

La presa bóveda de Albarellos

Por RODRIGO DEL HOYO FERNANDEZ-GAGO

Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.
Fuerzas Eléctricas del Noroeste, S. A. (FENOSA).

INTRODUCCION

El aprovechamiento hidroeléctrico del río Avia, afluente del Miño en el cual desemboca en las proximidades del pueblo de Ribadavia (Orense), está constituido por la presa bóveda de Albarellos de 90 metros de altura y 285 metros de longitud de coronación, una galería de presión de 3.140 metros revestida de hormigón en toda su longitud, con su correspondiente pozo de toma y chimenea de equilibrio, una tubería forzada de 230 metros de longitud y diámetros variables entre 3,75 a 2,65 metros y la central de Albarellos dotada de un grupo de 74.000 kVA de potencia. Un canal de trasvase de 4.245 metros de longitud capta las aguas del río Viñao, afluente del Avia con su desembocadura aguas abajo de la presa de Albarellos, y las vierte en el embalse del mismo nombre.

Las características generales del aprovechamiento son:

Embalse.

- Río: Avia.
- Superficie de la cuenca: 214 Km².
- Aportación media anual: 233 Hm³.
- Máxima avenida teórica: 640 m³/seg.
- Volumen total de embalse: 90,7 Hm³.
- Cota máxima de embalse: 265.

Presa.

- Tipo de presa: Bóveda de doble curvatura.
- Altura máxima sobre cimientos: 90 m.
- Altura máxima sobre recalce: 82 m.
- Longitud de coronación: 285 m.
- Espesor de la ménsula central:
 - En recalce: 14 m.
 - En coronación: 3 m.
- Aliviadero lateral:
 - Caudal máximo evacuado: 640 m³/seg.
 - Número de compuertas: 2.
- Desagües de fondo: 2 de 1,5 m Ø.

Trasvase del río Viñao.

- Superficie de la cuenca: 138 Km².
- Aportación media anual: 151 Hm³.
- Caudal máximo trasvasado: 8 m³/seg.
- Longitud del canal: 4.245 m.
- Caudal trasvasado al embalse de Albarellos en año medio: 138 Hm³.

Galería de presión.

- Longitud: 3.140 m.
- Sección libre circular de: 4,40 m Ø.



Fig. 1.—Vista general de la presa.

LA PRESA BOVEDA DE ALBARELLOS

- Espesor del revestimiento: 0,40 m.
- Caudal: 45,00 m³/seg.
- Velocidad del agua: 2,95 m/seg.
- Longitud de galería blindada: 90,00 m.

Tubería forzada.

- Longitud: 230 m.
- Diámetro en la salida de la válvula de cabezera: 3,75 m.
- Diámetro en la llegada a la válvula de guarda de la turbina: 2,65 m.
- Tipo de acero: A.52 d.

Central.

Turbina:

- Francis, de eje vertical.
- Caudal: 45 m³/seg.
- Velocidad nominal: 333,3 r.p.m.
- Salto neto máximo: 153 m.
- Potencia a salto máximo: 86.700 CV.

Alternador:

- Potencia nominal: 74.000 kVA.
- Velocidad nominal: 333 r.p.m.
- Frecuencia nominal: 50 Hz.
- Tensión nominal: 11 kV.
- Factor de potencia nominal: 0,8.

Producción media anual: 200.000.000 kWh.

GEOLOGIA DE LA CERRADA

El aprovechamiento hidroeléctrico de Albarellos tiene su emplazamiento en la parte occidental de Galicia. Dicha zona está constituida, desde un punto de vista geológico, por rocas ígneas y terrenos metamórficos.

La presa bóveda está emplazada en una franja de gneis alternando con granito, la cual separa una zona de granito situada al Este, de una zona de gneis situada al Oeste. Este granito intercalado entre el gneis, procede de la granitización por intenso metamorfismo de dicho gneis.

En el emplazamiento, el granito se presenta en diversas variedades, entre las cuales destacan los granitos gneísicos, con cierta foliación paralela al gneis y las pegmatitas. El gneis también presenta diversas variedades, pero, en general, su facies y su comportamiento geotécnico se aproximan mucho a los de un micasquistó.

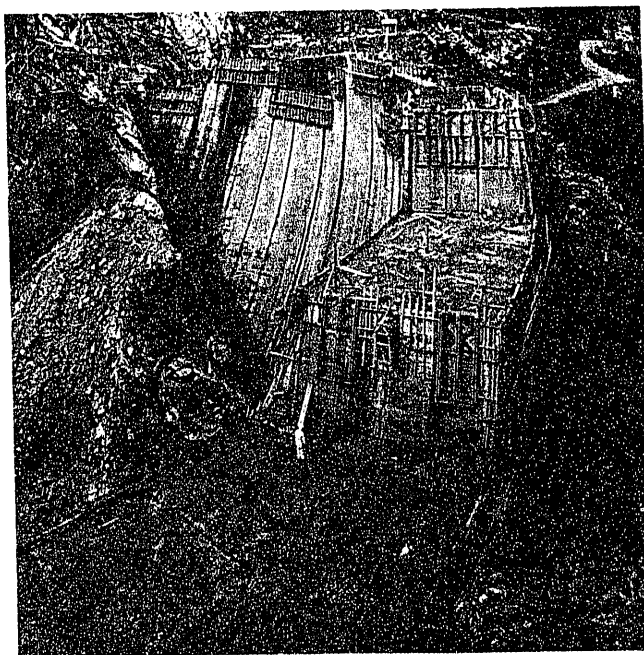


Fig. 2.—Hormigonado de la presa.

La roca de cimentación de la presa está formada, en los dos tercios de su altura de la ladera derecha, por un gran banco de granito y en la parte baja de esta ladera, cuenco y margen izquierda, por una alternancia de gneis y granito, constituido fundamentalmente por lentejones de granito incluidos en el gneis.

Entre todas las fracturas que se presentan en el emplazamiento de la presa hay dos accidentes fundamentales, que denominaremos falla Verde y falla A. La falla Verde, situada en la margen izquierda del río Avia, tiene un rumbo N 56° E, y un buzamiento de unos 60° hacia el Noroeste. Su relleno es una arcilla verdosa de 1 a 2 metros de espesor. La falla A cruza el cauce del río, tiene un rumbo N 32° E y es prácticamente vertical. Su relleno es un granito descompuesto muy comprimido, con un espesor a cinco metros de profundidad, en la margen izquierda, del orden de un metro.

La presencia de varias fallas, con el mismo rumbo que la falla Verde y buzamientos variables entre los 50° hacia el Noroeste y la vertical, han provocado una alteración importante de la roca situada en la margen izquierda, aguas arriba de la citada falla Verde, hasta profundidades importantes. Por otra parte, la roca situada aguas abajo de la falla A, es de una calidad notablemente inferior a la situada entre las fallas A y Verde, como mostraron los ensayos sismoelásticos realizados.

En la margen derecha y cuenco no se presentan accidentes importantes. La única falla desta-

LA PRESA BOVEDA DE ALBARELLOS



Fig. 3.—Comienzo del hormigonado del bloque central y roca de cimentación de margen izquierda.

cable es la A, la cual, después de cruzar el cauce del río, se divide en una serie de fracturas paralelas con relleno de escaso espesor que hacen que desde un punto de vista geotécnico no planteen dificultades.

CIMENTACION DE LA PRESA Y TRATAMIENTOS DE LA ROCA

Las circunstancias antes reseñadas han obligado a cimentar la presa, en la margen izquierda, en la roca comprendida entre las fallas A y Verde.

Teniendo en cuenta las orientaciones y buzamientos de estas fallas, y que las características geomecánicas del macizo rocoso mejoran en profundidad, ha sido necesario realizar excavaciones de hasta 30 metros con objeto de lograr una separación adecuada entre las citadas fallas que permitiese cimentar correctamente un estribo de gravedad, de las dimensiones convenientes para poder transmitir al macizo rocoso los empujes de los arcos superiores de la bóveda.

En la ladera derecha las características geomecánicas de la roca son favorables para la cimentación de la presa. El único accidente relativamente importante que la afecta es la falla A, que cruza la cimentación de la misma en el tercio inferior de la ladera, sin plantear mayores dificultades.

Con objeto de mejorar las características resistentes de la roca de cimentación afectada en parte por la decompresión provocada por las excavaciones, se procedió a un tratamiento de consolidación en toda la zona de apoyo, en ambos márgenes, hasta una profundidad media de 20 metros. El tratamiento consistió en una limpieza de las fracturas con agua y aire a presión, y una inyección posterior de lechada de cemento. Tanto el lavado como la inyección se realizó por grupos de 10 taladros y tramos de cinco metros de espesor. La densidad de taladros en la superficie de cimentación ha sido de uno cada 10 m² aproximadamente.

Las inyecciones de cemento se hicieron con dosificaciones variables de acuerdo con las absorciones, entre unos límites de relación agua/cemento comprendidos entre 0,5 y 2.

Las presiones medias de inyección han sido:

5 Kg/cm² hasta los 5 m de profundidad.

12 Kg/cm² a los 20 m de profundidad.

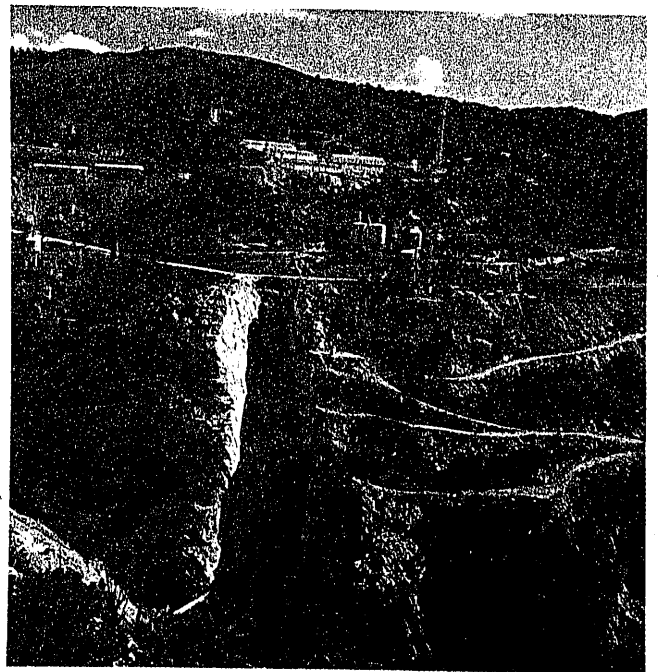


Fig. 4.—Roca de cimentación de margen derecha.

LA PRESA BOVEDA DE ALBARELLOS

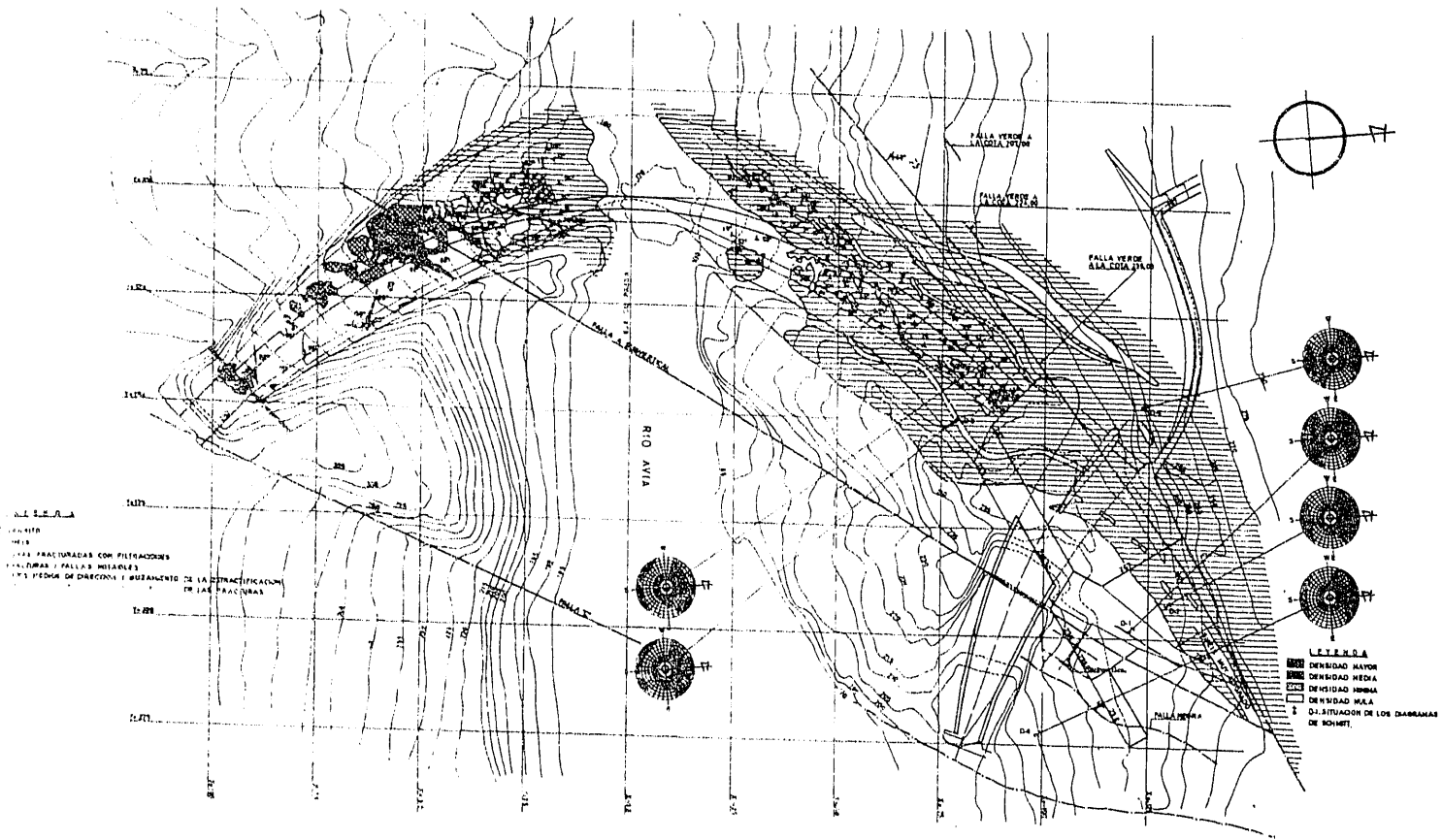


Fig. 6.—Planta geológica de la presa.

sejaron. En total se han perforado unos 4.000 metros de taladros de drenaje.

Como consecuencia del estudio de estabilidad de los macizos rocosos sobre los que se apoya la presa, desarrollados siguiendo el método de cálculo propuesto por Pierre Londe, se ha visto la conveniencia de rellenar una serie de anclajes en la ladera izquierda, con el fin de aumentar el coeficiente de seguridad al deslizamiento, según determinados posibles planos de fracturación, de la roca comprendida entre las fallas Verde y A. El número de anclajes ha sido de 58, con una longitud media de 60 metros y una tensión de 230 Tn.

En la ladera derecha se han realizado algunos anclajes aislados cuya misión ha sido impedir desprendimientos de bloques durante las excavaciones.

En la roca situada en la ladera izquierda, aguas abajo de la falla A, se realizó un tratamiento de consolidación superficial a base de inyecciones de baja presión, completado por bulones de pequeña longitud.

LA PRESA Y LOS ESTRIBOS

La concepción de las características geométricas de la presa han venido forzadas fundamentalmente por la geología del emplazamiento.

La existencia de las dos fallas antes citadas en la ladera izquierda, que limitan el macizo rocoso que debe soportar los empujes de la estructura, han determinado las formas del estribo de gravedad y las orientaciones de las directrices de los arcos, con objeto de que la resultante total de las fuerzas actuantes sobre la cimentación tenga la dirección más favorable que sea posible en relación con la estabilidad del macizo rocoso.

Por otra parte, en la margen derecha hay un macizo muy fracturado, situado inmediatamente aguas abajo de la presa, que ha sido necesario dejar al margen de los empujes de la estructura.

Por estas razones se definió la bóveda como una estructura simétrica, constituida por arcos horizontales de tres centros, cuyo radio en coronación es de 110 metros en la zona central y de 165 metros en las zonas laterales.

LA PRESA BOVEDA DE ALBARELLOS

Las curvas que determinan las magnitudes de los radios en los paramentos de aguas arriba y de aguas abajo en función de la cota correspondiente se definieron analíticamente a base de polinomios de cuarto grado.

El ángulo formado por los radios extremos de las zonas centrales de los arcos es constante, con un valor de $49\text{ g } 8888$.

En la definición de la ménsula central, se procuró que la componente de peso propio, neutralizase en lo posible las tracciones verticales originadas por el empuje hidrostático en la zona de empotramiento con el zócalo, aguas arriba, sin que se presentaran tracciones inadmisibles, a embalse vacío, en el paramento de aguas abajo en la citada zona de empotramiento.

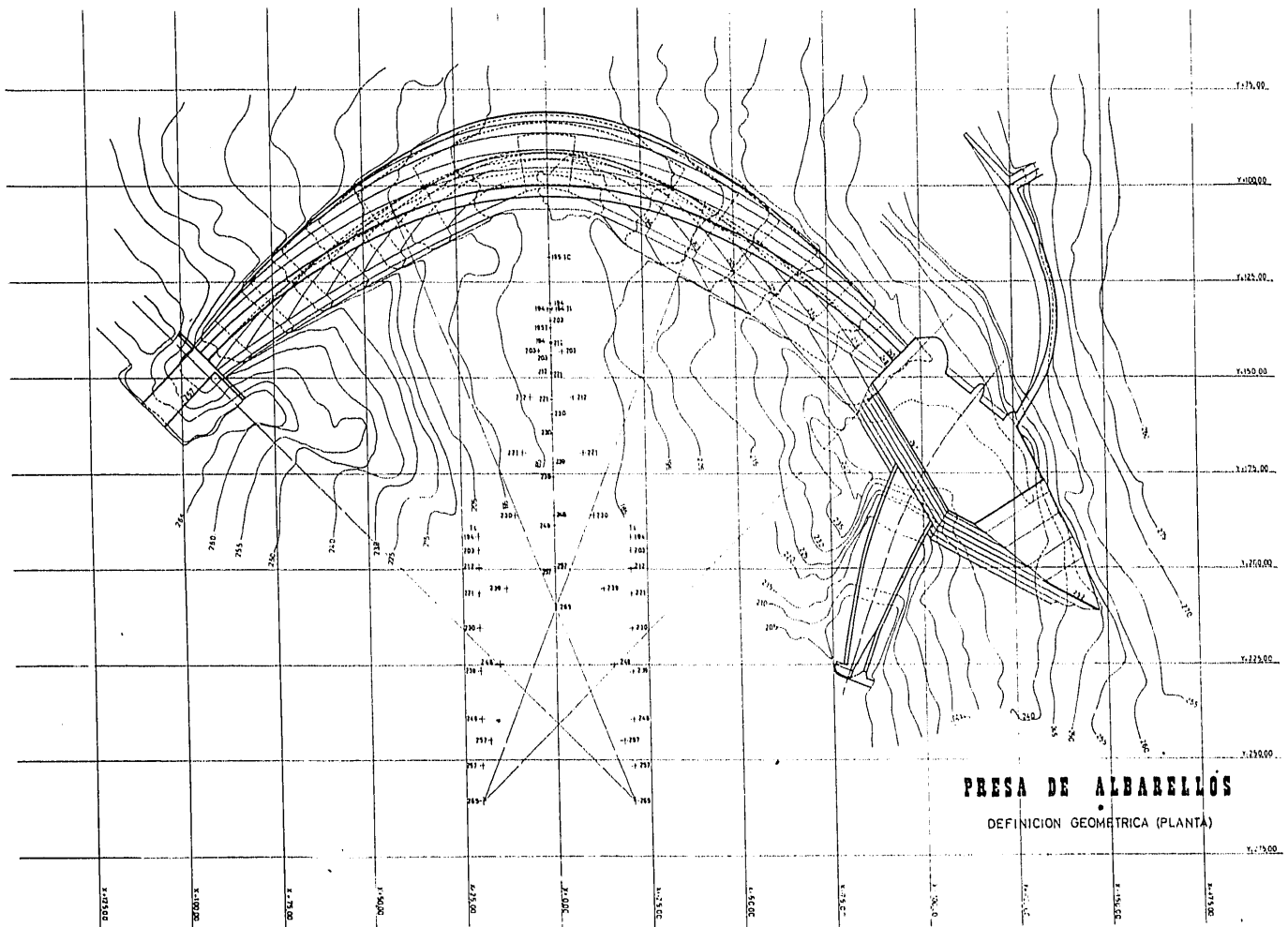
Las juntas transversales necesarias para lograr bloques de dimensiones adecuadas, que permitan, mediante un plan de hormigonado conveniente, la disipación del calor de hidratación del cemento, son superficies regladas engendradas por rectas

horizontales radiales con los arcos del paramento de aguas arriba y que se apoyan en líneas definidas sobre la superficie de referencia.

La separación de juntas es de 15 metros en coronación, aumentándose ligeramente en cimientos a causa de la forma de estas superficies.

Al proyectar el sistema de inyección de las juntas se pretendió eliminar en cuanto fue posible las válvulas y demás elementos artificiosos que se han empleado con frecuencia en obras de este tipo y que la experiencia demuestra que su funcionamiento no corresponde siempre a lo que se espera de él. Por este motivo se han dejado moldeadas en el hormigón ranuras horizontales cada tres metros de altura, que atraviesan mediante tubos el cubrejuntas situado a 40 centímetros del paramento de aguas abajo de la presa. La inyección se efectúa desde el paramento de aguas abajo y una vez terminada ésta se limpian los conductos en toda su longitud, con objeto de permitir, si fuera necesario, futuras reinyecciones.

Fig. 7.—Planta geométrica de la presa.



LA PRESA BOVEDA DE ALBARELLOS

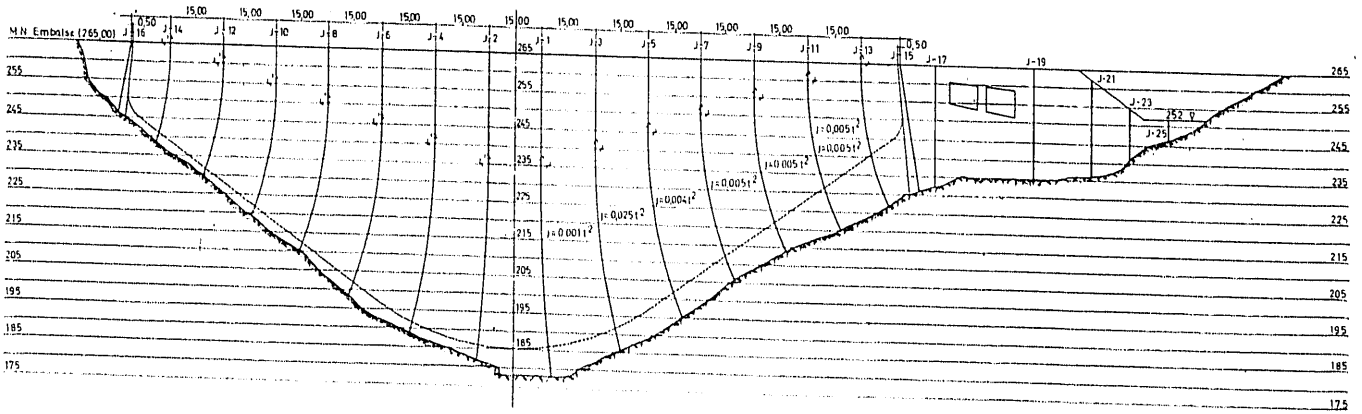


Fig. 8.—Alzado desarrollado desde aguas abajo.

En los recintos de inyección superiores, a causa de la curvatura de la presa, no pudo utilizarse este sistema y por ello se emplearon tubos con válvulas que se inyectaron desde coronación.

El estribo de gravedad de margen izquierda se ha dimensionado de forma que su masa sea la necesaria para resistir los esfuerzos transmitidos por la bóveda y la presión hidrostática que actúa directamente sobre él. Su disposición geométrica en planta viene forzada por las condiciones geológicas y geotécnicas del macizo rocoso, como ya hemos dicho anteriormente.

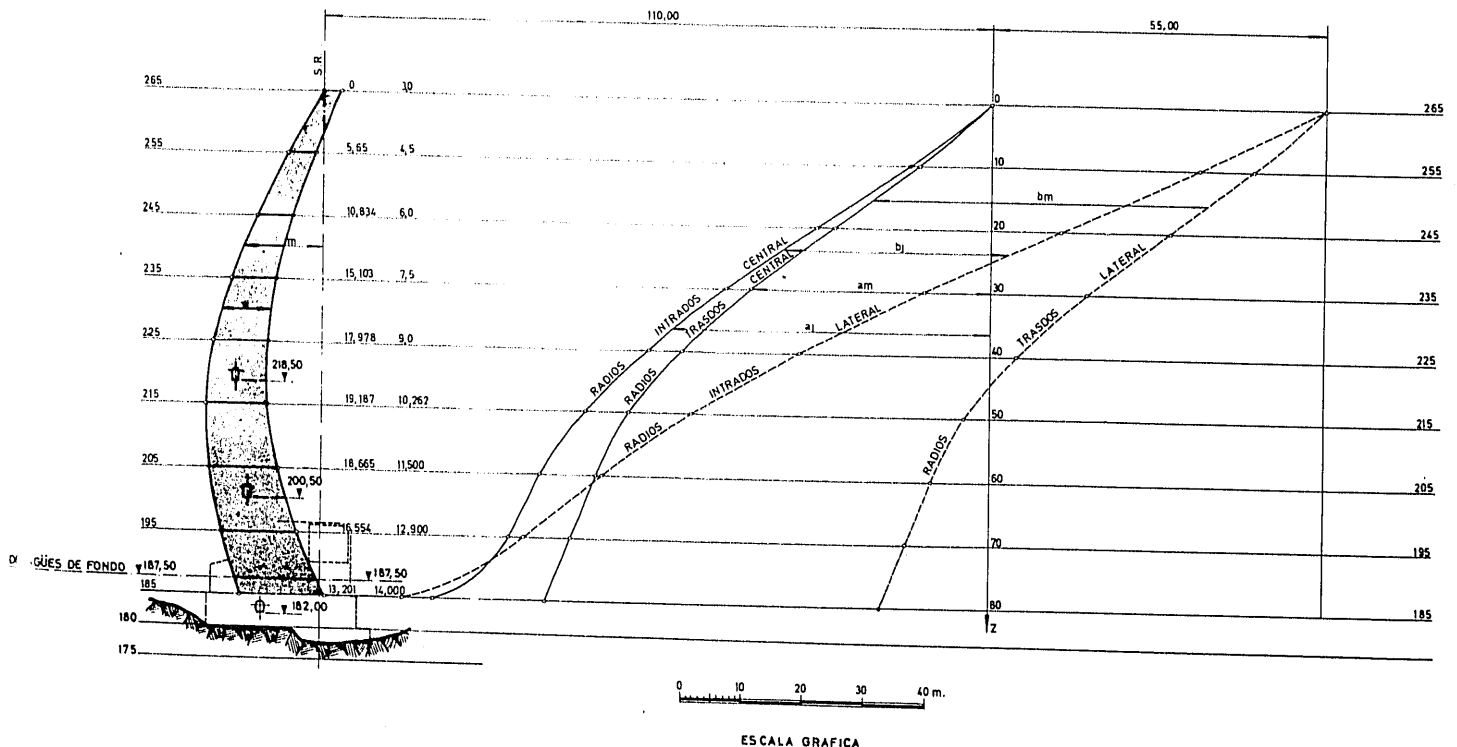
ALIVIADERO

El aliviadero está situado en la margen izquierda atravesando el estribo y prolongándose por medio de un canal de desagüe.

Este aliviadero se definió con la doble misión de poder evacuar la máxima avenida y de colaborar, a su vez, en la estabilidad del estribo de gravedad.

Para ello, a la solera del canal de desagüe se le dio un gran espesor de hormigón, con objeto de

Fig. 9.—Ménsula central y ley de radios.



LA PRESA BOVEDA DE ALBARELLOS

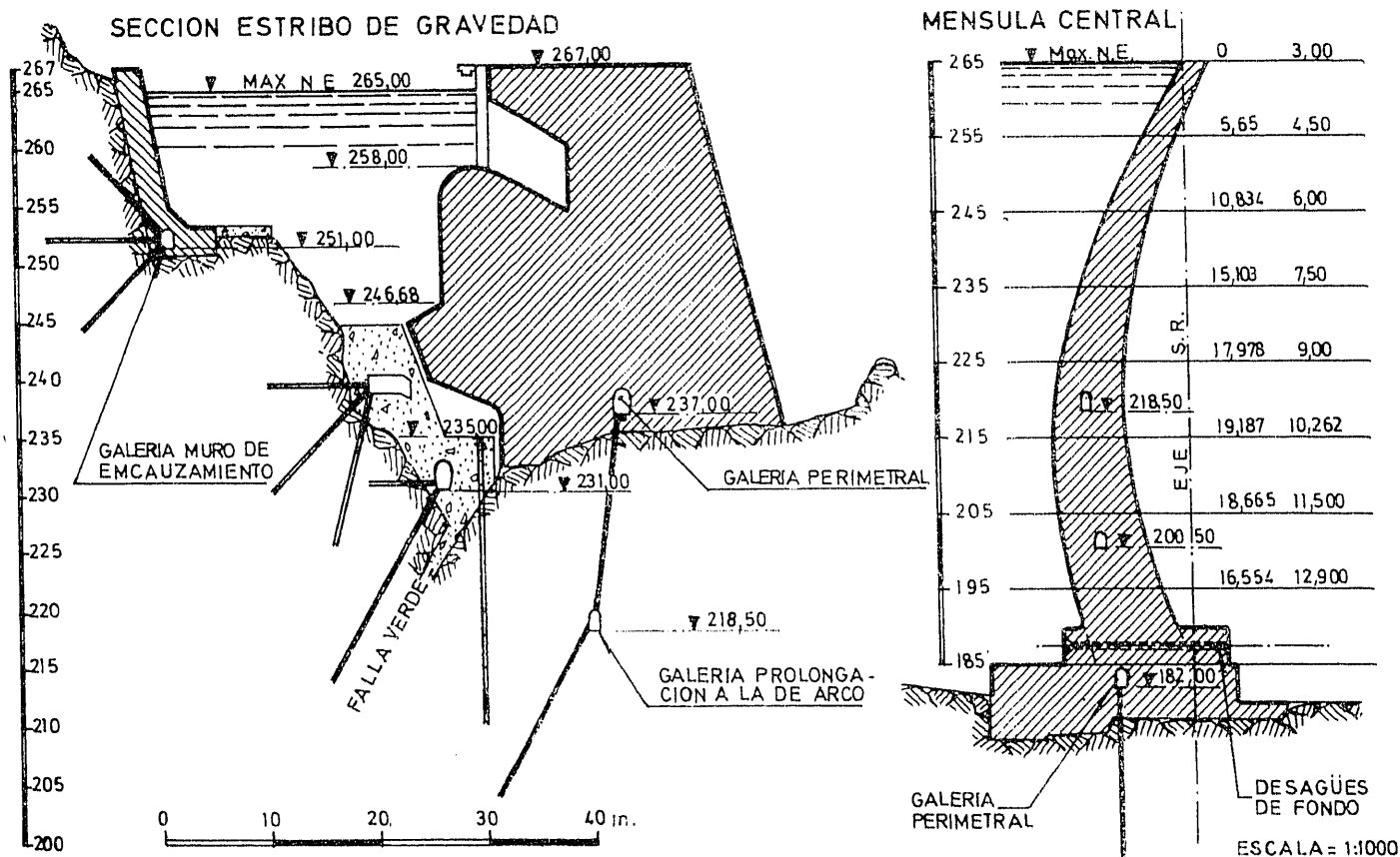


Fig. 10.—Drenaje de la cimentación.

que actúe como contrafuerte del estribo, mejorando notablemente su estabilidad.

Está dotado de dos compuertas vagón de ocho metros de largo por siete metros de alto cada una y tiene una capacidad máxima de 640 m³/seg.

Las características geométricas de su embocadura, canal y trampolín final de lanzamiento libre se han definido mediante ensayos hidráulicos en modelo reducido.

CALCULO DE LA ESTRUCTURA Y ENSAYOS EN MODELO REDUCIDO

El cálculo de tensiones y deformaciones de la presa de Albarellos se ha hecho descomponiendo la bóveda en una malla teórica constituida por cuatro arcos y siete ménsulas y haciendo coincidir los desplazamientos radiales de los puntos de cruce de arcos y ménsulas.

Se ha prescindido de los ajustes de las deformaciones tangenciales y distorsiones angulares, ya que son mucho menores que las deformaciones radiales, y la experiencia demuestra que las ten-

siones obtenidas por un ajuste más completo son inferiores a las obtenidas por el ajuste radial.

Se ha considerado un módulo de elasticidad para el hormigón de 200.000 Kg/cm² y para el terreno de 100.000 Kg/cm², incluido el efecto de zócalo.

El estado tensional máximo se obtiene combinando las sollicitaciones de peso propio, presión hidrostática, subpresión máxima y efecto térmico.

La máxima tensión de compresión obtenida por estos efectos es de 38,1 Kg/cm² en la clave del arco a la cota 215 y la máxima tracción es de 5,20 Kg/cm² en la ménsula a la cota 215.

Para complementar el cálculo analítico a que se hace referencia, se han efectuado una serie de ensayos en modelo reducido de la bóveda y del estribo. En los modelos ensayados se fueron introduciendo modificaciones a medida que se tenían más datos sobre las características geomecánicas de la roca de cimentación. Por último, se ha hecho la hipótesis, muy desfavorable, de prescindir de la roca situada aguas arriba de la falla Verde y aguas abajo de la falla A. Se ha considerado en

LA PRESA BOVEDA DE ALBARELLOS

este último ensayo un módulo de deformabilidad de la roca igual al del hormigón en la ladera derecha, cuenco y ladera izquierda hasta la cota 220. Sobre esta cota, en la ladera izquierda, el módulo de deformabilidad de la roca considerado es igual a 0,3 del correspondiente al hormigón.

Se han medido tensiones en ambos paramentos para los niveles de embalse a cotas 258 umbral de vertedero y 265 máximo embalse, y se han medido desplazamientos radiales para los siguientes niveles de embalse: 235, 245, 258 y 265.

De la combinación de solicitaciones de peso propio y presión hidrostática para el nivel máximo de embalse, obtenemos unas tensiones principales máximas de 47 Kg/cm² a compresión en el arranque aguas abajo del arco a la cota 215 y 9 Kg/cm² de tracción en el arranque de las ménsulas a las cotas 215 y 195 del paramento aguas arriba.

En el estribo de gravedad de la margen izquierda la compresión máxima es de 22 Kg/cm².

Al comparar estos valores con los obtenidos en el cálculo, hay que tener en cuenta que en éste se indican tensiones en arcos y ménsulas, y en el modelo, tensiones principales. Por otra parte, en el último ensayo efectuado, al que hacemos referencia, las hipótesis que se hacen sobre las características geomecánicas de la roca de cimentación de la ladera izquierda son desfavorables en comparación con la realidad.

De todas formas, las tensiones máximas obtenidas en el modelo siguen siendo inferiores a los límites admisibles y la distribución de tensiones, tanto en bóveda como en estribo, es correcta.

CONSTRUCCION

El volumen total de excavación ha sido de 195.000 m³ y el de hormigón de 217.000 m³.

Las fechas de comienzo y terminación de las principales unidades de obra se recogen en el siguiente cuadro:

	Comienza	Termina
Desvío del río	Jun. 69	Oct. 69
Excavaciones de presa y estribo.	Feb. 69	Marzo 71
Tratamiento de consolidación ...	Oct. 70	Dic. 72
Hormigonado	Sept. 70	Oct. 72
Pantalla de impermeabilización ...	Nov. 71	Enero 73
Pantalla de drenaje	Sept. 72	Feb. 73
Inyección de juntas	Nov. 72	Feb. 73

Las dosificaciones tipo del hormigón empleado en la bóveda y estribo han sido:

Concepto	Dosificación por m ³		
	Kg	Kg	Kg
Arido 1 (0 - 2,5 mm)	420	450	470
Arido 2 (2,5 - 9,5 mm)	180	180	180
Arido 3 (19,5 - 38 mm)	550	520	530
Arido 4 (38 - 76 mm)	500	530	530
Arido 5 (76 - 125 mm)	410	420	415
Cemento con un 25 por 100 de puzolana	250	225	200
Agua	140	125	125
TOTAL	2.450	2.450	2.450

Las resistencias del hormigón con 250 Kg de cemento por metro cúbico han sido del orden de 300 Kg/cm² a veintiocho días y 360 Kg/cm² a noventa días, con unas dispersiones del 9 por 100 tanto para los ensayos realizados a veintiocho días como para los realizados a noventa días.

ELEMENTOS DE CONTROL DE LA PRESA Y LADERAS

Con el fin de comprobar el comportamiento de la estructura y de la roca de cimentación se han instalado los aparatos que a continuación se citan, agrupados en función de la misión que tienen encomendada.

Control de tensiones.

- Ciento diez extensómetros eléctricos agrupados en 23 grupos bidimensionales y tridimensionales en la bóveda.
- Treinta y nueve extensómetros eléctricos de gran base, agrupados en seis grupos bidimensionales y tridimensionales en la roca de cimentación.

Control térmico.

- Ciento diez pares termoelectrónicos distribuidos en bóveda y estribo.

Control de movimientos en juntas.

- Setenta y cuatro medidores eléctricos y 47 bases de elongómetro mecánico.

Control de desplazamientos.

- Seis péndulos directos y sus correspondientes péndulos invertidos, anclados estos últimos en roca, a 20 metros de profundidad, instalados en la bóveda.
- Dos péndulos invertidos, que alcanzan la cota de coronación, y anclados a profundidades de 30 metros bajo la cimentación en el estribo.
- Cuatro extensómetros de hilo de 70 metros de longitud en el macizo rocoso de la ladera izquierda.
- Cincuenta bases para nivelación y 56 bases para poligonación en coronación y galerías.

Control de filtraciones y subpresiones.

- Doscientos sesenta y un drenes y 63 piezómetros distribuidos estos últimos en varios perfiles, tanto en la cimentación de la bóveda como en la del estribo.

Control del contacto hormigón-roca.

- Tres extensómetros eléctricos de gran base, que miden el despegue del hormigón con la roca de cimentación.

Control de anclajes en roca.

- Cinco células para comprobar el estado tensional de los anclajes de la ladera izquierda.

COMPORTAMIENTO DE LA PRESA

El primer llenado del embalse, que se inició en diciembre de 1972 alcanzándose prácticamente la cota máxima en julio de 1973, se realizó siguiendo un programa preestablecido para poder comprobar en todo momento el comportamiento de la estructura.

Ha sido posible llevar a cabo esta primera puesta en carga controlada de la presa adecuando la explotación de la central al programa establecido, y en los casos en que el caudal turbinado no era suficiente para mantener la cota de embalse, accionando los desagües de fondo.

Durante esta etapa se completó el sistema de drenaje a partir de los datos de aforos y subpresiones.

En relación con los desplazamientos medidos con los péndulos, se detectaron en algunos de ellos movimientos irreversibles de muy pequeña magnitud, consecuencia de un ajuste de la estructura a la cimentación durante la primera puesta en carga. En campañas sucesivas de llenado y vaciado del embalse no se detectaron más movimientos de tipo irreversible.

Durante la inyección de juntas hubo necesidad de inyectar algunos compartimientos antes de que los correspondientes bloques de hormigón se enfriaran lo suficiente. Estos compartimientos se reinyectaron posteriormente, con lo que se logró un mayor monolitismo de la estructura, como muestran las lecturas de los elementos de control de juntas.

En dos bloques de la presa, y en el paramento de aguas arriba aparecieron algunas fisuras horizontales de unos 30 centímetros de profundidad, que se inyectaron con resinas. Se instalaron medidores eléctricos con los que se ha podido comprobar la eficacia del tratamiento, ya que no han detectado aperturas de dichas fisuras con posterioridad a la inyección.

En general, podemos decir que en los seis años que lleva en explotación la presa de Albarellos, su comportamiento ha sido correcto, comprobándose que los valores de los desplazamientos medidos con los péndulos así como de las tensiones medidas con extensómetros concuerdan bastante bien con los valores esperados de acuerdo con los ensayos en modelo reducido y cálculos realizados.

De todos los aparatos de auscultación instalados en la presa, los únicos que desde su instalación han quedado inutilizados, bien por mala concepción de los mismos o por deficiencias en su montaje, han sido las células de control de la tensión de los anclajes y los extensómetros de hilo de 70 metros de longitud. Los restantes equipos a los que está encomendado el control de la presa (extensómetros eléctricos, pares termoeléctricos, piezómetros, péndulos, etc.) proporcionan datos totalmente concordantes los unos con los otros y que como ya hemos dicho nos permiten opinar que el comportamiento de la estructura y macizos rocosos es correcto y está de acuerdo con las previsiones del proyecto.