

Evolución de los perfiles de las presas en arco y ajuste de la bóveda a la cerrada

Por LUCIANO YORDI DE CARRICARTE

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Introducción.

En España, país eminentemente hidráulico, el estudio de los problemas relativos a la construcción de las grandes presas de embalse es una de las cuestiones más interesantes de nuestra Ingeniería Civil.

Las grandes realizaciones que se están llevando a cabo en nuestro país, con sus grandes volúmenes de obra, sus repercusiones en el orden económico en lo que se refiere a su financiación y a su proyección futura, la responsabilidad de su proyectar y ejecución, y los problemas de tipo social inherentes a las mismas son factores que dan en su conjunto una resultante del mayor interés a todos los numerosos y grandes aprovechamientos hidroeléctricos que se están ahora construyendo por el Estado y las Empresas privadas en el territorio nacional.

Ahora bien, esta profusión de grandes obras construídas y en construcción, con los éxitos que supusieron muchas de ellas para la Ingeniería española, han originado en nuestro ánimo el sentimiento de una orgullosa tradición que ha negado en parte, hasta una cierta época, un sentido evolutivo, tal vez por habernos aferrado a una rigidez de concepto excesivamente intransigente, en lo que a soluciones se refiere, quizá, aunque parezca paradójico, por un excesivo contacto y conocimiento del problema.

Hoy son ya muchos los Ingenieros españoles que sienten que las grandes presas tienen una constante evolución en su concepción, que repercute en forma directa en un mejor comportamiento estructural y en una mayor economía en lo que a sus presupuestos se refiere, debido, como es lógico, al avance inexorable de la técnica moderna.

Sin embargo, para que un acontecimiento interpretado por un grupo más o menos numeroso de profesionales se convierta en hecho colectivo es necesario que pase algún tiempo, y como lo colectivo, según se ha dicho, consiste en usos y está, por consiguiente, siempre retardado, es necesario que lo que llama nuestro Ortega "ley del carácter tardigrado" rija el menor tiempo posible en nuestras mentes y en nuestro ánimo, respecto a todos los problemas referentes a nuestra grande y tradicional

Ingeniería Hidráulica, que desempeña tan importante papel en nuestra economía.

Exponemos esta pequeña consideración para razonar el porqué de encontrar un cierto interés a un comentario sobre la evolución de los perfiles de las presas de embalse en estos últimos tiempos, pasando ahora a hacer una sucinta exposición sobre esta evolución.

Presas de gravedad.

Antes de nada queremos señalar que para nosotros el perfil triangular característico de la presa de gravedad que cumple las condiciones de equilibrio entre la presión hidrostática, la subpresión y el peso propio, es un perfil que a simple vista demuestra un mal rendimiento del material que constituye la presa, ya que a embalse lleno es la zona próxima al paramento de aguas abajo la que trabaja más, pasando a ser la zona contigua al paramento de aguas arriba la que entra en primer plano para absorber las tensiones debidas al peso propio de la obra cuando el embalse se vacía. La parte central de la estructura, en cambio, tiene siempre un papel secundario que crea automáticamente una superabundancia de hormigón mal aprovechado al no tener nada más que un trabajo secundario.

Además, la idea de un régimen de trabajo de la presa, basada en el solo hecho de la estabilidad de las ménsulas verticales es error grave, ya que la continuidad horizontal tiene su importancia tanto mayor cuanto más estrecho es el valle. Queramos o no la presa de gravedad es una estructura de tres dimensiones y no de dos. Un ejemplo bien claro es la presa de gravedad francesa de Ternay; su ligerísima curvatura, originada por un radio de 400 m., la salvó de la destrucción total.

Independientemente de este concepto estructural, en estas presas se originan problemas debidos a las tensiones internas creadas por las grandes masas de hormigón, como pudimos comprobar cuando construimos la presa del Tambre, que dificultan la salida del calor de fraguado al exterior, originando tensiones importantes en los cuerpos de las

mismas, a las cuales hasta hace poco no se les daba la debida importancia por falta de medios de auscultación.

Pensemos al decir esto que, en principio, pode-

va y la media de la sección en la que está situado. Se llega así a cifras realmente sorprendentes por su elevado valor.

Por ello, teniendo en cuenta, además, las ven-

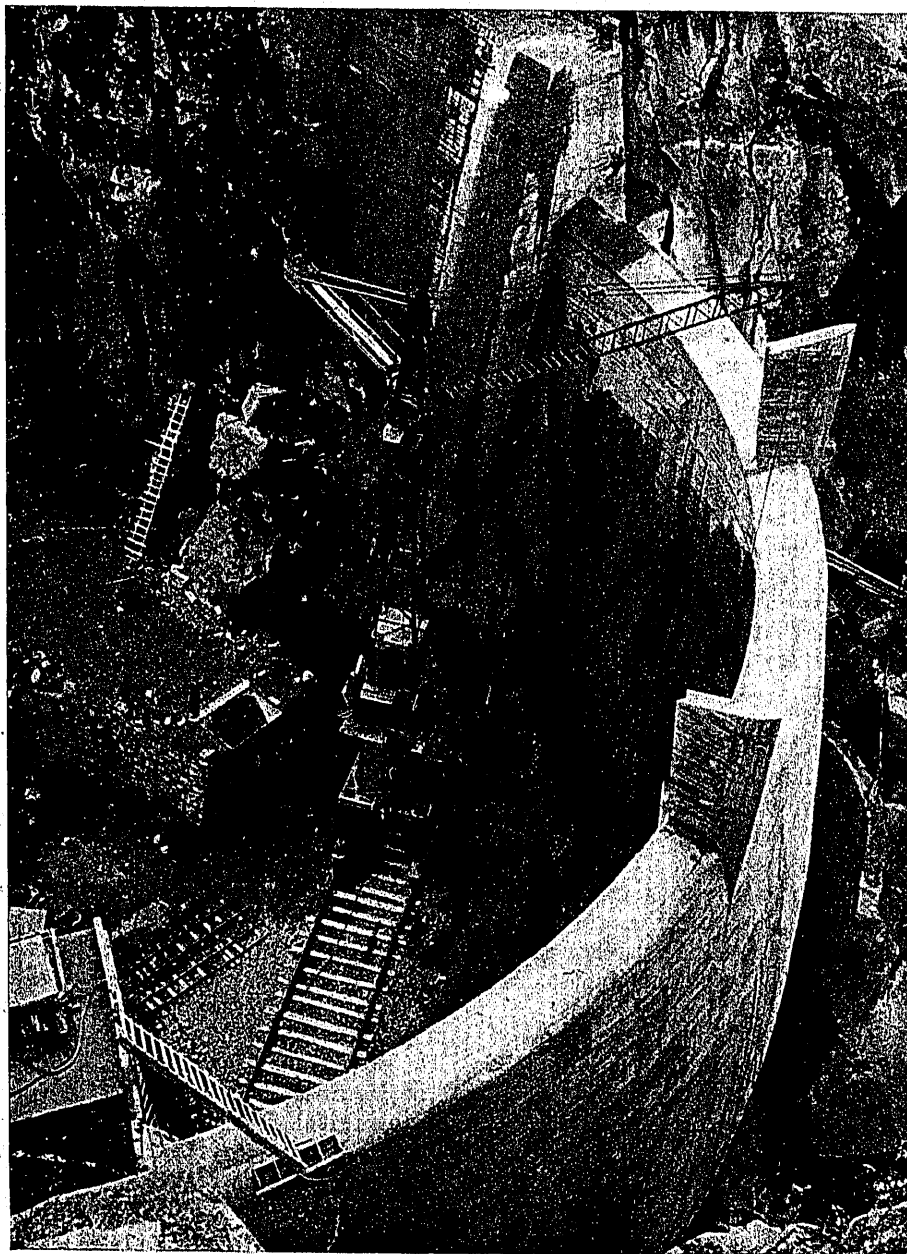


Fig. 1.ª — Presa de "ángulo constante" construida por Fenosa en el río Miño.

mos valorar las sobretensiones debidas a efectos térmicos en cifras a las que se llega multiplicando el módulo de elasticidad del hormigón por el coeficiente de dilatación del mismo por la diferencia en grados entre la temperatura del punto que se obser-

tajas de las presas en arco sobre las de gravedad, vamos aquí a hablar solamente de los tipos de presas curvas, que según nuestro punto de vista son hoy norma general, sin negar, como es lógico, la aplicación de otros perfiles a otros muchos casos es-

pecíficos de cerradas concretas que obligan a buscar otras soluciones más ventajosas en todos los órdenes.

da. Como se ha dicho sinnúmero de veces, este hecho está contrastado por las presas españolas de "Elche" y "Almanza" y la de "Pontalto" en Ita-

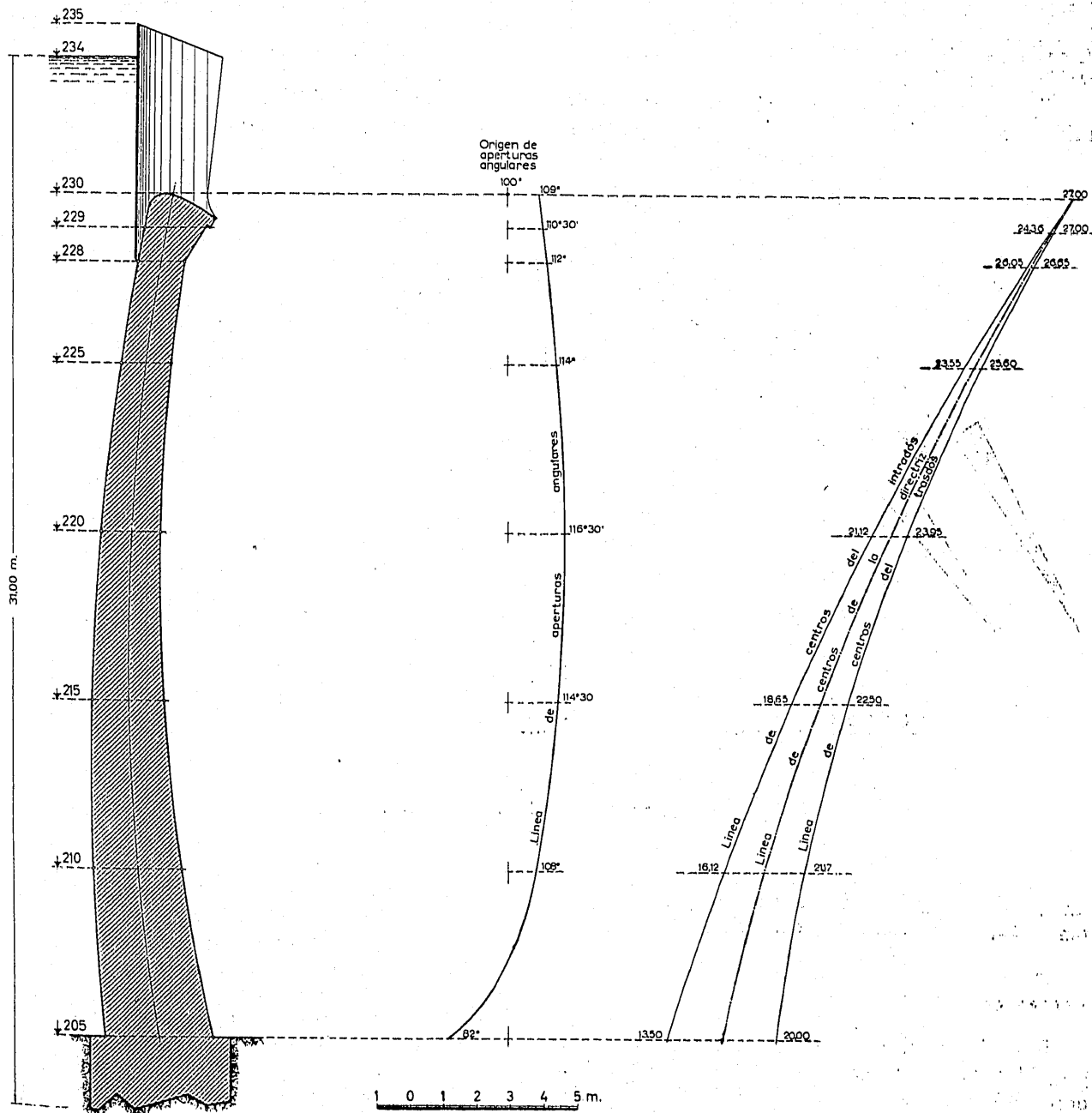


Fig. 2.^a — Ménsula central de la presa de la figura 1.^a

Presas en arco.

El aumento de seguridad que se consigue dando a las presas una forma curva con concavidad hacia aguas abajo, es hoy una idea totalmente confirma-

lia, cuyas fechas de construcción datan del siglo XVI.

Otro ejemplo que abunda en este mismo sentido es la construcción de la presa de "Zola" en Francia, en 1839.

El proyecto fué debido a Zola, padre del fa-

moso novelista. Su audacia y mérito consistió en que por no disponer de ningún método exacto de cálculo de arcos, tuvo que luchar con la Academia francesa imponiendo la idea de seguridad en la curvatura de la presa y la resistencia de las laderas (ver Arch Dams: "Their Philosophy A. Coyne", *Proceeding A.S.C.E.*).

Estas presas, como es más lógico, están constituidas por un sólido de revolución engendrado por

creado la base de partida de toda la técnica moderna de trazado, y así hay que reconocérselo. Ver hoy la presa de Pacoima es confirmar lo que decimos.

En estas presas de centro variable, las directrices horizontales son arcos de un solo centro que van variando de centro y de radio según su posición en altura, tratando de mantener en todo momento un ángulo óptimo en el centro sensiblemente constante, y próximo a los 133° .

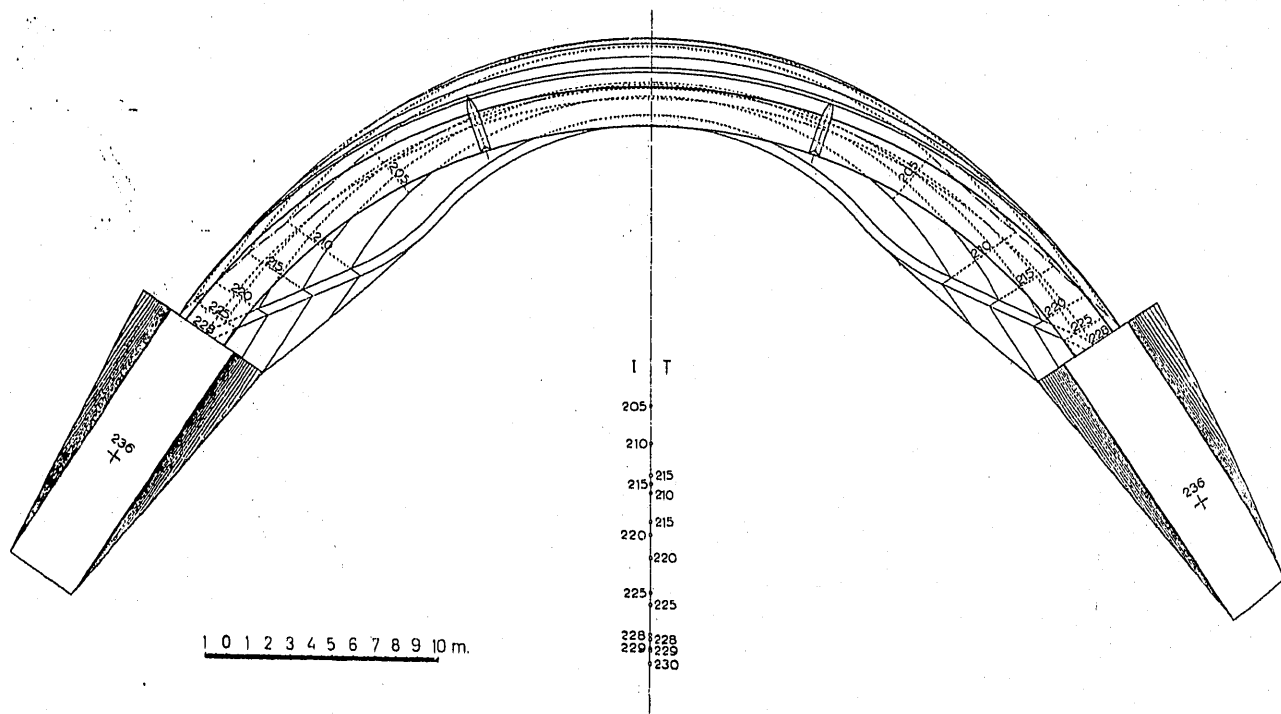


Fig. 3.ª — Planta de la misma presa.

un perfil triangular, siendo sus paramentos, por tanto, superficies cónicas o cilíndricas.

Presas de ángulo constante.

Posteriormente a este tipo simple de superficies surgieron las presas de centro variable, transformándose los paramentos de ellas en superficies de doble curvatura.

El desarrollo de esta idea hay que unirla a los pioneros americanos de principios de siglo, fundamentalmente a Lars Jorgensen y a Noetzli, que desarrollaron en amplia escala la técnica de las presas en arco de ángulo constante.

Ellos construyeron con decisión y coraje muchas presas en arco, siendo las más atrevidas las más antiguas, tales como: Bear Valley y Upper Otay. Ellos tienen el mérito indiscutible de haber

Se obtiene así una mejor distribución de las tensiones en las secciones horizontales de la presa.

Para mejorar estas tensiones de los elementos horizontales independientes, que tienen las líneas de presiones descentradas hacia aguas arriba en clave, y hacia aguas abajo en arranques, es necesario que a partir de una cierta cota hacia el cauce, o sea hacia las partes inferiores de la presa, los círculos que constituyen los dos paramentos de los arcos horizontales dejen de ser concéntricos.

En este tipo de presas de ángulo constante no se suele tener en cuenta el efecto del peso propio para compensar posibles tracciones verticales, por lo cual no suelen presentar grandes curvaturas en sentido vertical; únicamente se respeta la estabilidad de las ménsulas consideradas independientes con fines constructivos, tratando de centrar, en cambio, las cargas originadas por el peso propio. El único desplome obligado de la ménsula central tiene el

fin de que no se desplomen con exceso las ménsulas laterales hacia aguas arriba.

Un ejemplo de este tipo fué la presa construída en 1958 por Fenosa en el río Miño (fig. 1.^a). En el proyecto de esta obra, según se ve (figs. 2.^a y 3.^a), seguimos las directrices que acabamos de exponer y que definen las presas de tipo americano denominadas de "Constant-Angle".

Como referencia, citamos las características de esta presa, que son:

Altura máxima	31,00 m.
Abertura angular en coronación.	109°
Radio en coronación	27,00 m.
Cuerda en coronación	56,00 »
Espesor máximo en clave	2,90 »
Espesor mínimo en clave	1,40 »
Volumen de hormigón	5 500 m. ³

La poca personalidad que en todo momento iba a tener el peso propio de la obra, debido a sus pequeños espesores, y el carácter provisional de la misma, fué lo que nos decidió a negar en esta presa curvatura en sentido vertical para facilitar su construcción, que tuvo un plazo de ejecución de sólo dos meses y medio, y que se comportó correctamente en todo momento, a pesar de haber saltado sobre ella 1.300 m.³/s.

Presas de doble curvatura.

Posteriormente a este tipo de presas que acabamos de comentar, se empezó a ver la existencia en las mismas de tracciones verticales de cierta importancia, las cuales quedaron en algunos casos confirmadas por la aparición de pequeñas grietas.

Fué entonces cuando el genio de André Coyne proyectó en Francia, en 1937, la presa de Marèges en la cual, mediante la curvatura de las ménsulas en sentido vertical, neutralizaba las tracciones originadas por el empuje hidrostático en el pie del paramento de aguas arriba mediante la precompresión originada por el peso propio, al dotar a la presa de doble curvatura.

A partir de este momento se empezó a perfilar el concepto de la doble curvatura tratando de aprovecharla al máximo; primero, al inclinar el perfil de la ménsula central hacia aguas abajo para poder absorber parte del peso propio en régimen de compresión a través de la continuidad horizontal de la estructura en forma de cúpula, descargando parte de dicho peso sobre las laderas, y segundo, al aumentar esta curvatura en vertical, negando parte de las tracciones verticales que aparecen en el paramento de aguas abajo al actuar el empuje hidrostático.

Con el mismo fin se dió curvatura al paramento de aguas arriba en el pie de la presa.

Las primeras realizaciones de este tipo fueron las presas italianas que se construyeron, algunas de ellas con fuertes desplomes de las ménsulas centrales hacia aguas abajo.

En España se ha construído la presa del Eume (figuras 4.^a y 5.^a), perteneciente a Fuerzas Eléctricas del Noroeste, S. A.



Fig. 4.^a — Presa "cúpula" del Eume, perteneciente a Fuerzas Eléctricas del Noroeste, S. A.

cas del Noroeste, S. A., que también puede encuadrarse en el tipo de presa cúpula de doble curvatura.

Las características principales de esta presa, según se ve en las figuras 6.^a y 7.^a, son:

Altura sobre cimientos	101,00 m.
Abertura angular en coronación.	118°
Radio medio en coronación	116,50 m.
Cuerda	210,00 »
Espesor máximo en clave	19,60 »
Espesor mínimo en clave	4,00 »
Volumen de hormigón	225 000 m. ³

Esta obra ha tenido hasta el momento actual un comportamiento excelente, ahorrando volumen de hormigón en un 40 por 100 sobre la solución de gravedad.

Presas de arcos policéntricos.

No hace mucho, teniendo presente los resultados obtenidos por medio de cálculos analíticos y la experiencia proporcionada por los modelos reducidos, se vió la ventaja de manteniendo la curvatura

en sentido vertical abandonar, en cambio, en ciertos casos, las formas clásicas de los arcos horizontales de un solo centro, apareciendo los arcos parabólicos y los arcos policéntricos.

a éstos un mayor radio en las partes laterales de los mismos.

Se consigue además, de esta manera, una mejor incidencia de la presa con las laderas y un mayor

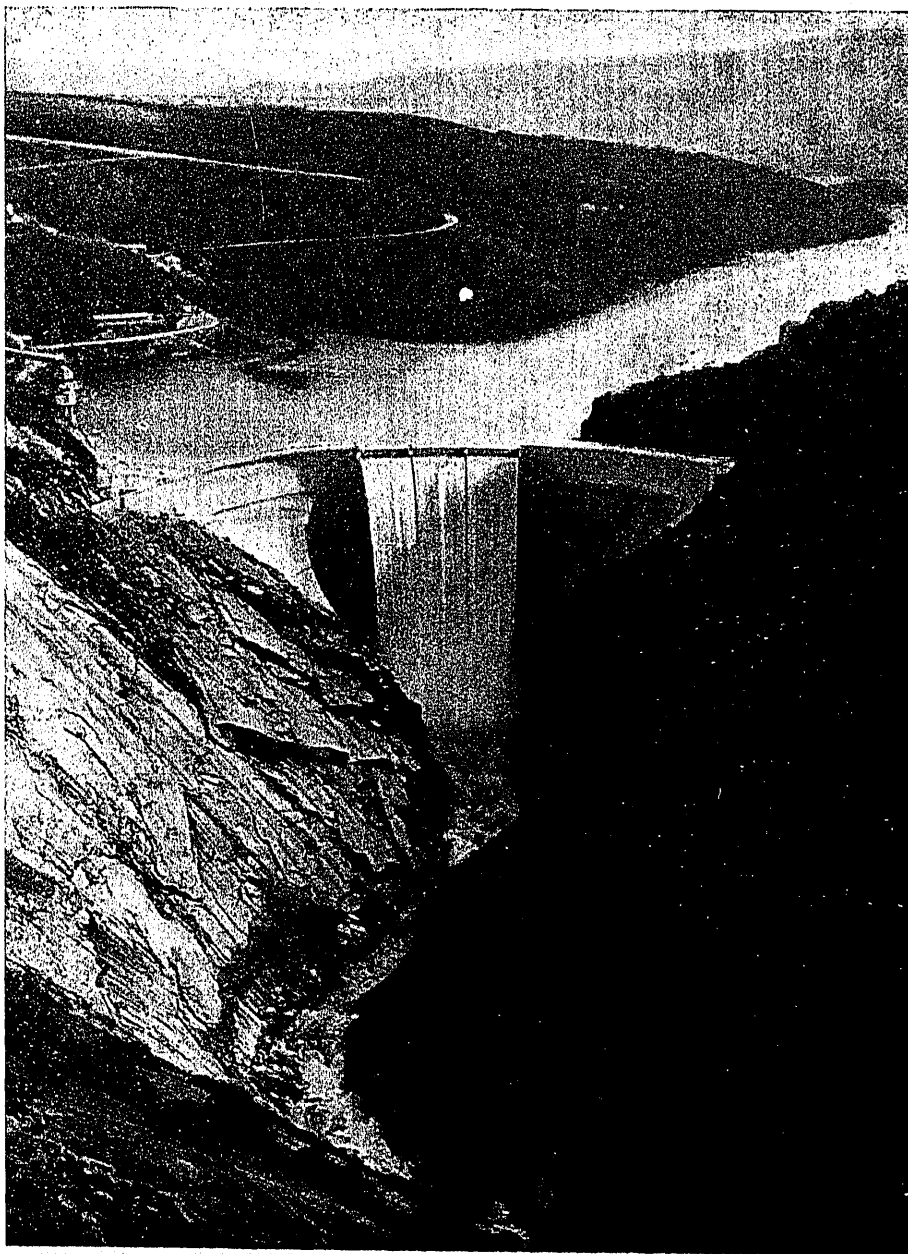


Fig. 5.^a — Presa del Eume en régimen de vertido.

Surgieron así las presas portuguesas de Chicamba y Odeaxere y la presa italiana de Reno di Lei, en las cuales la curvatura horizontal decrece hacia arranques debido al alivio de cargas de los arcos en sus entronques con las laderas, lo que permite dar

equilibrio en las ménsulas laterales sin necesidad de definir un mayor desplome para la ménsula central, con la ventaja, además, de negar efectos de torsión en dichas ménsulas laterales, como suele suceder en las presas de secciones horizontales de un solo cen-

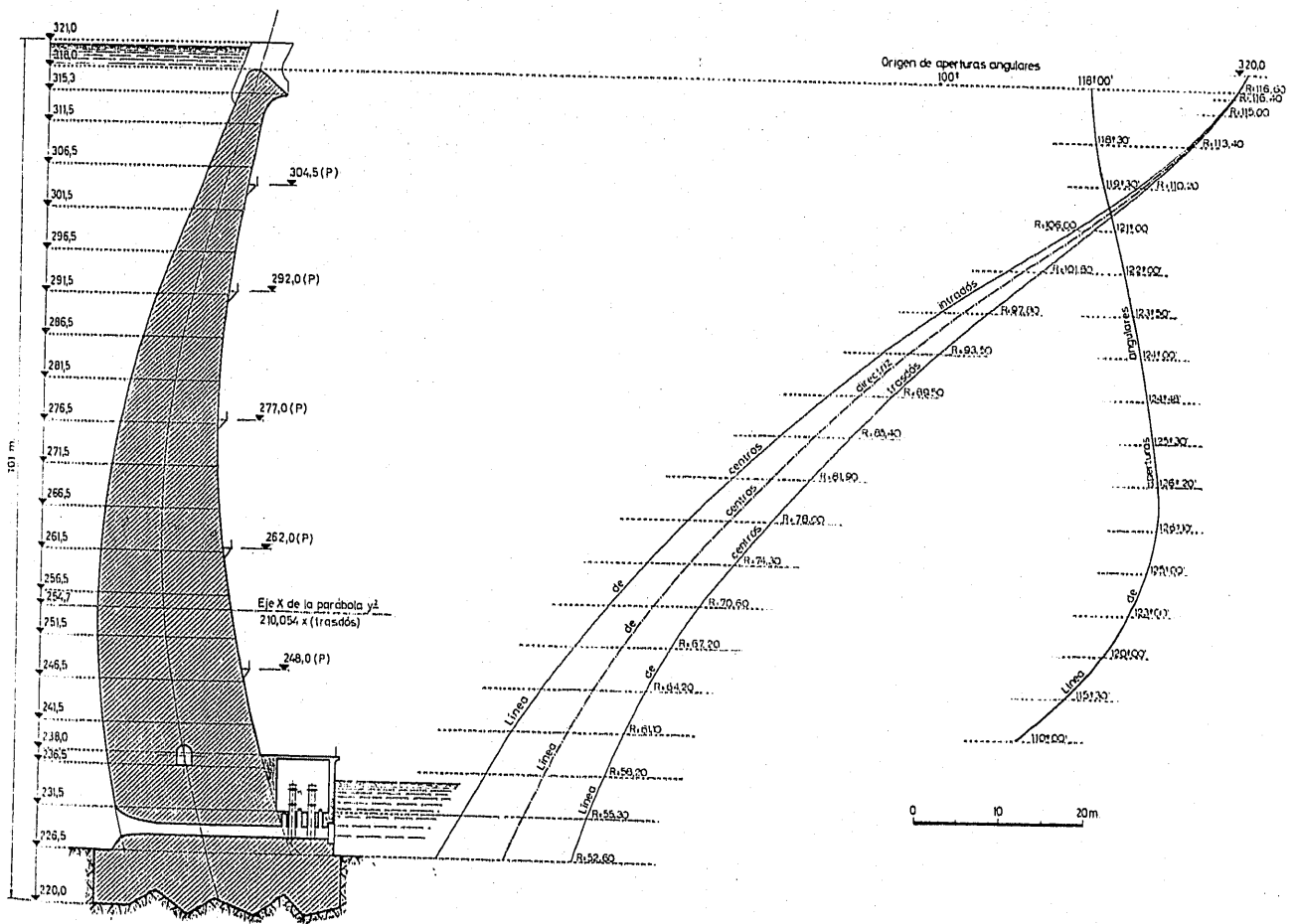


Fig. 6.^a — Ménsula central y características geométricas de la presa del Eume.

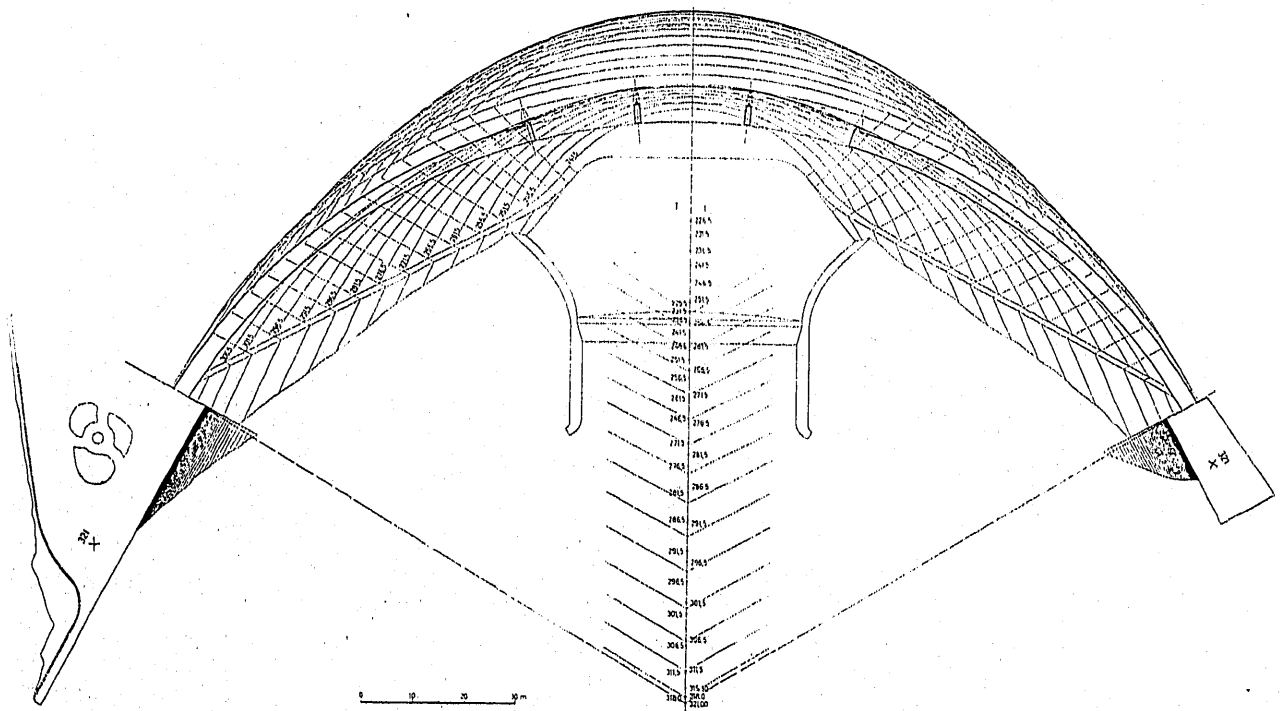


Fig. 7.^a — Planta de la presa del Eume.

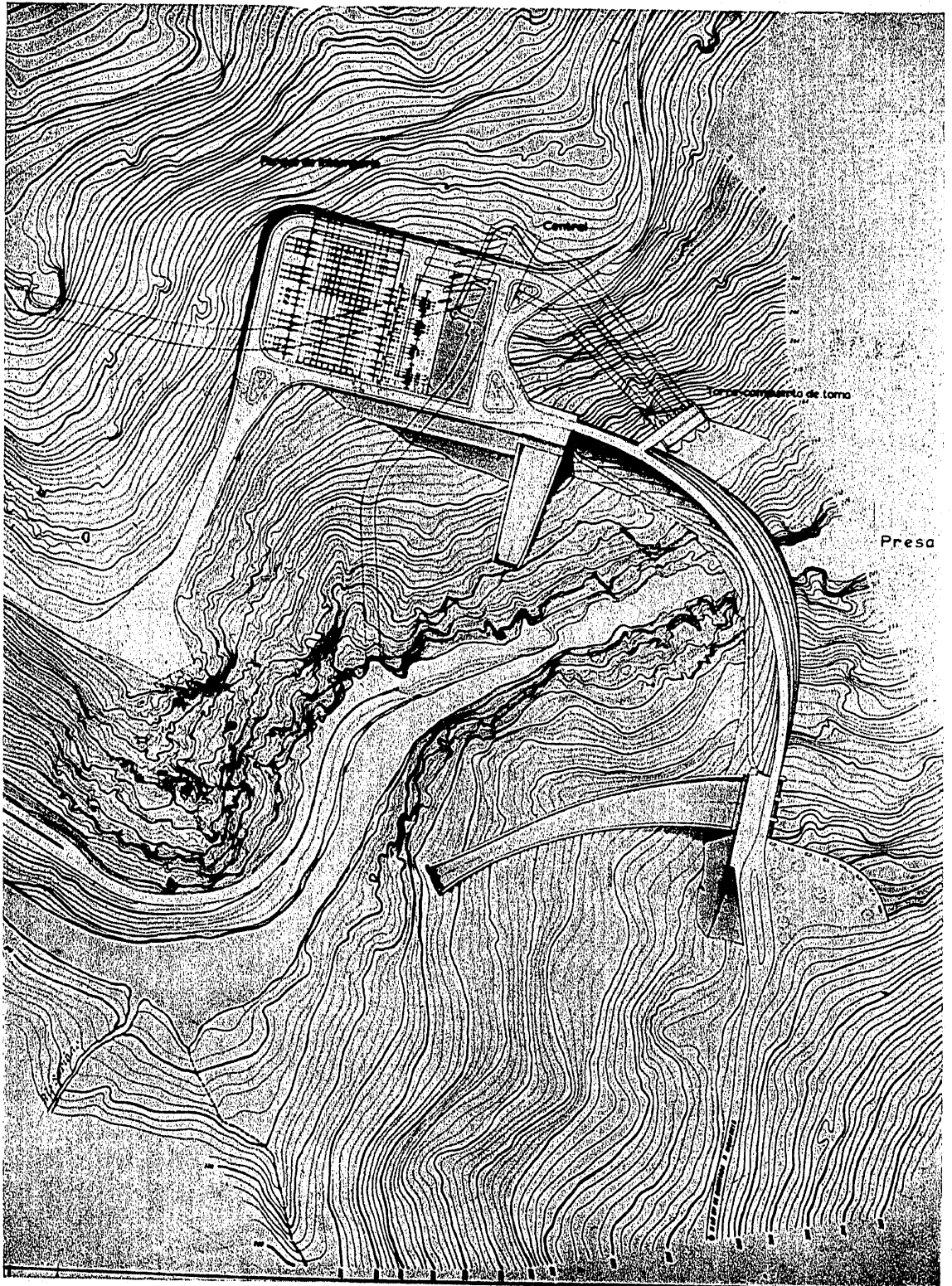


Fig. 8.^a — Presa de Belezar, del tipo de doble curvatura con arcos de tres centros. Planta general del aprovechamiento.

tro, tales como la presa del Eume, a la que antes nos hemos referido.

En la actualidad estamos construyendo, en el río Miño, la presa de Belesar (fig. 8.^a), también perteneciente a Fuerzas Eléctricas del Noroeste, Sociedad Anónima, que tiene arcos horizontales de

El ahorro sobre la solución de gravedad es de 430.000 m.³.

Vemos con lo dicho, que toda la evolución en el trazado de las presas en arco fué a base de buscar un objetivo lógico y natural, el de tratar de lograr un mejor comportamiento del hormigón que

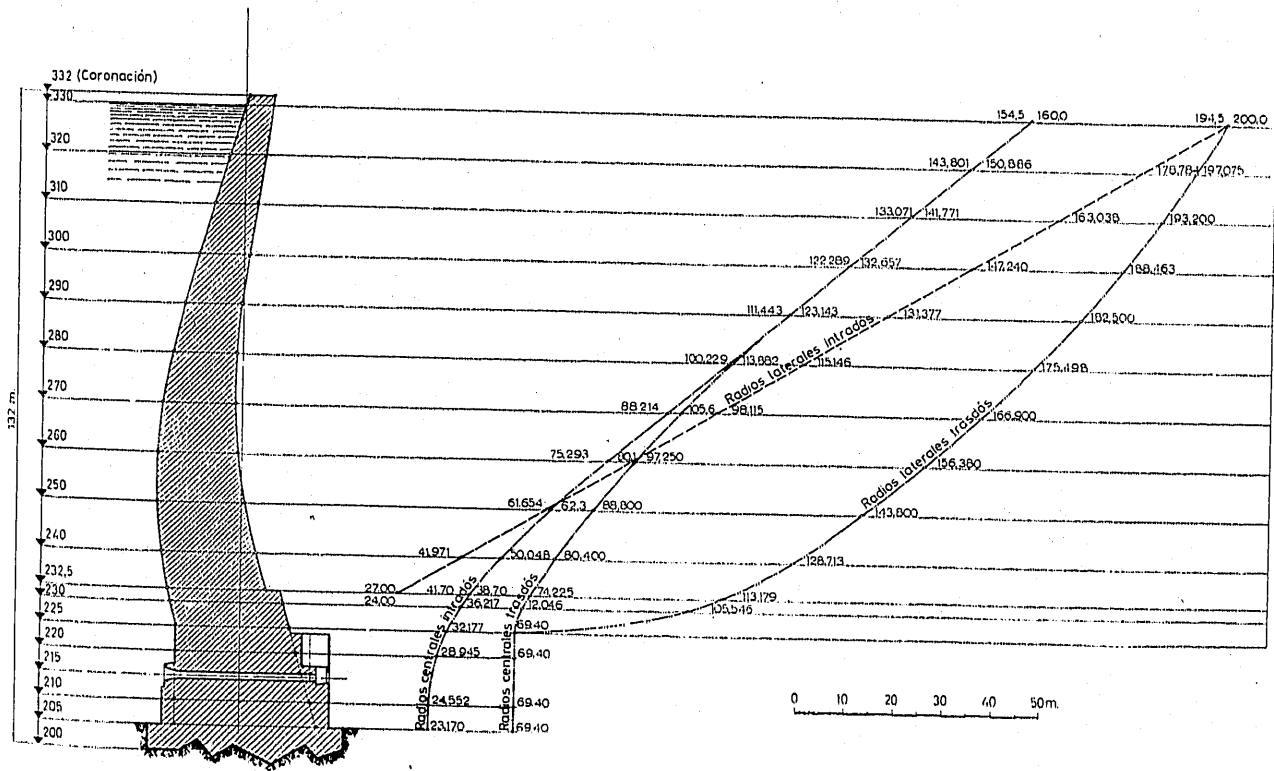


Fig. 9.^a — Ménsula central y características geométricas de la presa de Belesar.

tres centros y cuyas principales características geométricas (figs. 9.^a y 10) son:

Altura	132,00 m.
Abertura angular en coronación: 45° central + 42° lateral.	
Radio central trasdós coronación.	160,00 m.
Radio central intradós coronación.	154,50 »
Radio lateral trasdós coronación.	200,00 »
Radio lateral intradós coronación.	194,50 »
Espesor máximo en clave	29,00 »
Espesor mínimo en clave	5,50 »
Volumen de hormigón	700 000 m. ³

Esta obra, una de las más importantes realizaciones españolas, merecerá un comentario en otro artículo próximo.

constituye la presa a través de un estado de compresiones en toda la estructura.

Este objetivo, definido por un correcto dimensionamiento de formas donde el material trabaja en las mejores condiciones, obtiene, por consiguiente, siempre una economía.

La curvatura horizontal se da, como antes dijimos, para centrar las líneas de presiones de los arcos considerados independientes y formándolos a base de círculos policéntricos o arcos parabólicos. Esta es la tendencia actual, basada en la experiencia y conocimiento.

La curvatura en vertical, con el fin de que al descentrar la línea de presiones del peso propio pueda éste crear un estado de tensiones que neutralice las tracciones originadas por el empuje hidrostático.

De una forma teórica podemos decir que lo idóneo sería lograr un perfil de las ménsulas que fuese el antifunicular de las cargas absorbidas por ellos.

Ajuste de la bóveda a la cerrada.

Hemos hablado hasta aquí de lo que se refiere exclusivamente a la estructura de la presa, pero no podemos olvidarnos, lo que sería grave error, del conjunto que forman la presa y la montaña.

Al tocar este aspecto es fundamental, desde nuestro punto de vista, citar la conveniencia de do-

esta idea en forma intransigente, alcanzando radios laterales de 200 m., logrando así una correcta incidencia. Hoy, los resultados teóricos obtenidos y la realidad de la obra, nos confirma el acierto de la solución (véase fig. 11).

Creemos que nunca, con los hormigones que ahora se fabrican, es problema aumentar los radios y, por consiguiente, las tensiones en el cuerpo de

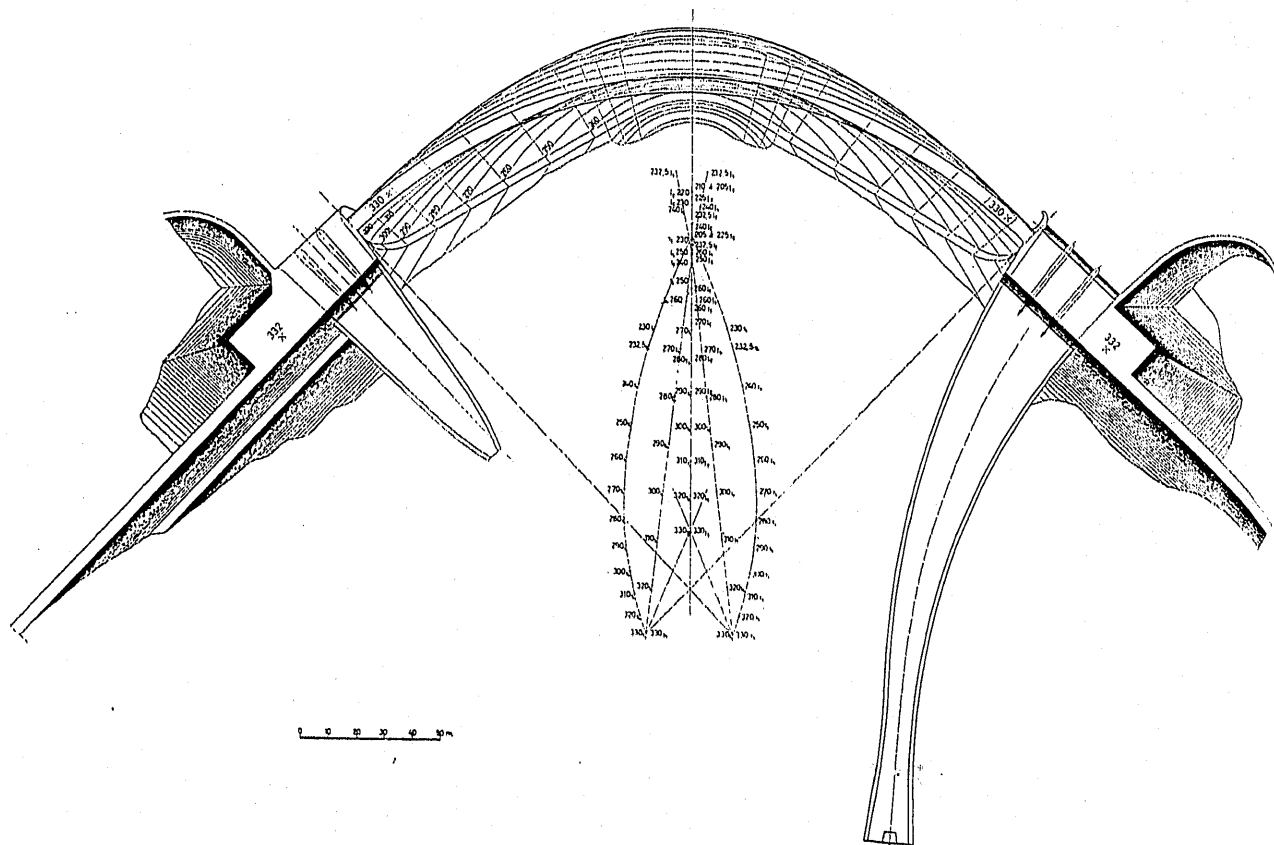


Fig. 10. — Planta geométrica de la presa de Belesar.

tar a la estructura de una simetría a base de un elemento de transición entre la presa y el terreno, que los ingenieros italianos llaman "pulvino"; los portugueses, "zoco", y nosotros, "recalce perimetral".

Este elemento, que no es ni más ni menos que un sobrancho, mejora notablemente el comportamiento estructural y las reacciones del terreno de apoyo.

Sin embargo, al hablar del ajuste de la bóveda a la cerrada surge la idea básica que es la necesidad de ir en todo momento a lograr las mejores incidencias de la presa con el terreno, alcanzando los valores máximos que se pueda, aun a base de reducir los ángulos en el centro y aumentar los radios que constituyen los arcos horizontales de la presa.

Nosotros, en Belesar, fuimos a la realización de

la presa, si se logra con ello un conjunto presa-laderas totalmente estable.

Tenemos que aceptar, porque así es en realidad, que las presas bóvedas más importantes del mundo y mejor diseñadas tienen, muchas de ellas, cargas de compresión debidas al empuje hidrostático y al peso propio del orden de los 80 Kg./cm.² y cargas de tracción debidas al mismo efecto de 12 Kg./cm.².

Pero también es cierto que en este momento, en España, se están fabricando hormigones, como en Belesar, con cargas de rotura a los noventa días de 350 Kg./cm.², con unos factores de dispersión del 9 por 100 logrados a pesar de los fuertes ritmos de hormigonado, del orden de los 35.000 m.³ mensuales.

Por ello, creemos realmente que hoy se puede ir,

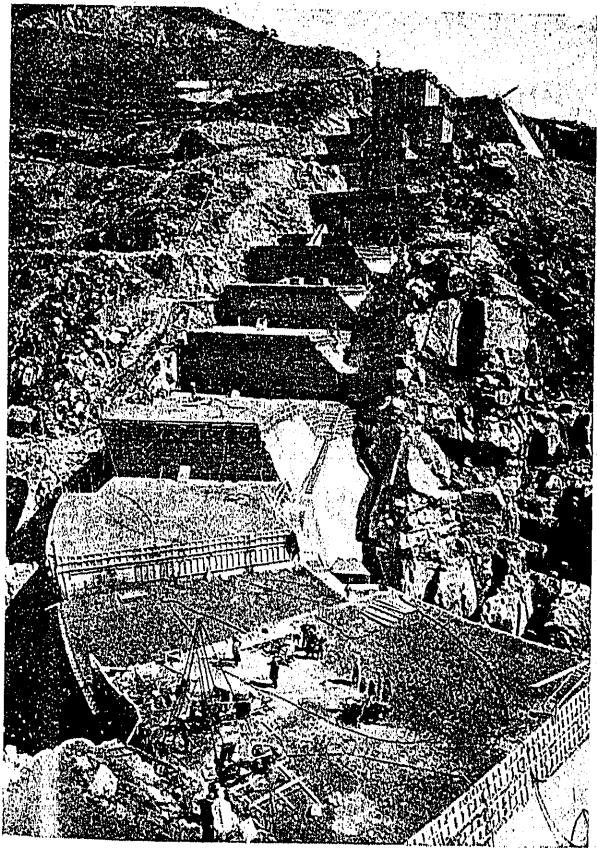


Fig. 11. — Presa de Belesar. Entronque de la presa con la ladera y el estribo de gravedad en la margen izquierda.

a base de arcos de tres centros, a salvar anchos valles, manteniendo en todo momento una buena incidencia a base de radios grandes.

Tenemos ejemplos reales de valles de base ancha que han sido cerrados por presas en arco sin mayor temor a flexiones excesivas en las ménsulas centrales, tales como Pieve di Cadore, Moulin Ribou y Kariba.

Los cálculos más perfectos, así como los múltiples ensayos realizados en modelos reducidos demuestran de forma evidente, que las extremidades de una presa situada en un valle muy abierto se deforman poco y, por consiguiente, no intervienen prácticamente en la resistencia, sino como bóvedas.

La idea antigua de que sólo se podían cerrar valles con presas bóvedas en que la relación cuerda, altura, no fuese superior a 2, desapareció totalmente y hoy en día se han construido presas como Kariba, Moiry y otras, en que esta relación está sobrepasada casi tres veces, a pesar de ser obras de 140 metros de altura.

Hoy en día G. S. Sarkaria y F. D. Kirn han tratado de sistematizar el encaje de una presa bóveda en una cerrada a base de definir un "factor de

forma de cañón", utilizando la relación entre el perímetro de los cimientos y de los estribos y la máxima altura de la presa. Este factor está dado por la siguiente fórmula:

$$K = \frac{b + H(\sec \psi_1 + \sec \psi_2)}{H}$$

siendo:

b = ancho de la cerrada en la base.

ψ_1 y ψ_2 = ángulo de las laderas con la vertical.

H = máxima altura de la presa.

Este factor varía generalmente en presas arco entre 2,2 y 4,6. El caso de Kariba con un factor de forma de 6 no se considera representativo por las circunstancias excepcionales de la cerrada.

De estas comparaciones empíricas se saca la conclusión general de que si se construyeron presas de gravedad con factores inferiores a 5 hay que pensar en que existieron circunstancias especiales que abogaron en contra de una solución de presa en arco y si, por el contrario, el factor de forma es mayor de 5, las circunstancias iniciales no son, en cambio, favorables para una presa en arco.

Sin embargo, la evolución de formas que comentamos en principio nos permite ahora acoplarnos mejor a la topografía del terreno, lo que unido a la mejor técnica del hormigón, que permite llegar a los 100 Kg./cm.², caso de Mauvoisin, y de 120 Kg./cm.², caso de Gage, hacen lograr cierres de valles con perfecto ajuste de las presas a la cerrada, con la esbeltez y elegantes soluciones que hoy día se están construyendo en todo el mundo.

Además, esta evolución de formas que ha desembocado en las presas de doble curvatura, mejora y uniforma las tensiones de las obras, con la consiguiente ventaja que si en un momento determinado, porque los apoyos no son de la misma calidad en todo el contorno, ceden parcialmente, si la presa está bien encajada, las presiones marchan por caminos indirectos, es decir, las fuerzas interiores se transmiten por las partes más resistentes de la estructura a las zonas donde la roca presenta mejores condiciones, lo cual corresponde al mínimo trabajo de deformación.

En los modelos reducidos de la presa del Eume vimos claramente este efecto en la zona de tránsito situada en el estribo derecho, entre la pizarra de la parte baja y el granito que constituye el apoyo de la parte alta de la obra. Una hipotética gran deformación de esta zona de tránsito nunca haría peligrar la estructura.

Esta es la gran seguridad de una presa bóveda bien apoyada en su contorno.

Llegando a este punto, es también conveniente señalar que la idea tradicional de que sólo se pue-

den emplazar presas en arco en rocas de excepcional compacidad y resistencia ha sido parcialmente abandonada.

Se pueden y se han construido presas en rocas de regular consistencia, fracturadas y con singularidades morfológicas locales, utilizando inyecciones de consolidación, o con colocación de armaduras en las zonas de apoyo, como se hizo en Bort, en Francia, y en Val Gallina, en Italia, o también con consolidación a base de tirantes como en Castillón y en La Chaudanne o profundizando los cimientos como en Mandraka.

También puede ser solución, en caso conveniente, ir a la creación de apoyos suplementarios artificiales, como se hizo en el caso de Belesar.

Esta idea se estudió inicialmente basándose en la solución dada a la presa del Río Freddo, en Piemonte, proyectada por Marcello y de 40 m. de altura, la cual está apoyada en dos grandes contrafuertes de gran altura, y en la presa de Fadaia, que complementa sus apoyos en roca con estribos artificiales de 15 m. respecto a una altura total de 64 m.

Los apoyos de Belesar, que son de los más grandes construidos hasta la fecha, han dado en las pruebas un óptimo funcionamiento elástico, absorbiendo en muy buenas condiciones los impulsos transmitidos por los arcos superiores que constituyen la bóveda central.

Esta solución de apoyos artificiales, complementarios de los apoyos en la roca, empuja enormemente las posibilidades de encaje de presas en arco en cualquier cerrada que reúna unas mínimas condiciones.

No creemos, en cambio, conveniente, con el fin de descargar impulsos de los arcos en las laderas si éstas no son óptimas, ir a dotar a la presa, para apoyar las ménsulas en él, de un arco de coronación rígido, que lo que hace es originar tracciones en los paramentos de aguas abajo coaccionando la deformación lógica de la estructura.

Es siempre un gran inconveniente el tratar en muchos casos de ir a refuerzos que lejos de fortalecer la estructura son causa de su debilidad.

La elasticidad, no podemos olvidar que es la cualidad esencial de un buen arco.

Estamos conformes con C. Semenza cuando complementando el viejo adagio árabe de que "El arco nunca duerme", añade que nunca duerme porque gracias a su elasticidad está en todo momento tratando de acoplar su directriz a la mejor forma de soportar las sollicitaciones a que está sometido.



Fig. 12.— Presa de bóvedas múltiples de meicende.

En resumen, vemos que el ajuste de una bóveda a una cerrada consiste en buscar ángulos de incidencia de 30 a 45° siempre que el "factor de forma del cañón" sea inferior a 5, a base de crear un conjunto integrado por bóveda + recalce perimetral + roca + apoyos artificiales cuyas cargas de trabajo no sobrepasen por efecto del peso propio y el empuje hidrostático los 80 Kg./cm.² a compresión y los 12 Kg./cm.² a tracción. El factor de forma de Belesar es de 4,80, teniendo en cuenta los estribos de gravedad.

Finalmente, también queremos señalar que en los amplios valles que en el futuro habrá que cerrar, la solución más idónea serán las presas de bóvedas múltiples o cúpulas múltiples, en las que se están haciendo grandes progresos en lo que se refiere a la relación de alturas y separación de contrafuertes.

En este momento estamos construyendo en La Coruña una presa de 300 m. de longitud de coronación con una altura de 20 m. y una separación de contrafuertes de 22 m., formada por bóvedas múltiples, que ahorra un 50 por 100 de hormigón sobre la solución de presa de gravedad (fig. 12).

En este tipo de obras existen ya grandes realizaciones, tales L'Oued Mellègue, construida en Túnez, y a ellas se les reserva un amplio futuro al irse agotando los valles estrechos y ser necesario ir a la utilización de los valles anchos para continuar así explotando hasta el final los recursos energéticos que nos brindan todos los ríos.