

## INFLUENCIA DE LA DEFINICIÓN DEL AMBIENTE SÍSMICO EN LAS DEFORMACIONES

Cocco, Leonardo<sup>a</sup>; Pinto, Federico<sup>b</sup>; Prato, Carlos<sup>c</sup>

(a) Ingeniero Civil, Profesor  
Universidad Nacional de Córdoba

[lcocco@unc.edu.ar](mailto:lcocco@unc.edu.ar)

(b) Ingeniero Civil, Profesor  
Universidad Nacional de Córdoba

[fpinto@unc.edu.ar](mailto:fpinto@unc.edu.ar)

(c) Ingeniero Civil, Profesor Emérito  
Universidad Nacional de Córdoba

[prato\\_carlos@yahoo.com](mailto:prato_carlos@yahoo.com)

### RESUMEN

Las acciones sísmicas utilizadas para el diseño o verificación de obras de infraestructuras son generalmente estimadas en función de los lineamientos expuestos en diferentes normas de aplicación (CIRSOC 103, ASCE 7, AASHTO, etc.). Estas acciones así determinadas consideran una importante suposición, que el ambiente sísmico consiste en ondas de corte S que se propagan verticalmente, mientras que los movimientos verticales se consideran ondas P de propagación vertical. En general, no son sugeridos otros ambientes sísmicos para la estimación de las acciones sísmicas en obras de infraestructura, como por ejemplo el compuesto por ondas superficiales (Rayleigh).

El presente estudio está enfocado en el análisis numérico de la influencia del ambiente sísmico en los asentamientos de una presa de escollera. Particularmente se analizan escenarios consistentes de ondas de cuerpo (P y S) y ondas superficiales (Rayleigh). El presente estudio también evalúa posibles efectos de la dirección de propagación de las ondas sísmicas, el ángulo de fase entre componentes (vertical y horizontal), y la influencia de la relación de amplitudes entre estas componentes. Los resultados muestran que un ambiente sísmico consistente de ondas Rayleigh puede conducir a deformaciones significativamente mayores que aquellos producidos por un ambiente sísmico consistente únicamente de ondas de cuerpo.

### ABSTRACT

*The seismic actions used for the design or verification of infrastructure works are generally estimated based on the guidelines set forth in different applicable standards (CIRSOC 103, ASCE 7, AASHTO, etc.). These actions thus determined consider an important assumption, that the seismic environment consists of vertically propagating*

Organiza:

*S-shear waves, while vertical movements are considered vertically propagating P-waves. In general, other seismic environments are not suggested for the estimation of seismic actions in infrastructure works, such as the one composed of surface waves (Rayleigh).*

*The present study is focused on the numerical analysis of the influence of the seismic environment on the settlements of a rockfill dam. In particular, consistent scenarios of body waves (P and S) and surface waves (Rayleigh) are analyzed. The present study also evaluates possible effects of the direction of propagation of seismic waves, the phase angle between components (vertical and horizontal), and the influence of the amplitude relationship between these components. The results show that a seismic environment consisting of Rayleigh waves can lead to significantly greater deformations than those produced by a seismic environment consisting of body waves alone.*

Organiza:

## INTRODUCCIÓN

El diseño de estructuras, en general, y de presas de escollera, en particular, en regiones sísmicamente activas generalmente está controlado por escenarios sísmicos destructivos (a menudo denominados terremotos de cierre seguro, SSE, en la literatura; por ejemplo, Wieland 2012), que pueden conducir a grandes deformaciones, colapsos parciales y fallas catastróficas. En general, las pautas de diseño proporcionan 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 (por ejemplo, CIRSOC 103, 2013; ASCE 7, 2022; AASHTO, 2020; USACE, 2004; FEMA 65, 2005; FERC, 2018; ICOLD, 2001; ICOLD, 2010) para un período de retorno determinado. Sin embargo, no hay directrices específicas sobre la naturaleza de las ondas sísmicas actuantes; es decir, el llamado ambiente sísmico, asociado al espectro prescrito, que se da en los códigos de diseño. En la práctica profesional, generalmente se adopta un ambiente sísmico simplificado que consiste en la propagación vertical de ondas P y S (por ejemplo, Abu-Seeda, 1996; Seiphoori et al., 2011; Wang y Chi, 2022), donde las ondas P se asocian a las componentes verticales de la aceleración y las ondas S a los movimientos horizontales. La práctica actual asume que las aceleraciones verticales máximas, si se incluyen en los análisis, son la mitad (1/2) o dos tercios (2/3) de la componente horizontal máxima (por ejemplo, FEMA 65, 2005; Sarma y Scorer, 2009; Makan et al., 2013). Sin embargo, no se dan recomendaciones particulares con respecto a la relación de fase entre las componentes horizontales y verticales. Es interesante notar que un ambiente sísmico que consiste puramente en ondas superficiales de Rayleigh ha recibido poca atención en la literatura técnica, y a menudo se ignora en la práctica profesional. Las ondas de Rayleigh se propagan a través de la superficie, transportando en ciertas situaciones una parte significativa de la energía total liberada por la fuente sísmica (por ejemplo, Abu-Seeda, 1996).

El propósito del presente estudio es comparar la respuesta sísmica en términos de asentamientos permanentes de una presa de escollera sometida a dos ambientes sísmicos diferentes; es decir, uno formado por ondas de cuerpo (P y S) y, el segundo, por ondas de Rayleigh. El análisis aquí descrito se realiza mediante un modelo numérico que incluye un modelo constitutivo de última generación, condiciones sísmicas de contorno avanzadas y teniendo en cuenta el comportamiento hidrodinámico del embalse. Como primer paso, se considera 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. Como segundo paso, se estudia la condición de un embalse lleno, con el fin de evaluar la influencia de las presiones hidrodinámicas. Ambas condiciones se analizan para siete registros históricos obtenidos de la base de datos de movimiento del suelo 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 las componentes verticales y horizontales.

Organiza:

## **Método de análisis**

### **Modelo Numérico**

El modelo numérico se realizó mediante el Método de los Elementos Finitos implementado en el programa comercial ABAQUS (ABAQUS, 2014), considerando condiciones de deformación plana bidimensional (2D). Como modelo constitutivo se utilizó el Modelo “Hardening Soil” (HSM), el cual permite una representación razonable del comportamiento material del relleno rocoso. El HSM caracteriza los materiales a través de once parámetros definidos por el usuario y tres parámetros internos, que se obtienen mediante un proceso de optimización (Cocco y Ruiz, 2018). La mayoría de estos parámetros pueden determinarse mediante ensayos de laboratorio estándar. Como el HSM considera la influencia del confinamiento tanto en la rigidez como en la resistencia, no es necesario subdividir el modelo para tener en cuenta las diferentes propiedades del material dentro del cuerpo de la presa.

### **Acción Sísmica**

La definición del ambiente sísmico es el foco principal del presente trabajo y considera dos escenarios sísmicos diferentes; es decir, i) un ambiente convencional que consiste en ondas P y S (ondas de cuerpo) que se propagan verticalmente y ii) un ambiente sísmico que consiste en ondas de Rayleigh (superficiales). En el primer escenario (es decir, ondas de cuerpo), las historias temporales de aceleración de los registros históricos se impusieron en las direcciones horizontal y vertical en el límite inferior del modelo. Estas componentes horizontales y verticales obtenidas en estaciones de registro sísmico reales, generalmente presentan independencia estadística. Por el contrario, para el ambiente sísmico formado por ondas superficiales, ambas componentes están fuertemente correlacionadas. 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 para 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.

Para los análisis realizados en el presente estudio se utilizaron siete registros históricos, considerando sus componentes horizontal y vertical, según lo sugerido por varias guías para el análisis sísmico de presas de escollera (USACE, 2004; FEMA 65, 2005; FERC, 2018; INPRES-CIRSOC 103, 2013). La adopción de los registros históricos se realizó con el fin de cubrir una amplia gama de frecuencias dominantes, mecanismos de ruptura y distancias focales.

En la Tabla 1 se resumen los registros históricos considerados en el presente estudio y sus correspondientes magnitudes.

Organiza:

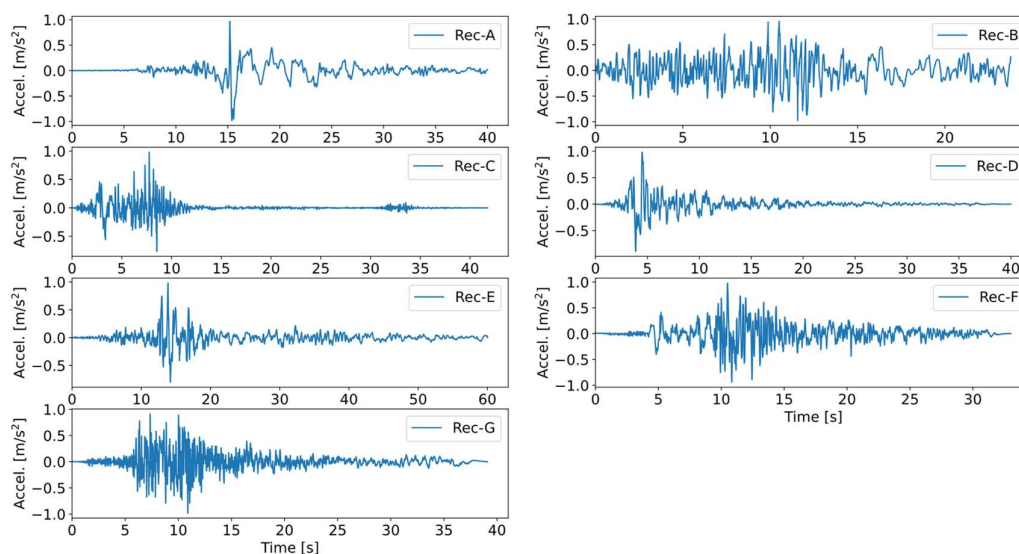
| Nombre y Fecha de Terremoto    | Estación              | Magnitud |
|--------------------------------|-----------------------|----------|
| Chi-Chi, 21/9/1999             | TCU068                | 7.3      |
| MCE Caracoles Dam              | -                     | -        |
| San Fernando, 9/2/1971         | Pacoima Dam           | 6.61     |
| Loma Prieta, 18/10/1989        | Gilroy-Historic Bldg. | 6.93     |
| Chi-Chi, 20/9/1999             | CHY006                | 7.62     |
| Tabas, 16/9/1978               | Tabas                 | 7.35     |
| Imperial Valley-06, 15/10/1979 | El Centro Array N°1   | 6.53     |

| Nombre y Fecha de Terremoto    | Intensidad de Arias [m/s] | Designación |
|--------------------------------|---------------------------|-------------|
| Chi-Chi, 21/9/1999             | 0.127                     | Rec-A       |
| MCE Caracoles Dam              | 0.219                     | Rec-B       |
| San Fernando, 9/2/1971         | 0.060                     | Rec-C       |
| Loma Prieta, 18/10/1989        | 0.088                     | Rec-D       |
| Chi-Chi, 20/9/1999             | 0.115                     | Rec-E       |
| Tabas, 16/9/1978               | 0.162                     | Rec-F       |
| Imperial Valley-06, 15/10/1979 | 0.144                     | Rec-G       |

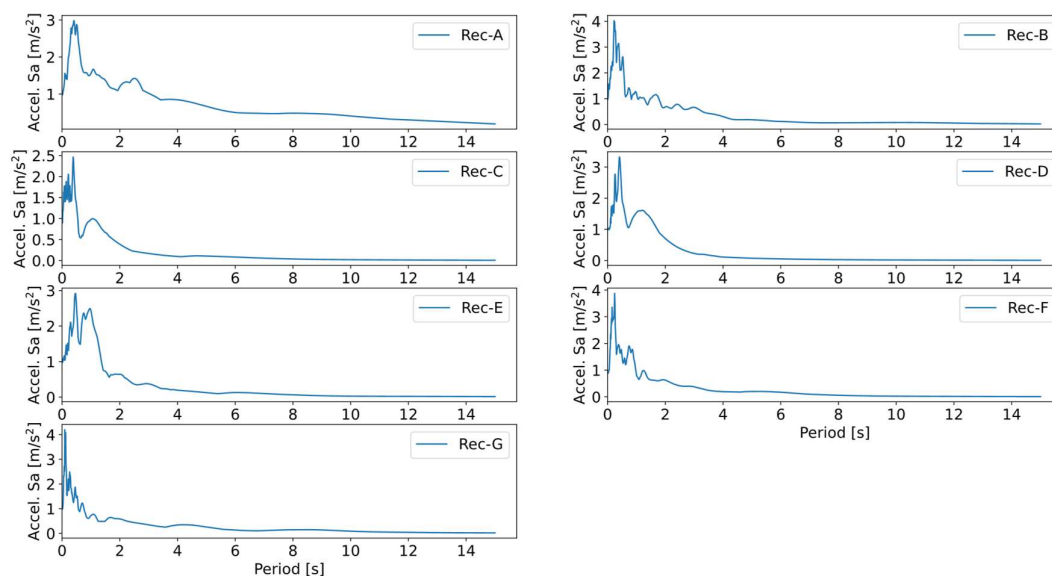
*Tabla 1 – Registros históricos utilizados*

La Figura 1 muestra la componente horizontal de los registros sísmicos para una aceleración máxima normalizada del suelo, PGA = 0,10 g. En la Figura 2 se muestran los espectros de respuesta correspondientes con amortiguación del 5%.



*Figura 1 – Componente Horizontal de los registros sísmicos*

Organiza:



*Figura 2 – Espectros amortiguados de los registros sísmicos*

## Geometría y propiedades del material de la presa

En el presente trabajo se analizó una sección simplificada de presa de escollera, con el objetivo de enfocarse en el efecto de las diferentes acciones sísmicas asumidas. Como se mencionó anteriormente, se analizaron dos condiciones para el mismo perfil de presa: un caso de embalse vacío, que se centró en el comportamiento no lineal de la presa de escollera, y un caso de embalse lleno. En ambas situaciones, la fundación de la presa se incluye en el modelo con las condiciones de contorno sísmico adecuadas.

El cuerpo de la presa está representado por un material de escollera homogéneo, mientras que para la fundación se considera un conjunto diferente de propiedades del material. La geometría de la presa se muestra en la Figura 3. El modelo de elementos finitos se discretizó en 7301 elementos finitos, con condiciones de contorno consistentes con el escenario de carga sísmica analizado. El modelo numérico tuvo en cuenta el amortiguamiento por radiación en la fundación a través de las condiciones de contorno locales, y las aceleraciones de campo libre se impusieron en el límite de la fundación. El amortiguamiento del material del cuerpo de la presa viene dado por el comportamiento no lineal definido por el modelo constitutivo y no se incluyen fuentes de amortiguamiento del material adicionales.

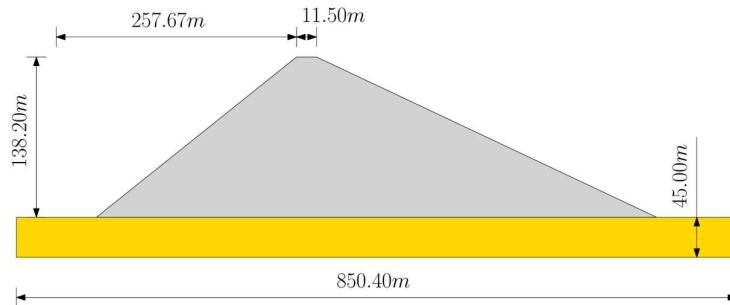
Se realizaron tres análisis separados considerando los siguientes ambientes sísmicos:

- Solo componentes horizontales de registros sísmicos (ondas S que se propagan verticalmente)
- Componentes horizontales y verticales de los registros (propagación vertical de las ondas S y P)

Organiza:

- c) Un ambiente sísmico de ondas de Rayleigh puras, de modo que la componente horizontal del movimiento coincida con cada registro sísmico.

Los tres escenarios sísmicos se escalaron a valores de PGA que oscilaron entre 0,10 g y 0,50 g, tomando como valor de referencia la componente horizontal.



*Figura 3 – Geometría de la presa de escolleras analizada.*

Cabe señalar que la práctica profesional estándar se basa en los supuestos a) y b), mientras que las ondas de Rayleigh rara vez se consideran en el diseño. La componente vertical de las aceleraciones generalmente se ignora en el análisis o se toma como una fracción de las demandas horizontales, por medio de un factor que es una función del mecanismo de ruptura, la distancia focal, la magnitud y las condiciones del sitio, entre otras consideraciones (por ejemplo, Bozorgnia y Campbell, 2016). En este estudio, las componentes verticales de los registros sísmicos para los escenarios b) se escalaron al mismo valor que el PGA horizontal.

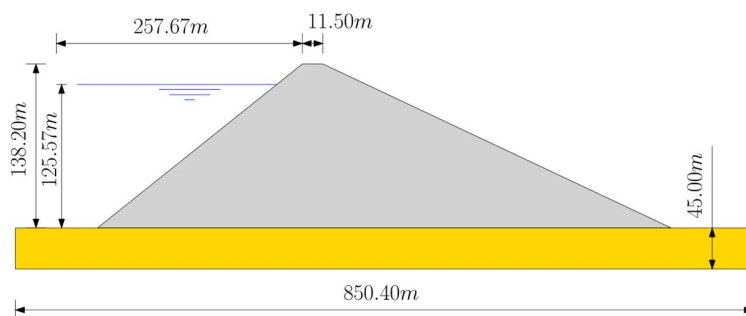
Las propiedades mecánicas seleccionadas para el cuerpo de la presa pueden considerarse típicas de los materiales generalmente utilizados en la construcción de presas de escollera. Las propiedades de los materiales consideradas para el aluvión y el cuerpo de la presa se resumen en la Tabla 2.

Cuando se considera el caso de embalse lleno (Figura 4), el comportamiento del agua embalsada se representa por medio de elementos acústicos que se acoplan a los elementos sólidos del modelo presa-fundación. Las acciones sísmicas y condiciones de contorno son las mismas que las consideradas para el caso de embalse vacío.

| Parámetro                                       | Escollera    | Aluvión      |
|-------------------------------------------------|--------------|--------------|
| Rigidez Secante Triaxial, $E_{50}^{ref}$        | 65000[kPa]   | 50000[kPa]   |
| Rigidez Tangente Edométrica, $E_{oed}^{ref}$    | 65000 [kPa]  | 50000 [kPa]  |
| Rigidez Carga/Descarga, $E_{ur}^{ref}$          | 195000 [kPa] | 150000 [kPa] |
| Potencia de dependencia tensional, $m$          | 0.55         | 0.55         |
| Cohesión (efectiva), $c'$                       | 5 [kPa]      | 5 [kPa]      |
| Ángulo Fricción (efectivo), $\varphi'$          | 42 [°]       | 40 [°]       |
| Ángulo Dilatancia, $\psi$                       | 6 [°]        | 6 [°]        |
| Coefficiente Poisson, $\nu_{ur}$                | 0.25         | 0.25         |
| Tensión referencia para rigidez, $p_{ref}$      | 100 [kPa]    | 100 [kPa]    |
| $K_0$ -valor (consolidación normal), $K_0^{nc}$ | 0.40         | 0.40         |

Organiza:

**Tabla 2 – Parámetros del Material para el HSM**



**Figura 4 – Geometría para caso de embalse lleno**

## Resultados

Los resultados de los análisis se comparan en términos del asentamiento permanente de la cresta, ya que el riesgo de desbordamiento es un tema clave en el diseño de presas de escollera. Además, el asentamiento permanente está estrechamente relacionado con la acumulación de daños durante un evento sísmico. Aunque el resultado clave es el asentamiento de la cresta, un primer paso en el análisis es la determinación de las frecuencias naturales, con el fin de caracterizar el comportamiento dinámico de la presa. Se obtuvieron frecuencias naturales para el caso de reservorio vacío, considerando las propiedades del material para el rango de pequeñas deformaciones, y las primeras diez frecuencias y períodos naturales se resumen en la Tabla 3.

| Frecuencias [Hz] | Períodos [s] |
|------------------|--------------|
| 0.49             | 2.04         |
| 0.76             | 1.32         |
| 0.83             | 1.20         |
| 0.87             | 1.15         |
| 1.00             | 1.00         |
| 1.05             | 0.95         |
| 1.15             | 0.87         |
| 1.17             | 0.85         |
| 1.25             | 0.80         |

Organiza:

*Tabla 3 – Frecuencias y Períodos Naturales*

Una vez identificadas las frecuencias naturales, se aplican tres escenarios de carga al modelo con el fin de evaluar los asentamientos permanentes para cada registro y ambiente sísmico considerado. Los resultados se resumen en la Tabla 4.

| Escenario - PGA | Rec-A | Rec-B | Rec-C | Rec-D | Rec-E | Rec-F | Rec-G |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| a) 0.10g        | 0.05  | 0.04  | 0.03  | 0.04  | 0.05  | 0.04  | 0.03  |
| a) 0.20g        | 0.11  | 0.09  | 0.06  | 0.11  | 0.11  | 0.08  | 0.06  |
| a) 0.30g        | 0.21  | 0.17  | 0.1   | 0.19  | 0.2   | 0.15  | 0.1   |
| a) 0.40g        | 0.31  | 0.27  | 0.15  | 0.29  | 0.32  | 0.25  | 0.15  |
| a) 0.50g        | 0.47  | 0.38  | 0.21  | 0.38  | 0.44  | 0.35  | 0.21  |
| b) 0.10g        | 0.09  | 0.1   | 0.04  | 0.06  | 0.06  | 0.05  | 0.04  |
| b) 0.20g        | 0.19  | 0.14  | 0.08  | 0.13  | 0.14  | 0.11  | 0.08  |
| b) 0.30g        | 0.31  | 0.2   | 0.13  | 0.23  | 0.25  | 0.19  | 0.13  |
| b) 0.40g        | 0.47  | 0.29  | 0.2   | 0.34  | 0.38  | 0.37  | 0.19  |
| b) 0.50g        | 0.63  | 0.39  | 0.27  | 0.46  | 0.51  | 0.41  | 0.26  |
| c) 0.10g        | 0.69  | 0.22  | 0.07  | 0.05  | 0.12  | 0.13  | 0.12  |
| c) 0.20g        | 1.34  | 0.51  | 0.14  | 0.11  | 0.28  | 0.27  | 0.29  |
| c) 0.30g        | 1.99  | 0.89  | 0.23  | 0.17  | 0.48  | 0.41  | 0.51  |
| c) 0.40g        | 2.68  | 1.24  | 0.33  | 0.23  | 0.75  | 0.55  | 0.8   |
| c) 0.50g        | 3.19  | 1.59  | 0.43  | 0.30  | 0.99  | 0.71  | 1.11  |

*Tabla 4 – Asentamiento Permanente de la Cresta  $\delta_c$  [m]*

Un análisis crítico de estos resultados conduce a las siguientes observaciones:

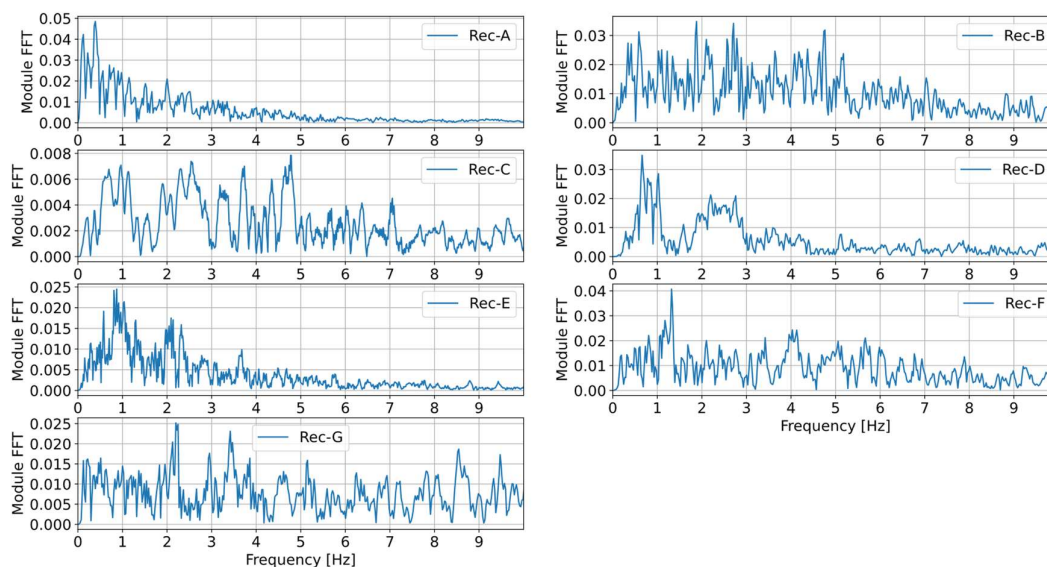
- En los casos en que se aplican componentes horizontales y verticales para las ondas de cuerpo (considerando la independencia estadística y aleatoriedad de los registros originales) se observó que los asentamientos aumentan con respecto a los escenarios donde solo se aplican componentes horizontales.
- Para escenarios de ondas de Rayleigh completas, se observa un aumento significativo en los asentamientos de la cresta, con respecto al caso en el que solo se consideran componentes horizontales.
- Si se comparan los resultados obtenidos para las ondas de Rayleigh con el caso en el que se aplican componentes de ondas de cuerpo horizontales y verticales independientes, también se observa un aumento.
- El Registro A muestra el mayor aumento en los asentamientos de la cresta cuando se consideran las ondas de Rayleigh. Este incremento es considerablemente superior al del resto de registros sísmicos considerados.

Organiza:

Por lo tanto, se observa que el Registro A presenta características particulares que merecen consideraciones adicionales.

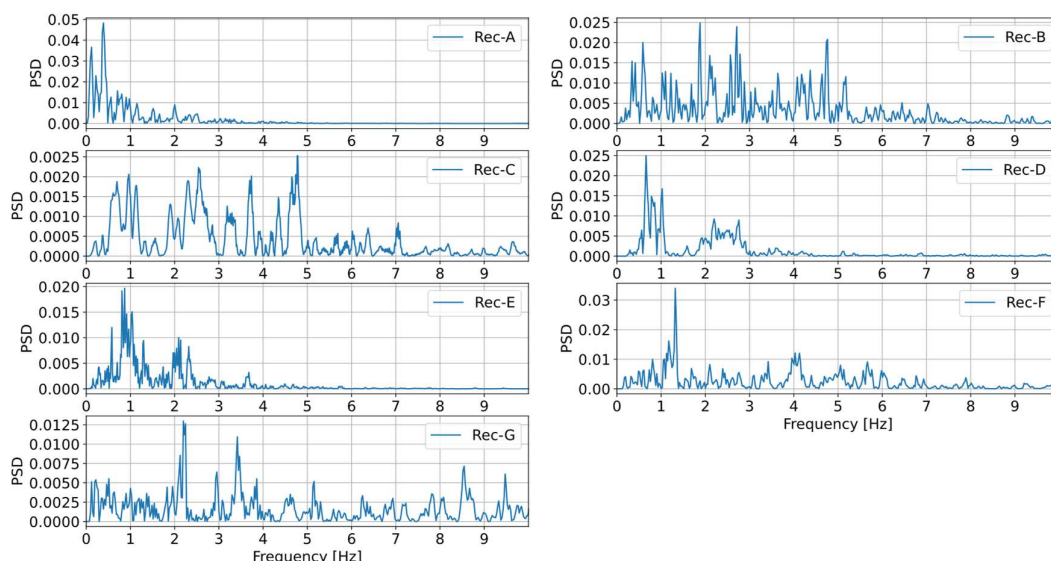
- Se observa que el aumento de los asentamientos permanentes debido a los escenarios de ondas de Rayleigh disminuye con el aumento de las amplitudes de PGA (por ejemplo, es mayor para las amplitudes de aceleración de  $PGA = 0,10\text{ g}$  que para  $PGA = 0,50\text{ g}$ ).

El fuerte aumento de los asentamientos permanentes asociados a Rec-A es un resultado intrigante que se encuentra en las simulaciones numéricas. Se observa que este registro muestra un mayor contenido en los valores de pseudoaceleraciones (PSA) dentro del rango donde  $T = 1.7$  a  $4.0$  seg (Figura 2). Este rango de períodos, donde se observa un contenido significativo en PSA para Rec-A, se encuentra muy próximo al período fundamental de la presa, considerando que los períodos naturales calculados para pequeñas deformaciones experimentarán un aumento debido a la degradación de la rigidez que sufrirá el relleno rocoso durante el terremoto. Por lo tanto, se evaluaron los espectros de Fourier y las densidades espectrales de potencia (PSD) de los registros con el fin de evaluar la distribución de energía en cada frecuencia. Las Figuras Figura 5 y Figura 6 muestran los espectros de Fourier y PSD para las componentes horizontales de todos los registros.



*Figura 5 – Espectros de Fourier de componentes horizontales*

Organiza:



**Figura 6 – Densidad espectral de potencia de componentes horizontales**

Se puede observar en ambas figuras que Rec-A presenta un contenido de frecuencias dominante en el rango de 0,1 a 0,5 Hz, mientras que para frecuencias superiores a 1 Hz las amplitudes son insignificantes. Esta característica particular, de un ancho de banda estrecho con frecuencias dominantes cercanas a la frecuencia fundamental de la presa (ver Tabla 3), no se observa en el resto de los registros. En algunos casos, por ejemplo, Rec-B, el contenido de frecuencias en el rango mencionado no es despreciable, pero el registro también contiene una cantidad significativa de energía en un rango de frecuencias más amplio. En consecuencia, la energía entregada por el terremoto, asociada a la PSD del registro, involucra un rango más amplio de frecuencias y no se limita a un rango estrecho como en el caso del registro Rec-A.

Por lo tanto, se considera que el aumento de asentamiento observado para Rec-A en un escenario de onda de Rayleigh, está asociado al hecho de que este registro en particular presenta un rango de frecuencia estrecho cercano a la frecuencia fundamental de la presa. Con el fin de estudiar más a fondo este fenómeno, Rec-A se filtró en el rango de  $f = 0$  a 0,5 Hz por medio de un filtro de paso alto, y se realizó un análisis adicional para evaluar los resultados de este registro modificado (es decir, filtrado). Los resultados se resumen en la Tabla 5, donde solo se consideran los escenarios a) y c), y se asume un  $PGA = 0,10$  g para todos los casos.

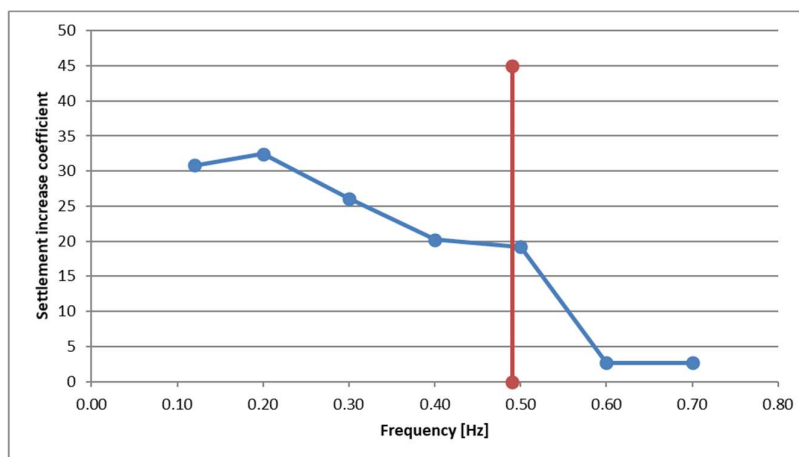
| Escenario - PGA | Original Rec-A | Filtered Rec-A |
|-----------------|----------------|----------------|
| a) 0.10g        | 0.05           | 0.04           |
| c) 0.10g        | 0.69           | 0.13           |

**Tabla 5 – Asentamiento de la Creta para registro Rec-A original y filtrado [m]**

Organiza:

Los resultados muestran que el asentamiento de la cresta para el registro filtrado es mayor que el valor obtenido para el caso en el que solo se aplican componentes sísmicas horizontales. Este incremento es del mismo orden de magnitud que los obtenidos para el resto de los registros (Rec-B a G). Estos resultados validan aún más la observación formulada con respecto a la causa raíz de la diferencia en los asentamientos de la cresta para el registro original Rec-A cuando se considera un escenario de onda de Rayleigh.

Se realizó un estudio paramétrico adicional con el fin de evaluar una posible relación entre el contenido de frecuencia del registro, la frecuencia fundamental de la presa y su efecto sobre el asentamiento de la cresta. Por lo tanto, se generaron registros sintéticos mediante la adición de funciones armónicas con un contenido de frecuencias que se varía para derivar una relación entre el asentamiento de la cresta en función del contenido de frecuencia.



*Figura 7 – Relación de aumento de asentamiento permanente de cresta.*

La Figura 7 muestra la relación entre el asentamiento permanente obtenido para un escenario de onda de Rayleigh y considerando únicamente las componentes horizontales de los registros. Esta relación se denomina en el presente trabajo "relación de aumento de los asentamientos de cresta". La línea vertical de la Figura muestra la frecuencia fundamental de la presa, y el eje vertical muestra la variación de la relación de incremento con respecto a la frecuencia dominante del registro sísmico. Estos resultados muestran que, si el contenido de frecuencia principal del registro es aproximadamente 1,2 veces mayor que la frecuencia fundamental de la presa, un escenario de onda de Rayleigh no conducirá a un aumento significativo en el asentamiento de la cresta con respecto a un escenario de onda de cuerpo convencional (es decir, S y P).

Sin embargo, estos resultados son limitados al caso de un embalse vacío, lo que se consideró como un primer paso en el análisis con el fin de evaluar la influencia del ambiente sísmico en los asentamientos permanentes del relleno, sin introducir variables adicionales. Así, el siguiente paso en el análisis es introducir la presencia

Organiza:

del agua embalsada, junto con otras variables de análisis; como la dirección de propagación de la onda, el nivel de PGA, así como un caso de análisis donde se considera como referencia la componente vertical (en lugar de la horizontal). El primer conjunto de análisis considera la presencia del agua embalsada por medio de elementos acústicos para el comportamiento dinámico y las presiones estáticas con el fin de tener en cuenta la componente estática de la carga. En estos análisis, el PGA varió de 0,3 g a 0,8 g, con el fin de evaluar los asentamientos para valores más altos de PGA, representativos de los terremotos destructivos que se suelen considerar en el diseño de presas. En la Tabla 6 se resumen los asentamientos de la cresta para los tres escenarios sísmicos y para el rango de PGAs considerados.

| Escenario - PGA | Reg-A | Reg-B | Reg-C | Reg-D | Reg-E | Reg-F | Reg-G |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| a) 0.30g        | 0.15  | 0.09  | 0.06  | 0.12  | 0.14  | 0.10  | 0.06  |
| a) 0.50g        | 0.33  | 0.22  | 0.12  | 0.25  | 0.30  | 0.24  | 0.13  |
| a) 0.60g        | 0.44  | 0.30  | 0.16  | 0.33  | 0.40  | 0.33  | 0.18  |
| a) 0.80g        | 0.68  | 0.48  | 0.24  | 0.48  | 0.60  | 0.51  | 0.27  |
| b) 0.30g        | 0.19  | 0.11  | 0.08  | 0.15  | 0.16  | 0.11  | 0.08  |
| b) 0.50g        | 0.40  | 0.25  | 0.16  | 0.30  | 0.35  | 0.25  | 0.16  |
| b) 0.60g        | 0.52  | 0.34  | 0.20  | 0.39  | 0.46  | 0.33  | 0.21  |
| b) 0.80g        | 0.81  | 0.53  | 0.30  | 0.56  | 0.69  | 0.51  | 0.32  |
| c) 0.30g        | 1.66  | 0.50  | 0.13  | 0.85  | 0.12  | 0.27  | 0.27  |
| c) 0.50g        | 2.83  | 0.98  | 0.26  | 1.57  | 0.23  | 0.46  | 0.62  |
| c) 0.60g        | 2.95  | 1.21  | 0.36  | 1.83  | 0.29  | 0.56  | 0.85  |
| c) 0.80g        | 3.17  | 1.69  | 0.54  | 2.25  | 0.45  | 0.78  | 1.37  |

*Tabla 6 – Asentamiento de la cresta para caso de embalse lleno [m]*

Se observan los siguientes aspectos:

- Para el escenario de ondas de cuerpo, en el que se aplican componentes horizontales y verticales tal como se registraron (respetando el grado de independencia y aleatoriedad presente en los registros originales), los asentamientos de la cresta aumentan con respecto a los resultados para escenarios en los que solo se aplican las componentes horizontales. Esta tendencia es consistente con los resultados obtenidos para un embalse vacío.
- Para los escenarios de ondas de Rayleigh, se observa un aumento significativo en los asentamientos de la cresta con respecto a los casos en los que solo se aplican las componentes horizontales. Los resultados para el escenario de Rayleigh también son mayores que los obtenidos para el escenario de ondas de cuerpo, considerando componentes horizontales y

Organiza:

verticales, no correlacionadas. Esta tendencia también se observó para el caso del embalse vacío.

- El registro A presentó el mayor aumento en los asentamientos de la cresta cuando se consideraron las ondas de Rayleigh. Este incremento es considerablemente superior a los obtenidos para el resto de registros. Esta tendencia es, una vez más, coherente con los resultados obtenidos para el caso de embalse vacío, lo que confirma las características particulares del Registro A.
- 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 R es mayor para las amplitudes de aceleraciones bajas). 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 la cresta para los tres escenarios sísmicos.

Como se mencionó anteriormente, en el caso de un embalse lleno, otro aspecto de interés es la dirección de propagación de las ondas (es decir, aguas arriba o aguas abajo). A este respecto, el único caso que hasta ese momento había considerado este efecto era el escenario de la onda de Rayleigh, en el que se consideraba la propagación a lo largo de la dirección aguas abajo. Por lo tanto, para evaluar la influencia de la dirección de propagación de la onda para este escenario, se considera una dirección de propagación aguas arriba. Los resultados obtenidos para este caso se muestran en la Tabla 7.

| Escenario - PGA | Reg-A | Reg-B | Reg-C | Reg-D | Reg-E | Reg-F | Reg-G |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| c) 0.30g        | 1.55  | 0.46  | 0.22  | 0.78  | 0.12  | 0.19  | 0.34  |
| c) 0.50g        | 2.89  | 0.97  | 0.43  | 1.69  | 0.22  | 0.33  | 0.68  |
| c) 0.60g        | 3.04  | 1.23  | 0.56  | 2.06  | 0.27  | 0.41  | 0.88  |
| c) 0.80g        | 3.63  | 1.89  | 0.83  | 2.54  | 0.39  | 0.59  | 1.40  |

*Tabla 7 – Asentamientos de la Cresta para propagación de onda aguas arriba [m]*

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 al 10%, con respecto al caso de propagación descendente.

Otro aspecto investigado, es la respuesta sísmica para ondas de Rayleigh definidas por la componente vertical como referencia, y derivando la componente horizontal correspondiente por medio de soluciones analíticas para un semi-espacio homogéneo. Este análisis tiene como objetivo evaluar si las aceleraciones verticales tienen alguna característica particular que no esté presente en las componentes

Organiza:

horizontales de los registros, al simular un escenario de onda de Rayleigh. En la Tabla 8 se muestran los resultados para este caso.

| Escenario - PGA | Reg-A | Reg-B | Reg-C | Reg-D | Reg-E | Reg-F | Reg-G |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| c) 0.30g        | 0.92  | 0.10  | 0.11  | 0.12  | 0.28  | 0.08  | 0.09  |
| c) 0.50g        | 1.60  | 0.21  | 0.22  | 0.23  | 0.55  | 0.15  | 0.19  |
| c) 0.60g        | 1.93  | 0.27  | 0.28  | 0.29  | 0.71  | 0.18  | 0.26  |
| c) 0.80g        | 2.58  | 0.39  | 0.40  | 0.42  | 1.04  | 0.26  | 0.42  |

*Tabla 8 – Asentamiento de la cresta para ondas Rayleigh usando la componente vertical como referencia [m]*

Los resultados muestran una disminución sistemática en los asentamientos de la cresta cuando se utiliza la componente vertical como referencia para un escenario de onda de Rayleigh. Esta disminución se sitúa en promedio entre el 36 y el 65 %, con respecto a los resultados del escenario original de ondas de Rayleigh. La disminución puede estar asociada a la relación de amplitud de las ondas de Rayleigh, donde las componentes verticales son típicamente 1,65 veces las componentes horizontales. Así, cuando se toman como referencia las componentes verticales, las amplitudes horizontales correspondientes son aproximadamente un 35% inferiores a las de sus homólogas verticales, lo que sirve para explicar los asentamientos más bajos obtenidos.

Un último aspecto estudiado fue la variación del ángulo de fase entre las componentes horizontal y vertical para escenarios de ondas de Rayleigh. El ángulo de fase entre los componentes horizontal y vertical de una onda de Rayleigh es de  $90^\circ$ . Con el fin de evaluar si esta característica contribuye al aumento de los asentamientos observados con respecto a los escenarios de ondas de cuerpo, este ángulo se varió en un estudio paramétrico de  $90$  a  $0^\circ$ . En este estudio paramétrico se consideró el escenario de onda de Rayleigh considerando como referencia la componente vertical. En la Tabla 9 se resumen los resultados obtenidos, mientras que en la Figura 8 se muestra la variación de los asentamientos con el cambio de fase.

| Escenario - PGA | $\theta = 90^\circ$ | $\theta = 60^\circ$ | $\theta = 30^\circ$ | $\theta = 0^\circ$ |
|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| c) 0.30g        | 0.92                | 0.84                | 0.79                | 0.76               |
| c) 0.50g        | 1.60                | 1.46                | 1.29                | 1.22               |
| c) 0.60g        | 1.93                | 1.82                | 1.58                | 1.43               |
| c) 0.80g        | 2.58                | 2.50                | 2.20                | 1.98               |

*Tabla 9 – Asentamientos de la cresta para diferentes ángulos de fase entre componentes*

Organiza:



**Figura 8 – Tendencia de variación del asentamiento permanente de cresta cuando se varía el ángulo de fase.**

Estos resultados muestran una tendencia casi lineal en las relaciones de asentamientos. Se observa que los asentamientos aumentan con el ángulo de fase entre las componentes. Esta tendencia parece ser independiente de la amplitud de aceleración del registro. La disminución máxima de 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 la relación de fase entre las componentes de la onda de Rayleigh es un factor clave en el aumento de los asentamientos al considerar este escenario sísmico.

## Conclusiones

En este estudio, se analizó la respuesta sísmica de una presa típica de escollera 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 reservorio vacío con el fin de caracterizar el comportamiento del cuerpo de la presa para diferentes acciones sísmicas. A continuación, se introdujeron los efectos hidrodinámicos para tener en cuenta el agua embalsada en una condición de embalse lleno.

Para el caso de reservorio vacío y los escenarios de onda de cuerpo, se observó que los asentamientos de la cresta aumentan en un factor de 1.21 a 1.57 cuando se incluyen las componentes verticales en el análisis, con respecto a los resultados obtenidos considerando solo las componentes horizontales. Este incremento, aunque moderado, no es despreciable y pone de manifiesto la importancia de tener en cuenta las componentes verticales (a veces ignoradas) en el análisis sísmico de las presas.

Se observa que los escenarios de onda de Rayleigh resultan en un aumento más pronunciado de los asentamientos, por factores que van de 2.24 a 10.18 con respecto

Organiza:

a los resultados obtenidos considerando solo las componentes horizontales de la onda SH. Estas relaciones se reducen un poco, a 1,70-6,38, cuando se realiza la comparación con respecto a los escenarios de ondas de cuerpo que tienen en cuenta tanto las componentes verticales como las horizontales. El aumento de los asentamientos debido a las ondas de Rayleigh es especialmente pronunciado para un registro particular que presenta un rango de frecuencias dominante muy cercano a la frecuencia fundamental de la presa.

Se realizó un estudio complementario con el fin de evaluar la influencia del contenido de frecuencia de la acción sísmica con respecto a la frecuencia fundamental de la presa en los asentamientos resultantes. Se observa que los registros con contenidos de frecuencia superiores a 1,20 veces la frecuencia fundamental de la presa, no muestran un aumento considerable de los asentamientos cuando se consideran las ondas de Rayleigh, mientras que el aumento es significativamente mayor cuando el contenido de frecuencia está por debajo de ese umbral de frecuencia.

Se estudiaron aspectos adicionales para caracterizar la influencia de las ondas de Rayleigh en los asentamientos finales. Se observó un aumento moderado (2 a 10%) en los asentamientos cuando la dirección de propagación de la onda es aguas abajo-aguas arriba. También se observa una disminución en los asentamientos cuando se utiliza la componente vertical como referencia para definir la onda de Rayleigh, principalmente debido al hecho de que la relación entre las componentes de una onda de Rayleigh es tal que la componente vertical es significativamente mayor y, por lo tanto, conduce a una componente horizontal más baja cuando se usa como referencia. Finalmente, se observa una disminución casi lineal en los asentamientos al reducir el cambio de fase entre las componentes de una onda de Rayleigh. La disminución de los asentamientos es de alrededor del 25 % con respecto a un desplazamiento 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 los asentamientos al considerar este escenario sísmico.

Las conclusiones derivadas del presente estudio ponen de manifiesto la necesidad de seguir investigando sobre la influencia del ambiente sísmico en los asentamientos postsísmicos de las presas de escollera. La selección de un ambiente sísmico particular parece tener un impacto significativo en el desempeño de estas estructuras cuando se someten a terremotos destructivos, mientras que los códigos de diseño que se utilizan a menudo en la práctica profesional no proporcionan pautas específicas con respecto a este aspecto del diseño sísmico.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen el apoyo provisto por la SECyT de la Universidad Nacional de Córdoba y el CONICET para las actividades de investigación asociadas este trabajo.

Organiza:

## Referencias

ABAQUS, 2014. "Analysis User's Manual, Version 6.14". *Dassault Systemes Simulia*, Inc.

Abu-Seeda, H. M., 1996. "Nonlinear Seismic Response of Dams using a Coupled Boundary Element - Finite Element Formulation", *PhD Thesis, Rice University*. Houston, Texas, USA. April 1996.

Bozorgnia, Y. and Campbell, K. W., 2016. "Ground Motion Model for the Vertical-to-Horizontal (V/H) Ratios of PGA, PGV, and Response Spectra". *Earthquake Spectra*, Volume 32, No. 2, pages 951–978, May 2016.

Cocco, L. and Ruiz, M., 2018. "Numerical Implementation of Hardening Soil Model". *Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX*, Volume 1, Chapter 25 (9 Pages). 2018.

FEMA 65, 2005. "Federal Guidelines for Dam Safety, Earthquake Analyses and Design of Dams". May 2005.

FERC, 2018. "Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects". *Federal Energy Regulatory Commission*, 2018.

ICOLD, "Design features of dams to effectively resist seismic ground motion", Bulletin 120, *Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams*, Paris, 2001.

ICOLD, "Selecting seismic parameters for large dams". Guidelines, Revision of Bulletin 72, *Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams*, Paris, 2010.

INPRES-CIRSOC 103, 2013. "Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes - Construcciones en General". *INPRES-CIRSOC*, 2013.

Makan, K. D.; Chen, Y.; Larkin, T. and Chouw, N., 2013. "The influence of vertical seismic ground motion on structures with uplift". *New Zealand Society for Earthquake Engineering*. Wellington, New Zealand. April 2013.

Sarma and Scorer, 2009. "The effect of vertical acceleration on seismic slope stability", *International Conference on performance based design in earthquake geotechnical engineering*. Tokyo, Japan. September 2009.

Seiphoori, A.; Haeri, S. M. and Karimi, M., 2011. "Three-dimensional nonlinear seismic analysis of concrete faced rockfill dams subjected to scattered P, SV, and SH waves considering the dam-foundation interactions effects". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31 (2011) 792-804. Elsevier.

USACE, 2004. "General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-fill Dams". *US Army Corps of Engineers*, EM 1110-2-2300. 2004.

Wang, M. and Chi, S, 2022. "Dynamic response analysis of high earth-rockfill dam subjected to P wave with arbitrary incoming angles". *Soil Dynamics and Earthquake*

Organiza:



*Engineering* 157 (2022) 107260.

Wieland, M., 2012. "Seismic Design and Performance Criteria for Large Storage Dams". 15 *WCEE*, Lisboa, Portugal, 2012.

Organiza:



Tel/Fax: [+54] 11 5252.8838 | Whatsapp: [+54 9] 11 3180.3746 | Hipólito Yrigoyen 1144 Piso 1° - Of. 2 | Buenos Aires  
Horario de atención: de lunes a viernes de 13:00 a 18:00 hs. | Mail: [info@jornadasaie.org.ar](mailto:info@jornadasaie.org.ar) - [www.jornadasaie.org.ar](http://www.jornadasaie.org.ar)