

# Seguridad de presas de tierra y escollera

## Safety of earth and rockfill dams

**Juan Carlos de Cea Azañedo.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
*Secretario General del Comité Nacional Español de Grandes Presas. jcdecea@mma.es*

**Resumen:** Se describen en el artículo el desarrollo de la sesión, las principales conclusiones expuestas en el Informe del Relator General de la misma, y se efectúa un breve resumen de los distintos artículos que fueron seleccionados para ser presentados en ella.

**Palabras Clave:** Seguridad, Riesgos, Aceptabilidad, Filtros, Filtraciones, Comportamiento, Anomalías, Desbordamiento, Brechas

**Abstract:** The paper describes how was developed the session, the main conclusions of the General Report, and it makes a brief summary of the different papers that were selected to be presented in it.

**Keywords:** Safety, Risks, Acceptability, Filters, Seepage, Behaviour, Anomalies, Overflow, Breaches

### 1. Introducción

El tema de la Seguridad, abordado desde distintas ópticas, se ha elegido en un total de cinco ocasiones como tema a ser tratado en otros tantos Congresos:

- Q.32: *La Seguridad de las presas desde el punto de vista de la cimentación y seguridad de las laderas del vaso.* Año 1967. Congreso de Estambul (Turquía).
- Q.52: *Seguridad de Presas en Explotación.* Año 1982. Congreso de Río de Janeiro (Brasil).
- Q.59: *Rehabilitación de presas para asegurar su seguridad.* Año 1985. Congreso de Lausana (Suiza).
- Q.68: *Evaluación de la seguridad y mejora de presas existentes.* Año 1994. Congreso de Durban (Sudáfrica).
- Q.76: *El uso del análisis de riesgos para apoyar decisiones en materia de seguridad.* Año 2000. Congreso de Beijing (China).

La elección de nuevo del tema de la Seguridad de las presas de tierra y escollera para ser discutido en el marco de la Cuestión nº 85 del 22º Congreso Inter-

nacional de Grandes Presas era especialmente importante porque, según datos de ICOLD, de las 33.500 grandes presas que hay actualmente en el mundo, un porcentaje cercano al 32% son de materiales sueltos (tierra y escollera), creciendo su número de forma sostenida año tras año a lo largo y ancho del mundo, especialmente en países en vías de desarrollo. Por otra parte, la importante vulnerabilidad que estas estructuras presentan ante la presencia interna o externa del agua (el porcentaje de roturas por desbordamiento y erosión interna con respecto al total de roturas de presas de estas tipologías, es de un 31% y un 15%, respectivamente), la invariabilidad de algunos de los aspectos esenciales de su diseño, o las conocidas dificultades existentes para responder a las preguntas ¿son suficientemente seguras este tipo de presas? o ¿cuánto de seguro es el término suficientemente seguro?, hacían necesario debatir en un evento de estas características todos estos temas.

Con respecto a la ya mencionada vulnerabilidad de estas estructuras, la introducción de la sesión efectuada por el presidente de la misma fue bastante concluyente, al demostrar éste que tanto los incidentes como las roturas que se vienen produciendo en los últimos años en este tipo de presas ocurren tanto en paí-

Fig. 1. Vista de la rotura del Depósito de Ameren's Sauk Tamuk (EE.UU).



ses desarrollados como en vías de desarrollo (1). Como ejemplos de roturas recientes ocurridas comentó someramente las de la Presa de Shakidor, en Pakistán, y la del depósito de Ameren's Sauk Tamuk (Fig. 1), en Estados Unidos, que tuvo lugar en Diciembre de 2005.

La Mesa de la Sesión estuvo presidida por D. Alberto Marulanda Posada, Presidente del Comité Colombiano de Grandes Presas y del Comité de Materiales de ICOLD. Como Vicepresidente de la misma figuraba D. Adama Nombre, del Comité Nigeriano de Grandes Presas. El Relator General fue D. Jean Pierre Tournier, del Comité Canadiense. Actuó como Secretario de la Sesión, el también Secretario del Comité Nacional Español de Grandes Presas, D. Juan Carlos de Cea.

## 2. Estructura de la Sesión

A la Cuestión se presentaron un total de 81 artículos correspondientes a un total de 29 países. España

(1) En el momento de escribir estas líneas teníamos noticias de la rotura de la presa Nigeriana de Gusau, por desbordamiento, que ha ocasionando más de 50 muertos.

fue el más prolífico de todos ellos, presentando un total de 11 (Tabla 1).

Una vez examinados todos ellos se decidió dividir la Sesión en los siguientes tres grandes temas y los correspondientes subtemas:

- a) Clasificaciones por Niveles de Seguridad y Reglamentación aplicable (9 Artículos presentados).

Tabla 1

Artículos Presentados	Países
11	España
8	Francia
6	China
5	Canadá, Japón, Suecia, Estados Unidos
4	Suiza
3	Alemania, India y Noruega
2	Sur Africa, Italia, Polonia, Portugal, Republica Checa, Inglaterra y Rusia.
1	Australia, Brasil, Bulgaria, Chipre, Iran, Nueva Zelanda, Pakistán, Rumania, Serbia - Montenegro, Sri Lanka y Venezuela

- a.1) Aplicabilidad de Normativa en países en vías de desarrollo.
- a.2) Clasificación y Reglamentación aplicable a presas naturales
- b) Análisis de Riesgos. Criterios de Aceptación. Filtración (45 artículos recibidos).
  - b.1) Lecciones aprendidas del comportamiento de los diques de encauzamiento de Nueva Orleans al paso del huracán Katrina.
  - b.2) ¿Deberían ser cambiados los criterios de diseño de filtros?
- c) Desbordamiento y formación de Brechas (27 artículos).
  - c.1) Generación de olas por deslizamientos
  - c.2) Capacidad de una escollera para soportar un sobrevvertido. Ejemplos.
  - c.3) Uso de compuertas de segmento con contrapeso en aliviaderos.
  - c.4) ¿Qué tipo de forma de brecha debería ser usado en un estudio de rotura de una presa de tierras con elemento de impermeabilidad distinto a un núcleo de arcilla?

De todos los artículos presentados a la Cuestión 86 se seleccionaron para ser expuestos y debatidos en la Sesión un total de 22, correspondientes a 15 países (Tabla 2). Sólo uno fue presentado por españoles. La idea perseguida con la elección de todos ellos fue la de lograr una Sesión equilibrada en lo que a Reglamentación Aplicable, Criterios Técnicos y ejemplos examinados, se refería.

Cabe destacar, por su especial importancia, el gran interés que entre los asistentes al Congreso despertó, de todas las presentaciones realizadas, la del Cuerpo de Ingenieros Americano en relación a las conclusiones alcanzadas, las lecciones aprendidas, de las roturas ocurridas en los diques de encauzamiento del río Missisipi, a su paso por la ciudad de Nueva Orleans, como consecuencia del huracán Katrina.

También es reseñable la conferencia especial, celebrada al final de la Sesión, en la que se mostraron las actuaciones que, en materia de seguridad, se están llevando a cabo en la presa natural más alta del mundo, la presa de Usoy, en Tajikistan, que con sus 550 m de altura cierra el lago Sarez.

Tabla 2. Comunicaciones Seleccionadas

Nº	Autor	Report	País	Título
<b>Tema 1. Clasificación de los niveles de Seguridad y Reglamentación aplicable</b>				
1a	P. Droz y L. Spasic-Gril	75	Suiza	Main parameters for a classification of natural dams based on the lake Sarez case
1b	D. Hartford	26	Canada	Classification of dams in terms of risk for safety and regulation
1c	Li Lei Et. AL.	60	China	Dam safety classification and dam risk management in China
1d	E.N. Bellendir ET AL.	54	Rusia	The practice of safety assurance of Earth dams in Russia
1e	B. Kalamadasa	38	Sri Lanka	Risk assessment of dams and emergency procedures - Sri Lankan Experience
1f	J.L. Utrillas y F.J. Sánchez Caro	30	España	Reflections on safety and monitoring for earth and rock fill dams
<b>Tema 2. Evaluación de Riesgos. Criterios de Aceptación. Filtración</b>				
2a	D. Kleiner	39	Estados Unidos	Filter for embankment dams - Comments on three papers - Barcelona - 2006
2b	J.J. Fry Y J. P. Blais	69	Francia	¿La perméabilité est-elle un critère à imposer pour les filtres?
2c	W.O. Engemoen y J. M. Cyganiewicz	40	Estados Unidos	Seepage and internal erosion threats in embankment dams
2d	J.P. Fabre, B. Daumas y P. Ruque	63	Francia y Argentina	Détection des évolutions rapides et traitement des anomalies sur les barrages Example du barrage de Los Reyunos
2e	S. Knutsson y A. Bjelkevik	7	Suecia	Failures and incidents at Swedish tailings dams
2f	S. Bonelli	-	Francia	A characteristic time for progression of piping in hydraulic works.
2g	D. Kratochvil y F. Glac	11	Republica Checa	Moravka Dam - Prevention of seepage and modernization of measuring system
2h	Y. Lyapichev	-	Rusia	Safety problem of the Boguchansk rockfill dam
2i	A. Marulanda	-	Colombia	CFRD - Recent incidents
2j	Y. Yamaguchi ET AL.	45	Japón	Safety evaluation of a CFRD in Japan
2k	L.K. Bansal y R. K. Sharma	81	India	Design and construction measures to increase the safety
<b>Tema 3. Desbordamiento y Formación de Brechas de Rotura</b>				
3a	K. Hoeg y A. Løvoll	1 Y 4	Noruega	of Tehri dam Instability and breaching of embankment dams. Field tests on 6 m high dams. Part : Dam toe stability and drainage capacity Part 2: The breaching process and characteristics
3b	P.H. Nguten	-	Canada	Surverse et rupture de barrage: un nouveau défi pour les praticiens
3c	J.J. Fry, J.R. Courivaud y F. Lempériere	66	Francia	Un modèle simple pour caractériser la rupture d'un remblai par surverse.
3d	D. Basham y E. Halpin	-	Estados	Performance of the New

### 3. Informe del Relator General

La seguridad de las presas de tierra, de acuerdo con el informe presentado por el Relator General, puede estructurarse en los siguientes subtemas:

1. Clasificación de los niveles de seguridad y Reglamentación aplicable.
2. Evaluación de riesgos y criterios de aceptabilidad.
3. Métodos de análisis y modelos numéricos.
4. Análisis del comportamiento.
5. Criterios para el diseño de filtros.
6. Medida y Control de filtraciones.
7. Incremento de la capacidad de descarga.
8. Medidas de emergencia y tratamiento de anomalías.
9. Desbordamiento y proceso de formación de brechas.

Se describe a continuación, de manera sucinta, cada uno de ellos, así como las principales conclusiones alcanzadas una vez examinados cada uno de los artículos presentados.

#### 3.1. Clasificación de los niveles de seguridad y Reglamentación aplicable

Los nueve artículos presentados hacen referencia a distintas posibilidades de clasificar los niveles de seguridad de este tipo de presas. Todos ellos coinciden en señalar que en las presas de esta tipología el uso de esas clasificaciones de los niveles de seguridad presenta, como principales inconvenientes, los siguientes: las singulares características de estas estructuras –un simple relleno de materiales–, la naturaleza no determinista de las propiedades de éstos, la ausencia de datos históricos relativos a incidentes, accidentes o roturas y los límites del cálculo probabilística.

Sin embargo, aunque parezcan diferentes, todas tienen la misma base, y el mismo propósito final: definir y priorizar las acciones que sean más necesarias para mejorar el mantenimiento y el seguimiento de una o varias presas.

Por tal motivo, la utilización en países en vías de desarrollo de estas clasificaciones es deseable y hay que apoyarla. No obstante, es preciso adaptarlas a las características de cada uno de ellos, especialmente, en lo que al grado de aceptabilidad de los riesgos

se refiere. Algunos de los artículos correspondientes a este tema de la Sesión ilustran este aspecto con cierto grado de detalle.

#### 3.2. Evaluación de riesgos y criterios de aceptabilidad

Para examinar y discutir ambos aspectos se presentó a esta parte de la Cuestión el mayor número de artículos, un total de 23, cuyas principales conclusiones son las siguientes:

- Aunque las roturas de estas estructuras son raras, en la práctica ocurren.
- Al principio de los 90, en los países más desarrollados (Estados Unidos, Canadá, Australia, etc.), para evaluar su seguridad, comenzaron a utilizarse las técnicas de análisis de riesgos, pero prestando atención, fundamentalmente, a los aspectos puramente económicos.
- El principal inconveniente de esta técnica radica en la dificultad de definir cual es la probabilidad de rotura y cuales serían las consecuencias.
- Los aspectos económicos se han ido eliminando de estas técnicas de evaluación de la seguridad utilizándose actualmente, en lugar de aquellos, las pérdidas potenciales de vidas humanas.
- Actualmente se están haciendo importantes esfuerzos para tratar de incorporar a estas técnicas de evaluación de la seguridad la cuantificación de los riesgos sociales y medioambientales.
- Algunos artículos ponen de manifiesto la importancia de utilizar estas técnicas correctamente para gestionar los riesgos y/o para determinar los criterios de aceptabilidad. Todo consiste en tener en cuenta el contexto en el que se emplean, sus aspectos físicos, sociales, legales, culturales, etc.
- La metodología a ser usada en el futuro debería armonizarse desarrollando los mismos métodos de análisis y principios (ALARP, Arbol General de Eventos, etc.)

#### 3.3. Métodos de análisis y modelos numéricos

Las presas de materiales sueltos presentan la particularidad de que su sección tipo está constituida por materiales de distinta naturaleza que cumplen diferentes objetivos, y cuyas propiedades básicas y comportamiento tenso-deformacional bajo carga conocemos, pero no con la suficiente profundidad.

La cada vez mayor complejidad de algunas de estas estructuras y la utilización en su construcción de materiales de características mediocres sigue haciendo necesario el desarrollo de métodos de cálculo y modelos numéricos cada vez más sofisticados con los que analizar y aproximarse algo más a lo que es o será su comportamiento en la práctica.

Hasta ahora un buen número de ellas se ha venido examinando, con un grado de aproximación suficiente, usando el método de los elementos finitos o de las diferencias finitas, bajo la hipótesis de que su sección tipo se trataba, en cualquier caso, de un medio continuo. Muchos de los artículos presentados describen esos cálculos y los resultados obtenidos, si bien en algún caso se habla de nuevos modelos, por ejemplo, el descrito por FRY *et al.* (R. 70), y denominado *bloques ensamblados*, que está basado en un proyecto denominado Micromecánica de Presas de Escollera, desarrollado por Électricité de France, Coyne y Bellier, Itasca y la Escuela Central de Lyon.

### 3.4. Análisis del Comportamiento

Se continúan desarrollando modelos para simular el comportamiento de los distintos elementos de la estructura, tanto durante la construcción como durante el llenado y posterior explotación del embalse, para asegurarse que se ajustan al diseño realizado. Ello es debido a la creciente utilización de nuevos elementos de impermeabilización: pantallas de hormigón, geomembranas, núcleos asfálticos, etc.

Puede ser el caso del software FLAC, que usado por BENLLIURE *et al.* (R.28), ha servido para predecir el comportamiento de la presa de Mora de Rubielos, de núcleo central de tipo asfáltico. Otro ejemplo es la propuesta efectuada por QINGXI *et al.* (R.56), que usa el denominado método RSM (Response Surface Method) para examinar el comportamiento de una presa con pantalla de hormigón.

Hay otros interesantes estudios relacionados con la fracturación hidráulica de núcleos. OHTA *et al.* (R.47) hacen un buen resumen del estado actual de la cuestión y SAKAMOTO *et al.* (R.46) concluyen que los taludes habituales con que se diseñan numerosos núcleos, 1(V):0,2(H), presentan un coeficiente de seguridad adecuado frente a ese factor de riesgo.

En relación con el comportamiento de materiales que constituyen la estructura, ESTAIRE y OLALLA (R.36) analizan un total de 20 ensayos de Corte Directo

efectuados en un cajón de 1 m<sup>3</sup> con varias muestras de escollera, concluyendo la no linealidad de su ley de resistencia y la importancia de la compactación en las propiedades resistentes obtenidas.

El comportamiento deformacional de escolleras ante el llenado del embalse, o por efecto de las lluvias, es descrito por ALONSO *et al.* (R.31) a partir de la utilización de un modelo de flujo acoplado, suponiendo que el medio no está saturado. Con esta misma hipótesis, pero utilizando un modelo basado en la teoría de Biot, determinan JAFARZADEH *et al.* (R.61) los asientos que produce el llenado del embalse en el espaldón de aguas arriba de la presa Masjed-Soleyman (Irán), de 177 m de altura.

Otro aspecto importante es el de la validación del comportamiento observado con respecto al predicho. Todo depende del número de elementos de auscultación instalados, que debe optimizarse, y de la calidad de las lecturas tomadas y de las interpretaciones que se hagan de ellas. MORI *et al.* (R.43) presentan un interesante ejemplo de lo anterior.

### 3.5. Criterios para el diseño de filtros

La erosión interna es una de las más importantes causas de rotura de las presas de materiales sueltos. Por ese motivo, la colocación de materiales adecuados aguas abajo de los elementos de la estructura que deben ser protegidos es el mejor medio de evitarlas. Además, es fundamental que proyectistas y constructores entiendan su importancia, el destacado papel que juegan estas zonas en relación con la seguridad y, especialmente, que la función filtro está asociada con la retención de partículas más finas, pero que deben cumplir una segunda, la de drenaje, que a su vez depende de la permeabilidad.

Hay dos artículos de mucha importancia que tratan de los criterios de dimensionamiento de filtros.

El primero es el de DELGADO *et al.* (R.29), artículo en el que se analizan un total de 688 ensayos, 340 de los cuales han sido realizados en la Universidad de Granada. Concluyen los autores la importante dispersión de los resultados obtenidos, la imposibilidad de encontrar una ecuación a partir de la cual definir un filtro y que las reglas habituales sólo sirven para determinar si un filtro falla o no.

El segundo artículo es el debido a KLEINER (R.39). En él se hace una revisión histórica de la cuestión. Se examinan los trabajos efectuados en los 70 por Vaug-

han, en los 80 por Sherard y sus colegas del U.S. Soil Conservation Service, en los 90 por Foster y Fell y los criterios recomendados en el Boletín nº 95 de ICOLD. El autor recuerda que ningún incidente se ha reportado hasta la fecha en estructuras diseñadas con los criterios contenidos en dicho Boletín.

Por tal motivo existe un consenso casi unánime de que los criterios de diseño incluidos en el Boletín nº 95 de ICOLD, que están basados en los propuestos por Sherard, son adecuados en la mayor parte de los casos. Sin embargo, hay que ser muy prudente cuando se emplea el criterio de retención cuando el suelo base es de tipo dispersivo.

No obstante, recomienda el autor ser más conservador con los suelos del tipo 1 (suelos con un contenido de finos mayor del 85%), usando una relación  $D_{15}/d_{85} < 6$ .

Además, los resultados de los ensayos NEF efectuados con multitud de suelos base y filtros confirman que es adecuado y conservador para la granulometría de estos últimos, fijar un contenido máximo de finos no plásticos del 5%. Complementariamente, la granulometría debe ser continua, bien graduada, de huso estrecho, y sus materiales constituyentes, uniformes y estables.

### 3.6. Medida y Control de filtraciones

En las presas de materiales sueltos, la detección precoz de filtraciones y de síntomas de erosión interna, es esencial durante las habituales y periódicas inspecciones de control para garantizar su seguridad. Diversas técnicas basadas en la Geofísica, en la utilización de fibra óptica, en las propiedades físico-químicas de los materiales, etc., han sido desarrolladas en los últimos años para localizar y cuantificar las pérdidas de agua a través de estas estructuras.

Los estudios de resistividad efectuados por SJÖDAHL *et al.* (R.62) en diversas presas suecas muestran que cuanto más larga es la serie de lecturas tomadas, mejores conclusiones pueden extraerse del análisis de las mismas.

Las anomalías del Potencial Espontáneo, combinadas con medidas de resistividad, pueden usarse para determinar caminos preferenciales de filtración, tal y como muestran los trabajos de ROZYCKI *et al.* (R.27). Una línea de investigación similar a la anterior, pero en la que se examina la temperatura del interior del cuerpo de presa, usando la fibra óptica, es comentada por PERZLMAIER *et al.* (R.12). También por WANG SHIJUN *et al.* (R.59). AMOS (R.50) propone, además de medir la

temperatura, analizar las características químicas e isotópicas del agua filtrada.

Cuando las filtraciones son excesivas, para reducir el riesgo de erosión interna en el cuerpo de presa o en el cimientado, se hace preciso llevar a cabo medidas correctoras. Cuando el problema se detecta en el cuerpo de presa, un método muy efectivo puede ser la colocación de una geomembrana en su paramento de aguas arriba, caso éste descrito por KRATOCHVIL y GLAC (R.11), en relación con la reparación efectuada en la presa Moravka, en la República Checa; otro ejemplo lo describen LAFUENTE *et al.* (R.37). Se trata de la pantalla de bentonita-cemento ejecutada en la cimentación de la presa de La Loteta, de naturaleza yesífera, con objeto de reducir, hasta un valor admisible, el gradiente de filtración.

También es posible acudir a las inyecciones convencionales a base de lechada de cemento. Sin embargo, pueden ser a veces difíciles de llevar a cabo, especialmente cuando la filtración es excesiva. IRNGARTINGER *et al.* (R.06) sugieren el empleo de productos termoplásticos calentados que después se congelan rápidamente cuando la temperatura disminuye y cuando el caudal de filtración aumenta.

### 3.7. Incremento de la capacidad de descarga

La seguridad hidrológica, en otras palabras, el paso de avenidas a través de los aliviaderos, es esencial en las presas de materiales sueltos por su altísima vulnerabilidad.

Esta función es correctamente ejecutada por los aliviaderos diseñados con los criterios más modernos, no así los que fueron proyectados con otros hoy considerados obsoletos o anticuados. La mayor longitud de las series hidrológicas utilizadas en su momento, los nuevos criterios de seguridad a que obligan las normativas -exigidos en parte por una Sociedad más consciente de los riesgos de todo tipo- son algunas de las razones por las que los titulares de las presas están obligados a revisar los sistemas de evacuación al objeto de cumplir esos nuevos requerimientos de seguridad.

Un ejemplo de lo anterior se comenta en el artículo de JONES *et al.* (R.17). Ante la incapacidad del aliviadero existente en la presa de Jindabyne, en Australia, para evacuar las avenidas deducidas de un nuevo estudio hidrológico, se propone modificar el aliviadero existente con un sistema Hydroplus con ocho vanos de vertido.

Otro ejemplo es el de la presa Hoa Binh, en Vietnam, descrito por RODIONOV *et al.* (R.76). Un nuevo estudio hidrológico puso de manifiesto la errónea estimación de la máxima avenida probable, que de 37.800 m<sup>3</sup>/s pasó a ser 52.000 m<sup>3</sup>/s. La única posibilidad para hacer frente a esa nueva situación pasa por construir una nueva presa aguas arriba.

Los varios artículos que tratan éstos y otros aspectos asociados a ellos, muestran claramente los desafíos a que se enfrentan en la actualidad los titulares. Si las estructuras existentes deben ser modificadas, es preciso mantener unos resguardos adecuados y muy holgados durante todo el tiempo que duren las obras. Si lo que se hace es construir una estructura independiente a las existentes, aquella debería tener un mínimo impacto sobre éstas, tanto durante su construcción como posteriormente durante su explotación. Además, conviene alterar la estrategia de utilización de forma tal que la nueva estructura entre en funcionamiento cuanto antes, al objeto de examinar si su diseño ha sido o no adecuado y si necesita ser optimizado.

### **3.8. Medidas de emergencia y tratamiento de anomalías**

La rápida detección de anomalías o cambios en las variables de control del comportamiento de las presas es fundamental para garantizar su seguridad, de manera muy especial en el caso de las de materiales sueltos.

Un ejemplo de lo anterior, lo describen con detalle FABRE y PAOLANTONIO (R.63). Se trata de cambios inesperados en la evolución de las lecturas de dos células de carga situadas aguas abajo del núcleo de la presa de Los Reyunos, en Argentina, y de 135 m de altura, Concluyen estos autores que:

- Ligeras anomalías o cambios de comportamiento de la presa pueden detectarse analizando globalmente todas las lecturas de los elementos de auscultación instalados
- Anomalías y cambios bruscos de comportamiento (por ejemplo, debidos a un fenómeno de erosión interna) están asociados, a veces, al tipo de estructura; en estos casos, recomiendan definir dos tipos de umbrales para aquellos:
  - El primero, para detectar el cambio de comportamiento y para aumentar la frecuencia de la toma de lecturas, y

-El segundo, para determinar la mayor o menor importancia del cambio de comportamiento, pero sin que tal variación represente un riesgo para la seguridad de la presa a corto plazo.

### **3.9. Desbordamiento y proceso de formación de brechas**

El análisis detallado de la base de datos de incidentes y roturas de presas de tierra a lo largo y ancho del mundo, elaborada por el International Dam Safety Interest Group, permite llegar a las siguientes conclusiones:

- a) Las presas de tierra homogéneas formadas por materiales de naturaleza cohesiva aguantan varias horas, sin romperse, el vertido por coronación de una lámina de agua de entre 30 y 50 cm de altura.
- b) Las presas de escollera aguantan un vertido por coronación del orden del doble, es decir una lámina de agua de hasta 1 m de altura, pero una vez formada la brecha, el tamaño de ésta aumenta muy rápidamente.
- c) La forma del hidrograma de rotura depende de varios parámetros, pero, básicamente, del volumen de embalse y de las propiedades geotécnicas de los materiales con los que está construida la presa.

En los últimos años se ha prestado una especial atención en Noruega a la rotura de pequeñas presas o diques de cierre de cauces de hasta 6 m de altura. Las principales conclusiones alcanzadas de esos ensayos reales son las siguientes:

- a) Las presas son más resistentes a la formación de brechas y a la rotura que lo que determinan las teorías más avanzadas en la materia.
- b) Aunque la primera fase del proceso, la iniciación de la brecha, es lenta y gradual, la segunda, su crecimiento, es muchísimo más rápido.

### **4. Resumen de las presentaciones realizadas en la sesión**

Se describen a continuación, de manera muy resumida, los contenidos de algunas de las presentaciones de mayor interés realizadas durante el desarrollo de la Sesión (Tabla 2).

### 1a. Main Parameters for a Classification of Natural dams based on the Lake Sharez case.

El autor describe las principales variables que pueden usarse para clasificar las presas naturales, centrándose, de manera muy especial, en las que presenta la presa de Usoy, que cierra el lago Sharez, en Tadjikistan, y es la más alta del mundo de esta tipología, con 550 m de altura.

La presa se creó a partir del deslizamiento de una ladera muy escarpada en un valle muy estrecho, como consecuencia de un terremoto de magnitud 7,2 acaecido en 1911. Se concluye que la presa es segura dado que las aportaciones en el embalse son inferiores a las filtraciones que se producen a través de ella y a que su coronación queda bastante por encima del nivel habitual del embalse creado.

A efectos de clasificación de este tipo de presas, establece el autor que deben emplearse, como mínimo, los siguientes:

- Topografía: En valle muy estrecho y con laderas escarpadas.
- Origen: Un terremoto de magnitud 7,2 acaecido en 1911.
- Tipo de deslizamiento a que está asociada: Rock and earth slumps
- Tamaño y Geometría: Muy grandes en relación a presas convencionales.
- Principal Modo de Rotura: Desbordamiento. Secundario, Erosión interna.
- Longevidad: Si bien muchas fallan poco tiempo después de formadas, en este caso, debido a que las entradas de agua son muy similares a las pérdidas por filtración, se trata de una presa centenaria.
- Efectos generados en la morfología del valle: Sedimentación importante aguas arriba.
- Medidas de Control de la Seguridad: Aliviaderos, Sifones, Bombeos, Túneles, etc.
- Beneficios Potenciales: Posibilidad de utilizar el salto como aprovechamiento hidroeléctrico.

### 1b. Classification of dams in terms of risk for safety and regulation.

El artículo critica los sistemas habituales de clasificación de presas basados en los daños incrementales, proponiendo, en su lugar, uno nuevo.

Todos esos sistemas están normalmente restringidos al caso de presentación de terremotos o avenidas, sin tener en cuenta otros posibles factores de riesgo, como pueden ser una reducida fiabilidad del funcionamiento de las compuertas de los aliviaderos o la posibilidad de presentación de fenómenos de erosión interna en las presas de materiales sueltos.

En lo que se refiere a la pérdida incremental de vidas humanas, el autor señala que en países desarrollados, y en el caso de presentación de avenidas, la población en riesgo, bien dirigida por las autoridades de Protección Civil, tiende a moverse hacia cotas elevadas, hacia la denominada como zona incremental, alejándose de la zona en riesgo, siendo normalmente difícil la pérdida de vida alguna (de ocurrir, suele tener la consideración de accidental).

Es ese, precisamente, otro de los grandes inconvenientes de todos esos sistemas de clasificación, la ausencia en ellos de criterios relativos a la dinámica de los movimientos de la población ante situaciones de riesgo, que se resuelve con el sistema propuesto por el autor (Tabla 3).

### 1c. Dam Safety Classification and dam risk management in China.

Describe el artículo que China tiene del orden de 85.000 presas, 82.000 de las cuales son de pequeño ta-

Tabla 3. Nuevo Sistema de Clasificación de Presas propuesto por D. Harford

Tipo de Riesgo	Consecuencias de la Rotura
$\alpha$ (Bajo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ninguna posibilidad de pérdida de vidas humanas.</li> <li>• No produce impactos socioeconómicos.</li> <li>• El entorno medioambiental se recupera de manera natural.</li> </ul>
$\beta$ (Significante)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Afección potencial a la población durante un breve período de tiempo.</li> <li>• Capacidad de absorción del Impacto socio-económico por parte del titular. Ausencia de daños colaterales.</li> <li>• Se necesita intervenir para recuperar el entorno medioambiental.</li> </ul>
$\gamma$ (Alto)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Afección potencial a una comunidad permanente.</li> <li>• Incapacidad de absorción del Impacto socio-económico por parte del titular. Daños colaterales.</li> <li>• Hay una pérdida permanente de especies y habitats.</li> </ul>

maño, de acuerdo con su sistema de clasificación, que también se describe y que, básicamente, depende del volumen del embalse y, en función de quien ostenta la titularidad, de las condiciones de seguridad que presentan. Si bien las de mayor tamaño han sufrido un proceso de rehabilitación en los últimos años, en el caso de las pequeñas, esas labores se encuentran aún pendientes.

Como consecuencia de unos bajos estándares de diseño, un reducido control de calidad de la construcción, los efectos del natural envejecimiento, el crecimiento de la economía y unas áreas aguas abajo de las presas cada vez más pobladas, el análisis de riesgos se postula como la mejor herramienta para controlar la seguridad y la priorización de los trabajos de rehabilitación a llevar a cabo. Se efectúa un Análisis de Riesgos sobre un total de 29 presas de tamaño grande e intermedio, utilizando los conocidos métodos del Bureau y Portugués.

**1d. The practice of safety assurance of Earth Dams in Russia.**

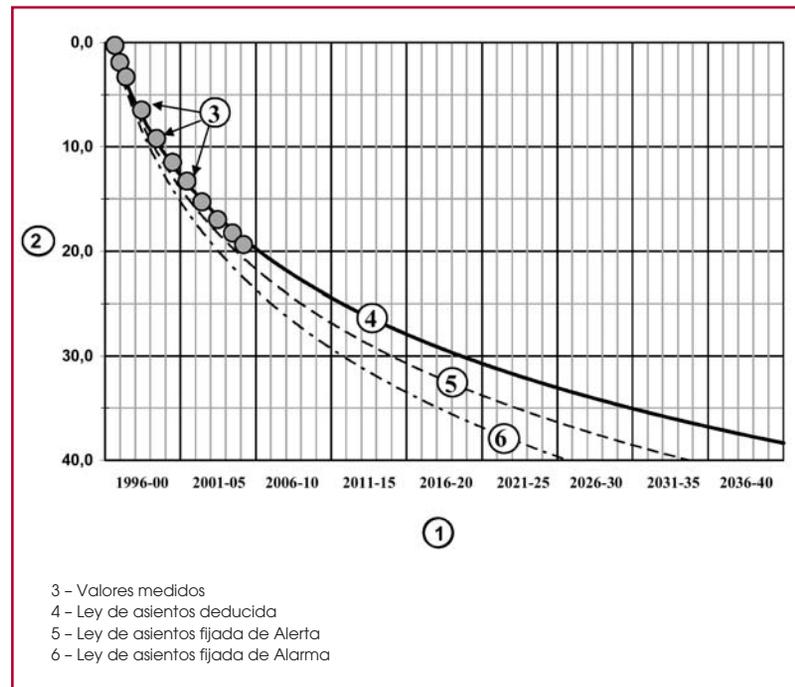
Rusia cuenta con más de 2.200 grandes presas en explotación, de las que del orden del 60% son de materiales sueltos.

El artículo describe los accidentes y roturas ocurridos en las presas de materiales sueltos rusas de Marmarik (deslizamiento del espaldón de aguas abajo), Chir-Yurt Dam (deslizamiento provocado por un terremoto), Tirl-yansk (desbordamiento), Bratsk, Kolyma y Dique de Nijegorodskaya (erosión interna), Kakhovsk (reducida capacidad de carga del cemento), etc.

De acuerdo con los datos anteriores, el concepto de seguridad debe ser tenido en cuenta tanto en el diseño como durante la construcción y posterior vida de la estructura. El análisis y evaluación de riesgos es una herramienta moderna que parece servir para estos propósitos, pero, previamente, habría que definir cual es el grado de seguridad aceptable, resolver como gestionar la seguridad de una presa o de un grupo de presas, como incluir, para optimizar, los costes de mantenimiento y conservación a lo largo de la vida de la estructura, y como incluir la forma en que se opera la presa.

**1f. Reflections on Safety and Monitoring for earth and rock fill dams**

El artículo describe la introducción en el ámbito territorial de la Confederación Hidrográfica del Júcar, y



Ejemplo de fijación de niveles de Alerta y Alarma en una ley de evolución de asentamientos.

más concretamente en la presa de Tous, de un Sistema de Alertas y Alarmas para la Instrumentación colocada en ella. El Sistema, de tipo automático, revisa la evolución de las lecturas de todos los sensores (que se clasifican previamente en Críticos, Importantes o Normales), avisando, como si de un semáforo de regulación de tráfico se tratara, cuando aquellas superan los umbrales establecidos de antemano por un equipo de técnicos altamente cualificados. Para mostrar en qué consiste el Sistema, se examinan la evolución de los asientos de la coronación de la presa y de las presiones intersticiales en el interior de ella.

En el caso de los asientos de la coronación, que normalmente tienden a seguir una ley del tipo logarítmico, una vez determinado cual es el máximo asiento de la coronación esperable en t años, los umbrales de alerta y alarma se fijan cuando los asientos medidos exceden en más de un 10% o un 20%, respectivamente, los deducidos por esa ley.

En lo que se refiere a las presiones intersticiales, una vez disipadas total o parcialmente las sobrepresiones generadas por el proceso constructivo y garantizado que su evolución depende tan sólo de la variación sufrida por el nivel del embalse, la presión medida en un cierto piezometro, u, será proporcional, con factor de multiplicación,  $\delta$ , a la carga hidráulica a la que se encuentra el punto en el que está ubicado aquel,  $\Delta H$ , con un cierto retraso en el tiempo,  $\varphi$ .

La definición de los niveles de alerta y alarma para los piezómetros se basan, pues, en el establecimiento de unos ciertos porcentajes por encima de los valores determinados a partir de la relación anterior.

### **2a. Filter for embankment dams. Comments on three papers of Barcelona - 2006**

La presentación realizada hace referencia a tres artículos incluidos en el marco de la Sesión (R.21, R.29 y R.39) en los cuales se examinan los criterios habituales de dimensionamiento de filtros, afirmando que la granulometría fina con la que habitualmente se dosifican muchos hormigones cumple la mayor parte de ellos.

Las investigaciones efectuadas por Park et al. (R.21) concluyen que el comportamiento de un filtro es adecuado aunque su granulometría tenga hasta un 15% de contenido de finos no plásticos, e incluso con un máximo del 5% de finos plásticos.

El trabajo de DELGADO *et al.* (R.29) valida los criterios de dimensionamiento establecidos por Sherard hace más de dos décadas, si bien, indican, que cada caso debe examinarse con detalle. También deducen una relación entre las permeabilidades de suelo base y filtro, y concluyen que la permeabilidad de este último es la mejor garantía de la efectividad de un cierto filtro.

Por último, el autor de la presentación revisa otros trabajos muy conocidos dentro de este campo (Sherard, Vaughan y Fell), concluyendo que los criterios de dimensionamiento contenidos en el boletín de ICOLD nº 95 son adecuados; que los establecidos por Vaughan para dimensionar *Filtros Perfectos* son aceptables, pero, en su opinión, muy conservadores, y, finalmente, recomienda para cada tipo de suelo base, de acuerdo con la Clasificación de Sherard, cual debería ser del D15 de la granulometría de filtro a emplear.

### **2c. Seepage and internal erosion threats in embankment dams**

Debido a que la mayor parte de las presas de tierra desarrollan en su interior una red de filtración, el riesgo de un accidente o rotura debidos a un fenómeno de erosión interna se encuentra casi siempre presente en la mente de todos los técnicos encargados de su mantenimiento y explotación. Pero, ¿cuando se considera que el proceso de filtración es una verdadera amenaza? Las inspecciones periódicas, las revisiones detalladas de la seguridad por equipos multidisciplinares inde-

pendientes, la instrumentación colocada y el Análisis de Riesgos, son algunas herramientas con las que actualmente se cuenta para poder dar respuesta a esa pregunta. De todas ellas, el USBR se decanta por el Análisis de Riesgos, si bien para ser verdaderamente efectivo, una agencia estatal debería definir cuando un riesgo es aceptable o inaceptable.

### **2e. Failures and incidents at Swedish tailings dams**

Se describe en la presentación, y en el período comprendido entre 1990 y 2004, una muy interesante estadística acerca de los problemas surgidos durante la operación normal, los incidentes, roturas y origen de ambos, ocurridos en las presas de residuos mineros Suecas, comparándose además, los resultados obtenidos, con lo que se conoce en otros países.

Se concluye que el origen de los incidentes y roturas es debido, en general, a problemas estructurales o de erosión interna, y que suele ser normal la coexistencia de varios en una misma estructura.

Por último, se ponen en duda las estadísticas manejadas por ICOLD, en las cuales figuran 2 ó 4 incidentes-roturas por año, mientras que la realidad se encarga de demostrar que esa cifra puede ser más próxima a 300.

### **2f. A characteristic time for progression of piping in hydraulic works**

En un muy interesante trabajo el autor analiza con detalle el proceso de erosión interna de un suelo, concluyendo que la ley que lo regula es una *ley constitutiva*. El proceso erosivo parece quedar definido por dos parámetros. Esfuerzo crítico, es decir presión del agua que arrastra las partículas del suelo, y Coeficiente de Erosión, factor que tiene en cuenta de que forma aumentan las dimensiones del conducto de erosión. A pesar de que aún se requiere una mayor investigación al respecto, la medida de ambas variables en laboratorio no parece muy complicada.

### **2g. Moravka Dam. Prevention of seepage and modernization of measuring system**

Se describe en el artículo la presa de Moravka, de pantalla asfáltica y 39 m de altura. Construida en la década de los 60, en los años 1996 y 1997 aparecieron en su paramento de aguas arriba dos chimeneas que provocaban una filtración de hasta 600 l/sg. Co-



Vistas de la presa de Moravka antes y después de la reparación de su paramento de aguas arriba.

mo consecuencia de este hecho se llevaron a cabo una serie de trabajos con el fin último de modernizar la presa. Consistieron, básicamente, en la colocación de una nueva pantalla de impermeabilización de PVC, en la ejecución de una nueva pantalla de inyecciones en el cemento, en la construcción de una galería en la margen izquierda que canalizara las importantes filtraciones que ocurrían por ella y en la instalación de un buen número de elementos de auscultación (130 piezómetros (105 de lectura automática) y 44 puntos de medida de caudales de filtración).

## 2i. CFRD. Recent Incidents

El autor concluye que al contrario de lo que venía siendo habitual hasta la fecha, no parece adecuado acometer el diseño de las futuras grandes presas de

pantalla de hormigón basándose en el comportamiento de las ya construidas.

El importante aumento en la altura de este tipo de presas (no son infrecuentes actualmente las que se acercan e incluso sobrepasan los 200 m de altura), la reducción de los espesores de las losas, de la cuantía de las armaduras en éstas, la eliminación en las juntas longitudinales de compresión de los refuerzos frente al estallido, y la cada vez mayor utilización del bordillo como base de apoyo de la pantalla, han conducido a algunos fallos muy relevantes (Antamina en Perú, Barra Grande y Campos Novos en Brasil, Mohale, en Lesotho, en Islandia, etc.), en algún caso no bien comprendidos, todo lo cual obliga a ser muy cauto en el futuro a la hora de diseñar estructuras de este tipo de gran altura basándose en el precedente.

## 2j. Safety evaluation of a CFRD in Japan

Describe el comportamiento de la presa Tomata Saddle, de escollera con pantalla de hormigón, 25 m de altura, 250 m de longitud de coronación. Fue terminada de construir a finales de 2003 y finalizado el llenado del embalse en 2005. Según el autor, se trata de la presa más moderna de esa tipología del Japón.

Se describe la instrumentación colocada en ella para controlar su adecuado comportamiento, prestándose una especial atención al control de las filtraciones, de los movimientos de la coronación y de las deflexiones de la pantalla. De todos ellos, se destaca, por su importancia, la utilización de un novedoso sistema para la detección de filtraciones por métodos eléctricos.



Vista de la instrumentación colocada en la presa de Tomata Saddle.





Rotura por erosión interna de un terraplén de prueba.

Un año después de puesta en carga, se califica su comportamiento de excelente, dado que teniendo en cuenta la altura y el factor de forma de la cerrada, los asientos de la coronación, la deflexión de la pantalla y las filtraciones registradas presentan los valores más bajos de todas las presas japonesas de esa misma tipología.

### 2k. Safety Measures in Highest dam in Himalayas.

Se describe con gran lujo de detalles el diseño efectuado y los procedimientos de construcción de la presa de Theri, en la India, en las inmediaciones del Himalaya. La presa de núcleo central y escollera, tiene una altura de 260 m.

Ante la elevada sismicidad de la zona, se ha prestado una especial atención a algunos aspectos esenciales del diseño: Estudio de la imposibilidad de licuefacción de núcleo y espaldones, resguardo de más de 9 m, contraflecha del 1% de la altura para compensar los asientos remanentes que podrían ocasionarse en caso de ocurrencia de terremotos de cierta entidad, inclinación de los taludes más reducida de lo que suele ser habitual, mayor anchura de la coronación para evitar el efecto látigo, mayor energía de compactación de los materiales de núcleo y espaldones para alcanzar una mayor densidad, ejecución de dos galerías longitudinales en el núcleo (una a la mitad de la altura y otra en las inmediaciones de la coronación) y la colocación de un elevado número de elementos de auscultación (350 aparatos en el cuerpo de presa y en el cimiento y más de 145 hitos de control de movimientos en la superficie de la presa).

### 3a. Instability and breaching of embankment dams. Field tests on 6 m high dams. Part 1: Dam toe stability and drainage capacity - Part 2: The breaching process and characteristics.

En una muy interesante presentación describen los resultados de los ensayos de rotura por desbordamiento o por filtración excesiva a través de defectos dejados a tal efecto en la sección tipo, llevados a cabo con terraplenes de 6 m de altura, distintas tipologías y constituidos por distintos tipos de materiales (arcilla, gravas y escollera). Se analiza cómo se inestabiliza su pie, de qué forma se inicia y progresa la brecha y se comparan las dimensiones que para esta última se deducen de distintas teorías con las observadas en la práctica.

Concluyen que:

- a) Las presas de tierra soportan sin romperse el paso de una lamina vertiente por coronación 0,3 a 0,5 m durante varias horas y hasta una de 1 m en el caso de las de escollera.
- b) Las presas de tierra son más resistentes a la iniciación de la brecha que lo que determinan las normas; la misma aseveración se hace en relación a los fenómenos de erosión interna, que tardan bastante en desarrollarse, incluso en ausencia de filtros adecuados.

### 3b. Surverse et rupture de barrage: un nouveau défi pour les praticiens.

El autor pone en duda en el caso de vertido por coronación de presas de pantalla y núcleo asfáltico la validez de las formulas clásicas para la determinación de las anchuras de brecha, la forma de ésta y el modo de rotura asociado. En lo que se refiere a este último, y ante la general ausencia en la sección tipo de ambos tipos de presas de materiales cohesivos y erosionables, recomienda examinar el deslizamiento del cuerpo de presa sobre la cimentación, o sobre un plano sub-horizontal, como si de un sólido rígido se tratara.

Por otra parte, para presas de núcleo, en el caso de presentación de avenidas propone examinar la posibilidad de que la filtración de agua entre la coronación de éste y la de la propia presa pueda provocar su rotura, situación ésta que, dice, es función de la duración de la avenida, de la inclinación del talud de aguas arriba, de la anchura de la coronación, de la velocidad a

la que circula el agua por ésta y por la resistencia a la erosión de los materiales.

### 3c. Un modèle simple pour caractériser la rupture d'un remblai par surverse.

El trabajo presenta una nueva fórmula para determinar el caudal máximo evacuado en caso de rotura de una presa por desbordamiento, cuya deducción se realiza teniendo en cuenta las tres etapas por las que pasa la brecha: iniciación, formación y agrandamiento, dependiendo esta última fase de un coeficiente que el autor denomina de erosión y que es función del tipo de material constitutivo de la presa y de la tipología de ésta. Para validar la nueva fórmula se tienen en cuenta los datos de un total de 11 casos muy bien documentados de roturas de presas, y se comparan los resultados obtenidos de su aplicación con los que resultan de la utilización de otras debidas a diferentes autores.

### 3d. Performance of the New Orleans Storm Protection System during Hurricane Katrina.

La presentación es un resumen de las conclusiones alcanzadas por el profundo estudio multidisciplinar realizado por la IPET (2) (Interagency Performance Evaluation Task Force, formada por 150 de los mejores ingenieros americanos del Gobierno, Universidades y empresas privadas) tanto en Nueva Orleans, como en el Sudeste de Louisiana, en relación a los daños producidos en esas dos zonas por el huracán Katrina en agosto de 2005.

El huracán, de grado IV, y con una precipitación asociada de 8.250 mm en algunas zonas, se considera como uno de los más devastadores de los que se tiene noticias. Provocó daños por valor de 75.000 M\$, obligó a desplazar a más de 400.000 personas y causó un total de 1.600 muertes, según datos del Centro Nacional de Huracanes y del FEMA.

El complejo sistema de protección de inundaciones y huracanes de Nueva Orleans, con más de 350 millas de diques y muros de contención, con los que se divide el área metropolitana en 17 subcuencas, literalmente desapareció en un total de 169 millas y sufrió 50 brechas, 4 de ellas debidas a problemas de cimentación de los diques.

(2) El Informe completo puede encontrarse en la dirección: <https://IPET.wes.army.mil>.



Efectos del huracán Katrina a su paso por Nueva Orleans.

Se resumen a continuación algunas de las principales conclusiones alcanzadas por el estudio:

- a) Realmente el Sistema de Protección no tenía nada más que el nombre, ya que en la práctica fue planeado, diseñado y operado de forma que cada elemento funcionaba de manera independiente y, además, sin que existieran redundancias.
- b) El sistema se encontraba incompleto; muchos diques habían sufrido procesos de subsidencia que no fueron posteriormente corregidos; otros se encontraban en construcción o inacabados y con sus cotas de coronación más bajas, debido a la carencia de fondos.
- c) Muchas de las brechas ocurrieron en materiales arenosos, encontrándose el origen de las mismas en transiciones no bien estudiadas entre diques y muros de contención. Dos tercios de la inundación ocurrida en Nueva Orleans tuvo como origen este modo de rotura.
- d) Otras ocurrieron por un modo de rotura no contemplado en el diseño del sistema.
- e) La mayoría de las pérdidas se produjo en áreas residenciales y no en zonas industriales.
- f) Dos tercios de las muertes contabilizadas fueron de personas mayores de 60 años; el 50% de ellas de personas de más de 75 años.
- g) Si bien no se ha terminado el Análisis de Riesgos y de fiabilidad del Sistema, las conclusiones provisionales indican que los niveles de riesgo y las roturas potenciales del Sistema son considerablemente más elevados que en otro tipo de infraestructura similar. ◆