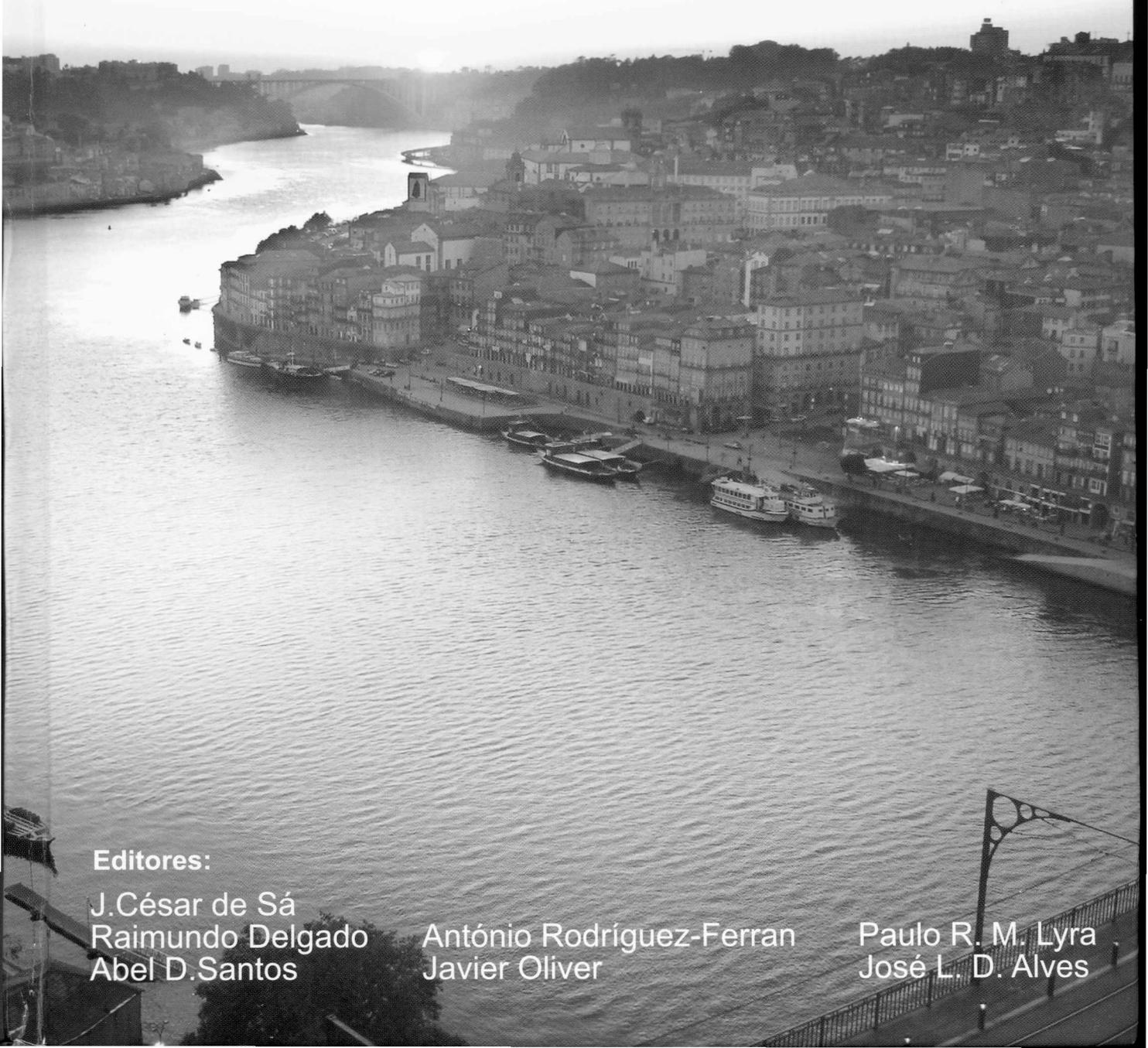


Métodos Numéricos e Computacionais em Engenharia

CMNE CILAMCE

2007



Editores:

J. César de Sá
Raimundo Delgado
Abel D. Santos

António Rodríguez-Ferran
Javier Oliver

Paulo R. M. Lyra
José L. D. Alves

Métodos Numéricos e Computacionais em Engenharia

CMNE CILAMCE
2007

Editores:

José César de Sá

Raimundo Delgado

Abel D. Santos

António Rodríguez-Ferran

Javier Oliver

Paulo R. M. Lyra

José L. D. Alves

Publicado por:

APM|AC

Associação Portuguesa de Mecânica
Teórica, Aplicada e Computacional

SEMNI

Sociedad Española de Métodos
Numéricos en Ingeniería

 **abmec**

Associação Brasileira de Métodos
Computacionais em Engenharia

Métodos Numéricos e Computacionais em Engenharia

CMNE CILAMCE

José César de Sá, Raimundo Delgado, Abel D. Santos, António Rodríguez-Ferran, Javier Oliver, Paulo R. M. Lyra, José L. D. Alves (Eds.)

Primeira edição, Junho 2007

© 2007 APMTAC/FEUP - Associação Portuguesa de Mecânica Teórica, Aplicada e Computacional/
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
R.Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal

Capa

Design de: Isabel Novais e Filipe Amaral

Foto: Ribeira do Porto (A.D. Santos)

Impresso por: Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

Depósito legal: 259977/07

ISBN: 978-972-8953-16-4

PRINTED IN PORTUGAL

ÍNDICE

Sessões Plenárias

Modelling of Fracturing Solids and Particulate Media in The Presence of Coupled Fields <i>D.R.J. Owen, Y.T. Feng, K. Han, F. M. A. Pires, J. Yu</i>	3
Computational Problems in Fusion Technology <i>Bernhard A. Schrefler, Daniela P. Boso, Marek Lefik</i>	6
High-Order Discontinuous Galerkin Solution of Low - and High-Reynolds Number Compressible Flows <i>F. Bassi, A. Crivellini, D. A. Di Pietro, S. Rebay</i>	7
Ignition, Lift-Off and Blow-Off of Diffusion Flames <i>Amable Liñán</i>	8
Krylov Space Solvers and Related Data Structures in Finite Element Analysis <i>Lucia Catabriga</i>	9
Modelação do Comportamento de Estruturas de Alvenaria <i>João Azevedo, António S. Gago</i>	10
Numerical Simulation of Hydropower Reservoir Flows and Transports for Environmental Analysis <i>Norberto Mangiavacchi, Cassio B. P. Soares, Luiz M. Carvalho</i>	11
Simulation of Damage and Fracture of Polymer-Based Laminated Composites <i>Pedro P. Camanho</i>	12

Sessões Temáticas

Aeroelasticidade e Engenharia dos Ventos

Organizador: José Ángel Jurado

Análisis Híbrido del Flameo y el Bataneo en Puentes de Gran Vano <i>José Á. Jurado, Alberto León, Félix Nieto, Santiago Hernández</i>	19
Comparación de diversas funciones indiciales para la resolución del flameo de una placa plana en el dominio del tiempo <i>Alberto León, José Á. Jurado, Santiago Hernández, Félix Nieto</i>	20
Ensayos Aeroelásticos de un Modelo de Puente de Arco Sobre el Río Tajo <i>A. Barrero-Gil, G. Alonso, J. Meseguer</i>	21
Programación Distribuida Aplicada al Problema de Optimización Aeroelástica de Puentes Colgantes con Sección en Cajón <i>Félix Nieto, Santiago Hernández, José Á. Jurado, Alberto León</i>	22
Projeto de Pás para Uso em Ventiladores Usando Elementos Finitos <i>F. D. Foroni, M. A. Menezes e L. A. Moreira Filho</i>	23
Túneles de Viento Virtuales: Razones para esta Metodología. <i>S. Hernández, J. A. Jurado, A. Baldomir, A. León y F. Nieto</i>	24

Vibrações Associadas à Variação Rápida da Rigidez da Via Férrea por Acção de Carga Móvel <i>Zuzana Dimitrovová, José N. Varandas, João R. de Almeida, Manuel A.G. Silva</i>	126
 Elementos de Fronteira <i>Organizado por: Andrés Sáez, A. Tadeu</i>	
Acoplamiento MEC-MEF Usando una Metodología Mortar 3D en Problemas Elasto-Estáticos <i>Luis Rodriguez-Tembleque, Ramón Abascal</i>	129
Análise 2D Transiente de Estruturas Através do Emprego do MEC, Utilizando Reciprocidade Dual <i>Edson Pedrosa de Oliveira Cavalcante Pessoa, João Carlos Cordeiro Barbirato, Francisco Patrick, Araújo Almeida</i>	130
Análise de Lajes Lisas por Meio do Método dos Elementos de Contorno Baseado na Teoria de Reissner <i>Jean Carla M. Araújo Beckler, Samir S. Saliba, Gabriel de Oliveira Ribeiro</i>	131
Análise de Problemas Inversos de Valor de Contorno em Domínios Multi-Regiões Via MEC <i>M.D.C. Ferreira, W.S. Venturini</i>	132
Aplicação do Método dos Elementos de Contorno a Problemas de Potencial Heterogêneos com Condição de Contorno Não Linear <i>T. F. Luiz, J. C. F. Telles</i>	133
Aplicação dos Métodos de Elementos de Contorno e de Reciprocidade Dual em Problemas Elastoplásticos Considerando Diferentes Critérios de Plastificação <i>Gilberto Gomes, Paul W Partridge, Gillermo J Creus, William T M Silva</i>	134
Aproximação Quadrática do Método dos Elementos de Contorno para Análise Térmica de Materiais com Gradação Funcional <i>Clayton T. Aquino, Francisco P.A. Almeida</i>	135
Desenvolvimento de um Novo Algoritmo para Análise Viscoplastica com o Método dos Elementos de Contorno Aplicado a Problemas Geotécnicos <i>Marcos Noronha, Nicholas Carbone</i>	136
Estabilidad Frente a la Discretización de la Formulación Dual del MEC en Dinámica de Sólidos Anisótropos. <i>Felipe Garcia Sánchez, Ramón Rojas Diaz, Andrés Sáez</i>	137
Estudio Numérico de las Vibraciones Ocasionadas en el Suelo y en Estructuras Cercanas a la Vía por el Paso de Trenes de Alta Velocidad <i>P. Galvín, J. Domínguez, A. Sáez</i>	138
Fator de Intensidade de Tensão Via Integral J E MEC Dual Elastoplástico <i>Marcello C. Teixeira, Fernando A. De Paula</i>	139
Formulação Alternativa para Análise de Sub-Regiões e Inclusões Anisotrópicas Via Método dos Elementos de Contorno <i>Carlos Alberto Cabral de Azevedo, Wilson Sergio Venturini</i>	140

Formulação do Método dos Elementos de Contorno para a Análise de Placas Enrijecidas <i>Leandro Waidemam, Wilson Sergio Venturini</i>	141
Formulación Dinámica del Método de los Elementos de Contorno para el Análisis de Sólidos Magnetoelastoplásticos Fisurados <i>Ramón Rojas Díaz, Felipe García Sánchez, Andrés Sáez Pérez</i>	142
Fractura de Sólidos Piezoelétricos Tridimensionales <i>M. Solís, J.A. Sanz, M.P. Ariza, J. Domínguez</i>	143
Identificación de Cavidades en un Estrato Mediante Técnicas de Gradiente y el Método de la Variable Adjunta <i>A. Martínez-Castro, R. Gallego</i>	144
Implementação da Solução Fundamental de Elasticidade para Problemas Axissimétricos no Semi-Espaço no Método dos Elementos de Contorno <i>Maria F. F. de Oliveira, Antony P. S. Selvadurai, Ney A. Dumont</i>	145
Influencia del Nivel de Agua del Embalse en la Respuesta Sísmica de Presas Bóveda <i>Juan J. Aznárez, Orlando Maeso</i>	146
Integração Quase-Singular para Elementos de Contorno Unidimensionais na Solução de Problemas Potenciais <i>Gustavo A.G.F. Amaral, Clayton T. Aquino, Francisco P.A. Almeida</i>	147
Iterative Coupling of Different Boundary Element Formulations: Applications Concerning Time-Domain Nonlinear Analysis of Fluidsoil-Structure Coupled Systems <i>Delfim Soares Jr., Webe J. Mansur</i>	148
Métodos Iterativos no Método dos Elementos de Fronteira <i>F. P. Valente, H. L. G. Pina</i>	149
Modelagem de Cascas Abatidas Através do MEC <i>E. T. Lima Junior, W. S. Venturini</i>	150
Modelo Numérico para el Cálculo de Impedancias Dinámicas de Pilotes y Grupos de Pilotes <i>Luis A. Padrón, Juan J. Aznárez, Orlando Maeso</i>	151
Nova Formulação para Busca de Pólos de Quase-Singularidade Complexos em Modelos Tridimensionais de Elementos de Contorno <i>Calebe P. G. De Souza, Marcos A. M. Noronha</i>	152
O Método das Soluções Fundamentais com uso de um Algoritmo Genético Simples Aplicado a Problemas da Elasticidade Linear <i>Glauceny C. de Medeiros, Li Chong Lee B. de Castro, Paul W. Partridge</i>	153
On Strategies to Incorporate Rigid Body Conditions in an Indirect Version of the Boundary Element Method <i>Luiz Henrique Thomazo, Euclides Mesquita</i>	154
Simple Bending Analysis of Stiffened Plates by a Formulation of the Boundary Element Method Based on Reissner's Hypothesis <i>Gabriela R. Fernandes, Danilo H. Konda</i>	155

INFLUENCIA DEL NIVEL DE AGUA DEL EMBALSE EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS BÓVEDA

Juan J. Aznárez y Orlando Maeso

División de Mecánica de Medios Continuos y Estructuras
Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Edificio Central del Parque Científico y Tecnológico del Campus Universitario de Tafira
35017 – Las Palmas de Gran Canaria, España
e-mail: jaznarez@iusiani.ulpgc.es; omaeso@iusiani.ulpgc.es

RESUMEN

Entre los factores que afectan la respuesta sísmica de una presa bóveda destacan aquellos que tienen que ver con: a) los efectos de interacción suelo-estructura; b) la naturaleza espacial y temporal de la excitación sísmica, y c) todos aquellos que afectan al campo de presiones hidrodinámicas en el embalse. Entre éstos últimos podemos citar la compresibilidad del agua, la geometría del embalse, su nivel de llenado, así como los efectos de interacción dinámica entre la masa de agua con el suelo y con la propia presa.

En esta comunicación los autores, haciendo uso de un modelo numérico de desarrollo propio basado en el método de los elementos de contorno, concentran su atención en el estudio de la influencia del nivel de llenado del embalse en el comportamiento dinámico de la presa. El modelo incluye la realidad tridimensional del problema, los efectos de interacción suelo-agua-estructura, la naturaleza ondulatoria de la excitación y los fenómenos de amortiguamiento por radiación.

El nivel de llenado del embalse juega un doble papel. Por un lado afecta a la masa global del conjunto. Por otro, altera la geometría del embalse. El resultado es que el comportamiento dinámico global, en términos de las frecuencias propias y las amplificaciones de respuesta correspondientes, se ve sensiblemente alterado por la altura del embalse, y así queda reflejado en los resultados obtenidos.

La presa y el suelo se modelan como medios viscoelásticos lineales. El agua como un medio compresible y comportamiento lineal. La posible existencia de sedimentos de fondo en el embalse se ha incluido a través de una región de naturaleza poroelástica. Las interacciones entre las diferentes regiones (presa, suelo, agua, sedimento) se establecen a través de ecuaciones de compatibilidad y equilibrio. El análisis se realiza en el dominio de la frecuencia. Se presentan resultados de la amplitud de la amplificación del movimiento en puntos seleccionados de una presa bóveda real y se estudia paramétricamente la influencia de la altura del agua en la respuesta para diferentes tipos de ondas incidentes en el suelo.

INFLUENCIA DEL NIVEL DE AGUA DEL EMBALSE EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS BÓVEDA

Juan J. Aznárez y Orlando Maeso

IUSIANI

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Edificio Central del Parque Científico y Tecnológico del Campus Universitario de Tafira
35017 – Las Palmas de Gran Canaria, España
e-mail: jaznarez@iusiani.ulpgc.es; omaeso@iusiani.ulpgc.es

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

Resumen. *Utilizando un modelo MEC 3-D previamente desarrollado, se estudia la influencia del nivel de llenado del embalse en el comportamiento dinámico de una presa bóveda. El modelo incluye los efectos de interacción suelo-agua-estructura, la naturaleza ondulatoria de la excitación y los fenómenos de amortiguamiento por radiación. Presa y suelo se modelan como medios viscoelásticos. El agua como un medio compresible. Se han incluido sedimentos de fondo de naturaleza poroelástica. Las interacciones entre presa, suelo, agua y sedimento se establecen a través de ecuaciones de compatibilidad y equilibrio. El análisis se realiza en el dominio de la frecuencia. Se estudia la influencia de la altura del agua en la respuesta para diferentes tipos de ondas incidentes.*

1. INTRODUCCIÓN

Entre los factores que afectan la respuesta sísmica de una presa bóveda destacan aquellos que tienen que ver con:

- a) los efectos de interacción suelo-estructura;
- b) la naturaleza espacial y temporal de la excitación sísmica, y
- c) todos aquellos que afectan al campo de presiones hidrodinámicas en el embalse y, por tanto, al estado de presiones en el paramento aguas arriba de la presa.

Dentro del tercer grupo podemos citar la compresibilidad del agua, la geometría del embalse, su nivel de llenado, así como las propiedades mecánicas del vaso rocoso y la posible presencia de sedimentos de fondo en el embalse, por cuanto modifican los efectos de interacción dinámica entre la masa de agua con el suelo y con la propia presa. La importancia de algunos de estos factores ha sido analizada en diferentes trabajos: Hall y Chopra [1,2], Fenves y Chopra [3], Fok y Chopra [4], Tan y Chopra [5], Domínguez y Maeso [6], Maeso et al. [7,8] y Aznárez et al. [9].

En esta comunicación, los autores, haciendo uso de un modelo numérico desarrollado previamente [6-9,10] basado en el Método de los Elementos de Contorno (MEC), concentran su atención en el estudio de la influencia del nivel de llenado del embalse en el comportamiento dinámico de la presa. Asimismo se pretende analizar cómo afecta la existencia de una capa de sedimentos de fondo en el embalse a la importancia que tenga el nivel de llenado del mismo.

El nivel de llenado del embalse juega un doble papel. Por un lado afecta a la masa global del conjunto. Por otro, altera la geometría del embalse. El resultado es que el comportamiento dinámico global, en términos de las frecuencias propias y las amplificaciones de respuesta correspondientes, se ve sensiblemente alterado por la altura del embalse, y así queda reflejado en los resultados obtenidos. Si bien este efecto ha sido analizado con anterioridad, pocos son los estudios que recogen la influencia en casos distintos a los de embalse completamente vacío o completamente lleno. Además, y hasta donde conocen los autores, no se han realizado estudios que analicen la influencia de la altura de agua en relación a la presencia de sedimentos de fondo y sus propiedades. Entre los trabajos existentes cabe destacar los estudios experimentales de Dabre et al. [11] y Proulx et al. [12], quienes monitorizan el comportamiento dinámico de sendas grandes presas bóveda en distintos meses de año asociados a distintos niveles característicos del agua en el embalse. Ambos autores concluyen que el comportamiento dinámico de la presa se ve fuertemente influenciado por este factor.

Por otro lado, durante el proceso de sedimentación y debido a la acción de la gravedad, los sedimentos de fondo pueden llegar a adquirir cierto grado de consolidación creciente con la profundidad. Por tanto el sedimento es un material con unas propiedades que pueden ser variables con la profundidad, y que son distintas a las del agua del embalse. La influencia del sedimento es doble: por un lado su presencia modifica la geometría del fondo; por otro, el sedimento absorbe energía de las ondas hidrodinámicas y por tanto aumenta el grado de amortiguamiento del sistema acoplado presa-suelo-embalse.

Dependiendo de su nivel de consolidación, el sedimento puede ser modelizado como un medio escalar con densidad creciente con la profundidad, o como un medio poroelástico saturado cuyo esqueleto ha adquirido cierta capacidad elástica. En este trabajo, y siguiendo trabajos previos de los mismos y otros autores (Cheng [13], Bougacha y Tassoulas [14], Domínguez et al. [15], Maeso et al. [8] y Aznárez et al. [9]) el comportamiento dinámico del sedimento se asimila al de medio poroelástico saturados o cuasi-saturados de acuerdo a la formulación de Biot [16]. Todos estos trabajos coinciden en que los sedimentos de fondo, en función de su compresibilidad, pueden modificar sensiblemente el comportamiento dinámico global, especialmente en el caso de sedimentos parcialmente saturados.

En esta comunicación se presenta un estudio preliminar de la influencia del nivel de llenado del embalse en la respuesta sísmica de una presa bóveda. Se realiza un estudio de la sensibilidad de la respuesta de la presa ante el nivel de agua en dos circunstancias distintas: embalse sin sedimento, y embalse con una capa de sedimento cuasisaturado cuyo espesor es la quinta parte de la altura máxima de la presa. Para ello se hace uso de un modelo de Elementos de Contorno. El modelo incluye la realidad tridimensional del problema, los efectos de interacción suelo-agua-estructura, la naturaleza ondulatoria de la excitación y los fenómenos de amortiguamiento por radiación. La presa y el suelo se modelan como medios viscoelásticos lineales. El agua como un medio compresible y comportamiento lineal. La posible existencia de sedimentos de fondo en el embalse se ha incluido a través de una región poroelástica. Las interacciones entre las diferentes regiones (presa, suelo, agua, sedimento) se establecen a través de ecuaciones de compatibilidad y equilibrio. El análisis se realiza en el dominio de la frecuencia y se estudia paraméricamente la influencia de la altura del agua en la respuesta para diferentes tipos de ondas incidentes en el suelo.

2. ECUACIONES BÁSICAS Y FORMULACIÓN DE ELEMENTOS DE CONTORNO

Sólo se incluye aquí un resumen básico de la formulación empleada. Todos los detalles relativos a las ecuaciones del modelo pueden encontrarse en trabajos previos de los autores [6-10].

El agua ^(a) del embalse 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.

Es frecuente que la dimensión del embalse en dirección aguas arriba sea muy grande en comparación con las dimensiones de la presa. Es lo que en la bibliografía se conoce habitualmente como embalse abierto, consistente en una región irregular cercana a la presa (cerrada del embalse) y una zona infinita, simulada como un canal de sección uniforme que se extiende indefinidamente aguas arriba. Los movimientos inducidos por el sismo en el fondo

del embalse y en los puntos del trasdós de la presa producen en el agua la aparición de ondas de presión hidrodinámica que se propagan longitudinalmente hacia aguas arriba. El desarrollo de los términos de presión contiene términos complejos que no se amortiguan con la distancia, y por ello el modelo necesita una simulación correcta de la zona del embalse no discretizada. Para ello se ha empleado una discretización que, tras una zona irregular, se extiende indefinidamente como un canal de sección uniforme (figura 1). Un nuevo contorno, perpendicular al canal, permite entonces modelar los efectos de radiación de ondas hidrodinámicas de campo lejano, escribiendo como condición la relación entre las presiones y sus derivadas normales que corresponde al problema de la propagación de ondas en un canal infinito de sección constante. Este nuevo contorno tiene como misión introducir en el sistema una forma de absorber la energía que corresponde a los términos de presión que no se amortiguan. Se ha escogido un canal infinito de sección rectangular, pues permite conocer analíticamente los términos del desarrollo de presiones. Para ondas que se propagan en dirección x negativa:

$$p^a = \sum_1^{\infty} \sum_1^{\infty} A_{nm} e^{K_{nm}x} \cos \lambda_z^n z \operatorname{sen} \lambda_y^m y \quad (2)$$

Siendo y, z las coordenadas en la dirección transversal y vertical de canal de dimensiones b y h , respectivamente:

$$\begin{aligned} \lambda_z^n &= \frac{2n-1}{2h} \pi & n &= 1, 2, \dots \\ \lambda_y^m &= \frac{m-1}{b} & m &= 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

y

$$K_{nm} = \sqrt{(\lambda_z^n)^2 + (\lambda_y^m)^2 - \frac{\omega^2}{c^2}} \quad (4)$$

La representación correcta de p requiere incluir al menos todos los términos de la serie para los que K_{nm} son imaginarios.

La presa de hormigón y la base rocosa se consideran sólidos viscoelásticos ^(ve) lineales y comportamiento isótropo: La ecuación de gobierno para cada uno de ellos es por tanto:

$$G^{ve} \nabla^2 \mathbf{u}^{ve} + (\lambda^{ve} + G^{ve}) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}^{ve}) + \mathbf{X}^{ve} + \rho^{ve} \omega^2 \mathbf{u}^{ve} = 0 \quad (5)$$

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 en cada medio, respectivamente.

El sedimento de fondo del embalse 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 [16]:

$$\begin{aligned}
 & G \nabla^2 \mathbf{u}^e + (\lambda + G) \nabla e + \left(\frac{Q}{R} + \frac{i\omega b + \omega^2 \rho_{12}}{i\omega b - \omega^2 \rho_{22}} \right) \nabla \tau + \\
 & \mathbf{u}^e \omega^2 \left(\frac{\omega^2 (-\rho_{11} \rho_{22} + \rho_{12}^2)}{i\omega b - \omega^2 \rho_{22}} + \frac{i\omega b (\rho_{11} + \rho_{22} + 2\rho_{12})}{i\omega b - \omega^2 \rho_{22}} \right) + \mathbf{X} + \frac{i\omega b + \omega^2 \rho_{12}}{i\omega b - \omega^2 \rho_{22}} \mathbf{X}' = 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

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:

$$\begin{aligned}
 \rho_{11} &= (1 - \phi) \rho^s - \rho_{12} \\
 \rho_{22} &= \phi \rho^a - \rho_{12}
 \end{aligned} \tag{7}$$

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:

$$\nabla^2 \tau + \frac{\tau}{R} (-i\omega b + \omega^2 \rho_{22}) + e \left[i\omega b \left(1 + \frac{Q}{R} \right) + \omega^2 \left(\rho_{12} - \rho_{22} \frac{Q}{R} \right) \right] + \nabla \mathbf{X}' = 0 \tag{8}$$

El conjunto de ecuaciones (1), (5), (6) y (8), junto con las condiciones de contorno, completan el planteamiento diferencial del problema. El Método de los Elementos de Contorno (MEC) [17] 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:

$$\mathbf{H}^a \mathbf{p}^a = \mathbf{G}^a \left[\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{n}} \right]^a \tag{9}$$

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:

$$\mathbf{H}^{ve} \mathbf{u}^{ve} = \mathbf{G}^{ve} \mathbf{t}^{ve} \tag{10}$$

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:

$$\mathbf{H} \mathbf{u} = \mathbf{G} \mathbf{t} \quad (11)$$

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

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1^e \\ u_2^e \\ u_3^e \\ \tau \end{bmatrix}^j \quad \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_1^e \\ t_2^e \\ t_3^e \\ U_n \end{bmatrix}^j \quad (12)$$

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.

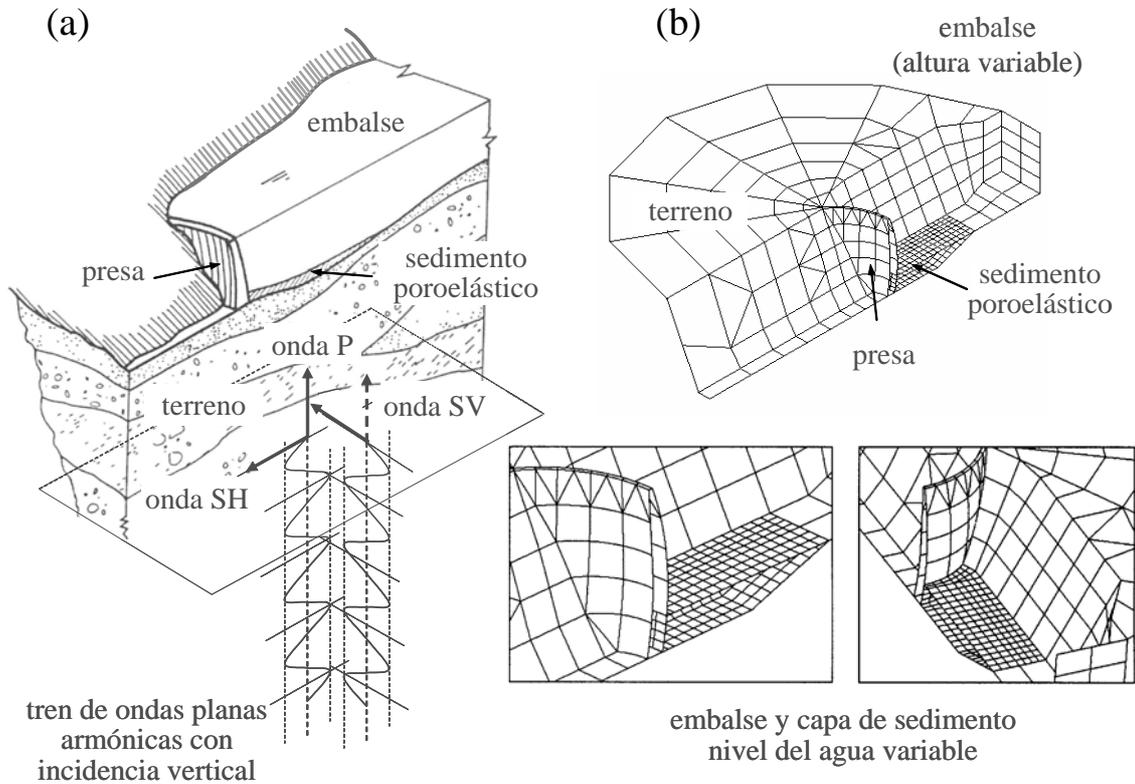


Figura 1. Esquema del problema (a) y discretizaciones tipo de elementos de contorno (b).

3. MODELO ACOPLADO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

La representación del comportamiento acoplado presa-suelo-embalse-sedimento se obtiene a partir de las ecuaciones (9) para el agua, (10) para la presa y el terreno, y (11) para el

sedimento. En los contornos 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.

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 [2]. La presa de hormigón y el suelo de cimentación se consideran medios viscoelásticos lineales e isotrópicos. El hormigón tiene densidad $\rho = 2481.5 \text{ kg/m}^3$, coeficiente de Poisson $\nu = 0.2$, módulo de elasticidad transversal $G = 11500 \text{ MPa}$, y coeficiente de amortiguamiento interno $\beta = 0.05$. El suelo tiene una densidad $\rho = 2641.65 \text{ kg/m}^3$, 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, el tipo de discretización de elementos de contorno empleada es como la mostrada en la figura 2, que corresponde al caso de embalse completamente lleno (sólo se presenta la mitad de la geometría al tratarse de un modelo simétrico). Para niveles inferiores de llenado las discretizaciones ajustan el tamaño del contorno absorbente aguas arriba al nivel de agua en cada caso. Se han usado elementos de contorno cuadriláteros y triangulares, de nueve y de seis nodos, respectivamente, con aproximación parabólica tanto de la geometría como de las variables en el contorno.

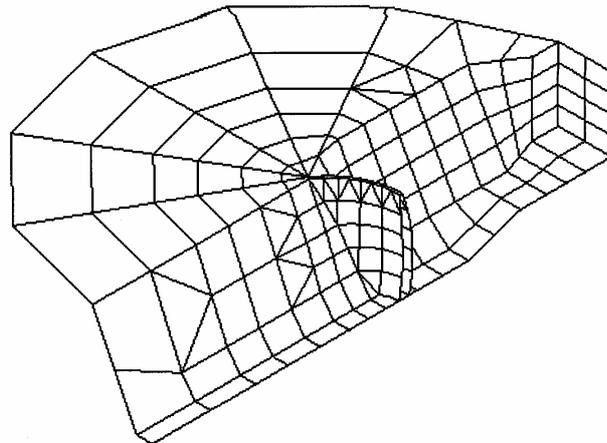


Figura 2. Discretización tipo de elementos de contorno. Embalse sin sedimentos.

La figura 1(b) presenta el tipo de discretización empleadas cuando se incluye la presencia de sedimentos de fondo. La capa de sedimentos tiene un espesor máximo de 28 m (la quinta parte de la altura de la presa) y se extiende aguas arriba hasta una distancia de 172 m. El sedimento 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 $\rho^a = 1000 \text{ kg/m}^3$, 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 [19]). 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 este trabajo, siempre que se considere una capa de sedimento se adoptarán las propiedades correspondientes a un grado de saturación del 99.5%.

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.

La excitación sísmica se modela a través de un tren de ondas armónicas que inciden hacia la presa desde el infinito con ángulo de incidencia vertical (ver figura 1(a)). Las ecuaciones del MEC se plantean en el suelo en términos del campo difractado [10], 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 [6][10]. 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. INFLUENCIA DEL NIVEL DE AGUA DEL EMBALSE

Para llevar a cabo el estudio de sensibilidad de la influencia sobre la respuesta en la presa que tiene el nivel de llenado del embalse, se han estudiado separadamente los casos de embalse sin y con sedimentos de fondo. En cada uno de estos casos se han considerado a su vez seis niveles distintos de llenado del embalse. El análisis para el caso sin sedimentos se esquematiza en la figura 3. Corresponde a niveles crecientes de agua desde la situación de embalse completamente vacío hasta completamente lleno, con incrementos de altura de agua de $h/5$, siendo $h = 142 \text{ m}$ la altura máxima de la presa.

Del mismo modo, en la figura 4 se esquematizan las distintas situaciones analizadas cuando el embalse posee una capa de sedimentos de fondo de espesor $h/5$. En este caso la situación de embalse al nivel $h/5$ correspondería a un embalse sin agua pero que sin embargo alberga una capa de sedimento poroso. Los incrementos de agua se entienden en este caso como incrementos sobre el lecho de sedimentos.

Se estudia la influencia sobre la respuesta dinámica de la presa del nivel de agua cuando el sistema se ve alcanzado por un tren de ondas armónicas con incidencia vertical (ver figura 1). Se han considerado tres tipos de ondas: SH, SV y P, que corresponden a ondas que provocarían en un semiespacio movimientos según la dirección anteroposterior, transversal y vertical, respectivamente.

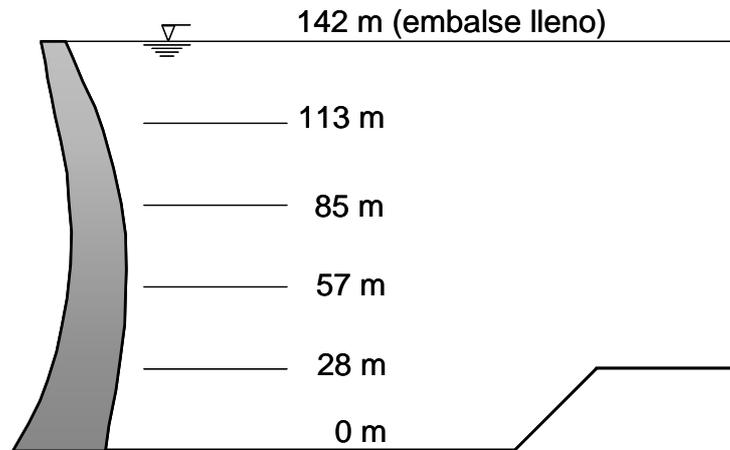


Figura 3. Embalse sin sedimento. Esquema de los distintos niveles de agua.

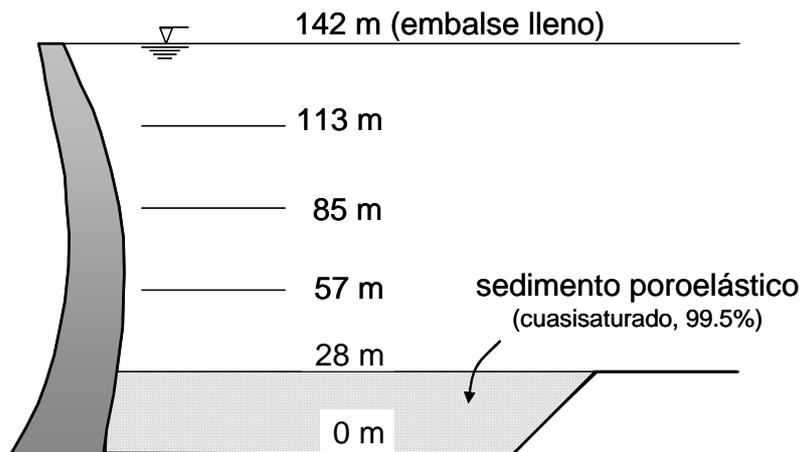


Figura 4. Embalse con sedimentos. Esquema de los distintos niveles de agua.

La respuesta de la presa se expresa mediante una variable adimensional que representa la amplitud de la respuesta compleja de la componente anteroposterior del desplazamiento en dos puntos seleccionados de la presa a cota de coronación, respecto al desplazamiento de campo libre en la superficie libre del suelo en zonas muy alejadas de la presa. Los puntos seleccionados se muestran en la figura 5. Para los dos problemas simétricos (ondas SH y P) la respuesta se mide en el punto A del plano de simetría de la presa. Para el problema antisimétrico (onda SV) la respuesta se mide en el punto B, el cual se encuentra distanciado un ángulo de 13.25° medido desde el centro del arco de circunferencia de esa cota. La

amplificación anteroposterior se representa frente a la frecuencia adimensional, normalizada con la frecuencia del primer modo de la presa sobre base rígida y embalse vacío. Se utiliza la frecuencia del primer modo simétrico (27.22 rad/s) para ondas SH y P, y la del primer modo antisimétrico (24.65 rad/s) para la onda SV.

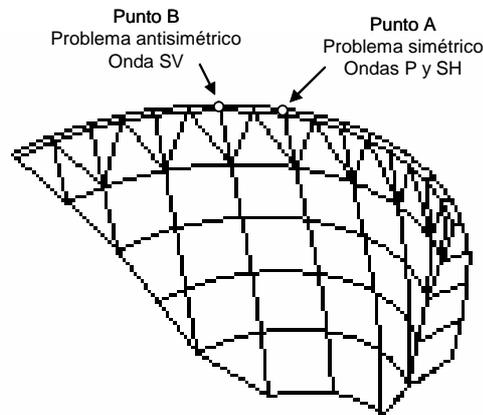


Figura 5. Discretización en elementos de contorno de la presa. Puntos seleccionados para medir la respuesta.

4.1. Embalse sin sedimentos de fondo

En la columna izquierda de las figuras 6, 7 y 8 se muestran las curvas de la amplitud de respuesta compleja en la presa ante las ondas SH, P y SV, respectivamente, frente a la frecuencia adimensional, para las seis situaciones analizadas del nivel de agua en el embalse. En las curvas se aprecia, como era previsible, que la altura de agua juega un papel importante en la respuesta dinámica. Las diferencias en la respuesta frente a la situación de embalse vacío son crecientes a medida que se llena la presa. Esta conclusión es válida para los tres tipos de onda (SH, P y SV) si bien el efecto es más evidente en el caso de la onda P. En este caso se está excitando en mayor medida la masa de agua que frente a la onda SH (no hay tensión tangencial en las interfases agua-sólido) y, además, se excitan de forma más directa las frecuencias de la capa de agua que tienen que ver con el problema monodimensional de propagación vertical. En todos los caso, el progresivo aumento del nivel de agua provoca la disminución de la frecuencia fundamental del sistema acoplado, al tiempo que modifica la posición de los restantes y la importancia relativa de las amplificaciones de cada uno.

Es llamativo notar que la situación pésima, desde el punto de vista de las amplificaciones de respuesta obtenida, no necesariamente corresponde con la situación de embalse completamente vacío o lleno. Este hecho resulta más claro en el caso de excitación de onda P.

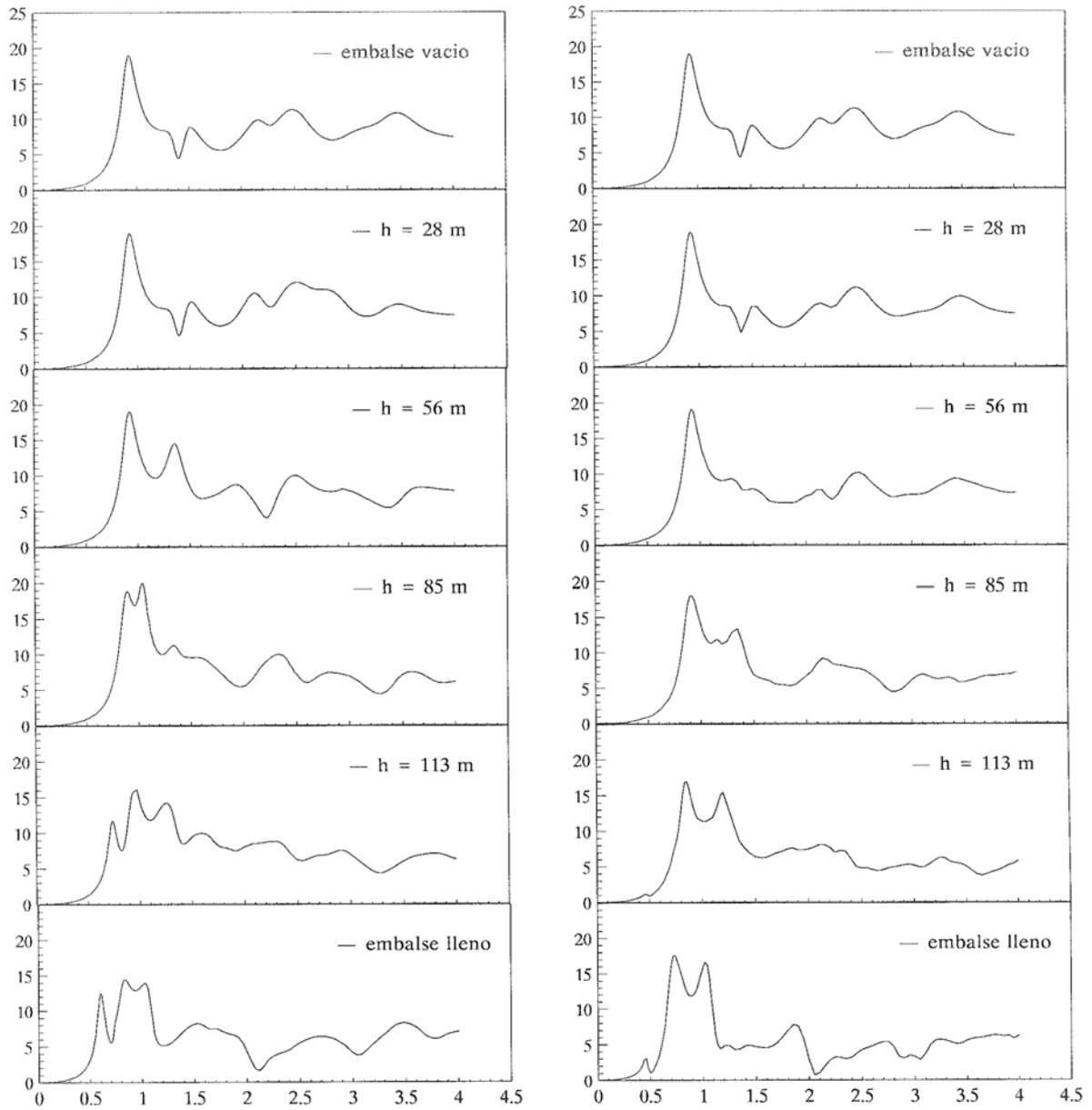


Figura 6. Influencia de la respuesta en la presa de la altura de agua en el embalse. Onda SH. Embalse sin sedimentos: columna izquierda. Embalse con sedimentos cuasisaturados: columna derecha.

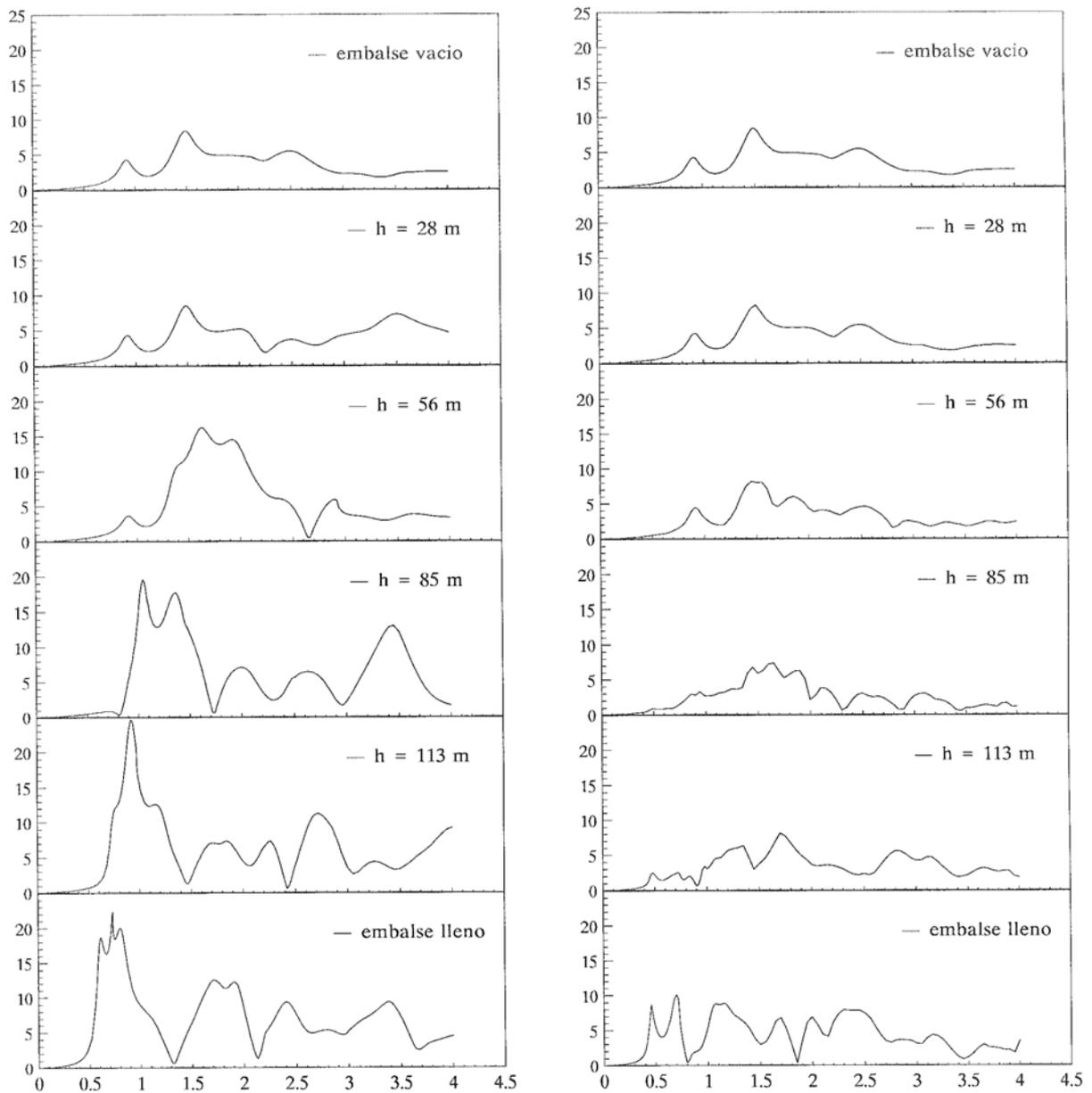


Figura 7. Influencia de la respuesta en la presa de la altura de agua en el embalse. Onda P. Embalse sin sedimentos: columna izquierda. Embalse con sedimentos cuasisaturados: columna derecha.

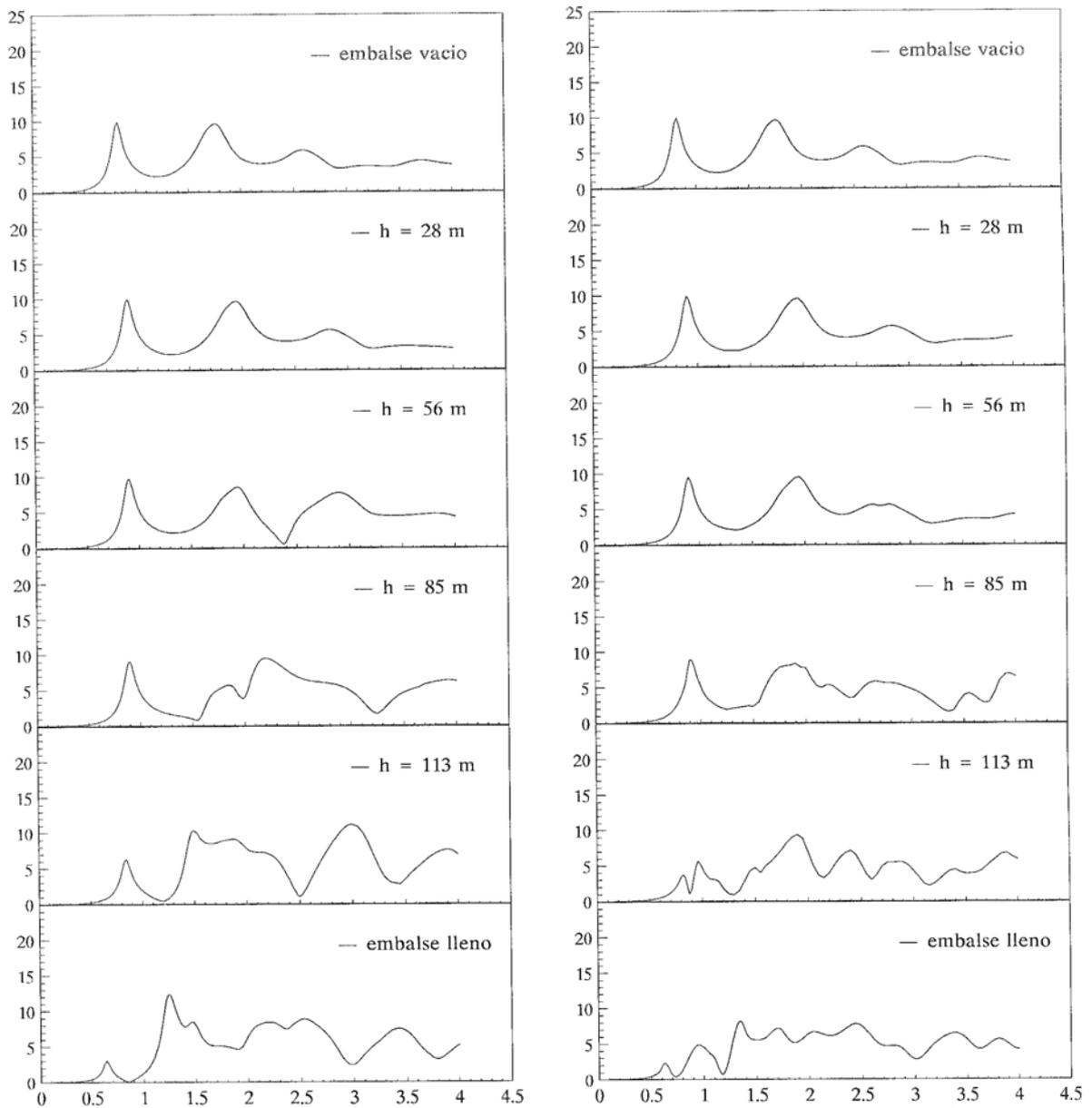


Figura 8. Influencia de la respuesta en la presa de la altura de agua en el embalse. Onda SV. Embalse sin sedimentos: columna izquierda. Embalse con sedimentos cuasisaturados: columna derecha.

4.2. Embalse con sedimentos de fondo cuasi-saturados

La influencia del nivel de agua en el embalse, cuando éste posee una capa de sedimentos de fondo con la propiedades indicadas en el apartado 3, se muestran en la columna derecha de las figuras 6, 7 y 8, que corresponden, respectivamente, a los casos de incidencia de ondas SH, P y SV. Estas figuras permiten estudiar simultáneamente la influencia del nivel de llenado del embalse y su importancia relativa en relación a la presencia o no de sedimentos de fondo. Sólo se presentan resultados para sedimentos porosos con índice de saturación del 99.5%, puesto que trabajos anteriores han permitido concluir que la influencia de sedimento con índice de saturación 100% afectan muy poco la respuesta de la presa [8,9].

La presencia de un lecho sedimentario se hace más patente a medida que aumenta el nivel de agua en el embalse. Esto se aprecia especialmente en los casos de onda SH y SV. En el caso de la onda P, aun para pequeños niveles de agua en el embalse, la presencia del sedimento modifica sensiblemente la respuesta en relación a la que tendría con el mismo nivel de agua en ausencia de sedimento. En este caso es más evidente el efecto amortiguador que tiene sobre la respuesta del sistema.

12. CONCLUSIONES

Se ha presentado un estudio preliminar de la influencia del nivel de llenado del embalse en la respuesta sísmica de una presa bóveda. Se ha realizado un estudio de la sensibilidad de la respuesta de la presa ante el nivel de agua en dos situaciones distintas: embalse sin sedimento, y embalse con una capa de sedimento cuasisaturado cuyo espesor es la quinta parte de la altura máxima de la presa. Para ello se ha hecho uso de un modelo de Elementos de Contorno previamente desarrollado por los autores. El modelo incluye la realidad tridimensional del problema, los efectos de interacción suelo-agua-sedimento-estructura, la naturaleza espacial de la excitación y los fenómenos de amortiguamiento por radiación. El análisis se ha realizado en el dominio de la frecuencia y se estudia paramétricamente la influencia de la altura del agua en la respuesta para los casos de ondas SH, P y SV con incidencia vertical.

De los resultados obtenidos se desprende que el nivel de llenado del embalse afecta de manera muy importante el comportamiento dinámico del sistema acoplado presa-suelo-embalse. A medida que aumenta la cantidad de agua embalsada se reduce la primera frecuencia fundamental, se modifican las restantes y la importancia de la respuesta a cada una. Estas conclusiones globales son extrapolables a los tres tipos de ondas (SH, P y SV). Asimismo son extrapolables a los casos de embalse sin sedimentos y embalse con sedimentos de fondo.

Es especialmente importante la influencia del nivel de agua ante ondas P verticales. En este caso, aun con pequeños niveles de agua, la respuesta de la presa se ve alterada con respecto al caso de embalse completamente vacío. El efecto amortiguador del lecho sedimentario es asimismo más evidente ante la incidencia de ondas P, apreciándose que para los mismo niveles de agua, la presencia del lecho poroso conduce a amplificaciones inferiores de la respuesta en todo el rango de frecuencias considerado.

Como conclusión final puede afirmarse que la influencia del nivel de llenado del embalse en

la respuesta sísmica de presas bóveda es muy importante y debe ser tenida en cuenta en cualquier análisis dinámico o sísmico. Se hacen necesarios estudios más detallados de este efecto que permitan obtener conclusiones de aplicación para la buena práctica ingenieril.

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 BIA2004-03955-C02-02. Los autores agradecen la financiación recibida.

REFERENCIAS

- [1] J.F. Hall y A.K. Chopra, "Hydrodynamic effects in the response of concrete gravity dams", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; **10**(2):333-345 (1982)
- [2] J.F. Hall y A.K. Chopra, "Dynamic analysis of arch dams including hydrodynamic effects", *J. Engrg. Mech., ASCE*, **19**(3), 496-512 (1983).
- [3] 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).
- [4] K. Fok y A. K. Chopra, "Water compressibility in earthquake response of arch dams". *Journal of Structural Engineering (ASCE)*; **113**(5):958-975 (1987)
- [5] 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)
- [6] J. Domínguez y O. Maeso, "Earthquake analysis of arch dams II: Dam-water-foundation interaction". *J. Engrg. Mech., ASCE*, **119**(3), 513-530 (1993).
- [7] 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*; **128**(7), 759-768 (2002)
- [8] O. Maeso, J.J. Aznárez y J. Domínguez, "Three-dimensional models of reservoir sediment and effects on seismic response of arch dams", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*; **33**: 1103-1123 (2004).
- [9] J.J. Aznárez, O. Maeso y J. Domínguez, "BE analysis of bottom sediments in dynamic fluid-structure interaction problems", *Engineering Analysis with Boundary Elements*; **30**: 124-136 (2006).
- [10] O. Maeso y J. Domínguez, "Earthquake analysis of arch dams I: Dam-foundation interaction". *J. Engrg. Mech., ASCE*, **119**(3), 496-512 (1993).
- [11] G.R. Dabre, C.A.M. de Smet y C. Fraemer, "Natural frequencies measured from vibration response of the arch dam of Mauvoisin", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*; **29**: 577-586 (2000).
- [12] J. Proulx, P. Paultre, J. Rheault y Y. Robert, "An experimental investigation of water level effects on the dynamic behaviour of a large arch dam", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*; **30**: 1147-1166 (2001).
- [13] A.H.D. Cheng. "Effects of sediments on earthquake induced reservoir hydrodynamic

- response". *J. Engrg. Mech., ASCE*, **112(7)**, 645-665 (1986).
- [14] S. Bougacha y J.L Tassoulas. "Seismic response of gravity dams II: Modelling of sediments". *J. Engrg. Mech., ASCE*, **117(8)**, 1826-1837 (1991).
- [15] 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)
- [16] 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).
- [17] J. Domínguez, *Boundary elements in dynamics*, Computational Mechanics Publications, Southampton and Elsevier, London (1993)
- [18] A. Verruijt, "Elastic storage of aquifers". *Flow through porous media*, R.J.M.De Weist Ed., San Diego (1969).