Informes de la Construcción Vol. 12, nº 118
Febrero de 1960

531 - 46

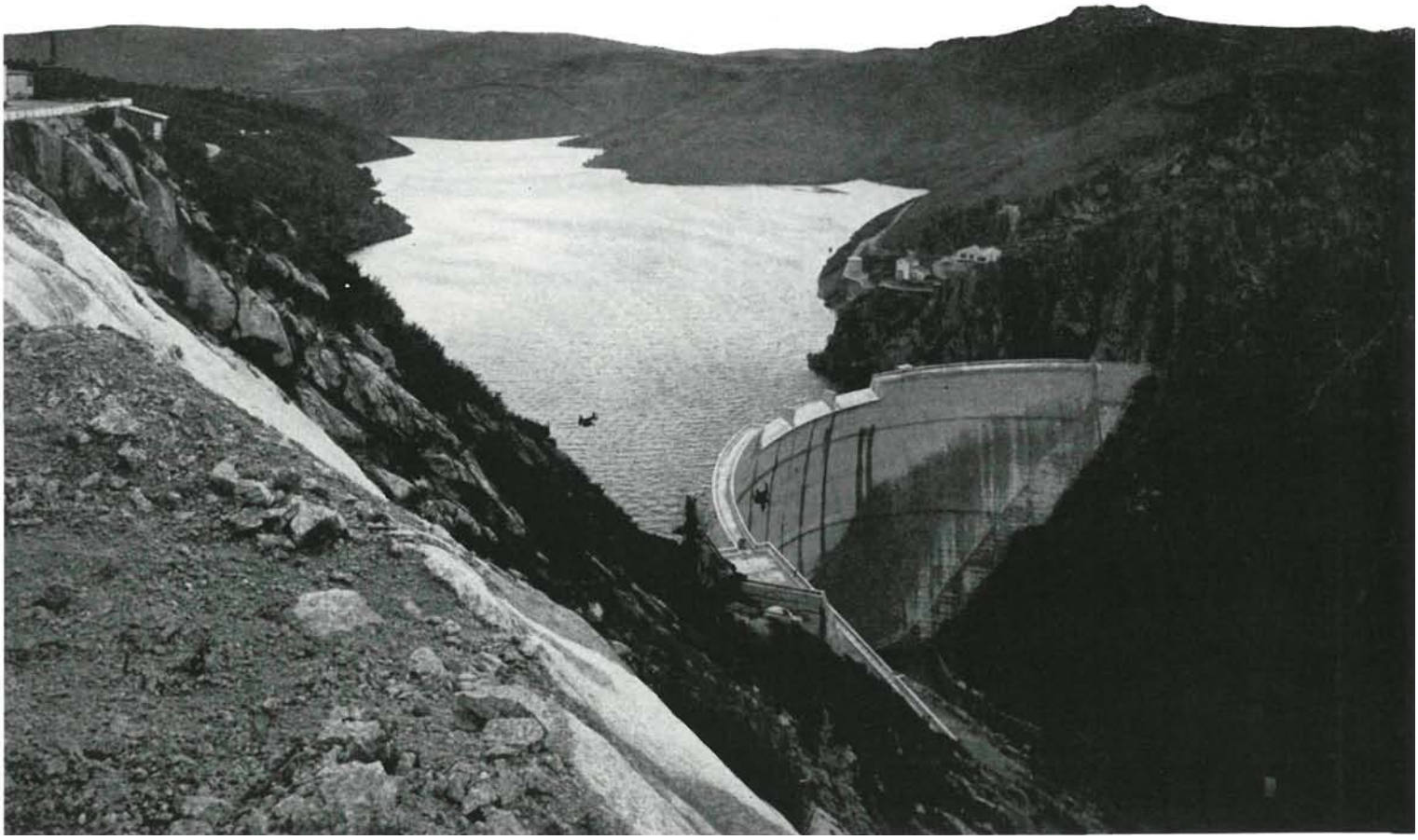
aprovechamiento hidroeléctrico del río Eume

LUCIANO YORDI DE CARRICARTE, ingeniero de caminos

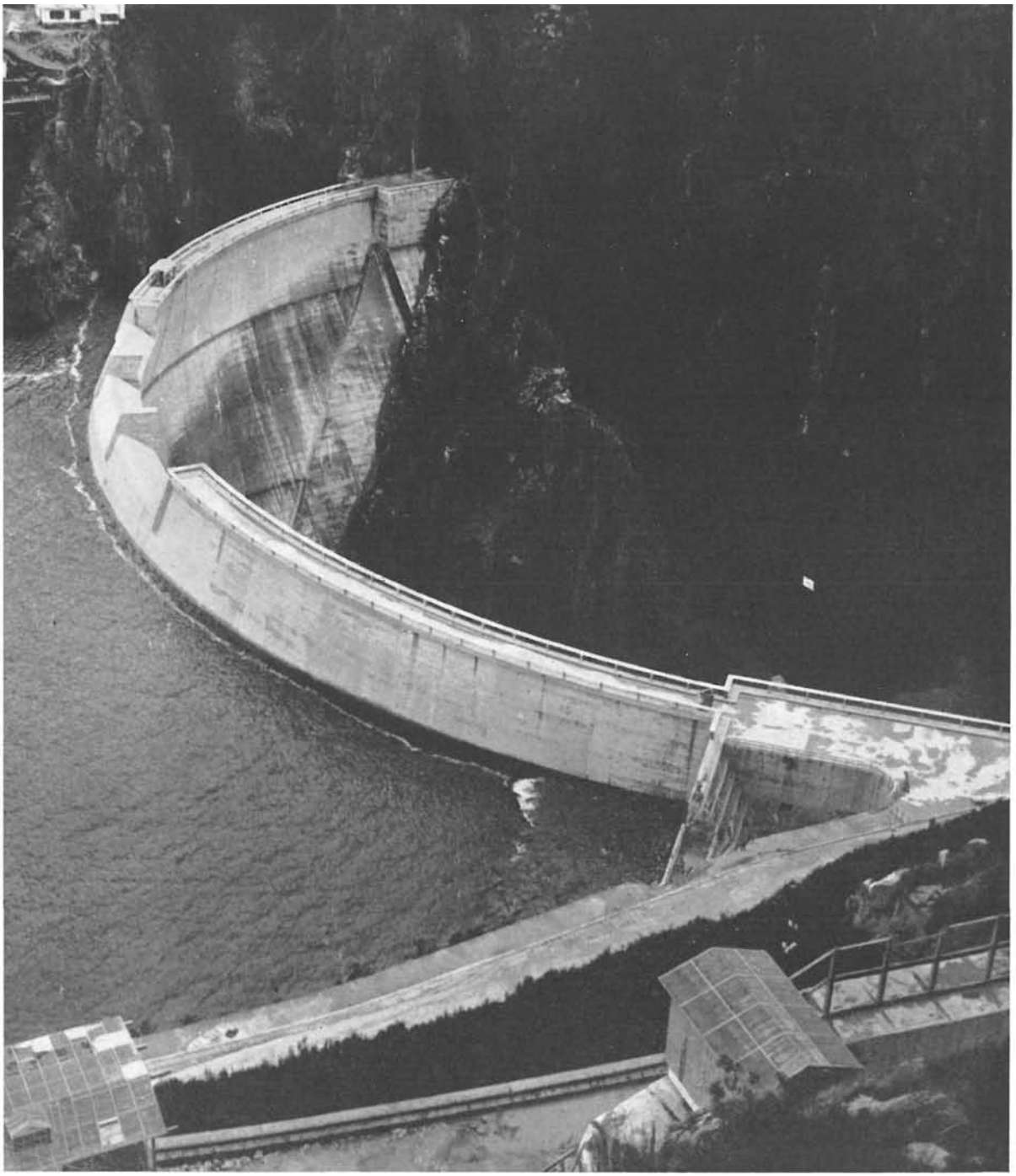
En la provincia de La Coruña, junto a la desembocadura del río Eume, y en las proximidades del pueblo de Puentedeume, se ha realizado el aprovechamiento hidroeléctrico de dicho río, formado, en cuestión, por tres elementos básicos: una presa de embalse de doble curvatura, de 103 m de altura; una conducción forzada, integrada por un túnel de 2.839 m de longitud y dos tuberías de 310; y una central, equipada con dos grupos de 75.000 CV.

Emplazamiento de la presa

El tramo del río Eume elegido para formar el salto proyectado está situado aguas abajo de Puentes de García Rodríguez, presentando en esta parte el río acusada pendiente por encontrarse en esa zona intermedia exenta de acarreos importantes, y, por lo tanto, propicia para construir una presa con poca excavación de cimentación.



© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es



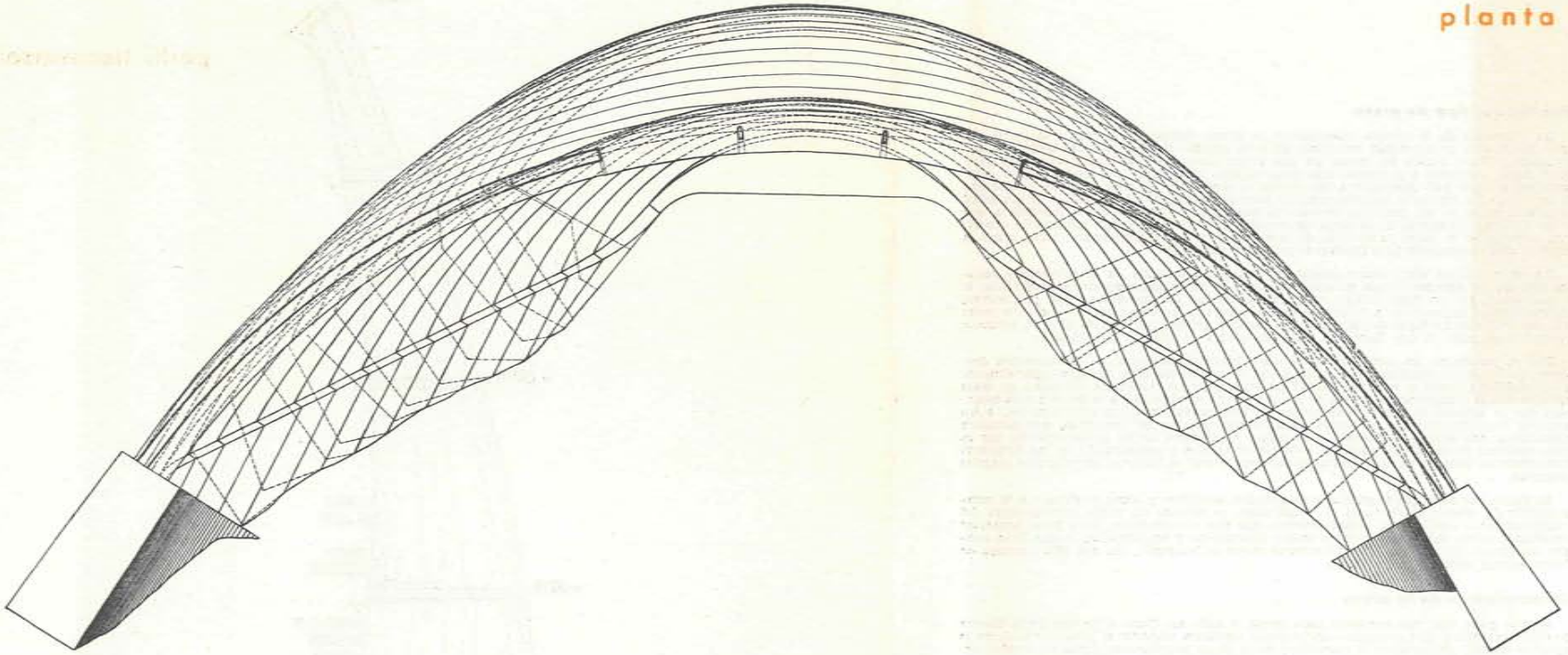
Dentro de este tramo, el lugar elegido para el emplazamiento de la presa, por reunir las mejores condiciones topográficas, ofrecía un terreno constituído por rocas cristalofílicas, predominantemente pizarrosas, con estratos próximos a la vertical y sensiblemente normales al cauce del río en ese tramo. Los lechos pizarrosos contenían algas que inducían a asignar al paquete de estratos la edad cámbrica, sin que sea muy segura su clasificación, desde luego paleozoica.

En cambio, aguas arriba de la zona de emplazamiento el valle se ensancha y no ofrecía buenas condiciones topográficas; aguas abajo estas condiciones eran más favorables, pero no así las geológicas, por penetrar en la zona de granito, cuya naturaleza, menos resistente, motiva el grado más avanzado de la erosión en sus diaclasas, siendo a este respecto bien elocuente el gran liso que se presenta en la ladera derecha, verdadero espejo de falla, que nos ha servido para la explotación de la cantera de la obra. También en la ladera izquierda se observaron, en esa zona de aguas abajo, algunos paquetes de estratos separados de la ladera y que la erosión del río irá socavando hasta arrastrarlos definitivamente.

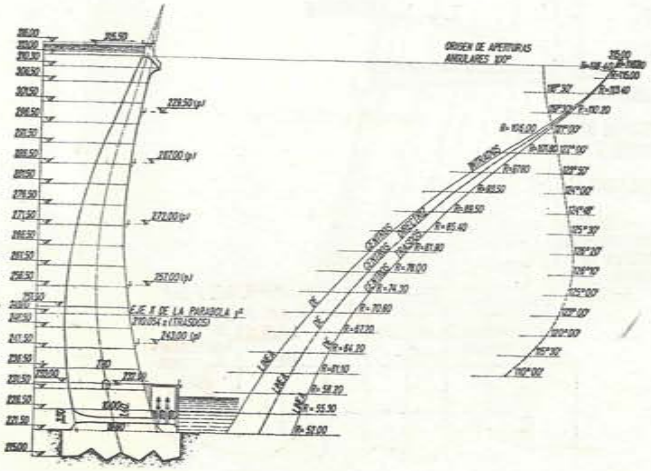
© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

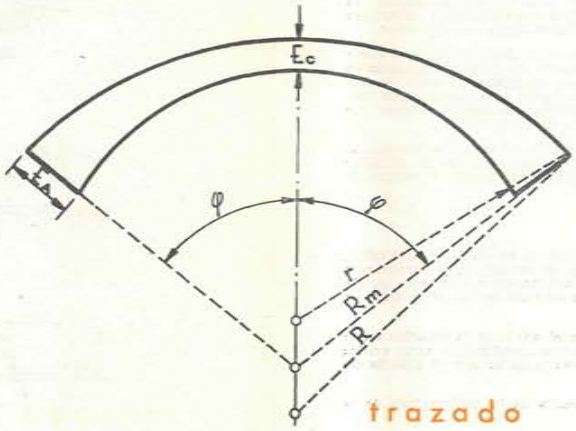
© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)

planta



perfil, centros de trazado y apertura angular





trazado

características

Altura de coronación (cota 316) sobre el punto más bajo de fundación (m)	103,00
Radio de coronación (m)	116,60
Apertura angular en coronación entre recalces	118°
Apertura angular máxima (cota 266)	126° 30'
Desarrollo en coronación incluídos estribos (metros)	284,00
Espesor en clave a la cota 312 (m)	3,20
Espesor en clave de la bóveda a la cota 221,50 (m)	19,60
Volumen total de hormigón, incluídos estribos (m³)	225.000

http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Elección del tipo de presa

La naturaleza de la cerrada seleccionada, la misma calidad de la roca y la forma del valle plantearon la necesidad ineludible de ir al estudio de una solución definitiva que encajase de lleno dentro del campo de una buena economía y de una mayor seguridad. Estas ideas indujeron a proyectar una presa-cúpula, rompiendo una cierta inercia existente en nuestro país favorable a las presas de gravedad. El considerar la estabilidad de los elementos verticales aislados, como se hace generalmente en las presas de gravedad de planta recta, es un 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; la elección de una presa-bóveda se presentaba, pues, como la solución más conveniente para resolver el problema planteado.

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 excluídas 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: los mayores conocimientos actuales en el campo estático, debidos especialmente a los modelos reducidos; a la posibilidad de confrontar los resultados obtenidos en estos modelos con el comportamiento real de la obra puesta en servicio; a la técnica más avanzada que se alcanzó en los procedimientos de impermeabilización y consolidación; a los mayores conocimientos que se tienen de las características del hormigón, que permiten resistencias más altas y uniformes; a la mayor experiencia de las presas-bóvedas por la gran cantidad de obras ejecutadas; y 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 construídas, se alcanzó un mejor conocimiento del comportamiento real de las presas-bóvedas, que este conocimiento sirva para proyectar estructuras cuyas solicitaciones estén mejor distribuídas 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.

Características de la presa

Elegido como tipo más ventajoso para cerrar el valle del Eume el de una presa-bóveda de doble curvatura (presa-cúpula), se proyectó simétrica respecto al plano vertical de la ménsula central, delimitando la estructura de la presa propiamente dicha un recalce perimetral continuo debajo del cual se creó un tapón de fondo, en cuyo interior se alojan los órganos de cierre de los dos desagües de fondo de que va dotada la estructura.

Los datos geométricos principales de la presa del Eume son:

La estructura está definida, en lo que concierne a los elementos horizontales, por arcos de un solo centro y radios variables, tanto en lo que respecta al trasdós como al intradós de cada uno de ellos, preocupándonos de realizar la mayor continuidad posible en las variaciones de las curvas de los radios y de los espesores para reducir al mínimo los aumentos locales de los esfuerzos. La cúpula se dibujó también con espesores y curvaturas en los planos horizontales y verticales, gradualmente crecientes hacia los arranques.

Un elemento de juicio que influyó notoriamente en nuestra decisión de ir a doble curvatura, fué la creencia que en una presa de simple curvatura los esfuerzos secundarios actúan sobre las generatrices previstas como vigas rectilíneas, vinculadas al suelo elástico y más o menos empotradas en él, mientras que en la presa-cúpula estas ménsulas se sustituyen por otros arcos que apuntan contra la base y contra una banda superior que forma parte del cuerpo de la presa, terminando en el arco de coronación.

Además la doble curvatura nos permitió inicialmente resolver el problema del aliviadero, ya que, al acentuar suficientemente el desplomo hacia aguas abajo de las ménsulas centrales, nos garantizó el alejamiento de la lámina vertiente, excluyendo el peligro de erosión en el pie de la presa.

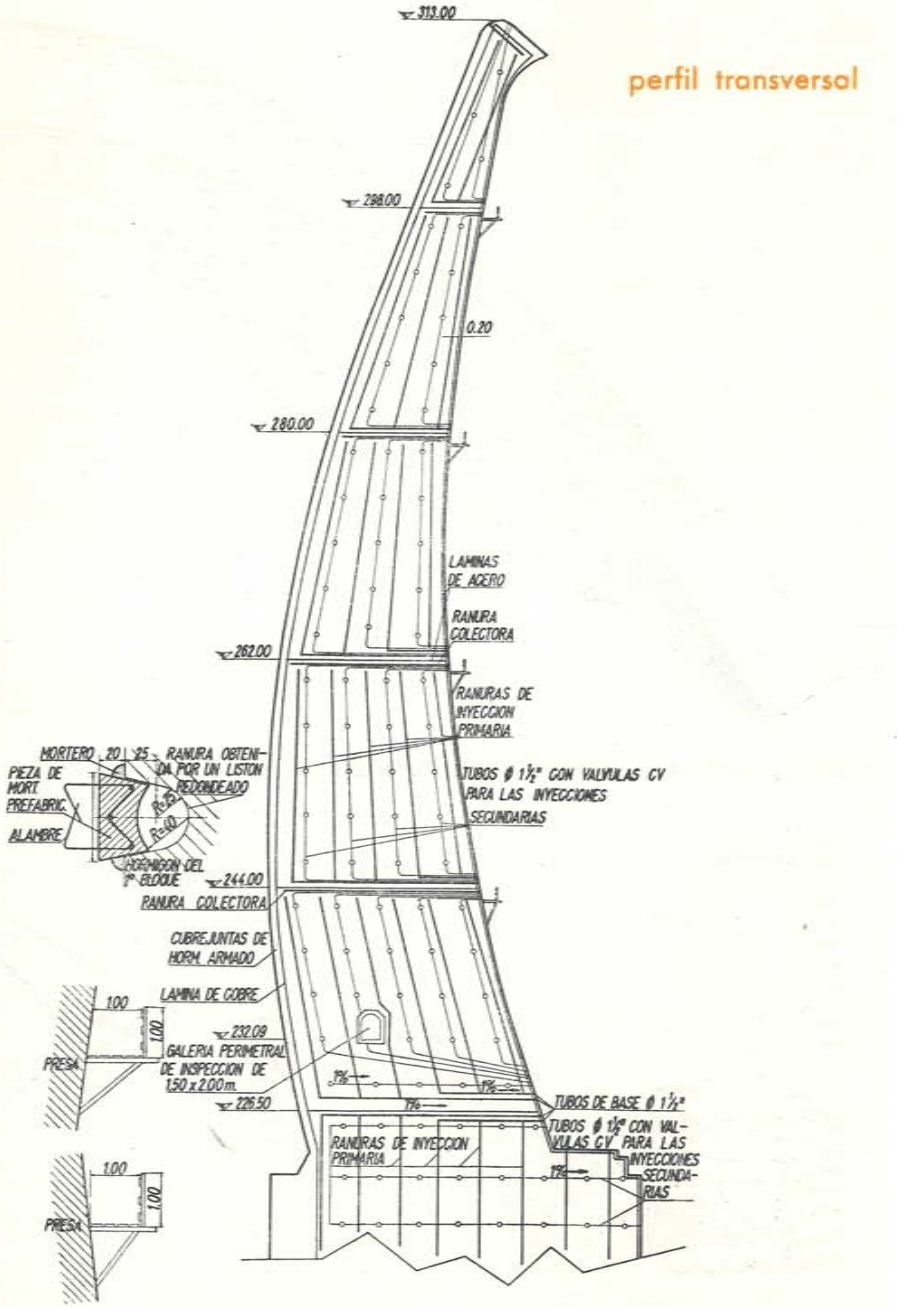
comprobación estática

La estructura se ha calculado por el método usual, siguiendo la teoría de la elasticidad, de arcos elásticos horizontales independientes, empotrados en arranques, y sometidos a la presión hidrostática, a las variaciones térmicas y a las solicitaciones originadas por la retracción del hormigón. También se hizo previamente un reajuste radial de la ménsula central.

Los arcos de la parte inferior de la presa, en los que el valor de la relación radio de curvatura—espesor medio era inferior a 4,50, se comprobaron simplemente como anillos de fuerte espesor, tanteándose además las bóvedas activas posibles por el método de Malterre.

En el cálculo de los arcos se tuvo en cuenta la afluencia de la deformación de la roca siguiendo el método de Vogt.

perfil transversal



Como medida de prudencia se excluyó la contribución de los elementos verticales en el cálculo de los elementos horizontales.

Como complemento a este estudio analítico se hicieron dos estudios tridimensionales en modelos: uno en el Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción de Madrid y otro en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa. Estos estudios dieron resultados plenamente satisfactorios.

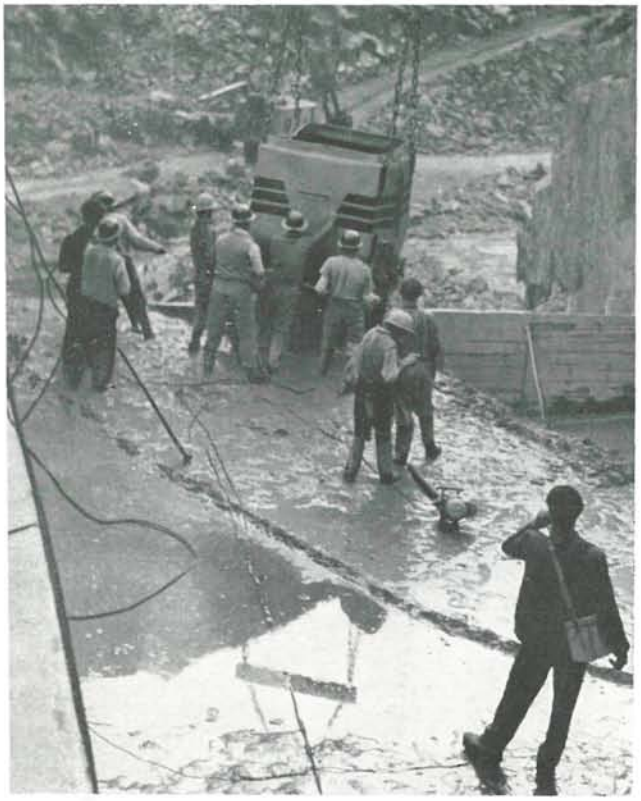
Juntas de contracción

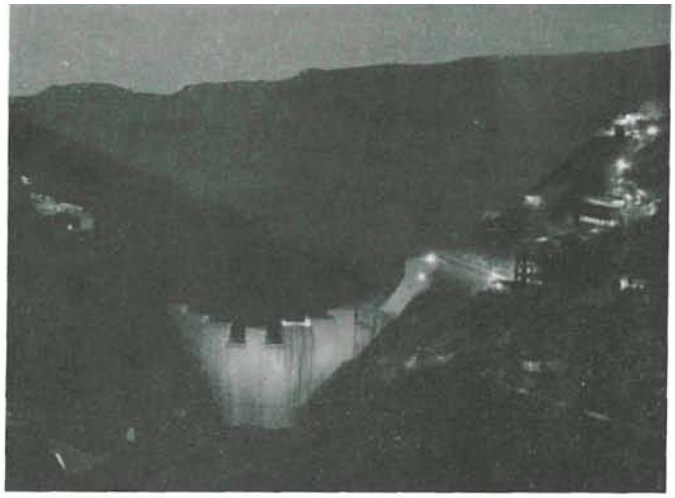
En relación con este aspecto, hay que decir en primer lugar, que en el proyecto del Eume se ha dado la máxima importancia a las juntas de que irá dotada la presa, puesto que se ha llegado a la convicción de que el modo mejor para oponerse a las tensiones originadas por las acciones térmicas es el de prevenirlas; esto es, consentir con gran amplitud aquellas contracciones que si fuesen impedidas por la continuidad darían precisamente origen a las tensiones mismas.

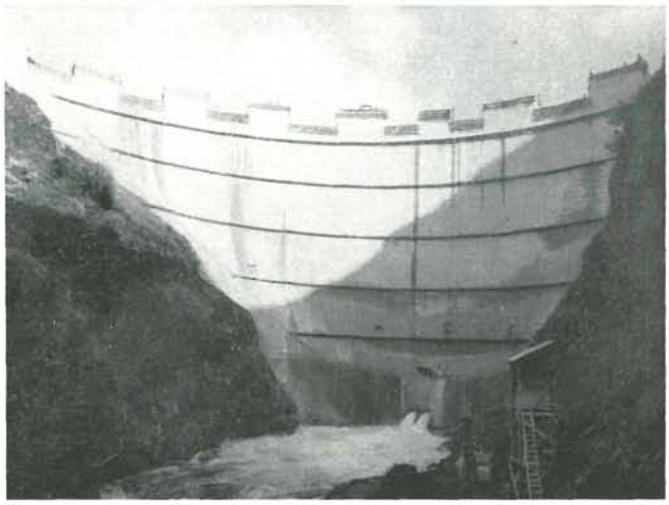
Se han previsto, por ello, juntas permanentes y verticales a la distancia media de 12 m y en número de 21, o sea, todavía más frecuentes que lo acostumbrado, teniendo en cuenta las características de los cementos españoles.

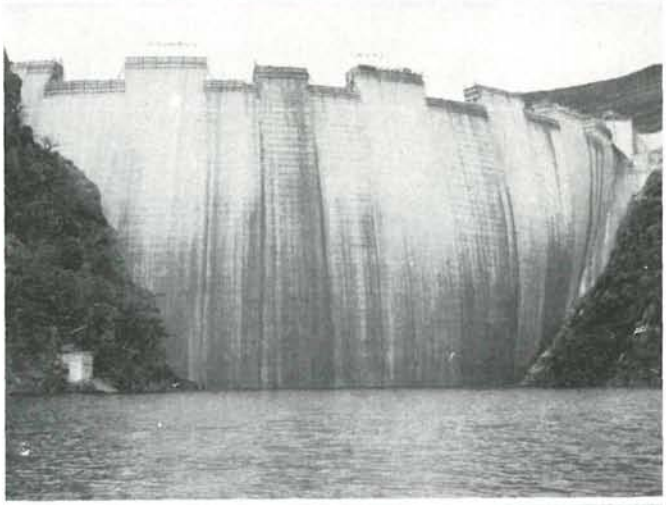
Quedan así ampliamente previstas en la presa aquellas posibilidades de contracción de conjunto, y, además, aquellas posibilidades de contracciones locales, limitadas a una parte bien pequeña del espesor, normalmente en la proximidad de los paramentos debido a la no rectitud y uniformidad de los diagramas térmicos.

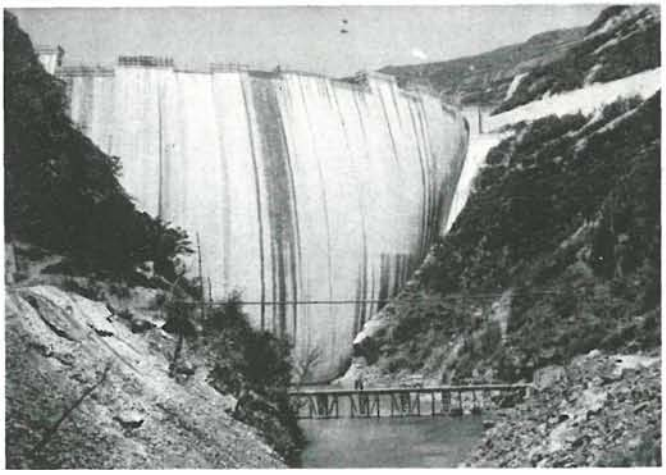
© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es











Aliviadero

La cuenca vertiente del río Eume hasta el emplazamiento de la presa tiene una superficie total de 500 kilómetros cuadrados. La lluvia media anual es de 1.200 mm/m^2, que, unida a un elevado coeficiente de escorrentía debido a la impermeabilidad del terreno, origina una aportación media anual de 400×10^6 m^3 de agua con un caudal medio de 13 m^3/s. Las máximas avenidas, deducidas según el estudio del río y de otros similares situados en la cuenca atlántica, se fijaron en 600 m^3/s.

Dada la pequeña cuantía de estas avenidas, después de una serie de tanteos, entre la solución de un aliviadero en pozo con una embocadura en forma de "Morning glory" o un aliviadero libre en coronación, nos decidimos por esta última solución. Esta elección fué debida al factor económico, a la facilidad constructiva y a los resultados de las prospecciones sísmicas realizadas en el cauce en la zona de vertido, en la cual se obtuvieron módulos de elasticidad de la roca del orden de los 500.000 kg/cm^2.

El vertedero quedó definido por tres vanos de 20 metros de luz con una altura de 2,50 metros de lámina vertiente, que en caso de emergencia puede alcanzar los 3,00 metros. Estas tres láminas caen en un cuenco amortiguador de solera parabólica con vértice en la cota 220, cerrada por una contra-ataguía de planta recta y coronación horizontal de cota 227.

El aliviadero es libre sin compuertas, a causa del escaso valor de los terrenos afectados por la sobreelevación de la lámina en caso de máximas avenidas sobre el nivel normal del embalse.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Para la comprobación de este aliviadero se realizaron varios ensayos sobre un modelo a escala 1/60, estudiándose su régimen de funcionamiento, el perfil del mismo, abarcándose la forma de la lámina vertiente, la capacidad de desagüe y el despegue o adherencia de aquélla sobre el paramento de aguas abajo de la presa.

La solución definitiva conseguida es satisfactoria, comprobándose que las presiones máximas en el cuenco no sobrepasan los 23 metros, y que no existen prácticamente presiones negativas.

El funcionamiento de vertido es bueno aun con los caudales más altos, quedando la agitación limitada al interior del cuenco, sin peligro ninguno de erosión para las laderas y cauce.

Toda la solera del cuenco va drenada con tubos de fibrocemento de 6 pulgadas, con salida al exterior para evitar efectos de subpresiones en el peor de los casos.

Desagües de fondo

Para complementar el aliviadero y para cumplir la misión de vaciar el embalse en un momento determinado, la presa va dotada de dos desagües de fondo, de 1,40 m de diámetro, cerrados cada uno de ellos por dos compuertas gemelas de tipo americano, de $1{,}00 \times 1{,}50$ m, construídos en acero moldeado y accionadas por gatos hidráulicos. La carga total sobre el centro de las compuertas es de 92,00 m de altura.

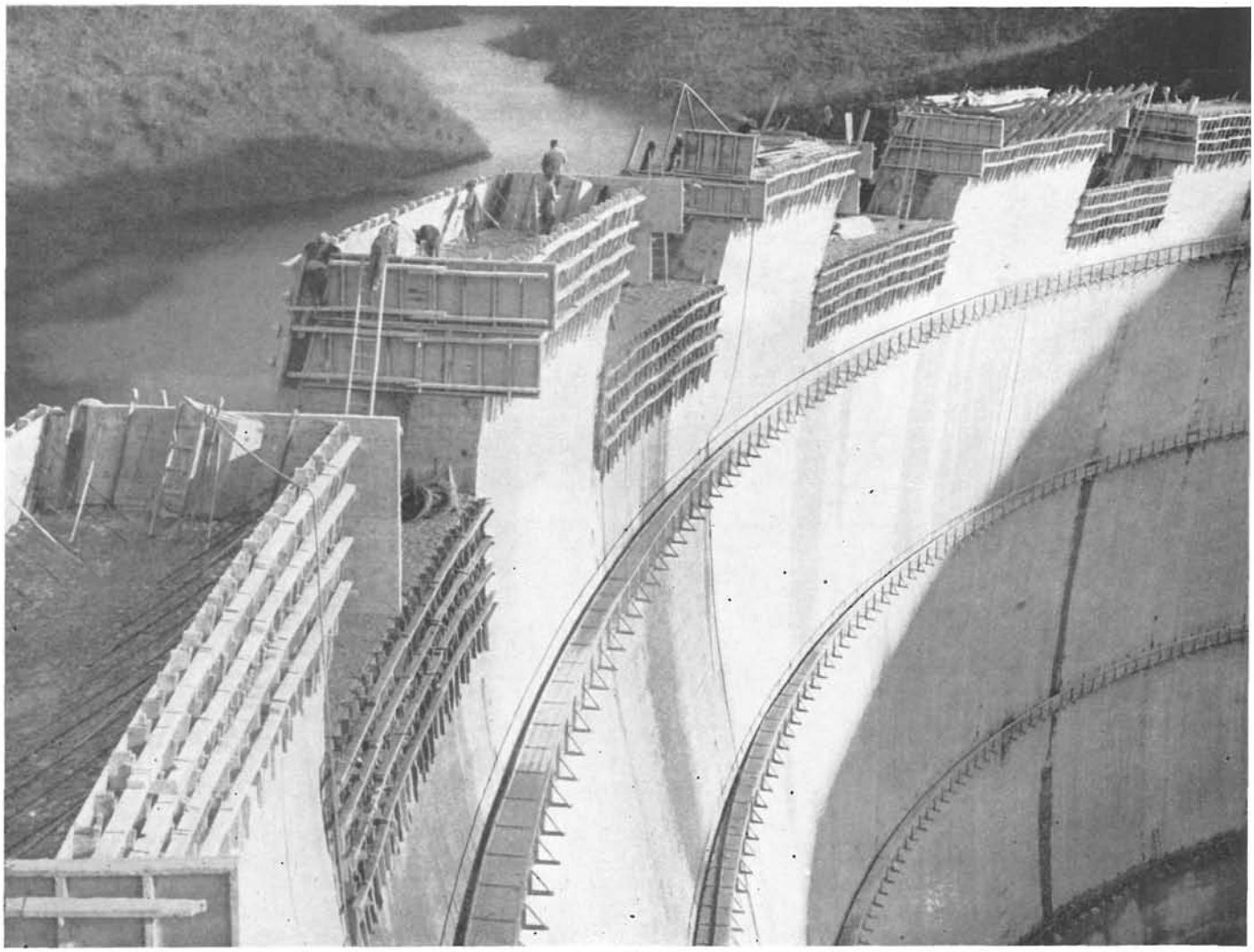
Túnel de conducción

El túnel de conducción del Salto del Eume tiene una longitud de 2.839 metros y 3,30 metros de diámetro.

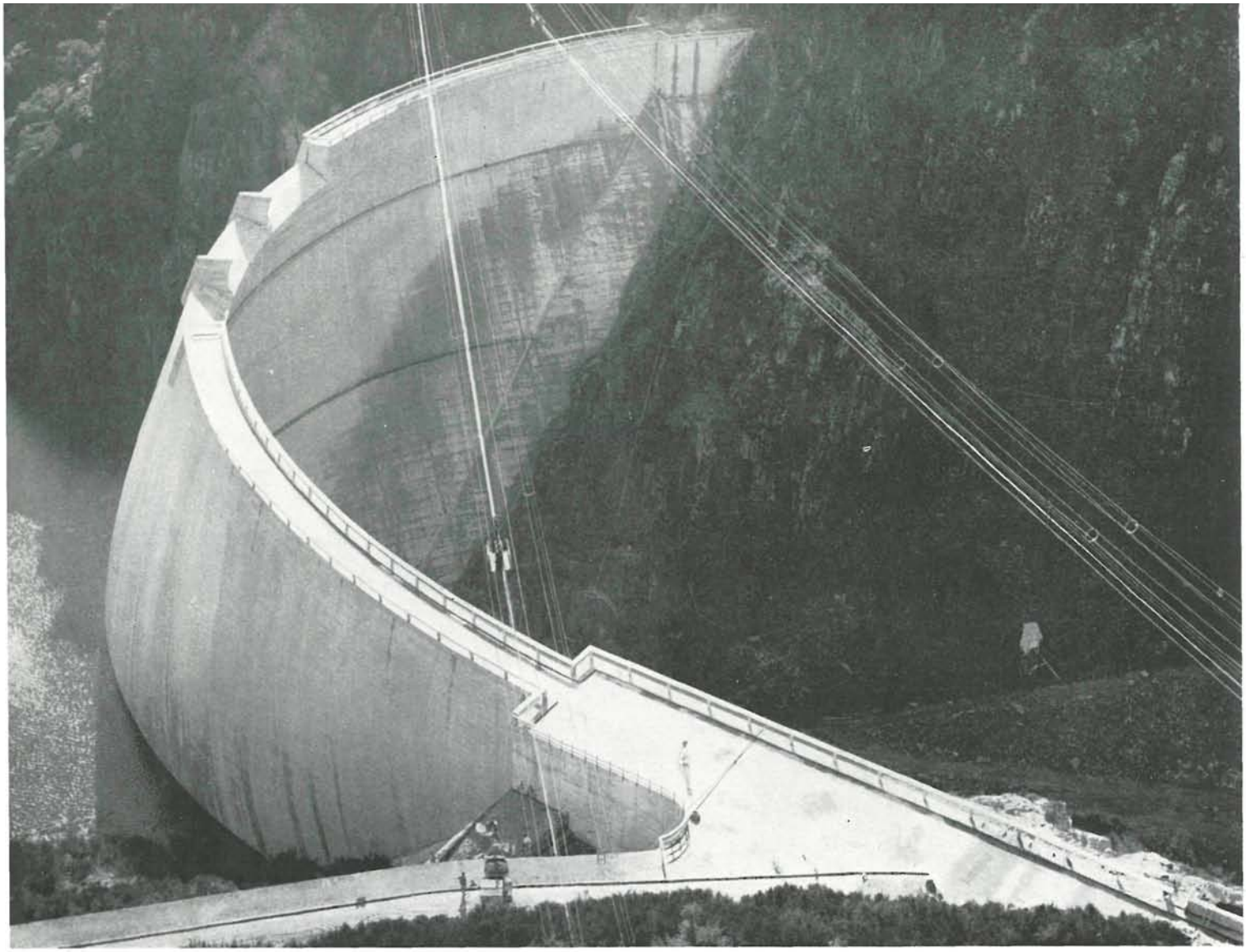
El carácter predominante del terreno que atraviesa, es el de pizarras con laminación más bien vertical, cortando al eje del túnel con un ángulo pequeño, por lo que se llegó a un revestimiento total del túnel.

Este revestimiento garantiza: la estabilidad mecánica; la impermeabilidad; la inalterabilidad, y permitió obtener la máxima economía.

Los diversos tipos de revestimientos empleados, según la naturaleza del terreno, son los siguientes:



© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es



Módulo elástico en la pared (kg/cm²)	Altura de la cobertura (m)	Permeabilidad natural de la roca (l/min)	Tipo de revestimiento propuesto
Superior a 150.000 kg/cm².	Superior a 75 m.	Pérdidas inferiores a 4 l/minutos.	Revestimiento simple de 3,44 m de diámetro interior. Inyección de relleno a 5 kg/cm². Diámetro interior: 3,44 m.
Superior a 25.000, pero inferior a 150.000.	Superior a 40 m.	Superiores a 4 l/minutos.	Revestimiento simple de 3,44 m de diámetro interior. Inyecciones de relleno a 5 kg/cm², o inyección de ligazón 15 kg/cm².
	Idem.	Idem.	Diámetro interior: 3,44 m.
Idem.	Idem.	Idem.	Como el anterior, pero con anillo de gunita armada con redondos de acero de 25 mm diámetro.
Idem.	Idem.	Idem.	Diámetro interior: 3,30 m.
Superior a 25.000.	Comprendidos entre 40 a 25 m.	Idem.	Como el anterior, pero con anillo de gunita armado con redondos de acero de 30 mm diámetro.
Inferior a 25.000.	Superior a 25 m.	Idem.	Diámetro interior: 3,25 m.
Todos los casos.	Inferior a 25 m.	Idem.	Blindaje calculado para la carga total sin participación de la roca.

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Compuerta de toma

Como elementos inherentes al túnel de conducción se dispuso a la entrada del mismo la toma de agua, constituída por una estructura de hormigón cerrada por rejilla metálica.

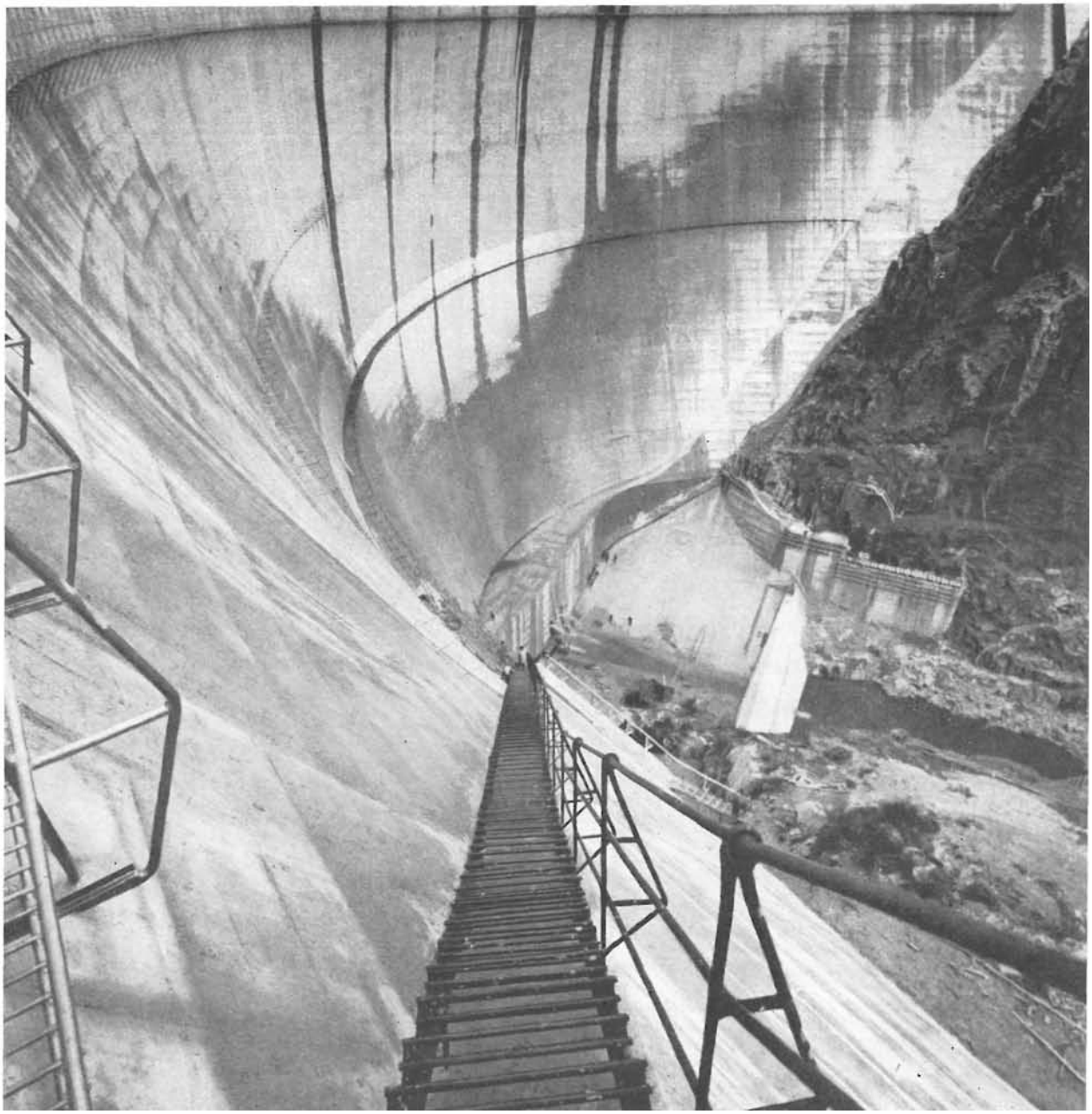
Dicha toma puede quedar cerrada por una compuerta de 2,60 × 3,50 m, equivalente a la sección del túnel. Esta compuerta es del tipo "oruga" dada la carga elevada que actúa sobre el tablero de la misma que así se transmite uniformemente sobre los caminos de rodamiento al hormigón que constituye la estructura.

La compuerta se utilizará normalmente como órgano de aislamiento destinado a permitir la visita y conservación de la galería, permitiendo el cierre eventual con toda la carga en caso de accidente aguas abajo de la toma. Esta maniobra podrá ser provocada a distancia desde la Central o desde la cámara de maniobra de la propia compuerta. La apertura, en cambio, se efectúa después de llenar la galería, equilibrando así las presiones de aguas arriba y abajo de la compuerta. El llenado se hace abriendo 10 cm esta compuerta.

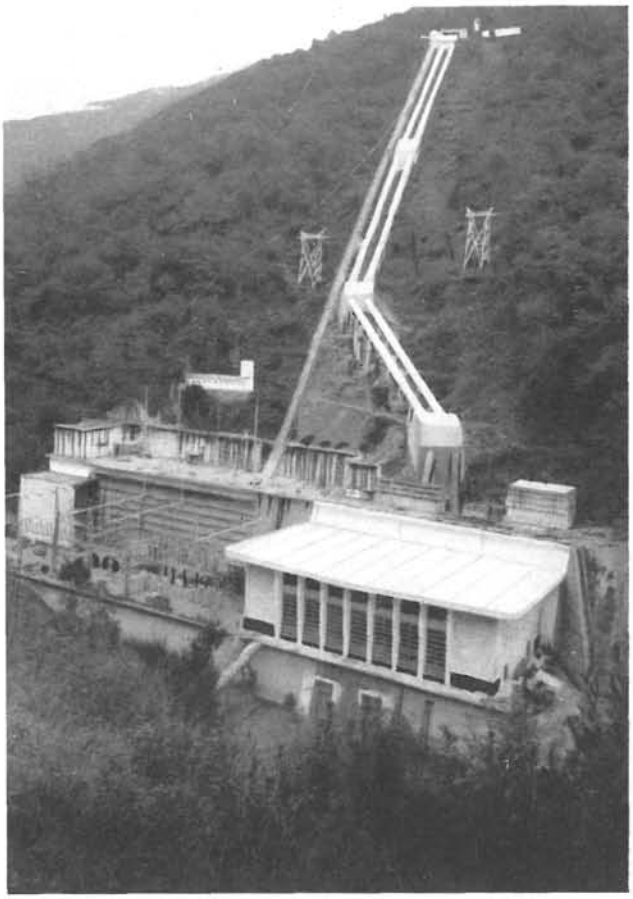
Chimenea de equilibrio

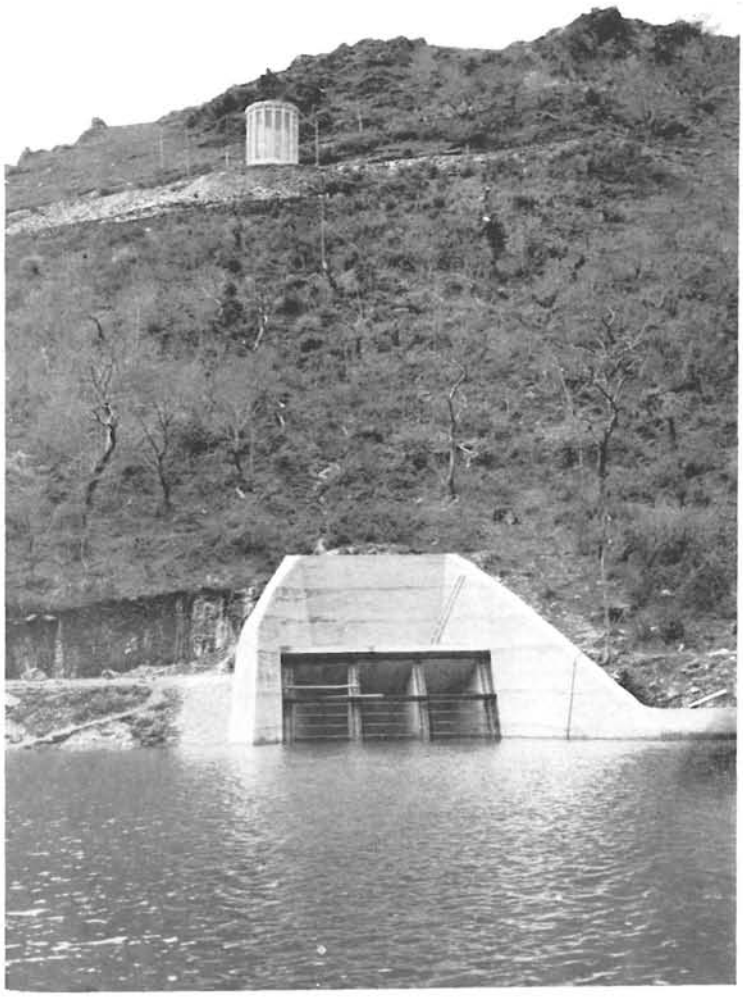
En el tramo final del túnel va dispuesta en el Salto del Eume una chimenea de equilibrio, que tiene la finalidad clásica de este elemento regulador y cuyas dimensiones son 4,50 m de diámetro para la chimenea propiamente dicha, diámetro que garantiza la estabilidad inicial según el criterio de Thoma.

La cámara superior tiene un diámetro de 16,00 m y la máxima oscilación en la misma para el cierre brusco de turbinas es de 6,70 metros. La hipótesis efectuada en el cálculo realizado para dimensionar esta cámara, hecho por diferencias finitas, fué el pasar del caudal máximo de $Q_o = 26{,}200$ m³/s a $Q_t = 0{,}00$ metros cúbicos/segundo.



© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc) http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es





Para el dimensionamiento de la cámara inferior se partió de la hipótesis de un caudal de $Q_0 = 13{,}100$ m³/s al caudal necesario para la máxima carga de la Central, o sea, $Q_1 = 26{,}200$ m³/s.

El descenso máximo quedó en este caso definido en 7,00 m para el golpe de ariete negativo señalado.

La circunstancia especial de esta chimenea es que la cámara inferior tiene un doble ramal de acometida al túnel de conducción para atacar desde aguas arriba este túnel de conducción, ya que en la sección comprendida entre los dos enlaces de la chimenea con él se originó durante la construcción del mismo un desprendimiento que era difícil de salvar con la perforación que se estaba efectuando desde la boca de salida de dicho túnel.

A partir de esta chimenea, la galería lleva un blindaje hasta la caseta de las válvulas de mariposa de que van dotadas en sus entradas las dos tuberías, tuberías de palastro soldado con 2,00 m de diámetro y 310 m de longitud, que alimentan la Central.

Central

Su equipo eléctrico está constituído por dos grupos, con turbinas tipo Francis de 37.500 CV cada una y alternadores de 32.000 kVA. La tensión de generación de las máquinas es de 11.000 voltios, la cual se eleva a 132.000 voltios mediante un transformador por grupo de 32.000 kVA de potencia.

Esta Central producirá 180 millones de kWh anuales, completamente regulados. Y por su ubicación cercana a los grandes centros de consumo de La Coruña y El Ferrol constituye para FENOSA una nueva fuente de energía de particular importancia, que servirá para alimentar una serie de nuevas industrias que se están emplazando en la provincia de La Coruña.

Fotos: M. G.º MOYA y GAMA

© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es