

# RECRECIMIENTOS Y REFUERZOS EN PRESAS DE GRAVEDAD

Dr. Ing. C. C. P. E. VALLARINO(\*) **VOCAL**

## RESUMEN

Los recrecimientos de presas han sido relativamente raros hasta ahora. Las crecientes exigencias del desarrollo y las mayores posibilidades técnicas actuales, los harán más frecuentes. En este trabajo se exponen los principios generales y se comparan las distintas soluciones, describiendo después dos casos de recrecimiento con soluciones distintas (peso de hormigón y cables) y un refuerzo de una presa (problema similar al del recrecimiento).

### 1. EL DESARROLLO HIDRAULICO Y EL RECRECIMIENTO DE PRESAS

El tema de los recrecimientos de presas está cobrando una importancia que tenderá a aumentar con el tiempo. Hasta época reciente era una operación más bien excepcional, cuya dificultad técnica y coste sólo se justificaban en algunos casos muy concretos. Pero hoy día las dos componentes, activa (función) y pasiva (coste y técnica), que operan en el recrecimiento de presas (como en toda obra) y que hasta hace poco daban en general un saldo negativo, están cambiando notablemente.

En cuanto a los factores activos, la rápida evolución de las necesidades de agua y la multiplicidad creciente de sus usos conducen a sacar el máximo partido de los embalses construidos con empleos que en la fecha en que se proyectaron no se podían sospechar o parecían tan lejanos que no justificaban el adelanto de la consiguiente inversión.

En cuanto a los factores pasivos — coste y posibilidad técnica de la operación — hoy día son relativamente corrientes las operaciones técnicas esenciales: demoliciones con precorte para controlar la extensión de lo destruido, cables de anclaje de alta potencia para conseguir las cargas que exigen las presas, productos para el pegado de hormigones de distinta edad, etc.

Por todo ello, mejorados los dos lados del balance, el recrecimiento de presas empieza a ser una operación

(\*) Agradecemos a nuestro compañero Sr. Baztán de Granda la colaboración prestada para la realización del presente trabajo.

menos infrecuente y puede devenir relativamente normal en un futuro próximo.

Hoy día los embalses no se proyectan con la simplicidad que prevalecía en otras épocas, sino que considerada el agua como material escaso que hay que administrar bien y del que hay que obtener la máxima utilidad, las presas se planean con el más amplio punto de vista y, como consecuencia, resultan de una magnitud superior a la que hubiera dado una visión más restringida.

Como los distintos usos y demanda del agua varían a lo largo del tiempo, en una planificación dinámica a largo plazo hay que elegir una de dos soluciones: construir el embalse para su capacidad máxima, si la plena utilidad no va a tardar demasiado en producirse, aceptando que en una primera fase la inversión sea superior a las necesidades estrictas; o bien si las cargas financieras del exceso de obra no lo permiten, proyectar la presa para su realización en dos o más fases de forma que en cada una de ellas se atienda a la demanda previsible. Este recrecimiento en una o más fases dentro de una visión planificadora a largo plazo tiene una notable ventaja respecto a los recrecimientos proyectados *a posteriori*. Estos son una adaptación de la obra (con la consiguiente carestía) a nuevas condiciones no previstas cuando se proyectó; en cambio, el recrecimiento planificado puede proyectarse de forma que la obra sea lo más sencilla y económica posible. Así se ha hecho en algunas presas de gran envergadura (por ejemplo, la presa del Guri, en el río Caroní, en Venezuela).

En España, país de rancia tradición hidráulica, los recrecimientos pueden cobrar una gran importancia. La mayor parte de los embalses anteriores a 1960 estaban concebidos para un solo uso (a algunos construidos con la finalidad principal de riego se adaptó posteriormente un aprovechamiento hidroeléctrico), por lo que muy probablemente bastantes de ellos no logran la utilización óptima de los recursos. Un problema distinto será el de la oportunidad económica de su conversión a la escala óptima, pero aún esta faceta puede variar rápidamente con el tiempo por la mejora simultánea de los dos elementos, activo y pasivo de la decisión a que antes hemos aludido.

Pero hay, además, aspectos relativamente recientes que pueden cambiar el panorama de la utilización de embalses de uso múltiple; concretamente, la nueva orienta-

16

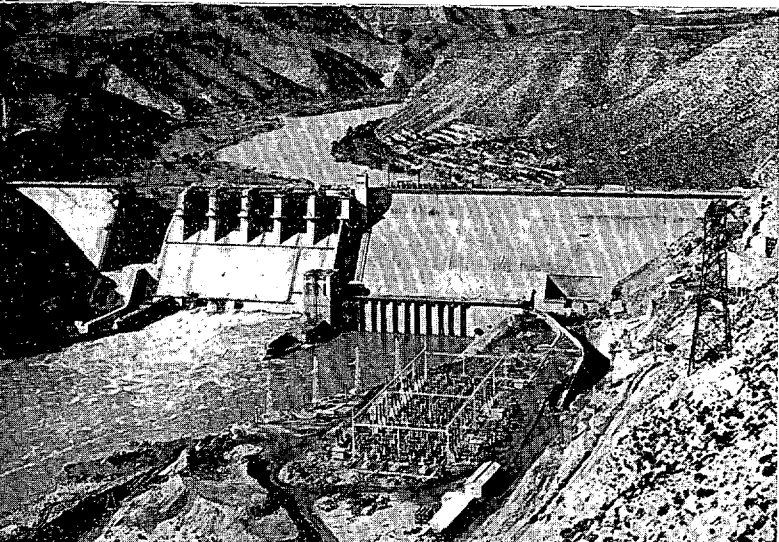
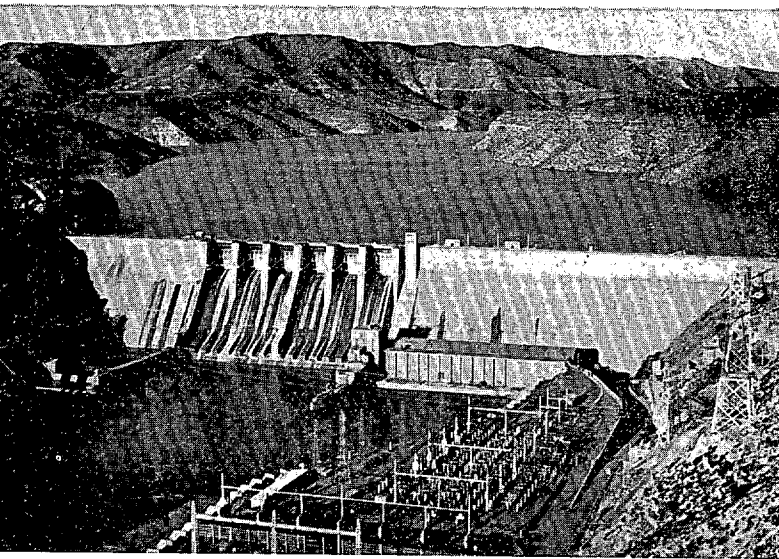


Fig. 1. — Presa de Mequinenza, terminado el refuerzo.  
 Fig. 2. — Presa de Mequinenza, en el momento de decidir el refuerzo.

ción de las centrales hidroeléctricas. Estas han sufrido en el último decenio una evolución radical en su concepto en los países cuyo desarrollo hidroeléctrico está próximo al límite potencial. En ellos casi no se concibe hoy día el establecimiento de una central de base, pues ese tipo de energía se puede obtener normalmente en mejores condiciones técnicas y económicas con centrales térmicas y nucleares que suministran la potencia sin variación anual ni estacional y a un coste muy conveniente. Es en las puntas en donde la energía hidráulica cobra su máximo interés, sin más competidor que las centrales térmicas con turbinas de gas o similares, prevaleciendo una u otra solución según el país, el precio del combustible, etc.

En el caso concreto de España, las centrales hidráu-

cas de puntas son, en principio, la solución. Y esto entrará la construcción creciente (ya iniciada hace años) de centrales reversibles y la adaptación de las centrales existentes para hacerlas aptas para puntas, si es que no lo son ya, o para reforzar el suministro de este tipo en las que ya trabajan así.

Por ello, en los años venideros, una buena parte de los saltos de agua en España (en 1972 con una potencia instalada de 11 GW y una producción de 36,4 TWh) tendrá que sufrir una adaptación, que exigirá frecuentemente un aumento del embalse, con el consiguiente recrecimiento.

Otras facetas que pueden exigir recrecimientos son la creciente demanda de agua para las ciudades y los nuevos regadíos, que se hacen factibles gracias a una mejor tecnología. En ambos casos, la asociación con un bombeo reversible permite soluciones que antes no podían pensarse (por ejemplo, el gran trasvase Tajo-Segura, de 250 kilómetros, en ejecución, y otros, como el del Ebro, en estudio).

En esta labor de adaptación de las presas españolas que ya empieza, nos ha caído en suerte el tener que resolver algunos de estos problemas. Y como cada caso ha tenido características distintas de los otros, las soluciones técnicas han sido muy variadas, por lo que hemos estimado interesante recoger estas soluciones y la filosofía correspondiente con motivo del XI Congreso de Grandes Presas. Al tema del recrecimiento hemos unido el de refuerzos de presas, porque esencialmente es lo mismo, y del que también hemos tenido una experiencia importante.

## 2. PROBLEMAS ECONOMICOS DEL RECRECIMIENTO

El problema del recrecimiento consiste, en esencia, en lo siguiente:

Una presa está proyectada para unas determinadas condiciones de cargas (fundamentalmente su peso propio, el empuje del agua y la presión intersticial); al recrecerla, aumenta el empuje del agua y la subpresión y, naturalmente, han de variar sus dimensiones y su peso. La nueva presa ha de ser, como la anterior, estable en su conjunto (con el consiguiente equilibrio de las fuerzas actuantes) y resistente en todos sus puntos. Estas nuevas condiciones de resistencia plantean reformas importantes que pueden afectar sobre todo a la cimentación de la presa antigua. Como, además, hay que hacer estas reformas sin interrumpir el uso del embalse y afectando a éste lo menos posible, se presentan una serie de condicionantes difícilmente compatibles y que siempre plantean al final un dilema económico: las soluciones técnicas más sencillas, seguras y baratas suelen exigir un descenso considerable del embalse y, consiguientemente, una fuerte limitación de su explotación, lo que se traduce en una pérdida económica que puede ser muy elevada. Para evitarla se requiere una solución técnica con una carestía en general considerable respecto a la que se obtendría con el embalse vacío o muy bajo. Es obvio que el óptimo está

en la solución más económica en conjunto, es decir, la que dé el mínimo de costes conjuntos de construcción y pérdidas debidas a la explotación.

Estas últimas a veces no son tan fáciles de evaluar, porque si bien puede conocerse el monto de la pérdida directa, puede haber otros beneficios indirectos más difíciles de estimar, pues ya es sabido que el agua presenta una gran ramificación de repercusiones en el ciclo económico. Incluso algunos de estos beneficios pueden tener un carácter social, higiénico, etc., de casi imposible

un embalse. Y es claro que al estar éste en explotación, sólo en casos excepcionales podrá justificarse una reducción importante de su uso.

### 3. RECRECIMIENTO Y REFUERZO DE PRESAS DE GRAVEDAD

El problema mecánico que se plantea en los recrecimientos es doble:

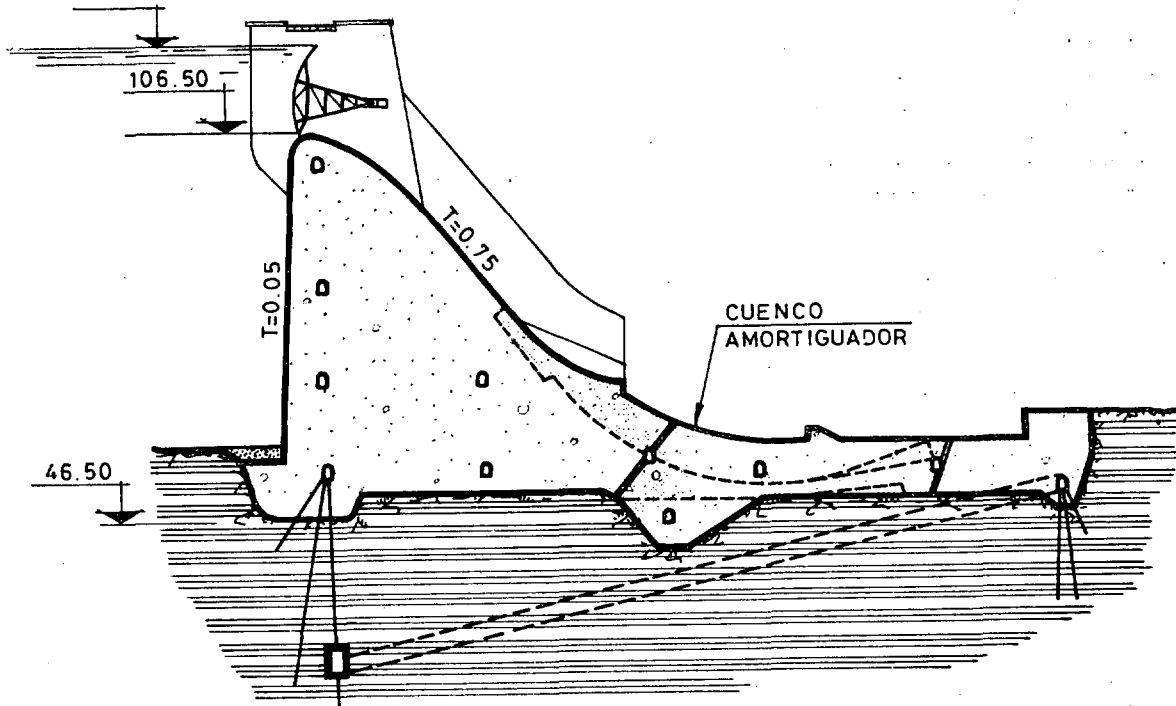


Fig. 3. — Sección del refuerzo de Mequinenza (zona de aliviadero). Las líneas de trazos señalan la presa sin reforzar.

traducción económica (en un modelo económico aparecerían con costes infinitos, es decir, sin elasticidad alguna para su supresión o limitación). En estos casos se impone la solución técnica adecuada con todo su coste y la única elección que tenemos es la de si este coste se justifica o no por la mejora conseguida. Por debajo de estos casos extremos hay toda una serie de problemas intermedios en donde la elección debe hacerse por el conjunto de coste directo y pérdidas de explotación. (Es obvio también que estas pérdidas pueden tener carácter estocástico y en ese caso hay que evaluarlas afectadas por su valor de probabilidad.)

En los casos específicos que vamos a describir después, teníamos el condicionante de la explotación del embalse y por ello ha habido que llegar a soluciones técnicas forzadas por esa limitación. Este suele ser el caso más habitual, pues, por esencia, el recrecimiento se hace para sacar el máximo partido posible de

- Proporcionar las componentes de compresión necesarias para la estabilidad al deslizamiento.
- Situar el centro de gravedad de estas componentes de manera que las tensiones sean las adecuadas y más concretamente que no haya tracciones en ningún punto.

Estas condiciones generales estructurales pueden exigir en algunos casos otra condición suplementaria: que las tensiones en las superficies de contacto del hormigón nuevo con el antiguo sean inferiores a lo que pueda resistir esa junta a esfuerzo cortante. Esto lleva a proyectar esta junta en la forma debida para que se cumpla tal condición, teniendo en cuenta la presunta debilidad de este contacto, o bien a emplear en la junta procedimientos que garanticen la debida resistencia frente a las tensiones que se prevean.

Las soluciones que se vienen utilizando con mayor frecuencia son las siguientes:

- Recrecimiento del paramento agua arriba, como en el caso de la presa de Mediano.
- Recrecimiento del paramento agua abajo, como en el caso de la presa de Irabia.
- Pretensado con cables para la creación de tensiones de compresión que aseguren la estabilidad al deslizamiento o anulen las posibles tracciones en el paramento de agua arriba, o ambas cosas a la vez, como en los casos de Cheurfas, Alt-Na-Lairige, El Kansera y El Sancho.
- Aumento de peso de hormigón de forma que se asegure la estabilidad y disponiendo dicho peso de manera que se absorban las tracciones del paramento agua arriba si fuese necesario, como en Uildecona y, en parte, en Mequinzena.

Las dos primeras soluciones apuntadas exigen un vaciado total si se trata de recrecer el paramento agua arriba y, al menos un vaciado parcial, en el de agua abajo, con los consiguientes inconvenientes para la explotación durante la fase de obras. Normalmente estas soluciones sólo se emplean por las razones antedichas en casos muy especiales y siempre que exista un dispositivo profundo de control que garantice los niveles de embalse.

En las dos soluciones de cables o peso de hormigón, puede quedar reducida la obra de refuerzo y recrecimiento a la zona de coronación de presa, sin afectar en absoluto a las partes bajas de ambos paramentos, por lo que no es necesario establecer un sistema de control del nivel de agua tan importante como el mencionado para las soluciones de recrecimiento de paramentos, bastando a lo sumo disponer unos portillos transitorios para controlar el nivel y los puntos de vertido.

No obstante, entre ambas soluciones hay diferencias acusadas en cuanto a posibilidades y exigencias.

La estabilidad al deslizamiento exige una mínima componente vertical que asegure los coeficientes de seguridad deseados. En un recrecimiento, al aumentar a carga de agua y, por tanto, las resultantes favorables al deslizamiento, es necesario aumentar las componentes estabilizadoras verticales en el valor necesario para alcanzar los límites de seguridad establecidos. Estas componentes verticales equivalen al volumen de hormigón adicional que se obtendría en una presa en que el vértice del triángulo teórico estuviese a la nueva cota de máximo embalse extraordinario, con los taludes necesarios. Este incremento de volumen será incluso superior, según los casos, bien por tener la fábrica antigua una densidad baja (considerando como tal la inferior a  $2,30 \text{ Tn/m}^3$ ) o por unas condiciones del terreno de cimentación, tales que la disposición de estratos, litoclasas, relleno de las mismas con coeficientes de rozamiento bajos, exijan un aumento considerable de componentes de compresión para evitar el deslizamiento potencial.

Por otra parte, la solución de cables pretensados tiene

límites tecnológicos de aplicación, ya que es difícil en la práctica realizar una solución que exigiese tensiones verticales superiores a  $300 \text{ Tm/m}$ .

Analizaremos a continuación con mayor detalle algunos puntos fundamentales referentes a las ventajas e inconvenientes de estos sistemas.

### 3.1. Recrecimiento del perfil.

Consiste en dar a la presa la forma adecuada para que tenga las dimensiones correspondientes a la nueva situación prevista para el embalse. La adaptación del perfil antiguo al nuevo se puede hacer añadiendo el hormigón en el talud de agua arriba o en el de agua abajo. Es muy raro el recrecimiento del talud agua arriba, porque suele ser condición esencial del recrecimiento, como ya hemos dicho, el poder seguir utilizando la presa y, por tanto, ese talud estará inundado. Sin embargo, en algunos casos excepcionales — por ejemplo, en presas cuyo único objetivo es el amortiguamiento de avenidas — es posible mantener en seco el paramento agua arriba durante un cierto tiempo. En estos casos, esta solución es preferible siempre a la del recrecimiento del otro talud, ya que dando un cierto talud más tendido al nuevo paramento de agua arriba, se asegura una componente adicional de peso de agua favorable a la estabilidad al deslizamiento.

En general, la solución de recrecimiento de talud se aplica agua abajo. Teóricamente bastaría poner un talud paralelo al anterior, de forma que la presa final tuviera las dimensiones debidas a su nueva altura. Sin embargo, esta solución no es factible sin más, porque la nueva presa no es homogénea e isotrópica, ya que tiene una junta que separa el hormigón antiguo del nuevo, cuya junta es un presunto elemento de debilidad. A lo largo de ella los esfuerzos cortantes pueden ser de importancia, pero, sobre todo, esa junta sufrirá los efectos de retracción de fraguado del hormigón nuevo, mientras que el antiguo es prácticamente invariable desde este punto de vista. Estos esfuerzos cortantes pueden ser de gran importancia y llegar a invalidar esta solución.

Estos efectos suelen exigir disponer un talud de la presa recrecida superior al que hubiera sido estrictamente necesario para la presa homogénea de igual altura final. O bien tomar determinadas precauciones para evitar las tracciones y los esfuerzos cortantes internos a lo largo de la junta.

Estas precauciones incluyen en cualquier caso un picado intenso de la junta, al objeto de dejar ésta rugosa y con el árido al descubierto para permitir la acción aglomerante del hormigón nuevo. En los casos en que esto no sea suficiente, puede darse un dentado a la junta para asegurar la debida trabazón.

Las nuevas técnicas de pegamento por medio de resinas facilitan la unión de los dos hormigones y permiten superar los inconvenientes debidos al dentado que se utilizaba en técnica ya superada y consiguiendo resisten-

Fig. 4.—Comparación de corrimientos de la presa sin refuerzo y con refuerzo, según los ensayos en el ISMES (Bérgamo).

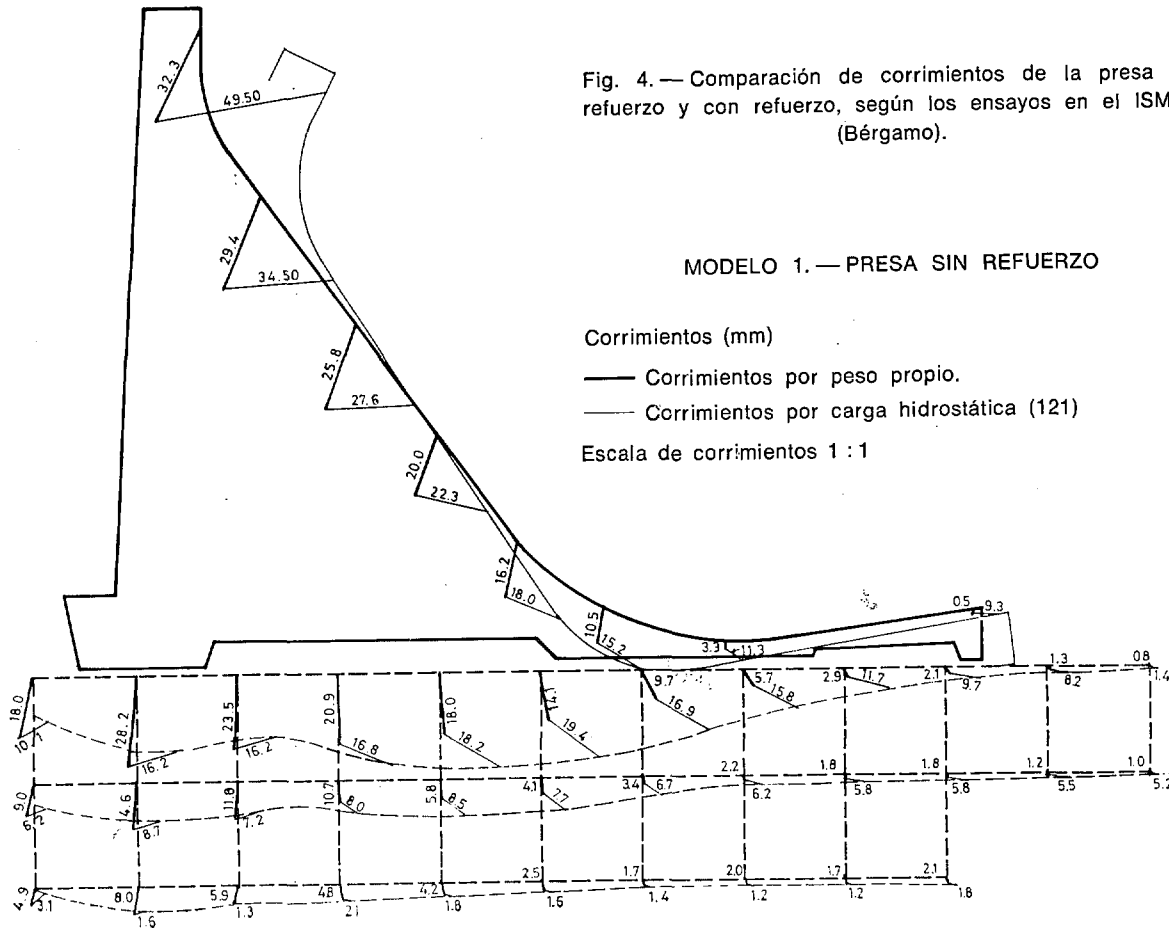
MODELO 1.—PRESA SIN REFUERZO

Corrimientos (mm)

— Corrimientos por peso propio.

— Corrimientos por carga hidrostática (121)

Escala de corrimientos 1 : 1



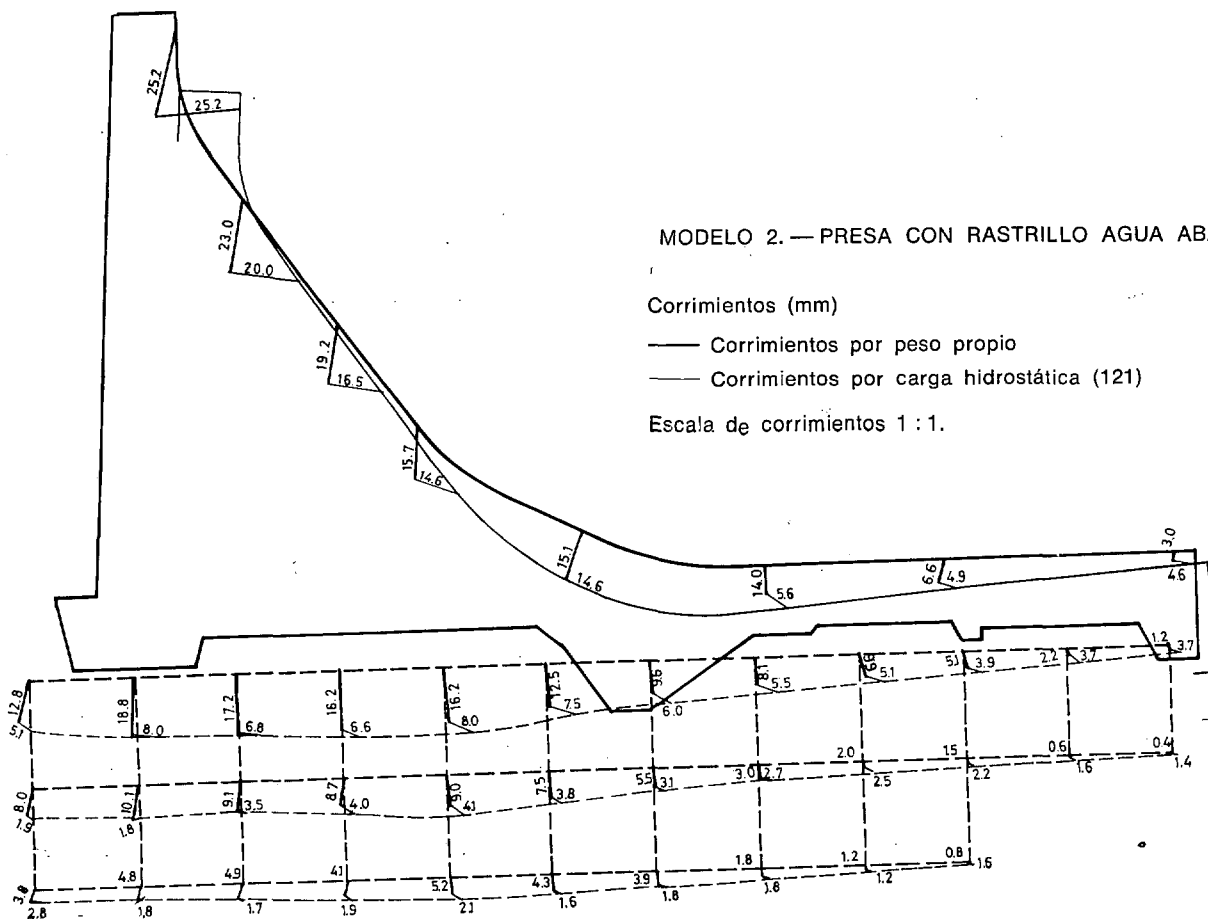
MODELO 2.—PRESA CON RASTRILLO AGUA ABAJO

Corrimientos (mm)

— Corrimientos por peso propio

— Corrimientos por carga hidrostática (121)

Escala de corrimientos 1 : 1.



cias al corte en la junta superiores a las del hormigón continuo, siempre que la formulación resina-endurecedor sea estudiada adecuadamente para evitar que la diferencia de retracción entre hormigón nuevo y resina no introduzca fisuraciones en las proximidades del contacto.

El aumento de coste de los dispositivos preparatorios para un ulterior recrecimiento no suele ser excesivamente importante y en cualquier caso el ahorro en la solución final es evidente. Sólo cuando ésta es muy dudosa o muy remota, podría no estar justificado ese aumento de obra y dejar para cuando se produzca el recrecimiento el adoptar la solución más conveniente.

Se comprende que esta solución de recrecimiento de talud tenga sus límites, pues no es admisible hacer una obra adicional más que cuando ésta tiene un ancho su-

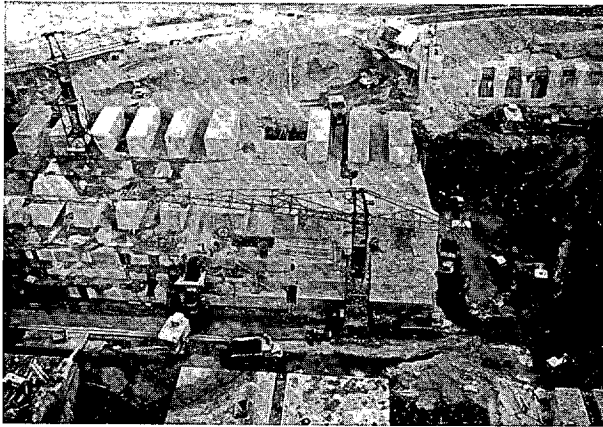


Fig. 5. — Presa de Mequinenza. Una fase del hormigonado del refuerzo.

ficiente y sobre todo unas ciertas proporciones con la presa. En cada caso habrá que estudiar la distribución de los esfuerzos y ver qué ancho resulta, pero en principio diremos que no parece adecuada esta solución para espesores de hormigón menores de 5 m (lo cual equivale a un recrecimiento del orden de 6) y para esbelteces de la capa nueva hormigonada superiores a 8 ó 10.

Todas estas condiciones limitan el uso de este tipo de recrecimiento. Y a todas esas dificultades hay que añadir la necesidad de un recalce de la cimentación de la presa al objeto de ampliarla lo suficiente para la obra adicional. Si, además, la presa es vertedero (como es lo más frecuente) hay que hacer un nuevo cuenco amortiguador, con las consiguientes dificultades suplementarias.

### 3.2. Masa añadida o cables pretensados.

Para obviar los inconvenientes del recrecimiento del talud agua abajo, puede emplearse en muchos casos una masa adicional de hormigón que, convenientemente colocada, resuelva el problema.

La masa de hormigón añadida a la presa en su parte superior tiene las siguientes ventajas indudables:

- Reduce al mínimo indispensable el retoque de la presa existente, pues basta la demolición de la parte superior de la presa antigua en el grado necesario para poder asentar la masa nueva. Esto es muy importante siempre, pero mucho más aún en presas antiguas en las que el hormigón o las juntas de contracción pueden no haber sido debidamente ejecutados y tener una débil dosificación y resistencia.
- Evita retoques de cimentación que siempre representan una operación peligrosa para la presa existente, máxime cuando presuponemos que ésta tiene que seguir funcionando en carga con las menores limitaciones posibles para el funcionamiento del embalse.
- Debidamente estudiada su colocación, introduce el menor cambio posible en el plexo tensional de la presa anterior.
- Es un procedimiento barato y rápido, puesto que el hormigón se emplea en masa, pudiendo usar maquinaria pesada y siendo esta operación hasta cierto punto independientemente del funcionamiento del embalse.
- Sus efectos son seguros, bien determinados y permanentes, dado que se basan en la gravedad.

Todas estas ventajas exigen como premisa la colocación adecuada de la masa, la cual ha de cumplir fundamentalmente las siguientes exigencias:

- Su peso debe ser tal que se cumplan las condiciones de estabilidad al deslizamiento.
- La masa debe estar colocada de forma que el reparto de tensiones sea el adecuado. Esto exige que tanto para embalse vacío como para embalse lleno no existan tracciones. Estas dos condiciones son en cierto modo antagónicas, puesto que la primera aconsejaría alejar y la segunda acercar la masa lo más posible al paramento agua arriba. Para cumplirlas y resolver el antagonismo, hay que estudiar cuidadosamente la distribución de masas, lo cual sue'e llevar a formas en voladizo tanto agua arriba como agua abajo, como veremos en los ejemplos.

Otra condición puede ser exigible en la mayor parte de los casos: permitir el vertido sobre la presa. A estos efectos, la nueva masa puede plantear una cierta dificultad. Ya veremos en uno de los ejemplos prácticos (Ulldona) cómo se ha resuelto perfectamente, tanto en su aspecto funcional (el vertido) como en el estético. Creemos que esta solución que luego describiremos (y de la que no conocemos precedentes), es perfectamente aplicable en muchos casos.

El límite de este tipo de solución está dado por la capacidad resistente de la sección inferior de la presa antigua, que se mantiene en la nueva. Se comprende que al pasar el recrecimiento de una cierta altura no sea posible conseguir que la compresión máxima no pase del

límite soportable por la roca de cimentación, lo que ya depende directamente de la magnitud del recrecimiento y de las dimensiones de la base de la presa antigua, así como de la capacidad portante o tensiones admisibles para la roca.

Todo lo dicho en los párrafos anteriores es aplicable al caso de refuerzo con cables pretensados, ya que esencialmente no difiere en cuanto a solución estructural. Tienen la indudable ventaja de la rapidez de ejecución, de su costo, cada día menor por tonelada transmitida, y de

diferentes, por serlo los valores de las tensiones verticales necesarias en cada uno de ellos y las condiciones de las fábricas anteriores. Estos casos son: un refuerzo (Mequinenza) y dos recrecimientos (El Sancho y Uildecona).

El problema técnico de los refuerzos es similar al de los recrecimientos, aunque el motivo funcional sea distinto, pues en éstos la reforma está motivada por una ganancia en la producción, mientras que el refuerzo se hace para poder mantener la utilidad de una obra que de otra forma peligraría en mayor o menor grado.

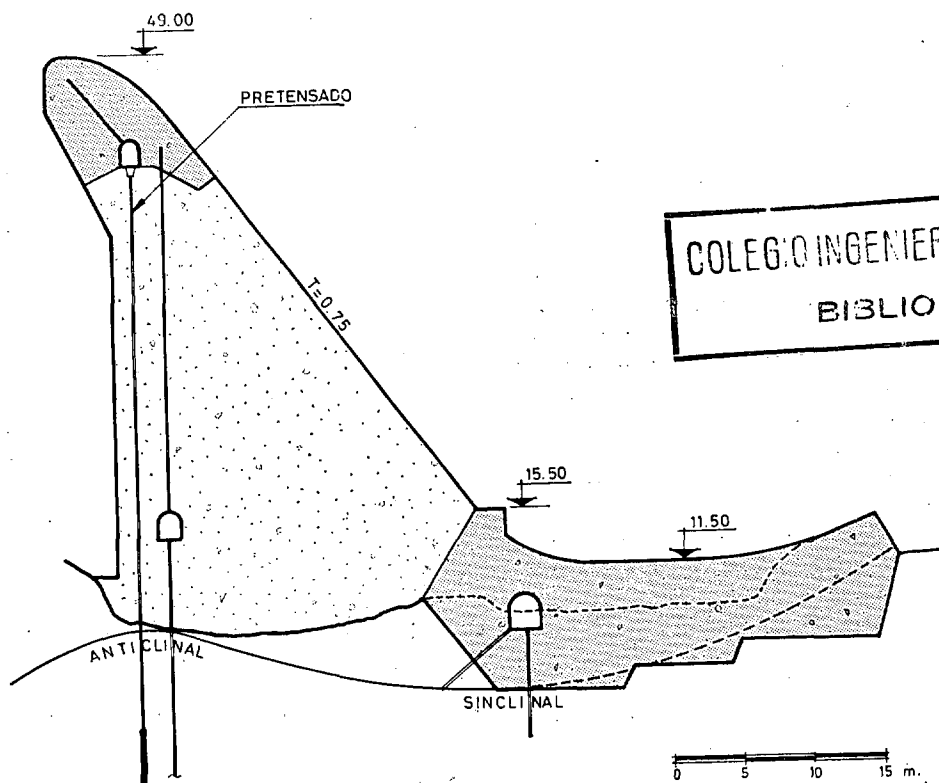


Fig. 6. — Presa del Sancho. Sección del recrecimiento por el aliviadero.

permitir situar el centro de gravedad de la carga muy próximo al paramento agua arriba. Sus inconvenientes fundamentales son, aparte la limitación de carga a transmitir, de la que ya hablamos, límite que se encuentra por bajo del relativo a los casos de empleo de masa de hormigón, la necesidad del control, entretenimiento y revisión de los cables y su tensión durante la vida de la obra. En el caso de Cheurfas, es bien conocido el refuerzo de la antigua pantalla de cables realizado treinta años después de su ejecución primera.

#### 4. REFUERZO DE LA PRESA DE MEQUINENZA

Para ilustrar las ideas anteriores, vamos a pasar revista a tres casos característicos que hemos vivido, en los que las soluciones adoptadas han sido conceptualmente

No podemos aquí hacer una descripción detallada del refuerzo de la presa de Mequinenza, porque no lo permite el espacio disponible ni es el objeto de este artículo. Por otra parte, ya ha sido tratada con cierta extensión en otros trabajos anteriores (\*). Aquí reseñaremos la esencia del problema y su solución.

La presa de Mequinenza tiene una altura sobre cimientos de 77 m, es de tipo gravedad, con un vertedero central de seis vanos de  $14,50 \times 15,50$  m de compuertas Taintor para una descarga máxima de  $11.000 \text{ m}^3/\text{seg}$ . En su estribo izquierdo tiene una central hidroeléctrica

(\*) Water Power, March 1971: "Strengthening the Mequinenza dam to prevent sliding", by Prof. Dr. Eng. E. Vallarino and Prof. Dr. Ing. A. Alvarez (autores, asimismo, del proyecto de este refuerzo). Gete-Alonso, Proceedings, Ninth International Congress on Large Dams, Report C9.

de 310 MW con una producción media de 814 GWh, propiedad de la Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana (ENHER) (fig. 1).

Estando muy avanzada la construcción de la presa (figura 2), se comenzó a sospechar que su cimentación podría tener unas características inferiores a las que habían sido consideradas al proyectarla y, consiguientemente, se dudaba sobre su estabilidad al deslizamiento. La roca de cimentación estaba formada por una serie de estratos de caliza prácticamente horizontales, con intercalaciones de margas y lignitos, estos últimos de un espesor de algunos centímetros, pero que constituían planos de debilidad y de presunto deslizamiento.

En consecuencia, se organizó una campaña de toma de características del terreno *in situ* entre las cuales unas medidas de resistencia tangencial en varios bloques, uno de ellos de 4 x 4 m. Con ello se llegaron a conocer mejor los coeficientes mecánicos de las capas intercaladas, que dieron para el lignito de 0,6 a 0,7 para el coeficiente de rozamiento interno ( $\text{tg } \phi$ ) y de 0,5 a 0,7 Kg/cm<sup>2</sup> para la cohesión.

Con estos coeficientes, y teniendo en cuenta la subpresión probable, el coeficiente de seguridad, aunque superior a la unidad, se consideró insuficiente y se decidió un refuerzo de la presa.

Se eliminaron varias soluciones, como el refuerzo por cables (que resultaba muy oneroso y presentaba además el inconveniente de la permanencia de su tensión, dada la plasticidad de las capas intercaladas entre los estratos de caliza); una traviesa longitudinal por debajo de la cimentación de la presa (que presentaba serios inconvenientes de construcción y una gran dificultad en evitar concentraciones de esfuerzos, así como para la unión con el resto de la presa). Y se llegó a una solución original que pareció la más lógica y que tuvo universal aceptación, tanto por la empresa propietaria como por los organismos inspectores oficiales.

El refuerzo consistió, en esencia, en una obra prácticamente externa en la presa, al objeto de debilitar al mínimo sus cimientos y su propia estructura, y agua abajo, puesto que la obra estaba muy adelantada (con su altura definitiva en casi toda su longitud) y tenía un cierto embalse agua arriba que podía incluso subir si ocurrían crecidas importantes.

El refuerzo (fig. 3) consistió en una gran pieza en forma de L con un lado horizontal largo y otro vertical más corto hincado en el terreno (rastrillo). Esa pieza tiene sus elementos de un grueso suficiente (la horizontal un mínimo de 8 m de espesor) para asegurar la debida transmisión de esfuerzos y añadir una masa pesante que contribuya a la estabilidad. Además, el rastrillo profundiza en la roca otros 8 m, con lo cual, a los efectos de deslizamiento, cuenta con la resistencia pasiva de los estratos horizontales hasta esa profundidad. La nueva construcción se une a la anterior por su pie agua abajo, exigiendo únicamente un corte en el pie de la presa anterior, al objeto de establecer debidamente la unión y dar al contacto de ella con el rastrillo una superficie sensible-

mente normal a las isostáticas de embalse lleno, con objeto de facilitar la transmisión de esfuerzos. El conjunto trabaja como una especie de anclaje grueso al pie de la presa, proporcionando a ésta una reacción superior a la que tenía y, por tanto, un momento contrario al del empuje del agua, contribuyendo a estabilizar las fuerzas y mejorando muy sensiblemente la resistencia al deslizamiento —objetivo principal— gracias al aumento de peso de la propia obra adicional, al de los estratos que vienen afectados por el rastrillo y a la resistencia de estos estratos a la compresión longitudinal.

Al propio tiempo que se conseguían todos estos efectos de tipo mecánico, se aprovechó la obra para dar mayor longitud al cuenco de amortiguamiento al pie de la presa, cuyo caudal a amortiguar es de 11.000 m<sup>3</sup>/seg.

El proyecto se hizo calculando la estabilidad de la presa y los nuevos esfuerzos, y casi simultáneamente se procedió a una serie de ensayos en modelo reducido (Laboratorio Central de Ensayos de Materiales de Construcción, de Madrid; Universidad de Sheffield e Imperial College de Londres (UK), e ISMES de Bérgamo, Italia). En los modelos reducidos en este último laboratorio se obtuvieron los resultados finales, reproduciendo las condiciones de los estratos y sus intercalaciones. Se observó un aumento notable del coeficiente de estabilidad al deslizamiento (conforme a lo previsto en los cálculos), que alcanzó alrededor de 4 con la carga máxima del embalse. Al propio tiempo se observó un efecto derivado del momento de reacción negativa a que antes hemos hecho referencia: no sólo se modificaron favorablemente las condiciones frente al deslizamiento, sino que el reparto de cargas con embalse lleno se mejoró notoriamente, disminuyendo las compresiones en el pie de agua abajo y aumentando las del pie de agua arriba (fig. 4), con el consiguiente alivio en la cimentación y el correlativo mejoramiento de las condiciones de impermeabilidad agua arriba, que a su vez repercutían en una mejora de la subpresión efectiva (aunque esta mejora no fue tenida en cuenta).

Además de hacer el refuerzo, se sometió la cimentación a un drenaje intenso, perforándose una galería longitudinal (paralela a la coronación) unos 25 m por debajo del cimientto. En ella se instalaron seis bombas (con un coeficiente de seguridad de tres respecto al estrictamente necesario) al objeto de asegurar la extracción de agua filtrada y el perfecto drenaje de la cimentación agua abajo del plano de galerías, que se reforzó también con una serie de drenes. Y, por supuesto, se establecieron galerías en las juntas de construcción de la nueva obra y en el interior de los rastrillos. A pesar de ello, se consideró la hipótesis de un fallo del sistema de drenaje, resultando un coeficiente de seguridad satisfactorio.

La zona de la central no era susceptible de una solución como la descrita y, además, sus condiciones eran mejores, por lo que se reforzó con cables y se drenó con intensidad similar. También fue ensayada en modelo reducido.

El refuerzo se ha comportado perfectamente, estando



la presa en explotación normal desde 1966 (fig. 1). La construcción planteó una serie de problemas de gran interés (ataguado de la zona, precortes de la roca y la estructura antigua, estudio de las fases de construcción para lograr una carga sucesiva y lo más uniformemente posible de los estratos, etc.) que no podemos incluir en este texto.

## 5. PRESA DE EL SANCHO

El recrecimiento de la presa de El Sancho es un ejemplo de solución mixta con utilización de peso de hormigón y cables pretensados.

Esta presa de gravedad de planta recta fue construida en los años cincuenta para abastecer la fábrica de Celulosas de Huelva. El año 1971 la ampliación de la factoría obligaba a duplicar el consumo de agua, y se decidió como solución más conveniente el recrecimiento de la presa en 5 m.

La presa primitiva tenía una altura sobre cimientos de 45 m con tres vanos de aliviadero controlados mediante compuertas de  $12 \times 4$  m, y 2 m de resguardo que permitía laminar un caudal de avenida de  $1.380 \text{ m}^3/\text{segundo}$ . Los taludes, tanto en zona de aliviadero como de estribos, son de 0,75 agua abajo y vertical agua arriba.

La cerrada está constituida por formaciones del carbonífero con alternancias de pizarras, grauwacas y areniscas, formando un anticlinal que corta oblicuamente al eje de la presa y un sinclinal casi paralelo a éste, situado a unos 40 m agua abajo (fig. 6).

La resistencia mecánica varía, como es lógico, según se trate de pizarras, grauwacas o areniscas, y según el estado de diaclasación de las mismas, pero constituía un peligro potencial de deslizamiento la discontinuidad correspondiente al sinclinal relleno de material arcilloso.

### 5.1. Bases del proyecto de recrecimiento.

Aparte de las condiciones normales impuestas a cualquier tipo de recrecimiento, en este caso coincidían las siguientes peculiaridades:

- Necesidad de realizar la obra en el menor tiempo posible (julio de 1971 a verano de 1972), habida cuenta que se trataba de un embalse en explotación normal al iniciarse las obras, y en explotación acelerada a partir del verano de 1972, coincidiendo con la ampliación de la factoría.
- Afectar lo menos posible a los cimientos, aprovechando la época de estiaje para realizar los trabajos de recalce, y evitar, en consecuencia, los vertidos durante las obras. (Esto obligó a hacer este recalce prácticamente durante el estiaje de 1971.)
- Afectar lo menos posible, y a las cotas más altas posibles, los paramentos de la presa y, sobre todo, del aliviadero, para no tener que bajar el embalse por causa de las obras.

- Concentrar el mayor número de tajos en la zona de coronación de la presa, permitiendo embalsar a partir del otoño de 1971 con una mínima utilización de los desagües de fondo.

La solución adoptada afecta únicamente a lo que pudiéramos llamar la superestructura de la presa y los cimientos del aliviadero, permaneciendo intactos el cuerpo central y los paramentos de la misma (\*).

### 5.2. Descripción general de la solución adoptada.

En la zona de estribos, las tensiones verticales necesarias para cumplir el doble objetivo de estabilidad al deslizamiento y anulación de tracciones en el paramento de agua arriba, se consiguieron por medio de una cabeza de hormigón con voladizos descompensados, de forma que el centro de gravedad está suficientemente desplazado hacia agua arriba para asegurar el mencionado estado de compresión en el paramento y, al mismo tiempo, no tan desplazado que se produzcan tracciones a embalse vacío agua abajo. Con esto quedaba asegurada la zona de estribos, sin tocar los taludes ni los cimientos (fig. 7).

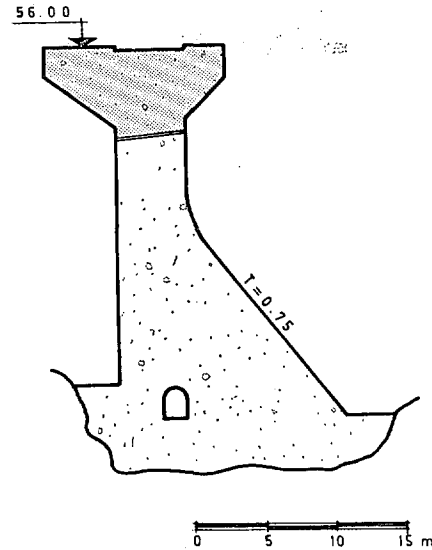


Fig. 7. — Presa del Sancho. Sección del recrecimiento por los estribos.

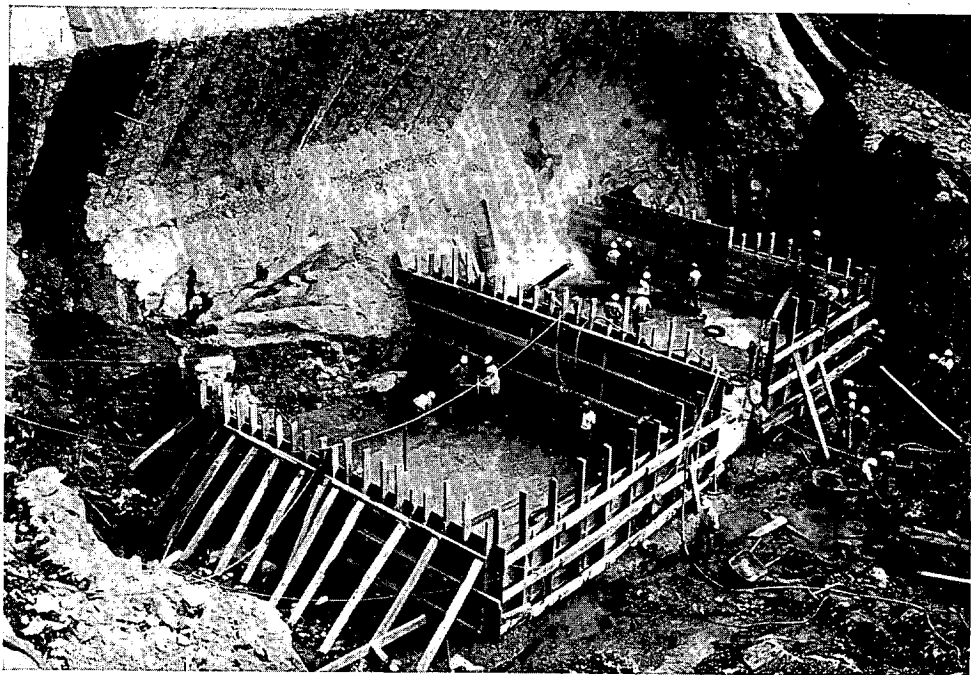
En la zona de aliviadero el problema se agravaba por las razones siguientes:

- Al tratarse de la zona de mayor altura, los momentos en la base debidos a la carga hidrostática aumentan de forma considerable, ya que varían con la potencia 3 de la carga de agua.
- La existencia en el cimiento del anticlinal-sinclinal relleno de material con bajo rozamiento y cohe-

(\*) Autores del proyecto de recrecimiento: Ings. Alvarez, Baztán, Cristóbal y Fernández Moreno.



Figs. 8 y 9.— Presa del Sancho. Obra de recalce al pie del aliviadero.



sión, materializa, como puede verse en la figura 6, una línea potencial de deslizamiento, más desfavorable que la línea de contacto presa-terreno.

- La existencia de los vanos del aliviadero supone una disminución de peso respecto del que tendría la sección triangular teórica.

Los cálculos de estabilidad confirmaron que la estabilidad al deslizamiento quedaba asegurada, salvo en el interbanco de sinclinal más superficial. Se resolvió estableciendo un talón de recalce de cimiento con disposición de juntas y contorno normal a las isostáticas, deducidas

tecimiento a la factoría, se proyectó absorber las tracciones mediante pretensado de cables junto al paramento agua arriba.

La tensión necesaria era de 145 Tm/m con plano de cables situado a 1,50 m del paramento mojado.

### 5.3. Algunas características de la obra.

Aunque se sale del tema fundamental de este artículo, creemos interesante reseñar algunos datos de la obra realizada, por lo que tienen de peculiares o privativos de este tipo de construcciones.

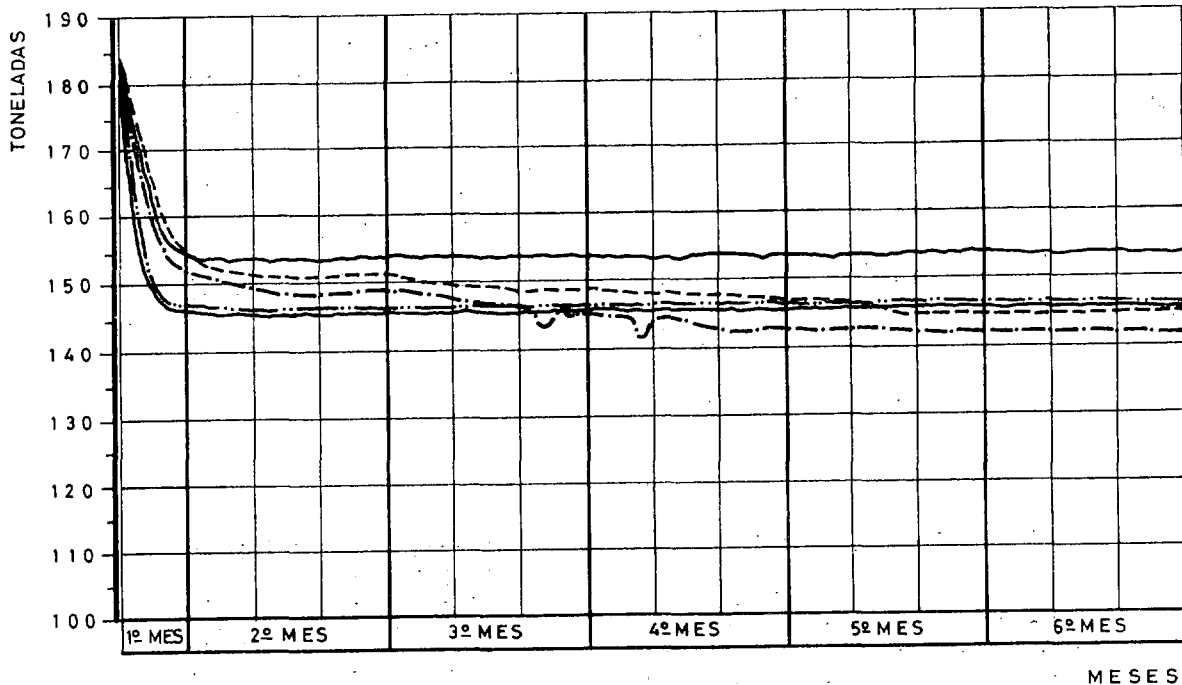


Fig. 10. — Presa del Sancho. Variación de la tensión de los cables.

de un cálculo en computador por el método de elementos finitos (\*). Este relleno de hormigón y recalce del cimiento cortaba la discontinuidad del anticlinal-sinclinal, dejando inactivo el posible deslizamiento a través de aquél.

Quedaba por resolver el problema de la absorción de tracciones en el paramento de agua arriba. La necesidad de mantener la anchura de vanos de aliviadero y aprovechar las antiguas compuertas en la presa recrecida, impedían jugar con vanos más estrechos y de mayor altura de lámina que hubiera supuesto pilas intermedias más gruesas y, por tanto, en un incremento de peso.

Como, por otra parte, el plazo de obra no permitía, como hemos dicho, soluciones que afectaran al paramento agua abajo del aliviadero, y mucho menos vaciados parciales de embalse que disminuyeran la garantía de abas-

Todas las demoliciones de la zona de coronación de la obra antigua se realizaron con la técnica del precorte, simple o amparado, según los casos, salvo en la zona de las antiguas pilas, en la que su fuerte armadura transmitía la fisuración a cotas inferiores a las previstas, y se terminaron demoliendo con martillo picador.

Las uniones entre hormigones antiguo y nuevo, aparte de la armadura de transmisión, se trataron mediante resinas epoxi con una formulación tal, que se evitara la fisuración del hormigón nuevo al retraer por contraste con la lámina de resina que, como se sabe, no tiene retracción.

La excavación para el recalce de cimientos se realizó mediante precorte con relleno de la junta entre hormigones en varias fases, con inyección a 10 Kg/cm<sup>2</sup>, de forma que se asegurara la transmisión permanente de tensiones (figuras 8 y 9). La dificultad principal radicó en que este

(\*) Según la teoría desarrollada por Zienkiewicz.

recalce había que hacerlo en plazo muy reducido (la parte fundamental en el verano de 1971), con peligro de vertido antes de tenerlo terminado.

Después de este recalce tan justo de plazo, el aspecto más delicado de la obra era el refuerzo con cables pretensados. Se realizaron 60 perforaciones de 60 m de longitud, cuya desviación máxima de la vertical fue inferior a medio grado centesimal, salvo en dos taladros en que se llegó a un grado centesimal, valores que pueden considerarse como extraordinariamente buenos. La verticalidad de taladros se controló fotográficamente a diferentes profundidades.

Los cables, tipo Freyssinet, se tensaron a 185 Tm, teniendo en cuenta las pérdidas de fluencia y las de

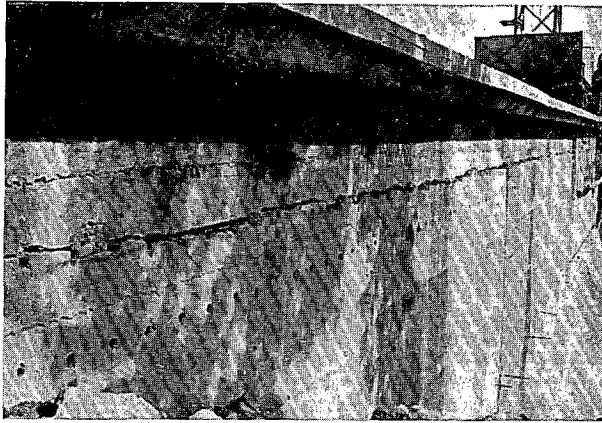


Fig. 11. — Presa del Sancho: precorte.

acomodación plástica de la roca en el empotramiento. Cinco de los cables se han controlado mediante células dinamométricas Telemac. Los resultados de este control, desde su primer tensado, vienen reflejados en la figura 10. Como puede verse, en tres de ellos, correspondientes a la margen izquierda, la estabilización fue relativamente rápida comparada con la de los situados en margen izquierda, en los que los efectos del anticlinal ya se esperaba influieran en la fluencia lenta del cimientó frente a la tensión de los cables.

## 6. PRESA DE ULLDECONA

Este caso constituye un claro y original exponente de recrecimiento basado en peso adicional de hormigón, tanto en zona de estribos como en la de aliviadero. Aunque la obra aún no se ha iniciado, el proyecto está ultimado y realizado por los autores, que han prestado su colaboración a la Confederación Hidrográfica del Júcar en este tema.

La presa, prevista antes del recrecimiento, tenía 60 m de altura, aunque la obra actualmente no está terminada,

pues se detuvo cuando los bloques de aliviadero llegaron a la iniciación del perfil Creager. Los bloques de estribos se construyeron hasta coronación.

El proyecto de recrecimiento tiene por objeto aumentar la cota de máximo embalse normal en 6 m respecto de la prevista en el proyecto primitivo.

Las características geométricas y las secciones transversales de la presa existente son diferentes en la zona de estribos y en la zona de aliviadero. En las secciones de estribos el talud agua arriba es 0,05 y el de agua abajo 0,835. En el aliviadero, el talud agua arriba es 0,05 y el de agua abajo 0,70. Como la presa se construyó sin utilizar encofrado, sustituyéndolo por una mampostería embebida en el perfil teórico resistente, puede decirse que, a efectos tensionales, el perfil de presa es inferior al previsto para la misma cota de agua.

Por otra parte, el hormigón que constituye el cuerpo de presa tiene unas características de densidad algo inferiores a las normales y que hemos podido fijar en 2,1 Tm/m<sup>3</sup> como media.

Desde el punto de vista geológico, la cerrada está constituida por paquetes calizos con un buzamiento constante de 10° hacia agua arriba, siendo la línea de máxima pendiente sensiblemente paralela a la dirección del río, por lo que su disposición es favorable a la transmisión de empujes de la presa.

Para estudiar la solución más conveniente, se determinó el incremento de componente normal vertical que por metro lineal sería necesario para cumplir los coeficientes prescritos por la Instrucción de Grandes Presas.

En la zona de aliviadero la componente vertical por metro lineal de presa, para llegar a los coeficientes de seguridad requeridos, es de 684 Tm/m, mientras que en la zona de estribos es de sólo 94 Tm/m.

Como puede observarse por los valores deducidos para las componentes normales necesarias en la zona del aliviadero, nos encontramos con una situación que claramente se sale de las posibilidades de utilización de cables pretensados, cuyo límite en las presas recrecidas por este procedimiento está muy por bajo del tonelaje necesario en este caso. Vemos de forma cuantitativa y clara cuál es la incidencia de una baja densidad de la fábrica existente en los límites de aplicación de la solución de cables pretensados. Una solución de este tipo en la zona de aliviadero debe eliminarse debido a que:

- a) La densidad de cables resulta excesiva.
- b) Las perforaciones quedarían muy próximas.
- c) Los puntos de anclaje del terreno crearían zonas masivas de posible plasticidad con fuertes pérdidas de tensión.
- d) La fábrica de hormigón antigua, cuyas características resistentes están en correspondencia con la baja densidad, no admitiría tales esfuerzos concentrados en las zonas próximas al anclaje.

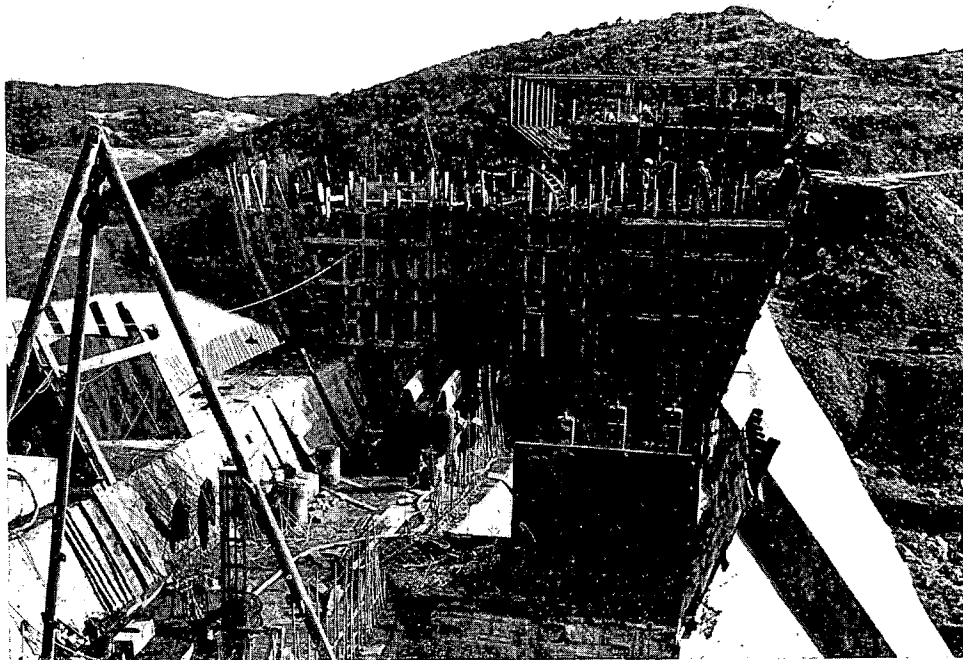


Fig. 12. — Presa del Sancho: encofrado de la cabeza.

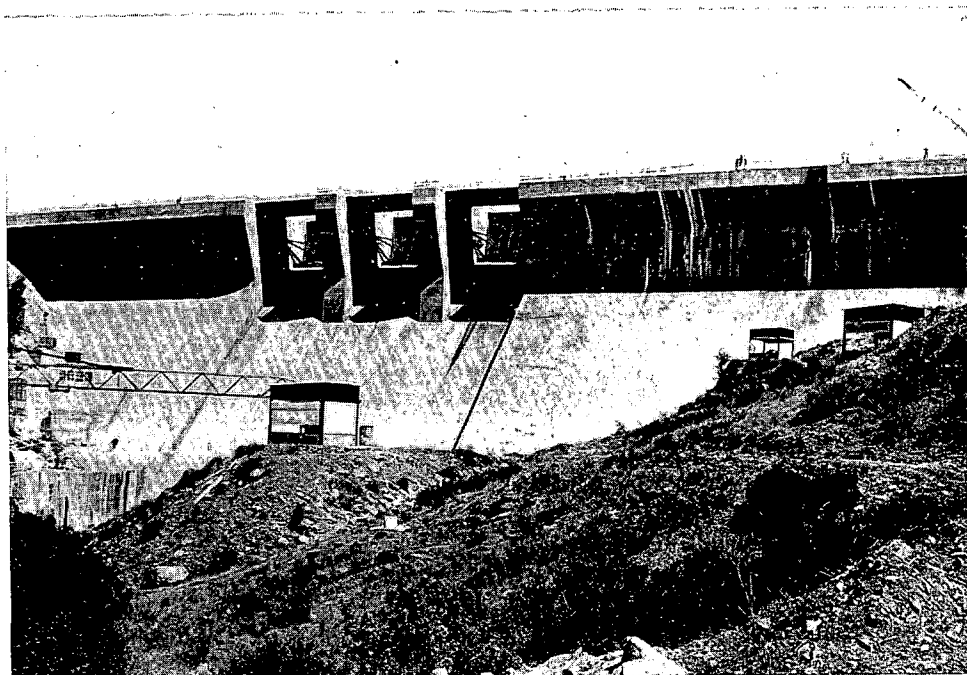


Fig. 13. — Presa del Sancho: recrecimiento terminado.

En definitiva, y como consecuencia de todas estas razones, nos pareció la más adecuada conseguir las componentes normales adicionales mediante peso de hormigón convenientemente distribuido.

Por otra parte, esta solución, siempre que sea factible, es la que resuelve el problema de forma definitiva y más segura, ya que la densidad del hormigón es prácticamente fija, mientras que las tensiones de los cables pueden variar sensiblemente por diversas causas y exigen un entretimiento y control continuos a lo largo de la vida de la obra, como ya hemos dicho al tratar del problema genérico. (Recuérdense también los inconvenientes que presentan los recrecimientos de taludes.)

En consecuencia, nos decidimos por estudiar una solución de recrecimiento que cumpliera las siguientes condiciones:

- Concentrar en lo posible la obra en las cotas altas para evitar un vaciado del embalse.

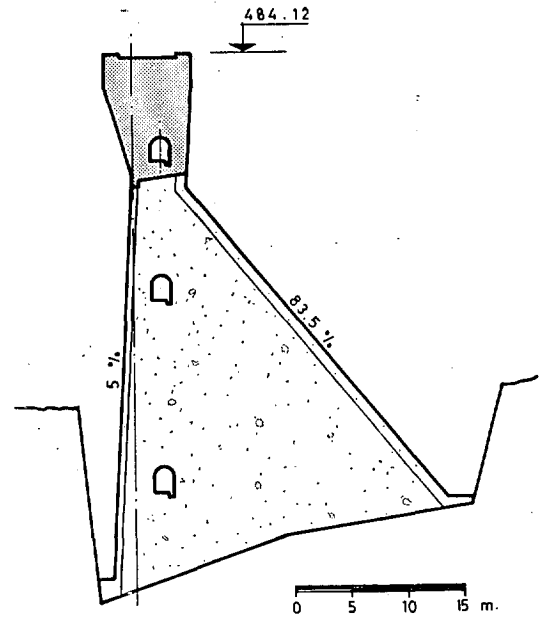


Fig. 14. — Presa de Uldecona: recrecimiento de estribos.

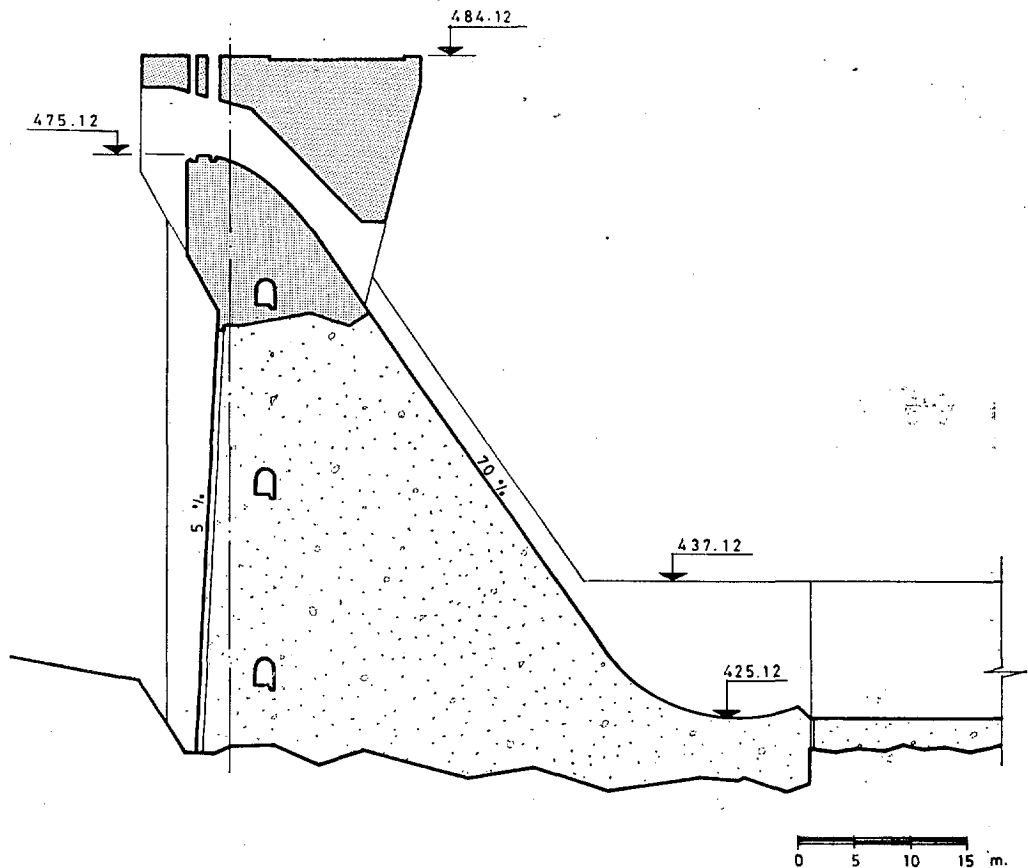


Fig. 15. — Presa de Uldecona: recrecimiento del aliviadero.

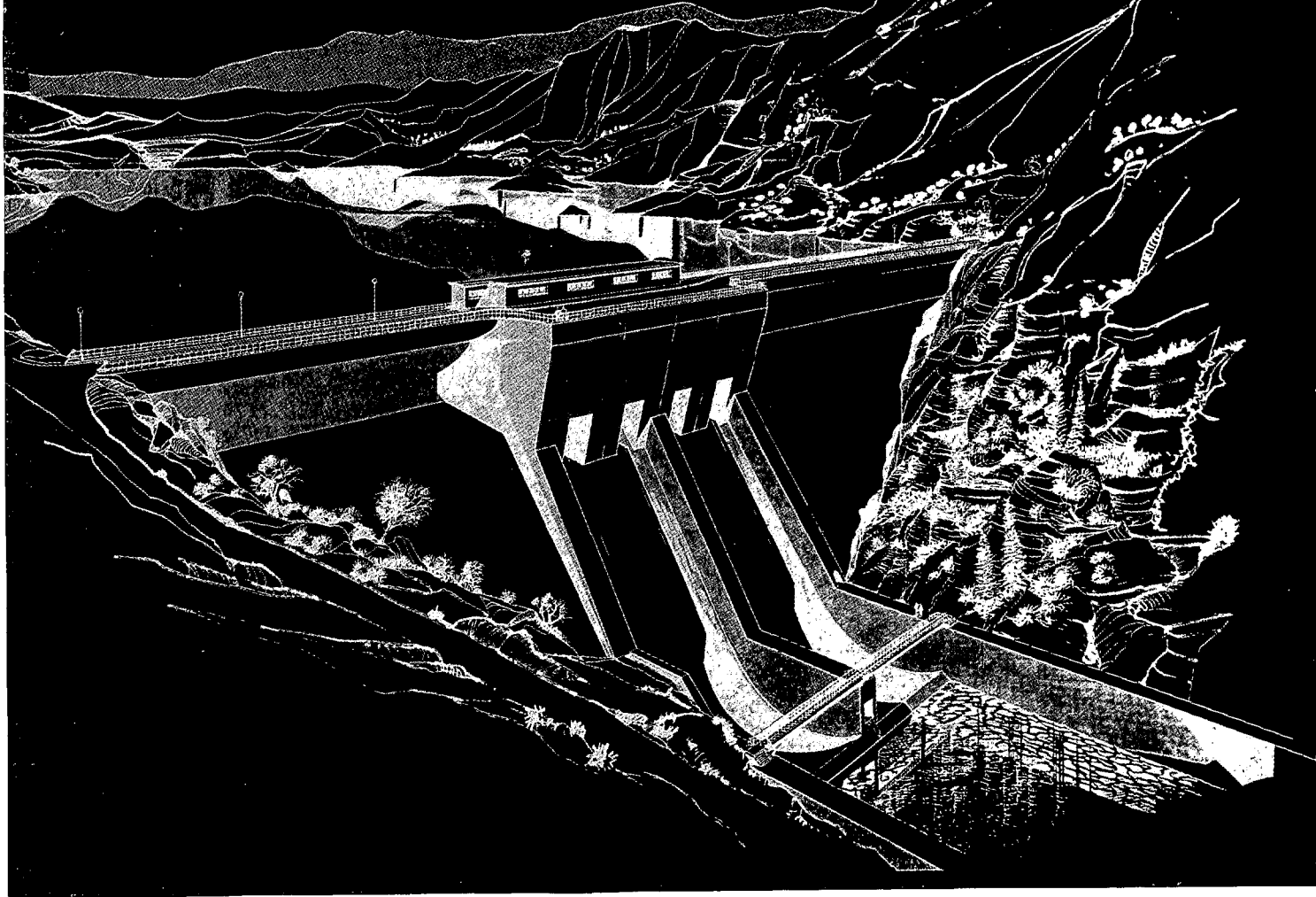


Fig. 16. — Presa de Uildecona: perspectiva de la presa recrecida.

- Procurar que la solución de recrecimiento afectase de forma mínima al hormigón actual, cuyas características en algunas zonas podrían considerarse dudosas.
- No recalzar en lo posible los cimientos para evitar las uniones entre hormigones en zonas de esfuerzos importantes, ya que las diferencias de calidad y rigidez (que no se daban en el caso de la presa de El Sancho) crearían una distensión en las redes isostáticas, con las consiguientes tensiones tangenciales de importancia en la junta entre hormigones de diferente edad.
- No utilizar el pretensado como solución básica por las razones antes apuntadas, pero preverlo como terapéutica en zonas de mayor debilidad o en juntas que pudieran abrirse tras la demolición, para asegurar la transmisión de esfuerzos tangenciales.

Como se desprende de las necesidades cuantitativas de componentes verticales deducidas para cada zona, es

muy diferente la solución dada a los bloques de estribos que a los bloques de aliviadero.

En los estribos el recrecimiento no ofrece dificultades, pues se trata de conseguir un peso adicional de 94 Tm/m. La solución dada, como puede verse en la figura 14, es de cabeza de hormigón descompensado hacia agua arriba, tratando de conseguir no sólo el peso necesario para la estabilidad, sino también la anulación de posibles tracciones en el paramento de agua arriba.

En la zona de aliviadero el problema a resolver es mucho más complejo, ya que se trata de conseguir un peso de 684 Tm/m, respetando la necesidad de vertido y el control mediante compuertas.

Como puede verse en la figura 15, la solución dada consiste en disminuir la luz de los vanos primitivos de aliviadero, macizando las zonas intermedias y creando de esta forma unas pilas de 7,25 m de anchura frente a cuatro vanos de sólo 5 m de luz.

Puesto que la disminución de luz de vano se traduce, para evacuar el mismo caudal, en un menor aumento en la altura de compuerta (ya que el caudal de vertido varía

con la potencia  $3/2$  de la altura de lámina y es lineal con la luz de vano), se llega, en nuestro caso, a que cada una de las cuatro compuertas necesitan 5 m de altura para evacuar los máximos caudales de avenida.

Obsérvese que esta solución, posible en el caso de Ulldecona, va íntimamente ligada al hecho de que las compuertas previstas en el proyecto primitivo eran de 12 m de vano por 3 m de altura, relación de dimensiones no usual y que permitía disminuir la luz de vano sin que la altura de lámina controlada por la compuerta llegase a valores excesivos o prohibitivos.

Apoyado en las pilas de separación, se proyecta un macizo de hormigón que permite la evacuación por debajo de él de la lámina vertiente en régimen de lámina libre.

El peso del conjunto formado por este macizo de hormigón y las pilas mencionadas ha permitido conseguir

la componente normal vertical necesaria para la estabilidad, y la distribución geométrica del peso en dichos elementos permite conseguir un centro de gravedad del conjunto tal, que desaparezcan las posibles tracciones en cualquier punto del paramento de agua arriba.

Por último, una de nuestras preocupaciones fue resolver el problema estético sin mengua de lo funcional, pues dado el tipo del recrecimiento, concentrando toda la masa en coronación, la presa podría resultar pesada. El efecto logrado ha sido —creemos— satisfactorio (fig. 16), pues la presa parece tener un desagüe de media profundidad, lo que le da un aspecto al que estamos habituados, cuando en realidad tiene un aliviadero superficial con una masa que queda permanentemente fuera del embalse, circunstancia, esta última, ignorada por el que ve la presa y no conoce su proyecto.