

Soluciones técnicas para reducir en tiempo y coste el proyecto y construcción de presas

Technical solutions to reduce time and cost in dam design and construction

F. Javier Bazán Moreno. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Vocal titular del Comité Español de Grandes Presas. e-mail

Resumen: Se resumen y comentan en este artículo, el informe del Ponente General de la cuestión Q.84, "soluciones técnicas para reducir en tiempo y coste el proyecto y construcción de presas", así como las contribuciones orales de los ingenieros españoles al mismo tema, durante el desarrollo del Congreso.

Palabras Clave: Ahorro en costes, Desvío del río, Cimentación, Aliviaderos, Sección de presa, Materiales

Abstract: The article summarizes and comments on the report by the General Reporter on question Q.84 "technical solutions to reduce time and cost in dam design and construction", and the contributions by Spanish engineers.

Keywords: Cost Savings, River Diversion, Foundation, Spillways, Cross Sections, Materials

1. Introducción

La elección del tema correspondiente a la Q.84, "Soluciones técnicas para reducir en tiempo y coste el proyecto y construcción de presas", propuesto para su discusión en el 22 congreso de ICOLD en Barcelona, reafirma la atención que se ha dedicado a esta tema tanto en anteriores reuniones del Comité Internacional, como en distintos Boletines ICOLD a lo largo de los últimos años.

Entre otros documentos, los siguientes boletines tienen especial relevancia para el tema tratado:

- Boletín 73 – Savings in Dam Construction, 1973
- Boletín 83 – Cost Impact on Future Dam Design, 1992
- Boletín 85 – Owners, Consultants and Contractors, 1992
- Boletín 110 – Cost Impact of Rules, Criteria and Specifications, 1997
- Boletín E02 – Non-structural Risk Reduction Measures, 2001

A lo largo de los últimos 70 años de historia de ICOLD, los temas de discusión en los distintos con-

gresos han ido evolucionando, incluyendo temas de importancia económica y social como son el impacto ambiental, análisis de riesgos, financiación privada y el correspondiente a la cuestión Q.84 del presente artículo. Esto corrobora la preocupación del ICOLD por los distintos temas, muchos de ellos novedosos, que van surgiendo a lo largo de los años, y que se consideran de interés para la comunidad presística mundial.

2. Temarios de la Cuestión e informes presentados

Los temas seleccionados por ICOLD para la Q.84 fueron:

- Tema 1: Reducción en tiempo y coste mediante nuevas soluciones y criterios de diseño para el desvío del río.
- Tema 2: Diseño y tratamientos innovadores del cimiento para evitar incertidumbres y contingencias.
- Tema 3: Uso de materiales en presas y secciones no convencionales.
- Tema 4: Ahorro en diseño de nuevos aliviaderos o mejora de los existentes.

- Tema 5: Acercamientos a la puesta fuera de servicio de presas; programas para su desarrollo.

Se recibieron 91 ponencias de 34 países (Ver Tabla 1) acreditando el interés creciente por el tema. La distribución de las contribuciones en las distintas Temáticas de la Q.84 fue la siguiente:

- 24 ponencias sobre desvío del río durante la construcción;
- 24 ponencias sobre cimientos;
- 52 ponencias sobre materiales en presa (tanto hormigón como tierras);
- 32 ponencias con cuestiones sobre aliviaderos;
- 23 ponencias sobre puesta fuera de servicio.

El tema 5 se trató exclusivamente en el resumen del ponente general junto con los otros cuatro temas, y no fue objeto de presentaciones en el congreso.

Las 91 ponencias presentadas a la Q.84 cubrieron un importante número de proyectos que se están elaborando actualmente en todo el mundo.

La distribución de las comunicaciones seleccionadas en los cuatro temas tratados para su presentación oral en el Congreso fue la siguiente:

- TEMA 1 Reducción en tiempo y coste mediante nuevas soluciones y criterios de diseño para el desvío del río. 5 presentaciones (Ver Tabla 2).
- TEMA 2 Diseño y tratamientos innovadores del cimiento para evitar incertidumbres y contingencias. 7 presentaciones (Ver Tabla 3).
- TEMA 3 Uso de materiales en presas y secciones no convencionales. 7 presentaciones (Ver Tabla 4).
- TEMA 4 Ahorro en diseño de nuevos aliviaderos o mejora de los existentes. 6 presentaciones (Ver Tabla 5).

3. Resumen de las contribuciones españolas

A continuación se resumen los dos temas de autores españoles seleccionados por ICOLD para su presentación oral.

Tabla 1

País	Contribuciones	País	Contribuciones
Argelia	1	Japón	5
Australia	2	Marruecos	3
Brasil	9	Méjico	1
Bulgaria	1	Nueva Zelanda	1
Canadá	3	Pakistán	1
Chile	2	Portugal	3
China	4	Rumania	1
Colombia	2	Rusia	2
Costa Rica	1	Eslovenia	1
Chipre	2	Sudáfrica	1
Egipto	2	España	5
Francia	4	Suecia	2
Alemania	1	Suiza	3
Islandia	1	Reino Unido	2
India	3	USA	5
Irán	11	Venezuela	3
Italia	2	Zimbabwe	1

Tabla 2

Autores	Título
P. Mason. UK.	Approaches to cost & time savings for dam construction
R. Herweynen. Australia	Discussion on "Competitive Alliance" Contractual Method for Burnett Dam
M. Lino. France.	Overflow cofferdam for embankment dams
Saks. Brazil.	Impact of diversion works in RCC experience
G. Pham Hong. M. Ho Ta Khanh Vietnam.	Cua-Dat CFRD and innovative river control during construction

Tabla 3

Autores	Título
S. Olivella, E. E. Alonso and N. Pinyol. Spain	Beliche Dam: A Case History in Impoundment and Rainfall Induced Deformation of Rockfill Dams
B. Materón. Brazil.	Plinth design in deformable foundations
N. Pinto. Brazil.	Designing compression vertical joints in very high CFRD dams
P. Jóhannesson, J. Kröyer. Iceland	Deformations and slab design aspects
A. Scuro. Italy.	A Fill dams with geomembranes
E. Frossard. France.	Granular fill geomechanics - applications to rockfill dams
Fry. France.	A new method for dimensioning and assessing safety of rockfill dam

Tabla 4

Autores	Título
Garand. Canada.	On site batching of plastic concrete
S. Malla, M. Wieland and R. Guimond. Switzerland	Proposed Nan Theun 1 RCC Arch-gravity Dam in Laos
Fujisawa, Kawasaki, et al. Japan.	Study on Strength and Physical Properties of Cemented Materials for CSG Design
A. Wohnlich. Switzerland.	Roller Compacted Concrete (RCC) Arch Dams
F. Ortega. Spain.	RCC dams. Cost on different design options
L. Uribe, L. Bustamente. Chile.	Diseño y construcción de la presa Ralco
D. Moser, M. Aufleger, R. Hoepfner. Brazil.	Application of New Instrumentation Methods towards Optimal Joint Spacing Criteria and Fast Construction of RCC Dams

Tabla 5

Autores	Título
B. A. Jones and W. D. Hakin. Australia.	Use of Fusegates on a New Auxiliary Spillway at Jindabyne Dam in Snowy Mountains, Australia
D. Van Wick. South Africa.	Design and Model Testing of a Labyrinth Spillway for the Maguga Dam
Agrestii. France.	Amélioration des capacités de stockage et de la sécurité des barrages d'irrigation Thaïlandais
J-P Vigny. France.	Performance, coût et limites d'emploi de divers déversoirs fusibles ou labyrinthes
A. Oumane. Argeria.	Donnés hydrauliques et du coût pour plusieurs conceptions de déversoirs en labyrinthe
A. Nombre, F. Millongo, E. Somda. Burkina Faso.	Improving safety and storage capacity of small dams with simplified fuse gate in Burkina Faso

3.1. "La presa de Beliche: un caso de deformaciones en escolleras inducidas por inundación y lluvias"

La ponencia fue presentada por E.E. Alonso, S. Olivella y N. M. Pinyol del Departamento de Ingeniería del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (UPC, Barcelona), e incluida dentro del Tema 2, "Diseño y tratamientos innovadores del cimiento para evitar incertidumbres y contingencias".

La presentación oral en el congreso corrió a cargo S. Olivella.

Se realiza a continuación un resumen de la presentación recogiendo los aspectos más importantes destacados por los autores:

En la presentación trataron las capacidades de modelos recientes para investigar el comportamiento de presas de tierra y escollera. En particular, se presentó el caso de la presa de Beliche (Algarve, Portugal) formada por un núcleo de suelo arcilloso y espaldones de escollera, distinguiéndose un espaldón interior más deformable y otro exterior de mayor resistencia. La figura 1 muestra una fotografía de la presa y la sección de proyecto de la misma. Esta presa fue analizada anteriormente por Naylor et al (1997) sin que se llegara a comprender por completo su comportamiento geotécnico.

Para la presa de Beliche se disponía de datos procedentes de ensayos de laboratorio, tanto edométricos como triaxiales (realizados en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa), así como medidas "in situ" durante un periodo de casi 10 años. A partir de un modelo constitutivo para escolleras que tiene en cuenta las deformaciones de colapso inducidas por los cambios de humedad relativa, desarrollado recientemente (Oldecop y Alonso, 2001 y 2003), se han simulado los ensayos de laboratorio y se han determinado parámetros. La figura 2 muestra un ejemplo de comparación de resultados experimentales triaxiales, que incluye una fase de mojado durante la fase de corte, con resultados del modelo por elementos finitos (cada triaxial se simula mediante una discretización por elementos finitos de la probeta). El colapso en escolleras se produce por un mecanismo de rotura de partículas al migrar la humedad hacia su interior por microfracturas. La mecánica de fractura proporciona una explicación a este mecanismo de deformación, que finalmente puede traducirse en un modelo de comportamiento macroscópico del material. Para el núcleo se ha usado el modelo para suelos no saturados (BBM) también ajustado a ensayos de laboratorio triaxiales y edométricos. Maranhã das Neves (2002) ha realizado una interesante revisión sobre el comportamiento de escolleras.

Una vez determinados los parámetros de los modelos para escollera y núcleo se ha preparado un modelo de elementos finitos que simula la construcción y el funcionamiento a largo plazo de la presa. La figura 3 muestra la geometría considerada que dispone de capas para simular las etapas de construcción de la presa. Tanto durante la construcción como durante la

Fig. 1. Fotografía y sección de la presa de Beliche (Algarve, Portugal).

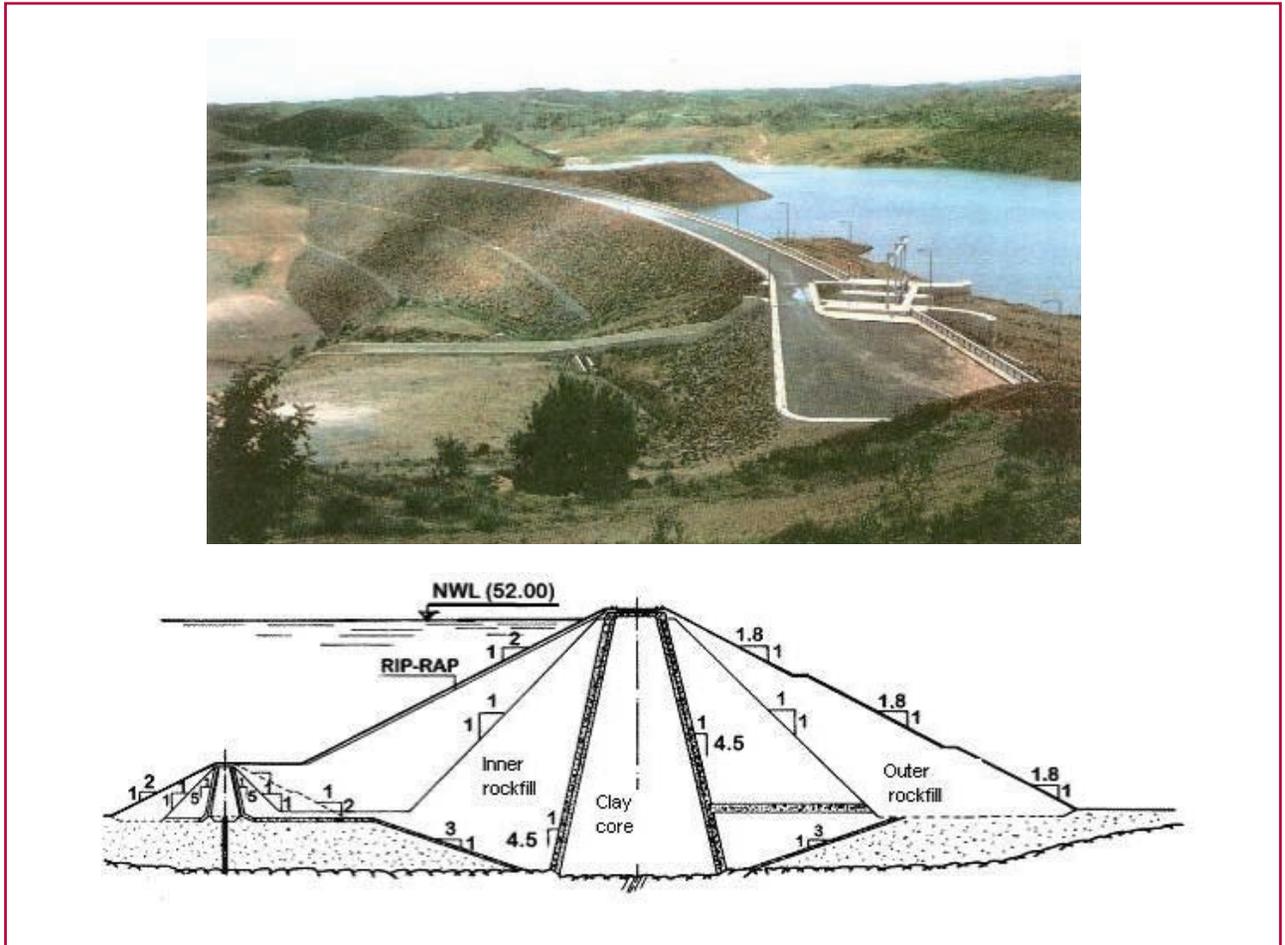
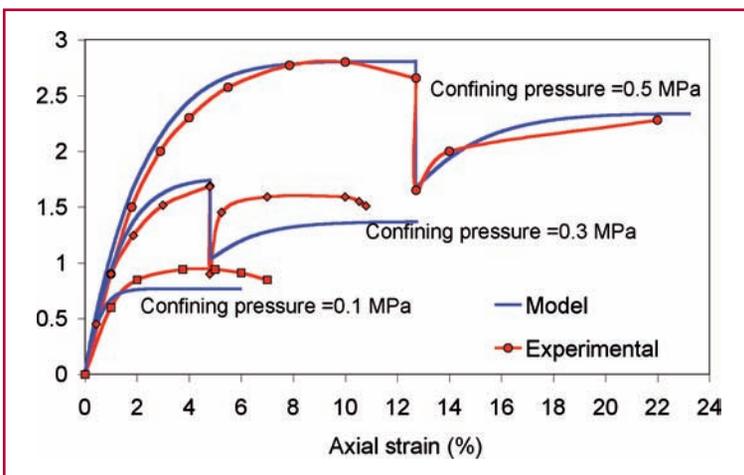


Fig. 2. Ensayo triaxial en escollera con inundación en la fase de corte.



fase de explotación se imponen en el contorno de los materiales los episodios de lluvia de intensidad y duración variable. Este modelo permite calcular los asentamientos en superficie y profundidad de la presa en condiciones de humedad variable, las presiones de agua y

las tensiones y deformaciones. La comparación de las variables calculadas con las medidas realizadas in situ (Figura 4) permite validar el modelo. Los cálculos por elementos finitos se han realizado con el programa CODE_BRIGHT (Olivella et al, 1996).

Para estudiar la influencia de varios parámetros se han realizado también algunos estudios de sensibilidad, como por ejemplo frente a la permeabilidad de los materiales o a su compresibilidad. Se ha visto que la permeabilidad juega un papel muy importante pues controla los picos de presión de agua en la escollera, que a su vez controlan las deformaciones de colapso. La compresibilidad de las escolleras es variable en función del tamaño de las partículas (efecto de escala). Puesto que en los ensayos de laboratorio, a pesar de realizarse con probetas de gran tamaño, todavía se descartan los tamaños máximos, la compresibilidad in situ suele ser algo mayor que la compresibilidad determinada en laboratorio. Por último, la deformación de fluencia bajo carga constante, un

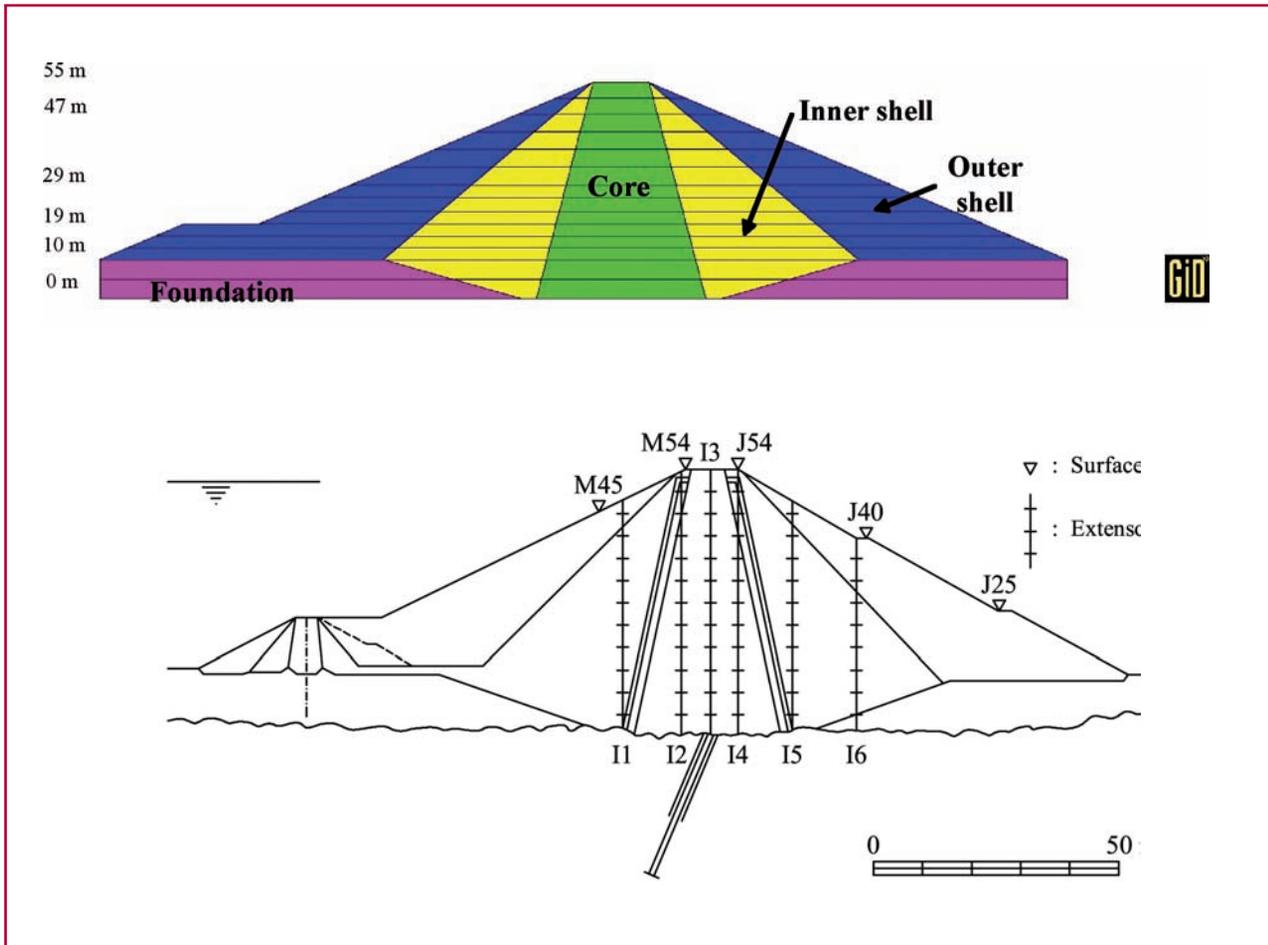


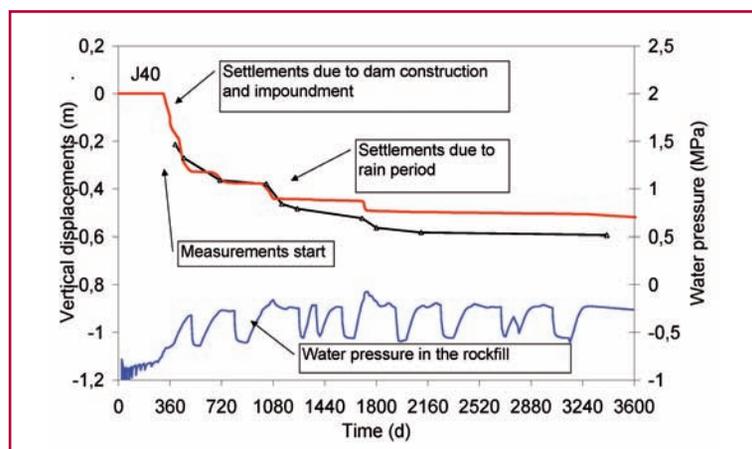
Fig. 3. Sección idealizada de la presa de Beliche y esquema de la instrumentación para medida de movimientos.

proceso de deformación que se ha observado también experimentalmente en escolleras, ha contribuido a mejorar la calidad del ajuste.

El modelo permite comprender el funcionamiento de la presa sobre todo ante eventos de lluvia e inundación de los materiales por el agua del embalse. Se ha demostrado que cuando las lluvias son suficientes, lo que se cuantifica tanto por intensidad como por duración, aparecen las deformaciones de colapso tanto del núcleo como de las escolleras pues se alcanzan presiones de agua superiores a las mayores alcanzadas anteriormente (es decir máximos absolutos en el instante en que se producen). Se ha visto, que no solamente en el talud en contacto con el agua del embalse se producen colapsos, sino también en el talud aguas abajo, en el que la lluvia juega un papel muy importante. En Alonso et al (2005, 2006) se pueden encontrar detalles de los modelos utilizados y una amplia discusión de los resultados obtenidos.

Se concluye que la influencia conjunta de la lluvia y del nivel de agua del embalse se deben tener en cuenta para analizar los movimientos en presas de tierras y escolleras. Para ello deben introducirse modelos para suelos y escolleras parcialmente saturados, en los que las tensiones efectivas no son suficientes para

Fig. 4. Asientos medidos y calculados en un punto del talud aguas abajo. Presión de agua en la escollera.



explicar el comportamiento del suelo. Se ha visto también que la lluvia puede dar lugar a deformaciones tan importantes como las inducidas por la inundación durante el llenado del embalse. Y, por último, que los ensayos de laboratorio, incluso a gran escala, son necesarios para caracterizar tanto los suelos como las escolleras aunque en este último caso es necesario tener en cuenta efectos de escala.

3.2. “Coste de los distintos conceptos de diseño de las presas de hormigón compactado con rodillo”

La ponencia fue escrita y presentada oralmente en el Congreso por Francisco Ortega Santos, Vocal del Comité Español de Grandes Presas.

Se realiza a continuación un resumen de la presentación recogiendo los aspectos más importantes destacados por el autor:

La construcción de presas de Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) se ha extendido rápidamente por todo el mundo a lo largo de los últimos 25 años, y últimamente de manera muy especial en países en vías de desarrollo. España ha sido, desde los inicios de su aplicación, un país líder a nivel mundial en esta tecnología. Los otros países con mayor número de presas de HCR construidas son: Estados Unidos, Japón, China y Brasil. La causa principal de esta expansión es la economía que es posible alcanzar debido a la rapidez con la que se pueden llegar a construir este tipo de presas de hormigón. Esta reducción de plazos frente a las presas de hormigón construidas por el método tradicional (presa por bloques y vibrado por inmersión) es la causa principal de su menor coste.

Un caso reciente muy significativo lo encontramos por ejemplo, en China, en la ataguía de la Fase III de la Presa de las Tres Gargantas donde se llegó a colocar 476.000 m³ de HCR en tan sólo un mes. La ataguía tiene un volumen de 1,1 millones de m³ y se construyó en 4 meses. En estructuras definitivas se ha llegado a colocar el HCR a ritmos por encima de los 200.000 m³/mes (Olivenhain en Estados Unidos, Tha Dan en Tailandia, Longtan en China, etc.).

A lo largo de los últimos 25 años el diseño y la construcción de este tipo de presas han evolucionado hacia dos corrientes principales. Por un lado se encuentra el concepto de diseño por el cual se atribuye al hormigón la calidad suficiente como para desempeñar por sí mismo las funciones estructurales y de impermeabilidad que se le exigen a la presa. Por otro lado

encontramos el concepto de la presa de HCR mixta en la que se emplea un material de prestaciones inferiores para el núcleo de la estructura y se combina este con mezclas ricas de retoma entre tongadas de HCR (para ganar resistencia en las juntas) y se construye además una pantalla de impermeabilización en el paramento de aguas arriba ya sea de hormigón convencional o de material sintético (para garantizar la impermeabilidad). El primer grupo corresponde a las denominadas presas “globales” de HCR y el segundo sería el de las presas “compuestas” de HCR. Ambas soluciones son válidas desde un punto de vista técnico. El éxito de las realizaciones concretas en uno o en otro caso depende de muchos factores que en general son comunes a todas las grandes obras de ingeniería: la experiencia del equipo de proyecto y construcción, el uso de los materiales disponibles, la calidad de los recursos empleados, la organización de obra, la logística de suministro de materiales, etc.

Como elemento diferenciador entre estas dos corrientes, debemos mencionar dos aspectos principales a favor de las primeras: en primer lugar, el empleo de conglomerantes puzolánicos (ya sean naturales o artificiales como las cenizas volantes) en la mezcla de HCR, y en segundo lugar, la simplicidad del diseño. En general las presas “globales” de HCR incorporan dichos conglomerantes puzolánicos en una alta proporción como sustitución del cemento Portland, y de ahí la mejor calidad del hormigón (tanto en resistencia a largo plazo como en impermeabilidad) que se puede obtener. También en general estas presas son más sencillas en su concepción y más rápidas de construir que las presas “compuestas” de HCR.

El análisis que hemos realizado en esta ponencia es el del coste de los diversos conceptos del diseño de las presas de HCR, a través de un análisis de incidencias y costes de recursos empleados en cada caso. Basados en la experiencia de construcción de este tipo de presas tanto en España como por todo el mundo, se han evaluado los costes directos unitarios del m³ de HCR y del m² del paramento de aguas arriba. Para ello se han considerado dosificaciones medias del hormigón en cada caso, costes típicos de los conglomerantes, de los áridos, de la ejecución e impermeabilización de las juntas transversales, de los paramentos encofrados, del hormigón convencional empleado en paramentos, del HCR enriquecido con lechada también empleado actualmente con frecuencia en los paramentos, de los morteros u hormi-

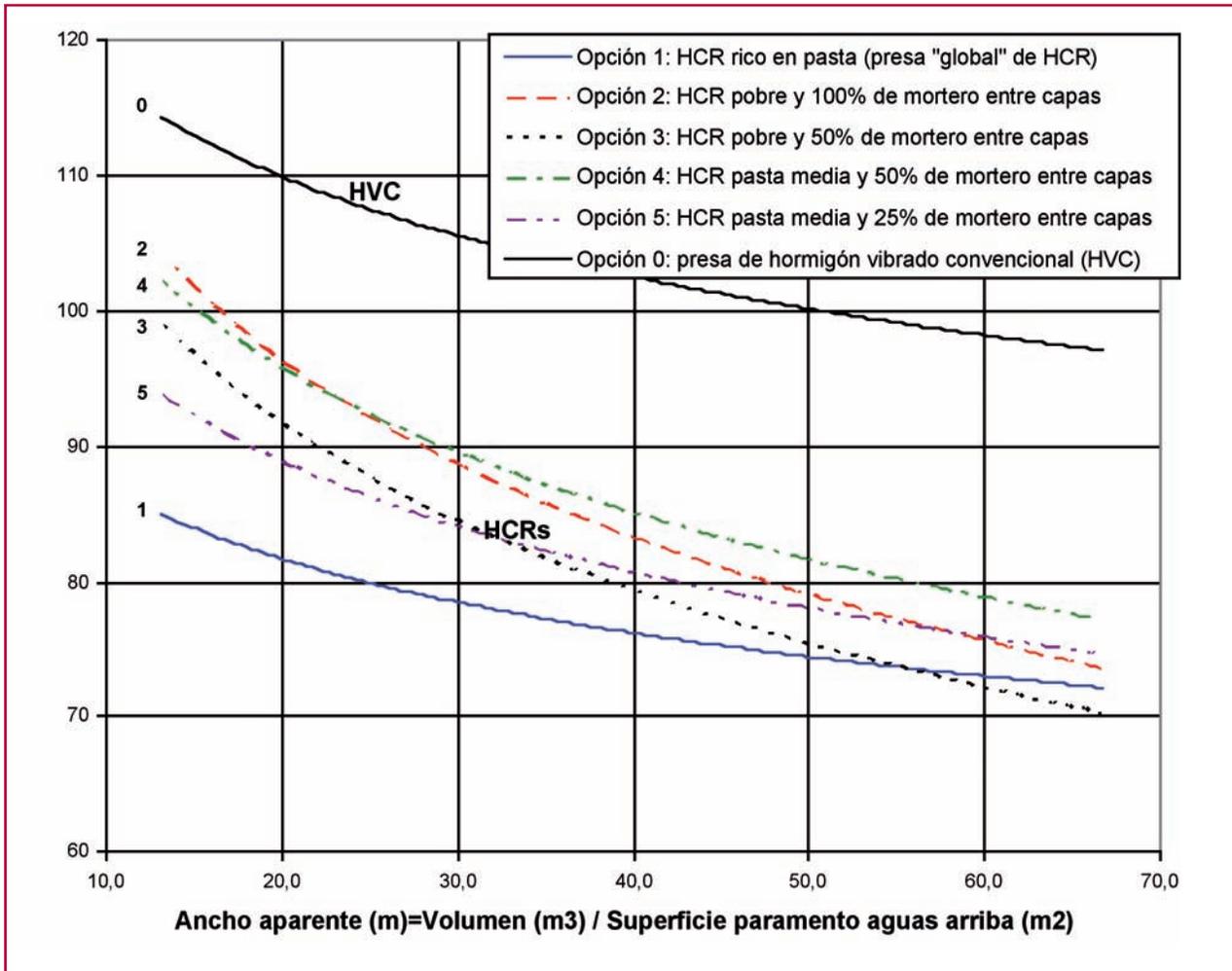


Fig. 5. Comparación del Coste Unitario de las Presas de HCR.

gones 'finos' empleados de una manera más o menos extensa en algunas presas de HCR como mezclas de asiento entre capas de HCR, de las membranas de impermeabilización, etc.

También hemos estimado la incidencia del coste indirecto en el coste del HCR como una función del volumen de la presa y del plazo de ejecución. El coste total unitario de la presa de HCR, como suma de los respectivos costes directo e indirecto, se ha aplicado a una gama amplia de tamaños de presas, entre 50 a 200 metros de altura y entre 200 a 800 metros de longitud de coronación. Los resultados se muestran en la fig. 5.

Como unidad de referencia se ha escogido el ancho aparente de la presa expresado en metros, que se calcula como el cociente entre el volumen de hormigón y la superficie del paramento de aguas arriba. Entre las posibles combinaciones distintas para ejecutar tanto el paramento de la presa como el hormigón

del interior se han escogido aquellas que se han empleado más frecuentemente. La opción 1 corresponde a las presas "globales" de HCR y las opciones 2 a 5 definen distintas posibilidades de presas "compuestas". A título orientativo también hemos incluido la curva correspondiente a las presas de hormigón vibrado convencional (Opción 0).

Como se puede apreciar la solución de presa "global" de HCR es en general la más económica. Tan solo para el caso de presas de gran tamaño con ancho aparente mayor a 50 metros (es decir presas con un volumen superior a unos 4,0 millones de m³) los costes de las distintas soluciones se aproximan entre sí. El coste de la presa de HCR es hasta un 25% mas bajo que el de la presa de hormigón convencional. Evidentemente esta conclusión es válida en términos relativos al comparar coste de soluciones que se han estimado sobre la misma base de coste unitario de los recursos y considerando en todos los casos un diseño

optimizado y un nivel similar de gestión y calidad de dichos recursos. En cada caso concreto, para cada proyecto y condiciones del país donde se realice, se debe analizar el valor absoluto de este coste unitario. Los valores del coste unitario del HCR aquí indicados pueden emplearse como referencia en estimaciones previas y estudios de viabilidad. No obstante, los estudios de proyecto más avanzados deben ser objeto de un análisis más pormenorizado.

Como conclusión práctica destacamos que en aquellos casos en los que exista la posibilidad de incorporar una cantidad importante de cenizas volantes o puzolanas naturales como sustitución del cemento Portland y a un precio razonable (que es el caso habitual en España y en la mayor parte del mundo) el coste de la solución de presa de HCR de alta pasta, es decir, la presa "global" de HCR, es la solución de menor plazo y de menor coste. Tal como se ha demostrado en muchos casos tanto a nivel nacional como internacional, si se diseñan bien y se ejecutan bien este tipo de presas, la calidad final es similar a la de las presas de hormigón vibrado tradicional.

4. Resumen general. Informe del Ponente General

Fue Ponente General de la Q.84 B. P. MACHADO (Brasil). A continuación se resume lo tratado por el Ponente en su Informe General.

4.1. Aspectos generales que afectan al ahorro y la innovación

Los diseños conservadores de una estructura como es el caso de una presa, están generalmente ligados a dar soluciones que ya han sido construidas anteriormente con éxito un número importante de veces. Las innovaciones están frecuentemente asociadas a un incremento del riesgo, y a veces se ven como una disminución en la seguridad.

La principal razón para buscar innovaciones es el ahorro en recursos financieros (siempre escasos) y la obtención de beneficios lo antes posible.

El trabajo de los ingenieros civiles de presas es diferente al desarrollado en los procesos industriales, principalmente porque el trabajo es único en relación al emplazamiento, entorno y época en que se construye la presa. Adicionalmente la construcción de una presa normalmente implica riesgos

potenciales y un capital importante para su financiación.

Los avances en los diseños de presas resultan de la combinación del análisis teórico y de la experiencia, todo ello unido a un extenso conocimiento del comportamiento de los materiales de construcción.

Los modelos matemáticos empleando potentes ordenadores han permitido un avance sustancial en el análisis teórico de las soluciones aportadas por la ingeniería de presas. De cualquier manera estas soluciones dependen de la posibilidad de modelizar el comportamiento de los materiales, y en algunos casos esto solo se puede hacer de manera aproximada por lo que de no realizarse con cuidado puede llevar a situaciones peligrosas. El juicio ingenieril y la experiencia son todavía las bases fundamentales en las que se debe basar la innovación y los avances en el campo de la ingeniería de presas.

4.1.1. El papel del ingeniero consultor

Las soluciones eficientes las aportan los ingenieros competentes con su dedicación al proyecto como consultores. Su labor más importante es la realización de los proyectos, que incluyen, además de planos y cálculos, la investigación del emplazamiento de la presa, definición de parámetros de comportamiento, y las especificaciones que serán usadas por los constructores y proveedores para definir los precios.

No resulta lógico elegir al Ingeniero consultor basándose solo en el precio más reducido por lo siguiente:

- El coste de los trabajos de ingeniería es insignificante en comparación con el coste total del proyecto;
- Un menor precio del trabajo de ingeniería va necesariamente a restringir el esfuerzo en la búsqueda de soluciones innovadoras y alternativas mejores;
- En general el ahorro conseguido debido a una buena solución en el proyecto compensa lo pagado por el esfuerzo del ingeniero consultor.

4.1.2. La relación entre el consultor y el constructor

Para conseguir ahorro en costes el proyecto básico debe permitir al constructor flexibilidad para pro-

poner la planificación de los trabajos que mejor se ajuste a sus recursos y medios.

Las especificaciones se deben concentrar en definir la calidad del producto final en términos de seguridad y desarrollo, además de establecer como debe realizarse cada fase de los trabajos.

La asociación de un proyectista y un constructor para la preparación de un proyecto de construcción es un factor importante que favorece soluciones económicas, preservando la calidad técnica del trabajo. Este aspecto se trata ampliamente en varias ponencias en la Q.84.

4.1.3. Formatos del contrato

Recientemente ha habido importantes cambios en los formatos de los contratos de construcción de presas, con la aparición de las partidas alzadas y contratos "llave en mano" de precio fijo.

Estos contratos se han originado fundamentalmente por la creciente aparición de agentes privados en el desarrollo de los proyectos de presas, sin contar con financiación y garantías estatales, y algunas veces basados en los denominados Project Finance, donde la recuperación de la inversión se realiza mediante los beneficios obtenidos por el proyecto en su explotación.

Estos modelos requieren dejar muy bien definidas las responsabilidades por los riesgos asumidos en el contrato, y un firme compromiso de todas las partes involucradas en conseguir los objetivos técnicos y económicos deseados, imponiendo importantes penalizaciones para los incumplimientos. La mitigación de riesgos requiere una provisión de costes. Si los riesgos son desproporcionados para la capacidad de las partes, el incremento substancial en el coste del proyecto puede, en muchos casos, compensarse con una optimización técnica.

Los contratos EPC son criticados a veces alegando que la colaboración entre el ingeniero y el constructor puede ser eficiente pero puede conllevar una menor calidad en el producto construido. De cualquier manera se pueden neutralizar estos riesgos con fuertes penalizaciones para las actuaciones fallidas, empleando un ingeniero de la propiedad para el control durante el desarrollo de los trabajos y empleando a un grupo de asesores para revisar y consensuar el desarrollo técnico de los trabajos.

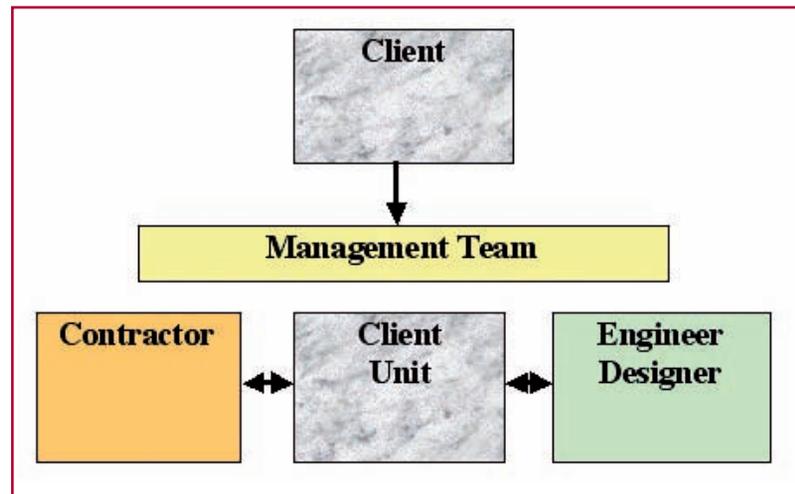


Fig. 6. Formato de Contrato.

4.1.4. Conclusiones generales sobre la relación del proyecto con el ahorro y la innovación

- La formulación inicial de un proyecto básico de diseño, desarrollado con tiempo y recursos suficiente por ingenieros competentes, incluyendo un programa de investigación del emplazamiento de la presa, es un requisito esencial para llegar a una solución económica.
- La cooperación entre el ingeniero proyectista y el constructor desarrollando soluciones innovadoras resulta efectivo y es un tema tratado ampliamente en las ponencias.
- La formulación de especificaciones para la construcción debe centrarse en la seguridad y desarrollo de la obras y evitar la tentación de enseñar al constructor como construir la estructuras.
- Los contratos EPC en los que el ingeniero y el constructor se sientan del mismo lado de la mesa de negociación resultan efectivos para el desarrollo de soluciones innovadoras y económicas, pero deben contar con la inclusión del ingeniero de la propiedad y un grupo de expertos para la revisión y control de los trabajos.

4.2. Problemática en tiempo y coste en el diseño del desvío del río

Se recibieron 24 ponencias que bien de forma directa o indirecta trataban el tema del desvío del río durante la construcción de una presa. El Ponente General hace un repaso de las aportaciones recibidas, tratando tanto las prácticas habituales en el diseño y construcción de los desvíos, las innovaciones introdu-

cidas por diversos autores, y las distintas formas en que el desvío del río afectó a la planificación y construcción de la presa.

4.2.1. Aspectos generales

Los trabajos de desvío del río afectan al tiempo y coste del proyecto fundamentalmente por las siguientes razones:

- El propio coste de los trabajos de desvío;
- El tiempo requerido para la construcción y su impacto en la planificación de la obra.
- El tiempo y coste requerido para reparar o reconstruir las estructuras afectadas por avenidas imprevistas que pueden suponer la destrucción parcial o total de los trabajos en ejecución.

Estos tres factores están interrelacionados. El factor clave para la definición de un desvío del río es la selección de la avenida de proyecto, definida como la máxima avenida que se espera durante el tiempo que el río se encuentre desviado, y que es el caudal para el que se han proyectado las estructuras del desvío.

4.2.2. Selección de la avenida de proyecto durante la construcción

La selección de la avenida de proyecto durante la construcción de la presa es un tema profundamente estudiado y que ha sido objeto de atención de ICOLD en numerosas ocasiones. (Boletines 48 y 125).

La selección de la avenida de proyecto durante la construcción es la decisión más importante durante esta fase, ya que está directamente relacionada con el riesgo, y tiene un impacto directo en los costes y en el adelanto de la programación de la obra.

Actualmente la elección de la avenida de proyecto se realiza mediante métodos probabilísticos, teniendo en consideración lo siguiente:

- El tipo de estructuras del proyecto
- El planning de construcción;
- Los daños potenciales en la obra y afecciones aguas abajo.

La elección de la avenida considerando exclusivamente los factores anteriores puede resultar subjetiva, ya que resulta adecuado tener en cuenta igualmente la experiencia local con avenidas anteriores, la legis-



Fig. 7. Desvío del río. Presa de Salto Caxias en Brasil.

lación medioambiental, y las regulación que en muchos países existe a la hora de seleccionar los valores para las avenidas.

La mayoría de las ponencias presentadas seleccionan la avenida de proyecto utilizando métodos probabilísticos y definiendo períodos de retorno (T). En algún caso se ha optado por considerar la avenida atendiendo a la máxima histórica acontecida en el emplazamiento.

Los valores seleccionados para los caudales de avenida pueden ser, y de hecho así sucede en un número importante de ponencias, diferentes según nos encontremos en una u otra fase de la obra. Durante las fases más importantes de la obra se opta por la elección de avenidas de periodo de retorno entre 10 y 50 años (si bien se presentan casos por encima de los 100 años), y para el comienzo de la obra, cuando los potenciales daños por sobrevertidos son poco importantes, se opta por avenidas entre 5 y 10 años.

Donde existe una clara estacionalidad hidrológica, las fases de la construcción se pueden establecer de manera que permitan asumir el riesgo de sobrevertido de forma progresiva. Esto significa evaluar las avenidas de acuerdo a las estaciones, y definir una avenida para época seca y otra para época húmeda, asumiendo pequeños riesgos según se va incrementando la altura de la presa y la construcción entra en la época húmeda.

4.2.3. El problema de ríos muy largos

La selección de la avenida a considerar en el caso de ríos muy largos (Latino América y Asia) requiere

una especial atención, ya que un fallo en su elección puede conducir a consecuencias tanto económicas como sociales dramáticas. En estos casos se debe analizar con especial cuidado la evaluación de los riesgos por sobrevertidos y el esfuerzo para producir ahorro en costes en la obra.

En las ponencias presentadas relacionadas con ríos importantes, las avenidas consideradas para la construcción manejan valores entre 5.000, y más de 50.000 m³/s.

Dos casos interesantes ilustran el hecho de que pueden aparecer durante la construcción de la presa caudales muy superiores que los valores asumidos, y en el momento más insospechado: Aguamilpa, en Mexico y Tucuruí, en Brasil, donde una avenida de 68.400 m³/s superó a la de diseño de 51.000 m³/s (T= 25 años) .

4.2.4. Estrategias para definir estructuras de desvío

La definición de la ataguía de desvío esta intrínsecamente relacionada con la formulación del esquema general del proyecto. Esto es especialmente cierto para ríos muy largos, como en el caso presentado de Caruachi y Tocoma, (Venezuela), donde las características del desvío del río condicionaron de forma importante el proyecto de la presa.

La influencia de los dispositivos de desvío en el proyecto y planificación de la obra se hace especialmente patente en casos de presas en cerradas estrechas, válidas como emplazamiento para la presa, pero complicadas en determinados casos a la hora de permitir dispositivos con capacidad suficiente de desvío. Esta situación obliga algunas veces a mover el eje de la presa a una sección más ancha para permitir situar los elementos de desvío.

En otros casos, como se puede ver en alguna ponencia, el desvío del río puede llegar a imponer el tipo de presa entre dos soluciones válidas. Las presa de hormigón pueden aguantar sobrevertidos mejor que las de materiales sueltos, y las previsiones para el desvío pueden ser más reducidas a igualdad de riesgo.

La solución, ya mencionada anteriormente, de utilizar avenidas estacionales para dimensionar las estructuras de desvío, requiere seguir estrictamente la programación de la obra. En estos casos la aparición de problemas en la construcción que supongan retrasos sobre lo planificado puede generar incrementos importantes de coste.

4.2.5. Control de avenidas en el emplazamiento

En distintas ponencias se refleja la tendencia cada vez más extendida en determinados casos de diseño del desvío del río permitiendo el sobrevertido en ciertas fases de la obra. Esta decisión dependerá de la confianza del proyectista en la capacidad de que la obra en construcción pueda soportar esa situación, que si bien puede resultar útil para presa de fábrica, esta siendo usado en algunos casos de presas de materiales sueltos. Un ejemplo importante es el de la presa de escollera TSQ-1 en China que fue sobrepasada por una avenida de 1.290 m³/s durante la construcción, sin producir daños.

Otro tipo de dispositivos utilizados permiten inundar el área de construcción previamente al paso de una avenida que pueda producir sobrevertidos importantes, y se utilizan habitualmente cuando se espera dicha situación. Se emplea para ello aliviaderos fusibles, siguiendo los criterios de su primera aplicación en Xingo, Brasil. Otro caso interesante descrito en las ponencias es el de Aguamilpa, en Mexico.

4.2.6. Diseños simplificados

A parte de las ataguías como dispositivo para el control del desvío del río, en distintas ponencias se presentan otro tipo de diseños simplificado para dicho fin;

- Túneles de desvío: En el caso de valles relativamente estrechos la utilización de túneles de desvío es practica habitual. Un tema controvertido es el tipo revestimiento de los mismos, ya que normalmente deben soportar velocidades importantes. Los túneles revestidos mejoran las condiciones hidráulicas y la estabilidad, y dan lugar a ataguías más pequeñas pero implican mayores costes y retrasos en la planificación del desvío. Se debe realizar un análisis económico que tenga en cuenta el riesgo de obturación del túnel por desprendimientos, que puede tener consecuencia peores que el sobrevertido por una ataguía.
- Ataguía incorporada la presa principal: una práctica común en presa con núcleo. El caso de ataguías de hormigón incorporadas a presas de materiales sueltos con pantalla de hormigón aguas arriba se presenta en alguna ponencia, pero están dando lugar a otros problemas.

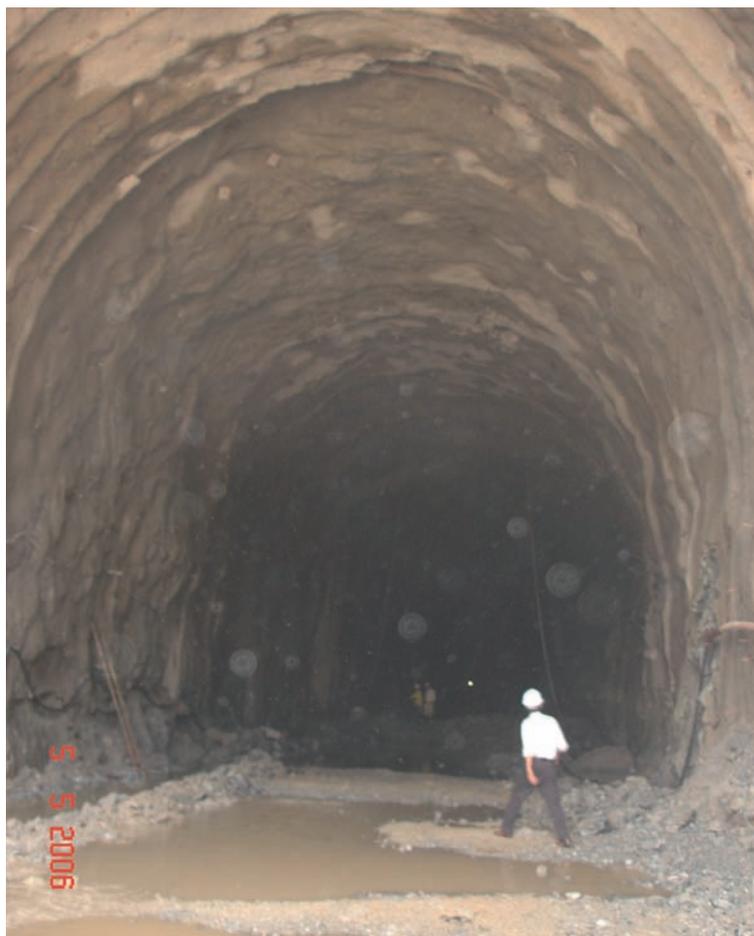


Fig. 8. Túnel de desvío, Presa de Cue Dat en Vietnam.

4.3. Diseño y tratamientos de cimiento

El comportamiento del cimiento de una presa, a grandes rasgos, debe ser por una parte el adecuado para soportar a la estructura, y por otro debe ser tal que conlleve un control de las filtraciones que se pudieran producir por la diferencia de nivel de agua originado por el llenado del embalse. Debe esperarse que tanto el control de las filtraciones como la deformabilidad del cimiento permanezcan estables a lo largo de la vida del proyecto.

Quizás más que en otras áreas de la ingeniería de presas, las decisiones de diseño relativas a la cimentación de la presa se toman asumiendo que tienen un cierto grado de incertidumbre, y para evitar posibles riesgos se deben tener presentes medidas de precaución adicionales y los costes que de ello se deriven.

Las incertidumbres son debidas a deficiencias en el conocimiento de las características de la cimentación, ya que los trabajos de exploración solo garanti-

zan un conocimiento adecuado en los puntos donde se han llevado a cabo los ensayos.

Esto significa que un primer y fundamental factor que influye en la posible reducción de incertidumbres y costes es la ampliación y adecuado diseño del programa de investigación del cimiento.

4.3.1. Riesgo geológico e investigaciones

Algunos de las ponencias de la Q.84 tratan sobre la extensión e interpretación de las investigaciones llevadas a cabo en las cimentaciones de distintos proyectos. Solamente una de las ponencias relaciona la repercusión de una insuficiente o inadecuada investigación, en el coste y planificación de la obra.

La necesidad de una amplia investigación del emplazamiento se ha tratado en varios congresos y simposiums de ICOLD, pero pocas veces se ha analizado ampliamente la relación entre la investigación y el riesgo geológico. Pocas ponencias tratan el tema de la influencia de los trabajos de investigación del emplazamiento en los costes estimados.

A pesar de lo anterior, el ingeniero de presas tiene claro que es fundamental una extensa y global investigación del emplazamiento durante el proyecto básico para estimar el riesgo geológico, aunque no se alcance nunca el punto ideal. De no ser así, existen muchos ejemplos de posteriores sorpresas durante la construcción que han generado importantes sobrecostes y retrasos.

Este es un tema controvertido, y quien asume la responsabilidad geológica deberá aumentar las contingencias en su presupuesto y por tanto en el coste total del proyecto. Para estos casos resulta difícil contar con seguros.

La cantidad correcta a destinar para las contingencias geológicas es difícil de establecer. Si al contratista se le obliga a asumir el riesgo geológico y su presupuesto de contingencias no es suficiente, seguramente aparecerán posteriores reclamaciones.

4.3.2. Soluciones para el proyecto

24 ponencias de la Q.84 tratan de trabajos en la cimentación de las presas, muchos de ellos tratando problemas específicos y soluciones aportadas en distintos proyectos.

- Cinco de ellos describen criterios y aspectos generales sobre tratamientos en cimientos rocosos.

Q.84. Soluciones técnicas para reducir en tiempo y coste el proyecto y construcción de presas

- Dos tratan sobre el análisis de los cimientos rocosos y presa arco.
- Seis sobre tratamientos del cimiento para presa de gravedad.
- Seis tratan sobre cimientos de presas de escollera.

En la mayoría de las ponencias sobre el tema, el diseño y tratamiento de las cimentaciones es un tema que preocupa más por su implicación en la seguridad de la presa que por el ahorro en costes, lo que resulta lógico dadas las consecuencias que un fallo en el cimiento puede producir.

4.3.3. Tratamientos del cimiento. Pantallas de inyección

Los conceptos y métodos para llevar a cabo tratamientos en un cimiento son temas ampliamente tratados y que han dado lugar a opiniones diferentes y muchas veces confrontadas entre los profesionales. Esta circunstancia se observa en varias de las ponencias presentadas, donde se aprecian diferentes puntos de vista a la hora de llevar a cabo el tratamiento de un cimiento.

En general, el tratamiento de la cimentación de una presa se realiza con alguna de los dos propósitos siguientes:

- Para crear una barrera y evitar filtraciones a través de cimientos. (Pantallas de inyección).
- Para incrementar la integridad estructural del cimiento, especialmente en su zona más superficial. (Inyecciones de consolidación).

Sobre las pantallas de inyección se presentaron 5 ponencias, donde se trataba sobre su necesidad, criterios de diseño y principales características. Estos puntos afectarán evidentemente al presupuesto y planificación del proyecto.

Tradicionalmente se establece la necesidad de la pantalla en función de la permeabilidad estimada del cimiento.

Tanto su necesidad como su extensión se determinarán de acuerdo a los resultados de las pruebas de presión de agua en taladros (WPT) expresados generalmente en unidades Lugeon.

Críticos como el Profesor Ewert indican que hay casos en que estos parámetros falsamente indican la necesidad de una pantalla sobrecargando el presupuesto y el tiempo para completar el proyecto. Otras



Fig. 9. Construcción del plinto en cimentación deformable. Presa de Itapebi en Brasil.

ponencias igualmente cuestionan la validez de las pruebas Lugeon para indicar los parámetros de permeabilidad y sustentar decisiones de proyecto.

En muchas de las ponencias se tratan otros métodos de inyección, como la técnica GIN desarrollada por Lombardi y Deere. Generalmente se refieren evaluar la eficiencia como control de la permeabilidad. Se ilustra el método con ejemplos específicos.

4.3.4. Casos específicos de distintos cimientos

El trabajo de tratamientos del cimiento es un área abierta de alguna manera a la "creatividad" del ingeniero, permitiendo explorar soluciones innovadoras. Pero hay que tener en cuenta que en el caso de presas de hormigón y de acuerdo a las estadísticas, la principal causa de rotura se produce debido al colapso del cimiento. Esto limita la utilización de soluciones heterodoxas. De cualquier manera son posibles soluciones no convencionales pero realistas, basadas en el juicio del ingeniero y en un amplio conocimiento de las características del emplazamiento.

Para el caso de cimientos complicados es necesario recurrir a herramientas analíticas complejas de análisis del cimiento, que permitan conocer mejor la interacción presa- cimiento.

Las ponencias presentadas abarcan descripciones específicas de casos de distintos cimientos. Los de

presas de hormigón se tratan en varias ponencias (Tannur en Argelia, Ribairadio en Portugal, Saluda en USA...) tratándose métodos de proyecto y procedimientos para obtener ahorros en costes, sin olvidar que la solución sea segura. El uso de modelos matemáticos se menciona en casos asociados a la consideración de acciones sísmicas.

Los cimientos de presa de materiales sueltos, tanto de núcleo como de pantalla aguas arriba (CFR) se tratan en varias ponencias (Salva Faccha en Ecuador, Kannaviou en Chipre...). Igualmente el criterio para la determinación de la anchura del plinto en la presa de CFR se analiza en varios trabajos.

4.4. Secciones y materiales en presas

Las ponencias tratando los temas de la tipología de presas y las innovaciones en secciones de presas y sus materiales centraron un número importante de los trabajos presentados. Concretamente 52 de las 91 ponencias recibidas para la Q.84.

La distribución por tipologías de estas 52 ponencias fue la siguiente:

- 18 sobre presas de hormigón compactado (RCC) y hardfill;
- 12 sobre presas de tierras y escollera con núcleo terreo;
- 9 sobre presas de pantalla aguas arriba de hormigón;
- 9 sobre presas de hormigón convencional;
- 7 de otros tipos o de topologías no convencionales.

No se presentaron ponencias sobre presas con pantalla o núcleo asfáltico, una tipología de presa frecuentemente utilizada y que esta sufriendo una rápida evolución.

Del conjunto de ponencias y como criterio general a la hora de determinar la tipología de presa, se concluye que la presa se debe adecuar al emplazamiento y no al revés. Para definir cuál es la mejor solución, debe considerarse primeramente el aspecto económico, de manera que este pueda ser definitorio a la hora de seleccionar la tipología de presa, siempre que la estructura a la que dé lugar mantenga las condiciones de eficacia y seguridad esperadas.

4.4.1. Presas RCC

(Presas de hormigón compactado con rodillo)

Las presas de RCC han experimentado una evolución profunda desde su aparición hace aproximadamente 35 años. Estas presas están alcanzando alturas de más de 200 m y siguen por tanto a las presas de hormigón convencional y presas arco. En China se están proyectando actualmente presas arco de doble curvatura en la tipología RCC.

La innovación en las presas de RCC afecta fundamentalmente a los métodos constructivos utilizados, aportando rapidez y continuidad en la construcción. Estos factores inciden directamente en el coste y planificación de las obras.

En la actualidad hay distintas aproximaciones y "escuelas" en relación al proyecto y construcción de presas de RCC, tratando y aportando criterios sobre aspectos como la proporción y calidad de los componentes del hormigón, la optimización en el espesor de las tongadas, las características de los elementos de unión entre tongadas, los métodos de construcción de juntas verticales, el uso de hormigón convencional sobre cimiento, la utilización de elementos impermeables aguas arriba de la presa así como los distintos métodos para producir, transportar y compactar el hormigón.

Las ponencias sobre presas RCC reflejan la diversidad y el esfuerzo conjunto que están realizando los ingenieros de distintos países con el fin de obtener ahorro en coste y una construcción más rápida.

4.4.2. Presas de "Hard-Fill"

La tipología de presa Hard-Fill, conocida también como FSHD, (face symmetrical hardfill dam), corresponde a una presa diseñada con un núcleo central de áridos enriquecidos con cemento, a la que se pueden añadir zonas externas delgadas de RCC, complementado todo ello con un elemento impermeable aguas arriba que garantiza la estanqueidad.

Esta tipología de presa, originada en un artículo de Londe y Lino de 1991, se ha construido con éxito en un número importante de países, alcanzando en algún caso alturas superiores a los 100m.

Tres de las ponencias presentadas tratan este tipo de presas, aportando criterios para el proyecto y realizando un análisis económico de las ventajas (menor contenido de cemento, ausencia de juntas de contracción, etc.) y desventajas (incremento en volumen

de material para una misma altura de presa) con respecto a otras tipologías.

4.4.3. Presas CFR

(Presas de materiales sueltos con pantalla de hormigón)

Las presas de materiales sueltos con pantalla de hormigón es otra tipología de presa que en los últimos años, concretamente desde los años 60, ha experimentado un vertiginoso desarrollo, alcanzándose alturas superiores a los 200 m (Shuibuya en China con 230 m).

Junto al incremento continuo en la altura de estas presas, se ha evolucionado igualmente en otros aspectos de su diseño y proceso constructivo, que han proporcionado importantes ahorros en costes y tiempos de construcción.

El avance alcanzado en las presas de pantalla de hormigón se ha conseguido basándose más en la experiencia que en la realización de modelos matemáticos, si bien un número considerable de organizaciones e ingenieros especialistas en este tipo de presas han colaborado en esta evolución, simulando el comportamiento de los distintos materiales, del cimiento y de los procesos constructivo. Estos modelos, alimentados con un número importante de parámetros, deben tratarse con precaución a la hora de proyectar la presa.

En general el aspecto más importante que afecta al coste y la planificación es la construcción del cuerpo de escollera de la presa, lo que implica la zonificación de la presa y el uso, a ser posible, de los materiales disponibles. La zonificación se refiere a la calidad de la roca y a los métodos para su colocación y compactación.

Se han conseguido rendimientos altos en la construcción de este tipo de presas y se describen en las ponencias presentadas sobre el tema (1 millón de metros cúbicos/mes en las presas de Campos Novos y Machaditos en Brasil).

En este tipo de presas la construcción del plinto en la zona del cauce se diseña en coordinación con el desvío del río y es crítico para conseguir una programación optimizada de la obra. Se utiliza a veces un bloque de hormigón soportando el plinto, en el fondo de los valles estrechos, pero esto puede afectar a la junta perimetral debido al brusco cambio en la rigidez de la base de apoyo.

El diseño de la losa de apoyo del plinto ha evolucionado basándose en la experiencia. Nelson Pinto en su ponencia aporta nueva información sobre un



Fig. 10. Presa de CFR de Campos Novos en Brasil.

comportamiento inesperado de la deformación de la losa, observado en presas de gran altura.

4.4.4. Presas de tierras y de materiales sueltos con núcleo terreo

Las presas de tierras y las de escollera con núcleo impermeable de tierras son los tipos más habituales dentro de las presas de materiales sueltos. Su elección para el diseño se realiza especialmente en caso de disponer de material y técnicas locales para su construcción. Abarca desde presas de pequeña altura, hasta presas importantes, (Nurek con 300m), que desplazan a presas de hormigón no viables por falta de rigidez de la cimentación.

En este tipo de presas, en general, los dos aspectos que determina el ahorro en costes y la correcta planificación de la obra, son, por una parte la disponibilidad de materiales y por otra la necesidad de contar con una climatología adecuada que permita la compactación del elemento impermeable.

Las ponencias presentadas tratan de proyectos específicos que se están diseñando o construyendo a lo largo del mundo, con soluciones técnicas que asumen la necesidad de aportar diferentes variantes al proyecto de acuerdo a las características específicas de cada emplazamiento.

Las presas de materiales sueltos de tamaño pequeño o mediano son estructuras muy flexibles que se pueden proyectar de maneras distintas. En varios trabajos se trata la adaptación del proyecto a los recursos del constructor y los posibles cambios del proyecto tras de la adjudicación de la obra.

En el caso de presa de núcleo de arcilla con alturas importantes, donde se alcanzan altos rendimientos en la construcción, es necesario anticiparse al futuro comportamiento de la estructura, analizando sus posibles deformaciones y las interacciones entre el núcleo y espaldones que puedan dar lugar a asentamientos diferenciales o rotura del núcleo. El único trabajo presentado de una presa de núcleo de arcilla de cierta altura es la Itapé en Brasil, que tiene 208 m.

El resto de ponencias se centran en el diseño de la presa en relación con el desarrollo general de los trabajos, planificación de la construcción para conseguir acortar plazos, altos rendimientos en presas de escollera, problemas de proyecto en valles estrechos y calidad de la escollera entre otros.

De los trabajos presentados se desprende que un plan de trabajos optimizado, basado en una detallada planificación de la construcción, y una estrecha colaboración entre proyectista y constructor producen óptimos resultados.

4.4.5. Presas de hormigón convencional

De los nueve trabajos presentados de presa de hormigón convencional, seis se refieren a presas arco. Las otras tres a estructuras asociadas con la presa, como túneles y aliviaderos.

En términos económicos estas presas no pueden competir con las de hormigón compactado, a no ser que resulten volúmenes inferiores a los de RCC, o bien impliquen alturas elevadas y de momento no alcanzadas por la tecnología de RCC.

De los 6 trabajos sobre presas arco, dos tratan sobre su método de cálculo, 2 sobre su adaptación en condiciones especiales del emplazamiento, y una describe los estudios iniciales para la construcción de una presa superior a 300 m de altura.

Los factores que afectan al ahorro en este tipo de presas están fundamentalmente asociados a los métodos constructivos y equipos empleados, dependiendo de las características del emplazamiento

4.4.6. Otros tipos de estructuras

En una ponencia se trata sobre presas de escollera impermeabilizadas con una membrana plástica. Este tipo de recubrimiento se utiliza más frecuentemente en presas de hormigón, y para presas de escollera, aunque se use en algún caso, se cuestiona su uso de-

bido a la posibilidad de que rompa o sufra daños con grandes cargas de agua o en el contacto con el cimiento rígido por estiramiento. De cualquier manera se está progresando técnicamente y su uso se está incrementando.

Dos ponencias tratan sobre recrecimiento de presas de tierra añadiendo muros en la coronación de la presa existente. Otro trata sobre el recrecimiento dotando a la presa de taludes más verticales estabilizados por suelo cemento o geomembranas.

En general las ponencias describen gran variedad de soluciones posibles a aplicar en presas de pequeña y mediana altura de manera que supongan un ahorro en costes y en rapidez de construcción.

4.5. Ahorro en diseño y mejora de aliviaderos

Los aliviaderos representan una parte importante del coste de un proyecto, y reducir su presupuesto constituye en algunos casos una tentación para el proyectista. Esto es aceptable siempre que no suponga una pérdida de seguridad, por lo que una reducción en el coste del aliviadero se debe evaluar cuidadosamente para no se haga a costa de su seguridad. El verdadero coste de un aliviadero es complicado de determinar, ya que está ligado al conjunto del proyecto.

Las estrategias para ahorrar en el diseño del aliviadero se basan fundamentalmente en la elección de las avenidas a tener en cuenta, el uso de distintos dispositivos para conducir el agua sobre o a través de la presa, así como distintas maneras de controlar la energía aguas abajo.

4.5.1. El Caudal de diseño del aliviadero

El criterio utilizado para la selección del caudal de diseño es un factor clave que afecta al impacto económico del aliviadero en el coste total del proyecto. Generalmente entendemos caudal de diseño como el máximo caudal que se puede aliviar en la presa sin comprometer su seguridad. En muchos proyectos se considera un caudal superior al de diseño, denominado caudal extremo, que es el máximo admisible, que en caso de producirse puede incluso producir daños en la estructura, tolerándose en estos casos incumplir con las normas de explotación habituales en la presa.

En la discusión sobre el riesgo de una avenida y la eficiencia del aliviadero, un punto importante es la



Fig. 11.
Aliviadero sobre
presa de CFR.
Presa de Crotty
en Tasmania.

magnitud de la avenida que se quiere considerar. En Suramérica y China hay aliviaderos en funcionamiento proyectados para caudales de más de 100.000 m³/s (Tucurui, Gezhouba) y en una de las ponencias presentadas se indica que en un proyecto en India se ha realizado un diseño para 170.000 m³/s (PMF), quizás el mayor valor considerado nunca para una avenida. En general muchos otros aliviaderos en dichos continentes están siendo construidos o proyectados para caudales superiores a 50.000 m³/s.

Para la determinación de las avenidas a considerar en el proyecto del aliviadero, generalmente se utiliza lo siguiente:

- El Periodo de retorno (T) para distintos caudales punta.
- El volumen de la avenida asociado con dichos caudales punta.
- La PMF, entendida como avenida máxima posible en el emplazamiento.

Teniendo en cuenta la limitación de datos utilizados para el cálculo de las avenidas, la posible variación física de la cuenca y la limitación de los métodos de cálculo, la selección de la avenida para el cálculo

del aliviadero debe tratarse anteponiendo la seguridad al coste, sin que esto signifique que no se pueda realizar una optimización económica de los mismos.

Para cuencas pequeñas y lugares aislados se utiliza el balance económico entre costes de la inversión y coste de los daños.

4.5.2. Localización del aliviadero

La optimización de la situación del aliviadero depende del proyecto total, tipo y altura de la presa y características del emplazamiento.

Para presa de hormigón su localización habitual es sobre la presa o lateral. Esto puede interferir con la localización de centrales a pie de presa, para lo que se presentan distintas soluciones en distintas ponencias.

Para presas de materiales sueltos a modo de regla el aliviadero se encuentra separado de la presa y construido en uno de sus estribos, tan cercano de la presa como se pueda para acortar su longitud y optimizar el movimiento de tierras y su aprovechamiento como material del cuerpo de presa. Esto se describe en varias ponencias, pero dependiendo de las características específicas del emplazamiento se puede llegar a otras soluciones.

Fig. 12.
Aliviadero en
Laberinto Presa
de Maguga En
Sudáfrica.



En algunos casos situando el aliviadero y tomas en una zona cercana, se concentran los trabajos de hormigonado y puede suponer un importante ahorro en costes.

La situación del aliviadero sobre la presa de materiales sueltos es todavía hoy una innovación y una práctica controvertida. La Presa de materiales sueltos con pantalla de hormigón de Crotty en Tasmania es un caso pionero. La de Tongbai en China, es otro caso similar. M' Dez en Marruecos es otro caso en fase de diseño actualmente. Esta solución puede ser aplicada solamente para caudales específicos poco importantes, de $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ o menos, y requiere cuidados estructurales especiales.

4.5.3. Selección del tipo de aliviadero

La selección del tipo de aliviadero con menor coste depende de muchos factores, siendo el más importante en general, como ya se ha remarcado anteriormente, la magnitud de la avenida a considerar.

Los aliviaderos en lámina libre son generalmente los más seguros y simples y por lo tanto la tipología preferida, especialmente para caudales medios, pero requieren una longitud horizontal y vertical determina-

da. Los requerimientos de resguardo del aliviadero implican presas más altas y conllevan una mayor zona inundable aguas arriba, con el consiguiente incremento de costes y posibles problemas medioambientales.

Para caudales importantes se utilizan más habitualmente aliviaderos controlados por compuertas, puesto que ahorran espacio, aumentan la capacidad de vertido y han demostrado su correcto funcionamiento en instalaciones existentes. Esos aliviaderos, frente a los de lámina libre requieren de un mayor mantenimiento y control en su operación.

Los aliviaderos en presión pueden presentar ventajas económicas, lo que hace de ellos una solución muy competitiva, incluso asociados a dispositivos de desvío del río (es el caso del proyecto de Caruachi).

Para presas de hormigón de alturas medias o importantes, se suele contar con desagües intermedios como Irape en Brasil, algunas veces complementando la capacidad de aliviadero o permitiendo embalsar agua incluso antes de terminar las obras.

En todos los aliviaderos, la disipación de energía es un factor clave a considerar, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Los modelos reducidos

son importantes y de gran utilidad a la hora de diseñar estos dispositivos.

4.5.4. Estrategias para obtener ahorros en el proyecto de aliviaderos

De las ponencias presentadas se desprenden distintas maneras de obtener ahorro en costes en el proyecto de un aliviadero, destacando entre otras las siguientes.

- Dividir el aliviadero en partes separadas; Considerar caudales frecuentes y de pequeña magnitud que serán evacuados por un aliviadero para dicho rango de caudales, y complementarlo con un segundo aliviadero que aporte el resto de la capacidad del aliviadero, y que será operado menos frecuentemente y diseñado con un criterio menos estricto, particularmente si no hay riesgo de daños aguas abajo.
- Permitir que el disipador de energía en aliviaderos de superficie construidos en roca se pueda dejar sin revestimiento, especialmente si su operación es poco frecuente y no hay daños aguas abajo, como sucede en el caso de las ponencias sobre LG2 en Canadá y Xingo en Brasil.
- Para aliviaderos en presas de hormigón, con alturas medias o bajas, la división del aliviadero en dos partes, permite la operación del segundo aliviadero cuando se eleva el nivel aguas abajo, ahorrando en elementos disipadores de energía como es el caso de Burnett en Australia.
- Se presentaron en las ponencias distintos dispositivos utilizados para reducir la longitud de aliviadero:
- Aliviadero en laberinto: Proyectado para más de 15.000 m³/s (Presa de Ute, USA y Maguga Swaziland).
- Los aliviaderos P. K. es una variación de los tradicionales aliviaderos en laberinto, modificando la forma de las paredes, buscando una mayor eficiencia.
- Compuertas fusibles: Formando aliviaderos en laberinto donde sus elementos desaparecen cuando se sobrepasa un cierto caudal.

5. Conclusiones

Finalizada la sesión el presidente la Q.84, F. Lempérière, presento unas conclusiones generales, que se resumen a continuación:

5.1. Comentarios generales

- En el mundo, la media de inversiones en presas ha estado en torno a 30 billions U.S. \$ al año desde 1950. Este valor se va a mantener probablemente en el mismo orden por lo menos hasta el 2050 (Usos hidroeléctricos, control de avenidas, ...).
- En los próximos 30 años más del 80% de dichas inversiones va a producirse en países con enormes necesidades y recursos financieros limitados.
- Las condiciones físicas y económicas van a ser muy diferentes de las de los últimos 30 años. Las mejores soluciones a tomar van a ser muy diferentes.
- Hay muchas oportunidades de ahorro en costes en el proyecto de nuevas presas y mejora de las existentes.

5.2. Condiciones para el ahorro en costes

- Muchos criterios de diseño tradicionales resultan actualmente injustificados y deben ser revisados.
- Incluso para proyectistas experimentados resulta complicado seleccionar y optimizar el diseño más barato que cumpla con los adecuados criterios de seguridad. En muchos casos la colaboración con el constructor resulta importante para llegar a una solución.
- Las especificaciones para partes importantes de la presa no deben estandarizarse sino adecuarse a las condiciones locales y soluciones elegidas.
- La reducción en coste y tiempo en la fase de proyecto puede repercutir en un incremento del coste final de la obra.
- La información sobre ahorro en costes puede resultar muy útil.

5.3. Algunos criterios de diseño cuestionables

- Fórmulas simplistas para establecer el caudal de desvío.
- Elección de avenida de diseño frente a avenida extrema.
- Aliviaderos con compuertas.
- Secciones tradicionales de gravedad.
- Criterios de tratamiento de terrenos.
- Criterios de diseño para sedimentación.

5.4 Control del río durante la construcción

- Aceptar durante unas pocas semanas el sobrevertido en presas de hormigón o incluso en las partes más bajas de presa de materiales sueltos acondicionadas para ello, puede resultar menos costoso que utilizar túneles de desvío o ataguías con alturas importantes aguas arriba.
- Incluir una ataguía de R.C.C. aguas abajo en una presa de escollera puede ser beneficioso desde el punto de vista económico.
- Cuando se utilizan varios túneles de desvío, situarlos a la misma cota puede no ser la mejor solución. La situación de los túneles conviene que se trate y optimice con el constructor, y en función de las circunstancias del caso.

5.5. Presas de hormigón

- La sección transversal, especificaciones, y detalles de diseño de las presas de hormigón convencional se estandarizaron durante 50 años. Esta solución fue generalmente poco adaptada a las condiciones locales, quedando lejos de conseguir los costes más bajos posibles.
- Las condiciones de los emplazamientos para futuras presas de gravedad (especialmente R.C.C.) variarán de forma importante: cimentación, materiales disponibles, criterios sísmicos, avenidas. Las soluciones no deben estandarizarse: secciones transversales, contenido de cemento, métodos constructivos, etc.
- La característica fundamental de una presa de gravedad es el peso del hormigón. De 5.000 presas de gravedad ninguna ha fallado por la calidad resistente del hormigón.
- Reducir el coste unitario incrementando las cantidades con especificaciones menos duras frecuente-

mente es mejor que reducir volumen con especificaciones más estrictas.

5.6. Presa mixtas de hormigón y materiales sueltos

- La calidad y la reducción de asientos en presas de escollera ha favorecido el uso de hormigón (o R.C.C.) en presas de materiales sueltos, como:
 - C.F.R.D.
 - Ataguías de R.C.C.
 - Aliviaderos sobre presas de materiales sueltos.
 - Tierras o escollera aguas abajo de una sección esbelta de hormigón.
 - Muchas otras soluciones.

5.7. Aliviaderos

- Los caudales a evacuar actualmente son muy altos.
- Hay muchas soluciones nuevas que ayudan a alcanzar a un menor coste una seguridad real:
 - Optimización de la coronación en presas de materiales sueltos.
 - Aliviaderos en laberinto.
 - Aliviaderos fusibles.
 - Recubrimiento de presas de escollera.
 - Las soluciones tradicionales de aliviadero libre o controlado por compuertas no son siempre la solución más económica.

5.8. Futuros Comités de ICOLD sobre ahorro en costes

Tres días antes de la celebración del congreso en Barcelona, en la reunión ejecutiva de ICOLD se ha creado un Nuevo Comité Técnico que tratará los aspectos incluidos en la Q.84. Su nombre es "Ahorro en costes en el diseño de presas". Tiene como objetivo publicar un Boletín sobre el tema en dos años. ♦

Referencias:

- 1. ICOLD General Report Q84. Brasil P. Machado (Brazil). Barcelona 2006.
- 2. ICOLD Conclusiones Q84. F. Lempérière (Francia). Barcelona 2006.
- 3. ICOLD. Boletín 73 – Savings in Dam Construction, 1973.
- 4. ICOLD Boletín 83 – Cost Impact on Future Dam Design, 1992.
- 5. ICOLD Boletín 85 – Owners, Consultants and Contractors, 1992.
- 6. ICOLD Boletín 110 – Cost Impact of Rules, Cri-

teria and Specifications, 1997..

- 7. ALONSO, E. E., OLIVELLA, S. and PINYOL N. M. (2005). "A review of Beliche Dam". Géotechnique, 55, No. 4, 267-285.
- 8. ALONSO, E. E., S. OLIVELLA, and PINYOL N. M. (2006). "Impoundment and rainfall induced deformation of rockfill dams". ICOLD-2006, Barcelona.
- 9. MARANHA DAS NEVES, E. (2002) "Some considerations about rockfill mechanics". Pacheco Silva Lecture. Soils and Rocks, v. 25, n.3: 161-203.
- 10. NAYLOR, D. J., MARANHA DAS NEVES, E., VEIGA PINTO, A. A. (1997). "A back-analysis of

- Beliche Dam". Géotechnique 47, No. 2, 221-233.
- 11. OLDECOP, L. and ALONSO, E. E. (2001). "A model for rockfill compressibility". Géotechnique 51, No. 2, 127-139.
- 12. OLDECOP, L. and ALONSO, E. E. (2003) "Suction effects on rockfill compressibility". Géotechnique. 53(2): 289-292.
- 13. OLIVELLA, S., GENS, A., CARRERA, J. ALONSO, E. E. (1996). "Numerical formulation for simulator (CODE_BRIGHT) for coupled analysis of saline media". Engineering Computations, Vol. 13, No 7, 87-112.