

EFFECTOS HIDRODINAMICOS EN EL ANALISIS SISMICO DE PRESAS BOVEDA

Juan Carlos Mosquera

ETSI Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

RESUMEN: En este artículo se pretende sintetizar el estado actual del conocimiento acerca de la influencia del agua embalsada en la respuesta sísmica de las presas bóveda. En primer lugar se destacan los rasgos fundamentales del fenómeno vibratorio en la masa de agua. Posteriormente se describen sus efectos sobre el comportamiento sísmico de la presa.

INTRODUCCIÓN

La respuesta de una presa sola a una excitación sísmica es la típica de un sistema de varios grados de libertad cuyas matrices de masa, rigidez y amortiguamiento son independientes del contenido de frecuencias de la excitación. En cambio, a causa de la presencia del agua embalsada, tanto las características dinámicas como la respuesta de la presa son distintas a las de la situación de embalse vacío.

Por una parte, el movimiento del terreno origina unos efectos inerciales en la masa de agua, cuya vibración transmite ondas de presión hidrodinámica, las cuales inciden sobre el trasdós de la presa. Por otra, la propia presa, en su vibración produce unas ondas de presión que se transmiten y se propagan por el medio fluido; al reflejarse dichas ondas en los contornos del embalse, pueden volver a incidir sobre la propia presa, cuyo resultado son unas presiones hidrodinámicas que se suman a las anteriores.

En consecuencia, la presencia de la masa de agua da lugar a una interacción presa-embalse, la cual modifica las características de la respuesta dinámica de la presa. El estudio de la importancia y de los efectos de dicha interacción es complejo. Existen diferentes métodos de

abordarlo, en general de forma simplificada y mediante técnicas numéricas.

En cualquier caso, la interacción presa-embalse es una componente de un fenómeno mucho más intrincado, la interacción presa-embalse-terreno, la cual es objeto de múltiples estudios en el momento presente.

RESEÑAS HISTORICAS.

Los primeros estudios en este campo fueron llevados a cabo por H.M. Westergaard. Resolvió el problema bidimensional consistente en el cálculo de las presiones hidrodinámicas sobre el paramento vertical de una presa rígida de sección triangular, sometida a una excitación horizontal armónica del terreno y en la dirección del río. Asimismo, consideró compresible el agua del embalse, cuyo fondo supuso horizontal y de extensión infinita hacia agua arriba (Westergaard, 1933). Westergaard obtuvo una expresión analítica para la distribución de la amplitud de las presiones hidrodinámicas sobre el trasdós; mostró que estas tienen fase opuesta a la aceleración del terreno, por lo que se podían interpretar como unas fuerzas equivalentes de inercia, correspondientes a una cierta masa de agua que acompaña solidariamente a la presa

Artículo recibido el **10 de Enero de 1995** y aceptado para su publicación el **3 de Marzo de 1995**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

en su movimiento de sólido rígido. La evaluación de dicha masa de agua se realiza a partir de la igualación de las fuerzas de inercia de la misma con la fuerza hidrodinámica ejercida sobre el trasdós de la presa, a causa de su movimiento. Esta analogía formó la base del concepto de **masa añadida**.

Con vistas a su utilización práctica, Westergaard aproximó la solución exacta obtenida a una distribución parabólica, la cual consideró mejor que una distribución con forma de cuadrante de elipse. Así, obtuvo unas expresiones simplificadas para determinar tanto la distribución de presiones hidrodinámicas sobre la presa, como la masa ficticia de agua adosada a cada unidad de área del trasdós de la presa en su movimiento. La comparación entre las expresiones simplificadas (que soslayaban la compresibilidad del agua) y las obtenidas analíticamente, arrojó resultados satisfactorios.

Ahora bien, Westergaard consideró que el período (T) predominante en los terremotos ocurridos hasta entonces era mayor de 1 segundo, y que por tanto la altura (h) de las presas existentes en aquella época distaba de la condición de resonancia del embalse: $h \ll 360.T$ (m,sg). Luego dicha solución solamente es válida para condiciones lejanas a la resonancia del dominio fluido.

La formulación de Westergaard se ha modificado (Kuo et al, 1982) para tener en cuenta la curvatura del paramento de agua arriba de la presa, y ha sido ampliamente utilizada en el análisis de numerosas presas bóveda en todo el mundo (Tarbox et al., 1979). Sin embargo, éste procedimiento simplificado prescinde del acoplamiento existente entre la respuesta de una presa flexible y su embalse.

Diversos autores han seguido profundizando en el estudio del problema, en el que incluyeron aspectos tales como el oleaje superficial (Mononobe), la inclinación del trasdós de la presa (Zangar, Napedvaritze), la longitud del embalse (Braatz y Heilbron), e incluso ampliaron el estudio al caso tridimensional (Werner y Sundquist, Kotsubo, Nath y Potamitis, Clough et al., etc).

El análisis de las presiones hidrodinámicas sobre el paramento de agua arriba de una presa bóveda se ha realizado fundamentalmente mediante métodos numéricos (diferencias finitas, elementos de contorno o elementos finitos). Así, Priscu et al (Kuo et al., 1982) emplearon el método de las diferencias finitas para calcular la respuesta del sistema presa-embalse en el dominio del tiempo, bajo la hipótesis de fluido compresible. Resaltaron la importancia de la compresibilidad del agua sobre la respuesta.

W.C. Müller analizó la interacción fluido-estructura con un fluido lineal compresible en el dominio del tiempo. Para los casos en los que no se podría prescindir de la compresibilidad del agua, propuso el empleo de una segunda matriz de masa añadida para abordar el problema de forma simplificada (Müller, 1981).

Asimismo, la implementación numérica de la Transformada rápida de Fourier ha hecho posible, y en algunos casos ventajoso, dicho estudio en el dominio de la frecuencia (Chopra et al.). J.F. Hall (Hall y Chopra, 1980) desarrolló un método numérico para tratar las configuraciones geométricas irregulares de los embalses. Analizó los efectos de la compresibilidad del agua, de la flexibilidad de la presa, de la radiación de energía en un embalse infinito, y del movimiento vertical del terreno.

PRESIONES HIDRODINAMICAS.

Durante un seísmo, la presa y el embalse entran en un estado de vibraciones forzadas que dan lugar a unas presiones hidrodinámicas sobre el paramento de agua arriba de la presa, las cuales se suman a las hidrostáticas. Dichas presiones de origen dinámico son por tanto acciones a considerar para el análisis de la respuesta de una presa a una excitación sísmica. Por ello, cuanto más aproximadamente se determinen aquellas, mejor se podrá estimar esta última.

Como se ha indicado anteriormente, las presiones hidrodinámicas se producen por una parte a causa del movimiento (de sólido rígido) del terreno, y por otra, a causa de la flexibilidad de la presa. Incluso se podrían considerar también las producidas por la deformación del terreno que rodea al embalse, aunque son de escasa importancia.

Los factores que más influyen sobre la magnitud de las presiones hidrodinámicas, son la dirección de la excitación, su contenido de frecuencias, así como el amortiguamiento o absorción parcial de las ondas de presión en los contornos del embalse. Este último hace que, incluso en condiciones de resonancia, no se alcancen valores infinitos de dicha presión sobre la presa. Asimismo, para frecuencias de excitación mayores que la fundamental del embalse, se produce un amortiguamiento por radiación hacia agua arriba de las ondas de presión; por ello, la contribución de los modos superiores de vibración del embalse a las presiones hidrodinámicas y a la respuesta de la presa, suele ser de menor o escasa importancia. Asimismo, si la excitación es vertical, las presiones hidrodinámicas en general son mayores que las producidas por un movimiento horizontal del terreno (Fok y Chopra, 1985).

La geometría del embalse tiene importancia secundaria frente a los tres factores anteriores. Así, se ha comprobado que si la longitud del embalse es superior a tres veces la altura de la presa, las presiones hidrodinámicas prácticamente no varían con respecto a la hipótesis de embalse infinito.

La configuración geométrica del paramento de agua arriba de la presa bóveda también contribuye a que las presiones hidrodinámicas sean menores que las que cabría esperar para un trasdós vertical plano.

Las presiones hidrodinámicas calculadas si no se considera la compresibilidad del agua resultan menores que si se tiene en cuenta, puesto que en este caso también contribuye la componente debida a la flexibilidad de la presa (Mosquera et al, 1993). No obstante, dicha consideración da lugar a que las presiones hidrodinámicas calculadas sean dependientes de la frecuencia, por lo que la dificultad y complejidad del problema se acrecienta. La repercusión de la compresibilidad del agua sobre las presiones hidrodinámicas es importante para una presa de gravedad, mientras que para otras más bien flexibles (presas bóveda), dicha influencia es menor, y en algunos casos puede ser incluso despreciable. La flexibilidad relativa entre la presa sola y su embalse (relación entre frecuencias propias) parece ser el factor que determina el grado de influencia de la compresibilidad del agua. Este es menor cuanto más flexible es la presa.

INTERACCION EMBALSE-PRESA BOVEDA.

La coexistencia de dos medios (la presa y el embalse) en contacto entre sí mediante una interfase, da lugar a que, por ser flexibles, ambos interaccionen.

Esto repercute sobre las presiones hidrodinámicas, pero además sobre las características dinámicas y sobre la respuesta de la presa a una excitación sísmica. En la situación de embalse parcial o totalmente lleno, la respuesta dinámica de la presa viene afectada por unos términos hidrodinámicos, que modifican las propiedades de la presa, mediante la introducción de unas masas, amortiguamientos y fuerzas adicionales. Estos términos hidrodinámicos, y por consiguiente la interacción presa bóveda-embalse, dependen de la frecuencia de excitación, de la dirección de la excitación y de la posible absorción de las ondas de presión en los bordes del embalse.

La interacción fluido-estructura sólo aparece realmente cuando se considera flexible la estructura y en contacto con un fluido compresible. Si la estructura es rígida, este fenómeno no se presenta; si el fluido se considera incompresible, el problema dinámico se reduce al cálculo de unas masas ficticias añadidas a la

estructura, las cuales producen únicamente una variación de las frecuencias propias del sistema. De esta forma, el cálculo dinámico de la respuesta del sistema se puede realizar mediante cualquier procedimiento estándar de análisis dinámico. Si el fluido es compresible, la respuesta de la presa se compone, por una parte, del cambio en los valores de la función de transferencia (respuesta a un impulso armónico unidad), y por la otra, del cambio en las ordenadas del espectro de respuesta, debidos a la variación en los períodos propios de la presa.

La interacción presa-embalse reduce las frecuencias propias de la presa, en particular la fundamental, a un valor inferior al de la frecuencia fundamental del embalse y también al correspondiente a la presa sola. Esta reducción es todavía mayor si se tiene en cuenta la compresibilidad en el cálculo. Afecta en mayor medida a los modos de vibración más bajos y es más relevante para presas bóveda que para las de gravedad.

De diversos estudios llevados a cabo para presas bóveda (Fenves et al, 1989) se ha deducido que, para excitaciones verticales u horizontales en la dirección del río, la interacción embalse-presa bóveda incrementa la respuesta de la misma, sobre todo la contribución de los modos inferiores a la misma. Debido al amortiguamiento que producen los depósitos de los contornos del embalse, no llegan a producirse picos infinitos en la respuesta de la presa; para frecuencias de excitación superiores a la fundamental del embalse, dicho amortiguamiento se incrementa notablemente. Por ello, la contribución de los modos superiores de vibración del sistema apenas resultan alterados por la interacción embalse-presa bóveda. Por otra parte, si el movimiento del terreno es transversal al valle, la respuesta de la presa se ve disminuida (con respecto a la situación de embalse vacío) a causa de la interacción presa-embalse.

Los efectos de la interacción presa-embalse, así como del amortiguamiento que tiene lugar en los contornos del embalse, son más significativos en la respuesta de presas bóveda, en comparación con las de gravedad. Esto se debe a que los términos hidrodinámicos adicionales (masas, amortiguamientos y fuerzas) tienen un mayor efecto en la respuesta dinámica de una presa esbelta que en la de una masiva.

En cuanto a las repercusiones de dicha interacción sobre las tensiones en la presa, diversos estudios (Fok et al, 1985) han concluido que, en una presa bóveda, los movimientos longitudinales o verticales del terreno tienden a cargar la presa según ménsulas, en particular las zonas de base y arranques. Si la excitación es transversal al río, la interacción aumenta las tensiones tanto según arcos (sobre todo los de la zona media-baja) como según ménsulas (en particular las de la zona central).

MÉTODOS NUMÉRICOS DE ANÁLISIS DEL SISTEMA PRESA BÓVEDA-EMBALSE.

Las primeras tentativas de estudio de la respuesta del sistema formado por la presa y el embalse fueron de tipo analítico, ensayos en modelos mecánicos o bien mediante analogía eléctrica. El advenimiento de los ordenadores y el desarrollo de diversos métodos numéricos han hecho posible un avance considerable en el estudio del problema. De esta forma se ha conseguido representar configuraciones geométricas complejas o irregulares.

El método de las diferencias finitas ha sido empleado por algunos autores (Shul'man, Voronkova, Priscu et al.) para el estudio bidimensional del dominio fluido (Westergaard et al. 1933).

El método de los elementos finitos constituye la herramienta más poderosa hasta el momento, para el estudio del comportamiento conjunto de la presa bóveda y del embalse. Ha sido empleado por numerosos autores, algunos de los cuales declaran que es un método efectivo y práctico de representar los efectos del embalse, por lo que no hay razón aparente para continuar adoptando modelos de masas añadidas de tipo Westergaard para el análisis de presas bóveda (Clough et al. 1985). Estos modelos, además de no contemplar el acoplamiento entre la presa y el embalse, sobreestiman en general los valores de las presiones hidrodinámicas calculadas, con relación a un modelo basado en elementos finitos incompresible. Además, pueden dar valores erróneos de las mismas en las zonas contiguas a las laderas. Diversos estudios muestran que los modelos basados en elementos finitos arrojan una mejor aproximación a resultados medidos en diversas presas reales (en cuanto a presiones hidrodinámicas y modos de vibración) (Kuo et al, 1982); (Clough et al, 1985); (Clough y Ghanaat et al., 1987).

En síntesis, existen dos clases de enfoques del estudio mediante elementos finitos. El primero considera al fluido como un sólido degenerado, compresible, con módulo de deformación transversal nulo. Las variables del problema son los movimientos de los nudos. Es un enfoque relativamente simple de implementar, pero conduce a cálculos muy costosos, además de a problemas de singularidad en la matriz de rigidez.

En el segundo tipo de enfoque, las variables son las presiones. Las tensiones cortantes se suponen nulas. La compresibilidad del agua puede ser soslayada o bien tenida en cuenta. Si no se considera, esta formulación conduce a la obtención de la matriz de masa añadida (Fenves et al, 1990). Para modelizar el embalse en toda su longitud se recurre normalmente al empleo de elementos infinitos de fluido, los cuales, bajo la hipótesis de compresibilidad, han de cumplir la condición de radia-

ción. Las funciones de forma utilizadas para estos elementos introducen por lo general simplificaciones excesivas, que pueden conducir a resultados poco aproximados en algunos casos.

Una variante dentro del enfoque mediante elementos finitos consiste en modelizar la presa y la zona contigua del embalse con elementos finitos estándar, mientras que la condición de radiación en el embalse, que solamente se modeliza de forma exacta en el dominio de la frecuencia, se simula de forma aproximada en el dominio del tiempo. Esto se puede conseguir, bien mediante la consideración de contornos transmisores (Kausei et al, 1985), bien mediante la integral de convolución (transformación del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo), o bien mediante la denominada "aproximación a un sistema lineal" (Fenves et al, 1990). Este último procedimiento se basa en la teoría de sistemas lineales, y aproxima la solución en el dominio de la frecuencia mediante un sistema de ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden. Estas se pueden incorporar a un programa de elementos finitos estándar mediante la modificación de las matrices del sistema.

El método de los elementos de contorno, aplicado al dominio fluido, se basa en que sólo interesa conocer la distribución de presiones hidrodinámicas en el trasdós de la presa (la cual se discretiza en elementos finitos), pero no en el interior del fluido (Tsai y Lee et al, 1987). Con dicho método se simula adecuadamente la propagación de las ondas en el fluido, aunque su inclusión dentro de un programa general de elementos finitos es difícil.

Hasta el momento presente, la gran mayoría de estudios sobre el comportamiento del sistema presa bóveda-embalse suponen rígido el terreno, lo que representa una simplificación notable del problema. Algunos estudios tienen en cuenta la flexibilidad del terreno (Fok et al, 1986); (Fok et al, 1985). No obstante, la interacción presa bóveda-embalse-terreno es un fenómeno mucho más complejo, el cual es objeto de numerosas y exhaustivas investigaciones en la actualidad. Asimismo, la mayor parte de los estudios consideran que la excitación es uniforme en todos los puntos del terreno para cada instante de tiempo. Existen investigaciones recientes sobre este aspecto en el ámbito de las presas bóveda (Fenves et al, 1990).

CONSIDERACIONES SOBRE LA COMPRESIBILIDAD DEL AGUA

La compresibilidad del agua constituye el factor que determina la propagación de las ondas de presión hidrodinámica y la aparición de las frecuencias propias

del embalse. Asimismo, contribuye al aumento del valor de las presiones hidrodinámicas actuantes sobre la presa en mayor o menor cuantía, con la consiguiente repercusión en la respuesta sísmica acoplada de la presa. Para algunos autores (Newmark y Rosenblueth, Bustamante et al.) los efectos de la compresibilidad sólo son importantes en presas de gravedad muy altas. No obstante, otros estudios (Fok et al, 1985); (Nath y Potamitis et al. 1987) han determinado que el grado de influencia de la compresibilidad del agua en la respuesta sísmica de la presa bóveda viene dado a través del valor relativo de la frecuencia fundamental del embalse respecto de la correspondiente de la presa sola. Si esta es muy flexible, los efectos de la compresibilidad serán despreciables. Es decir, cuanto más rígida es la presa, mayores son los efectos de la compresibilidad del agua.

Nath y Potamitis (Nath et al, 1983) elaboraron un diagrama que relaciona la rigidez de la presa bóveda con una cierta medida de los efectos de la compresibilidad del agua. Recomiendan utilizarlo para discernir si dicho factor se ha de tener en cuenta o no en el análisis.

Por otra parte, la inclusión de la compresibilidad del agua en el análisis requiere una solución de las ecuaciones del movimiento en el dominio de la frecuencia. En dichas ecuaciones aparecen unos términos de origen hidrodinámico que, debido a la compresibilidad del agua, dependen de la frecuencia de la excitación. No obstante, dicha formulación permite únicamente un planteamiento lineal del problema, por lo que no se pueden incluir en ella ciertos aspectos como la apertura y cierre de juntas, la cavitación o la no linealidad material. Por ello, en ocasiones se recurre a representar, aunque solamente de forma aproximada, los efectos de la compresibilidad en el dominio del tiempo, según se ha citado anteriormente (Weber et al, 1990), con lo que se pueden incorporar los fenómenos no lineales al estudio de la respuesta de la presa.

En numerosos análisis se prescinde de la compresibilidad del agua. Con ello, los términos hidrodinámicos de las ecuaciones del movimiento resultan independientes de la frecuencia, con lo que se suprime el carácter dinámico de las presiones hidrodinámicas, pero permite operar en el dominio del tiempo. La matriz de masas añadidas es el resultado de este tipo de formulación.

En cualquier caso, el efecto de la compresibilidad del agua se ve disminuido en la realidad por la flexibilidad del terreno, y por la propia secuencia de

construcción de la presa. Por el hecho de tener juntas, sus frecuencias naturales serán menores que las calculadas bajo la hipótesis de monolitismo, por lo que la presa no es tan rígida en la realidad. Además, la absorción de las ondas de presión en los contornos del embalse atenúa considerablemente dicho efecto.

Bajo la hipótesis de fluido compresible es de esperar que los desplazamientos calculados de una presa bóveda sean mayores que si se prescinde de la compresibilidad, y mayores a su vez que los de una presa de gravedad. Por lo tanto, es de esperar también que las presiones hidrodinámicas sean menores en las presas bóveda que en las de gravedad; sin embargo, si se considera el comportamiento no lineal del sistema, así como la interacción con el terreno, las conclusiones anteriores podrían diferir (Clough et al, 1985) ; (Fok et al, 1985).

CONCLUSIONES.

Por el hecho de ser flexible la presa bóveda surge el fenómeno de la interacción con el embalse. Luego la presencia del agua embalsada modifica sensiblemente las características dinámicas de la presa y de su respuesta a una excitación dinámica. Este fenómeno es más notorio en presas bóveda que en las de gravedad.

La interacción embalse-presa bóveda flexibiliza la presa, es decir, alarga sus períodos propios (hasta un 35% en algunos casos) y modifica la respuesta, tanto en amplitudes como en contenido de frecuencias, respecto de la situación de presa sola. El grado de modificación en la respuesta depende de la dirección del movimiento del terreno, del contenido de frecuencias de la excitación y, si se tiene en cuenta la compresibilidad del agua, del amortiguamiento que se produce por la absorción de las ondas de presión en el contorno del embalse. Los efectos de la compresibilidad del agua pueden ser soslayados en general para el análisis de presas bóveda flexibles.

REFERENCIAS

- Clough, R.W., Ghanaat, Y., Qiu, X. (1987) Dynamic reservoir interaction with Monticello dam, EERC Report No. 87/21. University of California, Berkeley.
- Clough, R.W., Chang, K., Chen, H., Ghanaat, Y. (1985) Dynamic interaction effects in arch dams, EERC Report No. 85/11. University of California, Berkeley.

- Fenves, G., Mojtahedi, S., Reimer, R. (1989) ADAP-88: A computer program for earthquake analysis of concrete arch dams, EERC Report No. 89/12. University of California, Berkeley.
- Fok, K.L., Chopra, A.K. (1986) *Frequency response functions for arch dams: hydrodynamic and foundation flexibility effects*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol 14, pp 769-795.
- Fok, K.L., Chopra, A.K. (1985) Earthquake analysis and response of concrete arch dams. EERC Report No. 85/07. University of California, Berkeley.
- Hall, J.F., Chopra, A.K. (1980) Dynamic response of embankment, concrete-gravity and arch dams including hydrodynamic interaction. EERC Report No. 80/39, University of California, Berkeley.
- Kausel, E. (1988) *Local transmitting boundaries*, Journal of Engineering (ASCE), vol 114, pp 1011-1027.
- Kuo, J.S. (1982) Fluid-Structure interactions: added mass computations for incompressible fluid, EERC Report No. 82/09. University of California, Berkeley.
- Shul'man, S.G. (1987) Seismic pressure of water on hydraulic structures, Ed. Balkema.
- Tarbo, G.S., Dreher, K.J., Carpenter, L.R. (1979) *Seismic analysis of concrete dams*. ICOLD 13th Congress, New Delhi, pp. 963-993.
- Tsai, C.S., Lee, G.C. (1987) *Arch dam-fluid interactions: by FEM-BEM and substructure concept*, International Journal for Numerical methods in Engineering, Vol 24, pp 2367-2388.
- Weber, B. (1990) *Fluid-structure interactions for arch dams*, Structural dynamics, pp 851-858. Krätzig et al. (ed.), Ed. Balkema.
- Mosquera, J.C. (1993) Comportamiento sísmico de presas bóveda. Influencia de algunos parámetros geométricos. Tesis Doctoral. UPM. Madrid.
- Müller, W.C. (1981) *Simplified analysis of linear fluid-structure interaction*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol 17, pp 113-121.
- Nath, B., Potamitis, H. (1983) *Coupled dynamic behaviour of realistic arch dams including hydrodynamic and foundation interaction*, Proceedings of the Institute of Civil Engineers, part 2, pp 583-603, Sept.
- Westergaard, H.M. (1933) *Water pressures on dams during earthquakes*, Transactions ASCE, Paper No. 1835, pp. 418-433.
- Zhang, L., Chopra, A.K. (1991) Computation of spatially varying ground motion and foundation-rock impedance matrices for seismic analysis of arch dams, EERC Report No. 91/06, University of California, Berkeley.