

Q  
83

# ASPECTOS SÍSMICOS DE LAS PRESAS

## SEISMIC ASPECTS OF DAMS

FRANCISCO BLÁZQUEZ PRIETO. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Vocal del Comité Nacional Español de Grandes Presas. [fblazquez@cyii.es](mailto:fblazquez@cyii.es)

**RESUMEN:** Desde los años 30 se han considerado criterios sísmicos en los proyectos de presas, si bien tanto su fundamento como sus valores y métodos de cálculo han variado de modo apreciable. Los criterios basados en el Boletín 72 de ICOLD suponen un importante avance en la determinación de las cargas sísmicas a considerar para la presa. Es menos costoso asegurarse durante el proyecto del comportamiento de la presa que realizar mejoras posteriores.

La evaluación de la seguridad de las presas existentes presenta una importancia creciente, los recientes terremotos permiten afirmar que en ciertos casos el riesgo sísmico es superior al debido a fuertes avenidas. Durante un terremoto las estructuras deben resistir cargas que pueden no haber sido jamás probadas.

Los avances en las técnicas de modelización, física y matemática, han abierto un nuevo campo a la mejora del conocimiento. La toma de conciencia sobre este problema por parte de los gobiernos hace pensar que los avances en el campo de la ingeniería sísmica continuarán siendo elevados.

**PALABRAS CLAVE:** RIESGO SÍSMICO, SEGURIDAD ESTRUCTURAL, SEÍSMO DE PROYECTO, SEÍSMO EXTREMO, ACELERACIÓN PUNTA, DEFORMACIONES PLÁSTICAS, ASPECTOS SÍSMICOS

**ABSTRACT:** Seismic aspects have been considered in dam projects ever since the 30's, though the consideration and assessment of the same has varied considerably since then. The criteria established by the ICOLD bulletin No. 72 has been seen as an important development in the specification of seismic loads to be considered in dams. It is far less costly to assure the behaviour of the dam during the design stage than to make subsequent improvements after construction.

The safety evaluation of existing dams is becoming ever more important and recent earthquakes have shown that in certain cases the seismic risk is far greater than it should be due to the presence of flood waters. During an earthquake structures have to resist loads which may never have been tested.

The progress seen in physical and mathematical modelling techniques has opened up a new area of advanced knowledge. The Authorities' current awareness of the problem seems to point to continued progress in the field of earthquake engineering.

**KEYWORDS:** SEISMIC RISK, STRUCTURAL SAFETY, SEISMIC DESIGN, EXTREME SEISMIC ACTIVITY, ACCELERATION POINT, PLASTIC DEFORMATION, SEISMIC ASPECTS

### 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Las grandes presas estuvieron entre las primeras obras para las cuales los criterios de proyecto sísmico fueron tenidos en cuenta desde los años 1930. Hasta la publicación de Boletín 72 de ICOLD, en 1989: "Elección de los parámetros sísmicos para grandes presas" era corriente proyectar las presas para resistir los terremotos utilizando una aproximación pseudoestática, en general para una aceleración horizontal de 0,1 g. Hoy se sabe que los terremotos pueden provocar aceleraciones de suelo considerablemente más eleva-

das que los valores estimados en el momento del proyecto en numerosas presas existentes. Además se admite igualmente que las grandes presas, que tienen la apariencia de cuerpos rígidos, responden de modo dinámico a los movimientos sísmicos del suelo.

Desde 1979, fecha en que se trató por última vez la problemática sísmica en un Congreso de Grandes Presas, se han realizado progresos considerables en el campo de la ingeniería sísmica. En el curso de los últimos años se han introducido, en bastantes países, reglamentos relativos al proyecto sísmico de edificios y otras estructuras. En Europa deberá

estar listo antes de 2005, el Eurocódigo 8: "Disposiciones de Proyecto para la Resistencia de las Estructuras a los Seísmos" que afecta igualmente al resto de edificaciones y obras civiles, así como a la reparación y el refuerzo de las estructuras. El Eurocódigo 8 influirá principalmente sobre la seguridad sísmica de las construcciones anejas y las presas pequeñas.

En el curso de los últimos años, un número creciente de presas ha sido equipado con acelerómetros para fuertes sacudidas. Así, los aparatos de este tipo instalados en presas de Japón, ya han suministrado informaciones útiles sobre el comportamiento de las presas durante los terremotos. Cada vez están disponibles más informaciones sobre los movimientos del suelo para los terremotos violentos, que confirman además que aceleraciones punta elevadas son posibles de modo simultáneo horizontal y verticalmente.

Las cuestiones relativas a los aspectos sísmicos de las presas, tratadas en anteriores congresos, han sido las siguientes:

- Asentamientos de presas de tierras, debido a la compresibilidad de los materiales que constituyen la presa o la cimentación, incluidas las cuestiones unidas a los terremotos. (Cuestión 18, 5º Congreso, París, 1956)
- Resultados e interpretación de las medidas hechas en grandes presas de cualquier tipo, incluidas las observaciones sobre terremotos. (Cuestión 29, 8º Congreso, Edimburgo, 1964).
- Presas en zonas sometidas a terremotos o en situaciones excepcionales. (Cuestión 35, 9º Congreso, Estambul, 1967).
- Resistencia de las presas a los terremotos. (Cuestión 51, 13º Congreso, Nueva Delhi, 1979).

El Tema de la Cuestión 83 "Aspectos sísmicos de las presas" fue propuesto por el Comité de Aspectos Sísmicos de Proyecto de Presas, que comprende actualmente expertos en presas y en terremotos de alrededor de 25 países diferentes. Las misiones del Comité de Aspectos Sísmicos de Proyecto de Presas son las siguientes:

- a) Seguridad sísmica de presas existentes: Numerosas presas existentes fueron proyectadas según las posibilidades analíticas de la época de su construcción. El conocimiento más preciso sobre seguridad de presas (usando análisis actualizados) es considerado cada vez más una necesidad.
- b) Interpretación sísmica de datos de observación integrados: El principal objetivo reside en el examen de los datos de fuertes sacudidas registradas en grandes presas. Además la observación automática moderna suministra igualmente datos de las deformaciones y de las tensiones en el cuerpo de presa y su cimentación cuando son sometidas a cargas sísmicas. El estudio de estos re-

sultados, bajo una forma integrada, permite una imagen más completa de la respuesta de la presa.

c) Sísmicidad provocada por el embalse (RTS): Objeto de numerosos estudios en los años 1970. Los resultados de observaciones y los conocimientos relativos a la sísmicidad asociada a la puesta en carga de un embalse se han acumulado desde entonces.

d) Determinación del riesgo sísmico y técnicas asociadas: Es uno de los objetivos básicos en materia de seguridad para cada presa.

El tema principal de la cuestión es la seguridad sísmica de las presas existentes, pues la práctica totalidad de las presas más antiguas fue construida sobre la base de métodos de análisis sísmico y de criterios de proyecto sísmico que están hoy considerados como obsoletos o anticuados (la mayor parte de las presas fueron proyectadas para resistir terremotos con un coeficiente sísmico de 0,1). Por ello, en muchos casos se ignora si una presa antigua satisface las recomendaciones de seguridad sísmica publicadas por ICOLD.

Este comité ha preparado los siguientes Boletines ICOLD en el curso de los últimos años:

- Boletín 52 (1986): Métodos de cálculo sísmico para presas
- Boletín 62 (1988): Inspección de presas después de seísmos.
- Boletín 72 (1989): Elección de parámetros sísmicos para grandes presas.
- Boletín 112 (1998): Neotectónica y presas.
- Boletín 113 (1999): Observaciones sísmicas de presas.
- Boletín 120 (2001): Características de proyectos de presas para resistir terremotos.
- Boletín 123 (2002): Proyecto y evaluación sísmica de las estructuras anejas.

Entre estas publicaciones, el Boletín 72 es el que ha tenido el mayor impacto, pues ha permitido definir claramente los criterios de proyectos sísmicos de las presas y ha introducido el concepto de terremoto de proyecto con dos niveles. Para verificaciones de la seguridad sísmica de presas, considera unos valores de movimientos del suelo generalmente más importantes que los tenidos en cuenta en el pasado.

## 2. TEMARIO DE LA CUESTIÓN E INFORMES PRESENTADOS

El temario de la cuestión estaba formado por las 5 sub-cuestiones siguientes:

**DISTRIBUCIÓN POR PAÍSES DE LAS COMUNICACIONES  
PRESENTADAS A LA Q.83**

|  |    |
|--|----|
| • Irán .....   | 13 |
| • Japón .....  | 8  |
| • Estados Unidos .....   | 6  |
| • Canadá .....   | 5  |
| • India .....  | 5  |
| • Gran Bretaña .....   | 4  |
| • Australia, Austria, China, España, Francia .....   | 3  |
| • Alemania, Rusia, Suiza .....   | 2  |
| • Brasil, Bulgaria, Eslovenia, Italia, Marruecos,<br>Nueva Zelanda, Rumania, Sudáfrica, Yugoslavia ..... | 1  |

1. Evaluación de los riesgos sísmicos en el emplazamiento de la presa – Sísmicidad provocada por el embalse – Selección del terremoto de proyecto – Selección de parámetros sísmicos para el análisis dinámico.
2. Propiedades dinámicas de los materiales en presas de hormigón y materiales sueltos, incluyendo la cimentación – Ensayos en laboratorio y medidas in situ.
3. Proyecto, cálculo y construcción para asegurar la seguridad sísmica (incluidas las obras anejas y los equipos)
4. Evaluación de la seguridad sísmica de las presas.
5. Comportamiento de las presas sometidas a cargas sísmicas – Enseñanzas aprendidas para futuros proyectos.

A partir de los informes recibidos, se ha obtenido un conocimiento más profundo de la compleja cuestión de los aspectos sísmicos de los proyectos de presas. La mayor parte de los informes tratan sobre varios aspectos y ello confirma el interés que la cuestión ha producido, así en el Informe General se señala:

- 1) La evaluación de los riesgos sísmicos en el emplazamiento de la presa se ha estudiado en 23 informes.
- 2) Las propiedades dinámicas de los materiales en presas de hormigón y materiales sueltos se han analizado en 15 informes.
- 3) El proyecto, cálculo y construcción para asegurar la seguridad sísmica se ha tratado en 44 informes.
- 4) La evaluación de la seguridad sísmica de las presas se ha examinado en 39 informes.
- 5) El comportamiento de las presas sometidas a cargas sísmicas se ha estudiado en 32 informes.

El mayor número de contribuciones (13 informes) proviene de Irán, seguido de Japón (8). Esto ilustra la importancia de las solicitudes sísmicas en el proyecto de las presas en estudio o en construcción en estos países.

A partir de los informes recibidos, se ha obtenido un conocimiento más profundo de la compleja cuestión de los aspectos sísmicos de los proyectos de presas

Los informes presentados sobre la cuestión son de gran utilidad para:

- a) Comprender mejor el comportamiento de las presas sometidas a fuertes sacudidas.
- b) Identificar los problemas claves de seguridad sísmica para los nuevos tipos de presa, tales como las presas de hormigón compactado con rodillo (RCC), las presas de escollera con pantalla de hormigón (CFR) y las presas bóveda de gran altura.
- c) Hacer frente a los riesgos sísmicos de presas existentes, construidas utilizando métodos de análisis sísmico y criterios de proyecto sísmico considerados hoy obsoletos o superados.
- d) Encontrar solución práctica a algunos de los problemas clave actuales.

### 3. RESUMEN DE LAS CONTRIBUCIONES ESPAÑOLAS

Por parte de autores españoles se han presentado los tres informes que se resumen a continuación.

El R.64 de R. IBAÑEZ DE ALDECOA y M. DUNSTAN sobre "Resistencia a la tracción directa de testigos con juntas como criterio crítico de proyecto para la construcción de grandes presas de RCC en zonas sísmicas – Correlación entre la resistencia a la tracción in situ y la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas" señala que las juntas son las secciones potencialmente más débiles en una presa de RCC y que un RCC considerado como adecuado en laboratorio puede presentar problemas una vez en obra.

Las juntas horizontales entre tongadas son así una zona crítica y un buen comportamiento, en particular desde el punto de vista de la resistencia a la tracción, es básico para las presas construidas en zonas sísmicas. En el control en laboratorio se analiza normalmente la resistencia a la compresión en probetas. Por ello es básico relacionar ésta con la resistencia a la tracción in situ principalmente en zonas con juntas horizontales.

El informe describe el método de correlación entre estas variables y los resultados obtenidos en las presas de Porce II (Colombia) y Beni Haroun (Argelia). Los valores obtenidos para la correlación, tanto in situ como en laboratorio, pueden ser muy útiles como referencia para otras obras de este tipo.

Se destaca la influencia en el comportamiento de las juntas horizontales debida a los cambios en la dosificación del hormigón y en la construcción de la zona superior de Beni Haroun. Se concluye señalando que debe ser prioritario el objetivo de obtener los valores in situ requeridos para las juntas de la presa (lo que supone un criterio más estricto) frente al de obtener una resistencia en la masa del hormigón (sin juntas).



Catarata creada por un movimiento de falla.

El R.66 de J.L. UTRILLAS SERRANO sobre "Análisis dinámico de la presa de Tous" describe las diferentes tareas que forman el análisis dinámico de la presa.

Para la evaluación sísmica de la zona de la presa se han considerado tres niveles en función del periodo de retorno: 150 años (TP 150 que corresponde al sismo base de explotación "OBE"); 1.000 años (TP 1000 "Terremoto de proyecto" en la Norma NCSE-94. Su ocurrencia requiere análisis en la estructura) y MCE (que se corresponde con el "Terremoto extremo" de dicha Norma).

A partir de los datos de la región se han obtenido las intensidades máximas de estos sismos. Para obtener los parámetros de modelización del comportamiento de la presa y cimentación, se efectuaron diferentes ensayos en campo y laboratorio.

Se han llevado a cabo tres tipos de análisis que corresponden a:

- a) Cálculos simplificados en dos secciones, empleando el método de analogía con solución analítica para sección triangular y el método de la columna de terreno equivalente (programa Shake).
- b) Modelo bidimensional de elementos finitos aplicado a tres secciones considerando el TP 1000 y el MCE

- c) Modelo tridimensional de elementos finitos, considerando las tres componentes del sismo

La principal conclusión es que los terremotos analizados no causan la rotura de la presa. Para verificar las hipótesis del modelo se ha instalado en la presa un sistema de acelerómetros triaxiales.

El R.67 de A. SORIANO PEÑA y M. VALDERRAMA CONDE sobre "Criterios sísmicos para presas. Normas españolas" describe el estado de las normas o recomendaciones vigentes relativas al efecto sísmico en las grandes presas. Dicha normativa esta formada por los siguientes textos:

- Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas (año 1967). Divide el territorio en zonas de baja, media y alta sismicidad y determina las acciones a seguir en cada caso y para diferentes tipos y tamaños de presas.
- Norma de construcción sismorresistente. NCSE-94. Establece criterios generales para todas las construcciones, si bien se aplica principalmente para la edificación. Determina el riesgo sísmico mediante dos parámetros:  $a_g$  "aceleración sísmica básica" (valor característico de la aceleración horizontal que corresponde a un periodo de

retorno de 500 años) y K (coeficiente de contribución). Establece la aceleración sísmica de proyecto " $a_c$ " multiplicando  $a_b$  por un factor de riesgo (que oscila entre 1 y 1,3 en función de la construcción).

- Reglamento técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses. (RT.96). Para las presas en zonas de sismicidad moderada y alta se determina el estudio para un sismo de proyecto (TP) y además en las presas de categoría A se comprobará para otro sismo extremo (TE) de periodo superior.

- Guía Técnica de Seguridad de Presas nº 3. Desarrolla los procedimientos del documento anterior. Recomienda para zonas de sismicidad media y elevada un periodo de retorno de 1.000 años para el TP y entre 3.000 y 10.000 años para el TE.

- Guía Técnica de Seguridad de Presas nº 2. Se puede considerar como una revisión de la Instrucción de 1967 relativa al proyecto de presas. Distingue tres situaciones: normal, accidental y extrema. Propone factores de seguridad para ellas.

- El Eurocódigo 8 aún no aprobado completamente, no contempla las presas. No obstante, se estima que influirá en las normas españolas.

El informe incluye un punto de vista histórico del desarrollo de esta normativa, de las hipótesis que la soportan y de las recomendaciones ahora aplicables. Se incluye la descripción cuantitativa de las acciones sísmicas y de los procedimientos de análisis hoy empleados en el proyecto de nuevas presas.

#### 4. INFORME DEL PONENTE GENERAL

Fue nombrado ponente general Martin WIELAND (Suiza), Presidente del Comité de ICOLD de Aspectos Sísmicos de Proyecto de Presas.

En dicho informe se comienza indicando la importancia de los daños causados en las presas por los terremotos en los últimos años. A continuación se analiza la evolución de la técnica y de los planteamientos de la seguridad sísmica en las presas.

En el segundo capítulo se describe una visión general de los informes recibidos en relación con el temario propuesto para la Cuestión 83.

El capítulo tercero incluye una síntesis de las publicaciones de ICOLD relativas a los sismos; se destaca la limitada difusión de estas publicaciones en bastantes países por barrera de lenguaje o económica. También se enumeran las misiones actuales del Comité de Aspectos Sísmicos de Proyecto de Presas, determinadas en 1999.

Los capítulos 4 "Revisión de aspectos sísmicos de presas" y 5 "Examen de los informes" forman el cuerpo del resumen y en ellos se hace una profunda labor de análisis de los 71 informes recibidos.

A continuación se resumen los puntos principales de dicho informe. En esta síntesis se ha tratado de mantener la estructura de la revisión que se efectúa en el mismo (en función de los diferentes aspectos tratados) por entender que es la forma más adecuada y la que mejor transmite la información sobre este tema. Debemos comentar que se ha efectuado la traducción al español del informe completo, la cual queda a disposición del lector interesado en una mayor información.

#### 4.1. ASPECTOS RELATIVOS A LA SEGURIDAD SÍSMICA, CRITERIOS DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO

Se han realizado progresos considerables respecto al análisis dinámico elástico-lineal de las presas de hormigón y se ha desarrollado un método lineal equivalente para las presas de materiales sueltos, ampliamente utilizado para las aplicaciones prácticas

El análisis de la seguridad sísmica de las presas ha estado influenciado por los conceptos de proyecto sísmico y las herramientas de análisis dinámico desarrolladas para la industria nuclear. El sismo de San Fernando de 1971 que dañó severamente la presa de Lower San Fernando (presa de tierras) y causó daños menores en la presa bóveda de Pacoima, ha marcado una etapa importante. Hasta entonces se utilizaba una aproximación seudoestática que tenía en cuenta, para las presas de hormigón, las fuerzas de inercia de la presa y las presiones hidrodinámicas ejercidas por el embalse. En las presas de materiales sueltos, se efectuaban los cálculos de estabilidad de taludes, teniendo en cuenta las fuerzas de inercia estáticas equivalentes de la masa deslizante.

Se han realizado progresos considerables respecto al análisis dinámico elástico-lineal de las presas de hormigón y se ha desarrollado un método lineal equivalente para las presas de materiales sueltos, ampliamente utilizado para las aplicaciones prácticas.

Se investiga el verdadero comportamiento no lineal de las presas de hormigón, teniendo en cuenta la apertura de las juntas de dilatación y la fisuración del hormigón en masa, y de las presas de materiales sueltos y la interacción dinámica entre el hormigón de la presa y la cimentación. Los modelos de cimentación propuestos aún están lejos de representar la realidad.

Se debe recoger información suplementaria sobre las presas sometidas a terremotos violentos, idénticos a los esperados durante el sismo máximo posible (MCE)(1). Este tipo de acontecimientos revela los problemas reales de las presas sometidas a terremotos. En ausencia de tal información es necesario proceder a ensayos sobre modelos has-

(1) El terremoto extremo (TE) en la normativa española



Deslizamiento de la presa Lower San Fernando (California).

ta la rotura de la presa. Para las presas de materiales sueltos, los ensayos dinámicos sobre máquina centrífuga son prometedores, pues representan mejor las tensiones y el comportamiento no elástico de las presas tipo.

El desarrollo de los métodos de análisis numérico ha progresado considerablemente, si bien se precisa más información para poder determinar con precisión el comportamiento de las presas durante los terremotos. Los problemas principales son los siguientes:

- Elección de las características de los movimientos sísmicos del suelo para el seísmo máximo posible y el seísmo de evaluación de la seguridad (SSE).
- Definición de los criterios de comportamiento y determinación de los modos de rotura sísmica de diferentes tipos de presas;
- Modelización de materiales e identificación de sus propiedades dinámicas; modelización del sistema presa-cimentación-embalse y utilización del análisis dinámico no lineal

Estos problemas son conocidos desde hace tiempo. Por ejemplo, la evaluación de la seguridad sísmica de las grandes presas ya era objeto de discusiones en Suiza a finales de los años 1970. Las evaluaciones de la seguridad sísmica deben ser efectuadas con las herramientas hoy disponibles.

Desgraciadamente, la situación corriente es que los propietarios de presas no están inclinados a invertir en unos estudios que quizás serán obsoletos en 10 o 20 años y que probablemente deberán ser repetidos.

Las sacudidas sísmicas afectan a todos los elementos de la presa al mismo tiempo, esto implica que los conceptos de redundancia y de barrera utilizados para los elementos críticos no conducen necesariamente a un creci-

miento de su fiabilidad. Esta es una de las razones por las cuales el caso de carga sísmica ha llegado a ser el caso de carga dominante para las centrales nucleares, incluyendo las situadas en regiones de sismicidad débil o moderada. Como los terremotos afectan a todos los elementos de una presa, todos ellos deben resistir cierto nivel de sollicitación sísmica. Los mismos criterios que para la presa serán utilizados para los elementos de seguridad.

Todos los elementos estructurales deben ser proyectados o verificados desde el punto de vista de su resistencia y de su seguridad frente a los seísmos. Generalmente, los ingenieros, los geólogos, los ingenieros mecánicos y eléctricos, etc. se inclinan principalmente sobre sus problemas específicos. Esta tendencia es incluso más pronunciada entre los investigadores que se concentran en sus aspectos particulares. Hay pues grandes posibilidades de que (i) ciertas cuestiones capitales sean olvidadas, (ii) se de mucho peso a aspectos poco importantes, o (iii) se utilicen criterios diferentes por diferentes profesiones.

La percepción y el sentimiento de seguridad varían considerablemente según el contexto cultural y económico de la población afectada. Las exigencias de protección contra la amenaza de temblores de tierra difieren en consecuencia y es necesario obtener un consenso en este aspecto.

La seguridad sísmica de una presa depende de los factores siguientes.

- a) Seguridad estructural; elección del emplazamiento; tipo y forma óptima de la presa; materiales y calidad de construcción; resistencias a las fuerzas sísmicas sin desperfectos;
- b) Control de la seguridad y mantenimiento apropiado: instrumentos de medida para fuertes sacudidas (presa y cimentación), inspección visual y evaluación de la seguridad después de un terremoto; análisis e interpretación de los datos;
- c) Seguridad operacional: curvas de referencia y recomendaciones operacionales para la fase siguiente al seísmo; existencia de personal de mantenimiento de la presa experimentado y cualificado, etc.
- d) Plan de alerta: alerta de suelta de caudales; cartografía de las zonas inundables; planes de evacuación; seguridad en el acceso a la presa y al embalse después de un terremoto violento; descenso del nivel del embalse;

La seguridad estructural, puede ser mejorada por medidas estructurales. La vigilancia de la seguridad, la seguridad operacional y los planes de alerta son medidas no estructurales y no reducen directamente la vulnerabilidad sísmica de la presa. En general, las presas que pueden resistir a las fuertes sacudidas del terreno del seísmo máximo

posible, tendrán igualmente un comportamiento satisfactorio bajo otros tipos de cargas.

Para el diseño sísmico de presas, ICOLD propone los terremotos de proyecto siguientes:

(i) Sismo de base de explotación (Operating basis earthquake - OBE): El proyecto basado en el OBE está destinado a limitar los desperfectos de los temblores de tierra. No existe criterio fijo para el OBE aunque ICOLD haya propuesto un periodo de retorno medio de alrededor de 145 años (probabilidad de excedencia del 50 % en 100 años). La presa debe permanecer operacional después del OBE y sólo se aceptan desperfectos menores, fácilmente reparables.

(ii) Sismo máximo posible (Maximun Credible Earthquake - MCE), sismo máximo de proyecto (Maximun Design Earthquake - MDE) o sismo de evaluación de seguridad (Safety Evaluación Earthquake - SEE): En teoría, el MCE es un acontecimiento determinista, y constituye el sismo máximo razonablemente estimable para una falla conocida o en una zona tectónica geográficamente determinada. Pero, en la práctica, el MCE está generalmente definido sobre la base de estadísticas con un periodo de retorno tipo de 10.000 años para un país de sismicidad débil a moderada. Los términos MDE o SEE son usados como sustitutos del MCE. La estabilidad de la presa debe estar asegurada en las peores condiciones de movimientos de suelo en la cerrada y no se producirá ningún vertido incontrolado, incluso aceptando desperfectos importantes en las obras. En el caso de daños sísmicos importantes, debe ser posible hacer descender el nivel del embalse.

#### 4.2. CONSIDERACIONES SOBRE EL RIESGO SÍSMICO

Debido a la probabilidad muy débil de ocurrencia de temblores de tierra destructores, en las regiones de sismicidad débil a moderada, algunos ingenieros y propietarios de presas piensan que se concede demasiada importancia a la seguridad sísmica de las presas. El hecho es que las presas, al presentar un importante potencial de daños, deben ser capaces de soportar también los movimientos provocados por el MCE o el SEE (periodo 10.000 años). Esta es una condición lógica y coherente pues estas mismas presas deben poder evacuar con toda seguridad la crecida máxima probable (PMF) o la crecida decamillaria.

En estas regiones, las crecidas son generalmente consideradas como el mayor riesgo natural. Sin embargo, se-

La evaluación de la seguridad sísmica debe ser examinada en un contexto global de seguridad. Si un riesgo sísmico es bajo no es razonable darle gran importancia y no debe distraer la atención de otros aspectos del comportamiento de las presas que puedan ser más críticos para la seguridad

gún un reciente estudio suizo, más del 50% de los riesgos naturales proviene de los temblores de tierra, y las crecidas representan menos de un tercio de estos riesgos. La principal parte del riesgo sísmico resulta de los terremotos más fuertes. La evaluación de la seguridad sísmica debe ser examinada en un contexto global de seguridad. Si un riesgo sísmico es bajo no es razonable darle gran importancia y no debe distraer la atención de otros aspectos del comportamiento de las presas que puedan ser más críticos para la seguridad.

El riesgo sísmico será el producto del peligro sísmico (expresado, por ejemplo, por la probabilidad de sobrepasar un valor de aceleración punta del suelo dado), de la vulnerabilidad sísmica de la presa para un nivel de peligro dado, y de las consecuencias de los desperfectos provocados por el sismo sobre la presa (pérdida de capacidad de almacenamiento en el embalse, vertidos de agua no controlados, deterioros en la presa y sus obras anejas).

La principal preocupación es la rotura de la presa y los vertidos no controlados del aliviadero que provocan crecidas (pérdida de vidas humanas, desperfectos económicos, daños en el medio ambiente) que sobrepasarán generalmente los costes de los desperfectos en la presa. En consecuencia, para la evaluación del riesgo sísmico de una presa, el embalse lleno representa la situación más crítica.

Los peligros presentados por los terremotos son múltiples y pueden entrañar las consecuencias siguientes en caso de una presa de embalse:

- Sacudidas del suelo que provocan vibraciones en las presas, las obras anejas y el material de equipamiento, y en sus cimentaciones;
- Movimientos de falla en la cimentación de la presa que provocan distorsiones estructurales;
- Desplazamientos de falla en el fondo del embalse que se traducen en olas o una pérdida de resguardo;

Generalmente, las sacudidas sísmicas del suelo constituyen el mayor peligro. Ellas entrañan tensiones, deformaciones, fisuras, deslizamientos, vuelcos, licuefacciones, etc.

Las numerosas caídas de rocas en las regiones montañosas son a menudo subestimadas. Estos fenómenos pueden bloquear el acceso al emplazamiento de la presa o en algún caso pueden formar embalses naturales (lago Earthquake creado por un deslizamiento de 20 hm<sup>3</sup> durante el terremoto Hebgen Lake, 1959) Montana, USA.

En el caso de un gran terremoto que puede causar desperfectos en una presa perfectamente concebida para

Grieta  
cimentación.



soportar el sismo máximo posible (MCE), se puede esperar que las construcciones y las infraestructuras situadas en la región sean dañadas y que el acceso a la presa (alejada) y al embalse esté interrumpido por deslizamientos del terreno, caídas de rocas, grietas en las carreteras, puentes dañados, etc. En el sismo Manjil de 1990, en Irán, el acceso a la presa fue bloqueado por caídas de piedras, la cerrada quedó prácticamente desierta inmediatamente después del temblor de tierra. Solo una persona del equipo de mantenimiento de la presa sobrevivió. Es preciso esperar un escenario del mismo tipo para otras presas después de un fuerte sismo.

Para salvar vidas, la respuesta debe ser rápida y esto incluye un acceso inmediato a fin de evaluar enseguida el nivel de seguridad y los desperfectos. Esta noción de accesibilidad es cada vez más importante, pues un número creciente de presas son vigiladas y explotadas mediante centros de control a distancia, y en este caso los aparatos de medida no permiten evaluar fácilmente la gravedad de los deterioros. Estos deben ser factores importantes en el establecimiento de los planes de emergencia.

#### 4.3. CONDICIONES MÍNIMAS SOBRE EL DISEÑO SÍSMICO. APLICACIÓN UNIFORME DE LOS CRITERIOS DE PROYECTO POR LOS INGENIEROS

En el pasado, las presas estaban proyectadas para un terremoto de proyecto con un coeficiente sísmico horizontal de 0,1 g. El periodo de retorno no estaba indicado. Hoy, por razones de seguridad, se deberá tener en cuenta los movimientos del suelo correspondientes al MCE (periodo de retorno de 10.000 años). En consecuencia es necesario examinar atentamente los valores de aceleración punta inferiores a 0,1 g basados en (i) valores dados en los códigos de construcción para regiones de sismicidad débil a moderada,

o (ii) análisis de peligrosidad sísmica deterministas para regiones con información sísmica inadecuada.

Es aconsejable observar las recomendaciones generales de proyecto presentadas en el Boletín 120 (ICOLD, 2001). Siguiendo estos criterios se obtienen unas presas más seguras, capaces igualmente de resistir a otros tipos de sollicitaciones.

En bastantes casos, se ha utilizado un valor de 0,1 g sin tener en cuenta el lugar donde se encuentra el equipo mecánico. Los equipamientos situados en la coronación de las presas de hormigón están expuestos a fuertes niveles de vibración, pues los movimientos del suelo producidos por los terremotos menores pueden ser amplificados por factores de hasta 10 en la coronación.

Aceleraciones punta superiores a 2 g han sido registradas en la coronación de la presa bóveda de Pacoima durante el sismo Northridge (Estados Unidos), en 1994, y superiores a 2,1 g en la coronación de la presa de gravedad de Kasyo durante el sismo Tottori (Japón), en 2000. Los ingenieros hidromecánicos no son siempre conscientes de las amplificaciones dinámicas de las vibraciones de la presa en coronación. Esta gran diferencia en las aceleraciones muestra igualmente que los problemas de seguridad sísmica implican un cambio del concepto estructural.

#### 4.4. IMPORTANCIA DE LA ACCELERACIÓN PUNTA DEL SUELO (PGA)

A pesar de todos sus inconvenientes, la aceleración punta del suelo siempre se utiliza para caracterizar los movimientos sísmicos del terreno en la zona de presa. Sin embargo, para la respuesta dinámica de una presa, el espectro de respuesta en aceleración es una mejor representación de los movimientos del terreno que la PGA. No obstante, la PGA es necesaria pues muchos de los espectros de respuesta estándar utilizados deben ser normalizados en relación con ella. A partir de un espectro de respuesta alisado, la PGA puede ser obtenida fácilmente.

La aceleración punta efectiva (EPA-effective peak acceleration) puede ser un valor más representativo de los movimientos del suelo. La EPA representa generalmente 2/3 de la PGA. La diferencia entre EPA y PGA es importante si la serie temporal de aceleración no está constituida más que por un número muy pequeño de choques de frecuencia elevada. La EPA también puede ser determinada directamente a partir de un acelerograma filtrando las frecuencias más allá de 10 Hz.

Muy a menudo, la cuestión se plantea en saber como la PGA está unida al coeficiente sísmico utilizado para el proyecto de la mayor parte de las estructuras existentes. La respuesta a esta cuestión no es simple. Sin embargo, si suponemos que la EPA es 2/3 de PGA, y que EPA/g corresponde al coeficiente sísmico, entonces la PGA sería alrededor de

1,5 veces el coeficiente sísmico. El concepto de EPA ha sido utilizado en Estados Unidos desde hace algún tiempo y ha sido igualmente propuesto para el proyecto sísmico de grandes presas en China.

Como es posible utilizar diferentes definiciones para la apelación punta, las comparaciones directas de sus valores pueden ser difíciles. Por ello se ha recomendado comparar directamente los espectros de respuesta en aceleración en el rango de frecuencias elevadas. Cuando no existen especificaciones sísmicas, los espectros de respuesta dados en los códigos sísmicos de construcción son a veces utilizados por los ingenieros de presas. En este caso, deberán asegurarse que se utiliza el criterio adecuado (PGA o EPA).

A pesar de los problemas citados, no cabe esperar que la PGA desaparezca rápidamente, pues constituye un parámetro simple de comparación de los movimientos sísmicos del terreno en diferentes zonas de presas.

#### 4.5. ASPECTOS SÍSMICOS DE PRESAS DE HORMIGÓN: JUNTAS Y FISURAS

Según las observaciones de los desperfectos provocados por los seísmos en las presas de gravedad de hormigón, las sacudidas del suelo entrañan la formación de fisuras en la zona de la coronación, sometida a fuertes tensiones a lo largo de planos de débil resistencia, como las superficies de juntas horizontales y las juntas de dilatación verticales inyectadas.

En este sentido el comportamiento sísmico de una presa de hormigón es comparable al de una estructura dúctil en la cual pueden producirse importantes deformaciones plásticas sin provocar roturas desastrosas. El rozamiento en las juntas y el encajamiento de los bloques permiten evitar movimientos en juntas. Cabe esperar un fenómeno similar para bloques de hormigón de presas bóveda o arco-gravedad.

Como ninguna presa bóveda ha sufrido serios desperfectos durante las sacudidas sísmicas, hay poca experiencia en su relación con los daños Unidos, por ejemplo, al MCE. Sin embargo, según los cálculos dinámicos, es preciso esperar apertura de juntas y/o de fisuras. Se utilizan actualmente las aproximaciones siguientes para cálculos sísmicos no lineales:

- a) La aproximación de fisura con rozamiento. Esta aproximación no se ha utilizado en ninguno de los informes.
- b) La modelización discreta de las juntas de dilatación en el modelo de elementos finitos
- c) La aproximación de fisuración discreta, en la cual se estudia el comportamiento dinámico de los bloques de

hormigón rígidos separados por fisuras y/o juntas (método del cuerpo rígido)

Los modelos b) y c) parecen ser los mejor adaptados a las aplicaciones prácticas. El tamaño de los bloques de hormigón característicos que pueden formarse durante un seísmo debe determinarse basándose en la experiencia práctica adquirida sobre presas del mismo tipo, las investigaciones experimentales y los resultados de análisis dinámicos elástico-lineales. Como las juntas de dilatación y entre tongadas son menos resistentes a la tracción, las fisuras se desarrollarán preferentemente a lo largo de estas. Una vez que las fisuras se desarrollan, la mayor parte de las deformaciones de una presa se localizan en estas fisuras.

Las aperturas de juntas y los movimientos de las fisuras son los mecanismos que aseguran que una presa de hormigón en masa seguramente resista los movimientos del terreno que sobrepasen los valores de proyecto.

Para obtener una presa bóveda que se comporte adecuadamente durante un violento seísmo es preciso tener en cuenta los siguientes criterios básicos:

- Estructura con forma simétrica para una excitación en la dirección del valle;
- Reparto uniforme de la rigidez, de la resistencia y de la masa;
- Minimizar los efectos de los movimientos del terreno no uniformes;
- Evitar las concentraciones de tensiones y reforzar la zona de coronación.

El aumento de rigidez de la coronación es uno de los medios más eficaces para modificar el comportamiento dinámico de una presa. Aunque un espesor y una masa mayores en la coronación generan fuerzas de inercia más grandes en esta zona, el porcentaje de aumento de la rigidez a la flexión de la coronación es mucho más importante que el de las fuerzas de inercia.

#### 4.6. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Fundamentalmente, la seguridad sísmica y el comportamiento de estas presas se evalúan examinando los aspectos siguientes: Deformaciones permanentes durante y después de un seísmo (pérdida de resguardo, por ejemplo); estabilidad de los taludes durante y después de un seísmo; aparición de excesivas presiones intersticiales en los materiales sueltos y en la cimentación (licuefacción del suelo); vulnerabilidad de la presa a la erosión interna después de la forma-

Para salvar vidas, la respuesta debe ser rápida y esto incluye un acceso inmediato a fin de evaluar enseguida el nivel de seguridad y los desperfectos. Esta noción de accesibilidad es cada vez más importante, pues un número creciente de presas son vigiladas y explotadas mediante centros de control a distancia, y en este caso los aparatos de medida no permiten evaluar fácilmente la gravedad de los deterioros

ción de fisuras; aparición de movimientos de deslizamiento limitado en los taludes del material o formación de zonas de materiales dañados debido a un fuerte cizallamiento (bandas de cizallamiento).

La respuesta dinámica de una presa depende de las características de deformación de los diferentes materiales. La mayor parte de los factores citados en el párrafo anterior está así directamente asociada a las deformaciones de la presa. Los fenómenos de licuefacción son el mayor problema de las presas de estériles y de las pequeñas presas de tierra construidas con materiales no coherentes o cimentadas sobre tales materiales. La sensibilidad a la licuefacción se puede evaluar de un modo relativamente simple efectuando ensayos in situ, pues existen relaciones empíricas entre el número de golpes del ensayo de penetración estándar y la sensibilidad a la licuefacción para diferentes movimientos sísmicos del suelo.

En el caso de grandes presas, las deformaciones permanentes inducidas por los sismos deben ser calculadas. El cálculo de los asentamientos permanentes de las grandes presas de tierras o de escollera con pantalla de hormigón, basados en análisis dinámicos son todavía bastante aproximados, pues la mayor parte de los ensayos dinámicos son efectuados con un tamaño máximo de grano inferior a 5 cm. Este es un problema en particular para las presas de escollera y para las presas cuyos materiales no han sido compactados durante la construcción. Para obtener información sobre las propiedades dinámicas de los materiales son necesarios ensayos dinámicos de corte directo o ensayos triaxiales sobre grandes testigos.

La fisuración transversal resultante de las deformaciones es un aspecto importante. Estas fisuras pueden provocar la rotura de las presas de materiales sueltos que no dispongan de filtros, drenes o zonas de transición o en las que estos elementos no se prolonguen sobre el nivel de agua del embalse.

#### 4.7. ASPECTOS SÍSMICOS DE LAS PRESAS DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (RCC)

Las presas RCC son fundamentalmente presas de gravedad y, en consecuencia, su comportamiento sísmico se acerca al de las presas de gravedad clásicas. Se producen fuertes tensiones sísmicas en la zona central superior de las presas de gravedad y de las presas arco-gravedad.

La principal diferencia entre las presas RCC y las presas de gravedad clásicas reside en el comportamiento dinámico del hormigón en masa. En las presas RCC la resistencia a la tracción de una junta entre tongadas puede ser una fracción de la del hormigón en masa. Esto significa que en caso de sismo violento, se formarán fisuras horizontales a lo largo de estas uniones, acompañadas de una apertura de las juntas de dilatación verticales.

Se debe suponer que las fisuras horizontales se extienden del paramento aguas arriba al de aguas abajo de una presa y que separan completamente la porción superior de la presa de las otras partes. Las deformaciones de la presa se deberán principalmente a la apertura de fisuras pues los bloques de hormigón pueden deslizarse a lo largo de la superficie de la fisura y sufrir movimientos oscilatorios. Así, el deslizamiento acumulado es el factor que gobierna la estabilidad dinámica de los bloques separados.

La red de fisuración en una presa de RCC puede ser idéntica a la observada en la parte superior de la presa de contrafuertes de Sefid Rud, de 106 m de altura, gravemente dañada durante el terremoto de 1990 en Irán. Las principales fisuras se formaron en las juntas horizontales entre tongadas. Una vez formadas las fisuras se debe suponer que toda la subpresión hidrostática actúa sobre ellas, reduciendo aún más la resistencia al cizallamiento de la junta fisurada. Por ello, para los análisis de estabilidad post-sismo se tomará en cuenta la presión hidrostática total.

En varias presas RCC se ha situado un "mortero de retoma" en las superficies de tongada, lo que aumenta la resistencia a la tracción. Este tratamiento especial impide la fisuración durante temblores de tierra moderados.

Una evaluación cualitativa permite concluir que la seguridad sísmica de las presas RCC ante violentas sacudidas del terreno es, muy probablemente, satisfactoria, pues las fisuras se desarrollarán a lo largo de las juntas de construcción horizontales en la parte central superior de la presa, sometida a fuertes tensiones. Sin embargo, esta conclusión deberá ser apoyada por estudios y observaciones más profundos.

#### 4.8. ASPECTOS SÍSMICOS DE LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGÓN (CFR)

La seguridad sísmica de las presas de escollera con pantalla de hormigón a menudo se supone superior a la de las presas de escollera clásicas con núcleo impermeable. En todo caso, el comportamiento de la pantalla de hormigón durante y después de un sismo constituye el aspecto crucial de las presas de este tipo. Según la sección de la cerrada las deformaciones de la presa serán igualmente no uniformes a lo largo del paramento aguas arriba, provocando movimientos diferenciales del soporte de la pantalla de hormigón, deformaciones locales en las zonas de compresión, etc.

Durante el sismo Chi-Chi en 1999, algunas observaciones indicaron que la pantalla de hormigón en presas de escollera puede alcanzar grandes deformaciones durante temblores de tierra, contrariamente a las observaciones hechas hasta entonces. La respuesta de la pantalla en su entorno próximo debe ser todavía objeto de experimentación. Un ejemplo real es la presa de escollera con pantalla de hormigón de Cogoti, de 85 m de altura, en Chile, terminada en

1938 que ha sufrido cuatro violentos terremotos con un PGA que ha alcanzado 0,19 g.

En bastantes casos las presas de materiales sueltos se analizan con ayuda del método del equivalente lineal utilizando un modelo bidimensional. Para este tipo de análisis dinámico se debe emplear un modelo tridimensional de la presa, la unión entre la pantalla de hormigón y las zonas de transición debe ser modelizada correctamente.

Dado que, desde el punto de vista de las deformaciones, el comportamiento de la pantalla, que actúa como pared rígida para las vibraciones en la dirección transversal al valle, difiere considerablemente del de la escollera y de los materiales de la zona de transición, la respuesta transversal al valle de la presa de escollera puede estar limitada por la pantalla de hormigón relativamente rígida. Esto puede traducirse en fuertes tensiones en el plano de la pantalla. Las fuerzas sísmicas transferidas de la escollera a la pantalla están limitadas por las fuerzas de rozamiento entre la zona de transición de la escollera y la pantalla de hormigón. Como toda la carga de agua está soportada por la pantalla, estas

fuerzas de rozamiento son relativamente elevadas y, por consiguiente, las tensiones en el plano de la pantalla pueden ser suficientemente importantes para provocar deformaciones locales o cizallamientos de la pantalla a lo largo de las juntas.

La principal ventaja de las presas de escollera con pantalla de hormigón reside en su resistencia a la erosión en el caso de que el agua se infiltre por una pantalla fisurada. Si la zona de materiales bajo la pantalla tiene una granulometría correcta el coeficiente de

permeabilidad será del orden de  $10^5$  m/s, y entonces ella será estable, es decir que no alcanzará la erosión. Esto elimina el riesgo de que se desarrollen importantes fugas bajo la pantalla fisurada.

La experiencia relativa al comportamiento sísmico de las presas de escollera con pantalla de hormigón es muy limitada y deberán ser emprendidos más esfuerzos para su estudio.

#### 4.9. ASPECTOS SÍSMICOS DE LOS MUROS DE DIAFRAGMA Y DE LAS PANTALLAS DE INYECCIÓN

Los muros de diafragma se utilizan como elementos de estanqueidad en las presas de materiales sueltos sobre suelos o roca muy permeable y están formados por hormigón armado ordinario. Hoy se prefiere el hormigón plástico. El muro deberá tener una rigidez idéntica a la del suelo o la de la roca que le rodea a fin de prevenir la concentración de cargas durante las deformaciones del suelo después de

la construcción de la presa. Aunque algunos seísmos pueden provocar importantes tensiones dinámicas en un muro diafragma de hormigón plástico, una ductilidad suficiente de este último minimizará la formación de fisuras.

En el caso de diafragmas constituidos por hormigón plástico con un débil módulo de elasticidad dinámica, las tensiones sísmicas serán menos elevadas que en el caso de un diafragma rígido, pero las propiedades resistentes del hormigón plástico son igualmente inferiores a las del hormigón clásico. Es preciso recordar que el diafragma de hormigón de la presa de Hebgen (seísmo Hebgen Lake, Montana, 1959) probablemente impidió la rotura de la presa bajo el efecto de un vertido sobre coronación.

Como en el caso del apartado anterior, la experiencia relativa al comportamiento sísmico de los muros diafragma permanece muy limitada.

En cuanto a las pantallas de inyección, de modo general, se supone que, en cimentación rocosa, no son vulnerables a la acción sísmica. Sin embargo, debido a los efectos de la interacción dinámica suelo-estructura, a los movimientos de diaclasas en la roca de cimentación y a las fisuras en la cimentación de la presa, la pantalla de inyección puede ser dañada localmente durante el seísmo. Los desperfectos sísmicos en las pantallas de inyección pueden ser evaluados a partir de cambios bruscos de subpresión y del caudal de agua de drenaje.

El conocimiento relativo al comportamiento sísmico de las pantallas de inyección es muy limitado. Se recomienda tener en cuenta los efectos sísmicos en la pantalla de inyección en el proyecto y la evaluación de la seguridad sísmica de las presas.

#### 4.10. SEGURIDAD SÍSMICA DE LAS PRESAS RURALES

El Informe denomina como presas rurales, las presas de regadío y de abastecimiento de agua, generalmente presas de tierra, con una altura inferior a 15 m. Estas presas no se incluyen en el campo de ICOLD. A menudo son construidas por comunidades locales, y con ayudas de ONGs que tienen poca, o ninguna experiencia en ingeniería de presas. Dado que la rotura catastrófica de una presa pequeña tendrá un efecto nefasto sobre la imagen de conjunto de las presas, es necesario que estas presas rurales respondan igualmente a criterios básicos de proyecto y seguridad.

Las presas rurales pueden romperse bajo el efecto de seísmos de intensidad moderada que se producen mucho más frecuentemente que el MCE. En consecuencia, teniendo en cuenta el hecho de que las probabilidades de rotura de presas rurales son de un orden de magnitud superior al de las grandes presas bien proyectadas, si se considera el volumen de agua almacenado detrás de las presas rurales, se puede concluir que el riesgo sísmico total de las presas

Las deformaciones de la presa se deberán principalmente a la apertura de fisuras pues los bloques de hormigón pueden deslizarse a lo largo de la superficie de la fisura y sufrir movimientos oscilatorios

pequeñas puede ser bastante mayor que el de las grandes presas.

El ensayo de penetración standard debe ser utilizado para evaluar la vulnerabilidad de las presas de tierra y de su cimentación ante la licuefacción durante movimientos del suelo.

#### 4.11. EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD SÍSMICA DE PRESAS EXISTENTES

Las etapas básicas para la evaluación sísmica de la seguridad de las presas de materiales sueltos son las siguientes:

- Determinación de los principales parámetros del seísmo de evaluación de seguridad (SEE), por ejemplo: espectro de respuesta, aceleración punta o EPA, duración de las sacudidas fuertes del suelo;
- Estimación de las propiedades dinámicas de los materiales a partir de ensayos estáticos y dinámicos en laboratorio o de informaciones extraídas de la literatura;
- Análisis dinámico de un modelo bi o tridimensional de elementos finitos del sistema presa-cimentación, utilizando, por ejemplo, el método del equivalente lineal;
- Evaluación de la formación de presiones intersticiales (análisis de la licuefacción para ciertas condiciones de cimentación o materiales) en presas de tierras;
- Cálculo de los desplazamientos permanentes de las masas que pueden deslizar a lo largo de los taludes de la presa. Análisis de asientos sísmicos.

En el caso de las presas de hormigón, las etapas básicas para la evaluación de la seguridad sísmica son las siguientes:

- Determinación de los principales parámetros del SEE;
- Estimación de las propiedades dinámicas de los materiales del hormigón en masa y de la cimentación; modelización de las juntas, si es necesario;
- Análisis dinámico de un modelo bi o tridimensional de elementos finitos del sistema presa-cimentación-embalse;
- Análisis de la estabilidad dinámica de los bloques de hormigón separados por juntas y/o fisuras y de la estabilidad dinámica de la cimentación;
- Evaluación de la seguridad sísmica en base al resultado del cálculo sísmico.

#### 4.12. SISMICIDAD PROVOCADA POR EL EMBALSE (RTS)

Si una gran presa ha sido proyectada siguiendo las técnicas actuales, lo que implica que la presa pueda con toda seguridad soportar los movimientos del suelo producidos por el MCE, podrá igualmente soportar los efectos del mayor se-

El registro de la vigilancia continua de las vibraciones ambientales de una presa puede ser utilizado para la vigilancia de la salud de la presa y la calibración de modelos numéricos de presas

ísmo provocado por el embalse, pues éste no será más violento que el MCE. En consecuencia, el seísmo inducido por el embalse no supone problema de seguridad para una presa bien proyectada. No obstante, tal seísmo puede suponer un problema para los edificios y las estructuras situadas en la vecindad de la presa, pues su resistencia sísmica es bastante inferior a la de la presa.

En la mayoría de los seísmos provocados por los embalses, las magnitudes son débiles y no entrañan problemas para las estructuras. Hasta el presente, la magnitud máxima de los seísmos provocados por los embalses es de 6,3. Al ser extremadamente débil la correlación entre el llenado

del embalse y la ocurrencia de un seísmo que suponga daños en la región de éste, subsisten serias dudas sobre la relación entre los embalses y algunos de los seísmos más violentos observados.

Como los seísmos inducidos por los embalses tienen a menudo focos poco profundos y epicentros relativamente próximos a los lugares de las presas o los embalses, los valores de aceleración punta pueden ser relativamente elevados para los acontecimientos más fuertes.

#### 4.13. INSTRUMENTACIÓN PARA FUERTES SACUDIDAS

Los aparatos de auscultación clásicos no permiten registrar de modo satisfactorio el comportamiento de una presa durante fuertes terremotos. Al contrario, el control de fugas, asientos y deformaciones, y la cartografía de las fisuras, es muy importante para la evaluación de la seguridad sísmica después de un temblor de tierra.

Existe falta de información sobre el comportamiento dinámico de todos los tipos de presa que han sido sometidos a fuertes seísmos. Hoy, los acelerómetros para fuertes sacudidas disponibles en el mercado son muy fiables, y pueden registrar tanto las vibraciones de débil amplitud como los movimientos generados por temblores de tierra o incluso explosiones. Los costes de los captadores y registradores numéricos han bajado y sus capacidades han mejorado considerablemente.

Los aparatos para fuertes sacudidas pueden ser utilizados para desencadenar una alarma durante la superación de los valores críticos de aceleración o de intensidad de espectro. Estos aparatos, pueden así convertirse en importantes elementos de un sistema de alarma y de reacción rápida y permitir la alerta precoz de las poblaciones aguas abajo (alerta de vertido de agua) y la puesta en marcha de los sistemas de seguridad.

Aunque el cierre de seguridad de las compuertas y la parada de las turbinas pueden necesitar cierto tiempo para evitar efectos dinámicos importantes en los sistemas bajo presión, las consecuencias de los daños de un seísmo sobre

estos dispositivos pueden ser fuertemente reducidas por una acción en el momento adecuado.

El registro de la vigilancia continua de las vibraciones ambientales de una presa puede ser utilizado para la vigilancia de la salud de la presa y la calibración de modelos numéricos de presas. Los datos recogidos por estos aparatos pueden igualmente ser utilizados para verificar y mejorar los criterios de diseño sísmico de la presa.

Debido a estas características y ventajas, se recomienda instalar aparatos para fuertes sacudidas en todas las grandes presas, especialmente en las zonas de elevada sismicidad. El mínimo absoluto para una gran presa es de 3 aparatos, pues se debe considerar la avería eventual de alguno de estos aparatos durante un violento seísmo.

#### 4.14. ASPECTOS SÍSMICOS QUE PRECISAN UNA ATENCIÓN PARTICULAR

Como el campo de la seguridad sísmica de las presas es todavía relativamente joven, cada seísmo importante que daña una gran presa o produce registros en la instrumentación, suministra nuevas enseñanzas. Muy pocas grandes presas de hormigón han sido dañadas durante un seísmo y los ensayos dinámicos efectuados en modelos de presa hasta la rotura no son verdaderamente representativos; así subsisten incertidumbres considerables en relación con el comportamiento de una presa bajo el efecto de fuertes sacudidas. Por ello los puntos siguientes demandan una particular atención:

- Comportamiento sísmico no elástico de las presas bajo fuertes sacudidas.
- Diseño de presas para resistir los terremotos MCE/SEE, incluyendo el desarrollo de métodos simplificados para estimar la estabilidad dinámica de presas de hormigón fisuradas y de taludes en presas de materiales sueltos.
- Refuerzo eficaz frente a seísmos de presas existentes.
- Estimación del peligro sísmico y mejora de los criterios de proyecto sísmico; reconocimientos sismológicos de nuevas fallas tectónicas.
- Comportamiento a corto plazo de los materiales de las nuevas presas de hormigón compactado con rodillo y de escollera con pantalla de hormigón. Seguridad sísmica de este tipo de presas.
- Simulación del efecto de movimientos de falla en la cimentación sobre el comportamiento y la seguridad de presas existentes.
- Proyecto sísmico y seguridad de obras subterráneas (galerías, cavernas) y del material hidromecánico (compuertas, conducciones, válvulas de desagüe, obras de toma, etc.);
- Respuesta de las pantallas de impermeabilización ante cargas sísmicas.



Grietas en la presa de Pacoima.

- Estabilidad dinámica al cizallamiento en la zona de embalse, producción de deslizamientos del terreno y movimientos masivos de roca en dicha zona.
- Estabilidad de la cimentación de las presas bóveda durante los seísmos.

Un informe señala que en una presa bóveda, las tensiones dinámicas máximas obtenidas a partir de un cálculo dinámico clásico se reducen a 2/3 si se efectúa un cálculo dinámico completo. Otras investigaciones han mostrado igualmente reducciones sustanciales en las tensiones dinámicas de tracción obtenidas por un cálculo elástico lineal, si se tiene en cuenta la apertura de juntas de dilatación.

Aunque estos resultados deben ser confirmados por observaciones, ensayos y otros análisis numéricos, ésta es la naturaleza de las diferencias hoy existentes en el proyecto sísmico y la evaluación de la seguridad de las pre-

sas. Por ello son necesarios estudios suplementarios para rellenar estas lagunas.

## 5. DESARROLLO DE LAS SESIONES

Se propusieron 4 temas para su examen en las sesiones del congreso. Estas sesiones se celebraron el día 19 de junio desde las 13,30 hasta las 17,30 (en ella se analizaron los temas 1 y 2) y el día 20 de junio desde las 8,30 hasta las 12,00 (en ella se analizaron los temas 3 y 4). Fueron presididas por D. Guillermo Noguera (Chile) y actuó como Ponente General D. Martin Wieland (Suiza).

En primer lugar tomó la palabra el presidente que efectuó la presentación. Seguidamente el Ponente General expuso de forma resumida el informe descrito en el apartado anterior.

A continuación, por parte de sus redactores se presentaron las comunicaciones seleccionadas sobre los diferentes temas arriba indicados, cuyos aspectos principales se resumen.

### TEMA 1. EFECTOS DE TERREMOTOS SOBRE PRESAS Y ASEGURAMIENTO DEL RIESGO SÍSMICO

- T. Sasaki (Japón) comenta que en Japón ya se han instalado sismógrafos en 413 presas con transmisión en tiempo real al Sistema de Gestión de Desastres. El terremoto de Kobe (1995) forzó el cambio a sismógrafos digitales. Existe además la red DSN (Dam Sismographic Network) conectada con otras redes.
- N. Matsumoto (Japón) indica que en el terremoto Totori (2000) la presa de Kasho se desplaza al norte y el terreno asciende 5 cm. En otra zona, el terremoto Kein (2003) tuvo magnitud de 7,0.
- A. Chad (Argelia) destaca que el terremoto de Argel (21-5-2003 a las 19,44 h.) con magnitud 6,8 (Richter) ocasionó 2.271 muertos. Se midió una aceleración de 0,34 g en presa de Keddara y 0,58 g en Boumerdes con duración de 42 segundos.
- A. Benialá (Argelia) señala que, a causa del terremoto citado, revisan 11 presas hasta distancia de 120 km del epicentro. Hay 4 presas que presentan desperfectos y no hay problemas a más de 70 km. La mayoría de los problemas es en coronación.

En el posterior coloquio se observó que no basta con tener datos si no se analizan posteriormente. Se comentó como afectan las condiciones del suelo, en especial los suelos blandos; en este sentido en Japón colocan acelerómetros a profundidad de 15, 30, 50 y 100 m, observando que las aceleraciones profundas son mucho menores. El presidente comentó que en Chile colapsan 1,7 presas de estériles al año por terremotos.

### TEMA 2. ASPECTOS SÍSMICOS DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS INCLUIDA LICUEFACCIÓN

- M. Romo (México) analiza la seguridad sísmica empleando modelos de Redes Neuronales. Destaca la deformación vertical en presas de tierra y los asentamientos inducidos por compactación debida al terremoto. Propone la realización de un banco de datos internacional.
- F. Jafarzadeh (Irán) compara los modelos EQL con los elastoplásticos. En la presa Soleiman (177 m) se compara entre modelo bidimensional y tridimensional. Presenta diagramas aceleración/tiempo y amplitud/frecuencia.
- Li Yan (Canadá) Señala que en suelos arenosos se producirá licuefacción en fuertes terremotos ( $m > 6,8$ ) en terrenos de permeabilidad baja o con capas impermeables. Se deben hacer mediciones para ver la velocidad de la onda de cizallamiento.
- N. Matsumoto (Japón) describe ensayos en materiales de escollera mediante explosión para ver la velocidad de la onda (entre 200 a 600 m/s). Las medidas de la frecuencia natural en las estructuras son de alrededor de 2 Hz.
- J. Carmona (Argentina) presenta un análisis tridimensional del comportamiento de la presa de Potrillo durante el terremoto de Mendoza.
- J.J. Fry (Francia) cuantifica las incertidumbres en los cálculos sísmicos de presas de tierras. Presenta una correlación intensidad-desplazamientos.
- T. Sasaki (Japón) describe las características sísmicas del material CSG (cemented sand and gravel). La resistencia dinámica es muy baja, la relación tensión deformación no es lineal.
- I. Escudero (España) indica que en el nuevo modelo dinámico de la presa de Tous se incorpora el análisis de potencial de licuefacción dinámico aguas abajo y analiza las condiciones iniciales.
- J. Fleitz (España) describe la mejora de los sistemas de vigilancia sísmica. Éstos se originan a partir de los sistemas sísmicos de centrales nucleares. La detección y estudio de la aceleración máxima no presenta problemas, mientras que el espectro de respuesta está menos estudiado. Señala la importancia del espectro de respuesta y el parámetro CAV (Cumulative Absolute Velocity).

### TEMA 3. ASPECTOS SÍSMICOS DE PRESAS DE HORMIGÓN

- H. Chen (China) describe los estudios de comportamiento realizados para la presa de Xiaowan, de 300 m de altura, ubicada en una región de sismicidad elevada.

• Y. Ariga (Japón) analiza la importancia de las juntas. Describe el terremoto registrado el 16-3-1997 de magnitud 5,8 cerca de la presa de Shintoyone y compara los datos reales con los resultados del modelo. En modelo con juntas, las tensiones son inferiores, se liberan 2/3 de las tensiones. Una aceleración de 0,5 g no produce daños. El agua del embalse tendrá efecto favorable (atenuará la onda).

• P. Leger (Canadá) señala que al analizar los desperfectos en las presas de gravedad por causas sísmicas, aparece como factor importante la apertura de juntas. Se señala el deslizamiento ente bloques en función de aceleración espectral. Indica la utilidad de los programas CADAM y RS-DAM, gratuitos en Internet.

• E. Bellendir (Rusia) presenta el conjunto legal (leyes, códigos, normas) vigente en Rusia. Se define la degradación de 1ª, 2ª o 3ª clase con planteamiento según ICOLD. Comenta la aplicación a la presa bóveda de Sayano (245 m).

• E. Frossard (Francia) analiza algunos elementos para refuerzo sísmico dispuestos en dos presas en Argelia: refuerzo de la parte alta de la presa con cinturones pretensados y hormigón armado en la zona de aguas arriba.

• A. Carrere (Francia) comenta resultados de ensayos de vibración en prototipo con generador de vibraciones y acelerómetro. En modo 10,4 Hz. se produce alta amortiguación. Se señalan valores obtenidos de amplificación en coronación: 5 en presas de hormigón y 3,8 en las de mampostería.

• H. Kreuzer (Suiza) destaca que es difícil reducir la incertidumbre estocástica. Remite al artículo "Earthquake conversations" (Scientific American - Enero 2003). Concluye que los resultados deben estar acompañados de evaluación de la incertidumbre.

A continuación se produjeron una serie de intervenciones orales. Lino (Francia) señala que las presas simétricas son buenas, el problema es el deslizamiento, comenta estudios en Perú para presa de 300 m en zona sísmica. Heybenson (California) analiza el cálculo de riesgos, estima que el cálculo probabilístico puede exagerar.

#### TEMA 4. REHABILITACIÓN SÍSMICA DE PRESAS Y ESTRUCTURAS ANEJAS

• D. Babbitt (USA) describe que en California se han rehabilitado por consideraciones sísmicas 116 presas, algunas de ellas muy cerca de fallas. El terremoto de 1928 fue el origen de la Ley de Seguridad de Presas de

Siendo la ingeniería sísmica una disciplina relativamente nueva, se puede esperar que se extraigan nuevas lecciones después de cada terremoto destructor, que provoque desperfectos en las presas, lo que puede tener una influencia sobre el proyecto sísmico de futuras presas

1929. El último episodio grave fue en 1971 cuando los desperfectos de Lower San Fernando obligaron a evacuar 70.000 personas. Las mejoras en presas han consistido en: Contrafuertes añadidos, cambio de materiales, rebajado de aliviadero, restricciones de llenado, inyecciones y drenajes, anclajes. Se desmontan 5 pequeñas presas.

• A. Morison (Gran Bretaña) señala que, en cumplimiento de la Guía de Seguridad Sísmica del Reino Unido, recibieron el encargo de mediciones de aceleraciones del terreno para diferentes periodos de retorno. Como resultado estiman 0,25 g para 10.000 años. Han determinado un "índice de vulnerabilidad sísmica" en función del tipo de presa, altura, condiciones de cimentación y PGA del terreno.

• S. Fox (Australia) describe la rehabilitación de la presa de Yarrowonga, destacando la solución para el paso de peces en vías de extinción.

• P. Foster (Nueva Zelanda) comenta, en la presa de Whacamaru, la sustitución de compuertas Stoney por Vagón y en la presa de Roxburg, el refuerzo de la estructura del aliviadero. Destaca la importancia de poder operar después de un terremoto.

• V. Perlea (USA) indica la evaluación de una presa en Kansas considerando el MCE.

• M. Zakery (Irán) analiza los problemas de la rehabilitación de la presa de Sefid Rud (contrafuertes). Fue preciso eliminar fugas por juntas y anclar zona superior con tirantes de 40 m. Las obras duraron 8 meses.

Se realizó una intervención oral para presentar el portal de Internet <http://nw-ialad.uibk.ac.at> (Integrity assessment of large concrete dams) perteneciente a la Red Europea de Investigación, financiada por la U.E.

En su intervención final, el Ponente General señaló, como conclusiones principales en relación con esta cuestión, las siguientes:

- Los recientes terremotos ocurridos indican que esta rama de la ingeniería debe estar alerta.
- El sistema japonés de auscultación para control del comportamiento de las presas debería ser imitado.
- La tectónica de placas presenta diferentes efectos si hay desplazamiento por subducción, movimientos horizontales o fallas de corte intraplacas.
- Las propiedades dinámicas de los materiales podrían ser determinadas tanto por comportamiento de la presa como por ensayos de laboratorio.
- El análisis elastoplástico debería ser preferido al análisis lineal.

- La excitación base de roca es diferente de la excitación en contrafuerte y de la excitación por sobrecarga.
- En cerradas estrechas, se preferirá el análisis tridimensional al bidimensional.
- Debe considerarse la posibilidad de licuefacción de gravas.
- Los análisis pseudoestáticos que toman 0,1 g. deberían ser abandonados.
- Los análisis tipo Newmark no son representativos de la realidad.
- El método FLAC es el que presenta un futuro más prometedor para los análisis dinámicos.
- Algunas ideas aplicadas a presas de hormigón son válidas para presas de escollera.
- Los estados deberían tender a disponer de regulaciones sísmicas
- Se han presentado diferentes análisis para rehabilitación y refuerzo de presas existentes.
- Se ha escrito poco sobre presas de estériles, que presentan un record de dos presas dañadas por año y sobre estructuras anejas a las presas.

## 6. CONCLUSIONES

Faltan informes referentes a los nuevos tipos de presas, como las presas de escollera con pantalla de hormigón (CFR) y las presas de hormigón compactado con rodillo (RCC). Esto puede estar unido al hecho de que ninguna de estas presas ha sido aún sometida a fuertes sacudidas del terreno o ha sido dañada durante un terremoto y que estas presas se suponen generalmente seguras desde el punto de vista sísmico.

Los informes recibidos muestran igualmente que la evaluación de la seguridad de las presas existentes es un tema que ha alcanzado importancia en el curso de estos últimos años. Se han establecido, o están a punto de serlo, nuevas recomendaciones en materia de seguridad sísmica en varios países, algunos con baja o moderada sismicidad.

La comunidad de ingenieros de presas ha tomado conciencia de este problema y varios países están comprobando la seguridad sísmica de las presas existentes o tienen planes para hacerlo.

Buen número de declaraciones hechas por R.G.T. Lane, en el Informe General de la Q.51 permanecen válidas

hoy. Notablemente la declaración según la cual "ninguna región del mundo está al abrigo de un terremoto" continúa teniendo una importancia en la evaluación de la seguridad sísmica. La actividad sísmica principal está asociada a los límites de las placas de la corteza terrestre, pero los terremotos en lugares situados sobre placas estables pueden ser importantes al determinar acontecimientos con muy largos periodos de retorno.

Las grandes presas deben resistir los efectos de los seísmos más fuertes esperados en su ubicación. Los movimientos se representan siempre por la aceleración punta del suelo (PGA). Este valor puede sobrepasar 1 g en la región del epicentro de los seísmos de origen poco profundo, relativamente violentos. En consecuencia, es necesario interpretar las diferencias entre los valores de PGA medidos y los utilizados para el proyecto y la evaluación de la seguridad de la presa. Las respuestas son complicadas, como lo indican los informes que tratan de la evaluación de la seguridad sísmica. Se puede señalar que los valores adoptados para las PGA de las sacudidas provocadas por los seísmos de evaluación de la seguridad (SEE) son cada vez más elevados, notablemente en las regiones con sismicidad moderada.

Siendo la ingeniería sísmica una disciplina relativamente nueva, se puede esperar que se extraigan nuevas lecciones después de cada terremoto destructor, que provoque desperfectos en las presas, lo que puede tener una influencia sobre el proyecto sísmico de futuras presas. Esto ya se observa en los códigos de construcción, que han sido revisados después de cada terremoto importante.

Ya existe un conocimiento extendido sobre el comportamiento sísmico de las presas. Esta información debe ser plenamente utilizada por la comunidad de los ingenieros de presas. Es mucho menos costoso asegurarse durante la fase de proyecto del perfecto comportamiento de una presa en el momento de un terremoto, que deber aportar mejoras posteriormente. La adopción de un tipo de proyecto en el pasado no entraña automáticamente que la seguridad esté asegurada. Debemos recordar que un proyecto que no ha dado malos resultados en el pasado, no debe ser automáticamente considerado como correcto, cuando se realice en las mismas circunstancias la vez siguiente, y que, durante un terremoto, los proyectos de estructuras deberán resistir cargas excepcionales que pueden no haber sido jamás probadas. ■