

ANÁLISIS NUMÉRICO DE ASENTAMIENTOS PERMANENTES EN PRESAS DE ESCOLLERA SOMETIDAS A DIFERENTES AMBIENTES SÍSMICOS

NUMERICAL ANALYSIS OF ROCKFILL DAMS PERMANENT SETTLEMENT SUBJECTED TO DIFFERENT SEISMIC ENVIRONMENTS

Leonardo J. Cocco^a, Adriano Trono^a, y Federico Pinto^{a,b}

^aFCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sársfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina
depestructuras@fcefy.unc.edu.ar, <http://www.efn.uncor.edu.ar>

^bInstituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT) – CONICET, Universidad
Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sársfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina. idit@fcefy.uncor.edu.ar,
<http://www.inv.idit.uncor.edu.ar>

Palabras clave: Presas de Escollera, Ondas de Rayleigh, Asentamientos Permanentes,
Ambiente Sísmico.

Resumen. El diseño sísmico o la verificación de presas de escollera en la práctica convencional de ingeniería se lleva a cabo teniendo en cuenta las recomendaciones proporcionadas por las directrices del código, que suelen definir un terremoto máximo creíble en el sitio en términos de un espectro de respuesta de campo libre y registros sísmicos compatibles con el espectro. Sin embargo, se observa que los códigos de diseño no proporcionan directrices específicas sobre cómo definir otras características de la entrada sísmica; como la naturaleza de las ondas sísmicas entrantes, la variabilidad espacial de la acción sísmica, la topografía del sitio y los efectos de la presa en 3D. El presente estudio se centra en la evaluación de la influencia del ambiente sísmico en los asentamientos sísmicos de una presa de escollera, considerando escenarios constituidos por ondas de cuerpo (P y S) y ondas de superficie (Rayleigh). Los resultados muestran que un entorno sísmico formado por ondas de Rayleigh puede dar lugar a asentamientos significativamente mayores en la cresta de la presa que los producidos por un entorno sísmico formado únicamente por ondas de cuerpo.

Keywords: Rockfill Dams, Rayleigh Waves, Permanent Settlements, Seismic Environment.

Abstract. The seismic design or verification of rockfill dams in conventional engineering practice is carried out considering recommendations provided by code guidelines, which typically define a maximum credible earthquake at the site in terms of a free field response spectrum and spectrum-compatible seismic records. It is however noted that design codes do not provide specific guidelines on how to define other features of the seismic input; such as the nature of the incoming seismic waves, spatial variability of the seismic action, the topography of the site, and 3-D dam effects. The present study is focused on the evaluation of the influence of the seismic environment on the seismic settlements of a rockfill dam, considering scenarios consisting of body waves (P and S) and surface (Rayleigh) waves. The results show that a seismic environment consisting of Rayleigh waves can lead to significantly greater settlements at the dam crest than those produced by a seismic environment consisting only of body waves

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de presas de escolleras involucra varios aspectos de ingeniería, como consideraciones hidrológicas, hidráulicas, estructurales, geotécnicas y ambientales. Una vez definidos los principales aspectos de diseño hidrológico, hidráulico y geotécnico, el diseño estructural del cuerpo de la presa juega un papel clave en la seguridad general de la instalación. El diseño estructural debe cubrir todos los escenarios de carga, incluidos los terremotos destructivos (a menudo denominados terremotos de apagado seguro, SSE, en la literatura, Wieland 2012), que a menudo es el escenario de carga más crítico y severo. En general, las pautas de diseño brindan recomendaciones para un terremoto de máxima credibilidad en el sitio en términos de un espectro de respuesta de campo libre y registros sísmicos compatibles con el espectro (USACE, 2004; FEMA 65, 2005; ICOLD, 2010; etc.). Sin embargo, se observa que los códigos de diseño abordan el período de retorno del terremoto, pero no proporcionan pautas específicas con respecto a otras características de la acción sísmica; como la naturaleza de las ondas sísmicas actuantes y la variabilidad espacial de la acción sísmica.

La práctica convencional de la ingeniería civil adopta un ambiente sísmico simplificado que consiste en ondas P y S que se propagan verticalmente (Abu-Seeda, 1996; Seiphoori et al., 2011), donde las ondas P están asociadas a los componentes verticales de la aceleración y las ondas S a las acciones horizontales. Además, la práctica estándar en los últimos años es suponer que ambas componentes de las aceleraciones horizontales tienen la misma amplitud máxima (FEMA 65, 2005), mientras que la componente vertical máxima se adopta como la mitad ($1/2$) o dos tercios ($2/3$) de la componente horizontal máxima (FEMA 65, 2005; Sarma y Scorer, 2009). Sin embargo, no se dan recomendaciones particulares con respecto a la relación de fase entre las componentes horizontal y vertical, ya que generalmente se asume que la acción sísmica corresponde a componentes de ondas de cuerpo no correlacionados. Por lo tanto, los escenarios sísmicos que consisten en ondas de Rayleigh han recibido poca atención en la literatura técnica y a menudo se ignoran en la práctica de la ingeniería. En consecuencia, este estudio se centra en analizar la influencia de un escenario sísmico que involucra ondas de Rayleigh y compararlo con uno dominado por ondas de cuerpo. Este constituye el objetivo principal del presente artículo.

El propósito del presente estudio es comparar la respuesta sísmica de una presa de escolleras sometida a dos ambientes sísmicos diferentes, es decir, uno que consiste en ondas P y S no correlacionadas y el segundo en ondas de Rayleigh. El análisis aquí descrito se realiza considerando un modelo constitutivo de última generación, condiciones de contorno sísmicas avanzadas y el comportamiento hidrodinámico del embalse. Como primer paso, se simula una condición de embalse vacío, con el fin de evaluar el comportamiento no lineal de la presa e identificar las principales características de la respuesta. Se estudia una condición de embalse lleno como segundo paso, con el fin de evaluar la influencia de las presiones hidrodinámicas. Ambas condiciones se analizaron para siete registros históricos obtenidos de la base de datos de movimiento fuerte del Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER). El presente estudio también evalúa el efecto de la dirección de propagación del frente de onda, el cambio de fase entre las componentes verticales y horizontales y la influencia de la amplitud de ambas componentes.

1.1. Métodos numéricos

Gazetas y Dakoulas (1992) identifican factores clave que deben tenerse en cuenta para evaluar la respuesta de las presas de escolleras, a saber:

- Comportamiento no lineal de los materiales
- Dependencia de la rigidez de las escolleras con el confinamiento
- Geometría 3D del valle
- Flexibilidad de la cimentación y posible presencia de material aluvial
- Tipo de ondas sísmicas y grado de coherencia de la excitación sísmica

En cada situación particular, uno o más de estos factores pueden tener una influencia apreciable en la respuesta sísmica de la presa y condicionarán el método de análisis a utilizar. Algunos procedimientos numéricos, que podrían tener en cuenta adecuadamente todos los factores mencionados anteriormente, pueden ser costosos desde el punto de vista computacional y requerir la definición de parámetros de entrada que pueden no estar disponibles en la práctica convencional de ingeniería.

Los métodos numéricos disponibles en la literatura para el análisis sísmico de presas pueden clasificarse en dos grupos generales: métodos que discretizan el dominio (por ejemplo, métodos de elementos finitos, FEM o métodos de diferencias finitas, FDM) y técnicas que discretizan el contorno (por ejemplo, métodos de elementos de contorno, BEM). Los métodos de dominio finito se han vuelto más populares que las técnicas de contorno, como se refleja en la amplia disponibilidad de software FEM/FDM comercial, mientras que los códigos BEM son menos comunes. Así, se observa que las técnicas de Elementos Finitos y Diferencias Finitas son los métodos numéricos generalmente utilizados en la práctica de la ingeniería para representar el comportamiento sísmico de las presas de escolleras (Chowdhury et al., 2019).

1.2. Condiciones de contorno

Una vez que se elige un método de dominio finito para representar el comportamiento sísmico de una presa de escolleras, un desafío importante es la representación numérica de las ondas salientes en el campo lejano logrando un equilibrio adecuado entre precisión y costo computacional. Generalmente, un modelo de elementos finitos se define limitando el dominio introduciendo condiciones de contorno artificiales (Kontoe et al., 2007). Si no se ejerce el cuidado adecuado, la introducción de estas condiciones de contorno artificiales podría tener una fuerte influencia y conducir a resultados inexactos. Las condiciones de contorno locales representan la condición de radiación por medio de amortiguadores distribuidos, y la solución es local en el espacio y el tiempo. Este tipo de condición de contorno se usa ampliamente en el campo de la ingeniería civil, ya que producen resultados razonables para la mayoría de los casos prácticos y requieren un esfuerzo computacional considerablemente menor que las condiciones de contorno consistentes más rigurosas. La condición de contorno local más simple, y quizás la más utilizada, es la llamada condición de contorno estándar de Lysmer y Kuhlemeyer (Lysmer y Kuhlemeyer, 1969). Dado que este estudio se centra en dos ambientes sísmicos diferentes, la adopción de condiciones de contorno locales siguiendo el enfoque de Lysmer y Kuhlemeyer se considera una opción adecuada, debido a su bajo costo computacional y de implementación para los dos ambientes sísmicos y por su consistencia con el método de análisis general empleado en el presente trabajo (Método de Elementos Finitos).

1.3. Modelo constitutivo

Dado que la no linealidad del material es un fenómeno importante que debe tenerse en cuenta en la respuesta sísmica de las presas de escolleras, debe considerarse cuidadosamente en el análisis. Hay varios modelos constitutivos disponibles en la literatura (por ejemplo, Anandarajah, 2010; Lade, 2005). Entre los modelos constitutivos disponibles, el Modelo de “Hardening Soil” (HSM) ha demostrado ser bastante efectivo para capturar las principales

características no lineales del comportamiento del suelo cuando se aplica a diferentes tipos de problemas geotécnicos (Benz, 2007; Lade, 2005). El modelo HSM se formula sobre parámetros, la mayoría de los cuales generalmente se requieren en programas generales de caracterización de suelos para proyectos de ingeniería, lo cual es una ventaja adicional de este modelo. El HSM original fue desarrollado por Schanz (Schanz et al, 1999) basado en el modelo de doble endurecimiento de Vermeer (1978). En consecuencia, el HSM también incorpora las ideas propuestas por Kondner (Kondner y Zelasko, 1963), Duncan y Chang (1970), Janbu (1963) y Rowe (1962). Los parámetros del modelo se pueden definir mediante evaluaciones de laboratorio estándar, como pruebas triaxiales y edométricas. La implementación numérica del HSM en este estudio se basa en la versión desarrollada por Benz (2007), en la que se introduce e implementa un nuevo potencial plástico y el criterio de falla de Matsuoka-Nakai para mejorar la versión original del HSM.

La función de fluencia para la formulación HSM se muestra en Figura 1. Para más detalles sobre el HSM implementado en este estudio, se remite al lector al trabajo realizado por Cocco y Ruiz (Cocco y Ruiz, 2018).

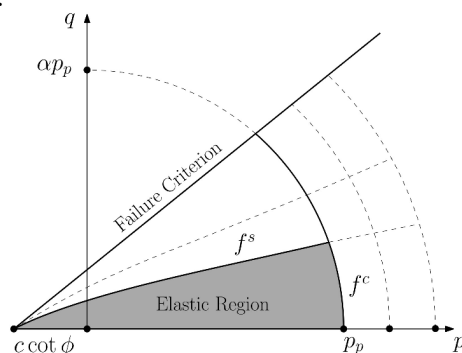


Figura 1. Evolución de la función de fluencia de HSM durante el endurecimiento

2. MODELADO NUMÉRICO

La modelación numérica se realizó mediante el Método de Elementos Finitos como marco general, implementado en el software comercial ABAQUS (ABAQUS, 2014), considerando condiciones de deformación plana bidimensional (2D). La suposición 2D generalmente se considera una aproximación razonable para las estructuras típicas de presas de escolleras, y los resultados pueden ajustarse para las condiciones 3D a través de factores apropiados (Sukkarak et. al, 2019). Aunque existen varias estrategias y herramientas disponibles para el modelado 3D de presas de escolleras a menudo se consideran demasiado complejos para la práctica rutinaria de ingeniería o requieren implementaciones numéricas especializadas, ya que generalmente no están disponibles en software comerciales. En consecuencia, el modelado 2D mediante software comercial presenta una alternativa muy atractiva para los diseños. A pesar de ciertas limitaciones, como la influencia de la topografía, la forma del valle, la geología, la variabilidad espacial del movimiento sísmico y los efectos de sitio, el modelado 2D sigue siendo una herramienta muy útil y práctica para el diseño.

3. ACCIÓN SÍSMICA

En este trabajo se consideran dos escenarios sísmicos para evaluar la influencia en los asentamientos: i) un ambiente convencional que consiste en ondas P y S (ondas de cuerpo, en lo sucesivo denominadas "convencionales") que se propagan verticalmente, no correlacionadas, y ii) un ambiente sísmico que consiste en ondas de Rayleigh (superficiales).

En el primer escenario (es decir, ondas de cuerpo) los registros históricos de aceleración se impusieron en las direcciones horizontal y vertical en el borde inferior del modelo. Estas componentes horizontales y verticales, registrados en estaciones sísmicas reales, generalmente presentan independencia estadística. Por otro lado, para el ambiente sísmico que consiste en ondas superficiales, ambas componentes están completamente correlacionados a través del modo de propagación de Rayleigh. Para definir el escenario de onda superficial, se adoptó la componente horizontal del registro histórico, mientras que la componente vertical se calculó considerando las características de una onda de Rayleigh en un depósito homogéneo, modulando tanto la amplitud como el ángulo de fase de cada componente de frecuencia. Se consideró que la onda superficial viajaba a la velocidad de fase correspondiente a través de la parte inferior del modelo, lo que conducía a una acción sísmica asíncrona.

Se utilizaron siete registros históricos para los análisis realizados en el presente estudio, considerando tanto las componentes horizontales como verticales, como lo sugieren varias normas para el análisis sísmico de presas de escolleras (USACE, 2004; FEMA 65, 2005; FERC, 2018). Los registros sísmicos se seleccionaron para cubrir una amplia gama de frecuencias dominantes, mecanismos de ruptura y distancias focales, con el fin de proporcionar generalidad a los análisis. La Tabla 1 resume las principales características de los registros históricos considerados en el presente estudio.

Tabla 1. Registros de historial de tiempo utilizados

Nombre y fecha del terremoto	Estación	Magnitud	Designación
Chi-Chi, 20/9/1999	TCU068	7.62	Rec-A
MCE Presa Caracoles	-	-	Rec-B
San Fernando, 9/2/1971	Presa de Pacoima	6.61	Rec-C
Loma Prieta, 18/10/1989	Gilroy-Edificio Histórico.	6.93	Rec-D
Chi-Chi, 20/9/1999	CHY006	7.62	Rec-E
Tabas, 16/9/1978	Tabas	7.35	Rec-F
Valle Imperial-06, 15/10/1979	El Centro Array N°1	6.53	Rec-G

La Figura 2 muestra la componente horizontal de los registros sísmicos para una aceleración máxima normalizada del suelo, $PGA = 0,10\text{ g}$.

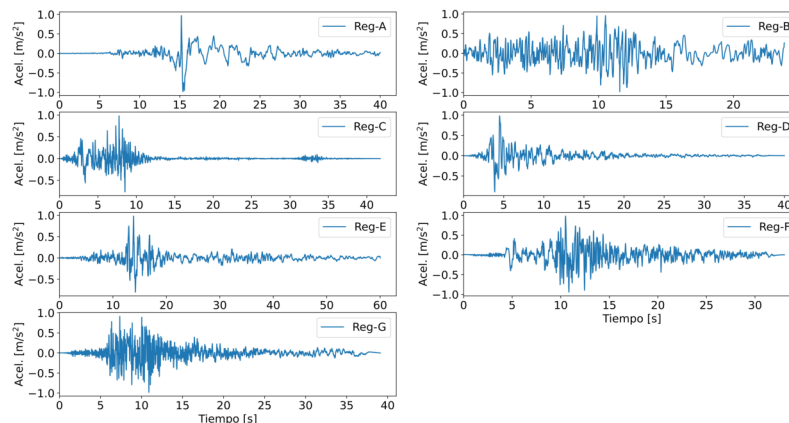


Figura 2. Componente horizontal de los registros sísmicos

3.1. Ejemplo numérico

En el presente trabajo se analizó una sección simplificada de presa de escolleras, con el objetivo de enfocarse en el efecto de diferentes supuestos de acción sísmica. Se analizó un

caso de embalse lleno, que se centró en el comportamiento no lineal del cuerpo de la presa de escolleras y donde el agua embalsada se considera en el análisis. La fundación de la presa se incluye en el modelo con condiciones de contorno sísmicas apropiadas.

El cuerpo de la presa está representado por un material de escolleras homogéneo, mientras que se considera un conjunto diferente de propiedades del material para la fundación. La geometría de la presa analizada se da en la Figura 3. La discretización se realizó con el fin de capturar frecuencias de hasta 20 Hz. El modelo numérico tuvo en cuenta la amortiguación de radiación en la fundación a través de las condiciones de contorno locales, y las aceleraciones de campo libre se impusieron en los nodos externos del contorno. El amortiguamiento del material del cuerpo de la presa viene dado principalmente por el comportamiento no lineal considerado por el modelo constitutivo.

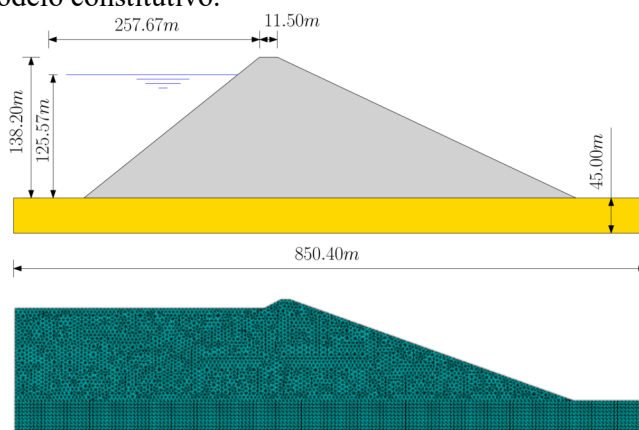


Figura 3. Analizada la geometría de la presa de escollera

Se realizaron tres análisis separados con diferentes acciones sísmicas:

- Sólo componentes horizontales de los registros sísmicos (onda S que se propaga verticalmente)
- Componentes horizontales y verticales de los registros (ondas S y P que se propagan verticalmente)
- Un ambiente sísmico de onda de Rayleigh puro tal que la componente horizontal del movimiento está dada por la componente correspondiente de un registro sísmico particular.

Los tres escenarios de carga se escalaron a valores de PGA que oscilaron entre 0,30 g y 0,80 g, tomando como valor de referencia la componente horizontal. En este estudio, las componentes verticales del registro sísmico se escalaron al mismo valor PGA de las componentes horizontales en el escenario de carga ii).

Las propiedades mecánicas seleccionadas para este ejemplo numérico podrían considerarse típicas de los materiales generalmente utilizados en la construcción de presas de escolleras. Estas propiedades, junto con los parámetros del material para el aluvión en la fundación, se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de materiales para el modelo HSM

Parámetros	Relleno de rocas Valor	Fundación Valor
Rigidez secante triaxial, E_{50ref}	65000[kPa]	50000[kPa]
Rigidez tangente edométrica, E_{oedref}	65000 [kPa]	50000 [kPa]
Rigidez de descarga/recarga, E_{urref}	195000 [kPa]	150000 [kPa]
Poder de dependencia del estrés, m	0.55	0.55
Cohesión (eficaz), c	5 [kPa]	5 [kPa]

Ángulo de fricción (efectivo), φ	42 [°]	40 [°]
Ángulo de dilatación, ψ	6 [°]	6 [°]
Relación de Poisson, ν_{lr}	0.25	0.25
Tensión de referencia para rigidez, <i>preferencia</i>	100 [kPa]	100 [kPa]
Valor K0 (consolidación normal), <i>K0nc</i>	0.40	0.40
Relación de fallas, <i>Rf</i>	0.90	0.90

4. RESULTADOS

Los resultados de los análisis se comparan en términos del asentamiento permanente de la cresta, ya que este es un resultado clave en el diseño de presas de escolleras. Además, el asentamiento permanente tiene una relación directa con la acumulación de daño durante un evento sísmico. En la Tabla 3 resume los asentamientos de cresta para los tres escenarios sísmicos y para el rango de PGA considerados. En estos análisis, se considera la presencia del agua embalsada por medio de elementos acústicos para el comportamiento dinámico y las presiones hidrostáticas con el fin de tener en cuenta la componente estática de la carga de agua.

Tabla 3. Asentamientos de cresta para el caso de embalse lleno [m]

Escenario - PGA	Reg-A	Reg-B	Reg-C	Reg-D	Reg-E	Reg-F	Reg-G
a) 0,30 g	0.15	0.09	0.06	0.12	0.14	0.10	0.06
a) 0,50 g	0.33	0.22	0.12	0.25	0.30	0.24	0.13
a) 0,60 g	0.44	0.30	0.16	0.33	0.40	0.33	0.18
a) 0,80 g	0.68	0.48	0.24	0.48	0.60	0.51	0.27
b) 0,30 g	0.19	0.11	0.08	0.15	0.16	0.11	0.08
b) 0,50 g	0.40	0.25	0.16	0.30	0.35	0.25	0.16
b) 0,60 g	0.52	0.34	0.20	0.39	0.46	0.33	0.21
b) 0,80 g	0.81	0.53	0.30	0.56	0.69	0.51	0.32
c) 0,30 g	1.66	0.50	0.13	0.85	0.12	0.27	0.27
c) 0,50 g	2.83	0.98	0.26	1.57	0.23	0.46	0.62
c) 0,60 g	2.95	1.21	0.36	1.83	0.29	0.56	0.85
c) 0,80 g	3.17	1.69	0.54	2.25	0.45	0.78	1.37

Se observan los siguientes aspectos:

- Para el escenario de ondas de cuerpo, donde se aplican componentes horizontales y verticales según lo registrado (respetando la independencia y aleatoriedad presentes en los registros originales), los asentamientos de cresta aumentan con respecto a los resultados para escenarios donde solo se aplican las componentes horizontales (en promedio en un factor de 1.14 a 1.22).
- Para los escenarios de ondas de Rayleigh, se observa un aumento significativo en los asentamientos de cresta con respecto a los casos en los que solo se aplican las componentes horizontales (en promedio por un factor de 1,97 a 7,70). Los resultados para los escenarios de ondas de Rayleigh también son mayores que los obtenidos para los escenarios de ondas de cuerpo, considerando componentes horizontales y verticales, no correlacionadas, como se observa para el caso de embalse vacío (en promedio por un factor de 1.71 a 6.35).
- El registro A presentó el mayor aumento en los asentamientos de crestas cuando se consideraron las ondas de Rayleigh. Este incremento es considerablemente superior a los obtenidos para el resto de los registros.
- En general, se observa que los asentamientos aumentan para los escenarios de ondas de Rayleigh, mientras que este efecto es menos significativo a medida que aumenta el PGA (es decir, el aumento de los asentamientos debido a las ondas Rayleigh es mayor

para las amplitudes de bajas aceleraciones). Esta tendencia también se observó para el caso de embalse vacío.

- En general, los resultados obtenidos incluyendo el agua embalsada mostraron una disminución en los asentamientos de cresta para los tres escenarios sísmicos (en promedio en un factor de 0.60 a 0.86).

Como se mencionó anteriormente, otro aspecto de interés es la dirección de propagación de las ondas. En este sentido, el único caso que hasta este punto es capaz de considerar este efecto es el escenario de ondas de Rayleigh, donde la propagación se consideró en la dirección aguas abajo. Por lo tanto, se consideró una propagación aguas arriba. Los resultados obtenidos para este caso se dan en la Tabla 4.

Tabla 4. Asentamientos de crestas para la propagación de ondas aguas arriba [m]

Escenario - PGA	Reg-A	Reg-B	Reg-C	Reg-D	Reg-E	Reg-F	Reg-G
c) 0,30 g	1.55	0.46	0.22	0.78	0.12	0.19	0.34
c) 0,50 g	2.89	0.97	0.43	1.69	0.22	0.33	0.68
c) 0,60 g	3.04	1.23	0.56	2.06	0.27	0.41	0.88
c) 0,80 g	3.63	1.89	0.83	2.54	0.39	0.59	1.40

Estos resultados muestran un aumento de los asentamientos cuando la dirección de propagación es aguas arriba. El aumento es pequeño, aunque no despreciable y sistemático, en el rango del 2-10 %, con respecto al caso de propagación aguas abajo.

Un último aspecto estudiado fue la variación del ángulo de fase entre las componentes horizontales y verticales para los escenarios de ondas de Rayleigh con el fin de ver si esta característica está asociada al aumento de asentamientos observados para estos escenarios. El ángulo de fase entre las componentes horizontales y verticales para una onda de Rayleigh es de 90° , y en el estudio paramétrico se desplazó de 90° a 0° . En este estudio paramétrico se adoptó el escenario de onda de Rayleigh considerando la componente vertical como referencia. La Tabla 5 resume los resultados obtenidos.

Tabla 5. Asentamientos de cresta para diferentes ángulos de fase entre componentes

Escenario - PGA	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 0^\circ$
c) 0,30 g	0.92	0.84	0.79	0.76
c) 0,50 g	1.60	1.46	1.29	1.22
c) 0,60 g	1.93	1.82	1.58	1.43
c) 0,80 g	2.58	2.50	2.20	1.98

Estos resultados muestran una tendencia casi lineal en las relaciones de asentamiento con ángulo de fase, con asentamientos crecientes para ángulos mayores entre componentes. Esta tendencia parece ser independiente de la aceleración máxima del registro. La diferencia máxima en los asentamientos es de alrededor del 25 % con respecto a los resultados obtenidos para un ángulo de fase de 90° (es decir, una onda de Rayleigh pura). Estos resultados indican que el cambio de fase de 90° en las componentes de una onda de Rayleigh es un factor clave en el aumento de asentamientos al considerar este escenario sísmico.

5. CONCLUSIONES

En este estudio, se analizó una sección típica de una presa de escolleras con el objetivo de evaluar la influencia del ambiente sísmico en los asentamientos permanentes resultantes. Se consideraron escenarios sísmicos consistentes en ondas de cuerpo (P y S) y ondas superficiales (Rayleigh). Como primer paso, se consideró un caso de embalse vacío con el fin de caracterizar el comportamiento del cuerpo de la presa para diferentes acciones sísmicas.

Luego se introdujeron efectos hidrodinámicos para tener en cuenta el agua embalsada en una condición de embalse lleno. Para ambos casos, se incluyó en el análisis la flexibilidad de la fundación de la presa y las condiciones de contorno sísmicas adecuadas.

Para los escenarios de onda de cuerpo, se observó que los asentamientos de cresta aumentan en un factor de 1.14 a 1.22 cuando se incluyen componentes verticales en el análisis, con respecto a los resultados obtenidos considerando solo componentes horizontales. También se observa que los escenarios de onda de Rayleigh conducen a un aumento significativo de los asentamientos, por factores que van de 1.97 a 7.70 cuando se comparan con los resultados obtenidos considerando solo las componentes horizontales. Estas relaciones se reducen un poco, a 1,71-6,35, cuando se hace la comparación con respecto a los escenarios de ondas de cuerpo que tienen en cuenta las componentes verticales y horizontales. En cuanto a la intensidad de los terremotos considerados, se observa que el aumento de asentamientos debido a los escenarios de onda de Rayleigh disminuye a medida que aumenta la PGA de los registros sísmicos. Un registro particular (Rec-A) presentó un aumento particularmente alto en los asentamientos de cresta para escenarios de ondas de Rayleigh. Se observa que este registro presenta un contenido de frecuencia y energía en un rango estrecho cercano a la frecuencia fundamental de la presa, lo cual fue corroborado que sería la causa del aumento en los asentamientos (por razones de extensión del artículo no se expusieron los resultados).

Finalmente, se estudiaron dos aspectos adicionales para caracterizar la influencia de las ondas de Rayleigh en los asentamientos finales: i) dirección de propagación de las ondas; y ii) cambio de fase entre componentes.

Considerando el primer aspecto, los resultados mostraron un aumento en los asentamientos cuando la dirección de propagación de la onda es hacia aguas arriba. Este aumento se sitúa en promedio entre el 2 y el 10 %, con respecto a la dirección aguas abajo. Finalmente, se observa una disminución casi lineal en los asentamientos al reducir el cambio de fase entre las componentes de una onda de Rayleigh. Esta tendencia parece ser independiente de la amplitud de aceleración. La disminución de los asentamientos es de alrededor del 25 % con respecto a un cambio de fase de 90° (que corresponde a una onda de Rayleigh clásica). Estos resultados indican que el cambio de fase entre las componentes de la onda de Rayleigh es un factor clave en el aumento de asentamientos al considerar este escenario sísmico.

6. REFERENCIAS

- ABAQUS, 2014. "Manual del usuario de análisis, versión 6.14". Dassault Systèmes Simulia, Inc.
- Abu-Seeda, H. M., 1996. "Respuesta sísmica no lineal de presas utilizando un elemento límite acoplado - Formulación de elementos finitos", Tesis doctoral, Universidad de Rice. Houston, Texas, Estados Unidos. Abril de 1996.
- Anandarajah, A., 2010. "Métodos computacionales en elasticidad y plasticidad". ISBN 978-1-4419-6378-9, e-ISBN 978-1-4419-6379-6. Springer, Nueva York, 2010.
- Benz, T., 2007. "Rigidez de suelos de deformación pequeña y sus consecuencias numéricas". Tesis Doctoral. Universidad de Stuttgart. Stuttgart, Alemania.
- Chowdhury, K.; Semilla, R. B.; Perlea, V.; Beaty, M.; Ma, F.; Hu, G., 2019. "Lecciones aprendidas de la reevaluación de las presas superior e inferior de San Fernando utilizando el estado actual de la práctica en el modelado numérico". Sociedad de EE. UU. sobre represas, EE. UU. 2019.
- Cocco, L. y Ruiz, M., 2018. "Implementación numérica del modelo de endurecimiento del suelo". Métodos numéricos en ingeniería geotécnica IX, Volumen 1, Capítulo 25 (9 páginas). 2018.

- Duncan, J. M. y Chang, C. Y., 1970. "Análisis no lineal de tensiones y deformaciones en el suelo". Proc. ASCE: Revista de la División de Mecánica de Suelos y Cimentación. 96: 1629-1653.
- FEMA 65, 2005. "Directrices federales para la seguridad de presas, análisis sísmicos y diseño de presas". Mayo de 2005.
- Gazetas, G. y Dakoulas, P., 1991. "Análisis sísmico y diseño de presas de escollera: estado del arte". *Dinámica de suelos e ingeniería sísmica*, 11 (1992), 27-61. Elsevier.
- ICOLD, "Selección de parámetros sísmicos para grandes presas". Directrices, Revisión del Boletín 72, Comité sobre Aspectos Sísmicos del Diseño de Presas, Comisión Internacional de Grandes Presas, París, 2010.
- Janbu, N., 1963. "Compresibilidad del suelo determinada por edómetro y ensayos triaxiales". Proc. 3º ECSMFE. Vol. 1: 19-25. Wiesbaden.
- Kondner, R. L. y Zelasko, J. S., 1963. "Una formulación hiperbólica de tensión-deformación para arenas". 2ª Conferencia Panamericana en Ingeniería de Cimentaciones de Mecánica de Suelos. Vol. 1: 289-394. Brasil.
- Kontoe, S.; Zdravkovic, L.; Potts, D. M. y Salandy, N. E., 2007. "El uso de límites absorbentes en análisis dinámicos de problemas de interacción suelo-estructura". 4ª Conferencia Internacional sobre Ingeniería Geotécnica Sísmica, 25-28 de junio de 2007. Documento N° 1231.
- Lade, P. V., 2005. "Descripción general de los modelos constitutivos para suelos". Publicación especial geotécnica de la ASCE N° 128, Modelos constitutivos del suelo: evaluación, selección y calibración, editado por J. A. Yamamuro y V. N. Kaliakin, junio de 2005, págs. 1-34.
- Lysmer, J. y Kuhlemeyer, R. L., 1969. "Modelo dinámico finito para medios infinitos". Revista de la División de Ingeniería Mecánica, Procedimientos de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, Vol. 95, N° EM4. Agosto de 1969.
- Rowe, P. W., 1962. "La relación tensión-dilatación para el equilibrio estático de un conjunto de partículas en contacto". Proc. de la Royal Society de Londres. Serie A, Ciencias Matemáticas y Físicas. Vol. 269: 500-527.
- Sarma y Scorer, 2009. "El efecto de la aceleración vertical en la estabilidad sísmica de taludes", Conferencia Internacional sobre diseño basado en el rendimiento en ingeniería geotécnica sísmica. Tokio, Japón. Septiembre de 2009.
- Schanz, T.; Vermeer, P. A. y Bonnier, P. G., 2000. "El modelo de endurecimiento del suelo: formulación y verificación". Más allá de 2000 en Geotecnia Computacional. págs.: 281-290. Rot-terdam: Balkema.
- Seiphoori, A.; Haeri, S. M. y Karimi, M., 2011. "Análisis sísmico tridimensional no lineal de presas de relleno de roca con revestimiento de hormigón sometidas a ondas dispersas de P, SV y SH considerando los efectos de las interacciones presa-cimentación". *Dinámica de suelos e ingeniería sísmica* 31 (2011) 792-804. Elsevier.
- Sukkarak, P.; Jongpradist, P. y Pramthawee, P., 2019. "Un factor de forma de valle modificado para la estimación del asentamiento de presas de relleno de rocas". *Computadoras y Geotecnia*, 108 (2019) 244-256.
- USACE, 2004. "Consideraciones generales de diseño y construcción para presas de tierra y relleno de rocas". Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, EM 1110-2-2300. 2004.
- Vermeer, P. A., 1978. "Un modelo de doble endurecimiento para arena". *Geotécnica*. Vol. 28, Número 4: 413-433.
- Wieland, M., 2012. "Seismic Design and Performance Criteria for Large Storage Dams". 15 WCEE, Lisboa, Portugal, 2012.