

CMN 2017

Congress on Numerical Methods in Engineering

July 3 - 5, Valencia, Spain

Edited by: Irene Arias, Jesús María Blanco, Stephane Clain, Paulo Flores,
Paulo Lourenço, Juan José Ródenas and Manuel Tur



A publication of:

**International Center for Numerical
Methods in Engineering (CIMNE)**
Barcelona, Spain



Printed by: Artes Gráficas Torres S.L., Huelva 9, 08940 Cornellà de Llobregat,
Spain

ISBN: 978-84-947311-0-5

PREFACIO

Este libro contiene los artículos o resúmenes de los trabajos presentados en el Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería CMN 2017, celebrado en las instalaciones de la Universitat Politècnica de València del 3 al 5 de julio de 2017. Este congreso ha sido organizado conjuntamente por SEMNI (Sociedad Española de Métodos Numéricos en Ingeniería) y APMTAC (Associaçao Portuguesa de Mecânica Teórica, Aplicada e Computacional).

Las sociedades decidieron fusionar dos congresos que originalmente se organizaban por separado en la edición de Madrid (2002). Desde entonces el congreso se ha celebrado en Lisboa (2004), Granada (2005), Oporto (2007), Barcelona (2009), Coimbra (2011), Bilbao (2013), y Lisboa (2015).

En esta edición del congreso se ha realizado un esfuerzo para impulsar la participación de jóvenes investigadores a través de diferentes acciones como la posibilidad de presentar los trabajos en formato poster y/o presentación oral, revisando el importe de las cuotas de registro, o la concesión de becas. El resultado de estas acciones ha sido muy satisfactorio, de manera que más de un tercio de los asistentes al congreso serán estudiantes.

De los 490 trabajos enviados inicialmente, en este libro se recogen los 301 resúmenes o artículos completos que finalmente serán presentados en formato oral o póster durante el congreso. El amplio contenido de este volumen recoge un amplio abanico de temáticas en el ámbito de los métodos numéricos aplicados a la ingeniería. Desde los aspectos más teóricos a los más aplicados, de las técnicas más clásicas hasta los métodos más modernos aplicados a problemas de sólidos, mecánica de fluidos y ondas. Los trabajos publicados se han reproducido directamente a partir de los archivos remitidos por los autores.

Los organizadores queremos agradecer a los autores que presentarán sus trabajos en el congreso, a los organizadores de sesiones temáticas, a los revisores de los trabajos y a los miembros del comité científico y del comité de organización local el esfuerzo realizado y su contribución en el éxito de esta edición del congreso.

Valencia, julio 2017
El comité organizador

SEMNI

APMTAC

Macro-element Mass matrix for the dynamic assessment of unreinforced masonry structures.....	233
<i>C. Chácara, P.B. Lourenço, B. Pantò, F. Cannizzaro and I. Caliò</i>	
RC simulation with concrete elements with embedded reinforcements using hybrid-mixed stress finite elements	247
<i>L.A. Mendes and L.M. Castro</i>	
Street lighting based on LED technology.....	267
<i>D. Alarcón, J. Higón, R. Bendaña, F. Giménez and P. Fernández de Córdoba</i>	
The effect of morphology on the structural behaviour of masonry walls ...	268
<i>L. Alejo, N. Mendes and P. Lourenço</i>	
Three-dimensional simulation of preload filling spiral case considering the shrinkage after pouring concrete.....	287
<i>Y. Yang, C. Su, H. Xu and S.P. Hu</i>	
Two-step procedure for the study of masonry walls subjected to a blast load.....	298
<i>L.C. da Silva, P.B. Lourenço and G. Milani</i>	

Finite Volume and Boundary Elements

Estudio de la respuesta sísmica de presas bóveda producida por una excitación constituida por ondas de Rayleigh.....	312
<i>F. García, J.J. Aznárez and O. Maeso</i>	
Evaluación mediante contraste experimental de un esquema numérico que usa el método de volúmenes finitos para simular el transporte de sedimentos incluyendo pérdidas locales de energía.....	326
<i>A. Balaguer Beser, B. Nácher Rodríguez and F.J. Vallés Morán</i>	
Nueva formulación del método de los elementos de contorno indirecto con integración analítica para resolver problemas de flexión de losas	327
<i>P. Castrillo and B. Sensale</i>	
Simulación numérica para el cálculo y diseño de tomas de tierra en subestaciones eléctricas enterradas	347
<i>R. Guizán, J. París, I. Colominas, F. Navarrina and M. Casteleiro</i>	
WENO-ADER finite volume numerical schemes: from homogeneous linear equations to non-linear systems of equations with source terms....	348
<i>A. Navas Montilla and J. Murillo</i>	

Fluid Mechanics

A new kernel-functions family to improve the accuracy and stability in SPH simulations.....	349
<i>J.J. Perea and J.M. Cordero</i>	
Advanced numeric methods for plasma turbulence simulations in the edge of a tokamak	369
<i>J.A. Soler, F. Schwander, E. Serre and J. Liandrat</i>	
An improved re-distancing algorithm for the level-set method	370
<i>A.F. Sucena, A.M. Afonso, M.A. Alves and F.T. Pinho</i>	

ESTUDIO DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS BÓVEDA PRODUCIDA POR UNA EXCITACIÓN CONSTITUIDA POR ONDAS DE RAYLEIGH

Fidel García¹, Juan J. Aznárez² y Orlando Maeso²

1: Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Edificio Central del Parque Científico y Tecnológico. Campus Universitario de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria. España
e-mail: fidel.garcia@ulpgc.es, web: <http://www.siani.es>

2: Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Edificio Central del Parque Científico y Tecnológico. Campus Universitario de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria. España
e-mail: {juanjose.aznarez,orlando.maeso}@ulpgc.es web: es

Palabras clave: Presas bóveda, dinámica de estructuras, ingeniería sísmica, interacción suelo-agua-sedimentos-estructura, elementos de contorno, incidencia variable, ondas de Rayleigh.

Resumen: En la presente ponencia se estudia en qué medida afecta al comportamiento dinámico de presas bóvedas cuando son alcanzadas por ondas de Rayleigh aspectos tales como:

- Las características de la propia excitación y el ángulo de incidencia; su variabilidad con la profundidad y la importancia en relación con el punto de medida y las características del embalse.
- La situación en relación a las condiciones del embalse: presencia de agua y sedimentos en el fondo del embalse.

El estudio se lleva a cabo en el dominio de la frecuencia mediante un modelo acoplado de elementos de contorno multifase que incorpora de forma muy natural medios infinitos, medios de distinto tipo y la naturaleza espacial de la excitación propuesta. El código, desarrollado por los autores, permite el estudio dinámico directo de problemas que incorporan regiones de naturaleza escalar (agua embalsada), viscoelástica (presa y suelo) y poroelástica (sedimentos en el fondo del embalse). Todas las regiones son discretizadas haciendo uso de elementos de contorno, formulando luego ecuaciones de compatibilidad y equilibrio que permiten establecer la interacción entre ellas de forma rigurosa.

Los resultados se muestran en términos de la función de respuesta compleja en dirección anteroposterior en el punto de la coronación de la presa situado en el plano de simetría.

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento dinámico de presas bóveda es un problema complejo debido a la naturaleza tridimensional del problema y a la presencia de medios con comportamientos diferentes (suelo, hormigón, agua y sedimentos) que interacción entre si formando un sistema acoplado en el que ninguna de las partes puede ser estudiada aisladamente. Además, la gran extensión de alguno de los medios implicados provoca que el comportamiento dinámico se vea influenciado por accidentes topográficos muy alejados de la zona de estudio.

A pesar de los grandes esfuerzos realizados en los últimos tiempos, habiéndose logrado avances muy significativos, existen aún grandes incertidumbres en relación al comportamiento sísmico de presas, lo que justifica que sea un campo de estudio plenamente vigente. Sin duda alguna, todos los esfuerzos encaminados a mejorar el conocimiento sobre el comportamiento sísmico de presas, redundará en construcciones más seguras, duraderas y económicas.

Son muchos los factores que influyen en la respuesta dinámica de presas. En un primer grupo estarían todos aquellos relacionados con la geometría y las propiedades de los materiales que constituyen la presa. El efecto local, gobernado por las características geológicas y topográficas del emplazamiento de la presa, constituiría un segundo grupo. Aspectos tales como las propiedades del suelo, la existencia de discontinuidades subterráneas o estratos y la presencia de accidentes topográficos próximos al emplazamiento estarían englobados aquí. Un tercer grupo lo formarían todos los relacionados con el carácter espacial de la excitación. Consecuencia del tamaño de la estructura y de la naturaleza viajera de las ondas sísmicas, no todos los puntos de la cimentación de la presa son excitados por igual en un determinado instante de tiempo. Además de las propiedades del terreno, de la frecuencia y de las dimensiones de la estructura, este efecto depende en gran medida del tipo y del ángulo de incidencia de la onda sísmica que alcance el emplazamiento, como se ha puesto de manifiesto en varios estudios previos [1-2]. Finalmente, un cuarto grupo estaría relacionado con los fenómenos de interacción dinámica. Por un lado, los desplazamientos en la superficie del suelo provocados por las ondas sísmicas se ven modificados por la presencia de la estructura. Por otro, el considerar el suelo como un medio flexible acoplado a la estructura modifica las frecuencias propias de ésta última y aumenta la disipación de energía, lo que redundaría en menores valores de la respuesta. Todo esto se ve acentuado por la presencia de medios escalares (agua) y poroelásticos (sedimentos) que alteran las frecuencias propias y modifican los valores de la respuesta al interactuar con el resto de regiones.

En la figura 1 se muestra un esquema del problema. El sistema acoplado está formado por la presa de hormigón, el terreno de naturaleza rocosa, el agua contenida y los sedimentos de fondo. El modelo numérico utilizado, basado en el Método de los Elementos de Contorno (MEC), permite una representación realista de la geometría del problema y tiene en cuenta, de forma rigurosa, la interacción dinámica entre todas las regiones cuando son alcanzadas por una solicitud sísmica que se propaga a través del suelo. En lo que a las características de las regiones implicadas se refiere, la presa y el suelo son considerados

medios elásticos, lineales e isótropos con amortiguamiento de tipo histerético; el agua se caracteriza como medio escalar; y los sedimentos como un medio poroelástico de acuerdo con la teoría de Biot [3]. Las ecuaciones del MEC se aplican a cada uno de los medios según sea su naturaleza, teniéndose en cuenta la interacción entre las regiones a través de relaciones de compatibilidad y equilibrio entre las variables definidas para cada dominio en los nodos de las superficies de contacto.

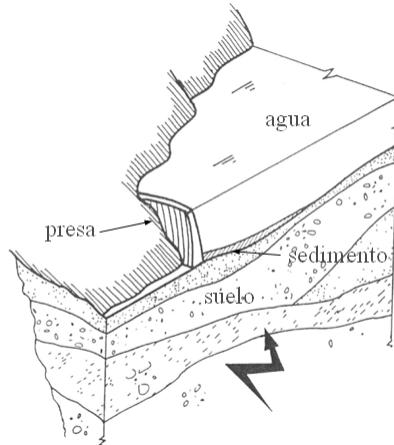


Figura 1. Sistema acoplado presa-suelo-agua-sedimento.

El modelo numérico empleado para llevar a cabo el presente estudio comienza a desarrollarse a principios de los años 90 por los autores [4-7]. Es capaz de tener en cuenta importantes factores que, o no eran considerados por los modelos existentes, o lo eran de una forma simplificada. Cabe destacar los efectos de interacción combinada suelo-presa-embalse, el efecto de la geometría real del embalse, la topografía local, el efecto de los desplazamientos diferenciales de la excitación o la presencia de sedimentos de fondo. En lo que respecta al estudio de la influencia del carácter espacial de la excitación sísmica y los efectos de interacción dinámica presa-suelo-embalse, el modelo permite incorporar cualquier combinación de ángulos de incidencia de ondas volumétricas y/o superficiales en el suelo llegando incluso a excitaciones consistentes en la incidencia simultánea de ondas P y S, con ángulo de incidencia completamente general ponderadas de forma que la excitación total sea compatible con los registros de diseño en campo libre [2].

En trabajos previos [1-2, 7-8], los autores han estudiado la influencia de muchos de los aspectos citados, pero siempre bajo la hipótesis de la incidencia de ondas volumétricas, bien de forma individual o actuando de forma combinada. Este trabajo trata de constituir un primer estudio, análogo al ya realizado para ondas de volumen, considerando la incidencia de ondas superficiales de Rayleigh únicamente.

Los resultados se presentan en el dominio de la frecuencia en términos del módulo de la respuesta compleja, estudiándose la influencia que sobre la variable indicada presentan el ángulo con el que incide la onda, la profundidad del cañón, el nivel de llenado y la presencia de sedimentos en el fondo del embalse.

La ponencia está estructurada como sigue. En el apartado 2 se resume el modelo de

Elementos de Contorno utilizado para el cálculo dinámico en el dominio de la frecuencia del sistema formado por la presa, el suelo, el agua embalsada y los sedimentos de fondo. En el apartado 3 se presentan los resultados obtenidos. Finalmente, en el apartado 4, se resumen las principales conclusiones del estudio.

2. MODELO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

El estudio presentando se centra en la presa de Morrow Point situada en el Parque Nacional del Cañón Negro, río Gunnison, Colorado (USA). En el modelo utilizado para su estudio, la presa y el suelo se consideran medios elásticos, lineales, homogéneos e isótropos, siendo éste último de dimensión infinita en comparación con las dimensiones de la presa. El agua embalsada se modela como un medio fluido compresible lineal. Las ecuaciones que rigen su comportamiento hacen uso de una solución fundamental que incorpora la ausencia de presiones en la superficie libre, con lo que no se hace preciso discretizarla. El sedimento se ha caracterizado como un medio poroelástico parcialmente saturado de agua que cumple las ecuaciones de comportamiento dinámico de Biot. Se han analizado diferentes niveles de llenado de agua con/sin presencia de sedimentos en el fondo del embalse. Cuando existen sedimentos, éstos tienen un de espesor $H/5$, donde H es la máxima altura de la presa (figura 2).

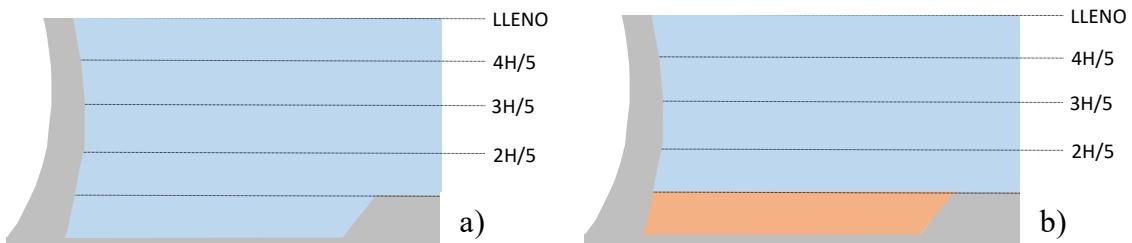


Figura 2. Definición de los niveles de llenado del embalse: a) sin sedimentos, b) con capa de sedimentos de espesor $H/5$

Las propiedades de los medios implicados son las siguientes: El hormigón de la presa viene caracterizado por una densidad $\rho_p=2481.50 \text{ kg/m}^3$, coeficiente de Poisson $\nu_p=0.2$, módulo de elasticidad transversal $G_p=11500 \text{ MPa}$, y un coeficiente de amortiguamiento interno $\xi_p=0.05$. El suelo tiene una densidad de $\rho_s=2641.65 \text{ kg/m}^3$, y el mismo módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y coeficiente de amortiguamiento interno que el hormigón. Para el agua se ha adoptado una velocidad de propagación de las ondas de presión de 1438 m/s y una densidad de $\rho_a=1000 \text{ kg/m}^3$. El sedimento depositado en el fondo se ha considerado como un medio bifásico poroelástico con las mismas propiedades que las adoptadas por [9] y [10] en sus estudios bidimensionales de respuesta sísmica de presas de gravedad: porosidad $\phi=0.6$, módulo de elasticidad transversal del esqueleto sólido $G=7.7037 \text{ MPa}$, coeficiente de Poisson $\nu=0.35$, coeficiente de amortiguamiento interno del esqueleto $\xi=0.05$, densidad del esqueleto drenado 2640 kg/m^3 , densidad del agua intersticial 1000 kg/m^3 , constante de disipación $b=3.5316 \times 10^6 \text{ Ns/m}^4$ (que

corresponde a una permeabilidad de 10^{-3} m/s) y módulo de compresibilidad del sedimento completamente saturado $K_f' = 2.0736 \times 10^9$ N/m². El módulo de compresibilidad, cuando el sedimento está parcialmente saturado, se ha calculado haciendo uso de la correlación propuesta por Verruijt [11]:

$$\frac{1}{K_f'} = \frac{1}{K_f} + \frac{1-s}{p_0}$$

Donde K_f' es el módulo de compresibilidad del sedimento completamente saturado, K_f' es el módulo de compresibilidad del sedimento para un grado de saturación s y p_0 es el valor de la presión hidrostática que se ha calculado para la profundidad en el punto medio de la capa considerada. Si bien el grado de saturación considerado es en todos los casos del 99.5% la presión p_0 depende del nivel de agua existente sobre la misma capa de sedimentos. En la tabla 1 se resumen el módulo de compresibilidad y las constantes de Biot teniendo en cuenta lo indicado.

Nivel de agua en el embalse	K_f' (N/m ²)	$Q' = (1-\phi)K_f'$ (N/m ²)	$R' = \phi K_f'$ (N/m ²)
2H/5	8.01978×10^7	3.20791×10^7	4.81187×10^7
3H/5	1.30303×10^8	5.21211×10^7	7.81817×10^7
4H/5	1.77951×10^8	7.11803×10^7	1.06770×10^8
Lleno	2.23318×10^8	8.93272×10^7	1.33991×10^8

Tabla 1. Módulo de compresibilidad K_f' y constantes de Biot Q' y R' para una capa de sedimentos de espesor H/5 con grado de saturación $s=99.5\%$ y diferentes niveles de llenado del embalse.

En la figura 3 puede observarse un detalle de las discretizaciones de los dos embalses contemplados en el estudio. El primero de ellos (figura 3.a), al que hemos denominado cañón somero, se corresponde con la topografía real del cañón de Morrow Point. El segundo, que denominaremos cañón profundo, (figura 3.b) es una variante del anterior obtenido a partir del cañón real aumentando su profundidad en 141.73 m de manera uniforme, aproximadamente 2.25 veces la altura real del cañón. En ambos casos, el estudio se ha realizado empleando un modelo de embalse que denominamos abierto, que supone que éste se extiende indefinidamente aguas arriba con una geometría uniforme. Esta situación es modelada introduciendo un contorno absorbente transversal al cañón en una zona suficientemente alejada de la presa, en el que se impone una relación entre la presión hidrodinámica y su derivada, análoga a las de un canal indefinido. Este modelo indefinido para el canal se ha empleado por Hall y Chopra [12] y Fok y Chopra [13] con modelos de elementos finitos y por Medina y Domínguez [14], Maeso y Domínguez [4-5] y Aznárez, Maeso, y Domínguez [7] con elementos de contorno. Únicamente es necesario discretizar la mitad de la geometría completa debido a que el modelo presenta un plano de simetría. Se han utilizado elementos cuadriláteros de nueve nodos y triangulares de seis, con aproximación parabólica tanto de la geometría como de las variables en los contornos. La discretización de la superficie libre del suelo se extiende hasta una distancia del orden

de 2.5 veces la altura de la presa, aumentando el tamaño de los elementos a medida que se alejan de la zona de interés. El tamaño de los elementos está determinado por la longitud de las ondas en cada medio (salvo en la superficie libre del suelo donde se han empleado elementos mayores a medida que se alejan de la zona de estudio).

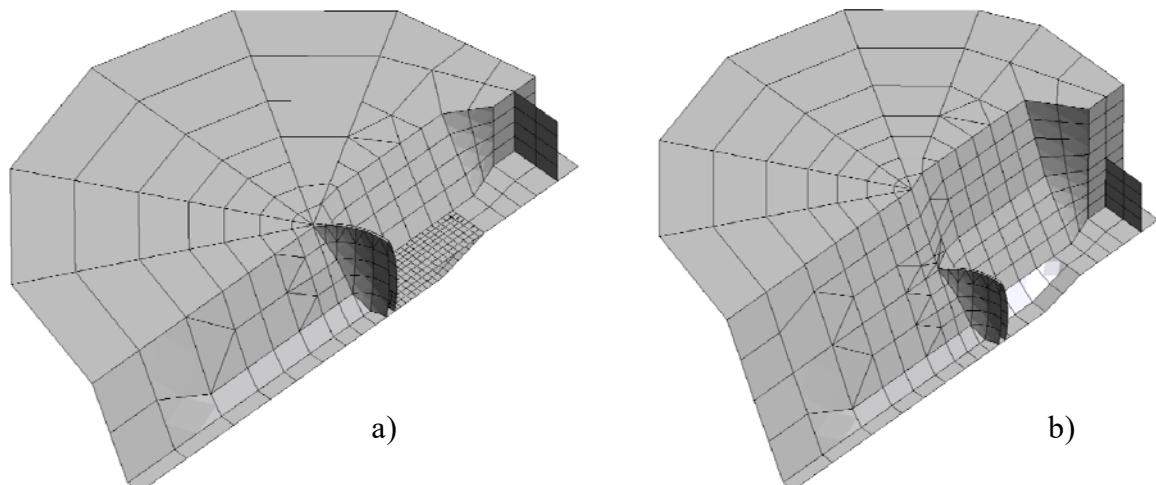


Figura 3. Discretizaciones de elementos de contorno: a) Cañón somero con sedimentos, b) Cañón profundo sin sedimentos

En todos los contornos exteriores de sólido, es decir, de presa y de suelo, se imponen condiciones de superficie libre de tensiones. En las interfaces entre las distintas regiones, a saber: presa-suelo, presa-agua, presa-sedimento, suelo-sedimento, agua-sedimento y agua-suelo, se imponen condiciones de acoplamiento de forma rigurosa por medio de ecuaciones adicionales que establecen el cumplimiento de las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad entre las variables de los nodos perteneciente a dichas interfaces.

3. RESULTADOS

En las distintas gráficas mostradas a continuación se presenta el valor del módulo de la función de respuesta compleja en dirección anteroposterior (eje x) frente la frecuencia en rad/s, en el punto de la coronación de la presa situado en el plano de simetría representado en la figura 4.

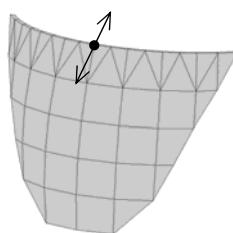


Figura 4. Punto de la presa para el que se obtienen los resultados

En cada grupo de resultados se muestran siete gráficos que se corresponden con los

ángulos de incidencia α definidos de acuerdo al criterio mostrado en la figura 5.

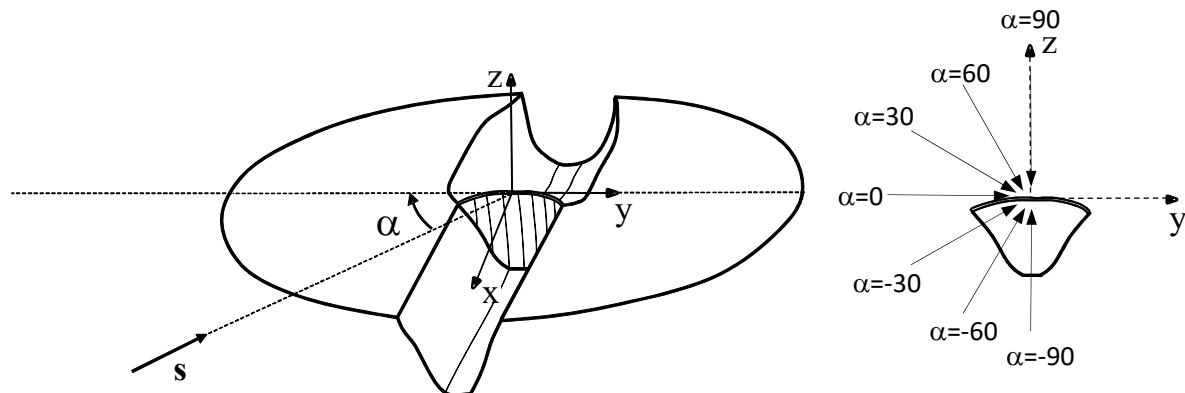


Figura 5. Definición de los ángulos de incidencia estudiados de la onda R

3.1 Cañón somero & cañón profundo. Influencia del nivel de llenado

Las figuras de la 6 a la 12 muestran los resultados obtenidos cuando incide una onda R con ángulos de incidencia de -90° , -60° , -30° , 0° , 30° , 60° y 90° respectivamente. En cada uno de los gráficos se muestran ocho curvas, cuatro correspondientes al cañón somero y 4 al cañón profundo; en ambos casos, cada una de las cuatro curvas corresponden a diferentes niveles de llenado del embalse, a saber: Completamente lleno, $4H/5$, $3H/5$ y $2H/5$. En todos los resultados presentados en este apartado no existen sedimentos en el fondo del embalse.

Un primer análisis de los ocho gráficos pone de manifiesto la gran influencia que tiene el ángulo de incidencia en todas las situaciones presentadas. Los valores mayores de la variable analizada se dan para ángulos comprendidos entre $\alpha=90^\circ$ y $\alpha=-30^\circ$ siendo la respuesta considerablemente menor para los casos de $\alpha=-60^\circ$ y $\alpha=-90^\circ$. El cañón somero presenta una sensibilidad mayor que el profundo al ángulo de incidencia cuando la altura de agua embalsada es considerable, véase la evolución de las curvas negras continuas (lleno) y de puntos y azules ($4H/5$) en los ocho gráficos.

Para cada uno de los niveles de llenado, salvo para $\alpha=-30^\circ$, el cañón somero presenta valores mayores o al menos iguales que los correspondientes al cañón profundo. Para la excepción indicada, $\alpha=-30^\circ$, el fenómeno se reproduce al contrario, correspondiendo las amplificaciones mayores al cañón profundo.

En el cañón profundo, curvas de puntos, se observa como para todas las incidencias el valor de la respuesta disminuye con la cantidad de agua embalsada a la vez que las frecuencias propias se mueven a valores menores. Esta tendencia se mantiene únicamente en el caso del cañón somero para incidencias $\alpha=90^\circ$ y $\alpha=60^\circ$. Para el resto de incidencias, niveles de llenado inferiores al lleno ($4H/5$ y $3H/5$), provocan mayores amplificaciones de la respuesta. Si se mantiene, sin embargo, la tendencia ya descrita para el cañón profundo de la disminución de las frecuencias propias con el llenado del embalse.

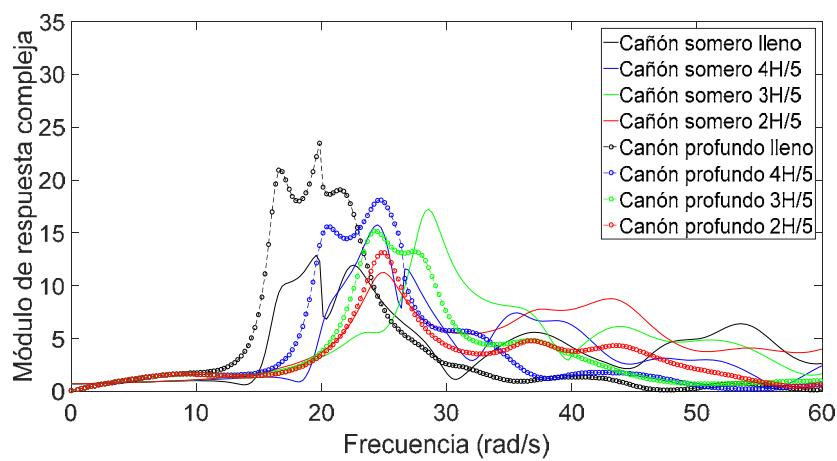


Figura 6. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=90^\circ$

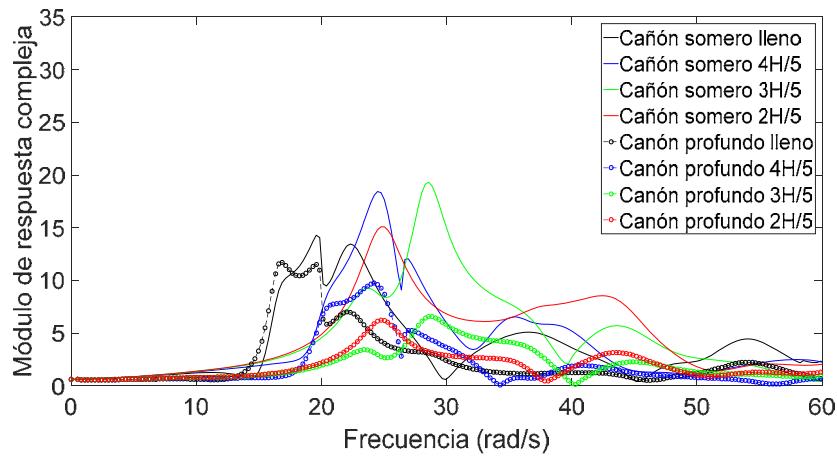


Figura 7. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=60^\circ$

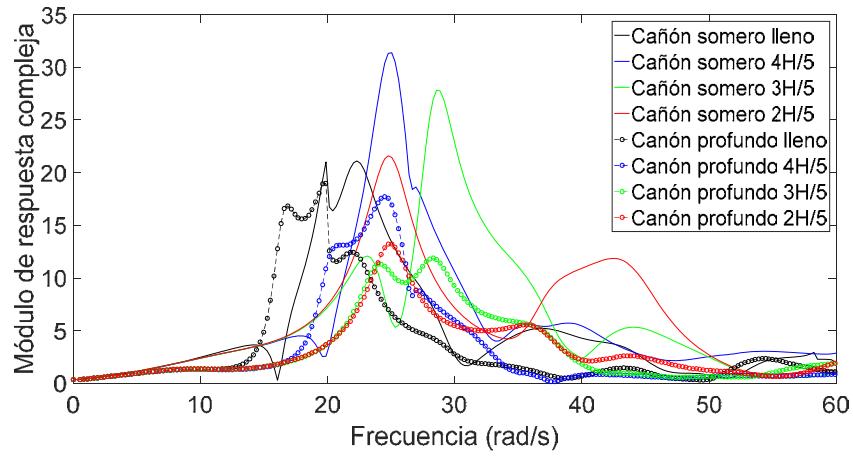


Figura 8. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=30^\circ$

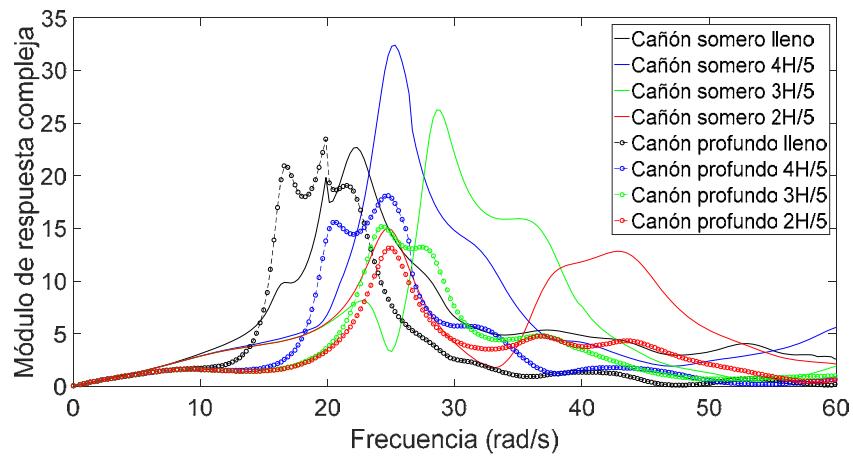


Figura 9. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=0^\circ$

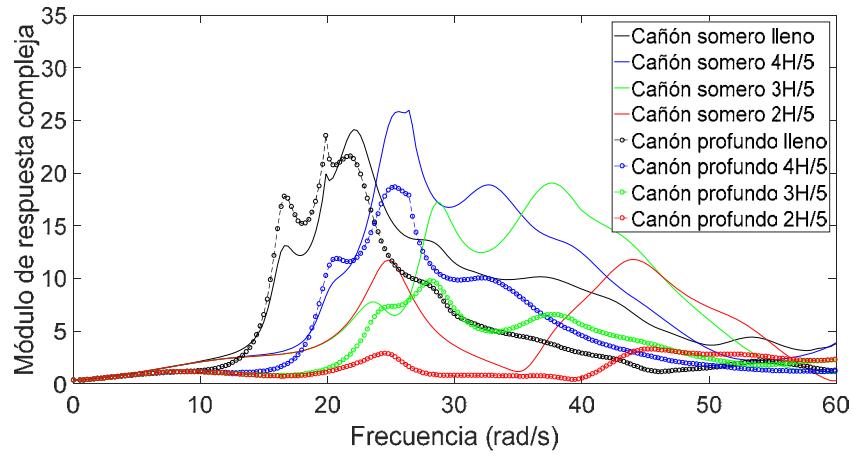


Figura 10. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=30^\circ$

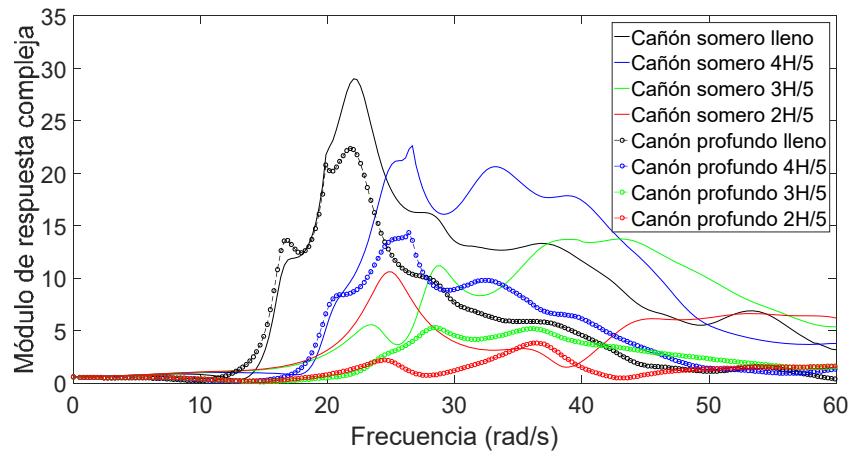


Figura 11. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=60^\circ$

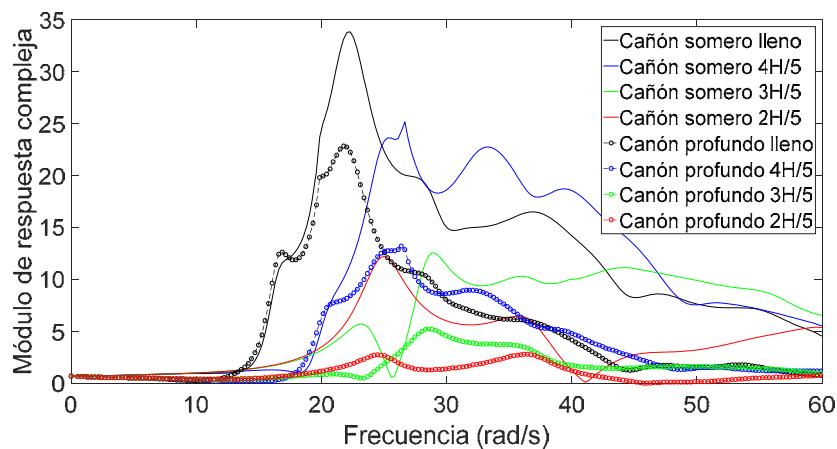


Figura 12. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=90^\circ$

3.1. Cañón somero & cañón profundo. Influencia de la presencia de sedimentos

De forma análoga a los resultados presentados en el apartado anterior, las figuras de la 13 a la 19 muestran los resultados para las siete incidencias analizadas. En todos los casos el embalse se encuentra lleno de agua. Cada gráfico presenta cuatro curvas, dos asociadas al cañón somero y dos al cañón profundo. Para cada uno se muestran dos curvas, una corresponde a la situación en la que no existen sedimentos y otra a el caso en el que existe una capa de sedimentos de espesor H/5.

Las curvas reflejan una tendencia general a una disminución de la magnitud de la respuesta con la presencia de sedimentos con ciertos matices. En el caso del cañón profundo la disminución se manifiesta para todas las incidencias de forma mucho más evidente por orden decreciente para $\alpha=90^\circ$, 60° , 30° y 0° . Para incidencias negativas, la diferencia entre ambas situaciones es mínima.

En el caso del cañón somero no existen diferencias apreciables en el valor de la respuesta para incidencias $\alpha=-90^\circ$ y -60° . Para $\alpha=-30^\circ$, único caso en que se presenta este fenómeno, la presencia de sedimentos amplifica el valor de la respuesta de forma apreciable. Para el resto de incidencias, el comportamiento vuelve a ser la clásica disminución de la magnitud con la presencia de sedimentos; la disminución es tanto mayor a medida que aumenta el ángulo α .

Para ambos cañones se aprecia una disminución de las frecuencias fundamentales con la presencia de sedimentos para todas las incidencias.

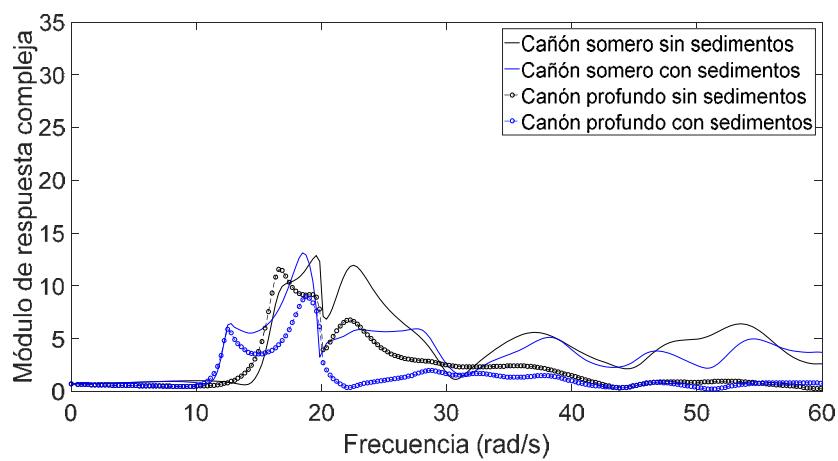


Figura 13. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=-90^\circ$

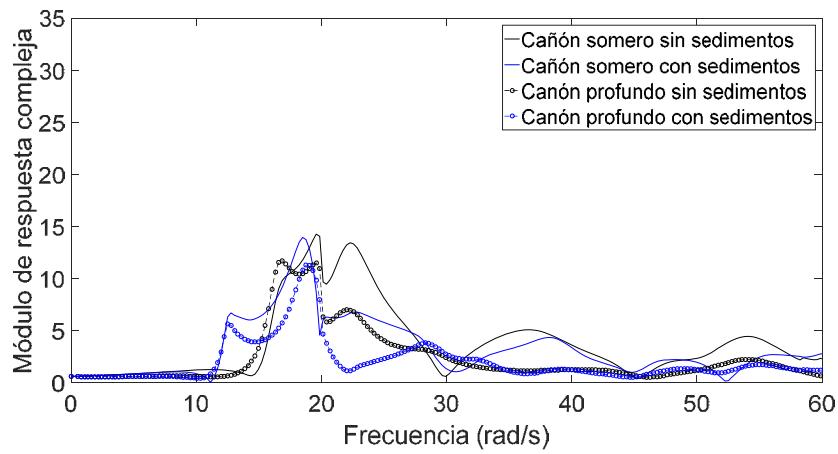


Figura 14. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=-60^\circ$

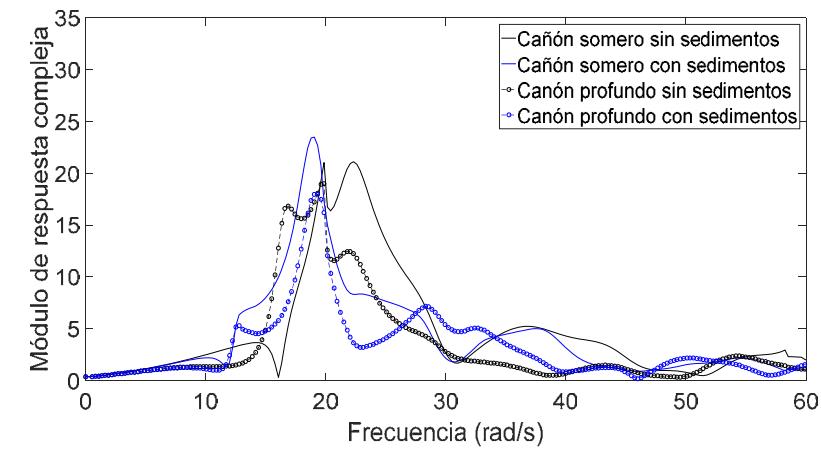


Figura 15. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=-30^\circ$

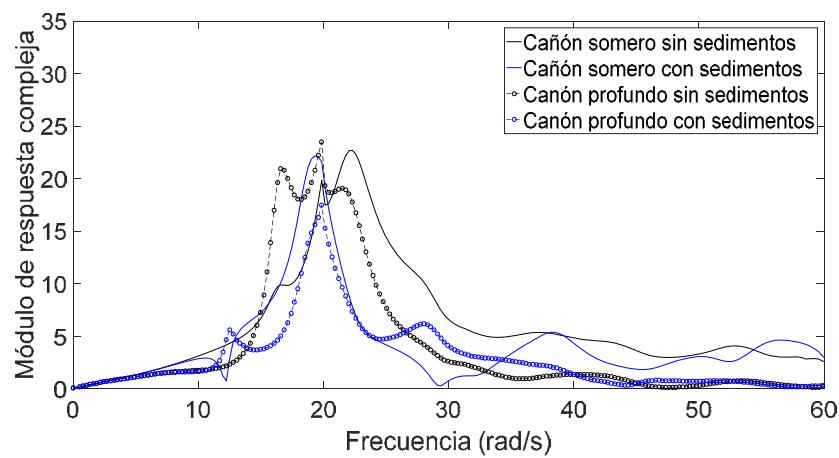


Figura 16. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=0^\circ$

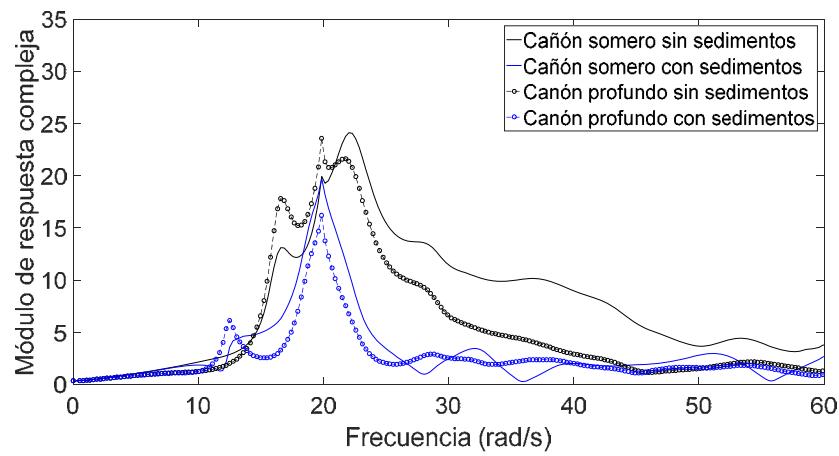


Figura 17. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=30^\circ$

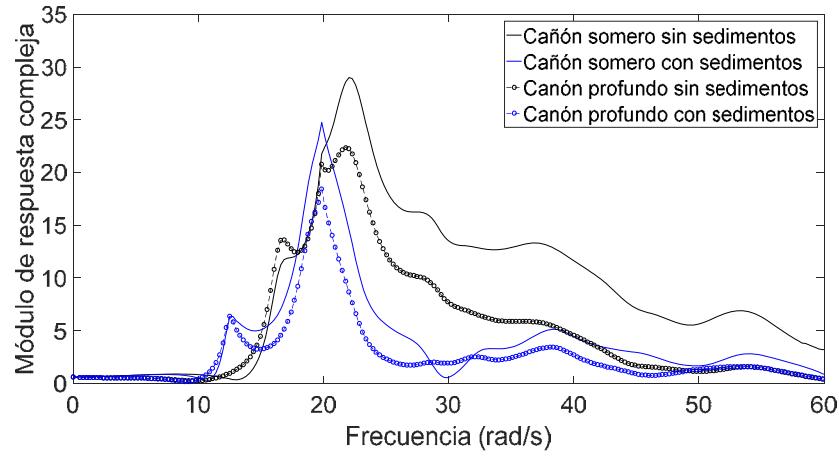


Figura 18. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=60^\circ$

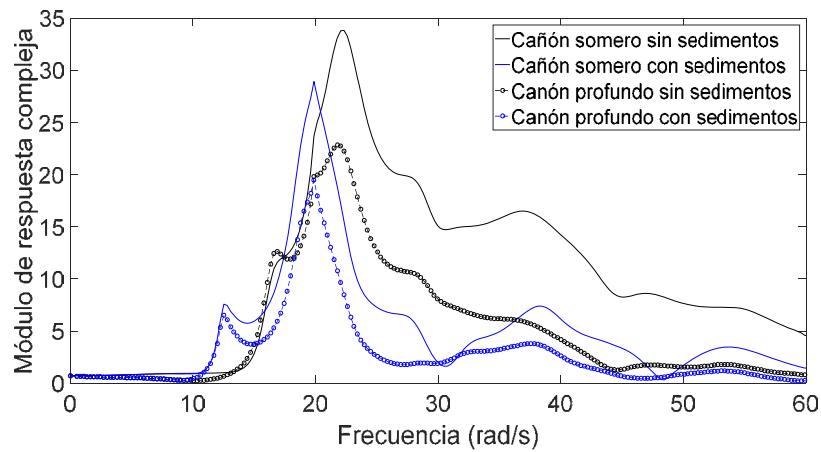


Figura 19. Comparativa cañón somero frente al cañón profundo para un ángulo de incidencia $\alpha=90^\circ$

4. CONCLUSIONES

Se ha presentado un estudio de la influencia que sobre el comportamiento dinámico de presas bóvedas alcanzadas por ondas de Rayleigh tienen aspectos tales como el ángulo de incidencia de la onda, el nivel de llenado del embalse y la presencia de sedimentos en el fondo del embalse. De los resultados presentados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El módulo de la respuesta compleja presenta una fuerte dependencia con el ángulo de incidencia. La respuesta toma sus mayores y menores valores cuando la incidencia se alinea con la dirección de la cerrada del cañón y el sentido es de aguas arriba a aguas abajo ($\alpha=90^\circ$) y de aguas abajo a aguas arriba ($\alpha=-90^\circ$) respectivamente.
- Para cada uno de los niveles de llenado, salvo para $\alpha=-30^\circ$, el cañón somero presenta valores mayores o al menos iguales que los correspondientes al cañón profundo.
- Existe una tendencia general, con matices, a una disminución de la magnitud de la respuesta con la presencia de sedimentos. Esta tendencia es más evidente en el cañón profundo que en el somero, en el que aparece el efecto contrario para determinadas incidencias.
- Tanto para el cañón somero como para el profundo la presencia de sedimentos provoca, para todas las incidencias analizadas, una disminución de las frecuencias fundamentales hacia valores menores.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está vinculado al proyecto de investigación BIA2014-57640-R, financiado por la Subdirección General de Proyectos de Investigación (MICINN) y fondos FEDER.

6. REFERENCIAS

- [1] O. Maeso, J. 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).
- [2] F. García, J.J. Aznárez, L.A. Padrón, O. Maeso, Relevance of the incidence angle of the seismic waves on the dynamic response of arch dams. *Soil Dyn Earthq Eng*, 90, 442–453 (2016).
- [3] M. A. Biot, Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I: Low Frequency Range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2), 168-178. (1956).
- [4] O. Maeso y J. Domínguez, Earthquake analysis of arch dams I: Dam-foundation interaction. *J. Engrg. Mech.*, ASCE, 119(3), 496-512 (1993).
- [5] J. Domínguez y O. Maeso, Earthquake analysis of arch dams II: Dam-water-foundation interaction. *J. Engrg. Mech.*, ASCE, 119(3), 513-530 (1993).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] F. García, J.J. Aznárez, H. Cifuentes , F. Medina, O. Maeso, Influence of reservoir geometry and conditions on the seismic response of arch dams. *Soil Dyn Earthq Eng*, 67, 264-272. (2014).
- [9] S. Bougacha & J. L. Tassoulas, Seismic Response of Gravity Dams II: Effects of Sediments. *J. Eng. Mech.*, 117(8), 1839-1850. (1991).
- [10] J. Domínguez, R. Gallego & B. R. Japón, Effects of Porous Sediments on Seismic Response of Concrete Gravity Dams. *Journal of Engineering Mechanics*. ASCE, 123(4), 302-311. (1997).
- [11] A. Verruijt, Elastic Storage of Aquifers. En R. J. Weist (Ed.), *Flow through porous media*. Academic Press New York. 331-376. (1969).
- [12] J. Hall & A. K. Chopra, Dynamic Analysis of Arch Dams Including Hydrodynamic Effects. *Journal of Engineering Mechanics*. ASCE, 19 (3), 496-512. (1983).
- [13] K. Fok & A. K. Chopra, Water Compressibility in Earthquake Response of Arch Dams. *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 113 (5), 958-975. (1987).
- [14] F. Medina & J. Domínguez, Boundary Elements for the Analysis of Dams Including Dam-Water-Foundation Interaction Effects I. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 6, 151-157. (1989).