

PRESA DE SANTA EULALIA

Prof Ing C. C. P. A. DEL CAMPO

Ing. C. C. P. L. MAROTO

INTRODUCCION

La presa de Santa Eulalia forma parte del salto del Jares inferior, que es uno de los diversos aprovechamientos de la cuenca del río Bibey.

El río Jares es afluente del río Bibey por su margen derecha, que a su vez es el afluente principal del río Sil. Aquél sigue, en su tramo inferior, un recorrido casi paralelo al río Sil, pero existe entre los cauces de ambos ríos un gran desnivel, por lo que se ha considerado conveniente realizar el transvase de las aguas del Jares al valle del Sil, para su aprovechamiento hidroeléctrico. Así se podrá utilizar un desnivel bruto de 235 m. (fig. 1.^a).

El aprovechamiento hidroeléctrico del Jares Inferior

está formado esencialmente por las siguientes obras (figura 2.^a):

Presa de Santa Eulalia, que remansará las aguas del Jares, formando un pequeño embalse destinado a la regulación diaria y semanal.

Galería de presión, que tiene su origen en el embalse de Santa Eulalia junto a la presa del mismo nombre, y atraviesa la divisoria entre el Jares y el Sil, terminando en una chimenea de equilibrio. Tiene una longitud de 4 800 m. y es circular, una vez revestida, de 3,00 metros de diámetro.

Chimenea de equilibrio formada por una torre cilíndrica pretensada, de 77 m. de altura y 10 m. de diámetro interior.

5

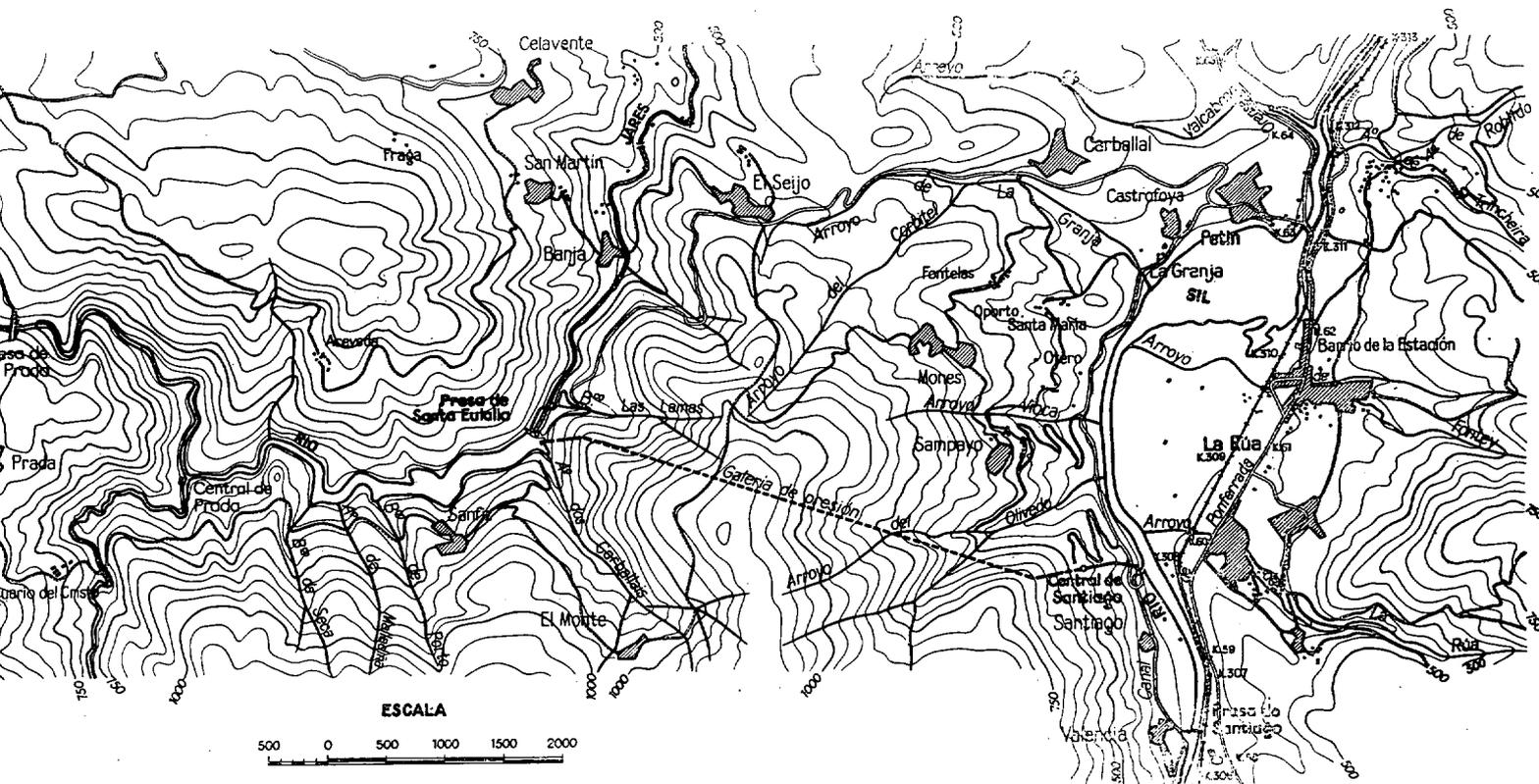


Fig. 1.^a — Planta general del salto del Jares Inferior.
(General Plan of the Lower Jares Scheme).

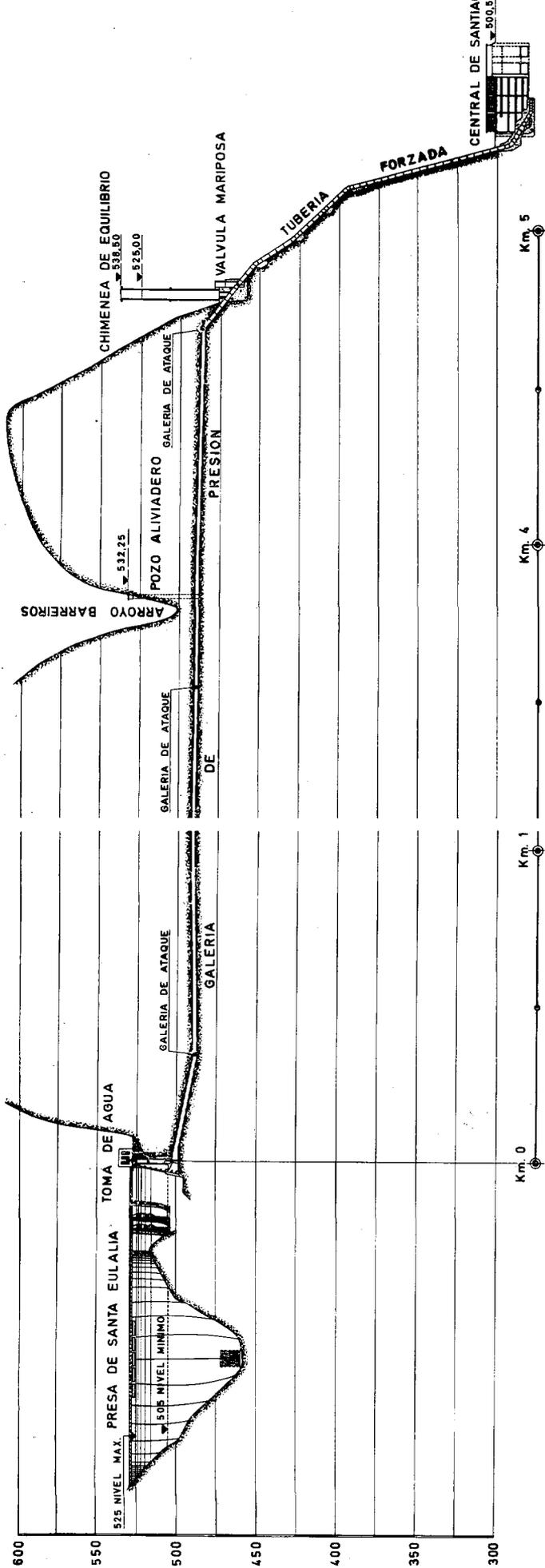


Fig. 2.^a — Perfil longitudinal del salto. (Longitudinal profile of the Scheme).

Tubería forzada, de 560 m. de longitud, formada por tubos metálicos con diámetro 3,0, 2,8 y 2,6 metros.

Central de Santiago, situada en la margen izquierda del río Sil, en la que se instalaron dos grupos de eje vertical con turbinas Francis que absorben un caudal de 28 m.³/seg., con un salto bruto de 235 m. La potencia de los dos grupos instalados en la central es de 64 000 kVA. y las producción en año medio de 104 millones de kWh. Girando en sentido inverso, los alternadores actúan como motores y las turbinas como bombas, y son capaces de elevar un caudal de 18 m.³/segundo.

En la misma central de Santiago, se instalarán otros dos grupos tipo "bulbo" con una potencia conjunta de 18 000 kVA., que utilizarán un caudal de 160 m.³/seg. derivado del río Sil, en un desnivel de 10 metros.

PRESA DE SANTA EULALIA

Los caudales del río Jares están regulados por el embalse de Prada, en explotación desde hace varios años, por lo que no es preciso una gran capacidad de embalse adicional en el aprovechamiento del Jares Inferior, siendo, sin embargo, necesario un pequeño embalse para la compensación diaria y semanal de los caudales utilizados en la central de Prada y para almacenar los volúmenes de agua bombeados desde el río Sil.

El embalse formado en el río Jares por la presa de Santa Eulalia, tendrá un volumen de 10,1 Hm.³, de los que 6,3 Hm.³ se consideran como capacidad útil.

La presa de Santa Eulalia es una presa en arco de doble curvatura, apoyada lateralmente sobre estribos de gravedad (fig. 3.^a).

Las dimensiones principales de la presa son:

Altura sobre cimientos	74 m.
Longitud de coronación	212 m.
Desarrollo de la bóveda	148 m.
Espesores de la bóveda	2,5 a 9,8 m.
Volumen de la presa	72 400 m. ³
Volumen de la bóveda	34 000 m. ³

Resumiremos, a continuación, las características principales de la presa de Santa Eulalia:

a) Las secciones horizontales de la bóveda están limitadas por arcos de tres radios (menor curvatura en las zonas laterales), y su espesor crece hacia las laderas.

Los arcos de curvaturas decrecientes hacia las laderas permiten adaptar su forma al antifunicular de las cargas por ellos transmitidas y descargar las ménsulas centrales y de mayor altura de la presa. La ventaja principal de esta disposición es el que los arcos alcancen las laderas con ángulos de incidencia relativamente grandes.

b) Curvatura vertical acusada (fig. 4.^a). Las presas de mediana altura exigen mayor curvatura vertical para evitar la aparición de tracciones al no poderse contar con las tensiones de compresión debidas al peso propio, que se producen en las presas de gran altura.

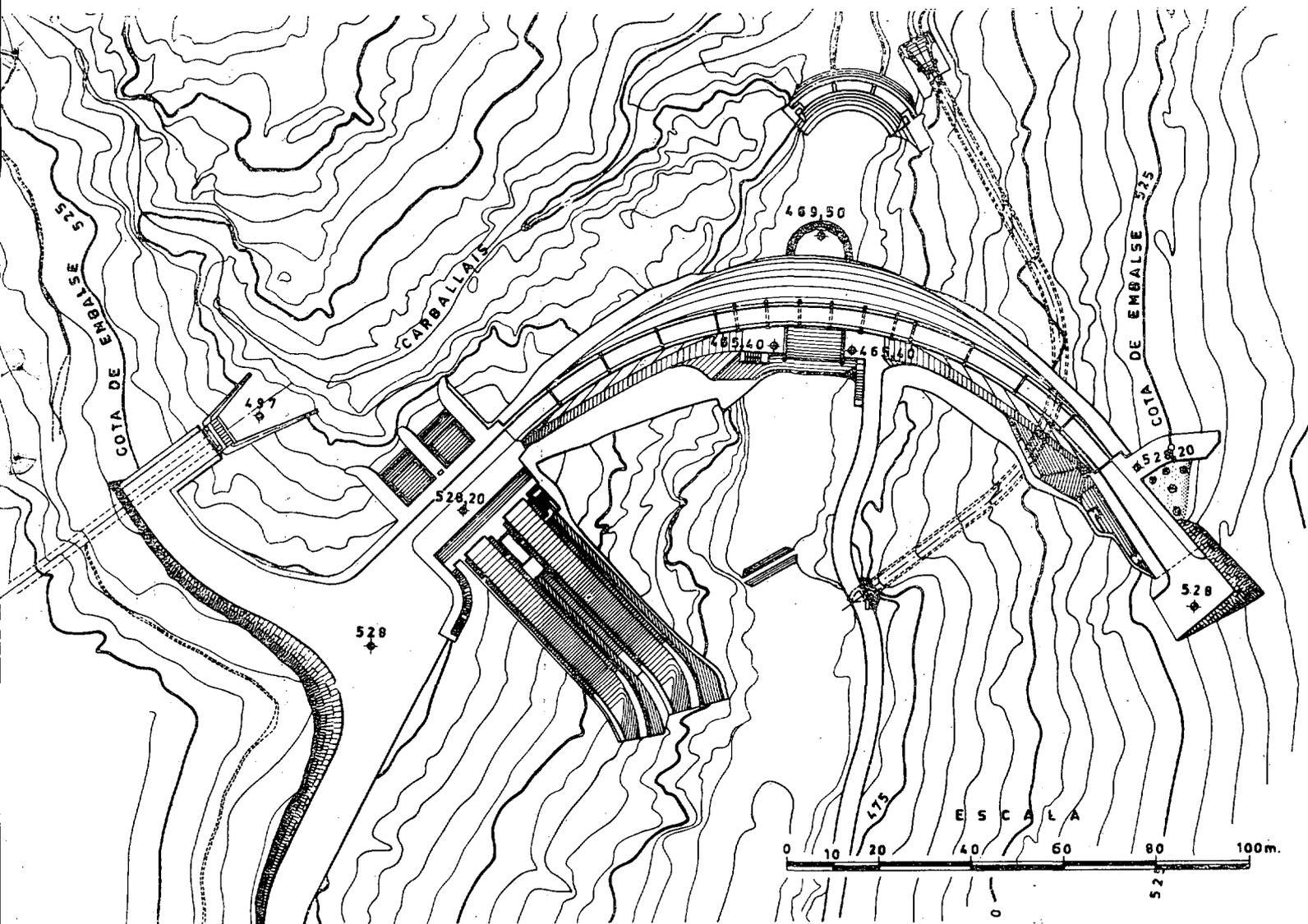


Fig. 3.^a—Planta de la presa de Santa Eulalia.
(Plan of Santa Eulalia Dam).

c) La bóveda se apoya perimetralmente sobre un zócalo destinado a centrar y repartir, sobre el terreno de cimentación, la carga transmitida por aquélla, con lo que puede llegarse a las tensiones relativamente elevadas, que admiten los hormigones modernos, sin sobrecargar el terreno de cimentación, generalmente con menos capacidad de carga que el hormigón. No se dispone junta perimetral entre bóveda y zócalo, pero se arma el hormigón en esta zona, para evitar la iniciación de fisuras.

d) La cerrada se ensancha en su parte superior adoptando una sección frecuente en los valles de las cuencas occidentales de la Península Ibérica. Para adaptar las bóvedas a cerradas con esta forma, se considera muy conve-

niente apoyarlas en su zona superior sobre los estribos de hormigón, con lo que se consigue que la curvatura de los arcos superiores no difiera notablemente del conjunto ni que, por otra parte, dichos arcos alcancen casi tangencialmente a las laderas. Se estima que esto proporciona un amplio coeficiente de seguridad a la presa, por dificultarse su deslizamiento según la superficie de cimentación de la bóveda. El estribo derecho de la presa es solidario con la embocadura del aliviadero. Para evitar el empuje directo del agua del embalse sobre el estribo izquierdo, se dispone normal al mismo un estribo de gravedad que transmite directamente la presión del agua a la cimentación.

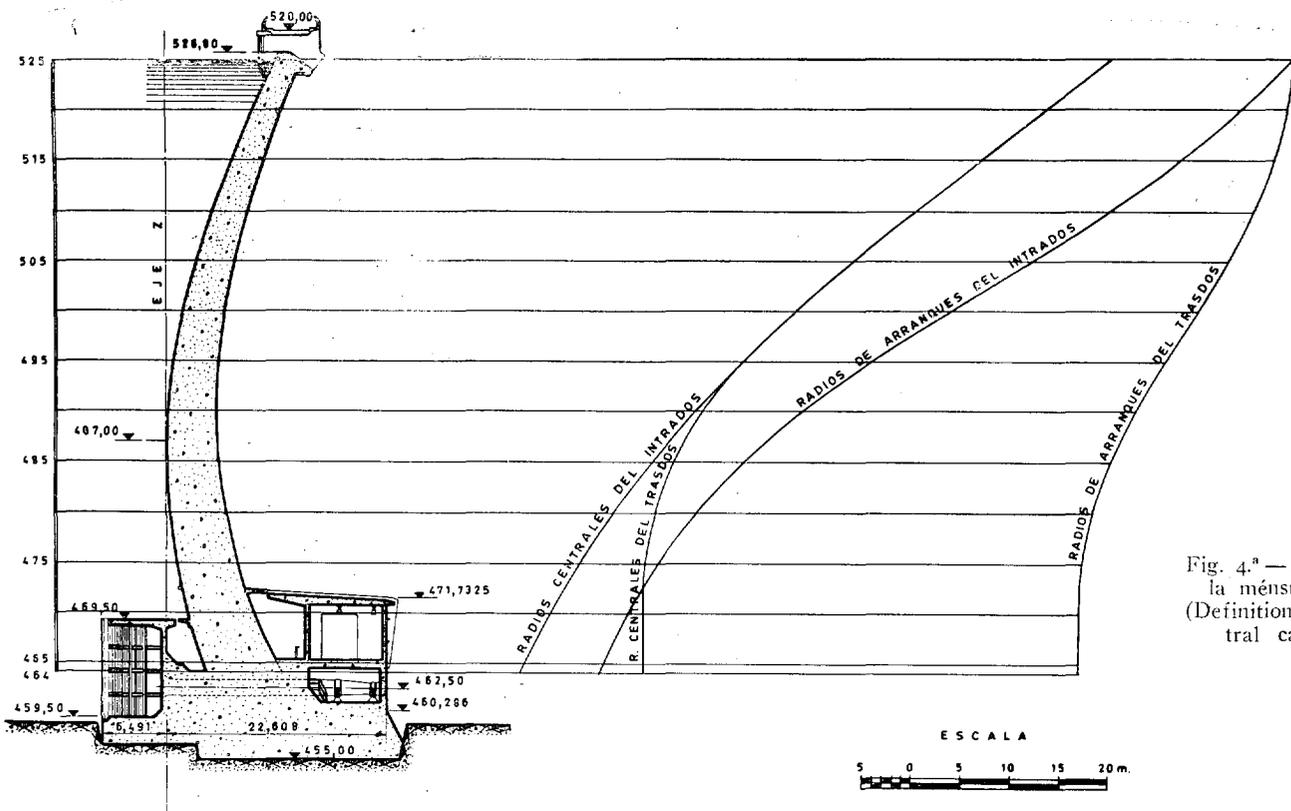


Fig. 4.^a — Definición de la ménsula central. (Definition of the central cantilever).

CALCULO ELASTICO DE LA BOVEDA

Para calcular la distribución de tensiones en la presa de Santa Eulalia, se la ha considerado representada por una estructura formada por cinco arcos y siete ménsulas, habiéndose repartido las cargas entre ambos sistemas, de modo que en los puntos de cruce de arcos y ménsulas fueran iguales los desplazamientos radiales, tangenciales y los giros en arcos y ménsulas. Como consecuencia de este triple ajuste, se ha observado que gran parte de las cargas se transmiten tangencialmente debido a la distorsión de las ménsulas laterales, por lo cual los empujes de los arcos superiores en arranques son muy moderados. De este cálculo, para la presión hidrostática con el nivel del embalse a la cota 525, subpresión y peso propio, se deducen unas tracciones máximas de 5,4 Kg./cm.², mientras las máximas tensiones de compresión son de 38 kilogramos/cm.² (fig. 5.^a).

Se han realizado ensayos en modelo reducido en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa, para comprobar el comportamiento estructural de la presa. Se ensayaron dos modelos, en el primero de los cuales la deformabilidad del terreno de cimentación era análoga a la de la presa, mientras que en el segundo modelo, mediante taladros, se incrementaba la deformabilidad del cimiento, hasta obtener los valores correspondientes a los ensayos realizados *in situ* y se reproducían los acciden-

tes geológicos más importantes que afectaban a la cimentación de la presa. En las figuras 6.^a y 7.^a se representan las magnitudes y dirección de las tensiones medidas en ambos modelos con el embalse sobreelevado a la cota 527,5 (nivel máximo en avenidas extraordinarias), observándose que los accidentes geológicos no introducen grandes perturbaciones en el reparto tensional.

En general, puede considerarse satisfactoria la concordancia entre los resultados obtenidos en el cálculo y las medidas en modelo reducido, aunque se encuentran algunas discrepancias que admiten explicación:

a) Las tensiones de compresión en las zonas de empotramiento de la presa, son más elevadas en los modelos reducidos por no considerarse en el cálculo analítico las concentraciones de tensión debidas a la transición brusca entre la bóveda y el zócalo.

b) En el modelo reducido no se registra una transmisión por esfuerzo cortante de las cargas de los arcos superiores de la presa hacia los inferiores, tan acusada como se deduce en el cálculo con triple ajuste. Convendría revisar los procedimientos de cálculo basados en el "Trial Load", en los que se supone que cada carga tangencial produce un desplazamiento en su plano, sin considerar que este desplazamiento puede ser modificado por el giro de cada elemento.

c) Quizá por la misma causa, los desplazamientos en clave del arco superior, obtenidos por el cálculo, resulten

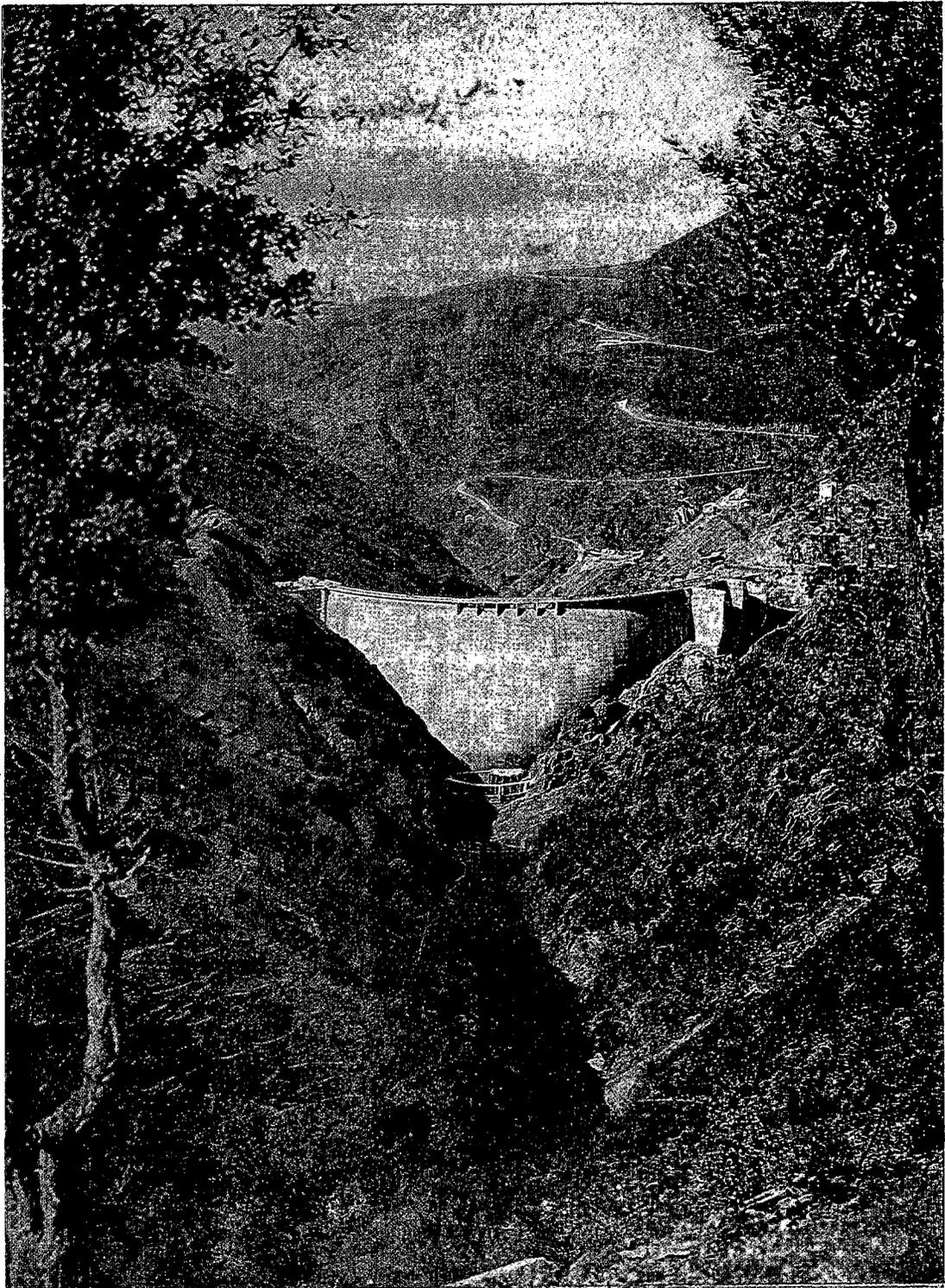


Foto 1.— Vista de la presa desde aguas arriba.
(View of the dam from upstream).

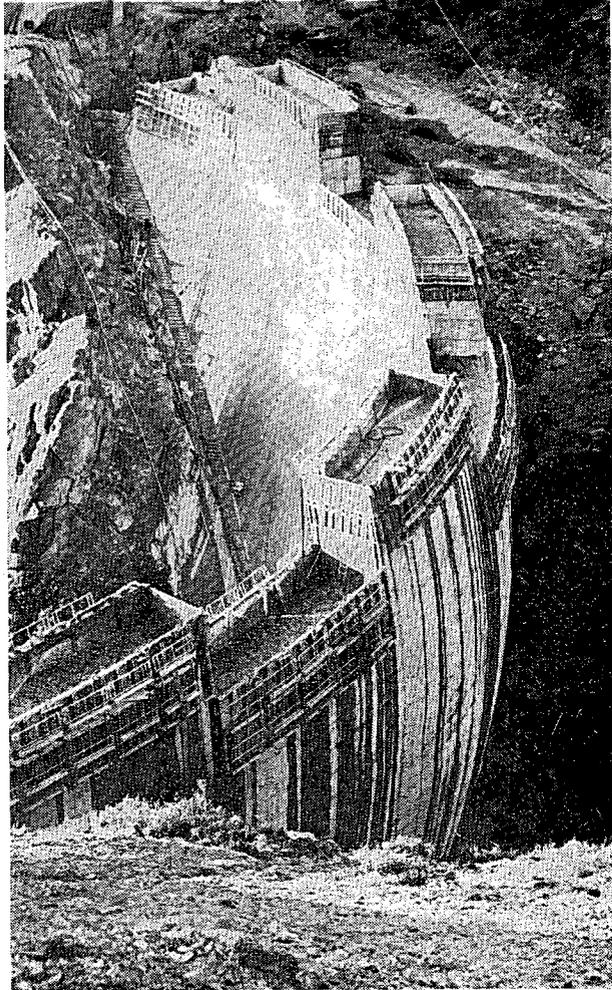


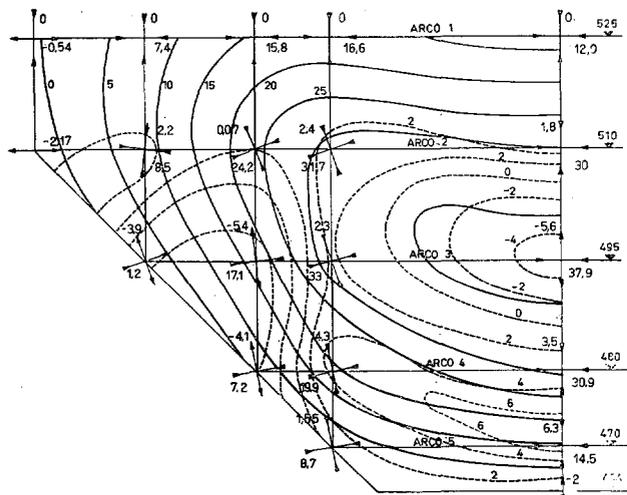
Foto 2.—Vista de la presa en construcción desde el estribo izquierdo.
(View of the dam under construction from the left abutment).

muy reducidos si se comparan con los medidos en el modelo, que son mucho más uniformes en la zona superior de la bóveda.

ALIVIADERO Y DESAGÜES

El aliviadero de la presa queda situado en el estribo derecho, y está formado por dos vanos de 8,50 m. de ancho, cerrados por compuertas de sector de 7,40 m. de altura. Los canales del aliviadero atraviesan por dos túneles el estribo de la presa y descienden con fuerte pendiente por la ladera, terminando en trampolines de lanzamiento, que arrojan al cauce del río los caudales de agua excedentes (fig. 8.^a). En el laboratorio de Iberduero, S. A., en Ricobayo, se ha ensayado en modelo reducido el funcionamiento de los aliviaderos (foto 5). Por el aliviadero lateral se puede evacuar un caudal de 650 m.³/seg. sin sobre elevarse el nivel del embalse. En previsión de que se produjeran avenidas con mayores caudales o que existieran dificultades para abrirse alguna de las compuertas, se prevé un resguardo de 3 m. entre el nivel máximo de explotación del embalse y el de coronación de la presa, con lo que, en caso de no ser suficiente el aliviadero principal para evacuar los caudales entrantes en el embalse, se elevaría el nivel de éste, vertiendo los caudales excedentes por un aliviadero de emergencia, situado sobre la parte central de la bóveda.

AGUA ARRIBA



AGUA ABAJO

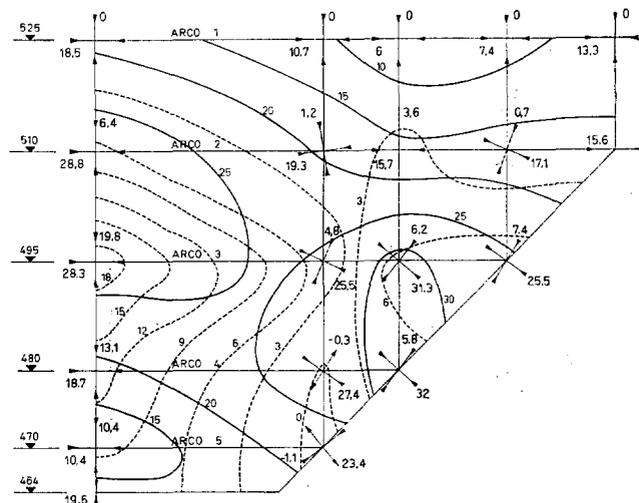


Fig. 5.^a—Diagrama de tensiones. Ajuste triple. (Diagrams of stresses. Triple adjustment).

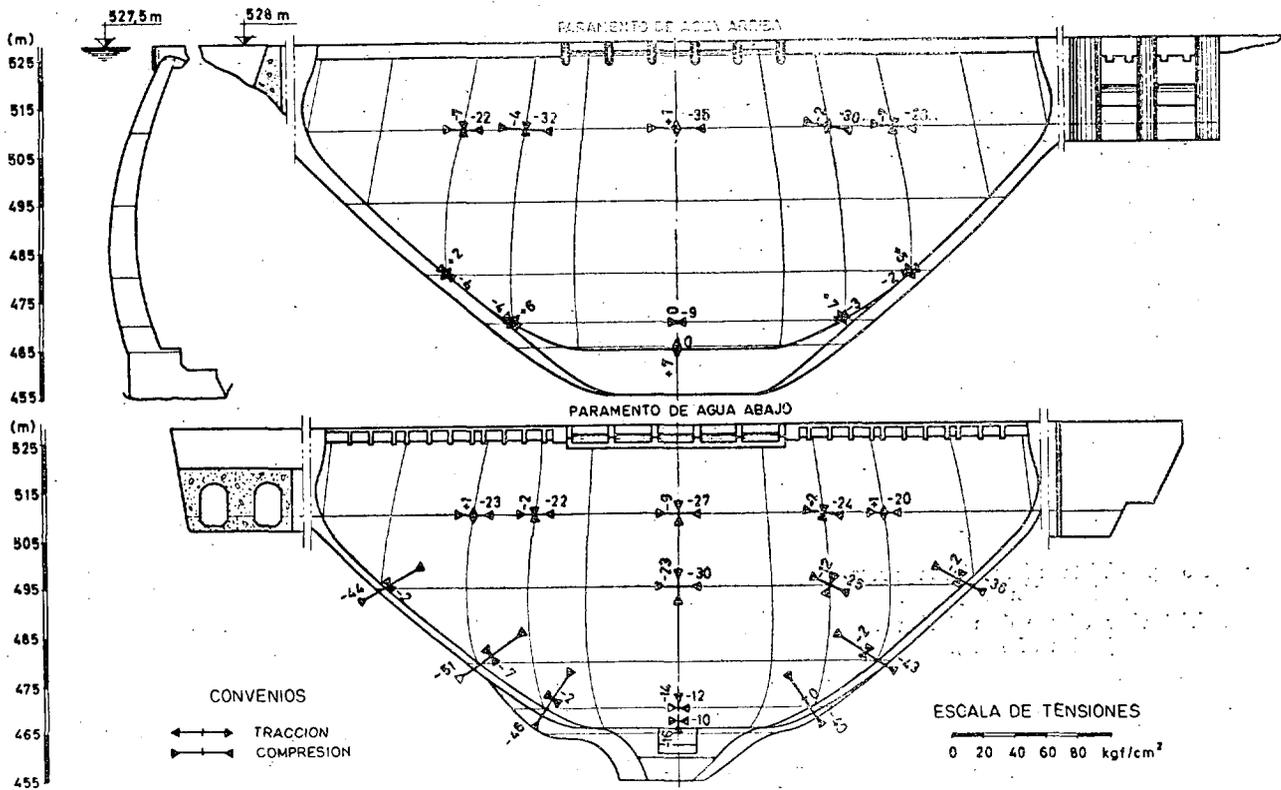


Fig. 6.ª — Diagramas de tensiones. Ensayo 1.ª.
(Diagrams of stresses. 1st. Test.)

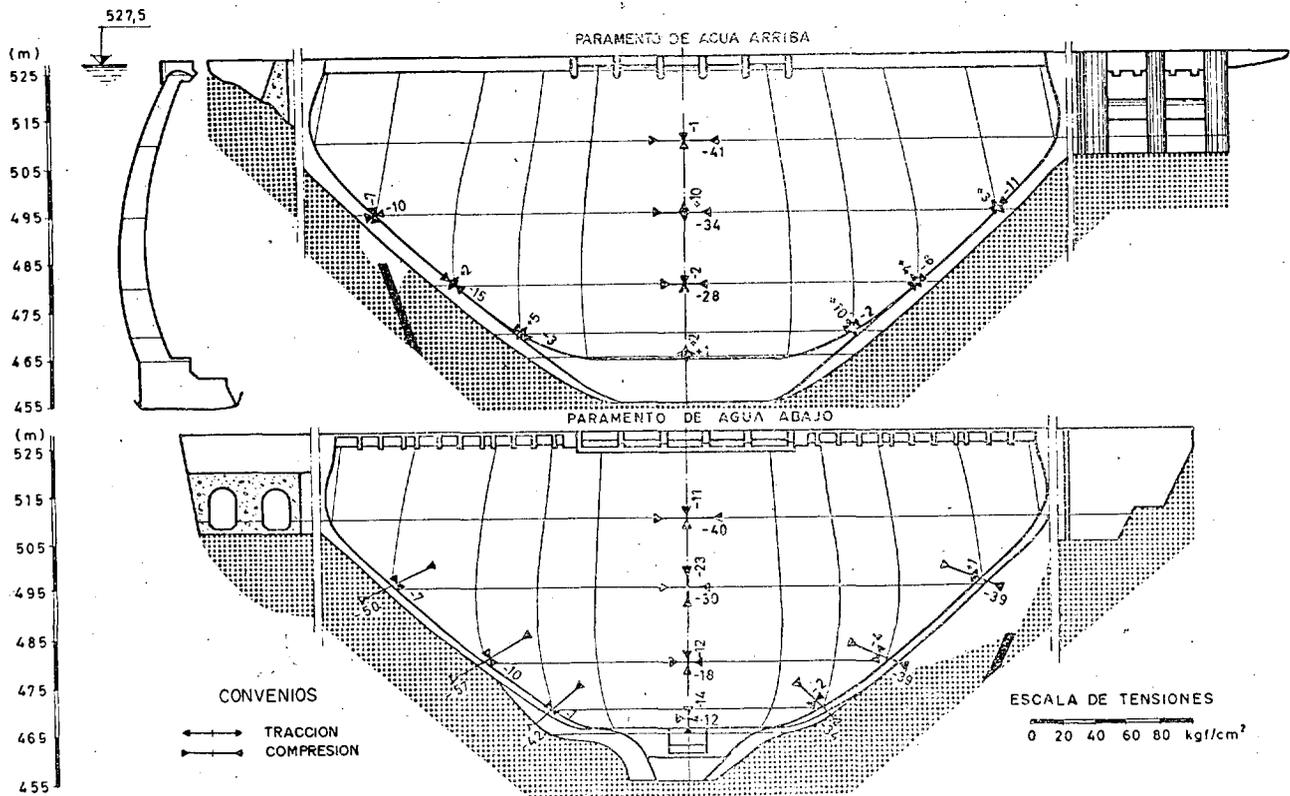


Fig. 7.ª — Diagramas de tensiones Ensayo 2.ª.
(Diagrams of stresses. 2nd. Test.)

Foto 3.—Vista desde aguas arriba.
(View from upstream).

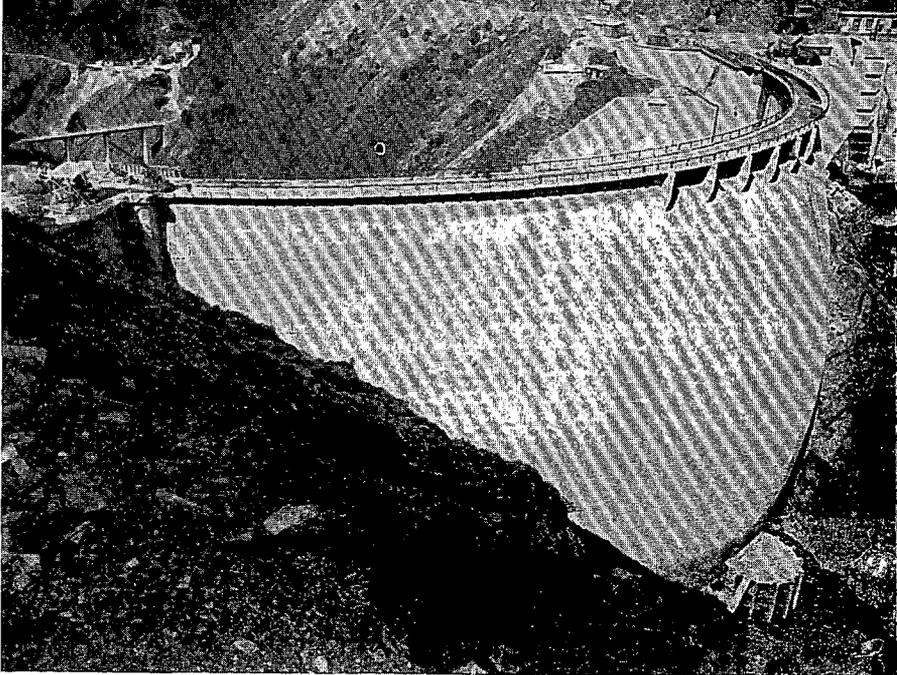


Foto 4.—Vista aérea de la presa
durante la inyección de juntas.
(Aerial view of the dam during the
injection of slots).



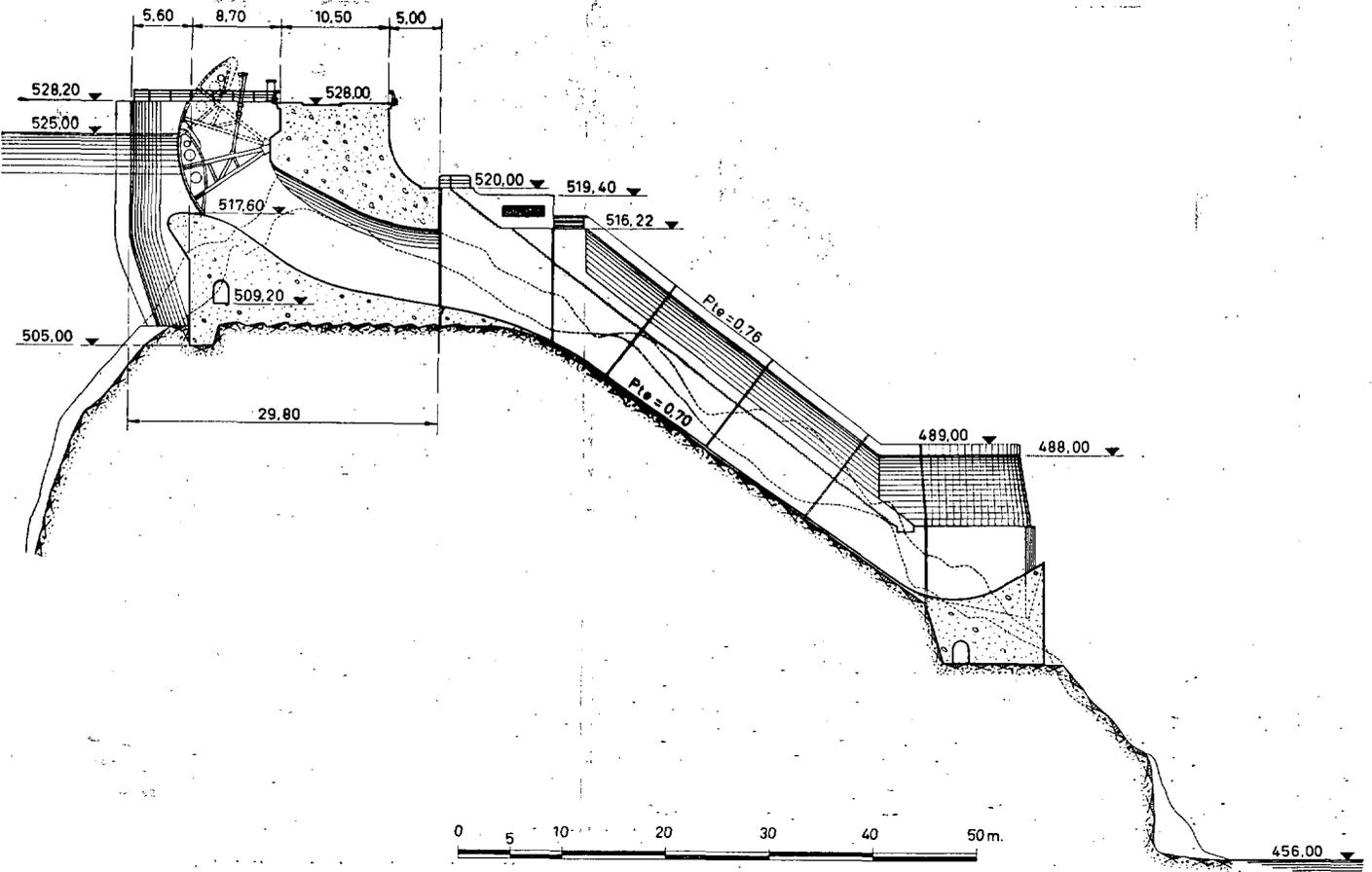


Fig. 8.^a — Perfil por un aliviadero. (Profile through a spillway).

Se disponen dos desagües de fondo, formados por conductos circulares de 1,60 m. de diámetro, que atraviesan el zócalo de la presa en su parte central. Cada uno de los desagües se cierra mediante dos válvulas mariposa, situadas ambas aguas abajo, confiando a la primera una misión de seguridad, y a la segunda, la regulación de caudales.

CIMENTACION

El emplazamiento de la presa está situado en terrenos silúricos, formados por capas de cuarcitas y pizarras, cuyas direcciones de esquistosidad y de diaclasas son, generalmente, favorables para soportar los empujes transmitidos por la presa.

Antes de confeccionar el proyecto definitivo de la presa, se han realizado numerosos reconocimientos y pruebas del terreno de cimentación, en especial por los procedimientos siguientes: prospección sísmica; sondeos mecánicos; galerías de reconocimiento; limpieza de los recubrimientos sobre las laderas que pudieran dificultar la

observación de la roca; levantamiento detallado de la red de litoclasas que afectan al macizo rocoso, midiendo, en especial, la orientación y buzamiento de los diversos sistemas de fracturas, su frecuencia, abertura, etc.; ensayos de compresión con gatos para estimar los módulos de deformabilidad del macizo rocoso en varios puntos; ensayos de corte en los accidentes principales que afectan a los macizos de cimentación.

La ladera derecha es bastante uniforme y poco deformable, habiéndose comprobado que la proximidad del barranco formado por el arroyo de Carballais o de Santa Eulalia, no ha afectado a la compacidad del macizo en que se apoya la presa. La ladera izquierda está afectada por algunas fracturas locales de la roca, cuya geometría y características mecánicas se han estudiado con todo detalle, con objeto de adoptar las precauciones convenientes para que no puedan afectar a la estabilidad del conjunto. Se realizaron como consecuencia de los estudios consiguientes: lavado e inyección de algunas de las fracturas; drenaje del macizo rocoso de la ladera; llaves para incrementar la resistencia al corte de algún accidente, y pretensado de la roca en alguna zona localizada.

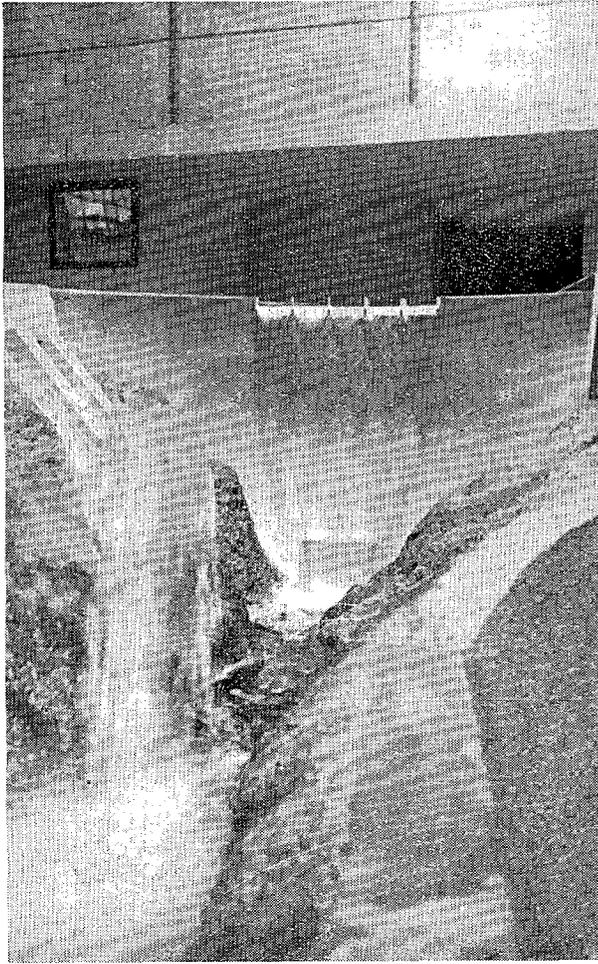


Foto 5.—Modelo reducido de los aliviaderos.
(Reduced model of the spillways).

(Ver Rapport núm. 32 de la Question 32, "Foundation of the Santa Eulalia Arch Dam", por Alejandro del Campo, José Manuel Peironcely y Luis Maroto.)

GALERIAS DE VISITA

Los espesores de la bóveda no han permitido disponer galerías de visita horizontales, pues debilitarían extraordinariamente las secciones de hormigón.

En cambio, se ha considerado conveniente disponer una galería perimetral, siguiendo el zócalo destinado a transmitir al terreno las cargas de la bóveda. Esta galería tiene una sección normal circular de 1,80 m. de diámetro, lo que equivale a una altura de 2,24 m. en sentido vertical (fig. 9.^a).

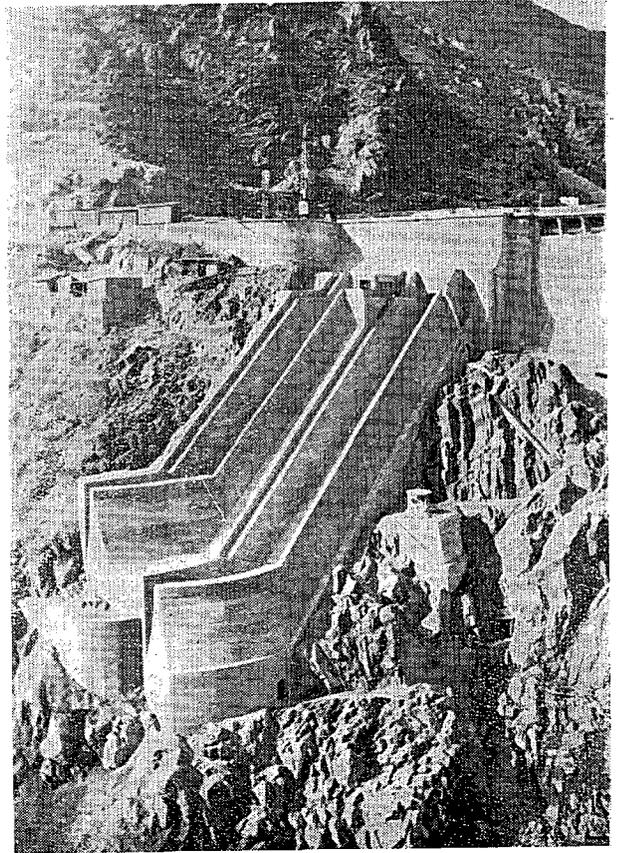


Foto 6.—Vista de los aliviaderos.
(View of the spillways).

Los fines de esta galería perimetral son:

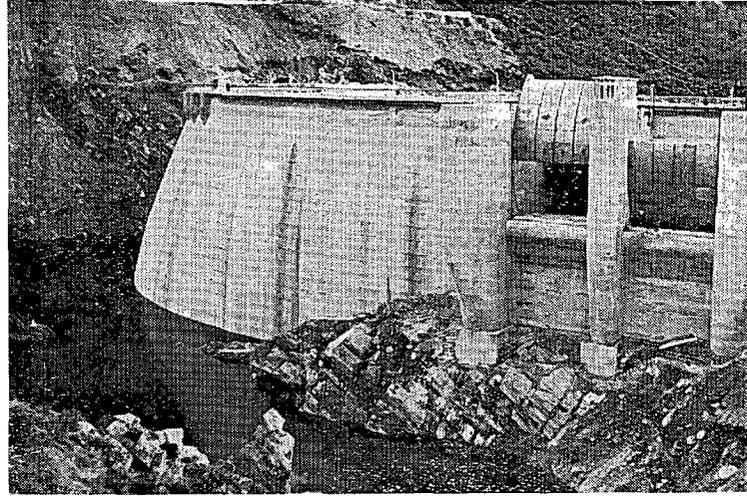
- a) Vigilar el hormigón en las proximidades del cimientó.
- b) Drenaje del macizo de hormigón.
- c) Facilitar la ejecución de las inyecciones de impermeabilización del terreno.
- d) Practicar desde su interior taladros que drenarán el terreno, cuyas filtraciones se conducirán por la propia galería perimetral.

Esta galería perimetral se comunica con la red de galerías del estribo izquierdo y con las galerías de reconocimiento del terreno, de la misma ladera.

El pequeño espesor del zócalo en la ladera derecha, no permite prolongar en toda su altura la galería perimetral, que ha sido sustituida por un orificio circular de 0,80 m. de diámetro.

Para completar el drenaje y vigilancia de las laderas, se han acondicionado para estos fines una de las galerías de reconocimiento en la ladera derecha y dos galerías en la ladera izquierda, que penetran hasta el accidente F4.

Foto 7.—Vista desde agua arriba en embalse parcial.
(View from upstream with partial impounding).



JUNTAS DE CONTRACCION

Con objeto de reducir el peligro de agrietamiento del hormigón por efecto de la retracción y el enfriamiento, se ha dividido la bóveda de la presa en 11 bloques por medio de juntas. Los estribos igualmente se dividieron en bloques (fig. 9.^a).

Se ha pretendido que las juntas en la bóveda sean sensiblemente normales a los paramentos, lo que ha dado lugar a superficies alabeadas. Como los esfuerzos cortantes a transmitir por las juntas son pequeños, no se ha previsto ningún tipo de dentado.

Posteriormente, y ya con el hormigón de presa totalmente frío, se llevó a cabo la inyección de estas juntas con lechada de cemento. Está previsto un doble sistema de inyección que permite repetir la operación en años sucesivos si se presenta algún motivo que lo aconseje.

La unión entre el estribo izquierdo y el estribo lateral de gravedad se ha dispuesto de forma que se garantice su impermeabilidad y se evite la transmisión de empujes. Como se puede ver en la figura 10, se ha dispuesto entre

ambos una junta abierta, con doble impermeabilización por banda de cobre y junta de caucho.

CONSTRUCCION DE LA PRESA DE SANTA EULALIA

Se iniciaron los trabajos preparatorios para la construcción de la presa de Santa Eulalia, en el mes de julio de 1964, habiéndose comenzado a hormigonar en estribos de la presa en el mes de mayo de 1965, y los cimientos de la misma, en el cauce del río, en agosto del mismo año. Se terminó el hormigonado de la presa en julio de 1966 (ver fig. 11), disponiéndose del resto del año para

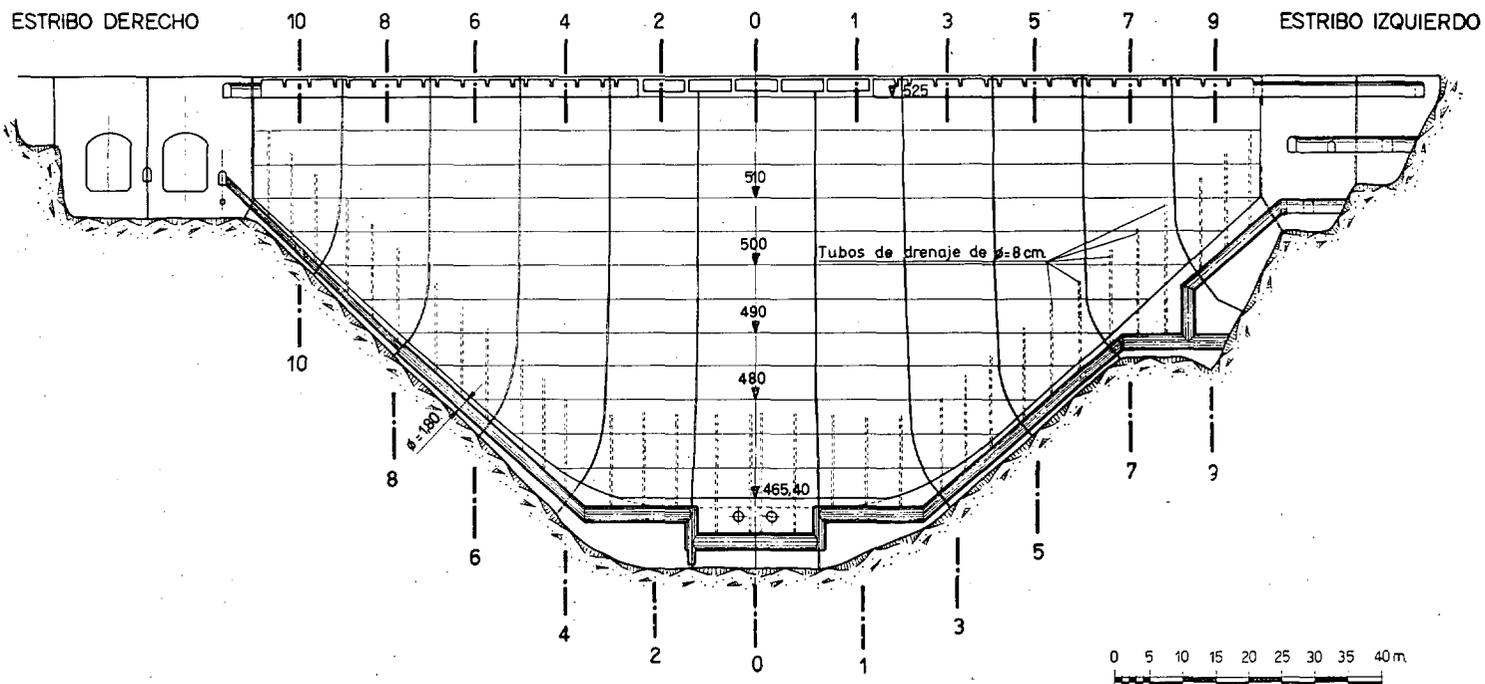


Fig. 9.^a—Sección desarrollada. (Developed section).

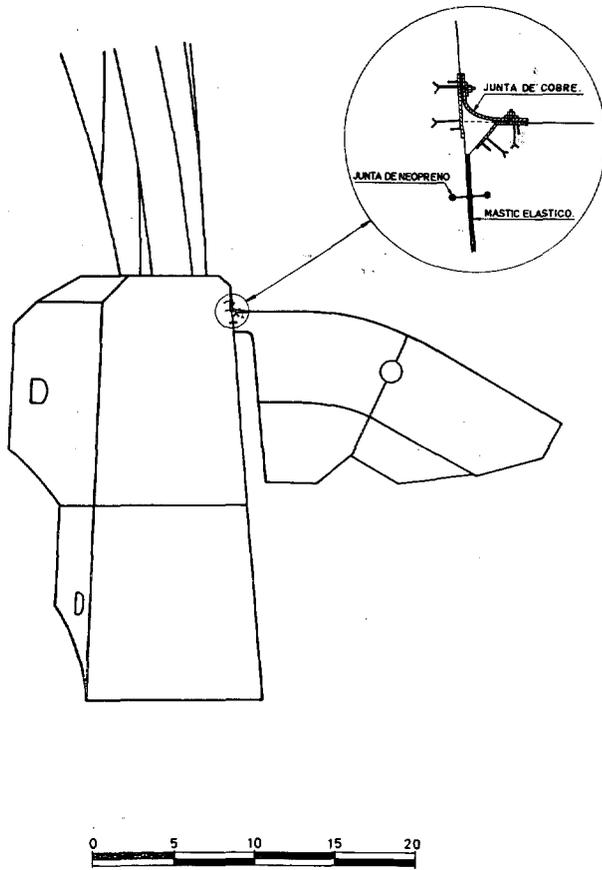


Fig. 10. — Sección de la junta de estribo.
(Section of the abutment joint).

el enfriamiento del hormigón y se inyectó el cierre de juntas en febrero-marzo de 1967, con las condiciones óptimas de temperatura en el hormigón del cuerpo de presa.

Las obras fueron ejecutadas por la Empresa Constructora Dragados y Construcciones, S. A.

Previamente se había construido el túnel de desviación, con objeto de utilizarlo como galería de reconocimiento de la ladera. La ataguía está formada por una bóveda cilíndrica, apoyada sobre una junta de "neopreno", para evitar que se transmitan flexiones por los elementos verticales (remitimos al lector a nuestro artículo sobre presas bóveda con junta en la base, de esta misma revista).

LA EXCAVACION

La excavación se realizó en dos fases sucesivas. Primeramente se arrancó con grandes voladuras la mayor parte de la roca que había que excavar y, posteriormente, se llevó a cabo una excavación de refino con precorte.

Estas grandes voladuras, algunas de las cuales llegaron a mover más de 7 000 m.³, se perforaron con martillos pesados sobre vagón-drill y con taladros de hasta 12 me-

tros. Una vez removida la roca, se empujaba el escombro con un bulldozer hacia el cauce del río, donde se cargaba con palas de 1,5 m.³ de cuchara, y se transportaba a la escombrera en camiones de 12 m.³ de capacidad de caja.

La segunda operación de refino se ejecutó siguiendo la técnica de precorte, con excelentes resultados en toda la ladera derecha y parte de la izquierda. Sin embargo, en algunas zonas de esta ladera no dio los resultados apetecidos, debido a la desfavorable situación de los lisos y a estar muy marcadas las direcciones de estratificación y esquistosidad.

EL HORMIGONADO

Después de estudiar varias posibles canteras para la obtención de los áridos destinados a la construcción de la presa, se decidió utilizar como áridos gruesos (mayores de 12 mm.) las graveras de canto rodado, que existen en el valle del Sil, y como la arena de estas graveras era de mediana calidad, se empleó caliza para la fabricación de las arenas que intervienen en la fabricación del hormigón (ver fig. 12).

Se emplearon los cinco siguientes tamaños de áridos:

100 -40	mm.	Grava gruesa	} Gravera de cuarcitas.
40 -12	mm.	Grava fina	
12 - 3	mm.	Gravilla	} Caliza de cantera.
3 - 1,6	mm.	Arena gruesa	
1,6- 0,07	mm.	Arena fina	

Los hormigones fabricados con áridos gruesos de cuar-

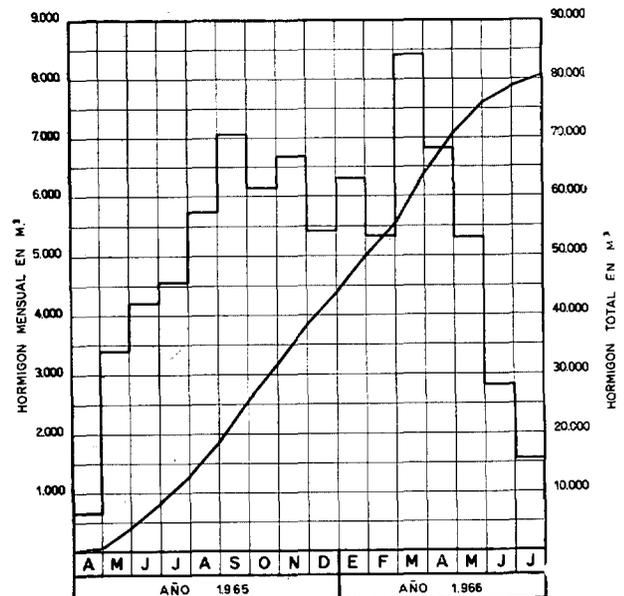


Fig. 11. — Historigrama del hormigonado.
(Histogram of the concreting).

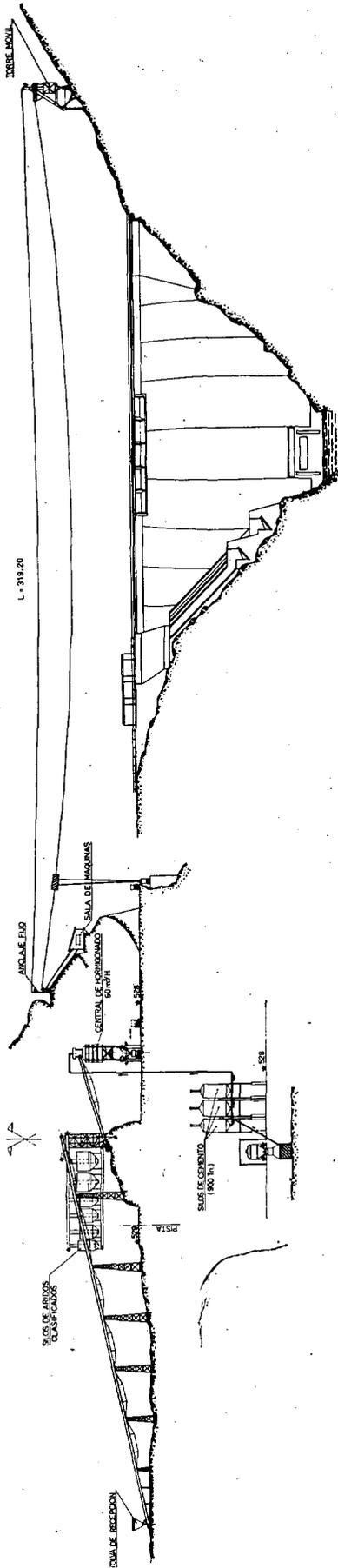
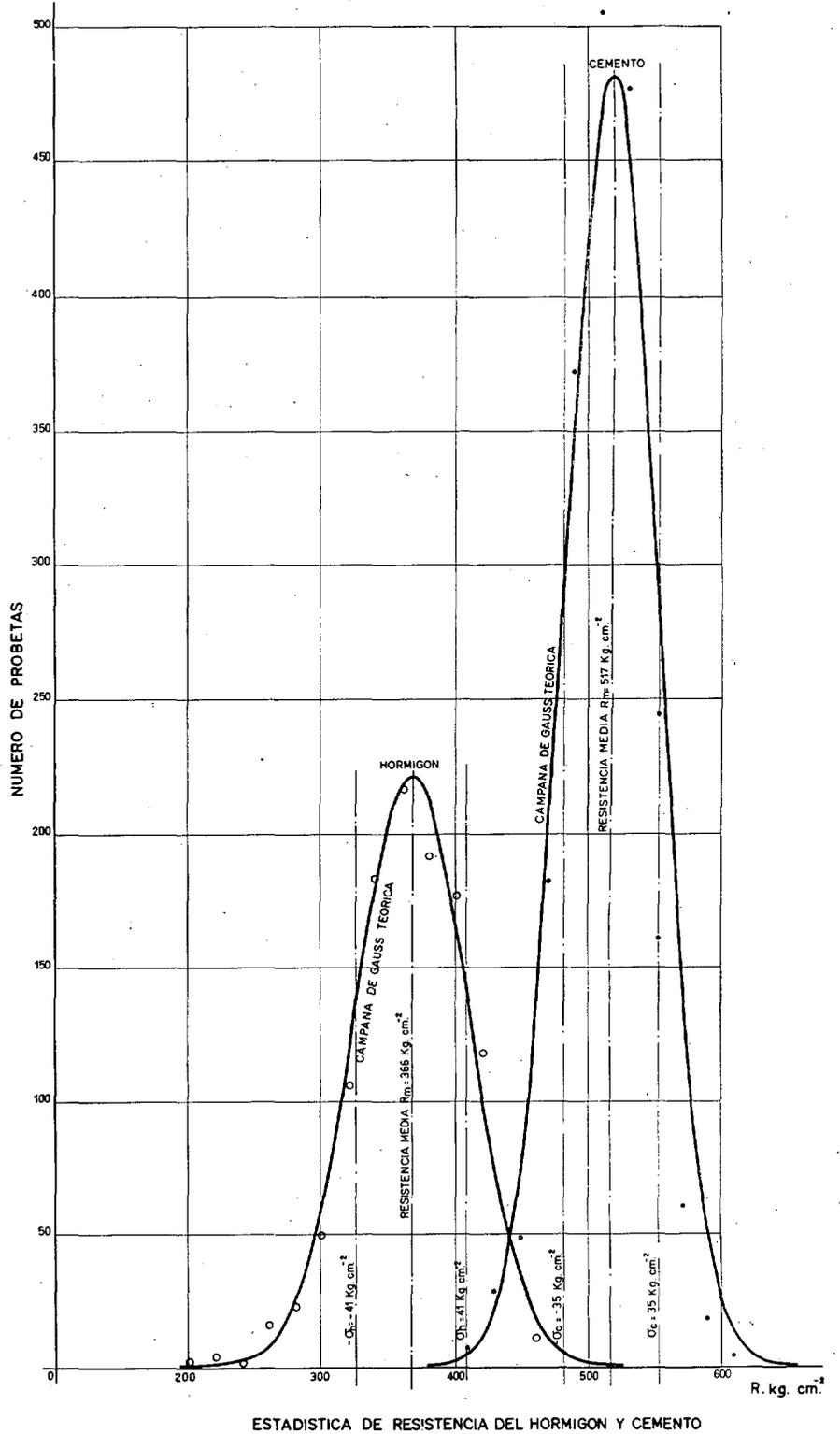


Fig. 12. — Perfil longitudinal de las instalaciones. (Profile of the installations).



ESTADISTICA DE RESISTENCIA DEL HORMIGON Y CEMENTO

Fig. 13. — Resultado estadístico de hormigonado. (Statistic result of the concreting).

cita redondeada y arena de caliza han dado resultados excelentes, tanto por lo que se refiere a la compacidad como a la resistencia y uniformidad.

Del hormigón de todas y cada una de las tongadas de la presa se confeccionaron series de seis probetas cilíndricas de 15 x 30 cm., que se rompieron a siete y veintiocho días. Periódicamente se ampliaban las series a 12 probetas, que se rompían a siete, veintiocho, noventa y trescientos sesenta y cinco días.

El resultado de las 1 140 probetas del hormigón de la bóveda, que se rompieron a veintiocho días, ha sido el siguiente:

La resistencia media, considerando la media aritmética del total de probetas, dio un valor de 366 Kg./cm.².

La dispersión media cuadrática de las 1 140 probetas resultó ser del 11,22 por 100 (ver fig. 13).

Al mismo tiempo que se confeccionaban una serie de probetas de hormigón, se tomaban muestras del cemento empleado, y se preparaban otras series de probetas según el Pliego oficial, que igualmente fueron rotas a siete y veintiocho días.

Los resultados de las 2 112 probetas de estos cementos fueron los siguientes:

La resistencia media, considerando la media aritmética del total de las probetas, dio un valor de 517 kilogramos/cm.³.

La desviación media cuadrática de las 2 112 probetas resultó ser de 6,70 por 100.

Las instalaciones de extracción, clasificación y lavado de gravas, estaban situadas a orillas del Sil, a una distancia de 12 Km. de la presa. A estas mismas instalaciones se condujo la caliza para su machaqueo y clasificación.

Desde los silos de la instalación de áridos se transportaron éstos, clasificados, en camiones, hasta las proximidades de la presa, donde, mediante cintas, se acopiaron en los silos correspondientes. Para permitir el secado de las arenas, existían dos silos para cada tamaño.

El cemento se transportó por ferrocarril hasta la estación de La Rúa-Petín, donde existe una instalación de descarga y ensilado, ya utilizada para la construcción de otras obras de Saltos del Sil, S. A. El cemento se transportó en camiones-cuba, desde los silos de dicha estación hasta la obra de la presa, donde se descargó por medios neumáticos.

Las instalaciones de hormigonado se situaron en la ladera derecha de la presa.

La torre de hormigonado contenía, en su parte superior, cinco silos para áridos, otro para cemento y un depósito para agua. La dosificación era automática en peso, para el cemento, agua, aireantes y los diversos tamaños de áridos. El hormigón se preparó en dos hormigoneras basculantes de 1,6 m.³ de capacidad. El error, medido periódicamente, en las pesadas era inferior al 1 por 100.

El hormigón se colocó en la presa mediante un blon-dín para 6 Tm. de carga, cuya torre de la ladera derecha era móvil.

AUSCULTACION

Repartidos en toda la bóveda y estribos, hay instalados un total de 39 termómetros de resistencia eléctrica en la masa del hormigón, con los que se ha seguido la evolución de la temperatura. Se ha podido comprobar que la presa estaba totalmente fría en el invierno de 1966-67, con temperaturas medidas en todos los termómetros, por debajo de la media anual. Esta diferencia se acusaba más en las zonas de poco espesor.

Para medir los desplazamientos horizontales se situaron unas dianas en 35 puntos, repartidos en el paramento aguas abajo de la bóveda, correspondiéndose con los puntos de cálculo. Periódicamente se observan estos puntos triangulándolos desde 5 pilares, colocados estratégicamente, con todas las precauciones propias de las observaciones geodésicas. Este procedimiento tiene la ventaja de su gran exactitud, pero tiene en contrapartida el inconveniente de dar los valores con un desfase de tiempo considerable.

En numerosas ocasiones se han triangulado las mismas dianas antes indicadas con los aparatos y procedimientos utilizados en el replanteo de la presa, lo que nos da unos valores de los desplazamientos con aproximación del milímetro y en un plazo inmediato.

El reducido espesor de la bóveda, y su fuerte curvatura vertical, impide situar dentro del cuerpo de la presa un pozo, donde poder instalar un péndulo, para medir los desplazamientos horizontales. A la vista de estos inconvenientes, se ha utilizado (creemos que por primera vez en España) una plomada óptica, para medir los desplazamientos horizontales del arco de coronación. Las observaciones realizadas hasta la fecha, han demostrado que el procedimiento tiene la sensibilidad suficiente.

En las juntas consideradas como más significativas se han instalado unos teledilatómetros para medir su abertura. En riñones del arco de coronación se dispuso un sistema de colimación para controlar periódicamente sus movimientos.

La observación de todos estos aparatos han confirmado las hipótesis de cálculo, pues las deformaciones medidas son pequeñas y perfectamente concordantes con los resultados del cálculo.

Además de los controles de deformación, se ha dispuesto un sistema que nos permite controlar los caudales de los drenes y los valores de la subpresión en el cimiento de la presa.

En la ladera izquierda, por debajo de la zona anclada, se han previsto unas barras especiales que, colocadas en unos taladros de 48 m. de longitud y ancladas en su fondo, permiten obtener la medida de los desplazamientos según dos direcciones. De esta forma podremos controlar y medir los posibles movimientos en la zona de falla y paquetes más blandos de la ladera izquierda. Los aparatos son de fabricación suiza, y también es la primera vez que se utilizan en una presa española.