

SEGURIDAD DE PRESAS SOMETIDAS A TERREMOTOS DESTRUCTIVOS.

Luciano Oldecop (*)

Francisco Zabala (*)

Rubén D. Rodari (*)

(*) Instituto de Investigaciones Antisísmicas "Ing. Aldo Bruschi"

Avenida Libertador General San Martín 1290 (o)

C.P.5400 - San Juan - Argentina.

Tel-Fax: 54-0264-4228123

e-mail: oldecop@unsj.edu.ar

RESUMEN

Las características geomorfológicas y climáticas de la región centro-oeste de la Argentina determinan la necesidad de construir presas para el aprovechamiento de los recursos hídricos y la generación de energía. Dichas obras se ubican en su mayoría, aguas arriba de los oasis en los que se concentran la población y la mayor parte de las actividades productivas. Es ésta también la zona de mayor actividad sísmica del país, en donde han ocurrido terremotos extremadamente violentos. Es por ello que la seguridad sísmica de presas es un tema de fundamental importancia en la región. Durante la última década se han producido importantes avances en el conocimiento de las características de los terremotos, a partir del registro instrumental de los movimientos sísmicos en área epicentral. Por otra parte se han realizado también importantes avances en las herramientas de análisis del comportamiento sísmico de presas, fundamentalmente en el campo de los métodos numéricos, tales como el desarrollo de nuevos modelos constitutivos, modelación de problemas en grandes desplazamientos y localización de deformaciones. En el presente trabajo se analizan los factores que tienen influencia en el diseño de presas sometidas a terremotos, los criterios para la verificación de su seguridad y las herramientas de análisis disponibles en la actualidad para llevar a cabo dicha verificación.

SEGURIDAD DE PRESAS SOMETIDAS A TERREMOTOS DESTRUCTIVOS.

**Luciano Oldecop
Francisco Zabala
Rubén D. Rodari**

INTRODUCCIÓN

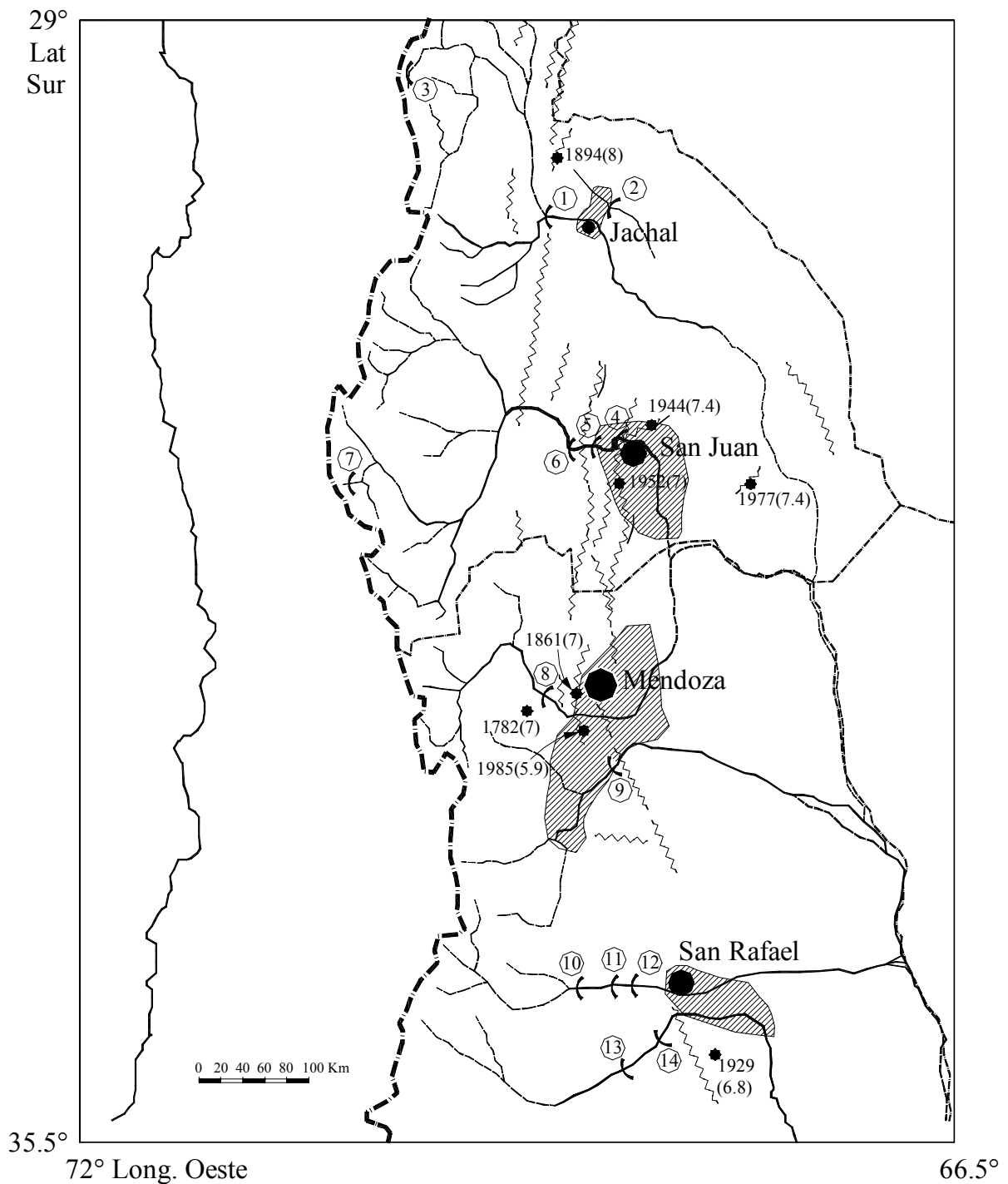
Las características geomorfológicas y climáticas de la región centro-oeste de la Argentina determinan que la población y la mayoría de las actividades productivas se concentren en oasis bajo riego artificial. El abastecimiento de agua a estos oasis, tanto para riego como para consumo humano, y la generación de energía hidroeléctrica han impulsado la construcción de grandes presas en todos los ríos con régimen de caudal permanente. En la figura 1 se señala la ubicación geográfica de 14 presas de embalse que aprovechan las aguas de 7 ríos: Huaco, Jáchal, San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante y Atuel. Seis de estas presas son estructuras de hormigón y las ocho restantes son de materiales sueltos. Dos de ellas, Caracoles y Punta Negra sobre el río San Juan, se encuentran en etapa de construcción y el resto en operación. Todas estas presas se ubican aguas arriba de asentamientos de población importantes y de las tierras de cultivo que constituyen la principal fuente de recursos de la región. El colapso de una de estas obras pondría en riesgo vidas humanas, bienes y líneas vitales tales como sistemas de provisión de aguas potable y de riego. Además, en la alta cordillera se elaboran en la actualidad proyectos mineros tales como Pascua-Lama y El Pachón, en los que se prevé la construcción de presas de almacenamiento de residuos de gran magnitud. El riesgo asociado a estas obras, aunque de naturaleza diferente, es no menos significativo. Un accidente en una presa de residuos pondría en peligro la calidad de los recursos hídricos de todo un oasis.

Por otra parte, la región de Cuyo es la de mayor actividad sísmica del país. En particular, la zona conocida como "Precordillera" en las provincias de San Juan y Mendoza, es la que presenta un mayor número de fallas activas y donde se esperan los mayores terremotos. En la figura 1 se indican los epicentros de los terremotos destructivos de los que se tiene información histórica. Se indica también la traza de las fallas activas que se conocen en la actualidad. Dada la magnitud de los terremotos ocurridos y la longitud de estas fallas, se puede deducir que la zona de la Precordillera de San Juan y Mendoza tiene un nivel de peligrosidad sísmica similar a las de las regiones más castigadas del mundo. En cuanto al oasis de San Rafael, la sismicidad histórica y las evidencias neotectónicas sugieren que la actividad sísmica es menos intensa que en la zona de la Precordillera.

Las consideraciones hechas en este apartado muestran la trascendencia que tiene el problema de la seguridad sísmica de presas para los habitantes de la región. En el presente trabajo se analizan los factores que tienen influencia en el diseño de presas sometidas a terremotos. Se analizan también los criterios para la verificación de la seguridad sísmica de presas y las herramientas de análisis disponibles en la actualidad para llevar a cabo dicha verificación.





ACCIONES SÍSMICAS PARA LA VERIFICACIÓN DE PRESAS.

Durante la década del 90, se realizaron avances trascendentales en el conocimiento de las características de los movimientos sísmicos en el área epicentral. Esto se debe fundamentalmente al incremento en extensión y densidad de las redes de acelerómetros, que comenzaron a instalarse en muchos países del mundo a partir de la década del 80. Para ilustrar este avance, se puede comparar la información obtenida en el terremoto de San Juan de 1977 con la del terremoto de Taiwan en 1999. Del primer terremoto se tienen dos registros obtenidos de instrumentos distantes 80 Km del epicentro aproximadamente.



Presa	Tipo	Estado	Presa	Tipo	Estado
① Cuesta del Viento	MSZ	O	⑧ Potrerillos	MSP	O
② Los Cauquenes	H	O	⑨ El Carrizal	MSZ	O
③ Pascua-Lama	RM	P	⑩ Agua del Toro	H	O
④ Ullúm	MSZ	O	⑪ Los Reyunos	MSZ	O
⑤ Punta Negra	MSP	C	⑫ El Tigre	MSZ	O
⑥ Los Caracoles	MSP	C	⑬ Los Nihuales	H	O
⑦ El Pachón	RM	P	⑭ Valle Grande	H	O

REFERENCIAS

-  Oasis bajo riego
-  Terremoto histórico:
Año(Magnitud)
-  Falla activa
-  Presa

MSZ: Materiales sueltos zonificada
MSP: Mat. sueltos con pantalla de H°
H: Presa de Hormigón
RM: Presa de relaves mineros

O: En operación
C: En construcción
P: En proyecto

Figura 1. Región cento-oeste de la Argentina. Presas, fallas activas y epicentros de terremotos históricos.

En contraposición, al momento de ocurrir el terremoto de 1999 existían en Taiwan más de mil instrumentos de registro instalados, distribuidos en una superficie de 36000 Km² (equivalente al 40% del territorio de la provincia de San Juan). En un radio de 50 Km del epicentro se obtuvieron registros de aproximadamente 80 acelerómetros, algunos de ellos ubicados a pocos cientos de metros de la traza de la falla que dio origen al terremoto. El aumento de la cantidad de datos registrados y fundamentalmente la posibilidad de obtener medidas del movimiento en área epicentral (a menos de 10 Km de la fuente sísmica) ha permitido identificar nuevas características de los movimientos sísmicos que antes se desconocían.

En la figura 2 se muestran los espectros de respuesta para amortiguamiento del 5% calculados a partir de algunos registros instrumentales obtenidos en algunos de los últimos grandes terremotos. Todos ellos corresponden a terremotos de corteza y a registros obtenidos en roca o suelo duro, a corta distancia de la fuente sísmica. Estos espectros de respuesta se comparan en la misma figura con los que resultan de aplicar el espectro de diseño normalizado propuesto por Seed e Idriss (1982) y la ley de atenuación propuesta por Seed y Schnabel (1980), sobre la base de la información instrumental previa a la década del 80. El espectro normalizado de Seed e Idriss (1982) se obtuvo como envolvente conservadora de espectros calculados para 59 registros en roca y suelo duro. Se muestra la envolvente media, calculada para la magnitud y la distancia a la fuente sísmica correspondiente a cada caso. La figura 2 pone en evidencia que las previsiones sísmicas que hace dos décadas se asumían para el diseño como conservadoras, han resultado ampliamente superadas por registros reales obtenidos en algunos de los últimos terremotos.

De la figura 2 se pueden varias conclusiones. En primer lugar, la nueva información instrumental muestra que los valores de aceleración máxima del terreno que ocurren en zona epicentral pueden ser significativamente mayores a los límites que se asumían como físicamente posibles antes de la década de los 80. Para sitios en roca, la mayor aceleración del terreno que se suponía razonablemente posible, cualquiera fuera la magnitud del terremoto, era 0.8g. Este valor ha sido ampliamente superado en muchos registros de área epicentral obtenidos en terremotos recientes (ver figura 2). El mayor valor de aceleración del terreno medido hasta el momento es de 2.09g en dirección vertical y sentido ascendente y corresponde a un registro en roca obtenido durante el terremoto de Nahanni (Canadá) de 1895 a 6 Km de la falla. Esta característica de los movimientos sísmicos de área epicentral no tiene mayor influencia en la verificación de grandes presas de materiales sueltos, ya que su periodo fundamental se ubica en la zona post-pico del espectro de pseudoaceleración. Por el contrario, las elevadas aceleraciones en roca son determinantes en la verificación de estructuras rígidas como presas de gravedad de hormigón y estructuras accesorias como vertederos y otras obras de descarga, particularmente aquellas que por ser críticas para la seguridad de la pesa, deben permanecer operativas aún después de haber ocurrido un evento extremo como es el terremoto de seguridad.

Otra característica importante que han puesto de manifiesto los registros instrumentales, es la influencia de la topografía sobre las características locales del movimiento sísmico. Se han observado importantes amplificaciones del movimiento en registros obtenidos en puntos elevados del terreno. Durante el terremoto de Northridge de 1994 se obtuvieron registros simultáneos en el estribo de margen izquierda de la presa de Pacoima (113 metros de altura) y en el fondo del valle. Los dos instrumentos están fundados en roca. En la figura 3 se comparan los espectros de respuesta elástica para el 5% de amortiguamiento calculados para cada una de las tres componentes obtenidas en el estribo y en el fondo del valle. Se puede ver

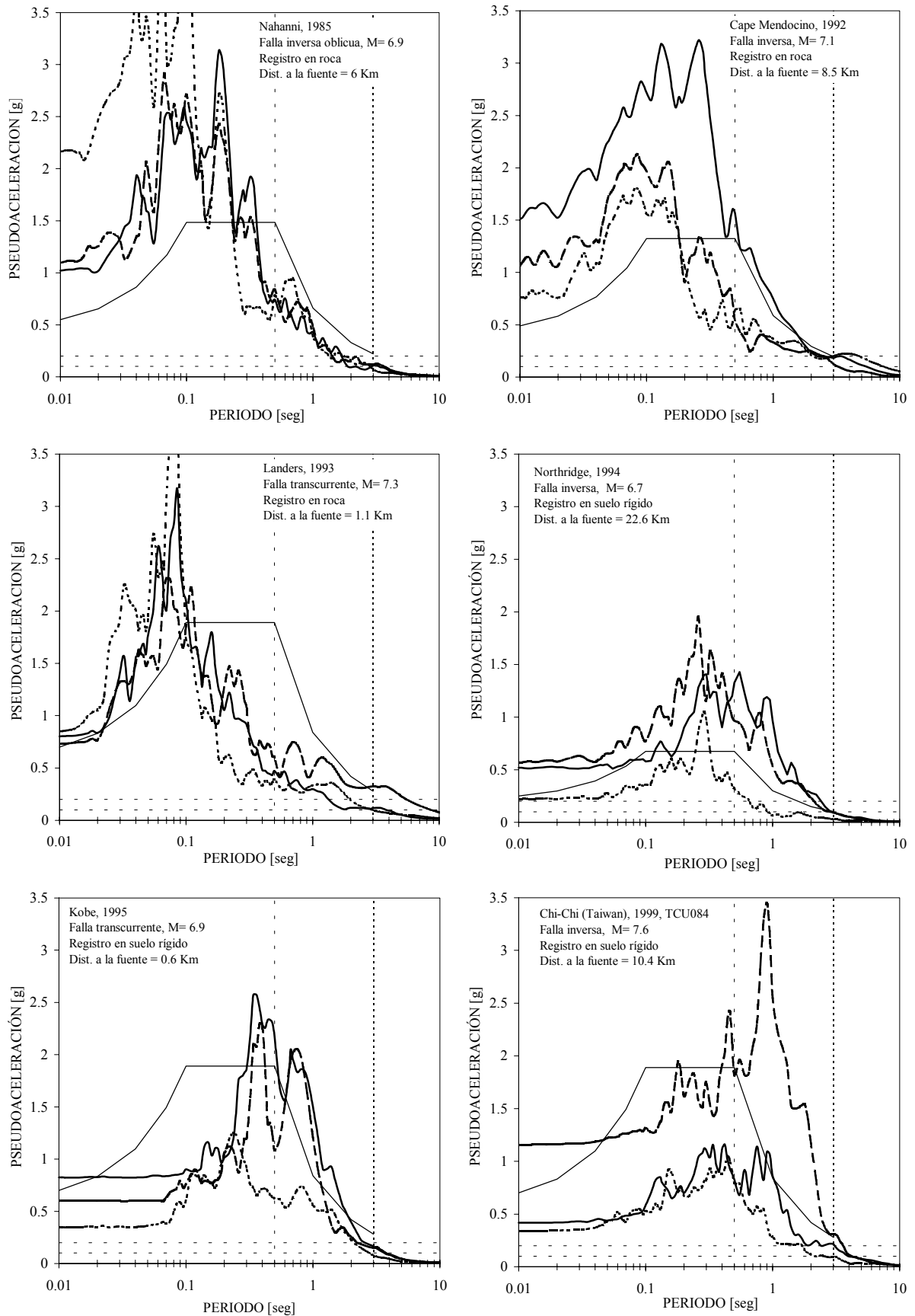


Figura 2. Espectros de respuesta lineal para el 5% de amortiguamiento calculados a partir de registros de algunos terremotos recientes. Línea continua: componente N-S, línea de trazos: componente E-O, línea de puntos: componente vertical, línea delgada: espectro de diseño propuesto por Seed e Idriss (1982) con aceleración máxima del terreno ajustada en base a la ley de atenuación de Seed y Schnabel (1980). (Datos de PEER Strong Motion Database)

que el morro de roca que constituye el estribo, provocó la amplificación de las aceleraciones con un factor entre 3 y 3.5 en las componentes horizontales y de 6.5 en la componente vertical. La dirección N-S coincide con la sección más esbelta del morro (relación base/altura $\cong 2$). Estas observaciones ponen en evidencia las limitaciones que tiene la tradicional hipótesis de considerar la roca de fundación y los estribos como una única frontera indeformable a través de la cual se introduce la acción sísmica sobre la presa. Además sugieren que, dependiendo de la topografía de los estribos, el movimiento sísmico aplicado a la base de la presa como terremoto de verificación puede ser insuficiente para verificar estructuras accesorias, como por ejemplo vertederos, fundadas sobre estribos esbeltos.

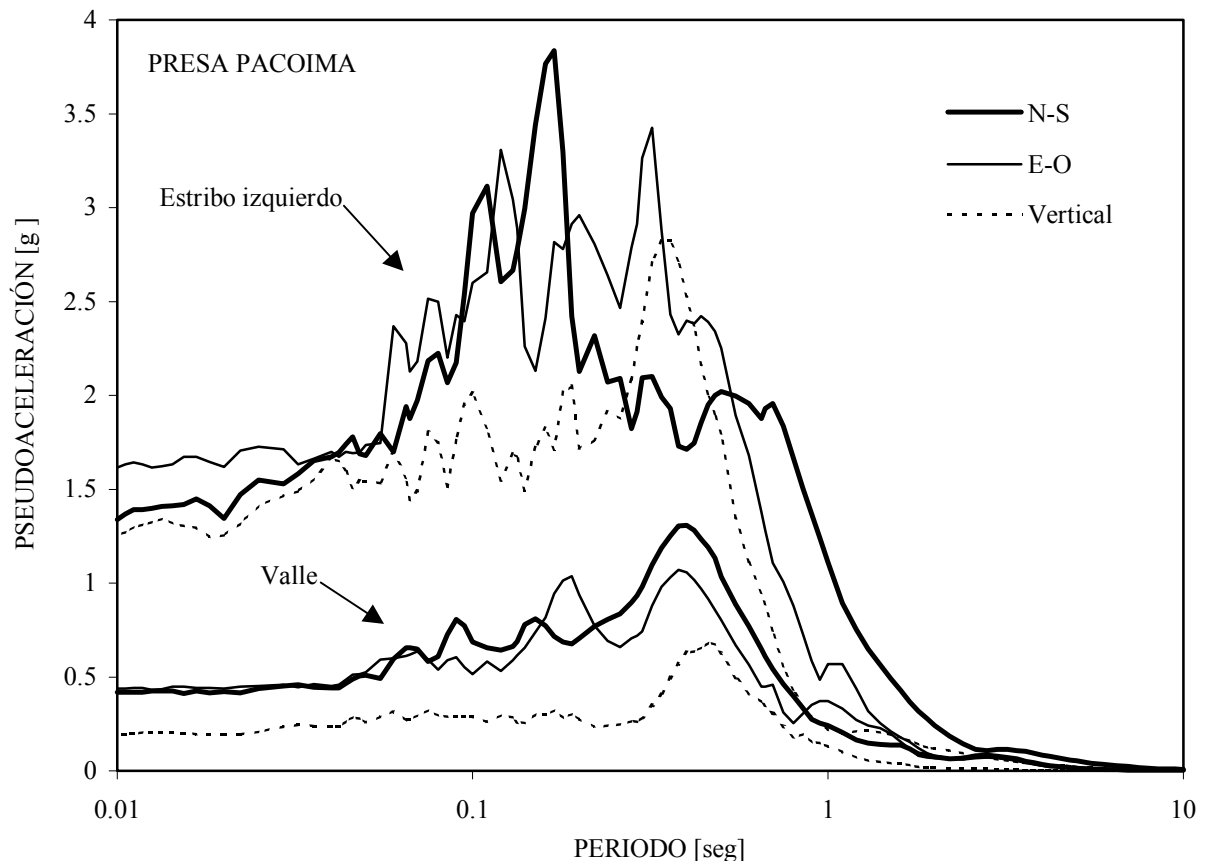


Figura 3. Espectros de respuesta lineal para el 5% de amortiguamiento calculados a partir de registros en roca obtenidos en el estribo izquierdo de la presa Pacoima y en el fondo del valle, aguas abajo de la presa. (Datos de PEER Strong Motion Database)

Por último, también se ha observado que muchos de los registros de zona epicentral recientemente obtenidos contienen grandes pulsos de velocidad, alcanzando valores significativamente mayores a los máximos que se suponían como razonablemente posibles antes de la década del 80. Seed e Idriss (1982) recomiendan estimar la velocidad máxima del terreno dentro de un radio de 50 Km del epicentro mediante las expresiones:

$$\text{en roca: } v_{\max}/a_{\max} = 55 \text{ cm/seg/g}$$

$$\text{en suelo rígido: } v_{\max}/a_{\max} = 110 \text{ cm/seg/g}$$

donde v_{\max} y a_{\max} son respectivamente la velocidad y aceleración máximas del terreno. Combinando estas expresiones con una aceleración máxima del terreno de 0.8g, resultan

valores de 44 y 88 cm/seg para roca y suelo rígido respectivamente. En contraste, el registro indicado como TCU084 en la figura 2 presenta un pico de velocidad del terreno de 263 cm/seg. Se atribuyen estos pulsos a los efectos de directividad (interferencia constructiva de las ondas generadas a lo largo de la superficie de ruptura) y “fling” (componente del movimiento debida a la deformación tectónica) que se detectaron en varios terremotos recientes como los de Loma Prieta (EEUU, 1989), Landers (EEUU, 1993), Kocaeli (Turquía, 1999), Chi-Chi (Taiwan, 1999) y Duzce (Turquía, 1999). Estos pulsos de velocidad implican el contenido de largos periodos en el acelerograma, tal como se ve en los espectros de respuesta lineal de la figura 2 para de los terremotos de Kobe (1995) y Chi-Chi (1999). Estas componentes de largo periodo afectan particularmente a las grandes presas de materiales sueltos que típicamente tienen su periodo fundamental (en rango inelástico) entre 0.5 y 2.5 segundos (rango indicado con líneas de trazo verticales en la figura 2).

En varias regiones sísmicas del mundo se ha iniciado desde hace algunos años un proceso de revisión de la seguridad sísmica de presas, que ha llevado muchos casos a ejecutar trabajos de refuerzo de las presas. Marcuson et al (1996), describen las obras de refuerzo sísmico efectuadas en 36 presas ubicadas en Estados Unidos. Este proceso de revisión está impulsado principalmente por los conocimientos recientemente adquiridos sobre las características de los movimientos sísmicos en área epicentral. Se debe tener presente que muchas de las presas construidas antes de la década del 70 fueron diseñadas con métodos pseudoestáticos aplicando valores de coeficiente sísmico entre 0.1 y 0.2 g (rango indicado con líneas de trazos horizontales en la Figura 2) (Seed, 1981). Por otra parte, los avances en las técnicas de caracterización de las fuentes sísmicas, fundamentalmente en neotectónica y paleosismología, han llevado a revalorar la amenaza sísmica en los emplazamientos de las presas, permitiendo detectar casos en los que esta amenaza había sido subestimada al momento de verificar la presa.

Es importante destacar el papel fundamental que tienen los estudios de paleosismicidad en la caracterización sísmica de una región. Para la verificación sísmica de presas estos estudios tienen una particular importancia ya que los terremotos de verificación que usualmente se especifican para estas obras tienen intervalos de recurrencia entre 5000 y 10000 años, en tanto que la ventana de observación de la actividad sísmica histórica en la región centro-oeste de la Argentina se extiende solamente por poco más de 200 años. Los estudios de paleosismicidad permiten ampliar la ventana de observación a todo el cuaternario (1.6 Ma) lo cual aporta una gran mejora en nuestra capacidad de comprender y caracterizar la actividad sísmica de una región. Recientemente se han identificado en la región algunas evidencias de actividad paleosísmica (Paredes y Perucca, 2000; Fauque y otros, 2002).

CRITERIOS DE VERIFICACIÓN SÍSMICA DE PRESAS

De acuerdo a las recomendaciones del ICOLD, las presas se verifican bajo dos escenarios: el terremoto de operación normal y el terremoto de seguridad, que generalmente coincide con el máximo creíble para el emplazamiento de la presa (Wieland, 1999). Sometida al terremoto de operación normal, se espera que la presa sea capaz de resistir la acción sísmica con daños menores, tales que no impliquen una interrupción de su operación. Por otra parte, la verificación con el terremoto de seguridad tiene el objetivo de comprobar que la presa no ponga en riesgo vidas humanas y bienes situados aguas abajo de la misma. Bajo este terremoto, se espera que la estructura no colapse ni alcance una situación de fuga de agua incontrolada, aunque sí se admite que ocurran daños importantes e incluso que la presa quede fuera de servicio y que sea necesario vaciar el embalse.

Desde el punto de vista metodológico y considerando las herramientas disponibles, el análisis del comportamiento de la presa bajo la acción del terremoto de operación normal en la

mayoría de los casos no implica grandes dificultades. Usualmente la verificación incluye comprobaciones de estabilidad, limitación de deformaciones o desplazamientos permanentes y verificación de tensiones en estructuras de hormigón. Por el contrario, bajo la acción del terremoto de seguridad se debe esperar que las presas ubicadas en zonas de intensa actividad sufrirán daños importantes, poniendo a la estructura en una situación cercana al colapso. De hecho, la evaluación de la seguridad debe incluir idealmente el análisis de todos los posibles mecanismos de colapso de la estructura, a fin de estudiar el margen de seguridad de la estructura respecto a cada uno de esos mecanismos. Los tipos de daño que puede causar un terremoto sobre la estructura propiamente dicha de presas de materiales sueltos (Seed, 1981) y sobre presas de hormigón (USACE, 1999) se resumen de modo general en la tabla 1.

Tabla 1. Daños que puede producir un terremoto sobre presas de materiales sueltos y de hormigón.

MATERIALES SUELTOS	Asentamientos (pérdida de altura de resguardo)
	Deslizamiento de taludes
	Deslizamiento de la presa sobre su fundación
	Agrietamiento de órganos de estanqueidad y fuga de agua
HORMIGÓN	Agrietamiento del hormigón
	Apertura de juntas constructivas
	Deslizamiento a lo largo de juntas constructivas
	Deslizamiento y/o rotación sobre la fundación

La evaluación de la seguridad en situaciones de daño elevado cómo las que se pueden esperar por acción del terremoto de seguridad, requieren de herramientas de análisis sofisticadas. Desde el punto de vista mecánico e hidráulico, el análisis a realizar debe contemplar la ocurrencia de una serie de fenómenos complejos. En presas de materiales sueltos los fenómenos a tener en cuenta suelen ser: la ocurrencia de deformaciones plásticas, licuación o movilidad cíclica de materiales granulares saturados, localización de deformaciones en superficies de deslizamiento, acumulación de deformaciones permanentes, agrietamiento, problemas de grandes deformaciones y flujo de agua con erosión de partículas. En el análisis del comportamiento de presas de hormigón pueden ser significativos los fenómenos interacción dinámica con la fundación y con el agua embalsada, agrietamiento y efectos de escala, generación de subpresión en grietas y en la fundación, deslizamiento y separación de la presa respecto de la fundación, comportamiento mecánico de la fundación y de estribos fracturados.

En general, las herramientas que se requieren para hacer un análisis detallado del comportamiento de la presa bajo la acción del terremoto de seguridad se encuentran aun en desarrollo o bien se utilizan para investigación, pero no son comunes en el ámbito profesional. La razón principal por la cual usualmente no se aplican estas herramientas al diseño es que sus resultados aun no han podido ser convenientemente contrastados con mediciones y observaciones de comportamiento de casos reales. El principal obstáculo para ello es el escaso número de presas que se han visto sometidas movimientos sísmicos intensos (de área epicentral). Más escasos aún son los registros instrumentales de la respuesta dinámica de presas sometidas a movimientos sísmicos.

HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE PRESAS.

Los nuevos conocimientos sobre movimientos sísmicos de área epicentral, que llevan a especificar terremotos de seguridad más intensos, han traído nuevos desafíos en el campo del análisis del comportamiento sísmico de presas, poniendo en evidencia las limitaciones de algunas herramientas de análisis de uso habitual en la práctica profesional. Los movimientos sísmicos que se postulan actualmente para la verificación de la seguridad de presas ubicadas

en zonas de intensa actividad sísmica llevan al análisis a rangos de comportamiento no considerados anteriormente, cambiando en muchos casos los objetivos y la metodología de la verificación.

Por ejemplo, en el caso de presas de materiales sueltos con núcleo central, hasta hace algunos años el objetivo del diseño era limitar las presiones de poros que genera la acción del terremoto en el cuerpo de la presa y su fundación. La metodología clásica de análisis consistía en estimar el incremento de presión de poros provocado por el terremoto y luego evaluar las condiciones de estabilidad del talud en presiones efectivas, es decir con la resistencia al corte del material degradada por pérdida de tensión efectiva (Banerjee y otros, 1979). Si se lleva a cabo un análisis de este tipo para una presa ubicada en el área epicentral de un terremoto destructivo, se comprueba que, aún cuando los materiales utilizados en su construcción sean bien compactados, la relación de presión de poros ($ru = \text{presión de poros}/\text{tensión de confinamiento}$) al final del terremoto resulta próxima al 100% en extensas zonas de la estructura. Este tipo de resultados se obtuvieron para la presa Cuesta del Viento (figura 4) al ser sometida a la acción del terremoto de seguridad ($M = 7.5$), aplicando el método de Seed-Lee-Idriss (Zabala y otros, 1994).

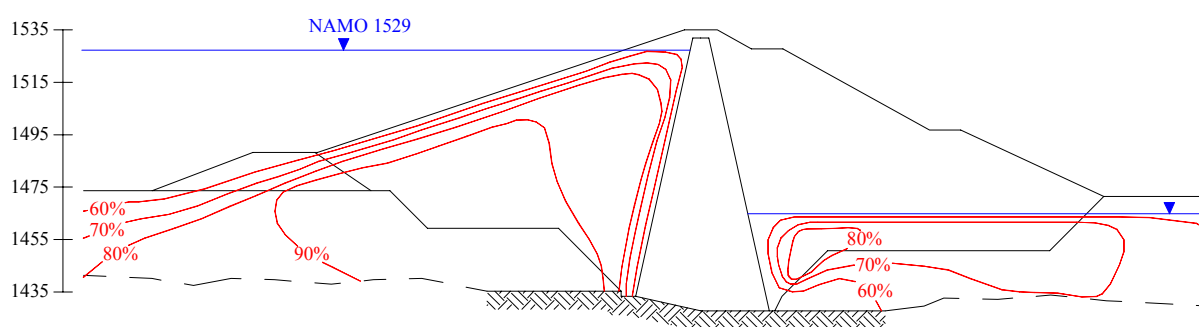


Figura 4. Incremento de presión de poros en la Presa Cuesta del Viento obtenido mediante el método de Seed-Lee-Idriss para el terremoto de seguridad ($M_w = 7.5$, aceleración max. del terreno = $0.5g$)

Los resultados del análisis muestran una condición al final del terremoto en la que el talud de aguas arriba no es estable considerando su resistencia al corte en presiones efectivas. Sin embargo, esto no implica que la estructura se encuentre en riesgo de colapso. Tratándose de un material granular denso, cuando ocurran deformaciones de corte tendrá tendencia a dilatar y por lo tanto las presiones de poro caerán rápidamente. Su resistencia residual en condiciones no drenadas es elevada y por lo tanto la estabilidad de la estructura está asegurada, aun cuando el terremoto efectivamente provoque las elevadas presiones de poro que se muestran en la figura 4. Durante la aplicación de la excitación sísmica el material de comportamiento dilatante puede alcanzar la movilidad cíclica que implica una pérdida momentánea de rigidez sin pérdida de resistencia. En este caso la cuestión que resta por resolver es estimar las deformaciones permanentes que provoca el terremoto y verificar que dichas deformaciones no impliquen un riesgo para la estructura (riesgo de sobrepaso por ejemplo).

Las herramientas de uso habitual en la práctica profesional para llevar a cabo el análisis del comportamiento de presas sometidas a acciones sísmicas son: la evaluación de las condiciones de estabilidad con métodos de equilibrio límite, el análisis de la respuesta dinámica con modelos de elementos finitos de tipo elástico o lineal equivalente y la estimación de desplazamientos permanentes mediante el método de Newmark (1965). Todas estas herramientas se basan en algoritmos relativamente simples, requieren poca información de entrada y proveen resultados de fácil interpretación. Además existe una abundante experiencia en su aplicación. En estas características radica su confiabilidad. Sin embargo es importante

tener presente que estas ventajas surgen de las fuertes hipótesis simplificadoras utilizadas en la formulación de los modelos, que implican también fuertes limitaciones para su aplicación.

Para llevar a cabo el análisis de las deformaciones de presas de materiales sueltos bajo la acción de movimientos sísmicos se ha desarrollado un programa de elementos finitos denominado GEOSIS (Zabala,1997). El programa permite realizar un análisis dinámico no lineal en tensiones efectivas. Utiliza un modelo constitutivo de plasticidad generalizada para representar el comportamiento de los materiales granulares (Zabala y Oldecop, 2000). El modelo constitutivo permite reproducir con razonable aproximación los aspectos relevantes del comportamiento de los materiales granulares bajo las diferentes condiciones de sollicitación a que están sometidos: material seco (en condiciones drenadas), material saturado (en condiciones no drenadas), cargas gravitatorias y cargas sísmicas (dinámicas). Algunos de los aspectos del comportamiento mecánico que este modelo permite tener en cuenta son:

- Dependencia de la rigidez volumétrica y de corte con el nivel de confinamiento.
- Generación de deformaciones permanentes simultáneamente dependientes del incremento de carga, del estado de tensiones efectivas actual y de la historia de carga del material.
- Comportamiento contractivo o dilatante en condiciones drenadas, dependiendo de la relación de vacíos y del nivel de confinamiento.
- Resistencias de pico y residual en condiciones drenadas y no drenadas.
- Densificación del material en condiciones drenadas por aplicación de cargas cíclicas.
- Fenómenos de licuación o movilidad cíclica de materiales saturados no drenados por aplicación de cargas cíclicas.

El programa GEOSIS obtiene la respuesta de una presa de materiales sueltos bajo la acción combinada de las cargas gravitatorias, peso propio y carga de agua, y las fuerzas inducidas por el terremoto. Entre las variables de la respuesta que pueden obtenerse están: el desplazamiento, la velocidad y la aceleración en cada instante, en cualquier nudo de la malla que represente a la estructura, y los desplazamientos permanentes al final del terremoto de verificación.

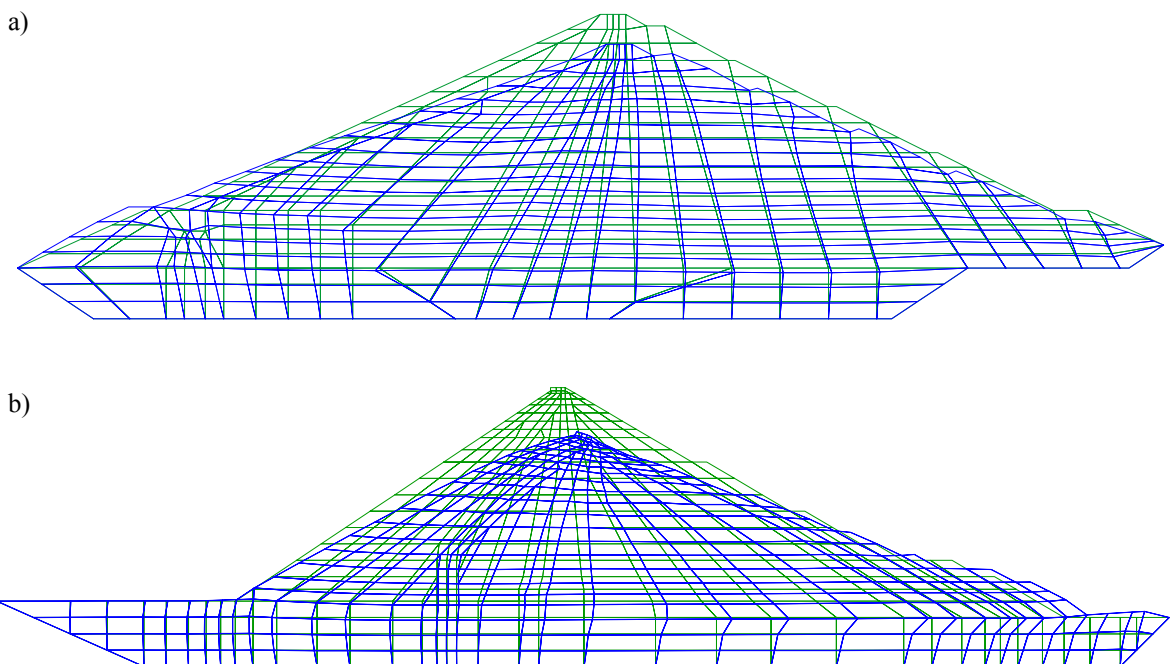


Figura 5. Resultados obtenidos mediante el programa GEOSIS. Desplazamientos permanentes (amplificados en el gráfico) causados por un movimiento sísmico en: a) una presa zonificada con núcleo de arcilla (Los Reyunos) y b) una presa con pantalla de hormigón (Caracoles).

En la Figura 5 se presentan ejemplos típicos de los resultados que se obtienen con el programa GEOSIS. En la figura 5.a se muestra la malla deformada, con desplazamientos multiplicados por diez, para la presa Los Reyunos al final del terremoto de verificación. Esta presa está construida con núcleo central de arcilla y espaldones de aluvión. Se puede observar que el espaldón saturado de aguas arriba se deforma en forma de “S” con desplazamientos hacia abajo y hacia aguas arriba en la zona del coronamiento. En la Figura 5.b se muestra la malla deformada para la presa Caracoles que es una presa de grava con pantalla de hormigón y en ese caso la malla deformada indica desplazamientos hacia abajo y hacia aguas abajo provocados por efecto combinado de la acción sísmica y de las cargas gravitatorias, peso propio y carga de agua sobre la pantalla. El comportamiento para cada caso es diferente, en el primer caso se esperan desplazamientos del talud saturado hacia el embalse y en el segundo desplazamientos del talud de aguas abajo. Se observa en estos resultados que cualitativamente el modelo matemático tiene una adecuada sensibilidad a las condiciones de carga y comportamiento típico de los materiales.

Por otra parte se debe tener en cuenta que en una presa pueden ocurrir mecanismos de falla que impliquen la localización de deformaciones, es decir, fallas de deslizamiento. Las elevadas aceleraciones que pueden esperarse en la zona de coronamiento, debido a los efectos de amplificación dinámica que introduce la estructura de la presa, pueden inducir este tipo de fallas en esta zona. Otras superficies de falla pueden ser inducidas por la presencia de materiales de baja resistencia. Para estos casos, es importante señalar que, a menos que se utilicen técnicas especiales, en general los modelos por elementos finitos (como el programa GEOSIS) no pueden reproducir adecuadamente este tipo de fallas que involucran la localización de deformaciones. El desarrollo de modelos capaces de tener en cuenta este tipo de fenómenos está actualmente en desarrollo con la utilización de mallas de elementos finitos adaptables, modelos constitutivos no locales y métodos de partículas.

En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos con un modelo de partículas (Material Point Method, MPM) para un caso de estudio teórico de un talud en un material puramente cohesivo sometido a la acción de la gravedad y a una rampa de aceleración horizontal que provoca la falla. Se observa cómo el modelo es capaz de capturar el mecanismo de falla, generando superficies de deslizamiento donde se concentran las deformaciones (localización). La superficie de deslizamiento principal se compone de segmentos circulares y un tramo recto definido por la frontera rígida inferior. Al pie del talud se forma una cuña de empuje pasivo que es expulsada hacia arriba para permitir el movimiento horizontal de la cuña principal. La aceleración de falla obtenida es de 0.25 g. Este resultado es razonable si se compara con la solución obtenida por un método equilibrio límite de dovelas (0.14 g), que no asegura la compatibilidad cinemática y con la solución por el teorema del límite superior del colapso plástico (0.31g) que asegura la compatibilidad cinemática pero no el equilibrio.

COMENTARIOS FINALES

El problema de la seguridad sísmica de presas tiene una gran trascendencia en el centro-oeste de la Argentina. Las presas son las estructuras de mayor magnitud y complejidad que hasta el momento se han construido en esta región, que es también la que presenta la mayor actividad sísmica del país. Estas circunstancias justifican el esfuerzo por adquirir una mejor comprensión del comportamiento sísmico de estas estructura y por desarrollar metodologías más confiables para evaluar su seguridad.

El análisis de la seguridad sísmica de presas comprende diferentes acciones entre las que se

destacan:

- Investigación de la amenaza sísmica en la ubicación.
- Investigación de las condiciones geotécnicas de la ubicación: propiedades de los materiales de fundación, geometría del vaso y de la fundación.
- Investigación de las características mecánicas de los materiales de la presa.
- Obtención de la respuesta dinámica de la presa teniendo en cuenta todos los fenómenos que tengan una influencia significativa en el comportamiento.
- Evaluación de los efectos del terremoto en la estructura de la presa y en su seguridad.

Estas acciones en muchos casos se ejecutan en forma parcial. En particular es poco frecuente contar con toda la información de campo y de laboratorio necesaria para este tipo de análisis. En otros casos aunque la información existe como fruto de intensas campañas de investigación, está no está adecuadamente sistematizada y resumida para hacerla aprovechable.

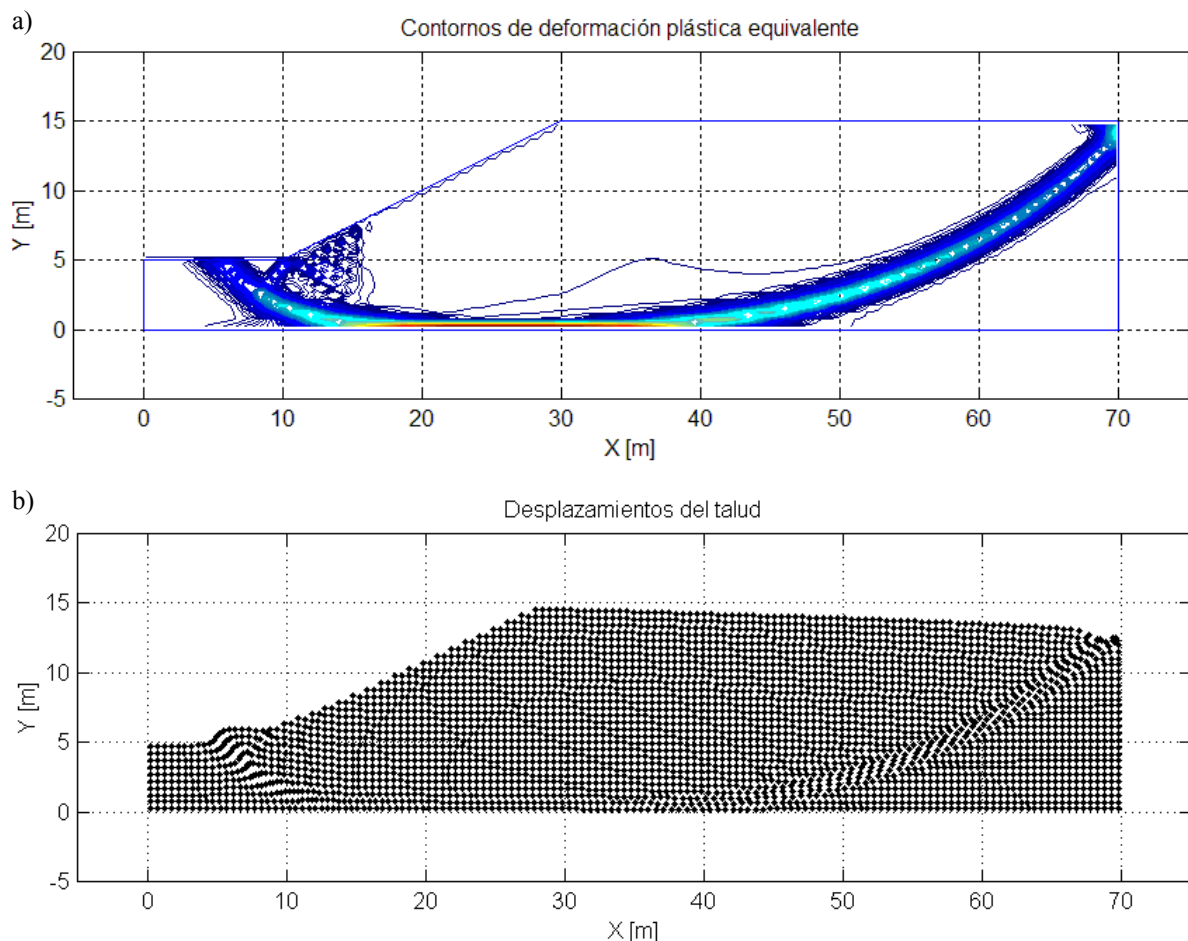


Figura 6. Análisis de colapso de un talud cohesivo con un modelo de partículas bajo un campo de aceleración horizontal estático (Material: Mohr-Coulomb sin endurecimiento, Peso específico: 2 ton/m³, Módulo de elasticidad: 200 MPa, Módulo de Poisson : 0.25 Ángulo de fricción: 0°, Cohesión: 50 kN/m²). a) Contornos de deformación plástica. b) Desplazamientos.

Es importante para la ingeniería de presas, reconocer el hecho de que en la década del 90, se han realizado importantes avances en el conocimiento del riesgo sísmico a través de los registros instrumentales obtenidos en área epicentral, en diferentes lugares del mundo. Estos conocimientos tienen un impacto directo en la estipulación del terremoto de seguridad, que ha de utilizarse para la verificación de presas ubicadas a corta distancia (menos de 10 km.) de

fuentes sismogénicas. En muchos casos, la consideración de estos nuevos conocimientos ha llevado a un aumento significativo de la intensidad del acelerograma de verificación y en consecuencia se han requerido acciones de remediación en las presas en operación o la actualización de los proyectos de obras a ejecutar en el futuro. Si bien estos cambios de criterio ya han ocurrido en algunos ambientes de la ingeniería de presas, en otros se observa una fuerte inercia de pensamiento que lleva a considerar como universalmente válidos los criterios de diseño sísmico establecidos a partir de mediados del s.XX. En parte, esto se puede justificar con el hecho de que muy pocas presas han colapsado a causa de terremotos en las últimas décadas, hecho que puede llevar a pensar que estas presas son “intrínsecamente” seguras ante acciones sísmicas. Sin embargo debe tenerse en cuenta que los terremotos destructivos son fenómenos muy poco frecuentes y las presas son estructuras también poco frecuentes. Por lo tanto, se puede afirmar que aun no se tiene experiencia sobre cuál sería el comportamiento de una presa de materiales sueltos sometida a la acción de movimientos sísmicos como los registrados en los últimos terremotos.

Las herramientas de análisis de uso habitual en la práctica profesional incluyen modelos relativamente simples que ofrecen ventajas en cuanto a confiabilidad y facilidad de interpretación de sus resultados pero que tienen limitaciones en cuanto a su aplicabilidad. Es importante tener un especial cuidado en el análisis de la validez de estos modelos y en la interpretación de sus resultados, cuando se prevea que el comportamiento sísmico de la presa involucre fenómenos complejos tales como licuación o movilidad cíclica de materiales granulares saturados, inestabilidad por degradación de resistencia, localización de deformaciones, respuesta dinámica de sistemas plásticos, agrietamiento, efectos de escala, respuesta dinámica de bloques con separación de la fundación, etc.

Por otra parte existen en la actualidad herramientas de análisis más sofisticadas, que permiten tener en cuenta muchos de los fenómenos complejos que ocurren en una presa sometida a una acción sísmica. Muchas de estas herramientas se encuentran aún en etapa de desarrollo. Otras ya están disponibles en forma de programas comerciales. La dificultad principal para su aplicación es que, dada la complejidad de los algoritmos utilizados en los modelos, es muchas veces imposible juzgar cuál es el grado de aproximación de los resultados a la realidad. El procedimiento ideal para esto sería poder contrastar las predicciones de los modelos con datos de comportamiento real. Pero en la actualidad los datos de medida de comportamiento sísmico de presas son todavía muy escasos y en algunos aspectos inexistentes.

Considerando la complejidad del comportamiento sísmico de las presas y la todavía limitada capacidad de análisis de que dispone la ingeniería, frecuentemente la solución más adecuada incluye la adopción de criterios de diseño conservadores y dotar a la obra de detalles constructivos que la protejan de las acciones sísmicas. En este sentido es importante que los profesionales que conducen el proyecto tengan una buena comprensión de las herramientas de análisis utilizadas para evaluar la seguridad sísmica de la estructura, a fin de hacer una correcta valoración de los resultados, evitando otorgarles más confianza de la que merecen.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Promoción de la Ciencia y Tecnología (ANPCyT) por el financiamiento otorgado para el desarrollo del proyecto PICT 13-09912 “Evaluación de la seguridad de presas de materiales sueltos bajo la acción de cargas de servicio y de terremotos destructivos”.

REFERENCIAS

- Abrahamson, N. A. y W. J. Silva (1997). "Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes". *Seismological research letters*, Vol 68, No. 1.
- Banarjee N.G., H.B. Seed y C.K. Chan (1979). "Cyclic behavior of dense coarse-grained materials in relation to the seismic stability of dams". Reporte No. UCB/EERC 79/13. Universidad de California, Berkeley.
- Fauqué, L.; J. Cortés, A. Folguera Y M. Etcheverria (2002). Evidencias de peligrosidad geológica en el Valle del Río Mendoza aguas abajo de Uspallata. Congreso Argentino de Presas, San Juan, Argentina.
- Kramer S.L. (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Marcuson, W. F., P. F. Hadala y R. H. Ledbetter (1996). "Seismic rehabilitation of earth dams". *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, Vol 122, No. 1, 7-20.
- Newmark, N. (1965). "Effects of earthquakes on dams and embankments". *Geotechnique*, Vol. 15, No. 2, 139-160.
- Paredes, J y L. P. Perucca (2000). Evidencias de paleolicuefacción en la Quebrada del Río Acequión, Sarmiento, San Juan. *Revista de la AGA*, 55, 4, 394-397.
- Seed, H.B. (1981). "Earthquake-Resistant Design of Earth Dams", International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Vol III, St. Louis, Missouri.
- Seed, H. B. y I. M. Idriss (1982). *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. EERI Monograph, Berkeley.
- USACE (1999). Response spectra and seismic analysis for concrete hydraulic structures. Engineer Manual 1110-2-6050, Washington.
- Wieland, M. (1999) "Position Paper on Earthquake Safety of Large Dams". Comité ICOLD: Seismic Aspects of Dam Design.
- Zabala, F; L. Oldecop y J.L. Almazán (1994) "Análisis de la Seguridad Sismorresistente de la Presa Cuesta del Viento". *3º Seminario Argentino de Grandes Presas*, Salto Grande, Entre Ríos, 1994.
- Zabala, F. (1997). "Aplicación de modelos de plasticidad generalizada al análisis de presas de materiales sueltos". Tesis de Master. Universidad Politécnica de Cataluña, CIMNE, Barcelona.
- Zabala, F. y L. Oldecop (2000) "Seismic analysis of Los Reyunos dam using generalized plasticity model". 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.