

salto de Aldeadávila

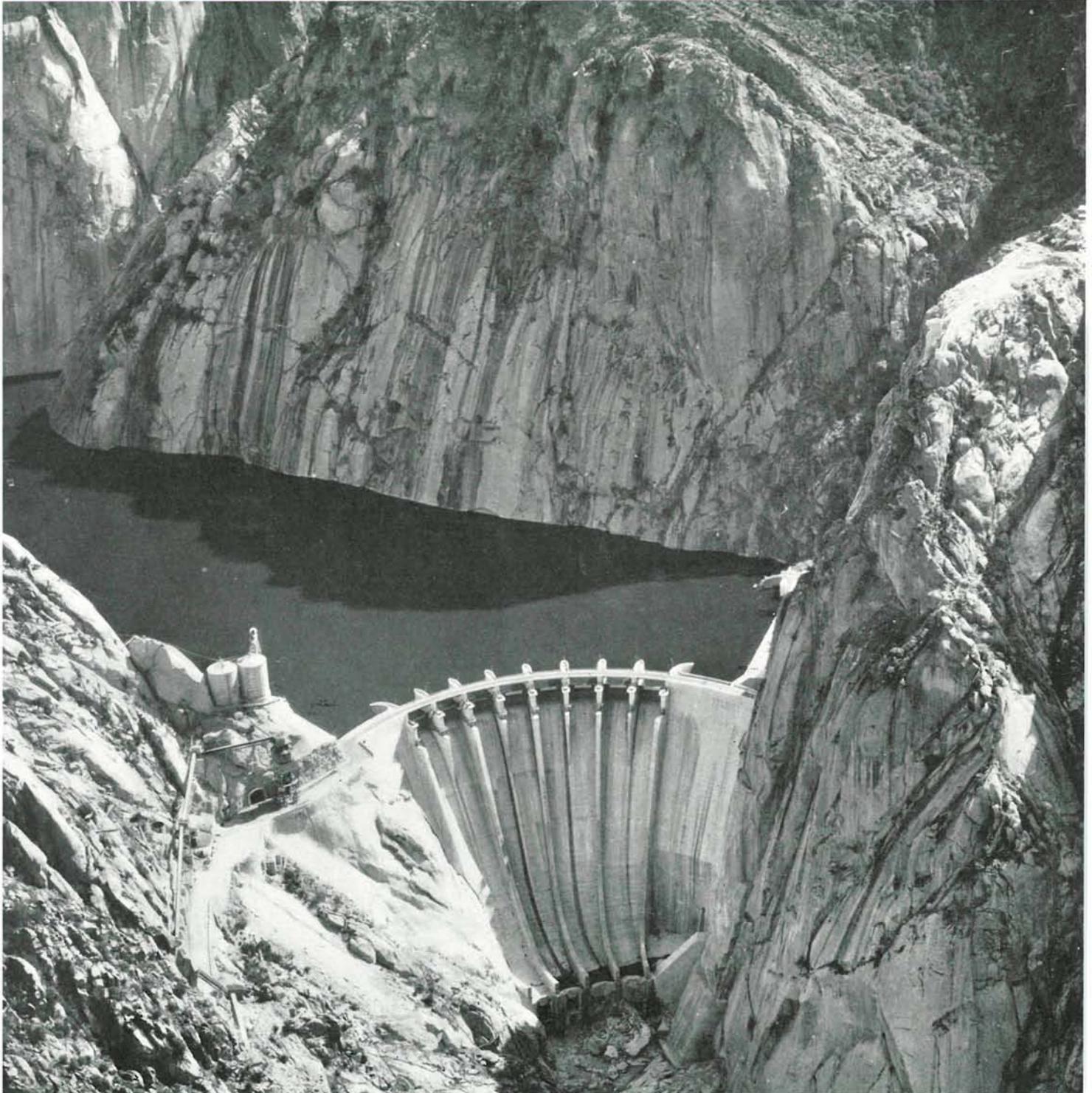
P. MARTINEZ ARTOLA, ingeniero (†)

sinopsis

531 - 64

La parte del tramo internacional del Duero, que, de acuerdo con el Convenio hispano-portugués de 11 de agosto de 1927 y las pertinentes autorizaciones administrativas del Gobierno español, fue concedida a Iberduero, S. A., es la correspondiente al desnivel existente entre las desembocaduras de los ríos Tormes y Huebra, en el Duero fronterizo.

España



Parece que el aprovechamiento de un tramo de río con pendiente del 0,372 por 100 debía realizarse mediante galerías en presión, pero la importancia de los caudales a derivar, la demanda del mercado eléctrico y las condiciones topográficas y geológicas del valle aconsejaron la solución de saltos de pie de presa.

La presa es de tipo bóveda, de gran espesor, de 140 m de altura, con vertedero de superficie, compuesto de ocho compuertas de sector de $14 \times 8,30$ m cada una, y un resguardo de 5 m. La capacidad del vaso cerrado es de 115×10^6 m³. La central generadora es subterránea y cuenta con seis grupos de 142.500 kVA, cada uno.

En este artículo se describen minuciosamente los datos, características y construcción de tan importante obra.

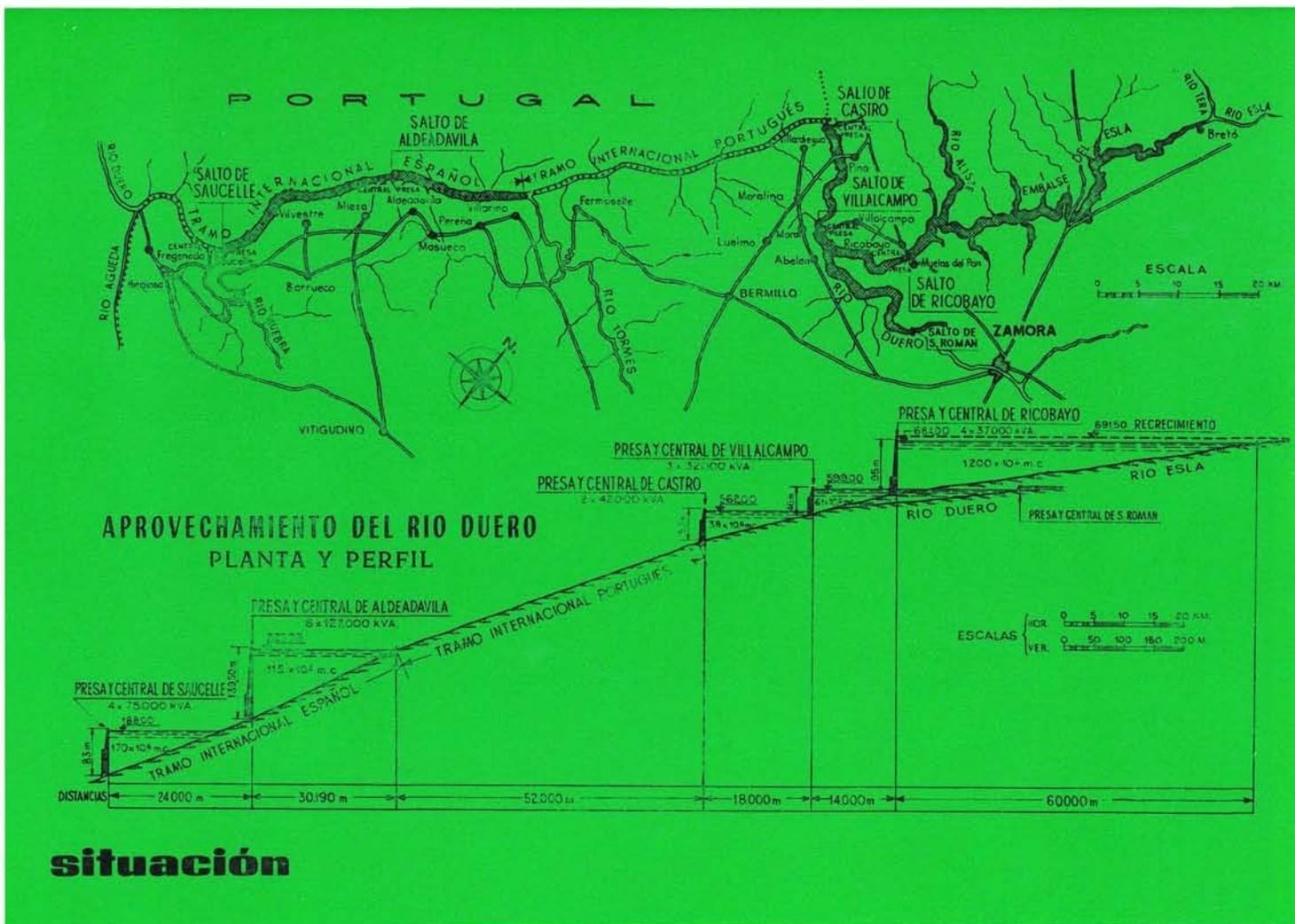
Introducción

Iberduero, S. A., es la empresa concesionaria de los aprovechamientos hidroeléctricos del río Duero en su tramo internacional o, mejor dicho, de la zona en que el río limita los dos países de la Península Ibérica. En ese tramo se halla situado el salto de Aldeadávila, que es el nombre de un pueblecito próximo, de la provincia de Salamanca.

La cuenca del Duero, con su mayor afluente el Esla, tiene 72.000 km² y aporta unos 10.500×10^6 m³ anuales. Con los embalses de Ricobayo y el proyectado sobre el río Tormes se ha logrado regularizar, parcialmente, el régimen fluvial.

Como el cauce del río en las proximidades del salto de Aldeadávila tiene una pendiente de 0,372, se pensó en una solución de aprovechamientos en rosario; pero por tratarse de grandes caudales, exigencias de horas punta y condiciones geologicotopográficas se levantó una presa de 140 m de altura, se derivaron las aguas a una central subterránea, restituyéndolas al río a través de un canal de salida.

El acentuado y angosto valle del río constituye un verdadero cañón. Por este motivo el cierre no presentó dificultades de elección, ya que todo interés se centraba en reducir el volumen de obra que debía realizarse.



situación

Datos básicos para el proyecto

Había que contar con un caudal de máximas avenidas de 12.500 m³/s; era preciso sacar el mayor partido posible de los desniveles sin merma para otros posibles aprovechamientos aguas abajo de la restitución; instalar grupos de gran potencia, y, finalmente, y de acuerdo con los convenios internacionales, ubicar las obras en zona española.

Con estos datos básicos iniciales se proyectó una presa tipo bóveda, de gran espesor, de 140 m de altura, cuyo vertedero de superficie consta de ocho compuertas de sector, de 14 × 8,30 m cada una, y un resguardo de 5 m. El vaso cerrado tiene 115 × 16⁶ m³ de capacidad.

El aliviadero consiste en una galería con capacidad de 2.800 m³/s, en la cual el agua discurre por gravedad y escasa pendiente.

Los seis grupos proyectados se alimentan con otras tantas tomas independientes y tuberías forzadas en forma de pozos inclinados, de 184 m de longitud, blindados con virolas de chapa de acero y de 5 m de diámetro.

La central generadora es subterránea y cuenta con seis grupos, de 142.500 kVA cada uno, que trabajan con un $\cos \theta = 0,95$. Se proyectaron cuatro chimeneas de equilibrio que arrancan de la extremidad posterior de los tubos de aspiración. Estas chimeneas son verticales, de 10,90 m de anchura, 250 m² de sección y unos 43 m de altura, actuando emparejadas y sobre tres tubos de aspiración y un canal o galería de desagüe.

La transformación, cuya relación es de 13,8/230 kV, se realiza con 19 transformadores, uno en reserva, de 47.500 kVA cada uno, instalados en una galería situada sobre las chimeneas de equilibrio. El parque de salida, para ocho líneas a 230.000 V, se halla en el exterior.

Los cuadros de mando y control están en un edificio exterior que se comunica con la central y galería de transformadores mediante un pozo de cables, vertical, de 5 m de diámetro.

Los accesos han tenido gran importancia en este proyecto de ejecución, pues se previó y realizó una galería de 650 m de longitud y de 60 m² de sección, una carretera hasta la coronación de la presa y, complementariamente, el poblado residencial del personal de explotación y otras instalaciones.

Constituye también una obra importante la plataforma habilitada para el parque de partida de líneas de transporte de energía eléctrica a 230 kilovoltios.

Geología y situación

La presa está situada en la extremidad aguas arriba de la gran curva que forma el cauce del río; la restitución se verifica en la otra extremidad de dicha curva, y las distintas obras exteriores y subterráneas se hallan en la dirección aproximada de la cuerda subtendida.

El cauce del río Duero en la zona del tramo internacional constituye un cañón abierto por el río en el gneis que corona el magma fundido intrusivo o batolito que hoy forma el banco de rocas plutónicas, graníticas, sanas, sobre el que descansa la capa superficial en estado de descomposición por agentes atmosféricos. La facie tectónica presenta sus características diaclasas y roturas o fallas, una de las cuales se halla aguas abajo de la presa y cruza un estribo.

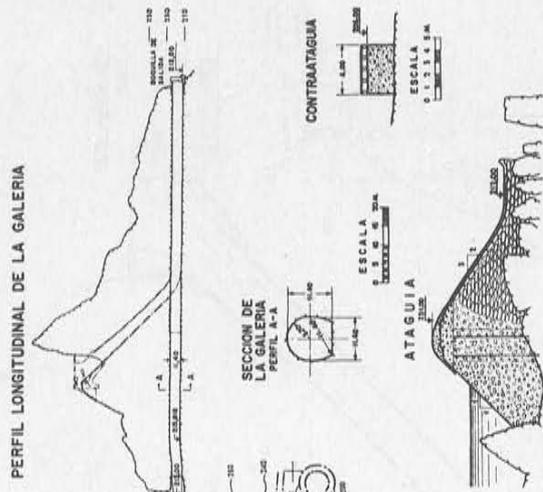
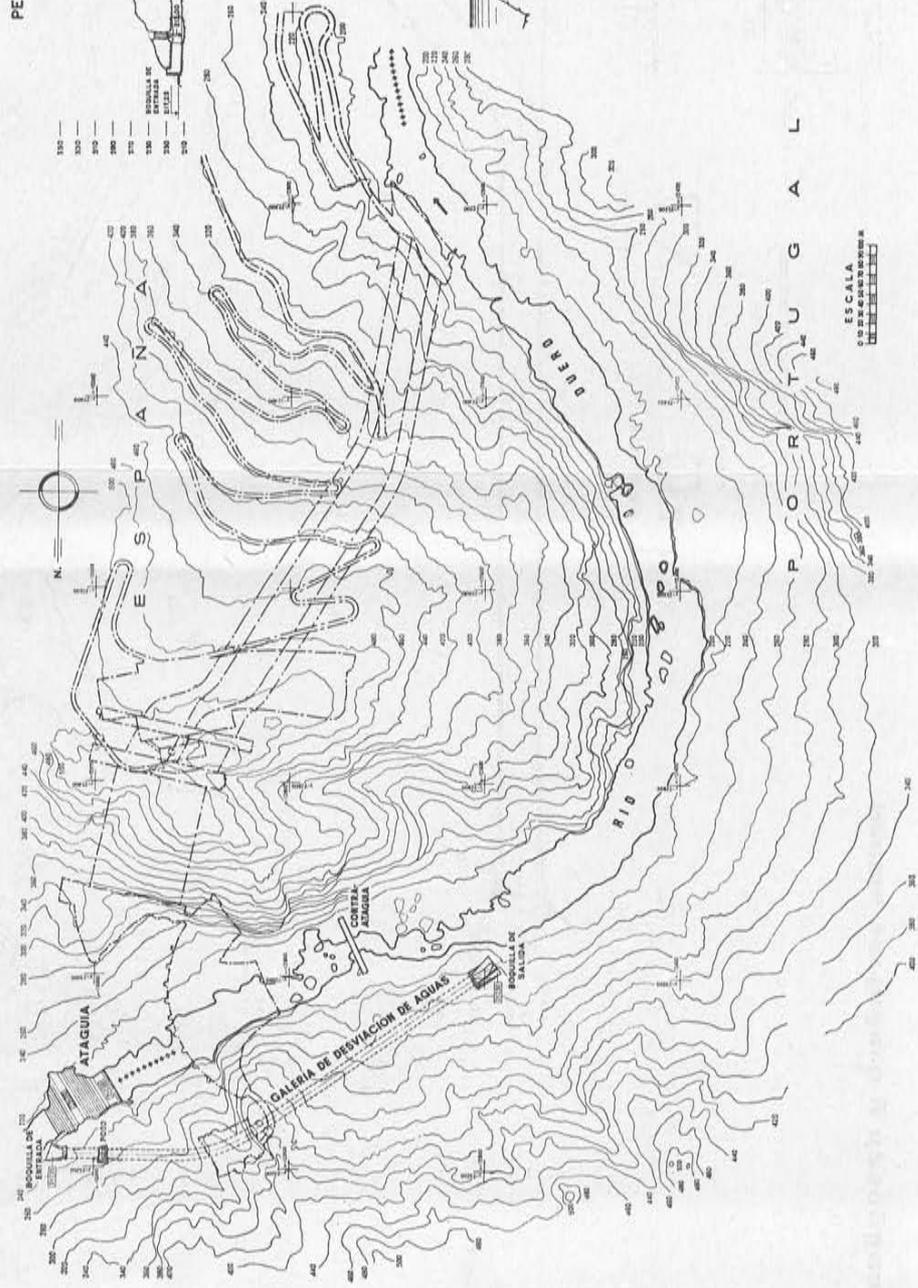
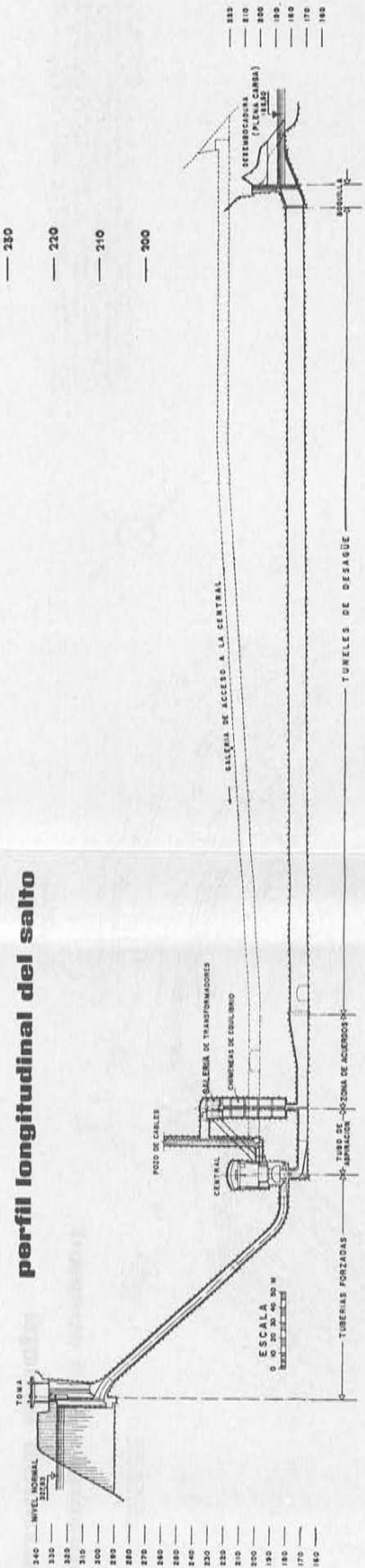
Aguas arriba aparece una gran diaclasa o grieta. El fondo del cauce presenta una especie de exfoliación con planos orientados según las líneas de máxima pendiente de las márgenes del valle, en una profundidad de 15 m, que, por amenazar posibles asientos de gran riesgo para la integridad y estabilidad de la presa, se someterá a un adecuado tratamiento.

La presa

El análisis de causas y efectos de ella, deducido en el estudio de la solución viable para la estructura de contención, tuvo, como premisa fundamental, contar con avenidas de excepción, para cuya apreciación se admitió un caudal tipo, variable, según:

$$C_E = C_N e^{3/2},$$

perfil longitudinal del salto



derivación

sección de una toma de agua

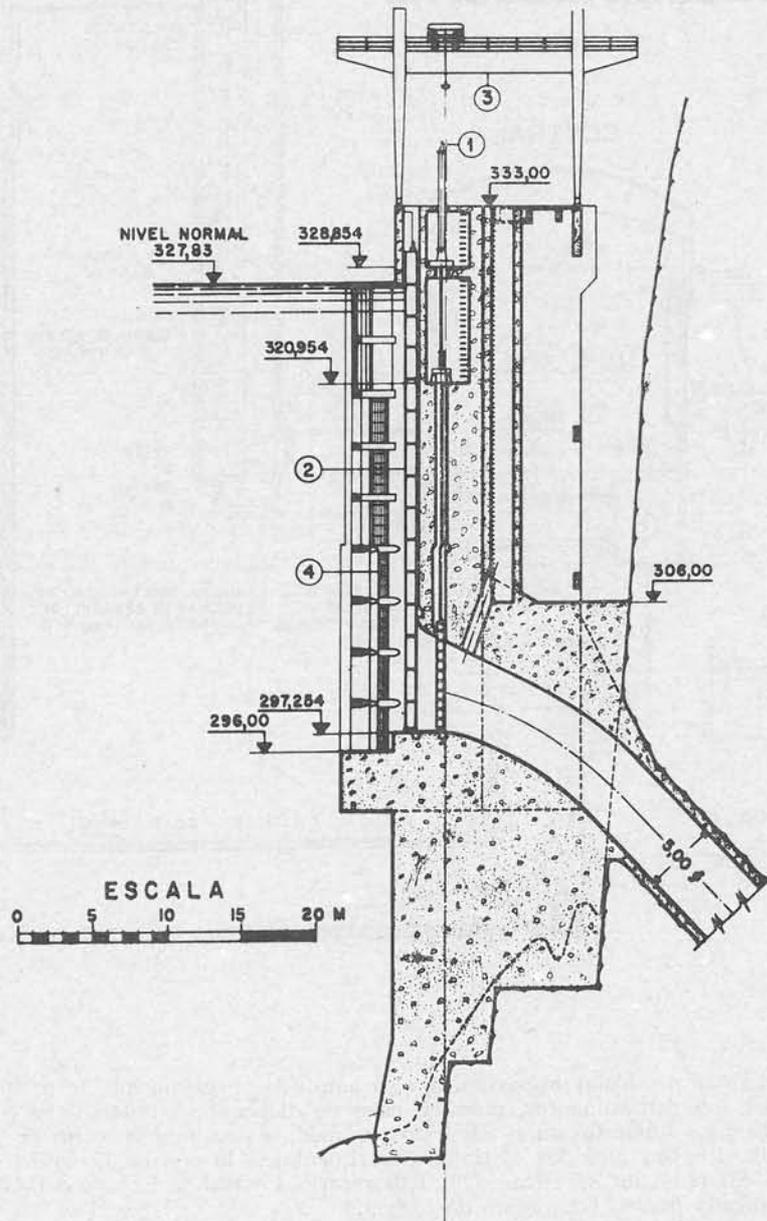
1. Compuertas de toma.
2. Ataguías.
3. Grúa pórtico de 35 t para ataguías.
4. Rejillas.

es decir, que la capacidad excepcional, C_E , sería igual al espesor de la lámina vertiente, e , elevado a $3/2$ y multiplicado por la capacidad normal, C_N . Además se previó una altura suplementaria para el resguardo y guiar la lámina vertida en régimen laminar sobre el intradós de la bóveda, terminando en salto de esquí, con lo que se logra una disipación de energía en una zona alejada del pie de cimientos y, por ello, sin peligro de socavación de los mismos.

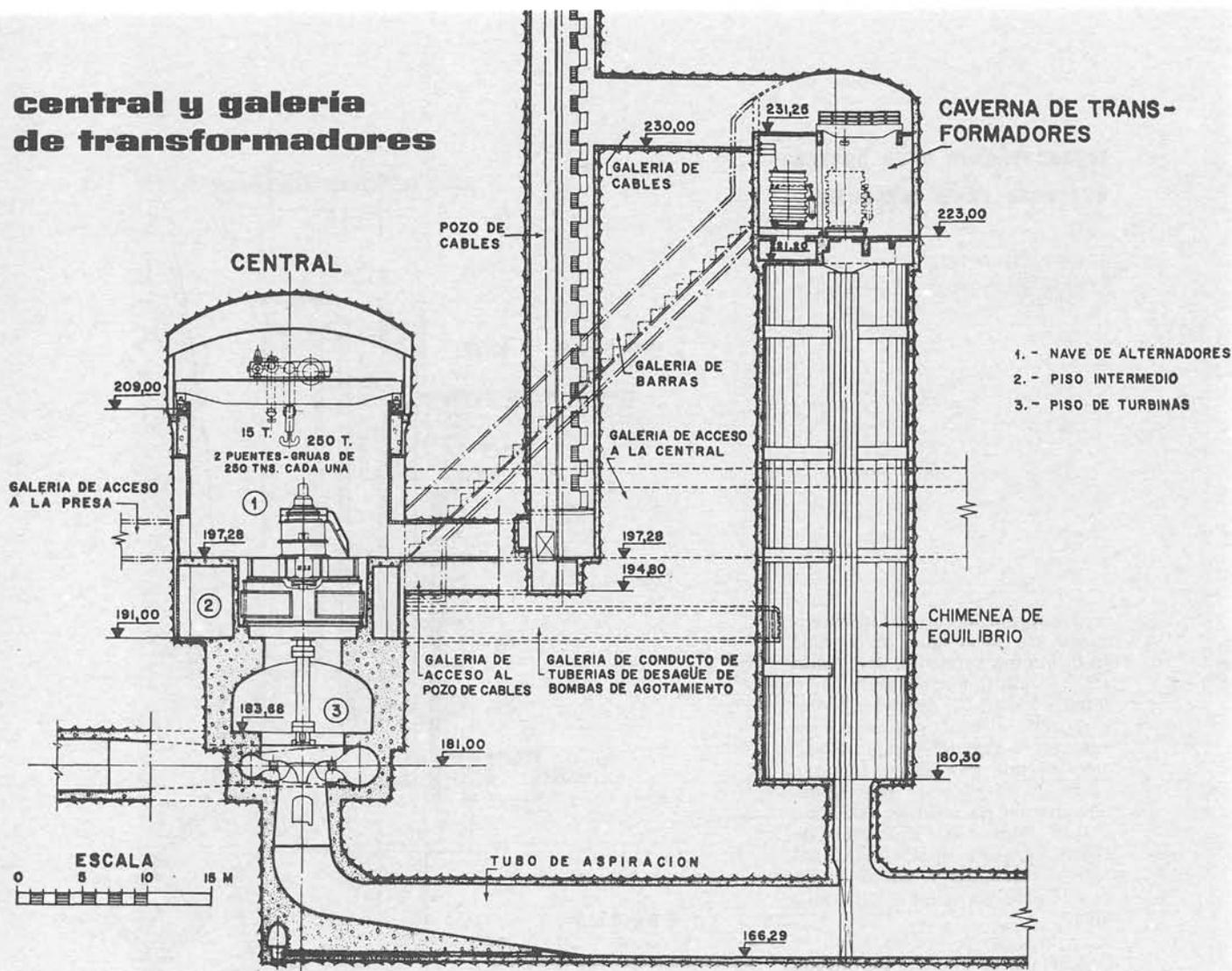
Descartada la solución de bóveda de pared delgada se estudiaron dos posibles soluciones, consistentes en una bóveda de pared gruesa, con vertedero en coronación y una estructura complementaria para apoyo de la lámina vertiente o bien sin este tipo de estructura, apoyando la lámina sobre el intradós de la bóveda directamente y formando un perfil trampolín de esquí en el pie. Esta última solución fue la adoptada definitivamente, con las características siguientes: 139,50 m de altura sobre cimientos; 120 m de radio de coronación; 250 m de desarrollo; 7,5 m de espesor en coronación; 45 m de espesor máximo, y 750.000 m³ de hormigón.

El paramento de aguas arriba, en la parte superior de la presa, constituye una superficie cilíndrica de eje ligeramente inclinado, con objeto de habilitar espacio para la instalación de las compuertas de sector del vertedero de superficie. El de aguas abajo o intradós es una superficie engendrada por una circunferencia de radio variable (generatriz) que se apoya en una línea quebrada (directriz), formando una sucesión de peldaños de huella horizontal y contrahuella de inclinación constante de 0,45 por 100.

La presa se calculó con ayuda de una simplificación del método de cargas de prueba, es decir, un procedimiento que consiste en probar, por tanteo, las cargas que corresponden al arco propiamente dicho y a los elementos de presa que se hallen en una banda horizontal de la presa. La distribución óptima de cargas se obtiene por tanteos sucesivos. La adopción de arcos circulares simplifica notablemente estos tanteos, laboriosos y, como siempre, basados en supuestos racionales y aproximados, con la ayuda de datos obtenidos en ensayos con modelos reducidos.



central y galería de transformadores



Dada esta particular importancia y su admitida aproximación aceptable, los ensayos con modelos reducidos son determinantes, pues en caso de dispersiones notables ha de revisarse todo el análisis desarrollado y los supuestos en él admitidos; es más, se acostumbra verificar los ensayos de modelos con otros realizados con métodos distintos experimentales, lo que ha ocurrido en esta presa, de cuyo estudio en modelo reducido se encargó el Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción, de Madrid, verificado por su homónimo de Lisboa.

La carga máxima del hormigón resultó ser de 47 kg/cm^2 . Para contrarrestar los estados nocivos tensoriales durante el proceso de fraguado, se mantuvo una red refrigerante que neutralizó, parcialmente, los efectos de la elevación de temperatura que provocan las reacciones exotérmicas del fraguado en las masas de hormigón. La temperatura media anual del ambiente se fijó en 16°C y las juntas se sellaron a 4°C .

Del estudio granulométrico de áridos y relación agua-cemento se llegó a una dosificación óptima de 225 kg por metro cúbico, confiando poderla reducir, ya que las probetas ensayadas en los primeros meses dieron resultados francamente favorables, por lo que se llegó a una dosificación práctica de 190 kg/m^3 .

La presa se hormigonó por tongadas de $0,50 \text{ m}$ de espesor, niveladas y vibradas mecánicamente. Las juntas de construcción se han sellado de forma tal que permiten insistir sobre ellas después del primer sellado, con lo cual asegura un relleno casi absoluto.

El vertedero de superficie lo constituyen ocho compuertas de sector, de 14 m de luz cada una, separadas por muretes de $3,4 \text{ m}$ de espesor. El umbral se halla $7,8 \text{ m}$ más bajo que el nivel máximo normal de explotación. La altura máxima libre de compuertas es de 13 m , lo que permite un desahúe total de 11.700 metros cúbicos/segundo.

Estudios detenidos de los efectos de potentes láminas vertientes en la presa dieron por resultado una presión en el paramento de 0,396 kg/cm², tomando la presión atmosférica equivalente a 1 kg/cm², por tanto, lejos de posibles fenómenos de cavitación. La repartición uniforme de la carga de la lámina vertiente sobre el paramento se logró con muretes que parten de los que separan las compuertas, continuados hasta la parte inferior de la presa.

El salto de esquí se proyectó para llevar la masa de agua menos dispersa a las mayores profundidades posibles en el lecho natural del río, en la zona de aguas abajo de la presa. El desagüe de fondo se realiza con tubos de 2,50 m de diámetro, que tienen una capacidad total de 300 m³/s con un embalse máximo normal.

Obras complementarias

Los caudales mínimos de desagüe exigidos por los Convenios internacionales se han conseguido con una galería revestida, perforada en la zona portuguesa, con una capacidad, en régimen libre, de 1.450 m³/s, y en carga, de 2.800 m³/s, que restituye las aguas al río.

Tomas de aguas

Las tomas de aguas se realizan a través de seis compuertas independientes, rectangulares, de 3,90 × 6,20 m que, después de una zona de transición, adoptan sección circular de 5 m de diámetro. Las compuertas se han espaciado a 17,50 m, alimentan las tuberías forzadas y disponen, en su plataforma superior, de un puente-grúa de gran capacidad.

La gran separación entre ejes de tuberías forzadas permite asegurar la integridad de la roca atravesada durante la perforación de los pozos inclinados que alojan las tuberías.

La pérdida de área entre la sección rectangular y la circular exige, en la zona de transición, un ajuste con la contracción experimentada por el flujo o vena de agua.

Cada toma se ha protegido con su correspondiente rejilla, robusta, colocada frente a la compuerta. Las maniobras de apertura y cierre han sido objeto de una ordenación de tiempo y gastos que aseguren el buen funcionamiento del grupo generador.

Tubería forzada

Como ya dijimos, las tuberías, de 5 m de diámetro, se hallan en el interior de pozos inclinados a 47° y perforados, con un diámetro de 6 m. Las virolas, de espesor variable, se han unido por soldadura, rellenando primero con áridos el espacio libre entre extradós de la chapa y hastiales del pozo y luego con una lechada de cemento los huecos. Esto no obstante, se terminó el relleno por medio de inyecciones finales. Las virolas se reforzaron con pletinas de 200 × 15 mm, espaciadas a 1,25 metros.

Con objeto de evitar los efectos de la subpresión posible en las inmediaciones de las tuberías, y con ello sobrepresiones en las mismas, se ha procedido a una serie de drenajes que desaguan en la central subterránea.

Central subterránea

Considerados minuciosamente los accidentes locales topográficos y geológicos, se llegó definitivamente a la solución de una central subterránea. Como se descubrió la existencia de un dique de granito descompuesto, de dirección paralela al río, se abrió una galería de reconocimiento para asegurarse de que la central estuviera fuera de la zona interesada por dicho dique.

El hueco de la central es de 19 × 40 × 139 m, subdividido en plantas para alternadores, turbinas y servicios. Aguas abajo de la central y, a mayor cota, se halla la galería de transformadores, comunicada con la cen-

tral por medio de rampas utilizadas para el paso de las barras conectadas a los generadores. Los ejes de la central y galería de transformadores son paralelos.

La central dispone de dos accesos: uno, que consiste en una galería, de 650 m de longitud, y otro, constituido por un pozo vertical, en el que se han instalado escaleras y montacargas. Este último comunica con la sala de cuadros y mandos, con el exterior, con la galería de transformadores y con la central.

El medio ambiente de la central se mantendrá a una temperatura cuya variación será de 6° C, con un máximo de 24° C. Los paramentos de la central son los hastiales obtenidos en la excavación, tratados con siliconas para evitar su oxidación y polvo consiguiente. Todo esto ha sido posible gracias al buen aspecto y dureza del granito cortado.

Chimeneas de equilibrio

Como las galerías de desagüe o restitución trabajan en carga, debido al régimen de avenidas, ha sido necesaria la construcción de chimeneas de equilibrio. Los ejes de las chimeneas se hallan 27,50 m aguas abajo de la central, dejando un potente banco de roca, suficiente para asegurar la estabilidad de la central. Las chimeneas están en la extremidad de los tubos de aspiración y por ellos desciende el aparejo de maniobra de las ataguías de los tubos de aspiración. La grúa que acciona las ataguías se ha instalado en la galería de transformadores.

Estudiando el régimen de posibles oscilaciones de niveles debido a obturaciones o aperturas de compuertas, la sección calculada resultó ser de 500 m². Esta sección se repartió entre dos pozos comunicantes, de sección rectangular, de 11 × 14 m, complementados con galerías laterales o cámaras de sección circular.

La parte inferior de la chimenea constituye una estrangulación, que fue estudiada con ayuda de un modelo reducido, lo que permitió comprobar el fenómeno completo de la oscilación y su campo de variación.

En la parte superior de las chimeneas de equilibrio se encuentra la galería de transformadores, de 159 m de longitud, 13 de anchura y 13 de altura. Su techo se consolidó, como con el de la central se hizo, con una armadura fijada y embebida por gunitado. Esta galería dispone de 19 celdas, vías para el transporte de transformadores y fosos, habiéndose estudiado la debida insonorización.

Una extremidad de la galería de transformadores se comunica con el exterior, al objeto de dar paso al aire para las chimeneas de equilibrio y la expulsión de aire viciado de la central y galería de transformadores.

Restitución de aguas

Las dos galerías de desagüe trabajan en carga y tienen unos 510 m de longitud. Esta solución en carga obedece a la oscilación máxima de niveles, de 32 m de amplitud entre estiajes y grandes avenidas. La restitución en régimen libre con central en plena carga provoca una elevación de 5,50 m del nivel del río, por cuya razón ha sido necesaria la galería en carga y la introducción de chimeneas de equilibrio.

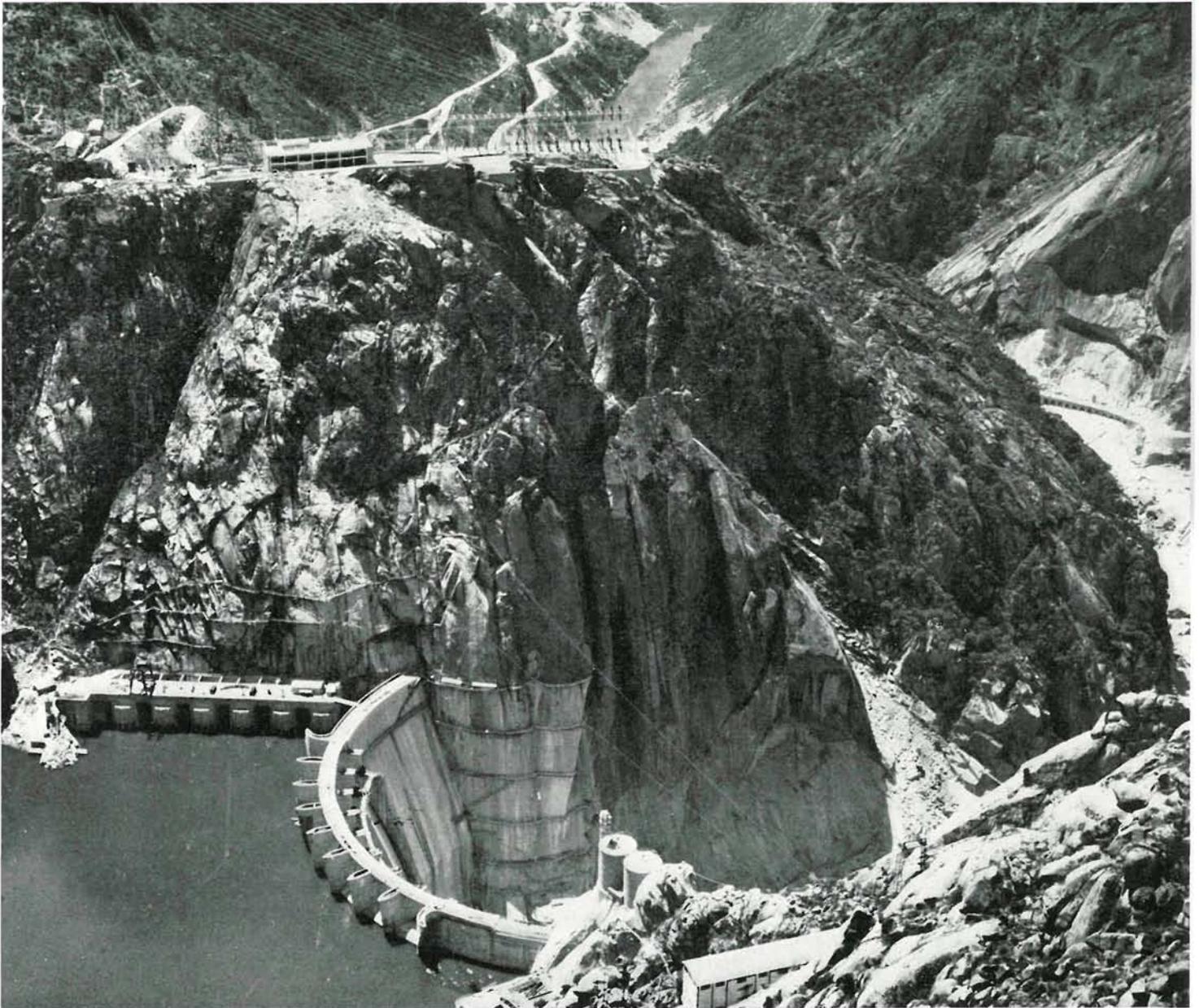
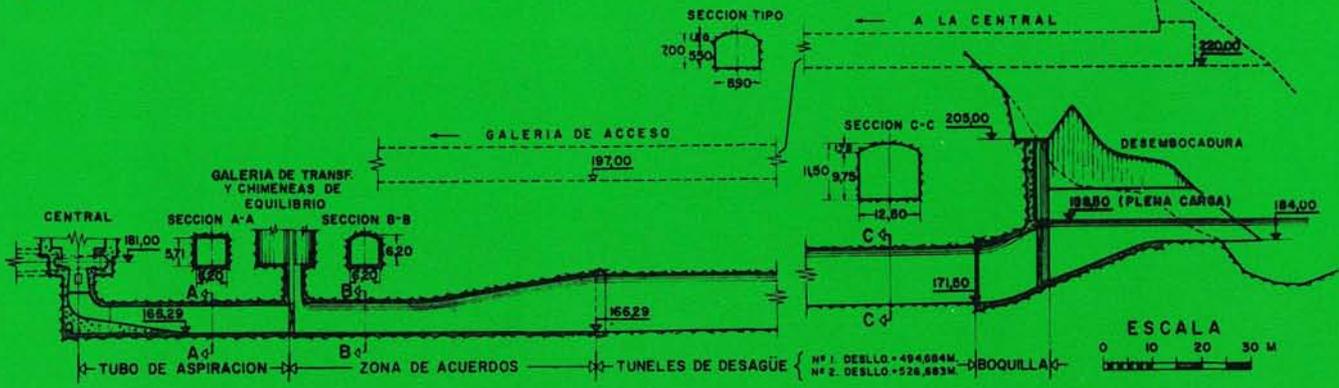
Con una velocidad óptima de desagüe de 2,25 m/s se necesita, para los 615 m³/s de caudal previsto, una sección, no revestida, de 273,40 m². Estos valores y la subdivisión del desagüe en dos galerías condujeron a una sección rectangular abovedada de 12,50 × 11,50 metros.

Las galerías desaguan en la cota 184 m, lo que asegura su régimen en carga. La salida cuenta con compuertas de cierre accionadas por medio de una grúa situada a la cota 205 m, que corresponde a una avenida de 7.200 m³/segundo.

Potencia instalada

El salto hidrostático es de 139 m, y el caudal normal, de 675 m³/s. La central cuenta con seis turbinas Francis, de 125.000 kW, que trabajan a 187,5 r. p. m. Los alternadores tienen 142.500 kVA de potencia y funcionan con un $\cos \phi = 0,95$, generando a 13.800 voltios.

galería de desagüe



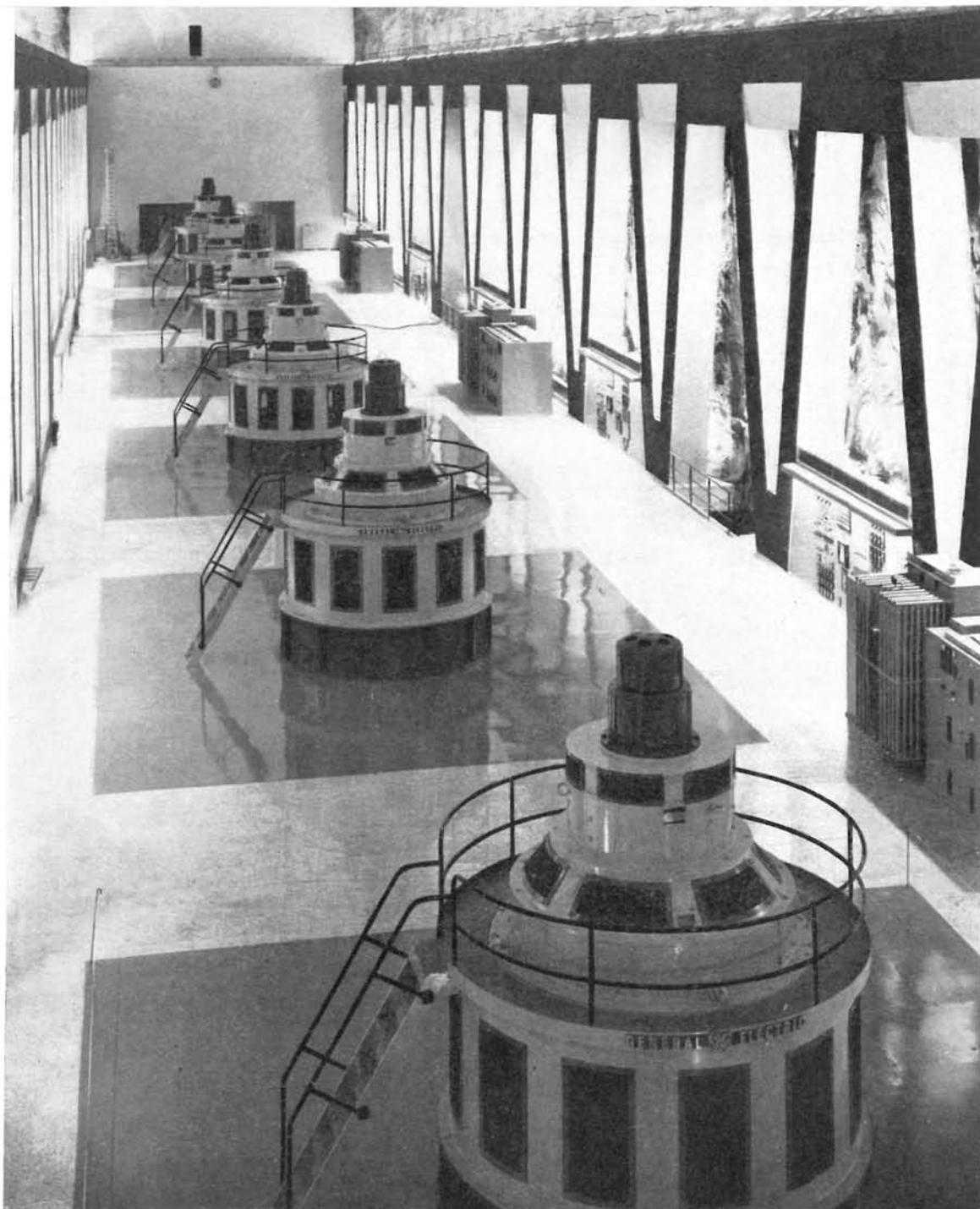


Salida de líneas.

La central está equipada electromecánicamente para hacer frente a sus propias necesidades de energía y conservación, dispone de dos grúas-puente de 250 t de capacidad cada una, que, acopladas, pueden elevar los rodets de los alternadores, de 480 t de peso. Para el control, protección y medida de energía, intensidades, tensiones, maquinaria y consumo se dispone de instrumentos modernos apropiados.

Derivación de aguas

Con objeto de trabajar en seco durante las obras de cimentación de la presa, y dadas las condiciones locales del terreno, se derivaron las aguas por una galería, de sección en forma de herradura, que finalmente serviría como aliviadero o desagüe de la presa. Esta galería se perforó en la margen portuguesa para descongestionar la española, donde se debían prodigar las obras. Los Convenios internacionales habían previsto esa posible utilización de la margen portuguesa.



La capacidad prevista para esta galería fue de 600 m³/s. Dicha galería no se ha revestido, tiene 500 m de longitud, y su toma y restitución de aguas se estudiaron en el laboratorio de hidráulica propiedad de Iberduero, S. A., con objeto de asegurarse de que las márgenes y lecho del río en la desembocadura no experimentarían erosiones nocivas para el régimen previsto.

Producción

La producción media anual óptima prevista es del orden de 2.440 GWh.

Adaptado por J. J. Ugarte.

Chute d'Aldeadávila - Espagne

P. Martínez Artola, ingénieur (†)

La partie de la zone internationale du Douro, qui, conformément à la convention hispano-portugaise du 11 août 1927 et aux autorisations administratives correspondantes du Gouvernement espagnol, a été confiée à Iberduero, S. A., est celle qui correspond au dénivellement existant entre les embouchures de la Tormes et de l'Huebra, dans le fleuve qui marque la frontière.

Il semblait que l'aménagement d'une partie du cours du fleuve ayant une pente de 0,37 % devait être réalisé à l'aide de galeries de dérivation travaillant en charge, mais à cause du fort débit à dériver, la demande du marché électrique et les conditions topographiques et géologiques de la vallée ont amené à une solution de centrales au pied du barrage.

Le barrage voûte, d'épaisseur moyenne à 140 m de hauteur, comprend huit vannes secteur de 14×8 m chacune, qui règlent le régime normal versant et qui sont munies d'une garde de sécurité de 5 m.

Les eaux retenues ont un volume de 115×10^6 m³. La centrale souterraine comporte six groupes générateurs de 142.500 KW, chacun.

Les caractéristiques et les méthodes de construction de cet important ouvrage ont été l'objet d'une étude détaillée.

Aldeadávila Dam - Spain

P. Martínez Artola, engineer (†)

An agreement was signed on August 11, 1927, between Spain and Portugal, on the development of the river Duero along the section which is common to both countries. The Spanish government gave the firm Iberduero, S. A., the right to exploit the river between the rivers Tormes and Huebra.

It would seem that the hydroelectric exploitation of a river with a slope of 0.372 % should best be accomplished by means of pressure conduits. But the volume of water involved, the urgent demand for electric power and the geological and topographical conditions of the valley counselled the adoption of systems of dams and power stations at each dam.

The Aldeadávila dam is a thick vaulted dam. Its height is 140 ms, with a surface spillway. It has 8 circular sluice gates, 14×8.30 m each, and a reserve height of 5 m. The capacity of the dam is 115×10^6 m³ of water. The power station is below the ground, and has 6 generators, each of 142.500 KVA.

This article describes in detail the construction and characteristics of this very important project.

Staufstufe von Aldeadávila - Spanien

P. Martínez Artola, Ingenieur (†)

Der Teil des internationalen Laufes vom Douro, der von Beschluss mit dem Spanisch-Portugiesisch Abkommen vom 11. August 1927 und die verwaltende Erlaubnis von der spanischen Regierung zu der Baufirma Iberduero, S. A., gewährt wurde, ist das entsprechende Gefälle zwischen den Mündungen der Flüsse Tormes und Huebra im Grenzduero.

Die Nutzung von einem Lauf von Fluss mit Gefälle von 0,372 % musste durch Stollen stattfinden, aber die Wichtigkeit der Staumenge abzuleiten, die Not von Elektrizität und die topographischen und geologischen Bedingungen vom Tal berieten den Bau von Staustufen.

Der Staudamm ist Gewölbetyp, von grosser Dicke, von 140 m Höhe, mit Ablaufrinne von Oberfläche, bestanden aus 8 Schleusen je von $14 \times 8,30$ m und ein Schutz von 5 m. Die Kapazität vom geschlossenen Glas ist von 115×10^6 m³. Der Kraftwerk ist unterirdische und besteht aus 6 Gruppe je von 142.500 KVA.

In diesem Artikel werden die Zahlen, Charakteristiken und Bauwesen von so wichtig Bau beschrieben.