

El comportamiento de las presas y la gestión integral de su seguridad

Dam behaviour and integral safety management

Antonio Soriano Peña. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid. Vocal Titular Comité Nacional Español de Grandes Presas.
antonio.soriano@ingesuelo.com

Ignacio Escuder Bueno. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Valencia. Vocal Titular Comité Nacional Español de Grandes Presas.
iescuder@hma.upv.es.

Resumen: La aprobación del Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses de 1996 supuso un hito de gran importancia a partir del cual la seguridad de las presas españolas ha resultado notablemente fortalecida.

El presente artículo, a la luz de la experiencia adquirida en este espectacular avance, contextualiza para las presas y embalses españoles, la manera de dar respuesta a la exigencia de, por un lado, mantener unos niveles de riesgo muy ponderados y, por otro, de rigor en el diagnóstico previo a la realización de importantes inversiones en la seguridad de estas estructuras tan importantes.

La primera de dichas exigencias estaría más directamente vinculada al conocimiento y estudio del comportamiento y a la evaluación de la seguridad, mientras que la segunda entra de lleno en el campo de la gestión de la seguridad, aspectos que se desarrollan conceptualmente y mediante diversos ejemplos en el presente artículo.

Palabras Clave: Presas; Comportamiento; Seguridad; Análisis de riesgos; Evaluación; Gestión

Abstract: The passing of the Technical Safety Regulations for Dams and Reservoirs in 1996 was a highly important benchmark and one serving to heighten the safety of Spanish dams.

In the light of the experience gathered during the ensuing years, the present article indicates how Spanish dams and reservoirs have to respond, on the one hand, to the requirement to maintain very measured risk levels while, on the other, observing a strict diagnosis before important safety investments are made in these vital structures. The first of these requirements is directly related to the knowledge and study of behaviour and safety evaluation, while the second comes fully within the field of safety management. These aspects are developed in a conceptual manner and with the aid of diverse examples in the present article.

Keywords: Dams; Behaviour; Safety; Risk analysis; Assessment; Management

1. Introducción

A partir de la entrada en vigor del Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses (1996), se han abordado en España una serie de trabajos anteriormente inéditos como la *Clasificación de las presas en función del riesgo potencial*, la redacción e implementación de *Planes de Emergencia*, la elaboración *Normas de Explotación* o los *Informes de Revisión y Análisis General de la Seguridad* de presas y embalses.

A la luz de la experiencia adquirida en esta última década, han surgido numerosos debates sobre la fijación de los niveles de seguridad razonablemente exigibles a estas estructuras, habiéndose editado al respecto una serie de Guías Técnicas como documentos de consulta. Muchas de estas discusiones se han ido plasmando en Congresos y Jornadas Técnicas que han tenido lugar en los últimos años (Valencia, 1996; Barcelona, 1998; Málaga, 1999; Zaragoza, 2002; Madrid, 2002; Valencia 2005, Ministerio de Medio Ambien-

te 2006, etc.), desde los cuales se reclamaba una Ley de Seguridad de Presas.

En Enero de 2008 se promulga el Real Decreto 9/2008 por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por Real Decreto 849/1086, que persigue como objetivo la protección de las personas y los bienes, y del medio ambiente, a través de la modificación de la normativa sobre inundaciones y de la introducción de un nuevo título relativo a la seguridad de presas embalses y balsas. En el preámbulo de dicho decreto se cita textualmente *“La Gestión del Riesgo, uno de los aspectos fundamentales que debe abordar un país moderno, es el hilo común de esta modificación del Dominio Público Hidráulico”*

Tal y como se deduce de los avances legislativos esbozados, la ingeniería no puede ser ajena a la propia evolución de los valores y las exigencias de la sociedad, que demanda, fundamentalmente:

- Unos niveles de riesgo muy ponderados y en cualquier caso justificados por los beneficios que obtiene a cambio.
- Rigor en el diagnóstico previo a la realización de importantes inversiones, así como participación en el proceso de toma de decisiones de actuación.

La primera de dichas demandas estaría más directamente vinculada a la “evaluación” de la seguridad, mientras que la segunda entra de lleno en el campo de la “gestión” de la seguridad, aspectos que se desarrollan a continuación.

2. Normativa sobre seguridad de presas en España

2.1. Reseña histórica

La primera normativa específica de presas fue redactada en el año 1905 por una comisión del denominado Ministerio de Fomento, que elaboró la Instrucción para los Proyectos de los Pantanos. Posteriormente, en 1959, la rotura de la presa de Ribadelago (río Tera) ocasionó 144 víctimas mortales. Este hecho, motivó la creación de la Unidad de Vigilancia de Presas, el restablecimiento de las Comisarías de Aguas, el inicio de los trabajos para redactar una nueva Instrucción así como la creación de una Comisión de Normas de Grandes Presas.

En 1960 el Ministerio publica de forma interna las Normas Transitorias para Grandes Presas y será dos años después, en 1962, cuando se publica la Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas, sometida inicialmente a un proceso de consultas entre especialistas y finalmente aprobada por Orden Ministerial de 31 de Marzo de 1967.

Si bien se habían comenzado trabajos de revisión de la mencionada Instrucción, la rotura catastrófica de la Presa de Tous en 1982 puso de manifiesto la necesidad de actualización de la normativa. Así, la Dirección General de Obras Hidráulicas encargó en 1992 la redacción de una nueva normativa sobre seguridad a la Comisión de Normas para Grandes Presas, que presentó una primera propuesta en 1994.

Simultáneamente, el Consejo de Ministros de 9 de Diciembre de 1994 (BOE 14/2/1985) aprobaba la Directriz de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones que obligaba expresamente a clasificar las presas en función del riesgo potencial derivado de su rotura o mal funcionamiento así como a la elaboración de los correspondientes Planes de Emergencia para aquellas que resultasen clasificadas como A o B.

En marzo de 1996, se publica el definitivo Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses, recogiendo los trabajos de la Comisión antes citados así como las exigencias de la Directriz.

En cualquier caso, y hasta que no se desarrollen y sancionen las Normas Técnicas de Seguridad previstas en el REAL DECRETO 9/2008 de modificación del Dominio Público Hidráulico, se encuentran actualmente en vigor con mayor o menor campo de aplicación:

- La Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas (Instrucción, 1967)
- La Directriz de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (Directriz, 1985)
- El Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses (Reglamento, 1996)

2.2. Normativa de aplicación

La normativa de aplicación varía en función de la Categoría de la presa (establecida en función de su “riesgo potencial”), del año en que se obtuvo la concesión, de la titularidad de la misma y de una serie de características adicionales. En concreto, a partir de las normativas directamente relacionadas

con Presas y embalses, se puede deducir su propio ámbito de aplicación en función de las siguientes particularidades:

- Si han sido clasificadas como A, B o C en función del riesgo potencial.
- Si la fecha de entrada en explotación es anterior o posterior al 1 de Abril de 1996.
- Si la titularidad es estatal o existe concesión administrativa.
- Si su altura, longitud de coronación, capacidad de embalse, capacidad de sus órganos de desagüe o la existencia de dificultades especiales han determinado su consideración como Gran Presa.

La Tabla 1 permite observar la disparidad de normativa y alcance de aplicación de la misma para distintos casos.

2.3. Las Guías Técnicas

La elaboración de diversos documentos conocidos como Guías Técnicas, ha sido impulsada tanto por el Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEP) como por la entonces denominada Dirección General de Obras hidráulicas y Calidad de Aguas (DGOHCA). Estas Guías nacieron con el objeto fundamental de constituirse en una ayuda para la aplicación de los criterios de carácter generalista que, a diferencia de la concreción y rigidez que presentaba la Instrucción de 1967, han inspirado el texto del Reglamento de 1996.

En cualquier caso, y aunque se deben tener muy en cuenta, cabe no perder de vista que el conjunto de los documentos que se relacionan a continuación (Tabla 2) constituyen simplemente recomendaciones y no forman parte de texto legal alguno.

Tabla 1. Resumen de aplicabilidad de la Normativa vigente (Adaptada a partir de Delgado et al, 2002)

Tipo de Presa	Normativa
<ul style="list-style-type: none"> • Clasificadas como C según su riesgo potencial. • Independientemente de la fecha de entrada en explotación y titularidad. • Sin dificultades especiales, que cumplan alguna de las siguientes condiciones: <ul style="list-style-type: none"> — Altura inferior a 10 metros — Altura entre 10 y 15 metros si la capacidad es inferior a 100,000 m³ 	Ninguna
<ul style="list-style-type: none"> • Clasificadas como C según su riesgo potencial. • De titularidad no estatal o con concesión anterior al uno de Abril de 1996. • Que cumplan alguna de las siguientes condiciones: <ul style="list-style-type: none"> — Altura superior a 15 metros — Altura entre 10 y 15 metros si la capacidad es superior a 100,000 m³ — Altura entre 10 y 15 metros con dificultades especiales de cimentación 	Instrucción (1967)
<ul style="list-style-type: none"> • Clasificadas como A o B según su riesgo potencial. • De titularidad no estatal o con concesión anterior al uno de Abril de 1996. • Que cumplan alguna de las siguientes condiciones: <ul style="list-style-type: none"> — Altura superior a 15 metros — Altura entre 10 y 15 metros si la capacidad es superior a 100,000 m³ — Altura entre 10 y 15 metros con dificultades especiales de cimentación 	Instrucción (1967) + Plan Emergencia
<ul style="list-style-type: none"> • Clasificadas como A o B según su riesgo potencial, o que sean Gran Presa según el Artículo 3.1 del Reglamento, es decir, que cumplan alguna de las siguientes condiciones: <ul style="list-style-type: none"> — Altura superior a 15 metros — Altura entre 10 y 15 metros con longitud de coronación superior a 500 m. — Altura entre 10 y 15 metros si la capacidad es superior a 1,000,000 m³ — Altura entre 10 y 15 metros con capacidad de desagüe superior a 2000 m³/s. — Dificultades especiales de cimentación • De titularidad estatal o con concesión posterior al uno de Abril de 1996. 	Reglamento (1996)

Tabla 2. Guías Técnicas publicadas y en fase de elaboración

Guías Técnicas del CNGP	Año de Publicación
Seguridad de Presas	2005
Criterios de proyecto de presas y sus obras anejas	2002. Pendiente la parte de presas de Materiales Suelos.
Estudios geológico-geotécnicos y de prospección de materiales	1999
Avenida de proyecto	1997
Aliviaderos y desagües	1997
Construcción de presas y control de calidad	1999
Auscultación de las presas y sus cimientos	2006
Explotación y conservación	Pendiente
Aspectos ambientales	Pendiente
Guías Técnicas de la DGOHCA	Año de Publicación
Clasificación de presas en función del riesgo potencial	1996
Elaboración de los planes de emergencia de Presas	2001
Normas de explotación	Pendiente
Informe anual	Pendiente
Revisión de la seguridad	Pendiente

Actualmente existe la obligatoriedad legal de redactar y aprobar (Real Decreto 9/2008 por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico) tres Normas Técnicas de Seguridad:

- Norma Técnica de Seguridad para la clasificación de las presas y para la elaboración e implantación de los planes de emergencia de presas y embalses.
- Norma Técnica de Seguridad para el proyecto, construcción y puesta en carga de presas y llenado de embalses.
- Norma Técnica de Seguridad para la explotación, revisiones de seguridad y puesta fuera de servicio de presas.

3. Rasgos generales del comportamiento

Los procedimientos que actualmente se utilizan para evaluar y gestionar la seguridad de las presas requieren la identificación de unos modos de fallo específicos, bien definidos. Un determinado modo de fallo queda descrito cuando se estipula el mecanismo concreto de rotura y los agentes o causas que lo provocan.

La observación del comportamiento de las presas ha permitido ir identificando una serie de modos de

fallo característicos. La comunidad presística ha ido definiendo, cada vez con más detalle, los posibles modos de fallo. Y además, para muchos de ellos, ha podido incluso establecer unos procedimientos de evaluación o cálculo de los márgenes de seguridad que existen en función de los valores de los parámetros físicos que controlan el desencadenamiento del mecanismo de rotura o de malfunción.

Para enumerar y describir brevemente los posibles modos de fallo conviene establecer cierta clasificación que permita formar grupos que tengan alguna característica común. En ese sentido, se podrían proponer los siguientes grupos:

- Modos de fallo que conducen al desbordamiento por coronación u otros mecanismos erosivos. Dentro de este grupo quedarían varios posibles modos que pueden conducir a la rotura de la presa. Entre ellos el fallo mecánico de las compuertas, el fallo en la operatividad de los desagües de fondo o simplemente la ocurrencia de una avenida de mayores dimensiones (volumen y/o caudal punta) que la que pueda manejar con seguridad el sistema de alivio. A este grupo se le denomina aquí bajo el denominador común de modos de fallo de la "seguridad hidrológico-hidráulica". Es sabido por la experiencia acumulada que este conjunto

de modos de fallo es el que ha conducido a mayor número de roturas, accidentales e incidentes de presas.

- Modos de fallo que conducen a la rotura estructural del cuerpo de presa. Las formas o maneras concretas en los que la estructura de una presa puede fallar son muy variadas. Dentro de este gran grupo de modos de fallo se consideran, en este texto, los posibles modos de fallo que implican al cimiento de la propia estructura y a las laderas del embalse. En este texto se denomina a este gran grupo bajo el nombre de modos de fallo que afectan a la "seguridad estructural".
- Modos de fallo que afectan a los equipos, instalaciones, accesos y comunicaciones. Puede comprenderse, dada la gran cantidad de posibles elementos considerados, que existe un gran número de posibles modos de fallo que afectarían a la "operatividad".

Los modos de fallo hidrológico-hidráulico quedan bien descritos y analizados en las Guías Técnicas de Seguridad de Presas. Dentro del gran grupo de los modos de fallo de tipo "estructural" conviene hacer, a su vez, algún mayor análisis de los posibles modos clasificándolos ya en algunos subgrupos algo más detallados. Para ello conviene, además, distinguir las estructuras por su tipo. Es frecuente distinguir, con este propósito, al menos, los tipos de estructuras siguientes:

- Presas de materiales sueltos.
- Presas de fábrica.
- Laderas del embalse.
- Aliviaderos y cuencos.
- Túneles de desvío, tomas y/o desagües.

La consideración específica de los cuerpos de las presas de materiales sueltos permite ya definir una serie concreta de modos de fallo específico que podría ser la indicada a continuación:

- Estabilidad al deslizamiento.
- Fracturación hidráulica.
- Defectos tensionales.
- Erosión interna del cuerpo de presa y/o de su cimiento.
- Asientos excesivos.
- Daños estructurales en estructuras enterradas.

- Rotura de plintos, pantallas y tapices de impermeabilización.
- Efectos sísmicos.

Para las presas de fábrica podría hacerse una enumeración semejante añadiendo la rotura estructural por exceso tensional en el cuerpo de presa.

No se quiere entrar aquí a discutir sobre los modos de fallo posibles en las laderas de los embalses pues el tema ha sido tratado de manera monográfica y extensa en las recientes jornadas de Zaragoza (2007). Tampoco se quiere entrar, dada la amplitud del tema, en la problemática de los aliviaderos, cuencos y otras obras esenciales del conjunto presa embalse. Se cree conveniente, sin embargo, incluir alguna consideración acerca de alguno de los modos de fallo de los cuerpos de las presas de materiales sueltos que no han sido aún considerados en las nuevas Guías Técnicas de Seguridad de Presas.

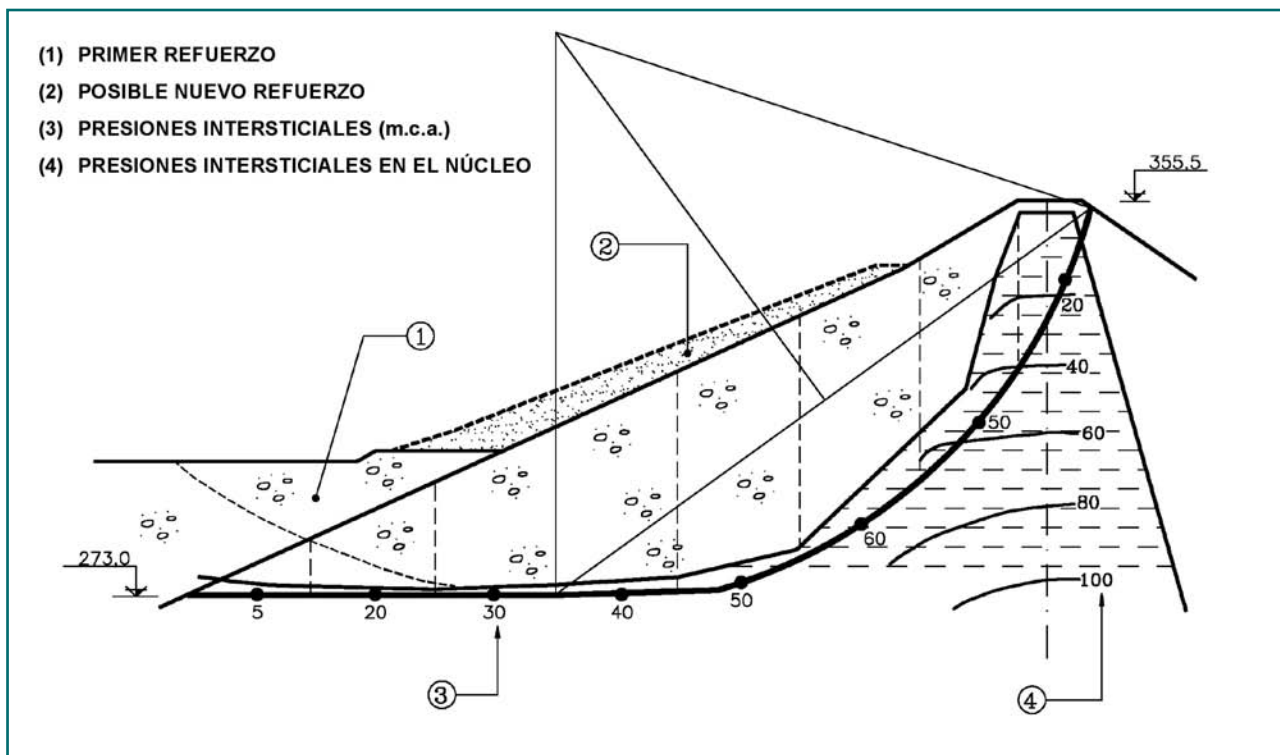
3.1. Estabilidad al deslizamiento de las presas de materiales sueltos

El mecanismo de fallo en cuestión es bien conocido por todos los presistas y los procedimientos de análisis asociados están hoy bastante bien desarrollados. Este tipo de fallo es, en general, fácil de prevenir y analizar. A pesar de ello se han observado algunos fallos notables en presas modernas como fue el de la rotura de la presa de Carsington (UK) durante su construcción o el de la presa del Canal de San Luis (USA) durante un desembalse rápido.

Para ilustrar este modo de fallo se incluye en la Figura 1 la sección tipo de una presa española que falló por deslizamiento durante la construcción. La base del espaldón de aguas arriba se quiso impermeabilizar para reducir las posibles filtraciones a través del cimiento. Para ello, se colocó un manto de arcilla de espesor considerable en la base del espaldón de aguas arriba que, además, se compactó con humedades de puesta en obra elevadas. Como consecuencia, durante la construcción se generaron presiones intersticiales altas y el espaldón de aguas arriba comenzó a deslizarse. El fenómeno se observó a tiempo y se pudieron disponer los refuerzos necesarios deteniendo el movimiento cuando el descenso del espaldón aún no habrá alcanzado más que unos pocos metros.

La condición más crítica para el deslizamiento de las presas de materiales sueltos suele ser la de "de-

Fig. 1. Esquema de los refuerzos necesarios para contener el deslizamiento del espaldón de aguas arriba de una presa de materiales sueltos.



sembalse rápido". Pero a veces es la propia construcción, el llenado del embalse o la condición de sismo, la situación que más condiciona el proyecto de una presa.

Las presas antiguas, con sistemas de control de filtración deficientes (filtros y drenes) pueden deslizarse a largo plazo. Hoy es relativamente frecuente la reparación de presas antiguas por esta causa.

3.2. Fracturación hidráulica

La fracturación hidráulica es un fenómeno bien conocido ya que se emplea como técnica habitual para "inyectar" lechadas de cemento (método de los tubos manguito provocando el denominado "claquage"). También se usa para medir tensiones naturales en el terreno a gran profundidad.

Existe, para cada configuración geométrica y para cada tipo de materiales, una presión de agua que permitiría abrir una fisura en el núcleo de una presa de tierras. No existe aún información específica de ningún caso conocido por los autores donde se haya podido comprobar en la práctica la validez de las distintas hipótesis de cálculo que existen para verificar, vía cálculos, la seguridad frente a la fracturación hidráulica.

Existe, sin embargo, un fenómeno parecido que se analiza a continuación y que se denomina "defectos tensionales" que es sin embargo más frecuente y más peligroso.

3.3. Defectos tensionales

Existe un buen número de situaciones en las que el núcleo o cualquier otro elemento de estanqueidad de una presa de materiales sueltos puede quedar poco comprimido haciéndolo proclive a ser atravesado con facilidad por el agua del embalse.

El proyecto de dos grandes presas españolas modernas fue dominado por el temor a este posible defecto (presa de Tous, tanto la antigua como la nueva y presa de Canales). Los estudios realizados en ambas presas han permitido resolver positivamente, adoptando medidas preventivas específicas, el temor que se tenía a las grandes deformaciones de corte que se podrían producir en el contacto del núcleo con los bloques laterales de hormigón (Tous) o con las laderas (Canales).

Los cimientos de las presas pueden quedar poco comprimidos y ser después fácilmente atravesados por el agua, como ocurrió con la malograda presa de Puentes (apoyada su base en parte sobre pilotes de

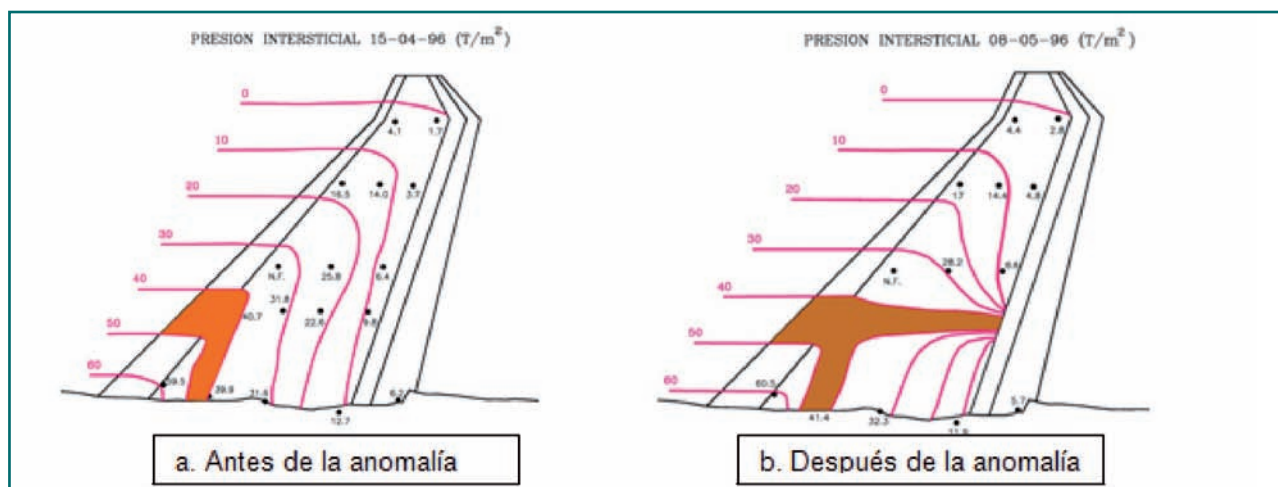


Fig. 2. Evolución del mapa de isobaras en un núcleo con un defecto tensional.

madera a través de los sedimentos del río) o la zanja estrecha rellena de arcilla que no quedó comprimida debido al efecto arco y que condujo a la rotura catastrófica de la presa de Teton (USA).

Estos defectos tensionales son muy frecuentes en el entorno de las galerías enterradas y son la causa predominante de la rotura de buen número de balsas.

Un defecto tensional de este estilo fue observado durante el primer llenado de una presa española. El mapa de isobaras del núcleo, un determinado día, era similar al indicado en la Figura 2 (a). Los diecisiete piezómetros ubicados en esa sección de auscultación funcionaron bien (salvo uno de ellos donde se indica que no funciona, NF). Los de otras secciones contiguas también indicaban una red de isobaras semejante. Unos días después con el embalse solo ligeramente algo más alto, el mapa de isobaras cambió bruscamente a la situación indicada en esa misma Figura 2 (b).

El estudio de este comportamiento anómalo condujo a concluir que el defecto tensional había sido causado por la propia instalación de los piezómetros (zanjas de alojamiento del cableado). El sistema de control de filtraciones (filtro y amplia zona de transición desde el filtro hasta el espaldón de escollera) hicieron que la anomalía detectada en esa presa no se tradujese en una amplia filtración erosiva. La presa sigue explotándose con normalidad sin que se hayan requerido reparaciones específicas.

3.4. Erosión interna

Es, sin duda, después del desbordamiento por coronación el modo de fallo más temido y más frecuen-

te en las presas de materiales sueltos y en los cimientos de cualquier tipo de presa.

No es la intención de los autores realizar aquí un estudio específico de este problema. Se remite al lector interesado a consultar el trabajo de investigación que viene realizando el grupo de trabajo EWG-7 "Internal Erosion" del Club Europeo de ICOLD y que puede verse en su portal informático.

Los procesos de erosión interna en los cuerpos de las presas de materiales sueltos suelen venir asociados a defectos tensionales pero también pueden deberse a la ausencia de filtros junto con la presencia de materiales no autoestables, cuyos finos pueden migrar a través de la estructura formada por las partículas más gruesas.

Existen cimientos especialmente proclives a la erosión como es el caso de la formación yesífera indicada en la foto de la Figura 3.



Fig. 3. Imagen del talud de excavación para el apoyo de una presa sobre una formación yesífera.

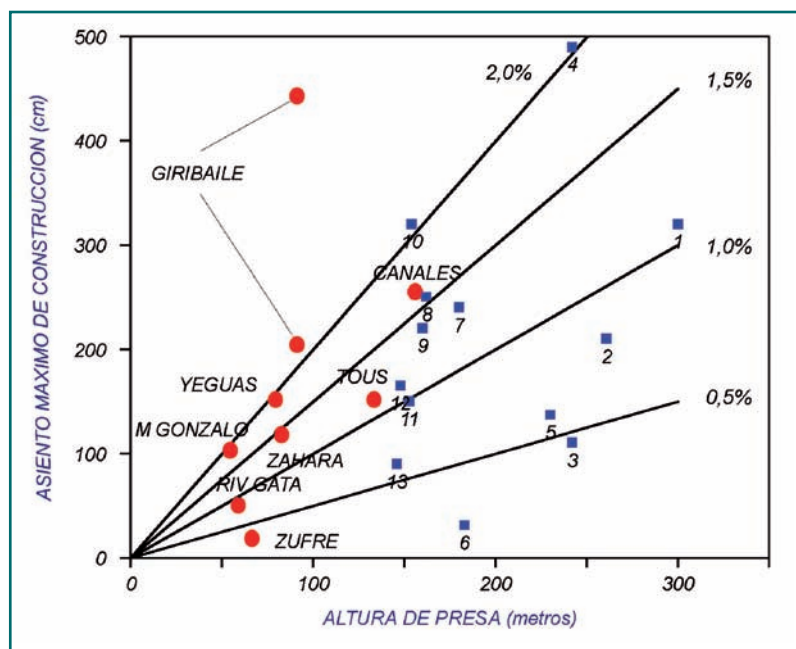


Fig.4. Asientos máximos de construcción observados en algunas presas españolas.

Las precauciones que han de tomarse para combatir estos procesos son, además de los tratamientos del terreno tendentes a reducir los caudales de las posibles filtraciones y a evitar huecos, hacer disposiciones constructivas adecuadas para evitar defectos tensionales y disponer, "a priori", un buen sistema de filtros, o "a posteriori", cuando se trata de reparar presas ya construidas, proceder a la colocación de filtros invertidos externos.

3.5. Asientos excesivos

Las presas de materiales sueltos asientan, en general se deforman, durante la construcción, durante el llenado y después, debido a la fluencia, durante toda su vida útil.

Los asientos de construcción son debidos principalmente a dos causas: la compresión del cimient y la compresión del cuerpo de presa. La compresión del cimient puede estimarse en la fase de proyecto con buena precisión. A modo de ejemplo puede mencionarse que la recién construida presa de Lechago (Teruel) sobre un depósito aluvial blando ha sufrido un asiento máximo del orden de un metro que fue bien pronosticado y comprobado durante la propia construcción. Antes, una presa similar (Barbate) había experimentado también asientos debidos a la compresión del cimient de ese mismo porte. Las grandes presas de materiales sueltos pueden experimentar du-

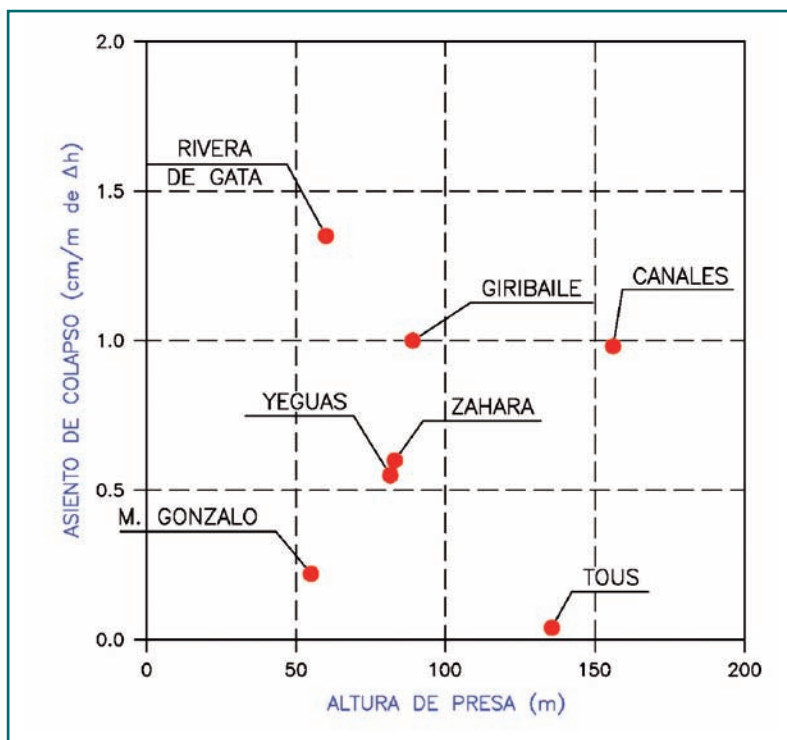
rante su construcción asientos importantes de su cimient sin que ello suponga ningún daño a la propia estructura del cuerpo de presa si se adoptan disposiciones constructivas correctas.

La compresión del cuerpo de presa durante su construcción depende de la altura de la presa y de la deformabilidad de los materiales. El máximo asiento suele ocurrir en un punto situado cerca del centro de gravedad del cuerpo de presa y alcanza valores que quedan en el entorno del 0,5% al 2% de la altura total de la presa. En la Figura 4 se incluyen datos de los asientos máximos experimentados durante la construcción de algunas presas de materiales sueltos modernas españolas.

Más tarde, durante el llenado, se ha venido observando que en un buen número de presas de materiales sueltos se produce un asiento adicional rápido denominado hace tiempo como "asiento de humectación" y que después cambió su denominación para pasar a llamarse "asiento de colapso".

El asiento de colapso sólo se produce cuando el espaldón de aguas arriba es proclive a este fenómeno. El problema es hoy bien conocido y es fácilmente evitable. Generalmente basta con una compactación adecuada. En escolleras por ejemplo, se evita compactando en capas pequeñas (reduciendo el ta-

Fig.5. Asientos de colapso experimentados durante el llenado de algunas presas españolas.



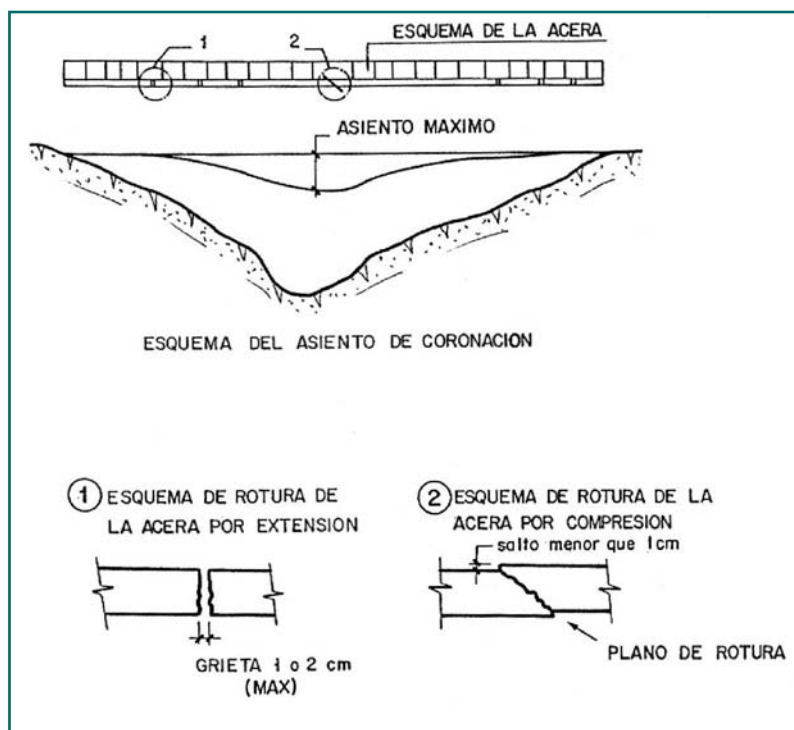


Fig. 6. Detalle de los efectos en coronación causados por los asentamientos de colapso originados por el primer llenado del embalse. Rivera de Gata.

maño máximo de los bloques más grandes) y realizan un riego abundante.

Los datos de asiento de colapso registrados en presas españolas conocidas por los autores quedan recogidos en la Figura 5. Como puede apreciarse tales asentamientos pueden llegar a ser importantes, incluso superiores al 1% de la altura de la presa.

Estos asentamientos, con la presa ya concluida, pueden ocasionar grietas en coronación y la consiguiente alarma. Son típicas las grietas de extensión que se producen cerca de los estribos en dirección aguas arriba-aguas abajo y también las deformaciones de compresión, que pueden romper las aceras o barandillas, en la zona central de la coronación. Esos detalles se ilustran en la Figura 6.

Los asentamientos de colapso también pueden inducir agrietamientos longitudinales y cabeceos (giros) del plano de coronación que asienta más en el borde de aguas arriba. Pueden inducir también desplazamientos horizontales de la coronación hacia aguas arriba que después cambian de sentido al completarse el llenado del embalse.

Los agrietamientos observados no suelen profundizar mucho dentro del núcleo de las presas pues la propia resistencia del material no permite que una grieta vertical sea estable más allá de una profundidad crítica, z_c , que hoy puede evaluarse con los dife-

rentes procedimientos que ofrece la mecánica del suelo. Pero pueden crear defectos tensionales peligrosos que, en ocasiones, conducen a la necesidad de realizar reparaciones preventivas.

Finalmente y añadidos a los anteriores, existen deformaciones de carácter diferido cuya velocidad decrece linealmente con el tiempo. Tales deformaciones suelen definirse mediante un índice adimensional denominado "índice de asentamientos", IA, que es el cociente entre el incremento de asiento experimentado por la coronación de la presa al pasar de un determinado tiempo ($t = t_1$) a un tipo diez veces mayor ($t = 10 t_1$) y la altura de la presa, H. Esto es $IA = (s(10 t_1) - s(t_1)) / H$. Tal expresión parece independiente del valor de t_1 siempre que tal tiempo esté suficientemente alejado del final de la construcción. Como ejemplo de este comportamiento puede verse el registro de asentamientos de la coronación de la presa de Barbate que se ha venido observando durante varios lustros (Figura 7).

Los asentamientos diferidos suelen ser moderados ($IA < 1\%$) salvo que exista algún tipo de comportamiento

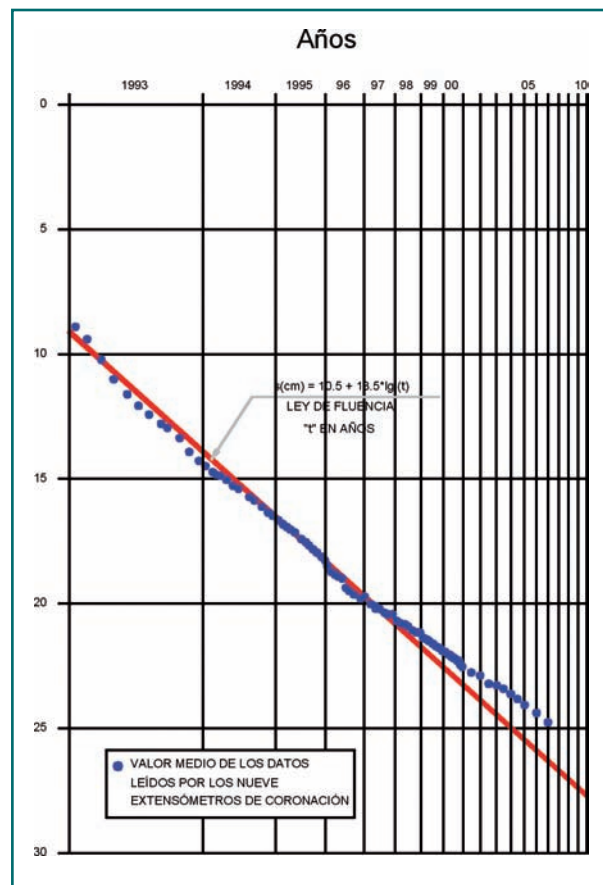


Fig. 7. Asientos diferidos de la coronación de la presa de Barbate (Cádiz).

patológico que, de ocurrir habría de ser analizado con detalle.

3.6. Daños estructurales en estructuras enterradas

Las estructuras enterradas en los cimientos o en los cuerpos de las presas pueden experimentar deformaciones importantes que, si no han sido oportunamente consideradas en su proyecto, podrían incluso agotar su resistencia.

Este hecho, bien conocido desde hace tiempo, ha llevado en los ingenieros presistas a no colocar nunca conductos a presión dentro de los cuerpos de las presas. Pero, por desgracia, es un problema (el mayor problema) de las balsas que se construyen con otras tecnologías.

Ha de destacarse, además, que buen número de estructuras enterradas constituyen "puntos duros" o con "proyección positiva" como suele denominarse en la tecnología de estos elementos. Esto hace que las cargas de aplastamiento que soportan sean mayores que las presiones geostáticas correspondientes. Por otro lado, las presas no transmiten presiones homogéneas, suelen darse concentraciones de tensiones más altas en las zonas de transición del núcleo a los espaldones. Estos rasgos del estado tensional de las presas han de considerarse al proyectar y construir estas estructuras.

También se recuerda que estas estructuras pueden conducir a defectos tensionales importantes, como se ha indicado en el punto 3.3.

3.7. Rotura de plintos, pantallas y tapices de impermeabilización

Las presas de pantalla impermeable en el paramento de aguas arriba construidas en España han sufrido algunas averías importantes. Dos de ellas (Siberio y Martín Gonzalo) sufrieron una rotura que provocó el vaciado completo del embalse filtrándose a través del cuerpo de presa en unas pocas horas. La patología de los plintos de unión de la pantalla al terreno en las presas españolas fue analizada en su día. Ver A. Franco y A. Soriano (1988)*.

Recientemente se han observado roturas de pantallas de hormigón cuyo estudio ha facilitado la comprensión del comportamiento de estos elementos. Hoy ya pueden proyectarse y construirse con la seguridad debida.

Los tapices impermeables son proclives a los "defectos tensionales" principalmente en laderas. La tensión principal menor puede llegar a ser nula. Y en consecuencia son proclives a dejar pasar el agua con relativa facilidad. Conociendo este hecho y tomando las oportunas medidas, sería posible construir bien este tipo de elemento de estanqueidad que en el pasado ha sido, en general, de dudosa eficacia.

3.8. Efectos sísmicos

Nunca, que se sepa, una presa de tierras ha sufrido un daño importante (irreparable) por causa de un sismo. El fallo de la presa de San Fernando (USA) se explica por la técnica constructiva empleada (relleno hidráulico) que hoy está en desuso. A pesar de ello se han realizado buen número de investigaciones relativas a la posible licuefacción de filtros o de cimientos de presas. En España cabe destacar los que se realizaron para el estudio de Canales, Tous o más recientemente en la presa de Lechago.

Estos estudios y otros similares, destinados a estimar los asientos remanentes que producen los sismos, son aún un problema en investigación en los que la observación de las presas españolas (por suerte o desgracia) aún esta lejos de aportar datos instrumentales de obras en servicio sometidas a sismos importantes. Pero ese está en ello. Existe ya una red de observación importante. Hay un buen número de presas auscultadas específicamente para medir las acciones sísmicas y las respuestas que tendrían lugar ante un eventual e improbable sismo importante.

4. Evaluación de la seguridad

4.1. Introducción

Si se trata de definir de manera genérica el concepto de Seguridad (Soriano y Sánchez, 1997) puede encontrarse en cualquier diccionario como "cualidad de seguro", o "libre y exento de todo peligro, daño o riesgo". Matizando dicha definición para presas, y tratando de cuantificar algo más el término, se podría definir seguridad como el margen que separaría las condiciones reales que existen en la presa construida de las que llevan a su destrucción o deterioro.

En cualquier caso, intentar definir un coeficiente de seguridad único para una presa es una utopía, pu-

diéndose afirmar que no existe una forma de medir la seguridad, sino índices parciales que pueden ser utilizados para la cuantificación aislada de alguna parcela de seguridad, como los habitualmente utilizados en el diseño de presas.

Por otra parte, la experiencia adquirida a partir de accidentes y fallos de presas ha inspirado muchos de los conceptos y metodologías referidas a aspectos hidrológicos, hidráulicos, sísmicos, geológicos, geotécnicos, estructurales, electromecánicos, etc. Aún más, la propia parcelación de la evaluación de la seguridad viene inspirada por el entendimiento de las causas de históricas de los fallos de presas

Por último, para cada una de las parcelas en las que típicamente se divide la seguridad de presas el planteamiento genérico de los trabajos debe consistir en:

- Estudio minucioso del Archivo Técnico.
- Identificación de las necesidades de inspección y análisis.
- Realización de las inspecciones.
- Identificación de las necesidades de campañas de investigación complementarias y/o instalación de instrumentación de control.
- Estudio de los resultados de las campañas de investigación y de los datos de auscultación.
- Análisis pormenorizado de la seguridad.
- Establecimiento de conclusiones en cuanto a la conveniencia de acciones de seguimiento del comportamiento o, en su caso, correctoras.
- Incorporación de la documentación generada en los trabajos al Archivo Técnico.

Nota: Entre los documentos que deben formar parte necesariamente del Archivo Técnico (RTSPE, 1996), destacan por su importancia la Clasificación de la presa según el riesgo potencial, el Plan de Emergencia, las Normas de Explotación, los Informes Anuales así como todos aquellos informes de las inspecciones realizadas y particularmente los de Revisión y Análisis General de la Seguridad.

La Figura 8 muestra las actividades comprendidas en un ciclo completo de evaluación de la seguridad, que según el reglamento de 1996 debe reproducirse de forma completa cada cinco años para aquellas presas clasificadas como "A" en función del riesgo potencial (DGOHCA, 1996).

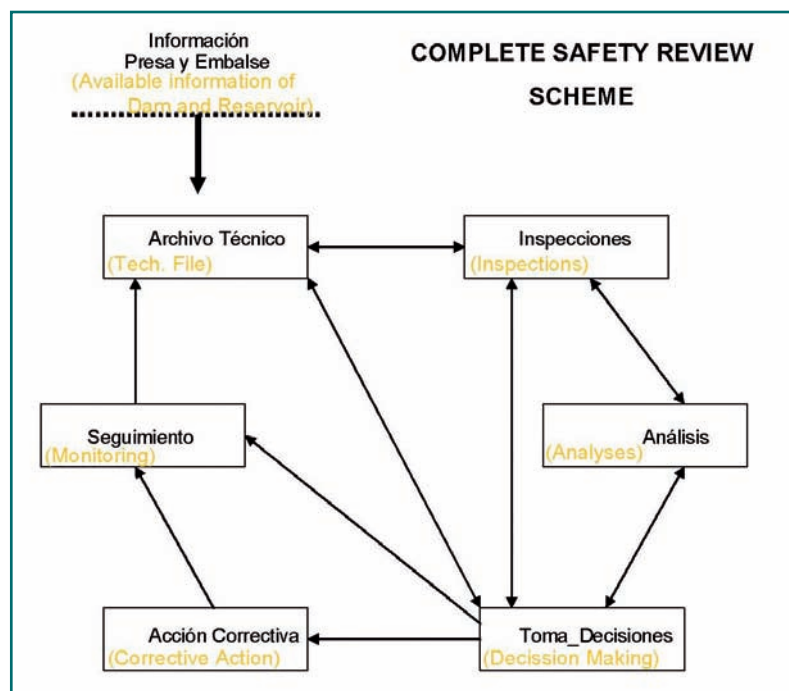


Fig. 8. Ciclo completo de la evaluación de seguridad de presas (adaptado de Escuder, 1996).

Para las presas clasificadas como "B" y "C" frente al riesgo potencial este ciclo se repetiría cada 10 años. En cualquier caso que, si bien desde la aparición por primera vez del término de "clasificación frente al riesgo potencial" en la Directriz de 1995 éste se ha mantenido en todos los textos relativos a seguridad de presas en España, conceptualmente cabe aclarar que se trataría de "daño potencial", dado que el concepto de riesgo implicaría necesariamente tener en cuenta la probabilidad de fallo junto con las consecuencias asociadas.

4.2. Evaluación de la seguridad hidrológico-hidráulica

Aspectos fundamentales a revisar

La revisión de los datos disponibles en el Archivo Técnico deber permitir la mejor determinación posible de los siguientes aspectos:

- La clasificación de riesgo.
- Procedimientos utilizados para determinar las Avenidas de Diseño.
- Procedimientos operativos en caso de avenida.
- Capacidad disponible de evacuación de las estructuras hidráulicas, así como la accesibilidad a sus mecanismos de control cuando se presentan los episodios extremos.

- Métodos de diseño de los aliviaderos y características de su funcionamiento hidráulico.
- Características de la cimentación del aliviadero y estabilidad de las laderas colindantes.
- Operatividad de los desagües de fondo.
- Registros históricos de funcionamiento.

Antes de detallar algunos aspectos de especial relevancia sobre la evaluación de la seguridad hidrológico-hidráulica, cabe destacar la importancia y la dificultad asociada a la definición de avenidas ligadas a muy bajas probabilidades de presentación con los métodos y datos de los que se dispone hoy en día. De hecho, la aceptación o no del estudio hidrológico a partir del cual se han definido las avenidas de diseño, constituye un aspecto de vital relevancia que requiere de un análisis experto.

Seguridad hidrológica

La evaluación de la seguridad hidrológica, entendida como la seguridad de una presa frente a episodios de avenida, no puede desligarse de las denominadas seguridad hidráulica y estructural dado que, los niveles de lámina de agua a partir de los cuales se analiza la estabilidad de la presa son consecuencia de:

- Las avenidas consideradas.
- La capacidad de desagüe.
- La fiabilidad de operación de válvulas y compuertas.
- Los resguardos establecidos.
- La estrategia de laminación adoptada.

Una posible medida de la seguridad hidrológica consistiría en la estimación de la probabilidad de ocurrencia de avenidas más perjudiciales a efectos de elevación de la lámina de agua que la Avenida Extrema adoptada como Extrema.

A este respecto, si bien la normativa española no fija de forma explícita dicho nivel de probabilidad de superación, las Guías Técnicas de Seguridad de Presas establecen para aquéllas de Tipo A (la gran mayoría), un período de retorno mínimo para la Avenida Extrema de 5000 años, recomendando una orquilla entre los 5000 y 1000 años.

Conviene en cualquier caso, revisar la definición de Avenida Extrema así como algunos de sus aspectos más comprometidos.

- Dicha avenida se define en el Reglamento como la mayor que la presa puede soportar, y supone un escenario límite al cual puede estar sometida la presa sin que se produzca su rotura, si bien admitiendo márgenes de seguridad más reducidos.
- En el caso de presas de materiales sueltos la identificación sería aparentemente sencilla, pudiéndose admitir que, en general, la destrucción de la presa se produce al producirse un vertido por coronación, aunque con seguridad existirán numerosas excepciones en que la rotura pueda producirse en otras condiciones. El Reglamento prescribe el vertido por coronación en presas de materiales sueltos de categoría A, imponiendo que éste no tenga lugar ni si quiera considerando la acción del oleaje por viento en concomitancia a la presentación de la Avenida Extrema.
- Sin embargo, para presas de hormigón, la identificación de dicho nivel de agua resulta sensiblemente más compleja. Así, considerar que la rotura de la presa se produce cuando el agua rebasa el nivel de coronación podría ser una hipótesis conservadora para muchas de las presas de dicha tipología existentes. En cualquier caso, el Reglamento sólo permite de forma explícita el vertido por coronación en presas de hormigón de categoría A por efectos de oleaje.

Resulta oportuno remarcar que el Reglamento de 1996 no explicita ningún período de retorno para la Avenida Extrema, haciendo exclusivamente mención a que (Art. 11) el criterio básico de determinación de las avenidas será el del *Riesgo Potencial Asumible*.

Nota: la Instrucción de 1967 contempla como avenida máxima la de 500 años de período de retorno, añadiendo una serie de exigencias adicionales sobre resguardos.

Seguridad hidráulica

Las estructuras hidráulicas principales son los aliviaderos superficiales y los desagües de fondo que controlan el flujo de agua a través o aparte del cuerpo de presa. La seguridad de una presa dependerá por tanto, entre otros muchos factores, de la bondad del comportamiento de dichas estructuras para amplios rangos de caudales.

Aquellas estructuras que no sean capaces de evacuar el caudal requerido, no presenten la resistencia suficiente a las solicitaciones que éste impone, o no reintegren el flujo al cauce en unas condiciones adecuadas pueden fallar. Un fallo de las mismas puede a su vez traducirse tanto en un incremento de la descarga como un decremento de la misma, pudiendo acarrear el colapso de la presa y/o la producción de una avenida catastrófica.

Cabe recordar en este punto, que el reglamento define la Avenida de Proyecto como aquella para la cual los órganos de desagüe deben funcionar correctamente, a la vez que impone que su funcionamiento para condiciones límite (Avenida Extrema) no comprometa la seguridad de la presa.

Las implicaciones que sobre la seguridad tienen ambos requerimientos ofrecen bastantes aspectos que merece la pena comentar:

- La Guía Técnica sobre la Avenida de Proyecto, recomienda adoptar como tal, para las presas de categoría A, la avenida de 1000 años de período de retorno, si bien resulta muy difícil analizar cuáles serían las consecuencias reales de un mal funcionamiento durante un período de tiempo en general muy limitado.
- Respecto del segundo requerimiento, su comprobación puede resultar de mayor o menor complejidad en función del tipo de aliviadero que se esté estudiando y del conocimiento real que se pueda tener sobre su curva de gasto para valores de caudal tan alejados de los de diseño.

Por otra parte, el adecuado funcionamiento de aliviaderos superficiales con compuertas y, en general, los desagües intermedios y de fondo depende en gran medida del estado de conservación y fiabilidad operacional de compuertas y válvulas.

Dicha funcionalidad se encuentra consecuentemente ligada una serie de equipos electromecánicos e instalaciones sobre los cuales se incidirá más adelante. En cualquier caso, la seguridad sobre la capacidad de operación del desagüe de fondo determinará, para este elemento en concreto, que pueda ser considerado en el cálculo de los niveles correspondientes a la Avenida Extrema y de Proyecto.

Por último, cabe hacer mención especial a la respuesta hidráulica del cauce aguas abajo así como a los usos del suelo y poblaciones próximas al mismo

que deben haberse estudiado en profundidad y revisarse de forma periódica para que el conjunto de operaciones de desagüe previstas en las Normas de explotación no conlleven, salvo casos muy excepcionales de compromiso para la seguridad de la presa, afecciones a bienes ni personas.

A este respecto, la elaboración de modelos digitales de elevación del terreno, incorporando cartografía actualizada sobre poblaciones y usos del suelo, y la confección de modelos hidráulicos que permitan estudiar dichas afecciones considerando aspectos como la propia capacidad de laminación en el cauce o los tiempos de traslación de la avenida, resultan de gran utilidad sobretodo si pueden ser calibrados con datos generalmente procedentes del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la cuenca.

4.3. Evaluación de la seguridad estructural

Aspectos fundamentales a revisar

Los datos estructurales de mayor relevancia que deben ser revisados a partir de la información contenida en el Archivo Técnico son:

- Propiedades asumidas para los materiales, cimentación y estribos.
- Situaciones de carga previstas en Proyecto.
- Métodos de análisis que se emplearon en su momento.
- Datos de auscultación del comportamiento (medidores de filtraciones, piezómetros, péndulos, extensómetros, termómetros, etc.)

De manera análoga a lo establecido sobre la importancia de la aceptación o no para la evaluación de la seguridad de una presa de los hidrogramas de las avenidas de referencia, constituye un aspecto capital enjuiciar la suficiencia de la caracterización deformacional y resistente de presa y terreno, así como de la metodología que haya conducido a la definición de los terremotos de diseño en su caso, tareas ambas que requieren de análisis igualmente experto.

Por otra parte, aunque el estado del arte de la técnica de desarrollo de proyectos de presas es cada día más elevado, no se debe limitar la evaluación de la seguridad de la presa al cumplimiento de las hipótesis establecidas en proyecto, debiéndose buscar el

apoyo del estudio del comportamiento para elaborar un dictamen sobre la seguridad de la obra.

Caracterización geológica, geotécnica y sísmica del emplazamiento

La Guía Técnica Número 3 "Estudios geológico geotécnicos y de prospección de materiales", hace mención explícita a los cimientos y, en particular, a las recomendaciones específicas para realizar la "Revisión de la Seguridad". Según este documento, resulta necesario realizar con carácter general y previo, una evaluación del Archivo Técnico de la Presa en lo relativos a los siguientes aspectos:

- Estudios geológico geotécnicos del Proyecto.
- Cartografía geológica de las excavaciones.
- Ensayos de comprobación durante la construcción.
- Descripción de los tratamientos del cimiento.
- Documentación geológico-geotécnica de posibles modificaciones del Proyecto.
- Comportamiento del cimiento durante la puesta en carga.
- Reconocimientos del terreno posteriores a la construcción.

En cuanto a los aspectos de caracterización sísmica, además de la revisión de cualquier estudio particular realizado, cabe verificar la caracterización de la zona en función de la normativa sismorresistente en vigor (2002), a efectos de determinar el alcance de la propia revisión.

Evaluación del comportamiento

Datos de partida

Para la evaluación de la seguridad de presas existentes sobre una cimentación dada y en un vaso de embalse determinado debe siempre atenderse el comportamiento deformacional e hidráulico de detectado en la cimentación, laderas del embalse y cuerpo de presa, aspecto ligado a datos provenientes de:

- Ensayos de caracterización de materiales.
- Observaciones de las inspecciones.
- Instrumentación de control.

Los aspectos más importantes para acometer la evaluación del comportamiento de las presas de hormigón pueden relacionarse con su susceptibilidad térmica, el estado y movimiento de sus juntas así como las deformaciones unitarias y el nivel de tensiones medido.

Los aspectos más importantes para acometer la evaluación del comportamiento de las presas de materiales sueltos pueden relacionarse con los niveles de deformaciones horizontales y verticales, la presiones totales y efectivas (dependientes además de las presiones intersticiales), así como con los movimientos detectados y las filtraciones a través del cuerpo de presa.

A su vez, las herramientas más profusamente utilizadas para interpretar el conjunto de datos de comportamiento relacionados con los aspectos comentados consisten en la modelación estadística y en la modelación determinista.

Modelos estadísticos

Este tipo de modelos resultan especialmente útiles cuando se dispone de una amplia información sobre la historia de la presa, puesto que basa los resultados del modelo sobre datos reales.

El objetivo de un modelo estadístico consiste en encontrar una relación suficientemente estable y precisa entre las variables exteriores y las variables de control registradas durante la historia pasada de la presa, permitiendo realizar una interpretación de la misma.

En concreto, el modelo estadístico debe permitir la obtención de las ecuaciones empíricas que rigen el comportamiento de cada variable de control de la presa (movimientos, subpresiones, temperaturas del hormigón, deformaciones, filtraciones, etc.), en función del tiempo transcurrido desde una fecha origen, los niveles de embalse y las temperaturas de referencia medidas "in situ" (variables exteriores). Así, estas ecuaciones proporcionan un sistema de control de los distintos parámetros medidos en la presa, poniendo de manifiesto los fenómenos anómalos que produzcan desviaciones respecto de lo esperado.

Consecuentemente, pueden identificarse tres componentes básicas aditivas en cada variable de control:

- La correspondiente a la parte irreversible derivada de las deformaciones y otros fenómenos progresivos debidos a la evolución de las propiedades del hormigón, cimentación, etc. o a fenómenos más o me-

nos bruscos de acomodación, función todo ello del tiempo cronológico transcurrido desde una fecha origen.

- La correspondiente al efecto del nivel de embalse, que podría llamarse "componente elástica" en el caso de tratarse de los movimientos sufridos por la presa de obra de fábrica, aunque esta componente también afecta a otro tipo de fenómenos, tales como caudales drenados, temperaturas del hormigón, etc.
- La correspondiente al efecto del ciclo térmico anual

Por último, el proceso de obtención de un modelo estadístico es habitualmente el siguiente:

- Creación del modelo
- Identificación de los coeficientes
- Contraste del modelo
- Establecimiento de tolerancias y análisis del modelo
- Obtención de tendencias en valores acumulados en el tiempo

Modelos deterministas

Los modelos deterministas se confeccionan a partir de códigos de resolución numérica basados en las técnicas de los elementos finitos y de las diferencias finitas fundamentalmente, permitiendo la simulación del comportamiento de suelos, rocas, estructuras de hormigón, etc. así como la interacción entre los mismos.

Las fases de confección de un modelo de simulación del comportamiento de este tipo son, fundamentalmente:

- Definición geométrica
La definición geométrica de los modelos confeccionados deben incluir la consideración de todos los materiales de distinta naturaleza involucrados mediante la definición de distintas "regiones" de cálculo, divididas a su vez en zonas y nodos. Las coordenadas que limitan dichas regiones han de ser adoptadas con mínimas simplificaciones a partir de los documentos disponibles, y la densidad de la malla de cálculo garantizar la suficiente precisión numérica en el análisis.
- Establecimiento de las condiciones de contorno
La extensión de los modelos alcanza zonas suficientemente alejadas del plano de cimentación

como para que las condiciones de contorno clásicas, consistentes en coacciones de movimiento, no distorsionen los estados tensionales y deformacionales en la zona de interés.

Por otra parte, las condiciones vinculación entre distintas regiones de cálculo, asociadas a superficies de contacto entre materiales de distinta naturaleza y juntas, se pueden idealizar mediante "interfacies".

- Elección de los modelos constitutivos
Distintos modelos constitutivos son capaces de reproducir, con distinto nivel de aproximación, el comportamiento tenso-deformacional de los mismos del conjunto presa-terreno de cimentación. En general, se suelen adoptar: modelos elásticos y lineales, elástico no lineales y elastoplásticos.
- Simulación del comportamiento constructivo y post-constructivo, con especial atención al conjunto de fenómenos asociados al llenado del embalse.
- Simulación del comportamiento frente a acciones sísmicas.

Por otra parte, las modernas técnicas de cálculo dinámico mediante software avanzado requieren de las siguientes tareas:

- Generación de sismos sintéticos acordes a las características conocidas y análisis de los mismos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.
- Confección del modelo de cálculo incluyendo la definición de una geometría acorde a la necesidad de transmisión de ondas, condiciones de contorno apropiadas a la geología y una serie de modelos constitutivos de los materiales capaces de reproducir lo más fidedignamente posible su conocido comportamiento histerético.
- Estudio del amortiguamiento considerando la contribución del tipo Rayleigh así como el propio del comportamiento constitutivo de los materiales (histerésis y plasticidad).
- Estudio del potencial de licuefacción de las arenas saturadas mediante el acoplamiento de modelos de generación de sobre-presiones intersticiales.
- Estudio de los efectos hidrodinámicos en la interacción entre el volumen de embalse y el cuerpo de presas de fábrica.
- Estudio de las deformaciones recuperables y no recuperables para el conjunto de los episodios sinté-

Tabla 3. Períodos de retorno para la acción sísmica

Categoría de la presa	Sismicidad del emplazamiento		
	BAJA	MODERADA	ALTA
C	No es necesario considerarlo	TP = 1000 años	TP = 1000 años
B	No es necesario Considerarlo	TP = 1000 años	TP = 1000 años
A	No es necesario considerarlo	TP = 1000 años TE = 3000-5000 años TE = 10000 años	TP = 1000 años

Donde:

TP = Terremoto de Proyecto

TE = Terremoto extremo

Sismicidad del emplazamiento = la correspondiente a partir del mapa de peligrosidad sísmica de la normativa sismorresistente en vigor (2002)

tos obtenidos y, en su caso, para eventos reales registrados que permitiesen su calibración.

Cálculos estáticos y dinámicos

Según dispone el Reglamento (1996), "en el Proyecto y en cada una de las revisiones posteriores, deberá comprobarse el comportamiento estructural de la presa ante las diversas solicitaciones y combinaciones posibles de ella, y se razonarán los niveles de seguridad que se adoptan en cada caso según la clase de solicitación considerada, la probabilidad de ocurrencia de la misma y su previsible permanencia".

A su vez, según este mismo documento, "se podrán adoptar distintos coeficientes de seguridad según el tipo de solicitaciones que se considere" y "se contemplarán distintos escenarios de solicitaciones concurrentes y razonablemente compatibles".

Los tres tipos de situaciones que considera el Reglamento (1996), atendiendo al grado de riesgo y permanencia de las solicitaciones son: *Normales*, *Accidentales* y *Extremas*.

Por otra parte, la Instrucción (1967) consideraba una serie de combinaciones concretas de acciones y, todavía iba más allá, fijando los coeficientes de seguridad mínimos que deben cumplir durante la construcción o en la fase de explotación las presas de fábrica (Artículo 27 y siguientes) así como las presas de materiales sueltos (Artículo 52).

Además, la Guía Técnica Nº2 del Comité Nacional Español de Grandes Presas "Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas" (2002), no establece di-

ferencias significativas en el cálculo y exigencias de coeficientes parciales de seguridad respecto de la Instrucción, con la excepción expresa de la acción del agua en casos de avenida y de la acción sísmica.

A este respecto, las principales variaciones respecto del efecto del agua han quedado suficientemente explícitas en el apartado de seguridad hidrológica, y las referidas a la consideración de acciones sísmicas se resumen en la Tabla 3 (Períodos de retorno para la acción sísmica).

4.4. Seguridad en los equipos, instalaciones, accesos y comunicaciones

El Reglamento establece, en su Artículo 23, la necesidad de que la presa disponga de fuentes de energía para garantizar el funcionamiento de los equipos eléctricos, relacionados en general con las operaciones de los órganos de desagüe, sobre cuya especial relevancia en la seguridad de la presa se ha hecho hincapié con anterioridad.

Así, se debe verificar que las instalaciones eléctricas sean las adecuadas para el fin propuesto contando con fuentes alternativas para cubrir eventuales faltas de suministro que permitan hacer frente a fallos, cuidando especialmente la atención hacia aquellas que forman parte de la operativa del Plan de Emergencia.

Los equipos electromecánicos deberán ser capaces de funcionar satisfactoriamente en las condiciones de explotación previstas en las Normas de Explotación, que a su vez deben englobar las actuaciones

previstas en el Plan de Emergencia así como un plan de inspección, mantenimiento y operación periódica de los equipos.

Por último, el Reglamento establece (Artículo 22), la necesidad de que la presa disponga de accesos y sistemas de comunicación, a poder ser alternativos, que puedan mantenerse en funcionamiento aún en condiciones extremas, que a su vez deben haber sido estudiadas en la elaboración del Plan de Emergencia.

5. Acciones correctoras y seguimiento del comportamiento

La evaluación de la seguridad de la presa y embalse, que debe haber partido de la información contenida en el Archivo Técnico y, en su caso, de inspecciones, campañas complementarias de investigación y cálculos adicionales debe a su vez haber establecido conclusiones de la siguiente naturaleza y gradación (Borrador de la Guía Técnica N°7: "Elaboración de la Revisión periódica de las presas"):

- a) *No hay síntomas que permitan establecer, de acuerdo con la reglamentación aplicable, falta de seguridad de ningún tipo en la presa revisada.*
- b) *No hay síntomas que permitan establecer, de acuerdo con la reglamentación aplicable, falta de seguridad de ningún tipo en la presa revisada, aunque será preciso llevar a cabo las actuaciones que se indican para alcanzar un perfecto estado de funcionamiento y/o cumplir con la legislación vigente.*
- c) *No cabe establecer una calificación definitiva sobre la seguridad de la presa revisada en tanto no se realicen las actuaciones que se indican. Podrán añadirse limitaciones propuestas a la explotación, mientras tanto no se realicen determinadas actuaciones.*

El informe resultante originará, dentro de la propia entidad titular de la presa, las actuaciones pertinentes derivadas de las conclusiones y recomendaciones establecidas en el Reglamento:

- El resultado de la revisión deberá ser informado por el titular y enviado a la Administración, quedando a la espera de que el Organismo Inspector realice observaciones y/o propuestas convenientes.

- El documento de revisión quedará incorporado igualmente al Archivo Técnico.

En particular, dentro de los cometidos del organismo encargado de la vigilancia e inspección de presas, según el Artículo 6.1 del Reglamento se encuentra *Analizar los resultados de las revisiones periódicas que se realicen en las presas existentes para comprobar el cumplimiento de las condiciones de seguridad, proponiendo la aprobación de las modificaciones que se precisen para corregir los defectos detectados o para incrementar la seguridad de la presa.*

En cualquier caso, sea cual sea la medida adoptada, debe llevarse a cabo un seguimiento de su comportamiento que permita contrastar la bondad de la decisión. Para ello, resulta imprescindible establecer un sistema de auscultación e interpretación de datos registrados mediante técnicas como las vistas con anterioridad para la evaluación del comportamiento de presa y embalse.

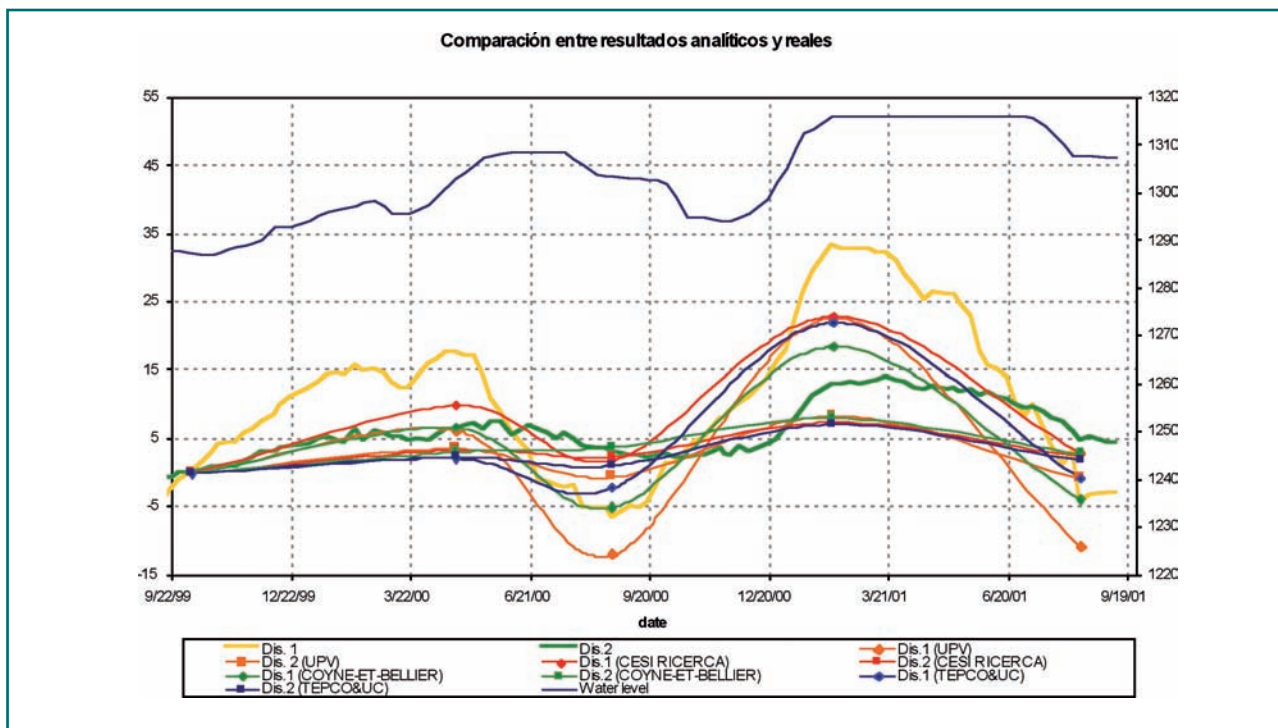
Como ejemplo, el caso de la presa de la Aceña (Escuder y Blázquez, 2007) resulta muy ilustrativo desde el punto de vista de las tareas de seguimiento del comportamiento por parte del Canal de Isabel II. Gracias a la utilización de los resultados de auscultación como caso de estudio para siete equipos independientes en el "Ninth International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams" (San Petersburgo, 2007), organizado por el comité de ICOLD en "Computational Aspects of Analysis and Design of Dams", se pudieron contrastar las capacidades de distintos modelos numéricos y caracterizar la fuente y magnitud de las incertidumbres en el comportamiento de la presa, reforzando la justificación de las actuaciones previamente tomadas por el Canal de Isabel II.

La Figura 9 muestra la comparación entre los resultados analíticos, calculados por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Coyne-et-Bellier, TEPCO&UC y Cesi-Ricerca, y los desplazamientos reales en milímetros a la altura de la galería intermedia (Dis 2) y en coronación (Dis 1).

6. Hacia sistemas integrales de gestión de seguridad de presas

Tradicionalmente, la gestión de la seguridad de presas y embalses implica, por un lado, actividades realizadas de forma sistemática y periódica - como las

Fig. 9.
Comparación
entre
movimientos
analíticos y
reales
(Traducida de
Escuder y
Blázquez, 2007).



inspecciones ordinarias o el registro de la auscultación y, en definitiva, el cumplimiento de las Normas de Explotación. Por otro lado, incluye también el desarrollo de investigaciones o ensayos más específicos y la realización de obras de diferente entidad.

Por una serie de razones que se enumeran a continuación, diversos organismos responsables de la seguridad de presas están introduciendo en los últimos años una nueva práctica que complementa al enfoque tradicional y, sin sustituirlo, aporta un importante valor añadido; se trata de la declaración de riesgos que, a su vez, incluye al análisis y la evaluación de riesgos. Algunos de dichos condicionantes son:

- El envejecimiento del parque de presas (la mayoría de las estructuras supera los treinta años de antigüedad y, un porcentaje muy amplio los cincuenta años en explotación), así como la diferencia entre el conocimiento ingenieril actual y el existente cuando éstas fueron diseñadas y construidas.
- La demanda de mayores niveles de seguridad para la población y los bienes ubicados aguas abajo de las presas.
- La creciente demanda respecto de una mejor justificación del uso de los fondos públicos, incluyendo los programas de seguridad de presas.

- La incorporación de técnicas de gestión de riesgos como complemento a los criterios exclusivamente ingenieriles.
- La necesidad de priorizar acciones correctoras para conseguir la mayor y más rápida reducción de riesgos posible.
- La práctica imposibilidad de construcción de nuevas estructuras por aspectos fundamentalmente sociales y medioambientales.
- La necesidad de optimizar la gestión de sistemas de recursos hídricos así como de aumentar la capacidad de regulación de los mismos para dar respuesta a una demanda de abastecimiento creciente y en una situación de aparente incremento de eventos climatológicos extremos (avenidas y sequías).

Además de todos los aspectos considerados en el enfoque tradicional de la seguridad, los sistemas modernos de gestión de la seguridad de presas incluyen elementos económicos, legales y financieros. Pero, sobre todo, llevan a cabo la gestión de la seguridad mediante una metodología robusta basada en el reconocimiento explícito y el análisis de los riesgos, junto con un tratamiento formal de la incertidumbre.

Aunque la aplicación de métodos probabilísticos para sistemas presa-embalse suscita comúnmente re-

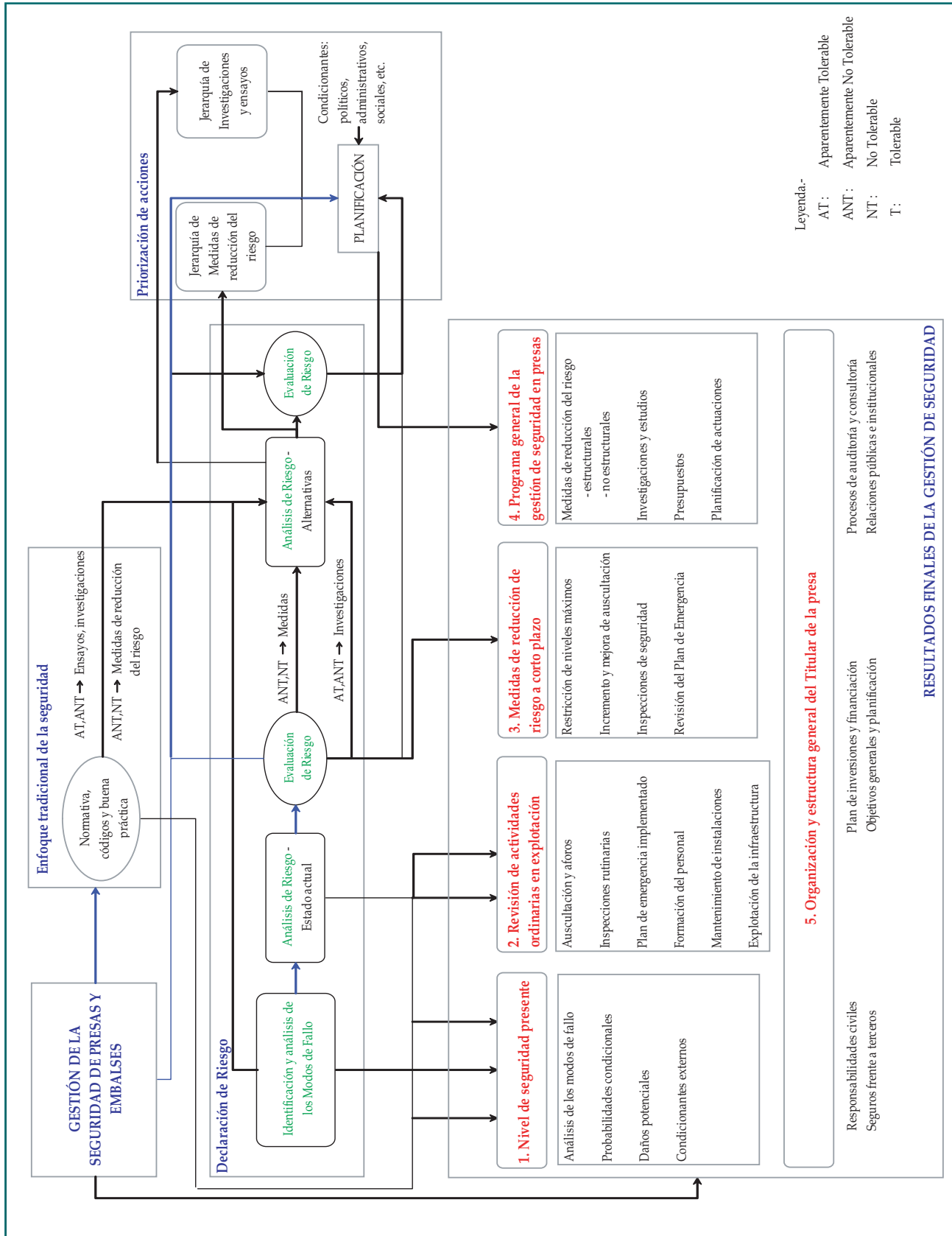


Fig. 10. Esquema general para la gestión de la seguridad de presas y embalses mediante la Gestión basada en riesgos (Adaptado de D. Bowles por M. Membrillera en Escuder et al. 2007).

celos o dudas respecto a la correspondencia entre la realidad y las frecuencias calculadas, las probabilidades de rotura calculadas no deben interpretarse estrictamente como eventos de rotura por unidad de tiempo sino, más bien, como una medida del grado de confianza que se tiene en la presentación de un evento concreto. Se sustituye por tanto el concepto frecuentista de la probabilidad, basado en sucesos observados, por el bayesiano, de carácter más subjetivo.

El proceso de puesta en marcha de estos sistemas de gestión suele implicar los siguientes pasos:

- Identificación de la organización y estructura general del Titular
- Desarrollo del Enfoque tradicional de la seguridad
- Análisis y evaluación de riesgos
- Priorización de acciones

La Figura 10, muestra como estos sistemas de gestión se aprovechan de las actividades ya existentes dentro del programa tradicional de seguridad (por ejemplo, las inspecciones, los registros de auscultación, etc) y viceversa. Del mismo modo, el esquema muestra la información específica que se precisa (por ejemplo, la cuantificación de consecuencias o la modelación de múltiples escenarios de inundación)

Además, el hecho de que en los últimos años se hayan concluido la mayor parte de los informes de Primera Revisión y Análisis General de la Seguridad y se esté en disposición de planificar y ejecutar las pertinentes inversiones en actuaciones correctoras, constituye un estímulo para poner a disposición de los propietarios de presas nuevas herramientas de ayuda a la toma de decisiones que permitan contrastar la eficiencia de dichas inversiones.

Como ejemplo práctico de aplicación en España, la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD)

está llevando a cabo una serie de tareas complementarias a su programa de seguridad de presas basadas en las técnicas de análisis de riesgos, a imagen de otros organismos internacionales equivalentes (p.e. US Bureau of Reclamation).

Culminada una primera etapa de cribado o "screening", cuyos resultados completos han sido publicados y presentados (Escuder et al, 2008), se ha desarrollado un análisis completo de los riesgos inherentes a la gestión de seguridad de las presas de Camporredondo y Compuerto, incluyendo estimaciones cuantitativas de probabilidad de ocurrencia de distintos eventos, la identificación de los potenciales modos de fallo, la probabilidad de fallo asociada a cada uno de los mismos y las consecuencias resultantes.

Dicho análisis, combinado con un tratamiento de la incertidumbre y con la evaluación de distintas medidas correctoras, proporciona al explotador una metodología para la toma de decisiones en seguridad de presas que permite priorizar y programar las actuaciones que deben llevarse a cabo por parte del explotador, de acuerdo con los criterios de viabilidad técnica, económica, social y ambiental, establecidos en la normativa vigente.

Por último, reseñar una de las aportaciones más significativas de la II Semana Internacional sobre la aplicación del análisis de riesgos a la seguridad de presas (Valencia, 2008), consistió en la divulgación de los resultados del proyecto "A European Methodology for the Security Assessment of Dams" (European Commission. Directorate General Justice, Freedom and Security. JLS/2006/EPCIP/001.), basada en la aplicación de las técnicas de análisis de riesgos a la evaluación de la seguridad de presas frente a acciones de sabotaje, vandalismo y terrorismo. La tendencia mundial en esta materia consiste en incorporar esta rama como una más en la gestión de la seguridad de presas y embalses. ♦

Referencias:

-Delgado, F.; Menéndez, A.; Rubio M^o.C.; Pérez, J. Normativa española sobre seguridad de presas y embalses. Editorial Universidad de Granada-Codesa. Sevilla. 2002.
-Escuder, I. 1996. Synthesis of Dam safety Protocol. Master of Science Thesis. University of Wisconsin-Milwaukee.
-Escuder, I.; Blázquez, F. Analysis of the elastic behaviour of an arch gravity dam. International

Journal on Hydropower and Dams. NUMERO: VOL 30, Issue 5, Pages 76-84. Dorchester, UK. 2007.
-Escuder, I.; G. De Membrillera, M.; Moreno, P.; Pérez, O.; Ardiles, L.; Jenaro, E. Desarrollo de un programa complementario de seguridad basado en análisis de riesgos para las presas de la Confederación Hidrográfica del Duero. V Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Sevilla. 2007
-Escuder, I.; G. De Membrillera, M.; Moreno, P.; Pérez, O.; Ardiles, L.; Jenaro, E. First risk-based

screening on a Spanish portfolio of 20 dams owned by the Duero River Authority. Hydrovisión 2008. Sacramento (USA). 2008.
-Franco, A.; Soriano, A. "Plinths in dams with watertight facing. Design, Construction and Performance" XVI Int. Conference on Large Dams. San Francisco U.S.A. Q61.R48. pp. 1787-1816. 1988.
-Soriano, A. y Sánchez, F. Sobre la evaluación de la seguridad de presas de materiales sueltos. Revista de Obras Públicas. Diciembre de 1997.