

CONSIDERACIONES SOBRE LA DOBLE CURVATURA DE LA PRESA DEL EUME

Por LUCIANO YORDI DE CARRICARTE,
Ingeniero de Caminos.

Se exponen en este primer artículo las razones que han inducido a adoptar este tipo de presa en la cerrada del Eume, y se anuncia otra con una descripción del proyecto y de los ensayos realizados sobre el mismo.

Vamos, en este primer artículo, a exponer las consideraciones generales que nos han llevado a proyectar la presa del Eume, encuadrándola de lleno en el campo de las presas cúpulas o de doble curvatura, hoy en primer plano de actualidad en la mayoría de los países de Europa, principalmente en Italia y Portugal.

Para ello citaremos en principio el siguiente párrafo del informe de la Asesoría Geológica del Ministerio de Obras Públicas, emitido el 31 de agosto de 1954, sobre el posible emplazamiento de la presa del Eume — y elemento indispensable para nuestro proyecto —; dice así: "Las condiciones del terreno, cuyas características han sido describas en párrafos anteriores, las consideramos en su conjunto favorables y creemos que permitirán la construcción de la presa y aun podríamos añadir que es esta ubicación apta para recibir una presa de tipo bóveda, solución que dadas las circunstancias topográficas del caso, encerraría sin duda considerables ventajas económicas que, desde un punto de vista nacional, no pueden desatenderse cuando se trata de obras de gran envergadura."

Esta base de partida, debida a la naturaleza de la cerrada seleccionada, a la forma de la misma y a la calidad de la roca, unida a la idea de que el considerar la estabilidad de los elementos verticales aislados, como se hace generalmente en las presas de gravedad de planta recta, es para nosotros concepto erróneo al demostrar el estudio de la estructura, que la continuidad horizontal de la presa desempeña un papel tanto más importante cuanto más estrecho es el valle, nos hizo mirar inicialmente con interés la elección de una presa bóveda como lo más conveniente para resolver el problema planteado, teniendo también en cuenta que en estos últimos años hemos asistido a una gran evolución en el proyecto y construcción de las grandes presas de embalse, que han permitido, aun en casos difíciles, ir a soluciones que no hace mucho eran excluidas por las incógnitas que planteaban, obligando a los proyectistas a refugiarse en las presas de gravedad, en las cuales, a pesar del mal rendimiento del material empleado, siempre dejaban su defensa al gran volumen de hormigón, como

si esto fuese una garantía contra posibles eventualidades.

Hoy el panorama ha cambiado, debiéndose fundamentalmente a los siguientes factores, que exponemos a continuación en líneas generales:

a) Los mayores conocimientos actuales en el campo estático, debidos especialmente a los modelos reducidos.

b) A la posibilidad de confrontar los resultados obtenidos en estos modelos con el comportamiento real de la obra puesta en servicio.

c) A la técnica más avanzada que se alcanzó en los procedimientos de impermeabilización y consolidación.

d) A los mayores conocimientos que se tienen de las características del hormigón, que permiten resistencias más altas y uniformes.

e) A la mayor experiencia de las presas bóvedas por la gran cantidad de obras ejecutadas; y

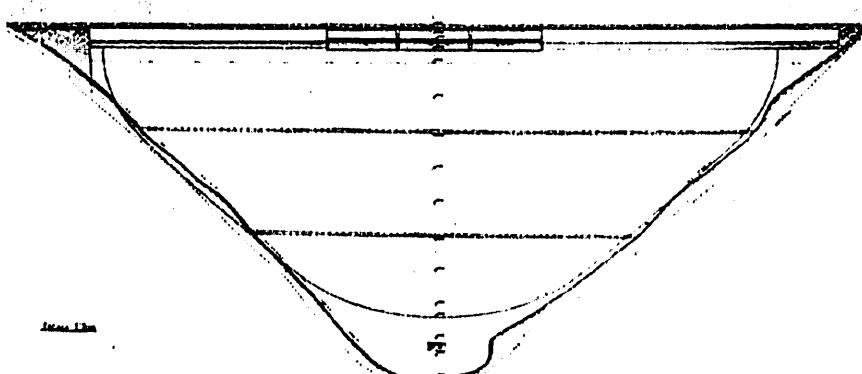
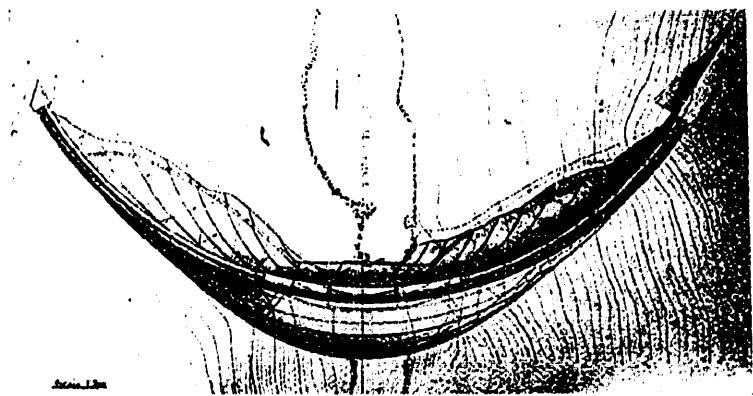
f) A la mayor técnica y organización de las Empresas constructoras, dotadas de maquinaria de obra, en la cual se hicieron últimamente grandes progresos.

Es lógico, por esto, que si gracias a los estudios analíticos y sobre modelos y a la comprobación de efectos sobre obras ya construidas, se alcanzó un mejor conocimiento del comportamiento real de las presas bóvedas, que este conocimiento sirva para proyectar estructuras cuyas solicitudes estén mejor distribuidas y equilibradas, lo que lleva consigo un ahorro de material al aprovecharse mejor el hormigón, sin que ello suponga en forma alguna pérdida de seguridad.

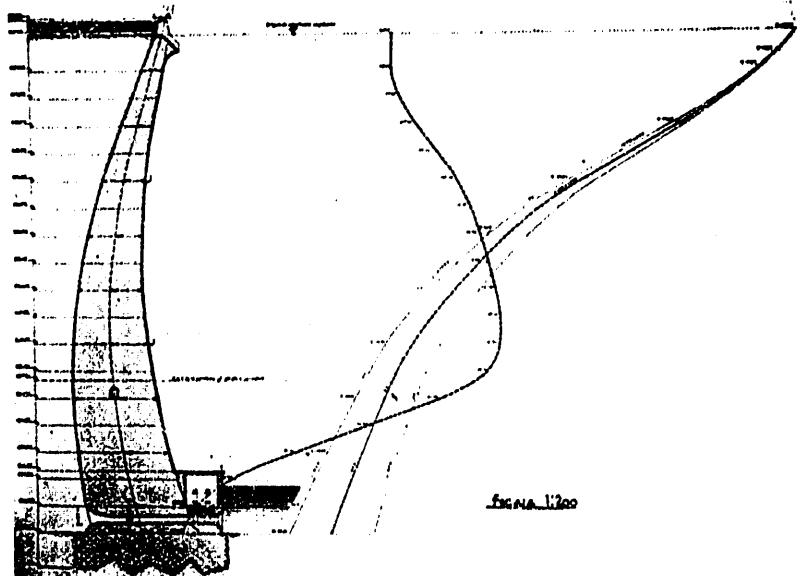
Los estudios realizados, la experiencia adquirida y la mejor técnica de la construcción deben ir a conseguir en las obras que se realicen a partir de ahora una mayor seguridad y un ahorro de material. De no conseguirse lo segundo, el objetivo buscado quedaría mutilado.

A propósito de esto, cito a continuación las palabras pronunciadas por el insigne Ingeniero de Caminos D. Juan Manuel de Zafra, en una conferencia dada el 1.^o de marzo de 1912 sobre los grandes embalses, decía entonces: "Para muchos apegados a lo añejo, el hormigón armado prosigue siendo, como

PLANTA DE LA OBRA



Alzado desarrollado de la presa del Eume por el paramento de aguas abajo.



Sección de la ménsula central de la presa del Eume, de las siguientes características: Altura máxima en el centro, 101 m. Desarrollo del arco de coronación, 230 m. Espesor de los arcos horizontales en correspondencia con la sección central, variables, de 19,60 metros en coronación. Radios de curvatura de la fibra media de los arcos horizontales, variables gradualmente, de 35,50 en la cota 221,50 a 111,0 en la coronación (cota 313).

Aperturas angulares medias de los arcos horizontales. Variables gradualmente de 77° 54' en la base (cota 221,50) al máximo de 138° en la cota 261,50 y desde allí decreciendo lentamente hasta 118° en la coronación (cota 313).

en los primeros días, una resultante de empirismo y de audacia, un arma de dos filos, imposible casi de manejar sin herirse; sus maravillosos éxitos, efectos de pura casualidad; sus grandes fracasos, debidos exclusivamente a sus condiciones intrínsecas.

Para muchos también, poco osados, y el Ingeniero

necesita siempre ser osado (lo que no implica ni imprudencia ni menos temeridad), los muros de embalse de sesenta a ochenta y cien metros, ya construidos algunos, son obras de verdaderos temerarios, ejemplos que terminantemente deben ser proscritos."

Estas palabras sirven de ejemplo para buscar so-

luciones perfectamente controladas *a priori*, que caigan de lleno dentro del campo de la técnica moderna, quedando, además, completadas por la serie de esfuerzos, trabajos y estudios que se hacen en la actualidad en todos los países del mundo para alcanzar obras de costo más reducido, sin pérdida de seguridad con relación a las obras construidas hace años, con un criterio, debido a los escasos conocimientos de entonces, excesivamente conservador.

Concepto general de la presa.

Esta idea nos indujo, en nuestro caso concreto del Eume, a estudiar el proyecto de referencia a base de una presa cúpula o de doble curvatura.

Una presa de arcos con simple curvatura se prestaba mal a cerrar el valle, ya que surgió el inconveniente de tener en la parte alta, debajo de la coronación, arcos de apertura angular limitada, y por ello en condiciones estáticas poco favorables, añadiéndose, además el otro factor en contra de tener solicitudes de tracción inadmisibles, en sentido vertical, o sea a lo largo de las ménsulas, como aclararon los ingenieros italianos en los estudios sobre la presa de Osiglietta.

Además, en la presa de simple curvatura los esfuerzos secundarios operan sobre las generatrices, previstas como vigas rectilíneas, vinculadas al suelo elástico y más o menos encajadas al pie; en la presa cúpula estas ménsulas se sustituyen por otros arcos, que apuntan contra la base y contra una faja o banda superior que forma parte del cuerpo de la presa y termina con el arco de coronación.

Se puede por ello afirmar que el tipo de presa que mejor satisface, sea bajo el aspecto racional y estático, sea bajo el económico, a las condiciones impuestas por la cerrada del Eume, es la de arco con doble curvatura, tipo de obra adaptado con pleno éxito en los cierres de Lumiéi, Valle di Cadore, Val Gallina, Osiglietta, Pieve di Cadore y Vajont, en Italia; Marége, en Francia, y Cabril, Bouça y Salamonde, en Portugal, además de otras de menos importancia.

La presa propiamente dicha es simétrica respecto al plano vertical central, por las conocidas ventajas estáticas que derivan de la simetría, aclarados por recientes indagaciones experimentales sobre modelos, estando delimitada por un realce continuo que tiene doble oficio de repartir los esfuerzos sobre la roca y regularizar la superficie de sustentación.

La curvatura en horizontal se hace obligadamente, para centrar las líneas de presiones de los arcos, de manera que las curvas de nivel del paramento de aguas arriba tengan forma circular, variando los radios con la cota de los arcos y aumentándose el espesor hacia arranques por medio de las curvas de nivel del paramento de aguas abajo, lo que obliga a que existan

dos líneas de centros, una referente al trasdós y otra al intradós de cada arco.

A veces, el paramento de aguas abajo está constituido en cada cota por varios arcos de círculo, formando una especie de cartelas en los arranques de cada arco horizontal o también por "caracoles" de curvación polar:

$$p = a + b (1 - \cos \omega).$$

Respecto a la curvatura vertical, la única consideración que se hacia antes de ahora era la de respetar la estabilidad de los bloques verticales (ménulas), considerados independientes, por un simple problema de tipo constructivo, lo que obliga a veces a centrar la linea de presiones, como en el caso de la presa de Pacoima, con grandes zapatas situadas en la base del paramento de aguas abajo, no dándose importancia mayor a la colaboración del peso propio, para contrarrestar en parte las tracciones verticales originadas por el empuje del agua.

El primero que negó este estado de cosas fué el genio de André Coyne, al proyectar la presa de Marége. En ella se retranqueó en la base, hacia aguas abajo, el paramento de aguas arriba, de forma que bajo la acción del peso propio, se crease un estado de precompresión que neutralizase las tracciones de aquella zona, originadas al aparecer el empuje del agua.

Ahora, en los proyectos últimamente redactados, la curvatura en vertical se da para conseguir descentrar la linea de presiones del peso propio, de tal modo, que en las diversas secciones horizontales exista un estado de tensión vertical que, sumado al originado por el empuje del agua, arroje compresiones. Con esta idea, lo primero que se hizo fué avanzar el paramento de aguas arriba en la base y el de aguas abajo en la coronación, ya que así la curvatura vertical se aprovecha mejor al inclinar el paramento de aguas abajo, pues la continuidad horizontal de la bóveda permite, según el criterio italiano, absorber en régimen de compresiones y descargándolo contra las laderas, parte del peso propio de la cúpula.

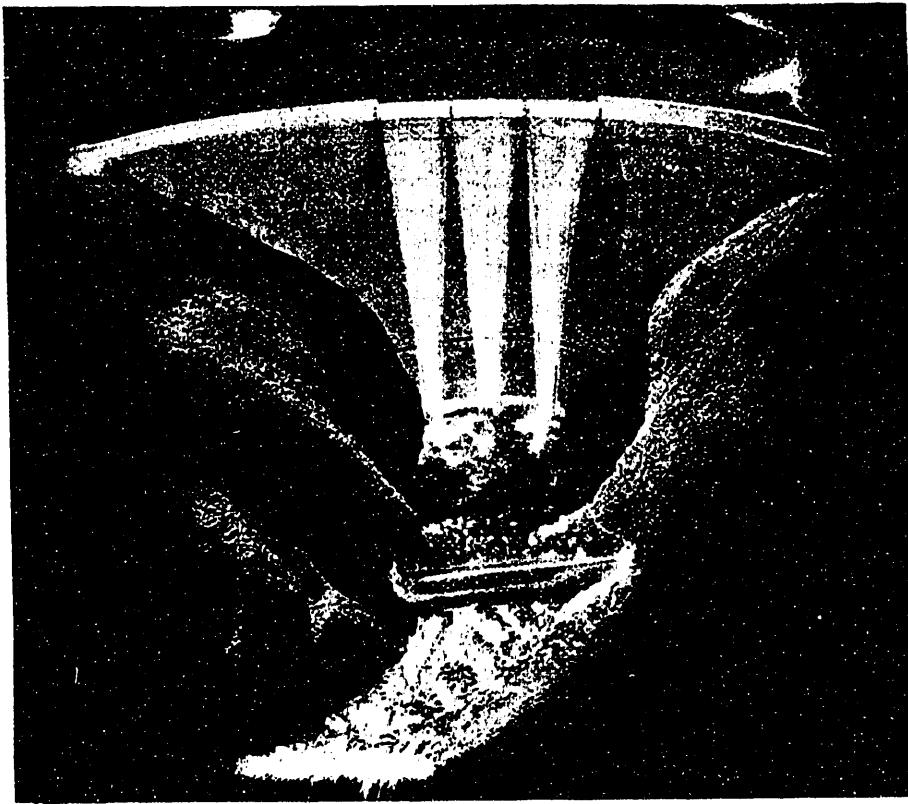
El criterio portugués es más conservador, al tener en cuenta todo el peso propio, sin absorción de parte de él por medio de las laderas. Pero, además, según se demuestra en los ensayos de los modelos reducidos, la curvatura vertical mejora el estado de tracciones en el paramento de aguas abajo, debido al empuje del agua, lo que señala que además de las compresiones que se crean en el paramento de aguas abajo por efecto del peso propio, hay un mejoramiento de la estructura en dicho paramento al apaciguar el empuje del agua, demostrándose así la existencia de dos factores favorables al dar curvatura vertical a la obra en la parte superior de la misma.

Esta disminución de tensiones debida a la curvatura de los elementos verticales, proviene en gran parte, según referencias italianas, relativas a la presa

de Osiglietta, de que estos elementos se aproximan en forma al antifunicular de las cargas por ellos absorbidas.

En general, las estructuras así proyectadas en forma curva están en mejores condiciones que ninguna otra para absorber cualquier sobrecarga; como ejemplos notables existen los citados por Carlo Semenza,

está apoyado en una zona de 25 metros de roca francamente mala, al mismo tiempo que la parte superior de la cimentación hasta coronación y la inferior hasta la base, están en roca buena. Esta situación no negó el proyectar una presa cúpula con óptimos resultados, haciendo que la cimentación del estribo trabaje como puente sobre la roca de baja calidad, lle-



Fotografía del ensayo hidráulico del aliviadero de la presa previsto en la zona central. Nótese que el perfil curvo hacia aguas abajo de la parte superior de las ménsulas centrales consiente alejar suficientemente la lámina vertiente exigiendo todo el peligro de erosión en el pie de la presa.

Director de la S.A.D.E., sobre tres presas italianas: una, la de Sottosella, sobre el Isonzo. Estando todavía en construcción esta obra, sobrevino una avenida excepcional; la ménsula central, ya construida, con altura notable y aislada, porque las dos juntas laterales estaban abiertas con un ancho de un metro, soportó una carga de agua de más de 20 metros, trabajando durante varias horas como una teja aislada empotrada en la base y sometida a la citada carga y a los tumultuosos remolinos del agua al pasar por las juntas, sin que la estructura sufriese lesión alguna.

El segundo caso son las pruebas sobre la presa de Fedaia, que han demostrado que sin la roca de apoyo de un estribo en una altura de 14 metros, la estructura es totalmente estable en esas condiciones.

Por último, señalamos el caso de Val Gallinas, en la cual, la parte intermedia del estribo derecho

vando los esfuerzos de los arcos a las zonas vecinas, formadas por rocas de mayor consistencia.

Cálculo de arcos y ménsulas.

Fijada la doble curvatura en la presa del Eume, se siguieron en el proyecto las directrices deducidas de los estudios de otras presas del mismo tipo, recientemente construidas en Italia y Portugal, basados esencialmente sobre la investigación experimental con modelos, los cuales han confirmado cuantitativamente los cálculos efectuados para dimensionar las presas citadas con gran aproximación.

Para dominar totalmente el problema de la doble curvatura en forma analítica, se han hecho estudios, entre ellos los muy interesantes de Krall, por sucesivas aproximaciones, partiendo del cálculo de la cí-

pula de rotación. Pero para fundarse sobre los métodos basados en tal directriz y en los cuales substancialmente la presa va considerada como un sector de la cúpula misma, con aberturas angulares variables del fondo a la coronación, se exige, en primer lugar, que la presa tenga el centro de los arcos — secciones horizontales — todos situados sobre una recta vertical que constituye el eje central de la cúpula. Sin embargo, en el caso de una cerrada en V notablemente rebasada, como en el caso nuestro del Eume, los radios de curvatura de los arcos aumentan tan rápidamente hacia lo alto, que no es posible aproximarse a tal hipótesis inicial.

Las investigaciones experimentales citadas han confirmado sistemáticamente que la doble curvatura valoriza la contribución resistente de los elementos verticales — ménsulas — en cuanto éstas tienen una eficaz forma arqueada. Y esto podría lógicamente consentir el aumento de las solicitudes en los elementos horizontales; sin embargo, por medida prudente se han efectuado los cálculos y verificación de la estabilidad de la obra, excluyendo toda eficaz contribución de los elementos verticales en el cálculo de los elementos horizontales — arcos —, admitiendo, sin embargo, por las razones expuestas, solicitudes máximas relativamente elevadas, del orden de los 10 Kg./cm.².

En el cálculo de los arcos se han tenido en cuenta también las acciones térmicas, la contracción y la valoración del efecto de la deformación de la roca. En los de las ménsulas, el efecto del peso propio.

Como ya se dijo, todos los arcos elementales se han perfilado con espesores variables mínimos en clave y de allí crecientes hacia arranques para alcanzar un máximo en correspondencia con estos últimos, allí donde se encajan en la roca. Recientes averiguaciones sobre modelos de arcos de presas han, en efecto, confirmado que se obtiene un mejoramiento estático todavía mayor del que de tal modo resulta del cálculo, porque se obtiene un mejor reparto en las solicitudes, disminuyendo en particular las máximas concentraciones de esfuerzos que se tienen en el intradós de arranques cuando se adoptan espesores constantes, sin empeorar la posición de la curva de las presiones, como se estimaba comúnmente.

En cuanto a los elementos verticales, sabemos que la forma de doble curvatura señalada en las más recientes presas de bóvedas construidas, responde a la oportunidad de perfilar los elementos verticales — ménsulas — de forma que puedan contribuir razonablemente con los elementos horizontales — arcos — a contrarrestar la acción de la carga hidrostática, así como estos últimos son diseñados ajustándose cuanto es posible al antifunicular de las cargas hidrostáticas en plan horizontal, también los primeros deberán tender a la forma que asume el antifunicular de las cargas en plano vertical.

En nuestro proyecto nos hemos limitado a examinar el estudio en planos verticales de la ménsula de la zona central, que es la de máxima altura y que suponemos limitada por dos planos normales separados una anchura unitaria — 1 m. — sobre el paramento de aguas arriba. Ella está en equilibrio bajo la acción de la carga hidrostática, del propio peso y de las fuerzas horizontales ejercitadas por los arcos que la apuntalan y por la reacción de la base. Dividida después la ménsula en un suficiente número de sectores elementales limitados por secciones normales, consideramos el equilibrio de uno de estos sectores genéricos. Las acciones conocidas, constituidas por la carga hidrostática y el peso propio que actúan sobre él, se componen con los empujes horizontales opuestos del arco del que el sector o dovela puede considerarse parte y con las fuerzas internas actuantes a lo largo de la ménsula que, según Schwedler, podremos, en primera aproximación, suponer centradas y normales a las secciones que limitan la acción.

Se puede ahora, partiendo de la dovela superior, construir por vía gráfica los sucesivos polígonos de equilibrio y valorar así el valor que asume progresivamente la resultante a lo largo de la ménsula, llamando al empuje de ella sobre la ménsula S_m y S_a la componente horizontal que soportan los arcos.

Conocidas estas fuerzas, es inmediato el paso a las correspondientes solicitudes unitarias.

Se comprueba que confluyen a lo largo de la ménsula esfuerzos medios de compresión gradualmente crecientes, hasta alcanzar cargas del orden de los 20 kilogramos/cm.², y que por efecto de la doble curvatura los elementos horizontales — arcos — resultan, respecto al cálculo por elementos aislados, aligerados en la zona central e inferior de la presa, mientras vienen más solicitados en las zonas superiores.

Además de lo que antes dijimos sobre la curvatura de los diversos elementos, nos preocupamos también, en nuestro caso del Eume, de realizar la mayor continuidad posible en las variaciones de las curvaturas de los radios y de los espesores, con objeto de reducir al mínimo los aumentos locales de los esfuerzos. Por el mismo motivo la cúpula se dibujó con espesores y curvaturas, en los planos horizontales y verticales, gradualmente crecientes hacia los arranques.

La forma de variar todos los parámetros, que caracterizan la configuración geométrica de la bóveda proyectada, está reproducida en los gráficos anejos, que muestran cómo lo hacen con gran regularidad.

Dejamos para otro artículo, independientemente de estas condiciones generales expuestas, el comentario del proyecto y de los ensayos realizados sobre el mismo, de los cuales ocupan primerísimo lugar los realizados en el Laboratorio Central de la Escuela de Caminos, bajo la dirección de los Ingenieros de Caminos D. Eduardo Torroja y D. Carlos Benito.