

PRESAS DE HORMIGON MAS ECONOMICAS TENDENCIAS ACTUALES

Dr. Ing. C. C. P. J. A. HERRERAS
SECRETARIO TECNICO

1. ANTECEDENTES

El lugar privilegiado que durante muchos años han mantenido en la construcción de presas las llamadas de fábrica, hace algún tiempo que lo han ocupado las de materiales sueltos. En Estados Unidos, por ejemplo, de las 360 presas construidas en el último trienio solamente 21 eran de hormigón. Al comentar en su editorial la prestigiosa revista *Engineering News-Record* estas cifras, pedía, en 1969, que se estudiaran métodos para hacer las presas de hormigón más económicas. La respuesta no se hizo esperar, y pronto entre U.S.C.O.L.D. (Comité Nacional norteamericano de grandes presas) y A.S.C.E. (Asociación nortécnica con este objetivo. A partir de la idea, típicamente ing Foundation Research —un organismo creado en Estados Unidos, en 1962, para investigar en campos ingenieriles— se decidiera a montar una serie de reuniones técnicas con este objetivo. A partir de la idea, típicamente norteamericana, de *time is money*, el primer seminario, celebrado en Asilomar (California) en 1970, se programó para analizar métodos adecuados para lograr que la construcción de las presas de este tipo se realizara más rápidamente. Uno de los acuerdos finales de aquella reunión fue el de celebrar otra en el mismo sitio, en 1972, sobre el tema más amplio de los procedimientos para realizar dichas presas más económicamente.

Una de las circunstancias que, sin duda, han contribuido más al éxito de las conferencias ha sido la asistencia de representantes, muy calificados, de todos los estamentos que de alguna forma tienen relación con el proyecto, construcción y explotación de una presa. Se consiguió reunir en ella no sólo a proyectistas y constructores, sino también a propietarios, investigadores, suministradores de maquinaria, profesores de Universidad, e incluso banqueros. Por otra parte, se invitó a conocidos expertos extranjeros (*) que pudieran proporcionar información de primera mano sobre el estado de la técnica en Europa y las soluciones encontradas al problema propuesto. El hecho de que la Conferencia se celebrara en régimen de internado ha animado, notablemente, los coloquios organizados entre los participantes y permitido obtener consecuencias realmente interesantes. El problema que se analiza no es, sin embargo, únicamente norteamericano, como lo demuestra el hecho de que el Tema 43 del XI Congreso, a cele-

(*) J. Torán y M. Castillo fueron invitados por el Comité Organizador precisamente para exponer los puntos de vista europeos sobre el tema.

brar en Madrid en junio 1973, de la Comisión Internacional de Grandes Presas, esté dedicado precisamente al mismo objeto. La escasez relativa de informes presentados a ella, solamente 20, se debe, en mi opinión, al tiempo realmente escaso transcurrido desde la última conferencia de Asilomar (mayo 1972) hasta el plazo límite (agosto 1972), concedido para la presentación en París de dichos informes que ha impedido realizar experiencias que confirmen las conclusiones alcanzadas.

2. OBJETIVO

La "marea" en la construcción de presas de tierra y escollera no ha llegado aún con plena fuerza a España; en efecto, de los 46 millones de m³ de hormigón colocados en todo el mundo en presas durante el período 1969-1972 más de la mitad, 25 millones, se han colocado en España. Ya en 1964 explicaba J. Torán en esta misma Revista las razones de ese aparente contrasentido en un país en el que abunda enormemente la roca. Es evidente, sin embargo, por las presas ya existentes y las muchas más de este tipo en construcción y proyecto que las presas de escollera empiezan a ganar terreno; probablemente como consecuencia de la desaparición de alguno de los motivos, disponibilidad de maquinaria adecuada, que dificultaban su eclosión. No cabe duda de que, en cualquier caso, ya sea por los mismos motivos que en Estados Unidos, disminución de la construcción de presas de fábrica, o con mayor razón aún si resulta que se siguen construyendo muchas de este tipo es muy conveniente la divulgación de las conclusiones alcanzadas en las dos conferencias mencionadas, por las sugerencias positivas que pueden producir para futuros casos. A ese fin va encaminado este artículo.

3. PLANTEAMIENTO

La participación en reuniones y coloquios de representantes de todos los campos relacionados con las presas de hormigón es natural que produjera ideas y procedimientos para abaratarlas mediante la actuación no sólo sobre el proyecto y construcción, sino sobre los propios materiales, e incluso sobre las condiciones contractuales y financieras. Por tanto, y para mayor claridad se ha dividido la exposición que sigue en cinco capítulos; cada uno de ellos incluye comentarios y propuestas relativas a un aspecto particular encuadrable, con criterio amplio, bajo un mismo

epígrafe. El hecho de que algunas de las propuestas se refieran a aspectos financieros o contractuales aplicables a las presas en general y no sólo a las de hormigón, ha motivado el que se describan en primer lugar. Las conclusiones sobre los materiales, proyecto y construcción que se relacionan después por este orden son, por el contrario, específicas para las presas de hormigón.

Es evidente que algunas de las ideas que se exponen han sido ya aplicadas en alguna ocasión en España. Se han incluido, sin embargo, porque además de no ser práctica usual aún se intenta reflejar lo más fielmente posible en el artículo las aportaciones más destacadas a dichas conferencias.

4. ASPECTOS FINANCIEROS

Una buena parte de las sugerencias que siguen no son aplicables para la construcción de presas, hoy por hoy, a los contratos con la Administración Pública, ya que pueden ser conflictivas con la ley de contratos del Estado; no obstante, se ha considerado importante detallarlas porque reflejan la experiencia de Organismos que han construido muchas presas y también porque existen propietarios particulares —las compañías hidroeléctricas hasta ahora y, con seguridad, numerosas urbanizadoras en el futuro— y administraciones extranjeras que podrían aplicarlas.

4.1. *Licitación restringida.*

La construcción de una gran presa no es tema que se pueda acometer sin una experiencia contrastada ni sin los hombres y métodos apropiados. Se considera que es mucho mejor invitar a un corto número de compañías precalificadas en función de su experiencia, equipo técnico, maquinaria, ocupación coyuntural y sanidad económica que hacer un concurso público prácticamente libre. Este procedimiento tiene, por otra parte, la ventaja indirecta de aumentar las posibilidades de los constructores precalificados de forma que aumente la calidad de las ofertas.

4.2. *Ausencia de fianzas.*

El procedimiento de selección descrito permite eliminar las fianzas con evidente ahorro para el propietario, ya que si se le pide fianza al constructor, éste incluirá en su oferta el coste del aval. En general, piensan quienes utilizan este método de selección, que una fianza tiene poco valor porque no impide el que se produzcan retrasos y la influencia económica de éstos es muy superior al importe de la fianza. Sin embargo, y con objeto de estar protegidos contra eventuales problemas financieros del constructor, el cliente retiene, en este caso, determinados porcentajes de las certificaciones.

4.3. *Interés sobre las retenciones.*

El porcentaje retenido de las certificaciones es, como se ha dicho, un seguro contra dificultades financieras imprevistas por parte del constructor. Es, sin embargo, un capital que en esencia le pertenece porque corresponde a trabajos ya realizados y, por tanto, es lógico que obtenga un interés mientras está retenido; esta partida puede llegar a ser un capital importante, que en definitiva, y si no se le reconoce, el constructor consciente habrá de incluir en su oferta con evidente perjuicio para el propietario, quien generalmente puede obtener capitales con menor coste que el constructor.

4.4. *Retenciones escalonadas.*

Manteniéndose en la misma línea de la retención como seguro es obvio que los porcentajes retenidos deben ser proporcionales a la obra que falta por ejecutar y que, por tanto, no debe esperarse hasta el final de la obra para liberarlos. Lo contrario sería considerar dichas retenciones como una fianza que ya se ha dicho, no se considera necesaria cuando se emplea el procedimiento de selección recomendado.

4.5. *Financiación inicial.*

Partiendo de la base de que los costes del dinero son, en general, un 50 por 100 más caros para el constructor que para un Organismo estatal —cifra que desciende al 20 por 100 en el caso de propietarios particulares— se comprende el ahorro que significa procurar un fondo de maniobra al constructor en las etapas iniciales de la obra cuando debe realizar cuantiosos gastos de instalación que no son, además, directamente certificables. Este adelanto debe recobrase, paulatinamente, de las certificaciones posteriores.

4.6. *Seguridad en los cobros.*

En numerosas ocasiones el constructor no tiene completa seguridad de que los cobros se van a realizar dentro de los plazos estipulados. La certidumbre que se conseguiría creando al principio del contrato una cuenta de crédito en la que se depositaran todos los fondos necesarios para la construcción, influiría sobre el porcentaje de imprevistos del constructor disminuyéndolos sustancialmente. Las cantidades no utilizadas habrán de ser invertidas de tal forma que sea posible disponer de determinadas cifras desde un preaviso de treinta días, por ejemplo.

4.7. *Cláusulas de revisión de precios.*

Todos los proyectos cuyo período de construcción especificado sea de más de dos años deberían tener cláusulas

realistas de revisión de precios, ya que el incremento anual de los costes del personal, por ejemplo, puede ser tan alto como el 12 por 100 (*).

4.8. Incentivos por adelantar la terminación.

En muchos casos la terminación de la presa y la posibilidad de embalsar antes pueden suponer sustanciales ingresos al propietario. Ofrecer bonificaciones adecuadas puede significar un importante ahorro para el constructor (**), no por los premios en sí mismos, que ciertamente gastará casi completamente en preocuparse un equipo adecuado para acabar antes, sino por el hecho de disminuir los gastos generales inherentes a tener la obra en marcha.

5. ASPECTOS CONTRACTUALES

Sobre este tema las contribuciones más importantes para lograr presas más económicas fueron aportación española, a través del Presidente J. Torán, y se centran, por una parte, en la necesidad de una estrecha colaboración entre propietario, consultor y constructor a la hora de redactar el pliego de condiciones, y, por otra, en el desglose, conforme se detalla a continuación, del contrato total en dos: uno, el de la presa propiamente dicha, y otro, el de las obras auxiliares.

5.1. Contratos desglosados.

Aunque el proyecto de una presa es una actividad que exige un tiempo determinado, normalmente largo, por la necesidad de realizar investigaciones y ensayos que no se pueden eliminar es corriente, sin embargo, que los proyectos de obras auxiliares, como son las del camino de acceso, poblados, limpieza del vaso, eventual enlace eléctrico, etcétera, se puedan realizar en mucho menos tiempo y a la vez que un proyecto previo de la presa que permita pronunciarse sobre su viabilidad económica. Esta circunstancia permite licitar, adjudicar (***) y ejecutar las obras auxiliares mientras se redacta el proyecto de construcción, obteniéndose las siguientes ventajas indudables:

- Acortar los tiempos totales desde la concepción del proyecto hasta la puesta en servicio de las instalaciones.
- Disponer desde el comienzo de la obra principal de todos los servicios necesarios.

(*) Esta cifra se refiere, por supuesto, a Estados Unidos.

(**) Recientemente la terminación adelantada de la presa de New Bullards Bar supuso al constructor una bonificación de 20.000 dólares diarios.

(***) Esta idea, que creo original de R. Urbistondo, ha sido aplicada ya con éxito, en España, por Saltos del Sil en la presa de Las Portas.

— Poder realizar una excavación, sin refinar, sobre los planos del proyecto previo que permita examinar la cimentación y eliminar todas las sorpresas procedentes de ella (*).

— Disponer de un constructor a pie de obra que pueda hacer, mediante el procedimiento de precios unitarios en su contrato, ensayos a escala natural de canteras, voladuras, etc., y realizar eventuales reconocimientos de comprobación.

Es evidente que en estas condiciones el proyecto resultará mucho más ajustado a la realidad y que el aumento "por indeterminación" en los precios unitarios ofertados para la construcción de la presa será mínimo.

5.2. Cooperación con el constructor.

El procedimiento de contratos desglosados descrito permite, en unión del método de invitación restringida, celebrar reuniones *in situ* entre el consultor y los constructores prospectivos muy beneficiosas para la obra. A este fin se recomienda proveerles, con suficiente antelación, de los planos preliminares de la presa, así como de toda la información geológica y de canteras disponible y efectuar dichas reuniones una vez que la excavación previa esté realizada. Es indudable que los constructores harán valiosas sugerencias que una vez analizadas aseguran la ausencia de variaciones entre el proyecto de construcción y la obra ejecutada. Es muy posible que después de estas conferencias se logre definir el sistema óptimo de desviación durante la construcción e incluso empezar a construirle con el subsiguiente ahorro de tiempo (**).

5.3. Redacción del pliego de condiciones.

Los pliegos de condiciones actuales pecan, en general, de dos defectos capitales que el constructor no tiene más remedio que traducir en imprevistos en sus precios unitarios:

- Excesivo respeto por precedentes muchas veces no aplicables al caso.
- Excesiva seguridad, traducida en poderes prácticamente omnímodos al Director de la Obra, en el caso de indeterminaciones.

El diálogo entre consultor y constructor puede y debe acabar con las indeterminaciones y hacer, como debe ser, de cada pliego de condiciones un "traje a medida".

(*) En las últimas doce presas construidas por la Pacific and Gas Company de California, el incremento medio sobre el precio contratado ha sido del 21 por 100, y en su mayoría son consecuencia de un insuficiente conocimiento de la cimentación.

(**) Durante la segunda conferencia de Asilomar (1972) el Corps of Engineers presentó a los asistentes los planos preliminares de una presa (Trumbull Lake), y Bureau of Reclamation de dos (Auburn y Crystal) para ensayar las ventajas del procedimiento descrito.

5.4. Mediciones ajustadas.

Todos los pasos que conduzcan a disminuir la incertidumbre en la oferta del constructor y le permitan un plan de trabajo real actúan directamente sobre el coste total, ya que permiten rebajar los precios unitarios. El método de actuación más arriba propuesto permite ajustar al máximo las mediciones de los diferentes conceptos.

5.5. Planos detallados. Calidades definidas.

Con mayor razón aún que en las mediciones cuanto mayor y más preciso sea el conocimiento de las características finales de la obra más ajustadas pueden ser las ofertas económicas.

5.6. Libertad de ejecución.

Una vez que la obra está perfectamente definida en todas sus dimensiones y fijas las características y calidades de los materiales, tanto de los componentes como del producto final, debe darse al constructor libertad para proponer la realización del trabajo como mejor le cuadre a sus posibilidades e imaginación creadora. Un sistema racional de penalizaciones y premios en función de las calidades obtenidas y fundamentalmente de la dispersión son mucho más eficaces y "transparentes" que la prescripción de los métodos de ejecución, que además son mejor conocidos, en general, por el constructor.

5.7. Programa de trabajo.

Al calcular el tiempo necesario para la construcción de la presa el proyectista debe considerar que la época del año en que se adjudique el contrato puede tener una repercusión importante sobre actividades tales como la desviación del río o la posibilidad de preparar a tiempo el hormigonado. Un programa preparado a partir de una fecha óptima puede ser irrealizable si el contrato se adjudica en otra y no se tiene en cuenta la diferencia en el origen de los tiempos. Por otra parte, es muy conveniente, para ser realista, suponer un período lógico de movilización; la realidad es que el constructor necesita ese tiempo, y si no se ha previsto en el programa se producirán, posteriormente, puntas de trabajo que invariablemente significan sobrecostes.

5.8. Ejecutividad a pie de obra.

El constructor necesita saber desde el principio, con objeto de aquilatar al máximo sus precios, que no se van a producir paradas en los tajos por falta de decisiones inmediatas. La Dirección de Obra, o la Supervisión, deben estar verdaderamente facultadas y calificadas para decidir sobre la marcha cualquier problema que se plantee. El

pliego de condiciones debe prever las compensaciones que se abonarán en caso que el plan de trabajo aprobado no se pueda realizar debido a estas circunstancias.

5.9. Arbitraje.

El pliego de condiciones debe incluir cláusulas que definan claramente el procedimiento de arbitraje a seguir en el caso de que surjan diferencias en la apreciación de las condiciones contractuales.

6. MATERIALES

Los comentarios y propuestas presentados sobre los materiales se refieren, fundamentalmente, a cementos, adiciones y hormigones.

6.1. Cementos.

6.1.1. Cementos expansivos.

Se trata de encontrar un cemento, o un aditivo, que produzca un hormigón expansivo capaz de compensar, exactamente, la retracción que se produce consecuentemente al enfriamiento del hormigón. Durante los dos últimos años se han estado realizando ensayos con un aditivo a base de óxido de magnesio; hasta ahora los resultados positivos obtenidos son solamente para hormigones de muy alta dosificación. La dificultad máxima estriba en lograr que la expansión sea, aproximadamente, de la misma magnitud y suceda en el momento preciso para compensar la mencionada retracción.

Este tipo de cemento podría utilizarse para reducir, e incluso eliminar, las juntas verticales en las presas de gravedad y también para colocarlo en juntas, de mayor amplitud que las actuales, dejadas entre los bloques de las presas bóveda de forma que produjera una compresión que compensara las tracciones provenientes del llenado del embalse.

6.1.2. Cementos de fraguado acelerado.

La remoción y limpieza antes de colocar una tongada del agua y lechada que exuda la anterior, es un porcentaje relativamente elevado, aproximadamente el 3 por 100, del coste total de una presa. Utilizando un cemento de fraguado rápido (*) no "subiría" el agua ni la lechada y se podría ahorrar el coste de la limpieza de juntas de construcción por una parte y utilizar encofrados mucho menos resistentes por otra. Esta clase de cemento permitiría,

(*) Debe tenerse en cuenta que entre tongada y tongada se produciría así una especie de "junta fría". Los conferenciantes que expusieron la idea piensan, sin embargo, que tal junta no debe preocupar.

además, el empleo de tongadas de menor espesor capaces de eliminar una cantidad mayor del calor de hidratación disminuyendo la probabilidad de fisuración y permitiendo aumentar el espaciamiento entre las juntas verticales.

6.1.3. Cementos retardadores de fraguado.

En contraposición con la postura de quienes defienden las ideas expuestas en el apartado anterior está la de quienes abogan por un cemento de fraguado muy lento que permitiera evitar, con toda seguridad, las "juntas frías" y colocar tongadas de mayor espesor.

6.1.4. Cementos con calor de hidratación mínimo.

Prácticamente todos los problemas producidos por los cambios de temperatura del hormigón podrían ser eliminados si se dispusiera de un cemento capaz de liberar el calor de hidratación antes de que fuera colocada la siguiente tongada. Profundizando en esta idea puede pensarse en producir un cemento cuyo calor de hidratación sea mínimo, e incluso cero. El problema se reduce a encontrar una reacción química endotérmica capaz de desarrollarse, sin alterar las características del hormigón resultante, paralelamente al proceso de fraguado. Es evidente que un cemento de estas características eliminaría los problemas de elevación de temperatura, preenfriamiento del hormigón, fisuras de tracción, etc.

6.2. Adiciones.

Aunque en las reuniones se comentaron ampliamente las propiedades de todas las adiciones normalmente utilizadas se analizaron, fundamentalmente, aquellas que permiten rebajar la cantidad de cemento sin alterar las características del hormigón convencional. Esta reducción permite, por una parte, un ahorro sustancial, ya que el cemento es el elemento más caro del hormigón, y, por otra, reducir los efectos nocivos ya comentados del calor de hidratación.

Además de la ventaja económica que supone la utilización de hormigones fabricados con menor cemento, se puso de manifiesto que las adiciones capaces de lograrlo son absolutamente necesarias cuando se requieren hormigones de alta resistencia y con valores inferiores al 35 por 100 en la relación agua-cemento. El Bureau of Reclamation después de las ventajas observadas en la construcción de las presas de Glen Canyon y East Canyon, considera que este tipo de adiciones permite ahorrar un 10 por 100 del cemento y, en consecuencia, ha incluido en sus pliegos de condiciones la obligación de utilizarlos en cualquier obra cuyo volumen sea superior a 1.500 m³.

6.2.1. Aireantes.

Los materiales utilizados para este propósito son muy semejantes a los jabones y detergentes. Aunque inicial-

mente fueron utilizados para proteger al hormigón de las heladas cuando la pasta estaba saturada, pronto se comprobó que también permitían reducir la cantidad de cemento y obtener un hormigón de la misma resistencia, impermeabilidad y duración. En el coloquio celebrado sobre el tema se llegó a la conclusión de que un estudio detallado de dosificaciones puede permitir ahorrar hasta un 30 por 100 del cemento inicialmente requerido.

6.2.2. Puzolanas.

Es sabido, hace mucho tiempo, que la adición de puzolanas produce hormigones con mayor cohesión y plasticidad, menor tendencia a la segregación y mayor resistencia final. Su ventaja fundamental consiste, sin embargo, en permitir reducir la cantidad de cemento necesaria, por unidad de hormigón, con las ventajas inherentes ya explicadas. Está comprobada la posibilidad de utilizar cenizas volantes cuando no existen puzolanas naturales de la calidad requerida.

6.2.3. Resinas para el curado.

Con objeto de facilitar la construcción reduciendo al máximo el tiempo que consume la limpieza y curado de las juntas horizontales, el Bureau of Reclamation ha estado experimentando, para estos fines, la utilización de resinas especiales. Si bien los resultados de laboratorio fueron muy prometedores, las experiencias realizadas en dos obras no han confirmado aún el optimismo inicial. Se prosiguen, no obstante, los ensayos a escala natural, con objeto de dilucidar si los materiales ensayados pueden tener aplicación comercial.

6.3. Hormigones.

Todas las ideas que se presentaron sobre hormigones tratan no sólo de hacerlo más barato, sino también de mejorar aquellas características que pueden permitir colocarlo más rápidamente o disminuir el volumen total a colocar.

6.3.1. Hormigones con mayor resistencia a tracción.

Si se dispone de un hormigón capaz de soportar mayores tracciones se logran ahorros inmediatos ampliando el intervalo entre las juntas verticales, por una parte, y reduciendo los gastos de pre y/o postenfriamiento de la masa, que hoy están cifrados en un 3 por 100 del total, por otra. El Army Corps of Engineers después de normalizar un ensayo, en viga, para medir la resistencia a tracción del hormigón en masa ha comparado diferentes métodos de aumentar dicha resistencia; de los ensayos efectuados se deduce que los hormigones fabricados con áridos de cantera tienen mucha mayor resistencia que los de áridos naturales; igualmente se ha probado que cuanto más bajo

es el módulo de elasticidad del hormigón mayor es la resistencia a tracción.

Los comentarios sobre hormigones realizados añadiendo resinas, polímeros e incluso agujas de acero, como proponen los japoneses, fueron muy favorables y se acordó intensificar al máximo los ensayos que se están realizando actualmente.

6.3.2. Hormigón discontinuo.

A partir de la idea de que cuanto más denso sea el conjunto formado por los áridos y más en contacto directo estén, menor será la cantidad de cemento necesaria y mayor la resistencia del conjunto, se ha comprobado, mediante un modelo físico, que la máxima densidad se obtiene una vez decidido un intervalo para el árido grueso, en el que el diámetro mínimo sea D , eliminando todos los tamaños intermedios hasta $0,155 D$ y tomando éste como el tamaño máximo del árido fino. Aunque existen tamaños intermedios que se pueden colocar entre los áridos gruesos, la tendencia de estos a juntarse durante el vibrado permite, solamente, el paso de aquellos que entran a través de sus huecos cuando están en contacto.

Además de las ventajas ya mencionadas, derivadas del empleo de menor cantidad de cemento, el hormigón discontinuo tiene mayor resistencia a la deformación, inmediatamente después de compactado, y a la abrasión y cavitación, por lo que puede emplearse en aliviaderos o túneles en los que se produzcan grandes velocidades.

7. PROYECTO

El desarrollo de los métodos de cálculo basados en la teoría de elementos finitos y el empleo de ordenadores permite llegar a conocer, con todo detalle, en un tiempo relativamente breve y a un coste asequible el plexo estructural de la presa, y en consecuencia, extraer el máximo beneficio de las formas especialmente en las bóvedas, que cada día se pueden hacer más delgadas. Debe el proyectista, sin embargo, considerar que un excesivo virtuosismo por su parte, que complique en exceso los encofrados o dificulte la puesta en obra, puede conducir a un coste total superior, a pesar de tener unas mediciones reducidas, por el simple mecanismo de encarecer los precios unitarios. En definitiva, se trata de no olvidar, a la hora de proyectar, los métodos de puesta en obra ni redactar especificaciones sobre las calidades y tolerancias incompatibles con los medios de construcción.

Se llamó la atención sobre el hecho de que las resistencias especificadas para el hormigón son varias veces superiores a las tensiones de trabajo, por lo que frecuentemente se podría disminuir dicha resistencia, y en consecuencia, la cantidad de cemento con los beneficios adicionales que tal medida lleva implícitos. Al comentar innovaciones más o menos espectaculares respecto a los tipos de presa se concluyó en la posibilidad de experimentar, a escala natural, en las atagüfias en gracia a su provisionalidad.

7.1. Materiales.

El consultor debe estudiar detenidamente el número de hormigones distintos que especifica para el conjunto de las obras, ya que una gran diversidad no suele estar justificada económicamente si se tienen en cuenta las dificultades y consecuente aumento de precio que significan para el constructor. La práctica bastante extendida de disponer hormigones de mayor calidad en las inmediaciones de los paramentos para aumentar la impermeabilidad y resistencia a los agentes exteriores puede ser eliminada mediante el empleo, como se detalla más adelante, de paneles prefabricados.

La dosificación relativa de los diferentes componentes y especialmente la calidad y el tamaño de los áridos afectan de una forma básica la resistencia a tracción y la capacidad de fisuración de los hormigones. Cuanto mayor es el módulo de elasticidad y el coeficiente térmico de los áridos menor es la resistencia a tracción del hormigón resultante. El proyectista debe, en consecuencia, considerar en cada caso las características de los áridos disponibles y estudiar en el análisis de alternativas la influencia, tal vez decisiva, que dichas características pueden tener en la elección de solución.

7.2. Cálculo.

Aunque las bóvedas sean cada vez más complejas buscando el aprovechamiento máximo de la forma es seguro que se seguirán produciendo, en valles anchos, tracciones en la base de la zona central. Se puede acudir en este caso a soluciones singulares como son las de dejar juntas horizontales hasta una galería de control o utilizar técnicas de pretensado y producir —mediante el empleo de gatos planos en las juntas de construcción o de cables tensados y convenientemente dispuestos— compresiones que anulen las tracciones. Parece, sin embargo, que la solución universal se encuentra en el uso masivo de "pulvinos" que añaden otras ventajas: corrección de la asimetría natural de la cerrada; mayor facilidad de construcción en zonas de difícil acceso que la propia bóveda y posibilidad de efectuar desde ellos eventuales inyecciones de cosido y consolidación del terreno.

Hasta ahora ni los más sofisticados métodos de cálculo, ya sean los basados en la teoría de membranas o en la de elementos finitos, consideran debidamente el efecto que sobre el plexo tensional produce la curvatura vertical, y por eso existen diferencias entre los resultados proporcionados por cálculo y los obtenidos a partir de ensayos en modelo reducido. La puesta a punto de un método que permita analizar con detalle las zonas en tracción y tener en cuenta el efecto mencionado permitirá, probablemente, reducir la anchura de la base.

Es bien conocido el hecho de que la carga de rotura a tracción es mucho menor cuando las cargas se aplican rápidamente que cuando se incrementa lentamente su valor. Puesto que en las presas es generalmente posible aumentar las cargas prácticamente a la velocidad que se desee,

sería muy conveniente llegar a conocer exactamente este fenómeno para permitir al proyectista conocer el coeficiente de seguridad real con el que cuenta en cada caso. Podría de esta forma incluso proyectar en función de la explotación del embalse.

7.3. Cimentación.

Además del procedimiento, ya mencionado, de realizar una excavación preliminar durante el desarrollo del proyecto de construcción, que permita eliminar al máximo las sorpresas en la cimentación, se puso de manifiesto la necesidad de que los proyectistas presten atención particular al método de excavación y a su influencia sobre la construcción en aquellos lugares en que las condiciones tengan características poco corrientes y no dejen el problema al constructor, ya que el coste real necesario puede ser muy diferente del convencional. Se recordaron casos como el de la presa de Bioge, en la que se creó un procedimiento específico para excavar una zanja de 3,5 m de anchura, a través de 35 m de aluviones, y rellenarla posteriormente de hormigón, con objeto de apoyar sobre el muro así creado una bóveda de 20 m de altura. También se comentó el caso de la presa de Kukuan, donde la disposición y buzamiento de los estratos en una garganta de 300 m de profundidad hubieran producido cantidades ingentes de excavación si se hubiera realizado ésta por procedimientos convencionales; el problema se resolvió mediante la excavación e inmediato hormigonado, de túneles situados uno sobre otro.

Debe tenerse en cuenta, también, que la práctica, muy generalizada, de encastrar las bóvedas de forma que los arcos del intradós sean perpendiculares a la roca de caja produce una sobreexcavación innecesaria. Se ha comprobado, en cierto modo sorprendentemente, que siendo perpendicular al cimiento sólo el arco del extradós y dando una pequeña inclinación de unos 4º al estribo se llegan a eliminar las tracciones en el extradós y disminuyen las compresiones en el intradós respecto a las que se producen en un arco de la misma anchura, y todo él perpendicular al estribo.

7.4. Dispositivos especiales.

Existen algunas obras de detalle en las presas como son las juntas, galerías, zonas armadas, coronación, etc., que debido a su naturaleza dificultan la puesta en obra del hormigón. Fueron numerosas las intervenciones proponiendo métodos que eliminen o al menos palien los inconvenientes que presentan.

Juntas verticales:

Puede decirse que este fue el caballo de batalla de las reuniones. En primer lugar, y antes de llegar a la solución radical de quitarlas completamente, para lo cual han de desarrollarse determinadas propiedades del cemento y/o

de los métodos de puesta en obra, se estudió la posibilidad de aumentar el espaciamiento entre ellas y superar la vieja regla de los 15 m (50 pies). La realidad es que indirectamente hace tiempo que se ha experimentado con distancias mayores entre juntas al suprimir las longitudinales incluso en presas de cierta altura. Por otra parte, es obvio que el espaciamiento debería ser función de la altura, pero para complicar la ejecución de la obra lo que se propone es suprimir alguna de las juntas desde determinada cota (*).

Galerías:

No cabe duda de que las galerías complican y retrasan la construcción, y por eso incluso se ha llegado a proponer su supresión a pesar de la importancia que tienen para el control y vigilancia de la presa. Una solución intermedia es la de no hacerlas más que horizontales y desde luego prefabricadas. En el caso de presas bóveda delgadas tal vez sea posible sustituirlas por pasarelas aguas abajo.

Zonas armadas:

Aunque en la presa propiamente dicha no existen muchas zonas armadas, sí las hay en las estructuras de desagüe. Se ha comprobado ya en numerosas ocasiones la ventaja de proyectar cada uno de estos elementos de forma que el conjunto de los aceros forme una especie de estructura que se pueda construir enteramente en el taller de ferralla, transportarlo después con una grúa a su sitio y hormigonar posteriormente. El procedimiento se ha aplicado con éxito no sólo a las armaduras, sino también a los sistemas de inyección de juntas.

Coronación:

La práctica universal de situar una carretera en coronación de la presa ha conducido al procedimiento de rematar ésta en ménsula sobre uno e incluso los dos paramentos. Se produce así la mayor complicación de encofrado precisamente en un lugar en el que las dificultades de colocación son grandes y las medidas de seguridad del personal han de ser máximas. Por todo ello resulta desproporcionadamente caro a su volumen, dando lugar a que los proyectistas consideren si no es más económico ampliar gradualmente la sección, a partir de determinada cota, y evitar todos estos problemas, continuando con una sección maciza que, además, se puede utilizar para desplazar, convenientemente, la resultante. Existen precedentes —presa de New Bullards Bar— donde el constructor realizó el cambio, a su costa, a pesar de significar más de 6.000 m³ adicionales de hormigón.

(*) En España se ha utilizado este procedimiento por lo menos en la presa de Las Portas, donde a partir de determinada cota los tres bloques centrales forman un solo monolito.

7.5. Dispositivos Hidráulicos.

Probablemente no existe otro campo para el consultor en el que pueda lograr mayores economías, analizando con profundidad el problema global y empleando la imaginación que el del proyecto de los dispositivos hidráulicos de la presa. Si se tiene en cuenta la importancia económica que tiene el disponer cuanto antes del embalse lleno se vislumbran las ventajas que puede ofrecer, en muchas ocasiones, una presa de fábrica en la que el proyectista se las ha ingeniado para ir embalsando al mismo tiempo que se construye la presa. El tema es especialmente importante si el embalse es grande y necesita un período largo para llenarse, como es el caso de Kariba, cuatro años, o el de Daniel Jhonson, que requiere siete años.

La versatilidad de la presa de fábrica a estos efectos es muy superior a las de materiales sueltos, no sólo por el menor desarrollo de eventuales túneles de desvío y la posibilidad de verter por coronación (*) sin daños apreciables en cualquier etapa de la construcción, sino por la facilidad con que se pueden dejar en ellas aberturas controladas (**). Permite incluso alejar de la zona de trabajo las aguas vertidas mediante un salto en esquí, construido sobre uno de los bloques o sobre el techo de la central que se puede ir instalando, simultáneamente, con seguridad.

Estas posibilidades obligan, por otra parte, a que el tema de la derivación durante la construcción sea competencia del proyectista que es quien tiene tiempo para estudiarlo y conoce todas las variables del problema. Debe de ser él, por tanto, quien se comprometa y fije detalladamente el sistema óptimo sin acudir a la mucho más cómoda postura de dejar que el constructor haga lo que pueda so pretexto de que las instalaciones para la construcción son suyas. Como se ha visto, el eventual daño que puedan sufrir es muy inferior al producto que se pierde al retrasar la puesta en marcha.

Otro aspecto a considerar en relación con los dispositivos hidráulicos en el proyecto de una presa de hormigón es la posibilidad de concentrar todos los dispositivos de desagüe, tomas, galerías de presión, desagües de fondo, etcétera, en un solo bloque para limitar al máximo los retrasos que producen en la puesta en obra del hormigón. A estos efectos se recomienda, igualmente, proyectar estos dispositivos de forma que crucen siempre la presa horizontal o verticalmente.

7.6. Alternativas a considerar.

Es evidente que en el pasado se han construido presas de gravedad convencional en lugares en los que hoy se

(*) Esta última ventaja es posible que se reduzca o incluso anule en el futuro, ya que de los vertidos a través y/o sobre la escollera durante la construcción, ya plenamente estudiados, no se tardará en pasar, como probable aplicación de la "tierra armada", al aliviadero permanente sobre coronación. Claro que esto significará indudablemente sobrecostes en las presas de escollera.

(**) Hoy ya se fabrican compuertas Taintor capaces de operar hasta con 150 m de carga.

podrían construir otros tipos más baratos, y por así decirlo, más sofisticados. Entre las recomendaciones que se hicieron a los proyectistas a este respecto se destacan las siguientes:

- En valles anchos y para presas de pequeña altura, menos de 40 m, debe considerarse siempre la alternativa de contrafuertes con distancias entre ejes de hasta 20 m.
- En valles anchos y para presas de gran altura es casi seguro que la solución más económica sea la de bóvedas múltiples. Se sabe ya que incluso en presas de 200 m de altura se puede utilizar una relación de vano a altura de 0,8; el ahorro en hormigón de esta solución puede ser del 50 por 100 respecto a una presa de gravedad convencional.
- El empleo del pretensado puede resolver muchos problemas en casos que serían difíciles de tratar de otra forma. Pretensados, radial en los arcos y horizontal en coronación, y el empleo de gatos planos en la base de las ménsulas centrales para predeformarlas son técnicas disponibles y empleadas con éxito.
- No debe olvidarse que el campo de aplicación del hormigón es la compresión. Puede, por tanto, pensarse en presas mixtas, en las que la resistencia a tracción esté encomendada a otro material. Se pueden utilizar, por ejemplo, como propone Londe, presas de contrafuertes de hormigón con bóvedas de acero, que se colocan, además, muy rápidamente durante la estación seca.

8. CONSTRUCCION

En realidad, los medios que pueden emplearse para abaratar el coste total de las presas de hormigón a partir de cambios en los procedimientos de puesta en obra son prácticamente imposibles de aplicar si el proyecto especifica unos condicionamientos que impidan el empleo de técnicas no convencionales. Una vez más se pone de manifiesto la necesidad del diálogo abierto entre el constructor y el consultor. Es también cierto, sin embargo, que la inmensa mayoría de los métodos hoy empleados fueron puestos a punto hace más de treinta años y que no ha habido innovaciones esenciales hasta ahora.

Se reseñan a continuación los aspectos más sobresalientes comentados en las reuniones relacionadas con el tema construcción.

8.1. Control y supervisión.

El crecimiento continuo de los costes de la mano de obra obliga a utilizar procedimientos de control, que hace años hubieran parecido "fantasía científica", con objeto de aumentar al máximo la productividad y evitar que la falta de dirección o de órdenes precisas a tiempo disminu-

ya los rendimientos. Afortunadamente el desarrollo de la electrónica proporciona dispositivos que permiten, con pequeño costo, evitar los tiempos muertos debidos a indecisiones o falta de información. En la presa de Dworshak se han utilizado además de los usuales teléfonos y radios portátiles circuitos cerrados de televisión para vigilar constantemente las zonas críticas de la obra e impedir que puedan parar. Cada vez será más normal disponer para la construcción de una presa de una central de control, completamente aislada, a la que llegue directamente información de toda la obra y desde la que se pueda ordenar racionalmente la construcción.

Es evidente que un programa de control y supervisión de este tipo debe incrementar los rendimientos en un gran porcentaje, pero también lo es que para desarrollarlo requiere un personal mucho más especializado y con una formación mucho más amplia del actualmente disponible, no sólo en la sala de control, sino en otros muchos lugares de la obra.

La idea predominante hoy día es que este tipo de personal no existe y es necesario formarlo; la opinión unánime es que el mejor procedimiento sería partir de jóvenes ingenieros, que después de pasar por todos los puestos de la obra adquirirían una importante experiencia, que unida a su indudable formación técnica permitirá, a la larga, disponer de un personal clave e indispensable.

8.2. Hormigonado.

La inmensa mayoría de los conferenciantes coincidieron en que el mejor procedimiento para realizar las presas de hormigón más rápidamente y, en definitiva, más baratas es colocar el material de forma continua, de estribo a estribo, suprimiendo las juntas transversales y longitudinales. Cuando accidentalmente sea necesario parar el hormigonado se debe dejar una junta transversal, pero no vertical, sino con una pendiente máxima de 2:1. El éxito económico será mucho mayor si se puede prescindir también del tratamiento de las juntas horizontales, por lo que se recomienda utilizar un retardador de fraguado. La altura de las tongadas depende de la capacidad del equipo de puesta en obra y de las dimensiones de la presa, pero en cualquier caso debe intentarse que el hormigón tenga la menor cantidad de cemento posible y que éste sea de bajo calor de hidratación con gran cantidad de puzolanas; se puede de esta forma minimizar el preenfriamiento de los áridos que se considera mucho más adecuado para este método que el postenfriamiento del hormigón.

No existe ninguna especificación para el transporte del hormigón desde la central al tajo con tal que sea suficientemente rápido. Parece, sin embargo, que el método más adecuado sería a través de cintas transportadoras cerradas, de descarga lateral, montadas sobre los encofrados deslizantes o colgadas de cables. Después de las numerosas intervenciones, con detalladas explicaciones, sobre el montaje del sistema y de la experiencia adquirida en el hormigonado del aliviadero de la presa de Dworshak parece que es posible utilizar cintas de 90 cm de anchura,

que trabajando a una velocidad de 200 m por minuto pueden colocar, sin la menor segregación, más de 1.000 m³ de hormigón por hora con áridos de hasta 15 cm de tamaño máximo.

Por cuanto se refiere al extendido y vibrado del hormigón se considera que deben desarrollarse para la primera operación máquinas semejantes, pero más simples, a las extendedoras utilizadas en la construcción de las pistas de aeropuertos y seguir utilizando las baterías de vibradores montadas sobre *bulldozers*.

En esta misma línea de hormigonado continuo, pero cambiando completamente de procedimiento, se encuadra el ensayo realizado por la Tennessee Valley Authority para colocar y compactar hormigón de consistencia seca, utilizando los procedimientos de construcción empleados en las presas de escollera. El ensayo consistió en extender el hormigón, siempre en la misma dirección, con palas cargadoras y compactarlo, posteriormente, mediante un rodillo vibrante de 15 t. Como siempre en todos los casos de hormigonado continuo el material era pobre en cemento, de bajo calor de hidratación y con un alto contenido de puzolanas. El hormigón resultante, al que fue posible compactar por tongadas de 45 cm, no difiere esencialmente en sus propiedades finales del obtenido por procedimientos convencionales y, por supuesto, no fue necesario utilizar encofrados ni limpiar o tratar las juntas horizontales. Parece que será posible emplear el procedimiento en presas con taludes no muy diferentes de los normales en las presas de gravedad, y que el único problema importante será la formación y compactación de los paramentos a los que no llega la acción del rodillo.

También se comentó la posibilidad de utilizar el procedimiento de precolocar los áridos gruesos e "inyectar" después un hormigón formado por los áridos finos y la pasta. Según el conferenciante, este procedimiento permite eliminar el vibrado del hormigón, distanciar las juntas verticales y, utilizando un retardador de fraguado, eliminar también la preparación y limpieza de las juntas horizontales.

8.3. Encofrados.

Independientemente de la presentación de varios métodos de encofrado deslizantes más o menos sofisticados el aspecto principal discutido sobre este tema fue, indudablemente, el empleo de encofrados prefabricados de hormigón. El procedimiento tiene las siguientes ventajas:

- Su fabricación en taller permite la ejecución de un hormigón de alta calidad, perfectamente curado, prácticamente impermeable y resistente a los agentes exteriores, heladas, con una apariencia tan sugestiva como se desee para mejorar el aspecto estético de la presa.
- Actúan como aislantes perfectos de la masa de hormigón extendida en su interior protegiéndole contra los cambios de temperatura y facilitando enormemente su curado, así como la hidratación del cemento al impedir las pérdidas de agua.

- Eliminan, o al menos disminuyen en gran porcentaje, las siguientes costosas actividades necesarias en una construcción con encofrados convencionales: curado, calentamiento de los paramentos en tiempo frío, aislamiento del contacto directo de los rayos solares, cambio de hormigón en las proximidades de los paramentos y desencofrado.
- Permiten la realización de juntas prefabricadas y de gran exactitud, que no tienen por qué coincidir con las de contracción de la masa, aumentando la impermeabilidad del conjunto.

Con los equipos de transporte y montaje existentes en el mercado se pueden fabricar y colocar paneles pretensados prefabricados de hasta 3 m de altura, 30 m de longitud y 10 cm de espesor, que pueden acelerar enormemente la construcción de la presa.

8.4. Juntas.

La tendencia unánime, tanto por cuanto se refiere a las juntas verticales como a las horizontales de construcción, es reducirlas al máximo y eliminarlas si es posible. Otra tendencia, ya experimentada por Gentile en la presa de Alpé-Gera, es la de colocar el hormigón de forma continua

y ejecutar las juntas posteriormente. Aunque en aquella ocasión se colocó un paramento de acero inoxidable, posteriormente se han realizado presas semejantes, Quaira de Ila Miniera, sin ningún paramento especial.

Es importante, también, reseñar los intentos realizados para desarrollar una máquina autopropulsada capaz de realizar el trabajo de limpieza y preparación de las juntas horizontales. Los ensayos realizados hasta ahora permiten cierto optimismo con respecto al éxito final; los estudios de costes indican la posibilidad de ahorrar hasta un 70 por 100 de este importante sumando en el coste total de la presa.

9. CONCLUSION

Las ideas expuestas a lo largo de las páginas anteriores no son, desde luego, aplicables simultáneamente, algunas incluso son contradictorias entre sí, pero no cabe duda que suponen un buen manojo de sugerencias que en muchas ocasiones pueden permitir obtener ahorros espectaculares en tiempo y presupuesto. En cualquier caso es la única herramienta de que se dispone, hoy por hoy, para realizar presas de hormigón más económicas.