

Simulación del acoplamiento dinámico en sistemas represa-embalse utilizando elementos finitos acústicos

Rivero, Rodrigo¹

Departamento de Investigación, Universidad Nacional de Itapúa,
Encarnación, Paraguay.

Resumen

Elementos finitos acústicos son utilizados para la simular las ondas hidrodinámicas que se propagan en el embalse de una represa durante un evento de sollicitación dinámica. Para estudiar su aplicabilidad, 3 casos de estudio fueron considerados: la sección principal de la represa Itaipú (de gravedad), Lumiei (de arco) y Pertusillo (de arco-gravedad). Después de ser validado con problemas de literatura, el método fue aplicado a los casos de estudio, removiendo las condiciones restrictivas y evaluando sus efectos. La disipación de energía viscosa resultó necesaria para evitar fenómenos de batimiento de las ondas acústicas. La absorción de energía por los sedimentos del lecho del embalse es de importancia y debe ser considerada. El nivel del embalse modifica el periodo del sistema acoplado y las amplificaciones para frecuencias elevadas. Las oscilaciones en dirección vertical tienen efectos de importancia despreciable para las presas curvas. La compresibilidad del agua y la deformabilidad de la presa son los factores clave, ya que permiten el acoplamiento completo y la amplificación dinámica, respectivamente. El método propuesto concuerda con las soluciones adoptadas en la práctica profesional, dentro del rango en el cual éstas son válidas, y mejorando su precisión fuera de éste, con un coste computacional razonable.

Palabras clave: Represas, acoplamiento dinámico, acústica, contorno, amplificación

¹ Dr. en Ingeniería Civil, Profesor Investigador de la UNI, rodrigo.m.rivero13@gmail.com
Recibido: 29/10/2019 Aceptado: 7/11/2019

Abstract

Acoustic finite elements are used to simulate the propagation of hydrodynamic waves within the reservoir of a dam during a dynamic event. To study their feasibility, 3 study cases were taken: the main section of the Itaipú dam (gravity dam), Lumiei (arch dam) and Pertusillo (arch-gravity dam). After being validated with known problems from literature, the method was applied to the study cases, removing the constrictive contour conditions and assessing their effects. Viscous damping turned out to be necessary to avoid acoustic beating phenomenon. Energy absorption from the sediments in the bottom of the reservoir is important and should be considered. Water level modifies the period of the coupled system and high frequencies amplification. Vertical vibrations have negligible effects in curved dams. Water compressibility and dam flexibility are the most important factors, as they allow the full complement and dynamic amplification, respectively. The proposed method agrees with solutions commonly adopted in professional practice, within the range where they are valid, improving the precision outside of it, with a reasonable computational cost.

Keywords: Dams, dynamic coupling, acoustics, contour conditions, amplification

1. Introducción

Las presas poseen un rol de importancia estratégica en la sociedad, debido a sus numerosas aplicaciones; regulación de caudales para el control de inundaciones, regadío extensivo de plantaciones, potabilización de agua para el consumo y generación de energía hidroeléctrica. En el mundo existen actualmente más de 58.000 presas en funcionamiento, de acuerdo con los datos recogidos por la Comisión Internacional de Grandes Presas, ICOLD[1]. La mayor parte de ellas fueron construidas en el siglo pasado, entre las décadas de 1920 y 1980, utilizando guías prácticas y métodos simplificados de diseño acordes a los conocimientos estructurales de la época. Dadas las condiciones severas de operación, tanto los diques principales como sus instalaciones complementarias se encuentran sometidas a un proceso de deterioro estructural que debe ser debidamente evaluado.

El monitoreo estructural es un grupo de técnicas que utilizan información proveída por diversos sensores instalados en las estructuras civiles (deflectómetros, extensómetros, termómetros, etc.), como datos de entrada en modelos de cálculo previamente calibrados. A estos se aplican técnicas estadísticas que permiten detectar fenómenos puntuales y estimar grados de deterioro diferenciales en las represas. Lógicamente, este procedimiento requiere contar con un modelo numérico optimizado desde el punto de vista de la relación precisión/costo computacional.

1.1 Descripción del problema

Existe un amplio espectro de fenómenos físicos, químicos y biológicos a los que se halla expuesta una presa a lo largo de su vida útil. Estos deben ser estudiados en profundidad en relación a sus efectos sobre el comportamiento de la estructura, con el objetivo de obtener resultados acordes a la realidad y realizar predicciones confiables. En particular, la presente investigación tiene por objetivo desarrollar un procedimiento eficiente y preciso para la

simulación del acoplamiento dinámico entre una presa y su embalse, el cual constituye uno de los mecanismos más importantes a nivel macroestructural.

Un dique puede vibrar por un número elevado de factores; movimientos sísmicos, explosiones, ensayos dinámicos de caracterización, olas generadas por inundaciones o vientos, deslizamientos de tierra sobre el embalse, choques, efectos locales de sumideros o compuertas, entre otros. Cuando ello ocurre, el movimiento de la estructura genera ondas de presión hidrodinámica en el embalse, que al propagarse en el fluido, se reflejan en el mismo e influyen a su vez las deformaciones de la presa. A estos dos mecanismos se agrega el de las deformaciones de la roca de fundación, que intercambia energía con ambos. En consecuencia, se tiene un proceso cerrado de tipo interactivo, que se resuelve considerando al mismo tiempo los tres componentes como partes de un sistema dinámicamente acoplado.

1.2 Estado del arte

Westergaard [2] llevó a cabo la primera investigación de interés en 1933, en ocasión del proyecto de la presa Hoover de los EE.UU. Consideró la sección plana de una presa de gravedad, de material elástico lineal, con fundación rígida y fluido compresible, irrotacional y de viscosidad nula. Encontró soluciones en forma cerrada de la distribución de presiones sobre la cara de la estructura para una aceleración horizontal armónica de periodo superior a 1 s, la frecuencia de resonancia del embalse y una función aproximada de las presiones hidrodinámicas de forma parabólica. Brindó una interpretación física denominada “de masas agregadas”, según la cual las fuerzas hidrodinámicas ejercidas por el embalse sobre la estructura pueden ser consideradas como una masa que se agrega a la misma, sin modificar su rigidez, aumentando en consecuencia su periodo natural. Esto es posible debido a que las presiones resultan estar en fase con la aceleración impuesta. En el mismo año, von Karman [3] simplificó

notablemente la formulación del problema, utilizando la hipótesis de fluido incompresible. Las presiones obtenidas, a diferencia de las de Westergaard, resultaron ser independientes de la frecuencia de oscilación de la estructura. En 1952, Zangar [4] desarrolló un modelo eléctrico, análogo al de la presa y su embalse. A la hipótesis de fluido incompresible de von Karman, añadió la inclinación variable respecto a la vertical de la cara aguas arriba, obteniendo presiones pseudo-parabólicas, inversamente proporcionales a la inclinación de la estructura. En 1957, Housner [5] determinó las presiones hidrodinámicas en contenedores circulares y rectangulares, extendiendo sus resultados para presas de gravedad de paramento inclinado. Utilizando un método de análisis en membranas, llegó a resultados similares a los de Zangar. En 1967, Chopra [6] y sus colaboradores desarrollaron un método matricial llamado “de las subestructuras”, con el cual consiguieron remover las condiciones de contorno más restrictivas. La primera novedad importante fue la ampliación del rango de frecuencias de oscilación, de acuerdo con el avance de la teoría de movimientos sísmicos. Demostraron que la solución de Westergaard no es válida para una frecuencia superior a la de resonancia del reservorio. La respuesta hidrodinámica se encuentra fuera de fase respecto al componente inercial, por lo cual el concepto de masas agregadas pierde sentido. Al estar formulado en el dominio de las frecuencias, el método permite encontrar la respuesta del sistema acoplado a una aceleración arbitraria en el dominio del tiempo, a través de una integral de convolución de la transformada de Fourier de las funciones complejas de respuesta unitaria. En las décadas siguientes, los investigadores expandieron el procedimiento de cálculo, introduciendo la deformabilidad de la presa [7], la absorción de energía por los sedimentos en el lecho del embalse [8], la variación espacial de los movimientos del suelo [9] y la radiación de energía a través de la fundación [10], considerada como un continuo semiinfinito. Si bien el método de las subestructuras permite evaluar diferentes

fenómenos simultáneos de manera eficiente, su aplicación se limita a mecanismos lineares, lo cual impide la inclusión de importantes componentes no lineares como el agrietamiento del hormigón, la cavitación o las aperturas y deslizamiento de juntas de dilatación.

Por este motivo, numerosas investigaciones con métodos numéricos han sido conducidos en los últimos años. El primer grupo de ellos emplea los elementos finitos denominados Lagrangianos, con 3 grados de libertad espaciales, para la simulación del embalse [11][12]. Su ventaja principal consiste en que cualquier software de elementos finitos genérico puede ser adaptado para utilizarlos, definiendo un material con módulo de esfuerzo cortante nulo. Sin embargo, esto origina modos de vibrar con deformaciones de energía nula, más una tendencia a inestabilidad numérica del tipo *hour-glass* que aumentan con la finura de la malla de cálculo [13]. Estos factores resultan contraproducentes para la extracción de las frecuencias naturales del sistema acoplado y la propagación de ondas hidrodinámicas, respectivamente. El segundo grupo de los procedimientos numéricos utiliza elementos finitos Eulerianos, introducidos por Gladwell [14] en 1965. Poseen 1 solo grado de libertad (el escalar presión). De acuerdo con Craggs [15], el orden de las matrices del sistema se reduce en dos tercios para una precisión equivalente. La mayor parte de las investigaciones disponibles en literatura pertenecen a este último grupo [16][17].

Se revisaron normativas internacionales de cálculo y operación de presas con el fin de conocer las soluciones utilizadas a nivel mundial. La normativa italiana [18] adopta las ecuaciones de Zangar, mientras la de la Confederación Suiza [19] recomienda la utilización de las ecuaciones de Westergaard. La regulación del Estado del Japón [20] no registra indicación alguna respecto al fenómeno. Las normativas norteamericanas, articuladas en diferentes documentos que se complementan entre sí, contemplan tres métodos, el

de Westergaard y dos de elementos finitos (compresibles e incompresibles).

2 Materiales y métodos

2.1 Casos de estudio

La presente investigación pretende profundizar en los aspectos críticos de la simulación del fenómeno en estudio. Para ello, 3 casos de estudio han sido seleccionados:

- La sección principal de la represa Itaipú, ubicada sobre el río Paraná, entre Brasil y Paraguay. Su geometría se extrajo de la publicación realizada por Souza [21]. Posee una altura nominal de 185 m.
- La presa Lumiei, en el distrito de Udine, al norte de la república Italiana, con una altura de 131 m.
- El dique Pertusillo, ubicado en la región de Potenza, al sur del mismo país. Su altura es de 103 m.

Los tres corresponden a tipologías estructurales diferentes; de gravedad, de arco y de arco-gravedad, respectivamente. Los modelos geométricos mostrados en la Figura 1 fueron construidos partiendo de la documentación disponible. Los modelos numéricos fueron desarrollados a partir de estos, optimizando los puntos singulares para aumentar la eficiencia de las simulaciones.

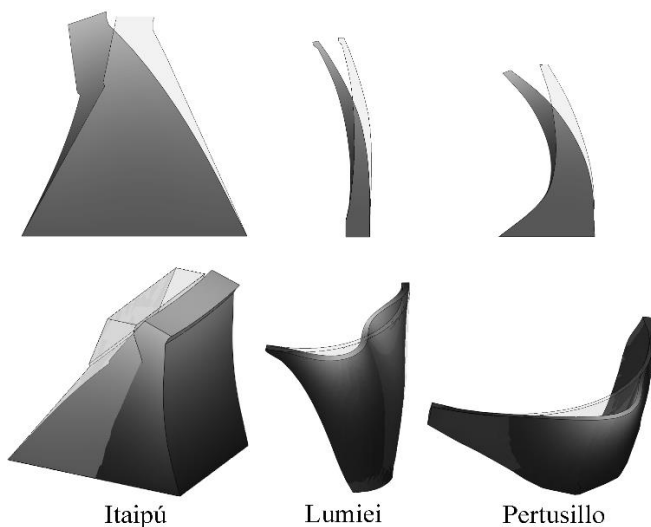


Figura 1- Casos de Estudio
Fuente: Elaboración propia

Estudios de convergencia de la malla de cálculo fueron realizados según lo recomendado por la normativa norteamericana USACE [22]. Elementos finitos tetraédricos fueron utilizados tanto para las estructuras como para los dominios fluidos.

2.2 Elementos finitos acústicos

El acoplamiento dinámico se plantea como un problema acústico estructural. La ecuación de equilibrio para un fluido compresible, en la hipótesis de pequeñas variaciones de presión se define [23]:

$$\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{x}} + \gamma_d(\mathbf{x}, \psi_i) \dot{\mathbf{u}} + \rho(\mathbf{x}, \psi_i) \ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{0}$$

con la ecuación constitutiva:

$$\mathbf{P} = k(\mathbf{x}, \psi_i) \frac{d\mathbf{u}}{d\mathbf{x}}$$

donde \mathbf{P} es la presión del medio fluido, \mathbf{x} la posición espacial de la partícula fluida, $\dot{\mathbf{u}}$ su velocidad, $\ddot{\mathbf{u}}$ su aceleración, ρ la densidad del fluido, γ_d la función de pérdidas de energía por viscosidad y ψ_i una variable que permite considerar características eventuales del medio como ser salinidad, temperatura, etc. Para el dominio del embalse, se define la condición de Sommerfield [24] tanto para su límite aguas arriba (simulando un reservorio infinito) como para su lecho (introduciendo la absorción de energía por los sedimentos allí depositados). La impedancia acústica está gobernada por:

$$u_{sal} = \frac{1}{k_1} \dot{P} + \frac{1}{c_1} P$$

donde u_{sal} es la velocidad de la partícula en la dirección normal saliente de la superficie del medio acústico, \dot{P} la tasa de cambio de la presión, k_1 el coeficiente de proporcionalidad entre la presión y el desplazamiento normal a la superficie y c_1 el coeficiente de proporcionalidad entre la presión y la velocidad normal a la superficie. Las demás condiciones de contorno están son:

- Presión nula en la superficie libre del fluido.
- Acoplamiento dinámico en la interfaz agua-presa. Se simula mediante un par de

superficies master-slave, cuyos grados de libertad se encuentran entrelazados a través de:

$$\mathbf{n}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{n} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \mathbf{x}}$$

siendo \mathbf{n} el versor normal a la superficie de la estructura.

Las simulaciones realizadas en el presente trabajo son del tipo lineal, resolviéndose las ecuaciones de movimiento mediante una integración implícita al paso, a través del método de Hilbert-Hughes-Taylor [25]. Se consideran oscilaciones de tipo armónico de frecuencia variable, imponiéndolas a la estructura y registrando las respuestas máximas. Esto permite estimar la influencia relativa de los parámetros que influyen en el comportamiento estructural.

3 Resultados

En primera instancia, se procedió a validar el método numérico descrito en el párrafo anterior, utilizando un modelo plano de una presa de gravedad ideal de 1 m de alto. La presa y el terreno se consideraron rígidos, y la profundidad del embalse H_e igual a la altura de la estructura H , es decir, lleno. Se estudió la respuesta del sistema a un movimiento armónico con una aceleración de $0,1g = 0.981 \text{ m/s}^2$ y período $T = 1 \text{ s}$. Se observó que las presiones son máximas para los instantes $t = 0, T, 2T, \dots$ y se encuentran en fase con la oscilación. En la Figura 2 se reporta la distribución de las presiones hidrodinámicas sobre la cara de la presa, normalizadas respecto al empuje hidrostático. Las teorías de Chopra y Westergaard coinciden exactamente y sus respuestas se hallan superpuestas. Las variaciones respecto a ellas de la distribución de Zangar se deben a la hipótesis de incompresibilidad del fluido, que implica una distribución invariable respecto a la frecuencia de oscilación. Los resultados de la simulación son próximos a los previstos por Westergaard, y se consideran dentro del margen de precisión numérica aceptable. El aumento de la presión al pie de la presa es del orden del 10%, mientras que el del empuje resultante (calculado como la integral de la

presiones sobre la cara de la presa) es del orden del 12%. Se verificó además que la frecuencia de resonancia del embalse se ajusta a lo previsto por la teoría $f_r = 4H/c$, donde c es la velocidad del sonido en el agua, aproximadamente 1.440 m/s en la presente investigación.

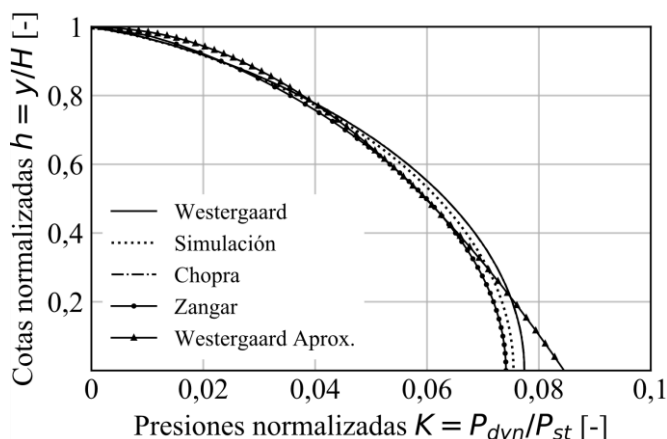


Figura 2 - Distribución de presiones en presa ideal
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se realizaron simulaciones para frecuencias variables de oscilación, conocidas en conjunto como análisis de barrido de frecuencias. Se constató que la solución de Westergaard es válida sólo para el rango $f < f_r$. La teoría de Chopra permite superar esta limitación. Se encontró que los resultados de la simulación se encuentran de acuerdo con los obtenidos por el autor, para el rango completo de frecuencias. En particular, la respuesta resulta ilimitada para $f = f_r$, debido a la ausencia de mecanismos de disipación de energía. Existen además amplificaciones menores para $f = 3f_r, 5f_r, \dots$. Mediante análisis paramétricos se concluyó que la longitud del embalse debe ser igual o superior a tres veces la altura de la presa, de tal manera a evitar efectos de resonancia locales en el dominio del tiempo.

A continuación se describen los efectos de las condiciones de contorno analizadas en la presente investigación.

3.1 Rigidez de la estructura

Constituye la hipótesis más restrictiva de todas. Se establece con el fin de simplificar las ecuaciones del problema, al permitir igualar los vectores de

aceleración y velocidad de todos los puntos de la presa. Sin embargo, no obstante las estructuras en estudio posean elevada rigidez, su comportamiento dista mucho del perfectamente rígido. El primer modo de vibrar de cada presa (sin embalse) se muestra en la Figura 1. El mecanismo principal es claramente el de ménsula, siendo Lumiei la más flexible de las tres (con frecuencia fundamental $f_s = 0,663$ Hz), Itaipú la más rígida ($f_s = 3,167$ Hz) y Pertusillo la intermedia ($f_s = 2,102$ Hz).

Una vez introducida la deformabilidad de la presa, se encontró que los picos de presión se dan para frecuencias menores a f_r . Esto implica que el periodo fundamental del sistema acoplado deformable es superior al del embalse. Comparando este resultado con el del sistema rígido, se entiende que la rigidez de la estructura impide en realidad el acoplamiento entre la presa y el embalse, originando respuestas no realistas.

Estudiando la distribución de presiones en el dominio del tiempo, se advirtió que el fenómeno en realidad es más complejo. La distribución de presiones ya no es de tipo parabólico para cualquier frecuencia de oscilación. En la Figura 3 se observa que es posible obtener presiones negativas para cotas superiores. Además se observó que puntos cercanos a la superficie libre del fluido pueden ejercer mayor presión sobre la presa que los situados por debajo de ellos, en total desacuerdo con los resultados clásicos.

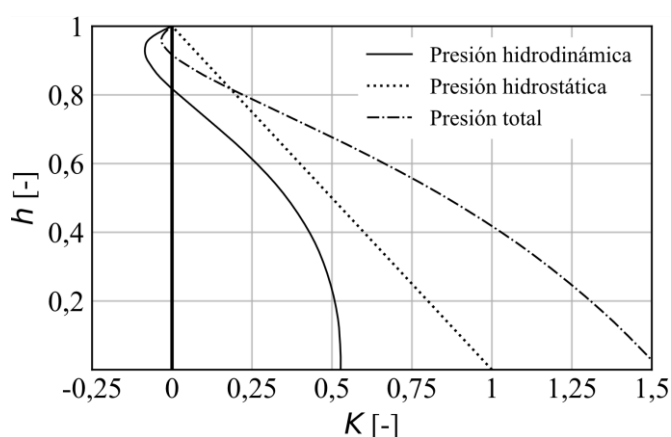


Figura 3 - Distribución de presiones para $f=f_r$
Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, no solo es equivocado considerar un efecto inercial constante del embalse sobre la presa, como sugiere Zangar, sino que la distribución parabólica utilizada en las normativas italianas, suizas y japonesas tampoco se encuentra del lado de la seguridad. Esto significa que para describir el aumento de solicitaciones sobre la estructura no es suficiente evaluar la amplificación de la presión al pie de la misma. Se hace necesaria la introducción de un valor más significativo, que tenga en cuenta la distribución completa de las presiones sobre la sección. Se selecciona la resultante de las mismas, el empuje hidrodinámico normalizado S . En la Figura 4 se aprecian la amplificación de S para diferentes frecuencias de oscilación, normalizadas respecto a la frecuencia natural de cada caso de estudio.

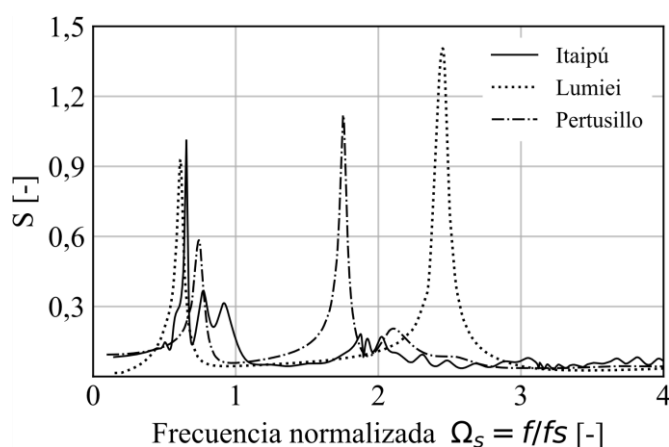


Figura 4 - Empuje hidrodinámico en presas deformables

Fuente: Elaboración propia

3.2 Disipación de energía

La ausencia de disipación de energía resulta particularmente problemática en las simulaciones numéricas. Se introducen aquí dos mecanismos. El primero corresponde a una disipación viscosa, fijada en un 5 % del valor crítico de amortiguamiento, siendo este un valor establecido convencionalmente para estructuras civiles. Su formulación es la clásica de Rayleigh, proporcional a la masa y a la rigidez de la estructura. Para el problema en estudio, su introducción es fundamental, ya que permite evitar fenómenos

teóricos de acoplamiento (batimiento) que no se verifican en la realidad. El segundo mecanismo es el de absorción de energía por los sedimentos del lecho del embalse. Se simula a través de una impedancia acústica, que depende de un coeficiente de disipación α_r que indica la proporción de la energía incidente que retorna al embalse por reflexión. Su valor, medido experimentalmente [26], oscila entre 0,5 y 0,75.

3.3 Profundidad del embalse

Se consideran 3 situaciones en este estudio: Embalse totalmente lleno ($H_e=H$) asociado a un evento de crecida por encima del nivel de operación normal, embalse mínimo asociado al caudal ecológico usual ($H_e=0,65H$) y un nivel intermedio ($H_e=0,85H$).

En general, el periodo del sistema acoplado aumenta con el nivel del agua, debido a una cantidad mayor de masa en el sistema, para una misma rigidez. Por otra parte, las amplificaciones en frecuencias altas aumentan para valores de llenado intermedio. En los tres casos, las amplificaciones para el primer pico permanecen o disminuyen respecto a la presa llena.

3.4 Dirección de oscilación

Si bien normalmente las vibraciones más importantes se desarrollan de manera perpendicular a la sección maestra de la presa, existen aceleraciones verticales provocadas por estas. Se encontró que las aceleraciones verticales son más importantes en el caso de la Presa Itaipú, al tener esta una mayor superficie expuesta a la presión en el sentido del movimiento, debido a su mayor inclinación. Para las presas curvas, las presiones generadas son inferiores en un orden de magnitud a las del caso de oscilación horizontal.

3.5 Modelos tridimensionales

Se construyeron modelos tridimensionales de los casos de estudio, respetando las geometrías de los embalses para el caso de las presas curvas. A través de un proceso análogo al seguido para los modelos planos, se estudió la convergencia de las mallas de

cálculo, la influencia de la ubicación y los tipos de elementos utilizados. En la Figura 1 se muestra el primer modo de vibrar de cada presa vacía. La presa Itaipú mantiene el mecanismo de ménsula del modelo bidimensional, lo cual confirma que es posible estudiar su comportamiento a través de un modelo plano. Lumiei, por otro lado, pasa de ser la presa más flexible a ser la más rígida. Presenta un modo antisimétrico respecto a la sección principal en la cresta. Esto es particularmente interesante para vibraciones transversales, en el sentido tangencial a los arcos horizontales. Por su parte, Pertusillo también aumenta su rigidez considerablemente y presenta un modo simétrico en el sentido radial, propio de una estructura biempotrada de elevada flexibilidad.

Si las presas se consideran rígidas, el mecanismo principal es similar al caso bidimensional, pero con ciertas diferencias debidas a la geometría del dominio acústico. Por otra parte, si se consideran flexibles, las amplificaciones son ligeramente superiores respecto al caso bidimensional, eliminándose los picos correspondientes a valores altos de f . Esto significa que es el primer modo del sistema acoplado el que se activa con más eficacia. En el caso de las presas curvas, existen tres mecanismos combinados, de ménsula, de arco y elástico diagonal que sólo pueden ser simulados en modelos tridimensionales, por lo que su uso se vuelve obligatorio en caso de evaluar tensiones, mecanismos de falla, etc.

3.6 Comparación con métodos clásicos

Se realizó una comparación con el método de masas agregadas comunmente utilizado en la práctica profesional. Este consiste en agregar masas puntuales a la estructura calculadas según la teoría de Westergaard.

Se halló que en general, el método clásico se encuentra del lado de la seguridad, sobreestimando los empujes hidrodinámicos. Las amplificaciones son similares para las frecuencias inferiores a f_r , pero divergen para valores superiores. Esto se debe a que las masas se calculan mediante el modelo de

Westergaard, que se limita al rango citado. Por lo tanto, para frecuencias mayores el método pierde precisión y si bien, para estimaciones rápidas es un procedimiento útil, debe ser siempre respaldado por algún método numérico más detallado como el propuesto en la presente investigación.

4 Conclusiones

La presente investigación describe la utilización de elementos finitos acústicos para la modelación del comportamiento dinámico del embalse de una represa. Con el fin de revisar la aplicabilidad del método, 3 casos de estudio fueron tomados: Itaipú (de gravedad), Lumiei (de arco) y Pertusillo (de arcp-gravedad). En primera instancia, se validó el procedimiento resolviendo problemas conocidos de literatura, con hipótesis restrictivas. En una etapa posterior, se procedió a remover las restricciones una por una, con el fin de evaluar sus efectos sobre el comportamiento estructural.

En particular, resulta evidente la necesidad de introducir modelos tridimensionales para presas curvas, debido a que el comportamiento de las mismas es fuertemente dependiente de mecanismos que actúan en el espacio. El efecto de la absorción de energía en el fondo del embalse es otra característica importante, ya que reduce notablemente las presiones sobre la estructura. Si bien su valor es difícil de determinar, parece ser suficiente con considerar un valor intermedio de impedancia acústica. Se analizó además el efecto de dos condiciones comúnmente ignoradas, la profundidad relativa del embalse y la dirección de la oscilación impuesta a la estructura. La primera resultó ser de una mediana importancia, ya que modifica los periodos del sistema acoplado e induce variaciones importantes en la amplificación del empuje hidrodinámico. La segunda es influyente solo para el caso de la presa de gravedad, pudiendo ser ignorada para las presas curvas.

Adicionalmente, otros factores fueron analizados, relacionados con la simulación numérica del fenómeno en estudio. Se encontró que el batimiento de las ondas acústicas ocurre cuando no se considera ningún mecanismo de disipación de

energía. Finalmente, se concluye que el método propuesto concuerda con las soluciones normalmente adoptadas en la práctica profesional, dentro del rango en el cual éstas son válidas, y mejorando su precisión fuera de éste, con un coste computacional razonable

5 Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Itapúa por proveer el financiamiento necesario para la investigación, y al *Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti* de la República Italiana por proveer la documentación para dos casos de estudio.

Referencias

- [1] International Commission on Large Dams - ICOLD, "General Synthesis Number of Dams by Country Members." 2019.
- [2] H. M. Westergaard, "Water pressures on dams during earthquakes," *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 98, pp. 418–433, 1933.
- [3] T. Von Kármán, "Discussion of water pressures on dams during earthquakes," *Trans. Am. Soc. Civ. Eng. - ASCE*, vol. 98, pp. 434–436, 1933.
- [4] C. N. Zangar, "Hydrodynamic pressures on dams due to horizontal earthquake effects," *Technical Information Office*, no. 11, 1952.
- [5] G. W. Housner, "Dynamic pressures on accelerated fluid containers," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 47, no. 1, pp. 15–35, 1957.
- [6] A. K. Chopra, "Hydrodynamic pressures on dams during earthquakes," *J. Eng. Mech. Div.*, vol. 93, no. 6, pp. 205–224, 1967.
- [7] A. K. Chopra, "Earthquake behavior of reservoir-dam systems," *J. Eng. Mech. Div.*, vol. 94, no. 6, pp. 1475–1500, 1968.
- [8] G. Fenves and A. K. Chopra, "Effects of reservoir bottom absorption on earthquake response of concrete gravity dams," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 11, no. 6, pp. 809–829, 1983.
- [9] L. Zhang and A. K. Chopra, "Computation of spatially varying ground motion and foundation-rock impedance matrices for seismic analysis of arch dams," no. 91, 1991.

- [10] H. Tan and A. K. Chopra, "Dam-foundation rock interaction effects in earthquake response of arch dams," *J. Struct. Eng.*, vol. 122, no. 5, pp. 528–538, 1996.
- [11] Y. Calayir and A. A. Dumanoglu, "Static and dynamic analysis of fluid and fluid-structure systems by the Lagrangian method," *Comput. Struct.*, vol. 49, no. 4, pp. 625–632, 1993.
- [12] M. Akköse, S. Adanur, A. Bayraktar, and A. A. Dumanoglu, "Elasto-plastic earthquake response of arch dams including fluid-structure interaction by the Lagrangian approach," *Appl. Math. Model.*, vol. 32, no. 11, pp. 2396–2412, 2008.
- [13] Y. Calayir, A. A. Dumanoglu, and A. Bayraktar, "Earthquake analysis of gravity dam-reservoir systems using the Eulerian and Lagrangian approaches," *Comput. Struct.*, vol. 59, no. 5, pp. 877–890, 1996.
- [14] G. M. L. Gladwell and G. Zimmermann, "On energy and complementary energy formulations of acoustic and structural vibration problems," *J. Sound Vib.*, vol. 3, no. 3, pp. 233–241, 1966.
- [15] A. Craggs, "The transient response of a coupled plate-acoustic system using plate and acoustic finite elements," *J. Sound Vib.*, vol. 15, no. 4, pp. 509–528, 1971.
- [16] M. A. Hariri-ardebili, H. Mirzabozorg, and M. R. Kianoush, "Seismic analysis of high arch dams considering contraction-peripheral joints coupled effects," *Open Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 549–564, 2013.
- [17] L. Design, M. Alembagheri, and M. Ghaemian, "Seismic performance evaluation of a jointed arch dam," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 256–274, 2017.
- [18] delle I. e dei T. Ministero, *Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse).*, vol. 1. 2014, p. 156.
- [19] B. Bwg, S. Wasser, R. De, R. Ufag, and S. Acque, "Documentation de base pour la vérification des ouvrages d'accumulation aux séismes," vol. 2, no. Mars, 2003.
- [20] Ministry of Construction, "The River Law n. 167 – Legal Framework for River and Water Management in Japan," *River Bur.*, no. 4, 1964.
- [21] V. M. de Souza Lima, J. F. A. Silveira, and J. C. Degaspere, "Horizontal and vertical displacements of the itaipu dam: a study on field measurements and theoretical predictions," *Proceedings*, 1985.
- [22] USACE, "Time-history dynamic analysis of concrete hydraulic structures," no. EM 1110-2-6051, p. 401, 2003.
- [23] Dassault Systèmes Simulia Corporation, "Coupled fluid-structural medium analysis," *Abaqus Theory Man.*, p. 2.9.1.
- [24] Hibbett, Karlsson, and Sorensen, *ABAQUS/standard: User's Manual*, vol. 1. Hibbett, Karlsson & Sorensen, 1998.
- [25] H. M. Hilber, T. J. R. Hughes, and R. L. Taylor, "Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 5, no. 3, pp. 283–292, 1977.
- [26] Y. Ghanaat and B. B. Redpath, *Measurements of Reservoir-bottom Reflection Coefficient at Seven Concrete Damsites*. Quest Structures, 1995.