

## **RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS BÓVEDA: INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DEL LECHO SEDIMENTARIO SOBRE LAS PRESIONES HIDRODINÁMICAS**

**Fidel García\*, Juan José Aznárez y Orlando Maeso**

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI).  
Edificio Central del Parque Científico y Tecnológico. Campus Universitario de Tafira  
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 35017 Las Palmas de Gran Canaria. España.  
fgarcia@dic.ulpgc.es, jjaznarez@siani.es, omaeso@siani.es, web: <http://www.siani.es/>

**Palabras clave:** Presas bóveda, dinámica de estructuras, ingeniería sísmica, interacción suelo-agua-sedimentos-estructura, elementos de contorno, lecho de sedimento poroelástico.

**Resumen** *En este trabajo se analiza la influencia que las propiedades de los sedimentos de fondo, especialmente su grado de saturación, tienen sobre la respuesta dinámica de presas bóvedas ante diferentes situaciones de excitación sísmica consistente en trenes de ondas planas  $P$  y  $S$  propagándose por el suelo hacia el emplazamiento con distintos ángulos de incidencia. La variable empleada para caracterizar la respuesta es la presión hidrodinámica resultante en un conjunto de puntos situados a lo largo del plano de simetría de la presa. El análisis se realiza en el dominio de la frecuencia, a partir de cual, mediante un algoritmo FFT, se obtiene la respuesta temporal y sus envolventes en los puntos indicados, para un registro sísmico dado. Se hace uso de un modelo acoplado de elementos de contorno (EC) desarrollado por los autores que permite el estudio dinámico directo de problemas que incorporan regiones de naturaleza escalar (agua embalsada), viscoelástica (presa y suelo del emplazamiento) y poroelástica (sedimentos en el fondo del embalse). Todas las regiones son discretizadas haciendo uso de EC, formulando luego ecuaciones de compatibilidad y equilibrio que permiten establecer la interacción entre ellas de forma rigurosa.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Aún a pesar de los grandes avances logrados en los últimos tiempos, existe una gran incertidumbre relativa al comportamiento sísmico de presas debido a que son muchos los factores que intervienen, existiendo sobre muchos de ellos un grado de desconocimiento aún hoy elevado. 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.

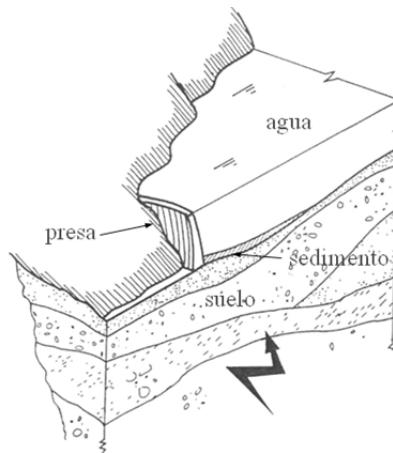
La modelización numérica de la respuesta sísmica de presas bóveda es un problema complejo debido a la existencia de medios de diferentes características (suelo, hormigón, agua y sedimentos) que interactúan entre sí formando un sistema acoplado en el que ninguna de las partes puede ser estudiada aisladamente. Además, la gran extensión de algunas regiones provoca que el comportamiento dinámico se vea influenciado por accidentes topográficos muy alejados de la zona de estudio.

Entre los factores que influyen en la respuesta dinámica de presas podemos citar:

- La geometría y las propiedades de los materiales que constituyen la presa.
- Las características geológicas y topográficas del emplazamiento (efecto local). Se incluyen en este punto las propiedades del suelo, la existencia de discontinuidades subterráneas o estratos y la presencia de accidentes topográficos próximos al emplazamiento.
- El carácter espacial de la excitación. Se alude con esta frase al hecho, consecuencia del tamaño de la estructura y de la naturaleza viajera de las ondas sísmicas, de que no todos los puntos de la cimentación de la estructura son excitados por igual en un determinado instante de tiempo. Además de las propiedades del terreno, la frecuencia y 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.
- Los fenómenos de interacción dinámica. De entrada, los desplazamientos en la superficie del suelo provocados por las ondas sísmicas se ven modificados por la presencia de la estructura. Por otro lado el considerar el suelo como un medio flexible acoplado a la estructura modifica las frecuencias propias de esta última y aumenta la disipación de energía, lo que redundará en menores valores de la respuesta. Todo esto se ve acentuado por la presencia de medios escalares (agua) y poroelásticos (sedimentos) que alteran 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. En el sistema acoplado coexisten 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 sollicitación sísmica que se propaga a través del suelo. En lo que a las características de la

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. 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 [1-5]. 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 [6-7].

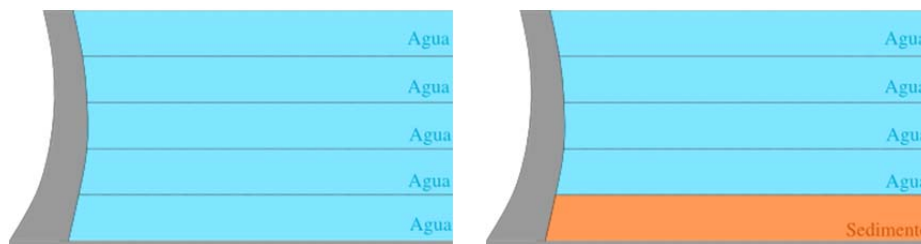
El principal objetivo que se pretende alcanzar con este trabajo es evaluar la sensibilidad de la presión hidrodinámica sobre la presa cuando se modifican las propiedades del sedimento. Esta sensibilidad se analiza frente a distintos tipos de ondas o combinaciones de éstas con distintos ángulos de incidencia.

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 lleva a cabo el estudio de la variabilidad de la presiones hidrodinámicas sobre el

paramento de la presa en función de de las propiedades del sedimento para diferentes combinaciones y tipos de ondas. Finalmente se resumen las principales conclusiones del estudio.

## 2. MODELO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

El estudio presentando se basa 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 isotropos, 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 [8]. En todos los casos estudiados el embalse se encuentra completamente lleno de agua ocupando los sedimentos, en aquellos casos en los que están presentes, un espesor de espesor  $H/5$ , donde  $H$  es la máxima altura de la presa (figura 2).



**Figura 2.** Situación analizada: Embalse lleno de agua sin sedimentos y con una 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  $1438 \text{ m/s}$  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  $2640 \text{ kg/m}^3$ , densidad del agua intersticial  $1000 \text{ kg/m}^3$ , constante de disipación  $b=3.5316 \times 10^6 \text{ N/m}^4$  (que corresponde a una permeabilidad de  $10^{-3} \text{ m/s}$ ) y módulo de compresibilidad del sedimento completamente saturado  $K_f =2.0736 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ .

Se han analizado cinco grados de saturación para el sedimento: 99.8%, 99.6%, 99.4%, 99.2% y 99.0%. El módulo de compresibilidad, cuando el sedimento está parcialmente saturado, se ha calculado mediante la ecuación de Verruijt [11]:

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

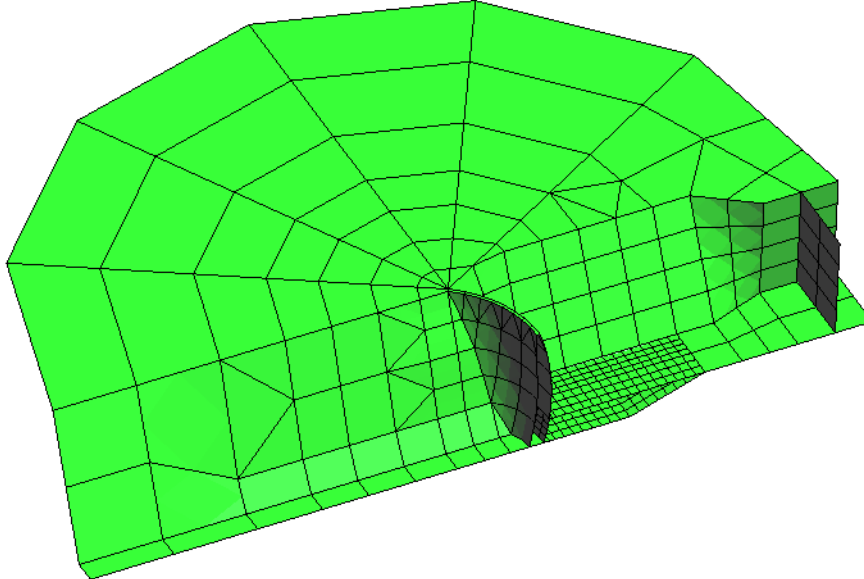
Donde  $K_f$  es el módulo de compresibilidad del sedimento completamente saturado,  $K'_f$  es el módulo de compresibilidad del sedimento para un grado de saturación  $s$  y  $p_0$  es el valor de la presión absoluta hidrostática que se ha calculado para la profundidad en el punto medio del espesor del sedimento. En la tabla 1 se resumen el módulo de compresibilidad y las constantes de Biot para cada uno de los grados de saturación obtenidos a partir de sus expresiones  $Q' = (1-\phi)K'_f$  y  $R' = \phi K'_f$ .

s	$K'_f$	$Q' = (1-\phi)K'_f$	$R' = \phi K'_f$
99.8%	4.80649E+08	1.92260E+08	2.88389E+08
99.6%	2.71829E+08	1.08732E+08	1.63097E+08
99.4%	1.89500E+08	7.57999E+07	1.13700E+08
99.2%	1.45448E+08	5.81791E+07	8.72687E+07
99.0%	1.18014E+08	4.72055E+07	7.08083E+07

**Tabla 1.** Propiedades del sedimento para distintos grados de saturación.

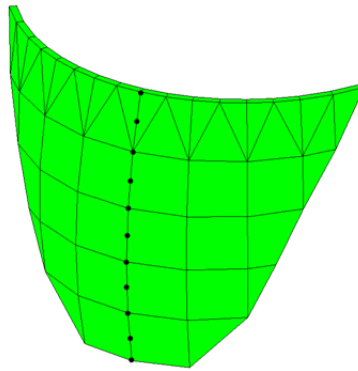
El estudio se ha realizado empleando un modelo de embalse que denominamos abierto (figura 3). Consiste en un embalse que se extiende indefinidamente aguas arriba con una geometría uniforme, situación modelada introduciendo un contorno absorbente transversal al cañón en una zona alejada de la presa, en 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 [1-2] y Aznárez, Maeso, y Domínguez [15] con elementos de contorno. La decisión de considerar este modelo abierto se justifica por la geometría real del embalse de Morrow Point. 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 de la discretización 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).

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.



**Figura 3.** Discretización de elementos de contorno. Modelo de embalse abierto.

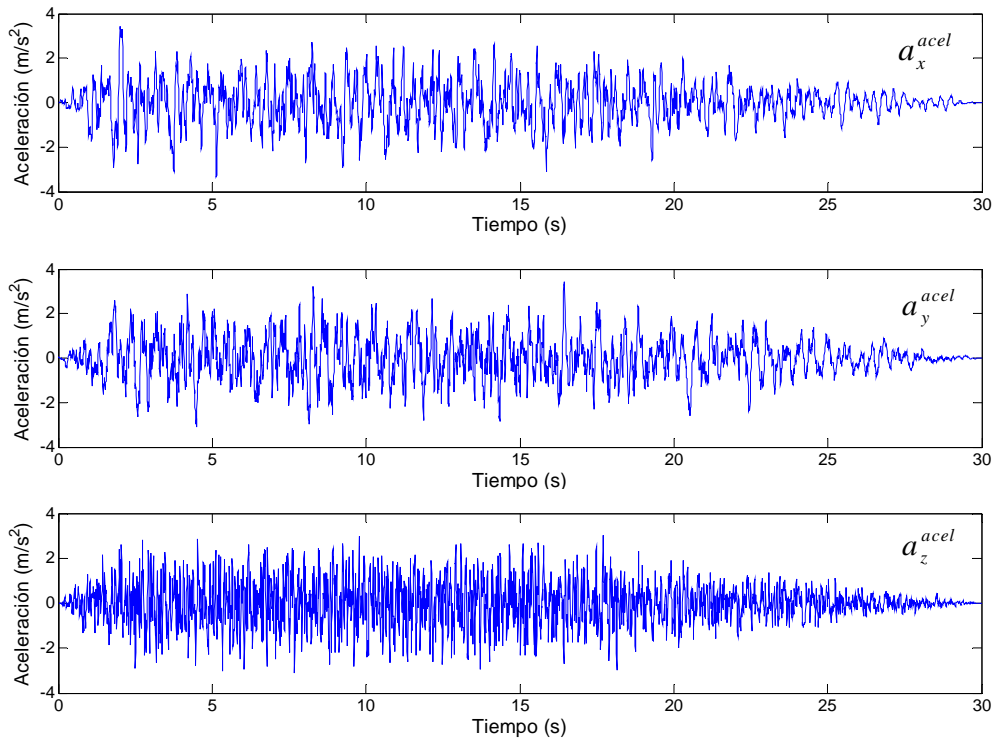
Los resultados mostrados en el siguiente apartado se presentan en términos del empuje hidrodinámico normal ( $\sigma' = p^a$ ) sobre la presa en todos los nodos situados en el plano de simetría de la bóveda (figura 4) en forma de curvas envolventes de empuje, una correspondiente a los valores positivos y otra a los valores negativos (succiones), adimensionalizadas con la presión hidrostática máxima correspondiente al fondo del embalse cuando está completamente lleno de agua ( $\rho g H = 1390,37 \text{ N/m}^2$ ). Cada envolvente se ha calculado tomando, para los puntos analizados, el máximo empuje negativo y el máximo empuje positivo de la respuesta temporal. Cuando existen sedimentos, en los puntos de la presa en contacto con los mismos, el empuje viene dado por la expresión  $\sigma' = \mathbf{t} \mathbf{n}^p - \tau$  donde  $\mathbf{t}$  y  $\tau$  son respectivamente el vector tensión sobre el esqueleto sólido y la tensión equivalente en el fluido del medio poroelástico y  $\mathbf{n}^p$  es el vector normal exterior a la superficie de la presa. Esto conlleva a que en el punto de la interfase sedimento-agua aparece una duplicidad en el valor del empuje como consecuencia de la variable que se representa.



**Figura 4.** Puntos del plano de simetría de la bóveda en los que se han calculado las envolventes del empuje hidrodinámico normal.

Los empujes hidrodinámicos presentados corresponden a la respuesta que provoca un sismo determinado al alcanzar el emplazamiento. Dicho sismo viene caracterizado por una terna de acelerogramas sintéticos (figura 5), dos horizontales y uno vertical,  $(a_x^{accel}, a_y^{accel}, a_z^{accel})$  compatibles con el espectro de diseño “tipo 1” para suelos “tipo A” y aceleración de diseño 0.35 g de acuerdo con lo indicado en el Eurocódigo 8 [16]. El procedimiento de síntesis y la corrección posterior de la línea base pueden consultarse con detalle en [7]. En el caso de los resultados correspondientes únicamente a la onda SH, la excitación considerada consiste en uno de los acelerogramas horizontales  $(a_x^{accel})$ . Para los resultados correspondientes a la combinación de ondas P y SV se emplean los acelerogramas  $(a_y^{accel}, a_z^{accel})$  ponderados según el proceso determinista que figura en [7] que conduce a que las aceleraciones provocadas por el tren de ondas planas correspondientes propagándose por el suelo provoquen en el problema de campo libre unas aceleraciones en cada dirección iguales a los acelerogramas empleados como excitación.

El programa de elementos de contorno trabaja en el dominio de la frecuencia dando como resultado la función de transferencia del sistema. La herramienta utilizada para pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y viceversa es la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y su correspondiente Transformada Inversa (FFT-1).



**Figura 5.** Aceleración de los registros artificiales corregidos empleados como excitación.

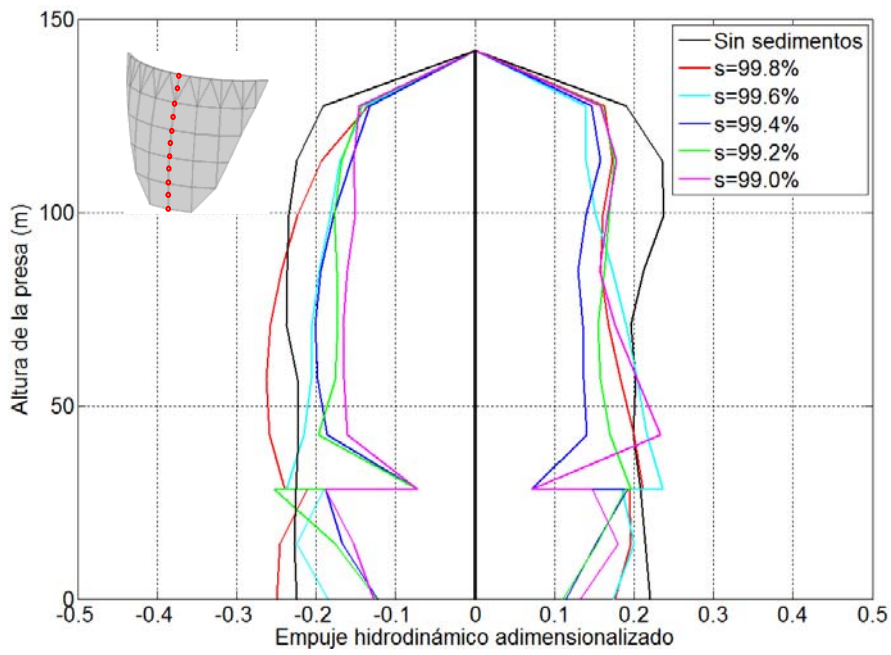
### 3. RESULTADOS

En las distintas gráficas mostradas a continuación el valor del empuje, que como ya se comentó anteriormente se ha adimensionalizado dividiendo por la presión hidrostática máxima, se representa en el eje de abscisas; en el eje de ordenadas se muestra la altura de la presa medida a partir del fondo del embalse.

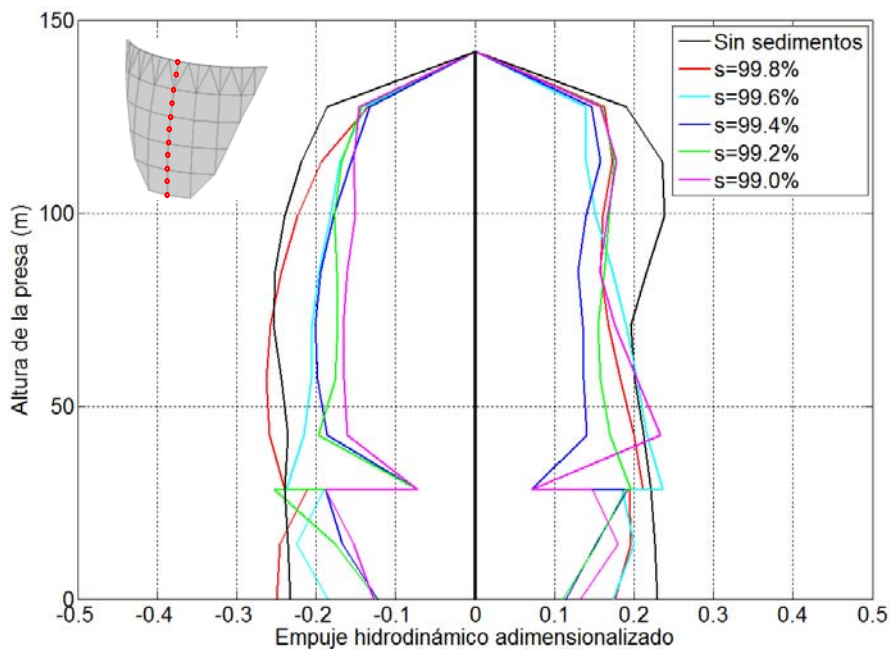
Las figuras 6, 7 y 8 muestran los resultados obtenidos cuando incide una onda SH con ángulos de incidencia de  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $30^\circ$  respectivamente. En todos los casos se observa como la presencia de sedimentos, independientemente del grado de saturación, provoca empujes menores en el último tercio de altura de la presa. A medida que la incidencia se hace más rasante la disminución del empuje con la presencia de sedimentos alcanza cotas más profundas. Nótese cómo en el caso de la incidencia de  $30^\circ$  este efecto llega, con alguna excepción, hasta el fondo del embalse.

Existe una tendencia general a que disminuyan los valores del empuje con el grado de saturación. No obstante, no se puede afirmar esto de forma concluyente dado que esta tendencia se altera en determinadas zonas.

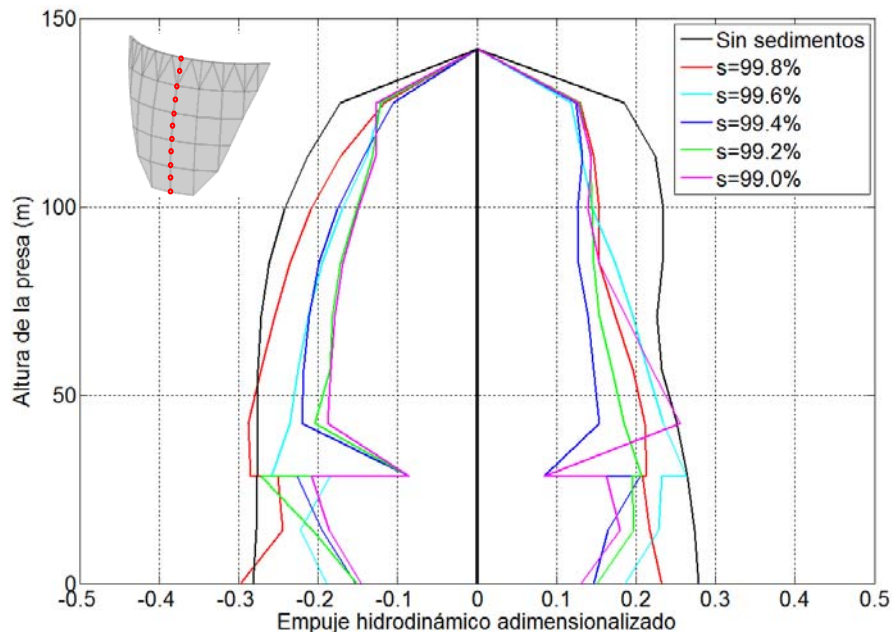




**Figura 6.** Empujes hidrodinámicos. Onda SH. Incidencia 90°.



**Figura 7.** Empujes hidrodinámicos. Onda SH. Incidencia 60°.

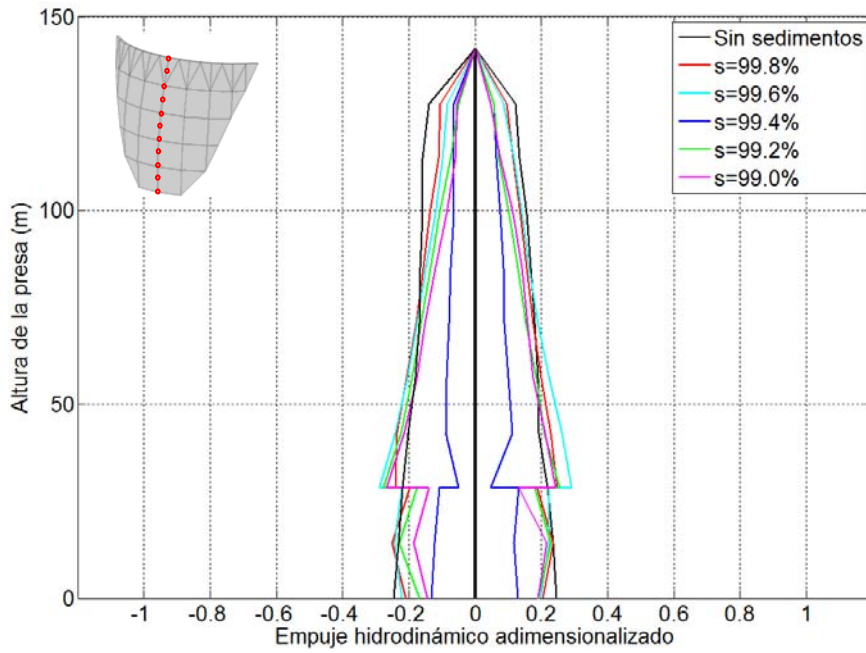


**Figura 8.** Empujes hidrodinámicos. Onda SH. Incidencia 30°.

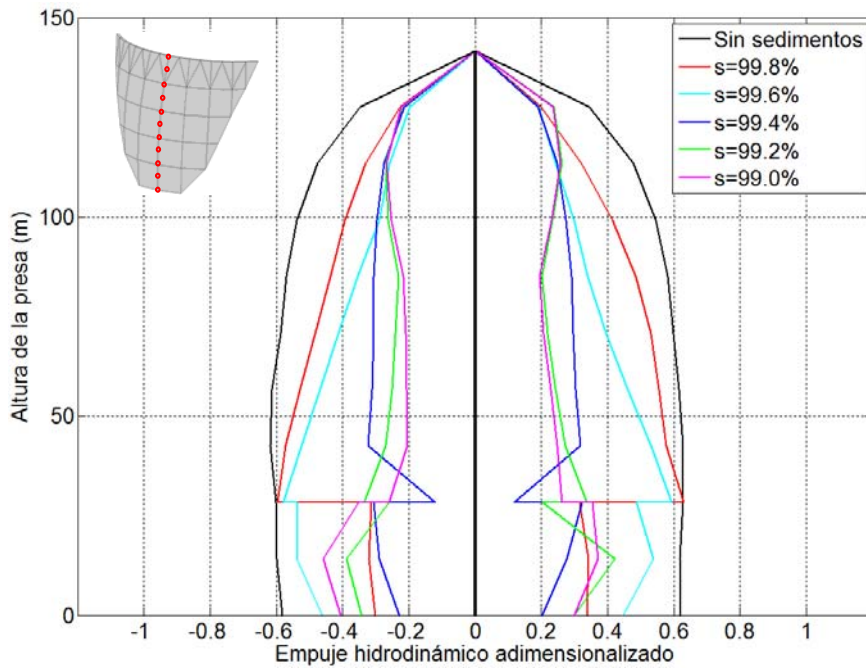
Las figuras 9, 10, 11 y 12 muestran los resultados obtenidos cuando incide una combinación de ondas P y SV con ángulos de incidencia de 90°, 54°, 51° y 30° respectivamente. A diferencia del caso anterior, la curva de 60° se ha reemplazado por las correspondientes a 54° y 51° valores junto por encima y por debajo del ángulo crítico de la onda SV (52.2° para las propiedades del suelo utilizado). Al igual que ocurría en el caso de la onda SH se observa cómo la presencia de sedimentos hace disminuir los empujes hidrodinámicos en relación a la situación en la que no existen sedimentos. Únicamente en puntos situados entre el fondo del embalse y  $2H/3$  de altura para determinadas incidencias (90° y 51°) se rompe esta tendencia. Como ocurre en el caso de la onda SH, hay una tendencia general a que disminuyan los valores del empuje con el grado de saturación. En este caso, se aprecia una mayor sensibilidad de los empujes con el grado de saturación en aquellos casos en las que está presente la contribución de la componente SV (figuras 10, 11 y 12).

Es llamativo ver cómo para el caso en el que el ángulo de incidencia es de 90°, situación en la que los empujes son únicamente debidos a la onda P (figura 9), éstos son del mismo orden que los provocados por la componente anteroposterior (SH) (figuras 6, 7 y 8). Los empujes máximos, tanto en presencia de sedimentos con en ausencia de éstos, en el caso en que la componente transversal (SV) contribuye a la excitación sísmica (figuras 10, 11 y 12), resultan del orden de 3 veces mayores que los correspondientes a los provocados por la componente anteroposterior (SH) (figuras 6, 7 y 8). La incidencia de la combinación de una onda P+SV con un ángulo ligeramente por debajo del crítico (figura 11) es con diferencia la situación que mayores empujes origina. Además, en este caso, las situaciones en las que existen sedimentos con un alto grado de saturación (99.8% y 99.6%) rebasan en la zona más profunda de la presa los empujes de la situación en la que no están presentes los sedimentos. Esto también ocurre

pero en mucha menor medida en el caso de incidencia vertical (figura 9)



**Figura 9.** Empujes hidrodinámicos. Onda P+SV. Incidencia 90°.



**Figura 10.** Empujes hidrodinámicos. Onda P+SV. Incidencia 54°.

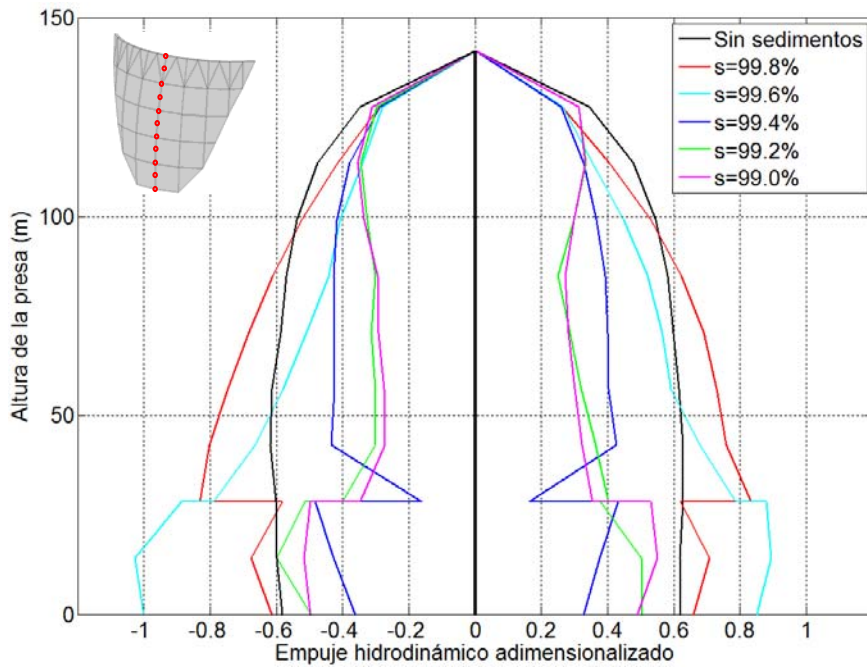


Figura 11. Empujes hidrodinámicos. Onda P+SV. Incidencia 51°.

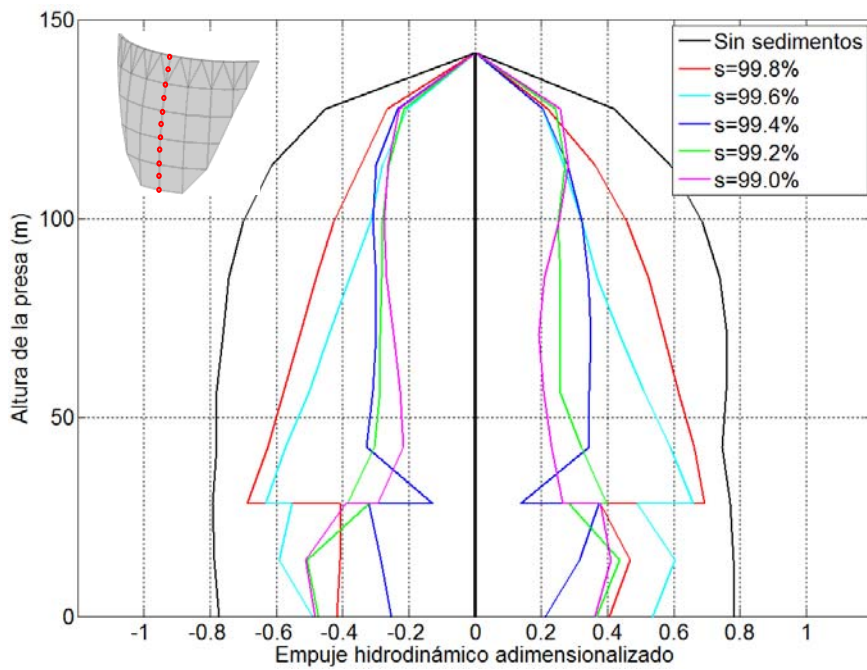


Figura 12. Empujes hidrodinámicos. Onda P+SV. Incidencia 30°.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha presentado un estudio sobre la influencia que el grado de saturación del lecho sedimentario tiene sobre la presión hidrodinámica en la presa en el caso de incidencias de ondas SH o combinaciones de ondas P y SV con diferentes ángulos de incidencia.

Si bien la disminución del grado de saturación del sedimento tiende a provocar menores valores de los empujes no es posible afirmarlo de forma categórica al presentarse algunas excepciones.

En todos los casos se observa como la presencia de sedimentos, independientemente del grado de saturación, provoca empujes menores en el último tercio de altura de la presa. En los dos tercios inferiores esta tendencia se rompe en determinados casos.

Los empujes debidos exclusivamente a la incidencia de una onda P provoca empujes del mismo orden que los provocados por la componente anteroposterior (SH).

Los empujes máximos provocados por la acción simultánea de las componentes transversal y vertical (combinación de ondas SV y P) son considerablemente mayores que los provocados por la componente anteroposterior (SH). Esta conclusión es aplicable con presencia o ausencia de sedimentos en el embalse.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está vinculado al proyecto de investigación BIA2010-21399-C02-01, financiado por la Subdirección General de Proyectos de Investigación (MICINN) y FEDER, así como al proyecto ProID20100224 financiado por la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información (ACIISI) del Gobierno de Canarias y FEDER.

#### REFERENCIAS

- [1] O. Maeso y J. Domínguez, "Earthquake analysis of arch dams I: Dam-foundation interaction". *J. Engrg. Mech., ASCE*, 119(3), 496-512 (1993).
- [2] J. Domínguez y O. Maeso, "Earthquake analysis of arch dams II: Dam-water-foundation interaction". *J. Engrg. Mech., ASCE*, 119(3), 513-530 (1993).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] F. García, F., J. J. Aznárez y O. Maeso, Variabilidad de la Respuesta Sísmica de Presas Bóveda ante Diferentes Combinaciones de Ondas P y S Compatibles con un Espectro de Respuesta. Congress on Numerical Methods in Engineering 2011.

- Coimbra. Portugal. (2011)
- [7] F. García, Comportamiento Dinámico de Medios Poroelásticos en Relación con Problemas de Interacción Suelo-Estructura y Suelo-Agua-Estructura. Las Palmas de Gran Canaria. Tesis doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. (2012)
- [8] 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).
- [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).
- [15] J. J. Aznárez, O. Maeso & J. Domínguez, B.E. Analysis of Bottom Sediments in Dynamic Fluid-Structure Interaction Problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 30, 124-136. (2006).
- [16] CEN. European Committee for Standardization, EN 1998-1:2004:E. Design of structures for Earthquake Resistance (Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings). (2004).