conviene evaluar ahora la importancia de estos efectos sobre la respuesta de la estructura, y para ello estudiaremos una misma presa alojada en tres cañones diferentes. La geometría y discretización de cada uno de los casos estudiados se presentan en las figuras 2, 3 y 4. La figura 2 representa un cañón cuya profundidad en las inmediaciones de la presa es 142 m (la altura de la propia presa), y al que en adelante denominaremos cañón tipo 1. La figura 3 (cañón tipo 2) corresponde a un cañón de profundidad 284 m (doble que el primero). Finalmente la figura 4 muestra un tercer tipo de cañón (tipo 3) con un embalse que se ensancha y pierde profundidad con la distancia a la presa aguas arriba, y se convierte en un canal uniforme a partir del punto en que se trunca la discretización. La profundidad de este canal es la mitad que en el mismo punto de las otras dos geometrías consideradas.

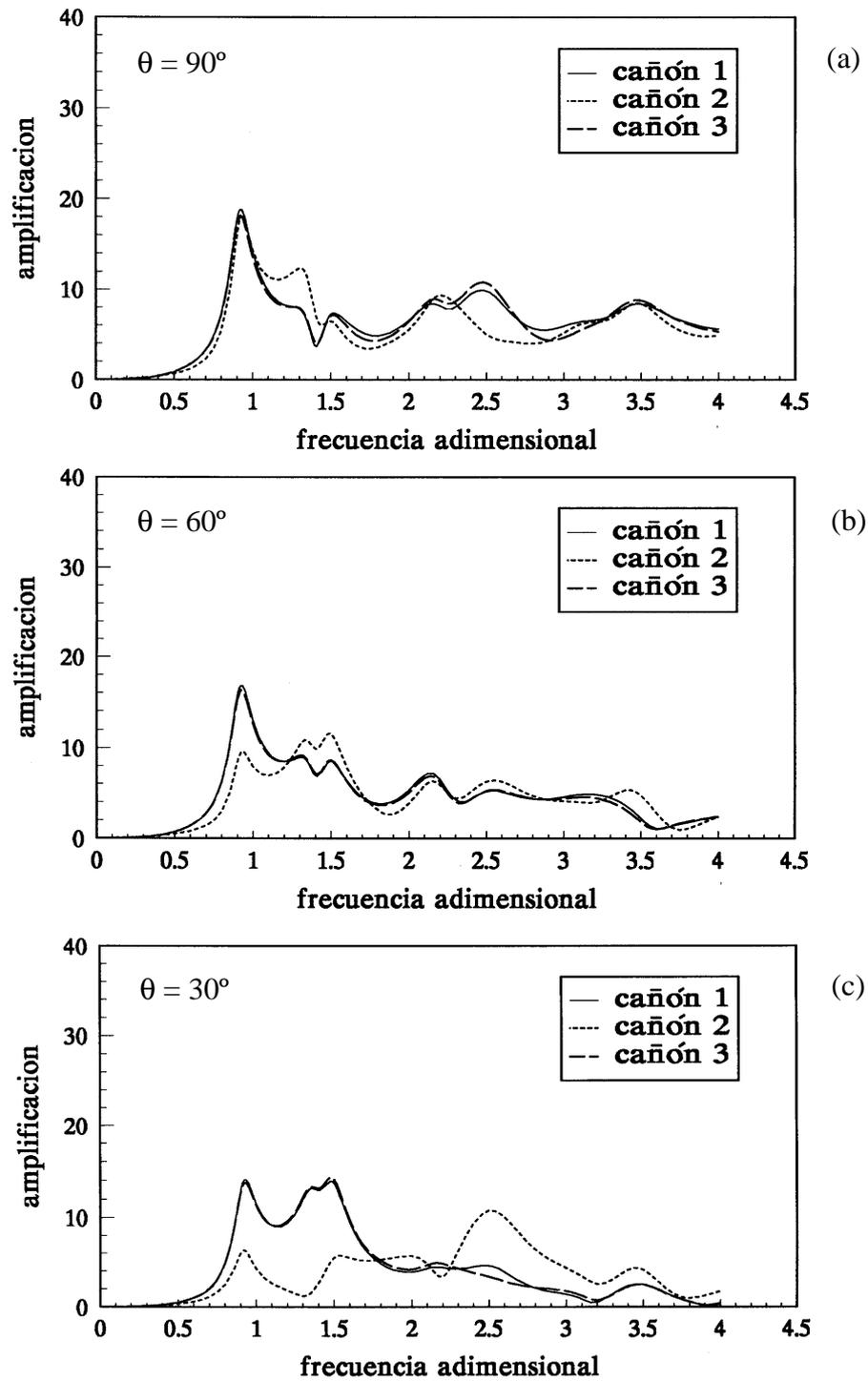


Figura 5. Respuesta anteroposterior en coronación para ondas SH. Influencia de la geometría del cañón. Embalse vacío. Angulo de incidencia variable.

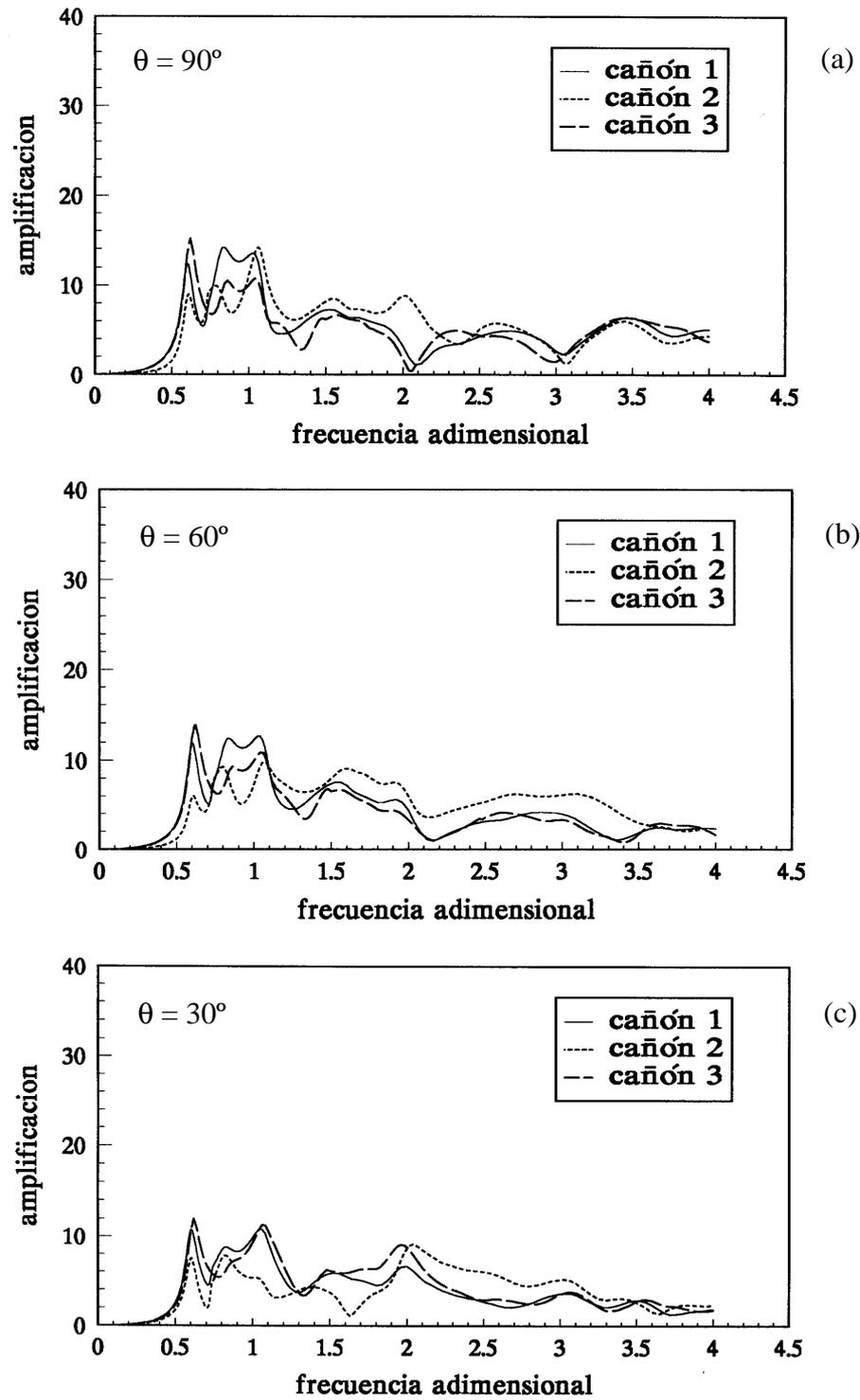


Figura 6. Respuesta anteroposterior en coronación para ondas SH. Influencia de la geometría del cañón. Embalse lleno. Angulo de incidencia variable.

Evaluemos en primer lugar la influencia de la geometría del cañón en la situación de embalse vacío. Las figuras 5.a, 5.b y 5.c muestran, para este caso, la amplificación anteroposterior en coronación para tres tipos de excitación que corresponden a ondas SH con ángulos de incidencia $\theta = 90^\circ$, 60° y 30° , respectivamente. Se pone de manifiesto que la influencia de la geometría tridimensional real del cañón es significativa, especialmente para los dos últimos valores de θ . Estas diferencias están asociadas a la existencia de excitaciones diferentes en los estribos de la presa en los tres tipos de cañón, debido a la naturaleza espacial de las ondas y a los efectos de amplificación local de campo libre. Los cambios de los desplazamientos de campo libre en la zona de los estribos son mayores por aumentar la profundidad del cañón (tipo 2) que por aumentar el ancho del vaso (tipo 3)[18].

Las figuras 6.a, 6.b y 6.c ($\theta = 90^\circ$, 60° y 30° , respectivamente) muestran la misma comparativa pero en la situación de embalse completamente lleno. También en este caso la influencia del perfil del cañón es importante. Nótese que la geometría del embalse es idéntica en el cañón tipo 1 y tipo 2, y las diferencias se deben principalmente, también en este caso, a los efectos espaciales de la onda y los de amplificación local. Sí es diferente el embalse en el cañón tipo 3. La disminución de profundidad a medida con la distancia aguas arriba produce un cierto incremento de la respuesta para la primera frecuencia natural del sistema, independientemente del ángulo de incidencia.

4.2. Influencia de los sedimentos de fondo del embalse

Dos tipos diferentes de embalse van a ser considerados: embalse que se extiende indefinidamente aguas arriba como un canal uniforme (figura 7), y embalse no muy extenso que es representado en toda su amplitud (figura 8). La geometría del embalse hasta una distancia de 172 m de la presa (que es la longitud adoptada para el estrato de sedimentos) es idéntica en ambos modelos. El espesor de la capa de sedimentos es 0.2 veces la altura de la presa. Estamos interesados en evaluar la influencia que tiene la presencia del sedimento sobre la respuesta de la presa, con respecto a la situación de embalse lleno sin sedimentos. Asimismo queremos conocer el efecto que tiene el grado de saturación del sedimento poroso. Para este estudio, la excitación se ha modelado como un tren de ondas armónicas SH con incidencia vertical ($\theta = 90^\circ$). Las figuras 9 y 10 muestran la amplificación anteroposterior en la coronación para el caso de embalse abierto (figura 7). Las figuras 11 y 12 presentan la misma información pero corresponden al embalse cerrado (figura 8).

Se aprecia en la figura 9 que, para el embalse abierto, la existencia de sedimentos saturados tiene una influencia muy pequeña sobre la respuesta del sistema respecto a la situación sin sedimento. Se han desarrollado dos modelos simplificados alternativos para representar los sedimentos de fondo. Ambos consideran el sedimento como un medio monofásico escalar compresible, con una densidad que es la del material homogéneo del modelo bifásico. En el primero de ellos (modelo escalar (1)) las ondas de presión se propagan, para cada frecuencia, con la misma velocidad que la onda longitudinal más rápida del modelo poroelástico. La onda de presión del modelo escalar (2) tiene una velocidad cuya parte real es la misma que el modelo escalar (1), pero se ha aumentado la parte imaginaria

hasta alcanzar la misma proporción que correspondería al amortiguamiento interno del esqueleto sólido (5%). Con este segundo modelo se persigue claramente simular la existencia de un cierto amortiguamiento intrínseco al sedimento, pero manteniendo la parte real correspondiente a la onda longitudinal preponderante. En la figura 9 se comparan los tres modelos de sedimento para saturación completa. Se aprecia que los resultados de los dos modelos escalares son casi iguales en este caso, y reproducen adecuadamente los resultados del modelo poroelástico.

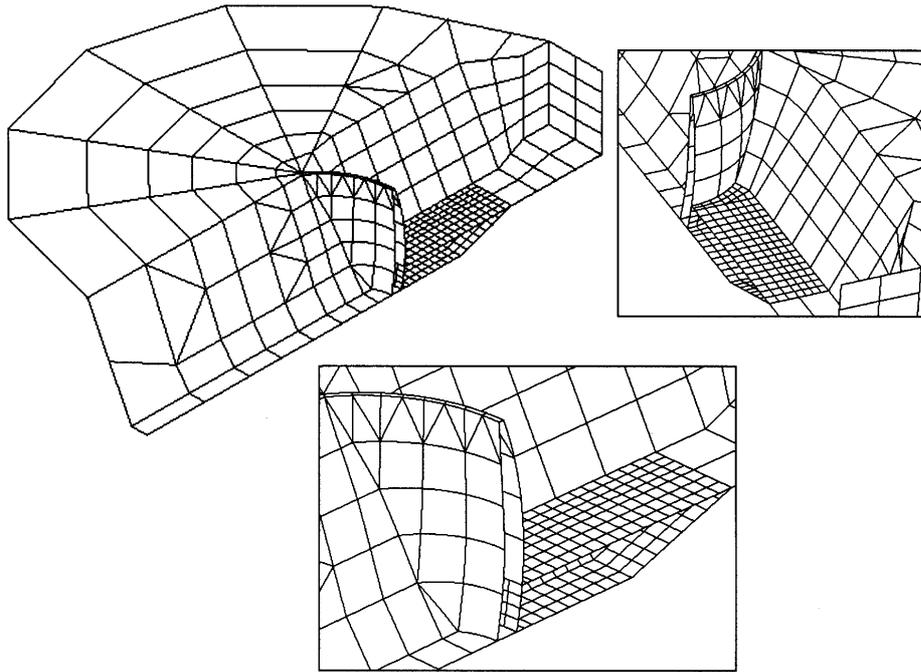


Figura 7. Discretización de elementos de contorno. Presa-agua-sedimento-terreno. Embalse abierto.

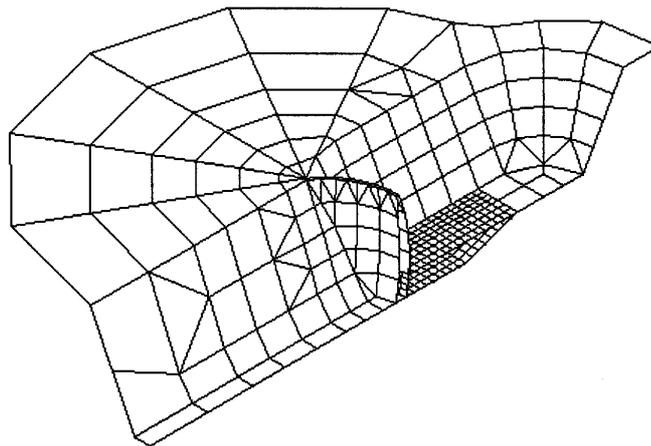


Figura 8. Discretización de elementos de contorno. Presa-agua-sedimento-terreno. Embalse cerrado.

La situación es muy diferente si el sedimento es parcialmente saturado, como se deduce de la figura 10, donde se presenta la amplificación anteroposterior en la coronación de la presa ante una onda SH vertical, para la situación de embalse abierto lleno de agua. La presencia de sedimento cuasi-saturado provoca una disminución de la primera frecuencia característica, al tiempo que se reduce la respuesta a dicha frecuencia. Se concluye que el sedimento cuasi-saturado modifica las frecuencias propias, y en general la respuesta dinámica del sistema. En cuanto a los modelos escalares de sedimento, se aprecia que el modelo (1) predice una respuesta infra-amortiguada respecto al modelo bifásico, mientras que el modelo (2) representa adecuadamente el valor de la respuesta en el rango estudiado de frecuencias.

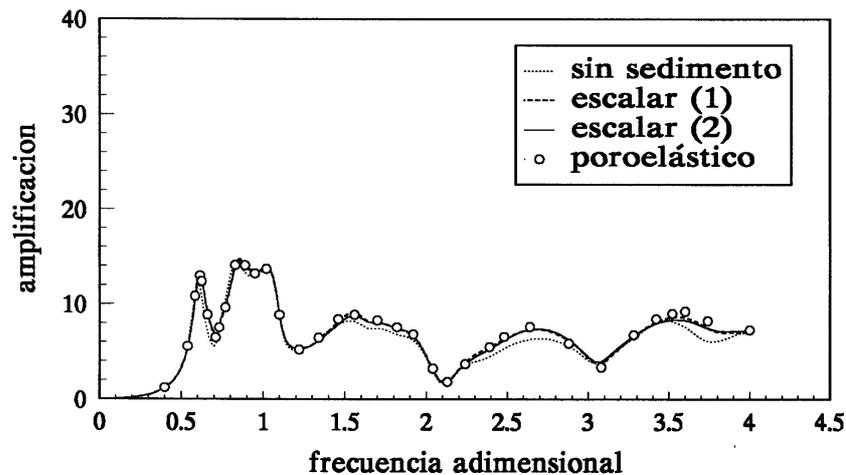


Figura 9. Respuesta anteroposterior en coronación. Onda SH. Incidencia vertical. Sedimento saturado. Embalse abierto.

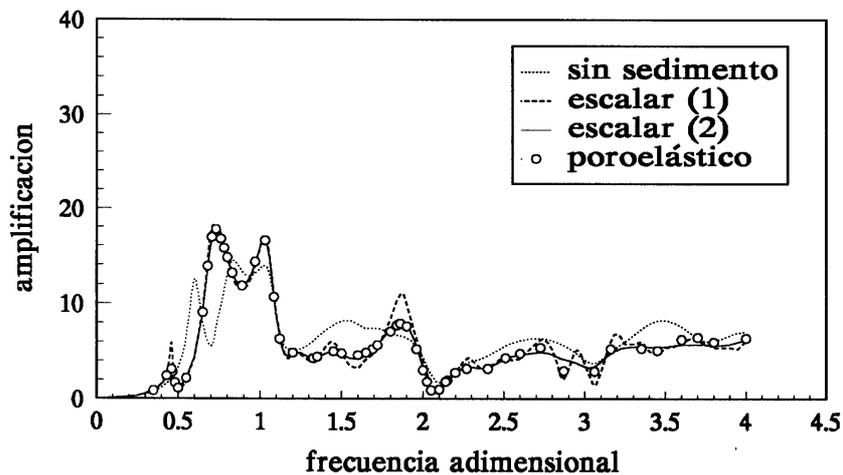


Figura 10. Respuesta anteroposterior en coronación. Onda SH. Incidencia vertical. Sedimento parcialmente saturado. Embalse abierto.

Es interesante investigar las diferencias que puedan surgir si el mismo análisis se repite para un modelo cerrado de embalse (figura 8). Tal como se deduce de la figura 11, (y al contrario de lo que ocurría para el embalse abierto), el sedimento saturado modifica sensiblemente el comportamiento dinámico del sistema respecto a la situación sin sedimento. En general se aprecia un leve retraso de la frecuencia fundamental, que es más claro para las restantes frecuencias propias, al tiempo que modifica los valores de amplificación. También se deduce que los dos modelos simplificados predicen resultados correctos.

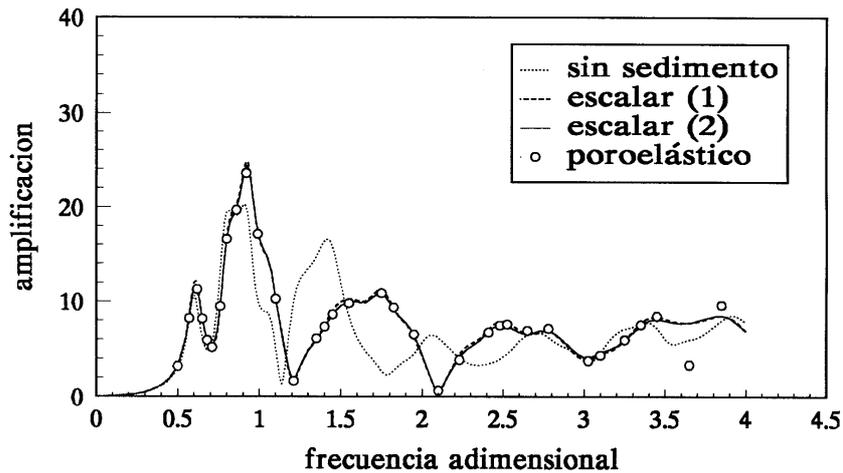


Figura 11. Respuesta anteroposterior en coronación. Onda SH. Incidencia vertical. Sedimento saturado. Embalse cerrado.

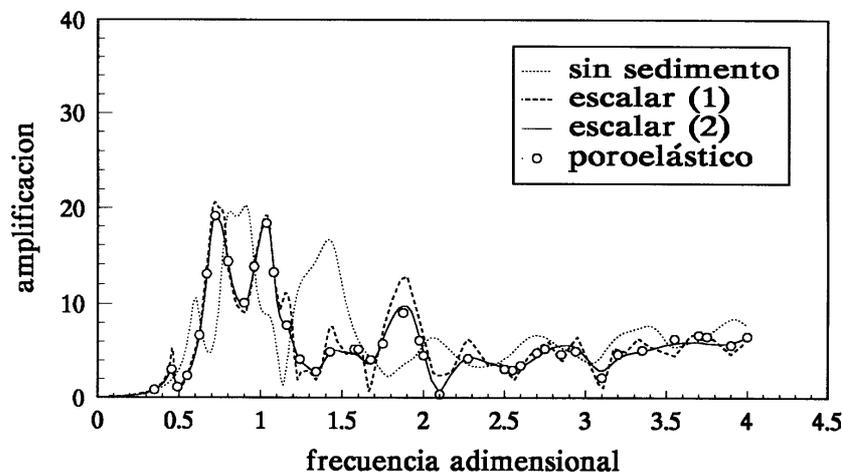


Figura 12. Respuesta anteroposterior en coronación. Onda SH. Incidencia vertical. Sedimento parcialmente saturado. Embalse cerrado.

La figura 12 presenta la respuesta anteroposterior en la coronación cuando bajo el embalse cerrado existe una capa de sedimento parcialmente saturado. De nuevo se aprecian grandes

diferencias respecto a la situación de saturación 100%: el sedimento cuasi-saturado disminuye sensiblemente la frecuencia fundamental así como la amplitud a dicha frecuencia, y modifica las restantes frecuencias propias del sistema. También es interesante observar que el modelo simplificado (1) predice una respuesta infra-amortiguada, mientras que el modelo escalar (2) proporciona resultados correctos comparados con los del modelo poroso.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo tridimensional de Elementos de Contorno apropiado para el análisis dinámico en el dominio de la frecuencia de sistemas continuos que incorporan medios fluidos, viscoelásticos y poroelásticos de geometría arbitraria. Este modelo se ha aplicado a un sistema acoplado presa-embalse-suelo rocoso, que se encuentra excitado por un movimiento del terreno. El modelo incluye sedimentos de fondo, que se han considerado como un medio bifásico poroelástico (matriz sólida y agua), la presa y el terreno, que se han considerado como sólidos viscoelásticos lineales (siendo el último de tamaño no acotado), y el agua del embalse considerada como un fluido compresible no viscoso. El modelo permite definir la excitación como un tren de ondas elásticas con cualquier variación espacial prescrita, que se propagan a través del terreno e inciden sobre la presa desde zonas alejadas.

Estudios previos han remarcado la importancia de los factores geométricos, la excitación espacial y los factores de amplificación local. El MEC permite una consideración natural y directa de ondas propagándose en el suelo, al tiempo que el planteamiento del problema en campo difractado permite dejar abierta la discretización sin perturbar las condiciones de radiación. Por estos motivos parece la mejor opción para contemplar en el terreno los factores señalados.

Se ha evaluado el efecto de la variación espacial de la excitación considerando ondas armónicas, y analizando la sensibilidad del sistema al ángulo de incidencia de tales ondas. Dicho efecto, junto a la topografía local, provocan modificaciones importantes de los movimientos de campo libre en el entorno de los estribos la presa. Se ha comprobado que alteraciones de la geometría tridimensional del cañón conducen a respuestas dinámicas sensiblemente diferentes tanto en la situación de embalse lleno como vacío.

Puede concluirse que junto con otros factores como la compresibilidad del agua, la flexibilidad del suelo y la caracterización correcta de la geometría del embalse, la variación espacial de la excitación a lo largo de la interfase presa-base rocosa tiene un efecto muy significativo sobre el comportamiento dinámico de la presa.

Las propiedades del sedimento, en particular su grado de saturación, tienen un gran influencia en la respuesta del modelo. Se ha comprobado que el efecto del sedimento saturado es pequeño (para el espesor de estrato considerado) cuando se considera una geometría de embalse abierta e indefinida. No ocurre así cuando el embalse es cerrado.

El sedimento parcialmente saturado (se ha considerado un grado de saturación del 99.5%), produce cambios significativos en el comportamiento dinámico. Tanto si el embalse es abierto como si es cerrado, reduce la frecuencia fundamental y la amplificación correspondiente, y modifica sensiblemente las frecuencias propias del sistema. Para el caso estudiado de onda vertical SH, retrasan las frecuencias del segundo y tercer armónico, y amplifican la respuesta

en ese entorno.

Se ha comprobado que pueden proponerse modelos simplificados para el sedimento que conducen a resultados concordantes con el modelo poroelástico. Así, un modelo escalar con velocidad de propagación idéntica a la correspondiente a la onda de primer tipo del modelo bifásico, predice resultados correctos (para las propiedades de sedimento estudiadas) en el caso de sedimento saturado. Por el contrario es necesario incorporar un cierto amortiguamiento adicional para reproducir los resultados del modelo poroelástico si el sedimento no está completamente saturado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado con financiación del Ministerio de Ciencia y Tecnología, así como por fondos FEDER, a través del Proyecto de Investigación DPI2001-2377-C02-02. Los autores agradecen la financiación recibida.

REFERENCIAS

- [1] M. Dravinski, "Scattering of SH waves by subsurface topography". *J. Engrg. Mech. Div., ASCE*, **108**, 1-31 (1982)
- [2] H. L. Wong, "Effect of surface topography on the diffraction of P,SV, and Rayleigh waves". *Bull. Seism.Soc.Am.*, **72**, 1167-1183 (1982)
- [3] F. J. Sanchez-Sesma, M. A. Bravo y Herrera, "Surface motion of topographical irregularities for incident P, SV and Rayleigh waves". *Bull. Seism.Soc.Am.*, **75**, 263-269 (1985).
- [4] Sanchez-Sesma, "Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface topography". *Bull. Seism.Soc.Am.*, **73**,1621-1636 (1983).
- [5] H. Chen y S. Hou, "Effect of seismic travelling wave on the response of arch dams". *Proc., China-U.S. Workshop on Earthquake Behavior of Arch Dams*, Beijing, China. R.W. Clough and Zhang G., Eds., Pergamon Press (1987).
- [6] C. Zhang y C. Zhao, "Effects of canyon topography and geological conditions on strong ground motion". *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, **16**, 81-97 (1988).
- [7] K. Fok y A. K. Chopra, "Earthquake analysis of arch dams including dam-water-interaction, reservoir boundary absorption and foundation flexibility". *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, **14**(2), 155-184 (1986)
- [8] K. Fok y A.K. Chopra, "Water compressibility in earthquake response of arch dams". *J. Struct. Engrg.*, ASCE, **113**(5), 958-975 (1987).
- [9] L. Zhang y A.K. Chopra, "Impedance functions for three-dimensional foundation supported on an infinitely long canyon of uniform cross-section in a homogeneous half-space". *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, **20**(11), 1011-1027 (1991)
- [10] L. Zhang y A.K. Chopra, "Three-dimensional analysis of spatially varying ground motions around a uniform canyon in a homogeneous half-space". *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, **20**(11), 911-926 (1991).
- [11] H. Tan y A. K. Chopra, "Earthquake analysis of arch dam including dam-water-

- foundation rock interaction”. *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, **24**, 1453-1474 (1995)
- [12] H. Tan y A. K. Chopra, “Dam-foundation rock interaction effects in frequency-response functions of arch dams”. *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, **24**, 1475-1489 (1995)
- [13] P. S. Nowak y J.F. Hall, “Arch dam response to nonuniform seismic input”. *J. Engrg. Mech.*, ASCE, **116**(1), 125-139 (1990).
- [14] R. J. Camara, “A method for coupled arch dam-foundation-reservoir seismic behaviour analysis”. *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, **29**, 441-460 (2000).
- [15] O. Maeso y J. Domínguez, “Earthquake analysis of arch dams I: Dam-foundation interaction”. *J. Engrg. Mech.*, ASCE, **119**(3), 496-512 (1993).
- [16] J. Domínguez y O. Maeso, “Earthquake analysis of arch dams II: Dam-water-foundation interaction”. *J. Engrg. Mech.*, ASCE, **119**(3), 513-530 (1993).
- [17] O. Maeso, J. Aznárez y J. Domínguez, “Travelling wave effects on the seismic response of arch dams”, *Proc. 14th ASCE Engineering Mechanics Conference*, University of Texas at Austin, J.L. Tassoulas (Ed.), CD-ROM (2000)
- [18] O. Maeso, J. Aznárez y J. Domínguez. “Effects of the space distribution of the excitation on the seismic response of arch dams”. *J. Engrg. Mech.*, ASCE (aceptado y en prensa).
- [19] A.H.D. Cheng. “Effects of sediments on earthquake induced reservoir hydrodynamic response”. *J. Engrg. Mech.*, ASCE, **112**(7), 645-665 (1986).
- [20] G. Fenves y A.K. Chopra. “Effects of reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction on frequency response functions for concrete gravity dams”. *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, **13**(1), 13-31 (1985).
- [21] V. Lofti. “Analysis of the response of dams to earthquakes”. *Geotech. Engrg. Rep. GR86-2*, Dep. of Civil Engrg., Univ. of Texas (Austin) (1982).
- [22] S. Bougacha y J.L Tassoulas. “Seismic response of gravity dams II: Modelling of sediments”. *J. Engrg. Mech.*, ASCE, **117**(8), 1826-1837 (1991).
- [23] J. Domínguez, R. Gallego y B.R. Japón. “Effects of porous sediments on seismic response of concrete gravity dams”. *J. Engrg. Mech.*, ASCE, **123**(4), 302-311 (1997)
- [24] J. Aznárez, O. Maeso y J. Domínguez. “A 3-D boundary element model for the dynamic analysis of arch dams with porous sediments”. *Proc. III Int. Earthquake Resistant Engineering Structures, ERES-2001*, Málaga (España), Corz y Brebbia Eds. CD-ROM, (2001).
- [25] M.A. Biot. “Theory of propagation of elastic waves in fluid saturated porous solid I. Low frequency range”. *J. Acoust. Soc. Am.*, **28**(2), 168-178 (1956).
- [26] J. Domínguez, *Boundary elements in dynamics*, Computational Mechanics Publications, Southampton and Elsevier, London (1993)
- [27] J.F. Hall y A.K. Chopra, “Dynamic análisis of arch dams including hydrodynamic effects”, *J. Engrg. Mech.*, ASCE, **19**(3), 496-512 (1983).
- [28] A. Verruijt, “Elastic storage of aquifers”. *Flow through porous media*, R.J.M.De Weist Ed., San Diego (1969).