

PRESA DE ALCANTARA

Prof. Dr. Ing. C. C. P. M. CASTILLO

Dr. Ing. C. C. P. N. NAVALON

I. INTRODUCCION

En el conjunto que Hidroeléctrica Española, S. A., está construyendo actualmente en el río Tajo, el salto de Alcántara constituye el cuarto escalón y el más importante de todos ellos, situado unos 800 metros aguas arriba del famoso puente mandado construir por el emperador hispanorromano, Trajano, en el siglo I, e inmediatamente aguas abajo de la confluencia del más importante afluente del Tajo, el Alagón.

Le da el nombre al salto la villa extremeña más próxima, Alcántara, cuyo origen indica su mismo nombre árabe: *Cantaraf Assaif*, que significa "Puente de la Espada", y debió ser fundada en la época del califato de Córdoba.

Alfonso IX de León conquistó definitivamente la estratégica villa en 1213, entregándola para su protección a la Orden de Calatrava. Como se hallaba esta plaza muy distante de sus posesiones, para que pudiesen los Caballeros de Calatrava atender debidamente a su defensa,

la cedieron a la Orden de San Julián del Pereiro, creada en 1156 por varios caballeros salmantinos, con sede a orillas del río Coa, a 45 kilómetros de Ciudad Rodrigo y 22 de Sabugal.

18

La villa de Alcántara quedó ya siempre unida a la historia de la Orden de San Julián del Pereiro, que trasladó allí su convento y estableció en él la cabeza de su Orden, cambiando su primitivo nombre por el de Alcántara.

Dentro del recinto de la villa, construyó la Orden, en el siglo XVI, el actual convento y templo de San Benito. El edificio del convento fue subastado por la Junta de Desamortización en 1866, y convertido en vivienda particular, mientras que la iglesia fue declarada monumento nacional por Real Orden de 16 de marzo de 1914.

Finalmente, en 1961, Hidroeléctrica Española adquirió la parte más monumental del convento, que se encontraba en estado ruinoso, lo reconstruyó e instaló en él su residencia.

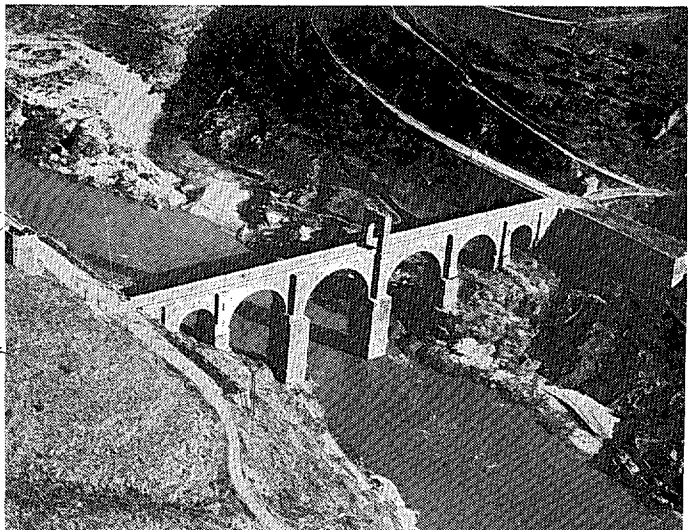


Fig. 1.^a — Puente romano. Siglo I.
(Roman bridge).

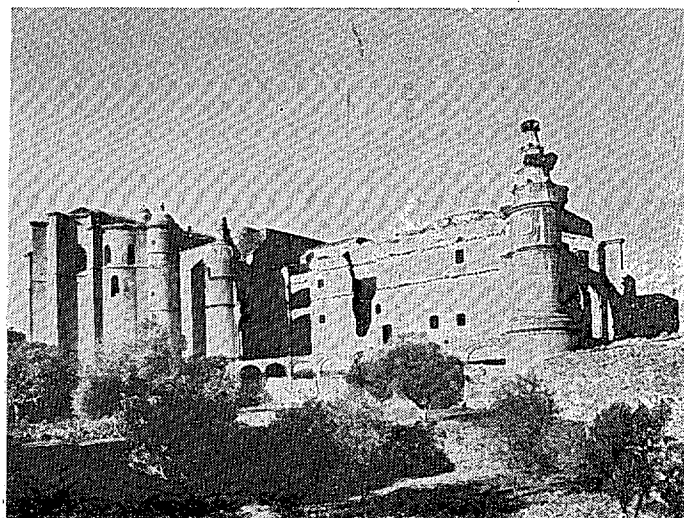


Fig. 2.^a — Convento de San Benito Siglo XVI.
(San Benito convent)

II. EL SALTO DE ALCANTARA

1. Características generales.

El conjunto de las instalaciones que constituyen el salto de Alcántara, son las siguientes:

- Presa gravedad aligerada, de 130 m. de altura máxima.
- Central de pie de presa, situada en la margen izquierda, con 800 000 kW. instalados.
- Dos aliviaderos de superficie: uno central, situado sobre la presa. Otro lateral, situado en la margen izquierda.
- Dos desagües profundos en correspondencia con los túneles de desvío.

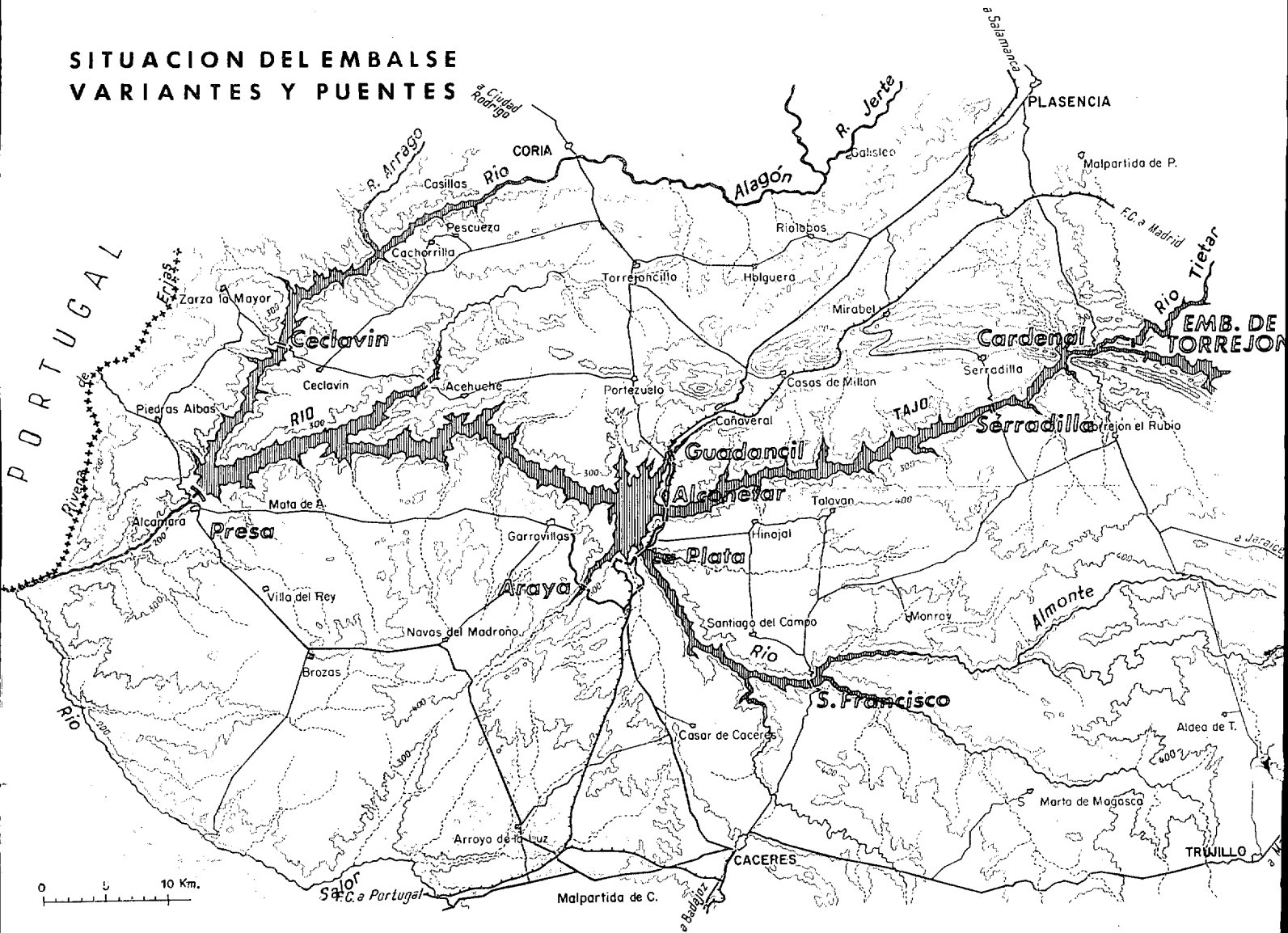
— Ocho variantes con diecinueve puentes, dos de los cuales son mixtos.

Resumen de las características generales:

Embalse:

| | |
|---|-------------------------|
| Superficie de la cuenca vertiente | 51 916 Km. ² |
| Aportación media anual | 7 691 Hm. ³ |
| Volumen de embalse | 3 137 Hm. ³ |
| Superficie inundada | 10 400 Ha. |
| Longitud del embalse | 91 Km. |
| Máximo nivel normal | 218 m.s.n.m. |
| Máximo nivel extraordinario | 220 m.s.n.m. |

SITUACION DEL EMBALSE VARIANTES Y PUENTES



Situación del embalse, variantes y puentes.
(General plan of reservoir, diverted roads, railways and new bridges.)

Presa:

De gravedad aligerada, compuesta por 19 elementos de 22 m. de anchura.

| | |
|------------------------------|-------------------------|
| Cota de coronación | 223 m.s.n.m. |
| Altura máxima | 130 m. |
| Longitud de coronación | 570 m. |
| Volumen de hormigón | 850 000 m. ³ |
| Volumen excavación | 640 000 m. ³ |

Aliviaderos:

| | |
|--|---------------------------|
| Central: 3 vanos de 16 × 10,5 m. | 4 000 m. ³ /s. |
| Margen izquierda: 4 vanos de 15 × 15 m. | 8 000 m. ³ /s. |
| En carga: 2 de 300 m. ³ /s. | 600 m. ³ /s. |

Central:

| | |
|---|---------------------------|
| Potencia instalada (4 × 200 MW.) | 800 MW. |
| Salto máximo bruto | 108 m. |
| Caudal máximo turbinable | 1 172 m. ³ /s. |
| Producción media anual | 1 750 GWh. |
| Turbinas: 4 Francis de eje vertical y ro- dete de 5 090 mm. ϕ | |
| Compuertas de toma: 4 de tipo Oruga, de 5,5 × 8,4 m. | |
| Diámetro de las tuberías | 7,50 m. |
| Volumen de hormigón | 295 000 m. ³ |
| Volumen de excavación | 535 000 m. ³ |

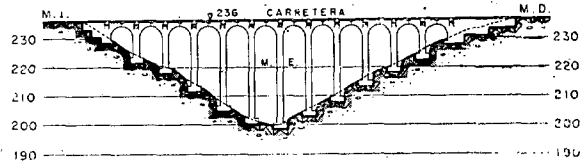
Variantes y puentes:

1. Variante de C.C. 522, de Garrovillas a Valencia de Alcántara.

- Longitud de la variante, 7 352,26 m.
- Puente sobre la rívera de Araya:

De hormigón armado de arcada múltiple, con 11 elementos análogos y dos estribos.

| | |
|------------------------------|-----------|
| Longitud total | 142,40 m. |
| Entre eje de elementos | 10,00 m. |
| Altura máxima pila | 34,00 m. |

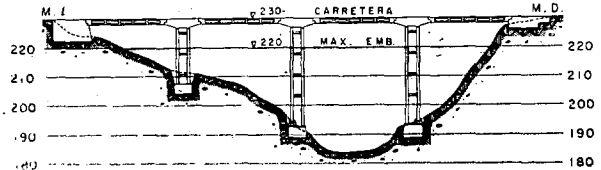


Puente de Araya, sobre la ribera de Araya.
(Araya bridge, over Araya stream.)

2. Variante de la C.L. de Cáceres a Torrejón El Rubio.

- Longitud de la variante, 669,76 m.
- Puente de San Francisco sobre el río Almonte:
Isostático de hormigón postesado, con tramos prefabricados de 28 m.

| | |
|--|-----------|
| Longitud total | 167,00 m. |
| Luz entre eje de pilas | 39,50 m. |
| Luz entre pila y eje apoyo estribo | 33,75 m. |
| Altura máxima de pila | 34,00 m. |

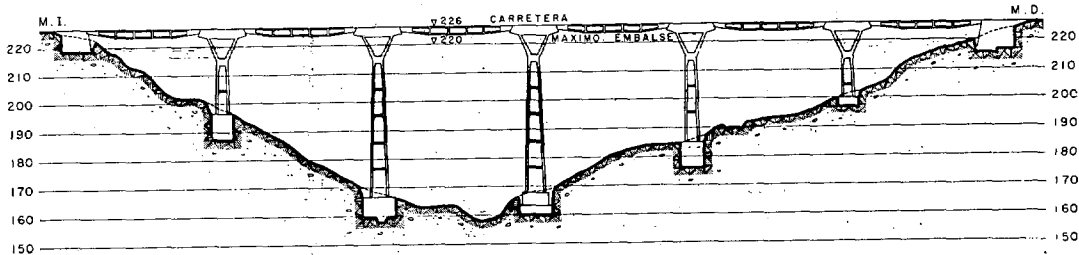


Puente de San Francisco, sobre el río Almonte.
(San Francisco bridge, over Almonte river.)

3. Variante de la C.L. de Zarza la Mayor a la C.C. 526, de Puente de Guadancil a Ciudad Rodrigo.

- Longitud de la variante: 1 027,89 m.
- Puente de Ceclavin sobre el río Alagón:
Isostático de hormigón postesado, con 6 tramos prefabricados de 40 m.

| | |
|------------------------------|----------|
| Longitud total | 320,0 m. |
| Luz entre eje de pilas | 54,0 m. |
| Entre pila y estribo | 47,5 m. |
| Altura máxima de pila | 57,0 m. |



Puente de Ceclavin, sobre el río Alagón.
(Ceclavin bridge, over Alagón river.)

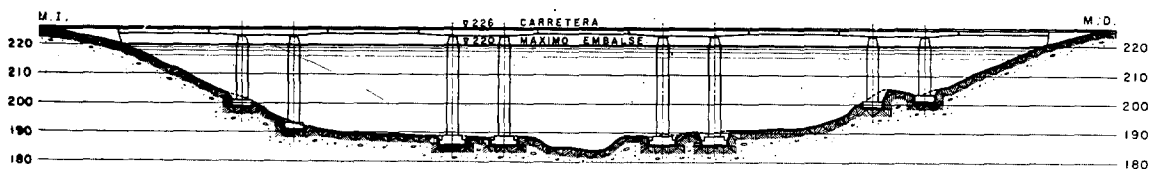
4. Variante de la C.C. 524, de Plasencia a Trujillo.

— Longitud de la variante: 1 292,28 m.

— Puente del Cardenal sobre el Tajo:

Isostático de hormigón postesado, formado por 4 tramos.
 Cantilever de 41,12 m. y 5 tramos apoyados de 31,60 m.

Longitud total 324,0 m.
 Luz entre eje de pilas 54,72 y 18 m.
 Altura máxima de pilas 35,0 m.



Puente del Cardenal, sobre el río Tajo.
 (Cardenal bridge, over Tagus river.)

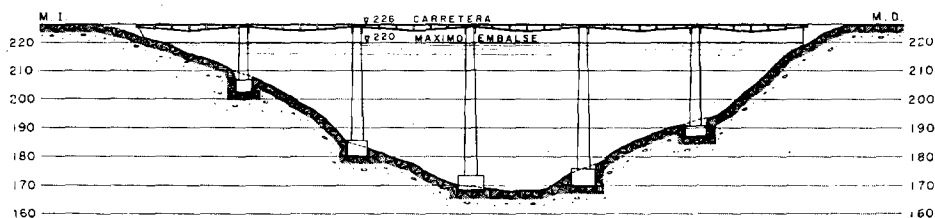
5. Variante del C.V. Serradilla, a la C.L. de Cáceres a Torrejón El Rubio.

— Longitud de la variante: 627,98 m.

— Puente de Serradilla sobre el Tajo:

Isostático de hormigón postesado, formado por 4 tramos prefabricados de 39 m.

Luz entre eje de pilas: 39,00 m.
 Entre pilas y estribos: 37,50 m. y 19,50 m.
 Altura máxima de pila: 50,00 m.



Puente de Serradilla, sobre el río Tajo.
 (Serradilla bridge, over Tagus river.)

6. Variante de la C.C. 526, Cáceres-Ciudad Rodrigo.

— Longitud de la variante: 1 244,15 m.

7. Variante de la C.N. Gijón-Sevilla, tramo Salamanca-Cáceres.

— Longitud de la variante: 14 180,69 m.

— La variante lleva 7 puentes, de los cuales 2 son mixtos; es decir, F.C. y carretera.

— Puentes normalizados:

Tramos isostáticos postesados, de 20 m. de luz entre eje de apoyo y 21,50 entre ejes de pilas.

Son los siguientes:

| Nombre | Long. total — m | Nº de tramos | Altura máxima de pilas — m |
|-------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------------------|
| Sapo | 87,40 | 3 | 7,50 |
| Carecera | 81,00 | 3 | 9 |
| Cabrera | 146,30 | 6 | 11 |
| Arenero | 130,12 | 5 | 20 |
| Villoluengo | 103,50 | 4 | 17 |

entre ejes de apoyo y 21,50 m. entre ejes de pilas. **18**

Son los siguientes:

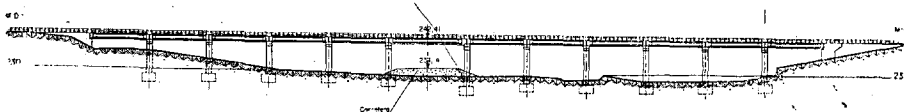
| Nombre | Long. total — m | Nº de tramos | Altura máxima de pilas — m |
|----------------|-----------------------|-----------------|-------------------------------------|
| Sapo | 79,80 | 3 | 7,50 |
| Carecera | 53,75 | 2 | 11 |
| Cabrera | 114,80 | 5 | 11 |
| Arenero | 127,30 | 5 | 18 |

8. Variante de F.C. Madrid-Valencia de Alcántara.

- Longitud de la variante: 10 471,70 m.
- La variante lleva 7 túneles con una longitud total de 2 240 m., y 7 puentes, dos de los cuales son mixtos; son los siguientes:
- Puentes normalizados:
Tramos isostáticos postesados, de 20 m. de luz

— Puentes sobre el arroyo de Guadancil:

Isostático de hormigón postesado, formado por 11 tramos de 21 m. de luz y uno de 27,50 m., prefabricados.
Pilas cilíndricas de 2,40 m. de diámetro y 18 m. de altura máxima.
Longitud total: 289,50 m.



Puente del ferrocarril, sobre el arroyo Guadancil.
(Railway bridge, over Guadancil stream.)

— Puente de Alconetar sobre el Tajo:

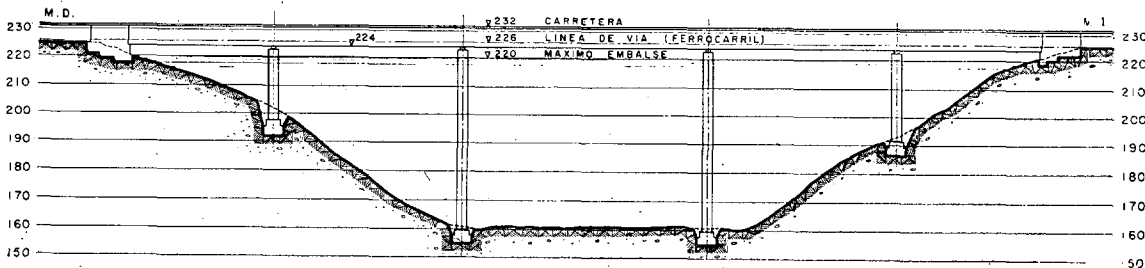
Puente mixto de ferrocarril y carretera.
La superestructura hiperestática está formada por una sección en cajón, postesada en los dos sentidos, de 5,80 m. de ancho y 6,95 m. de altura para paso del ferrocarril. El tablero superior, de 10 m. de ancho, es para la carretera.
Longitud total del puente principal, es de: 341,5 metros.
Consta de 5 vanos de 85 m., 2 de 65 y 2 de 50 m.
Altura máxima de pilas: 60 m.
Los dos puentes de acceso al principal, son puentes carreteros de superestructura hiperestática y postesados, cuyas características son:

Acceso norte:

Longitud 63,00 m.
Luces entre ejes de pilas: 2 de 18 m., 1 de 24 m.
Altura máxima de pilas 10,00 m.

Acceso sur:

Longitud 183,00 m.
Luces entre pilas: 7 de 21 m., 2 de 18 m.
Altura máxima pilas 12,00 m.



Puente mixto de Alconetar, sobre el río Tajo.
(Alconetar road and railway bridge, over Tagus river.)

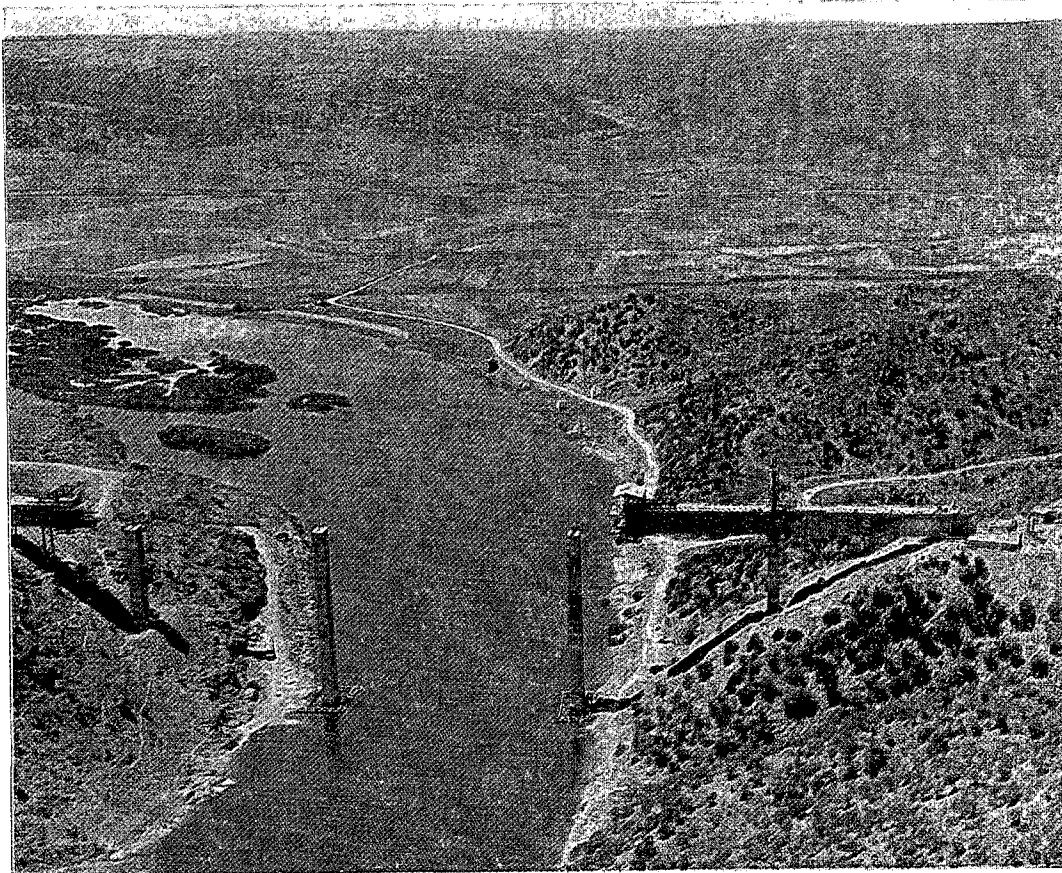


Foto 3.— Puente mixto de Alconetar.
(Alconetar bridge).

— Puente de La Plata sobre el río Almonte:

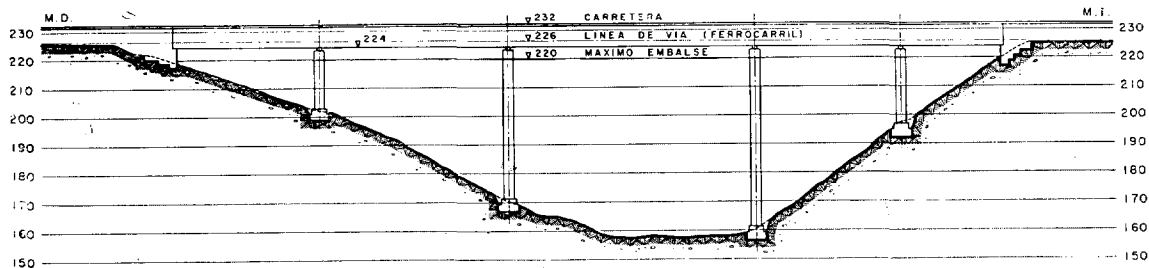
Puente mixto de ferrocarril y carretera.
Estructura idéntica al anterior.
Longitud total del puente 308,25 m.
Consta de 5 vanos de 50 m. y 3
de 85 m., 48,50 m. y 36,5 m.
Altura máxima de pilas 60,00 m.

Puente acceso norte:

Longitud total 46,00 m.
Luces entre eje pilas 20 m. y 26 m.
Altura máxima pilas 8,00 m.

Puente acceso sur:

Longitud total 45,60 m.
Luces entre ejes pilas 21,00 m.
Altura máxima pila 8,00 m.



Puente mixto de La Plata, sobre el río Almonte.
(La Plata road and railway bridge, over Almonte river.)

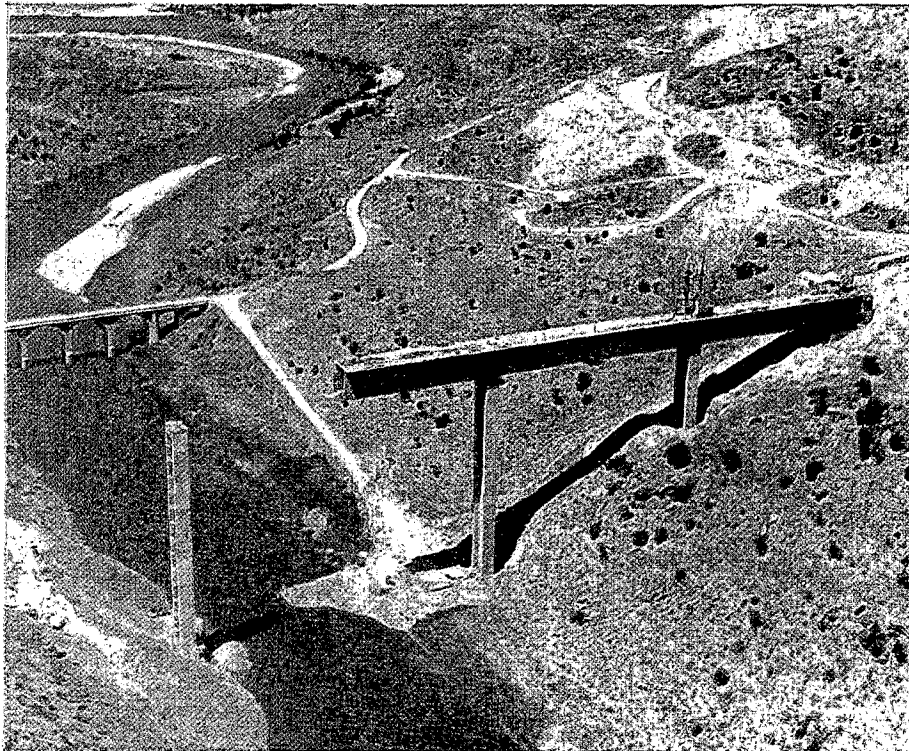


Foto 4.— Puente mixto de La Plata.
(La Plata bridge).

2. Presa.

La presa, de 130 m. de altura máxima desde cimientos, es una gravedad aligerada de doble contrafuerte, tipo Marcello, constituida por diecinueve elementos de 22 m. de ancho cada uno, y dos estribos de gravedad: el derecho, de 40 m. de longitud e idéntico perfil, dividido en tres bloques; el izquierdo, que engloba el aliviadero lateral, forma con el eje de presa un ángulo de 20° hacia aguas abajo; consta de nueve bloques de diez metros cada uno, un muro aleta y un bloque transición entre la gravedad aligerada y el aliviadero propiamente dicho.

El elemento tipo de perfil triangular isósceles, tiene las siguientes características fundamentales:

| | |
|--------------------------------------|-----------------|
| Ancho | 22 m. |
| Pendiente paramentos | 0,45 |
| Pendiente paramentos laterales | 0,03 |
| Hueco interior | 7,00 m. |
| Vértice triángulo resistente. | 220,50 m.s.n.m. |
| Coronación | 223,00 m.s.n.m. |
| Ancho de coronación | 7,00 m. |

Todos los elementos se ensanchan en su zona de aguas abajo, hasta ponerse en contacto para lograr una mayor estabilidad transversal de conjunto. La altura de contacto es variable.

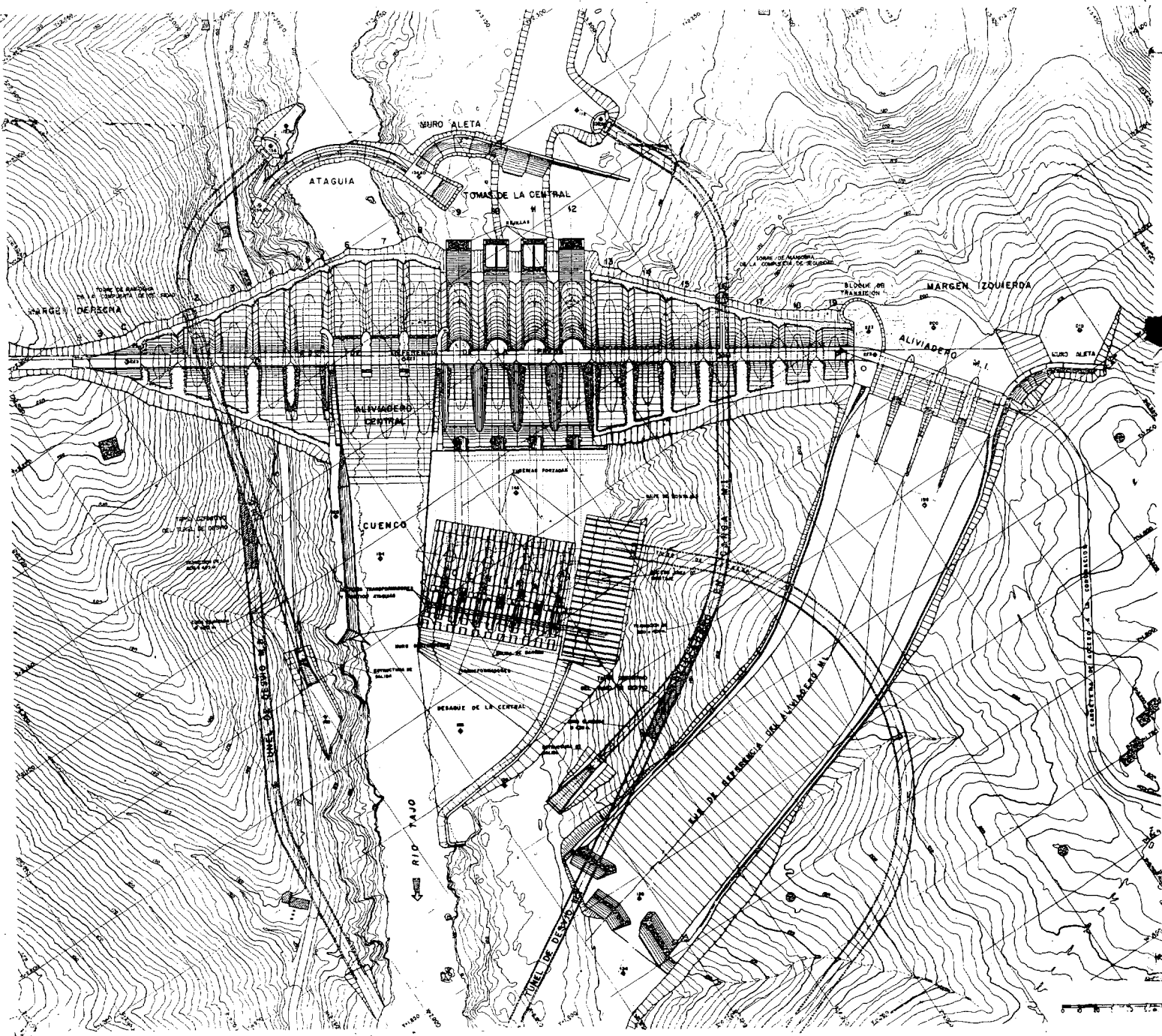
La cimentación de cada elemento se hace ascendente hacia aguas abajo, con el fin de lograr una mejor incidencia de la resultante de los esfuerzos sobre el plano de cimentación, reforzando al mismo tiempo, artificialmente, la discontinuidad ya existente de por sí, en la roca, en la familia subhorizontal de diaclasas.

Cada una de las dos partes de todo contrafuerte queda cimentada sobre un plano, ganándose el desnivel entre ambas en el espacio situado frente al hueco interno.

Los elementos son independientes, pero en contacto a lo largo de una estrecha superficie, que corre en toda la altura donde van ubicados los dispositivos de impermeabilización.

Para la construcción, cada elemento se ha dividido en dos o tres bloques, según su altura, por medio de juntas dotadas de redientes y dispositivos de inyección.

Para la elección de tipo de cemento a utilizar, fueron premisas fundamentales las siguientes:



Planta general.
(General plan.)

- El tipo de presa y su proceso constructivo, que en Alcántara supone bloques de dimensiones extraordinarias, sin posibilidad de reducir, al menos, una de sus dimensiones.
- Su ubicación, provincia de Cáceres, con elevada temperatura ambiente en verano—del orden de

40° C.—y no muy bajas en invierno—por encima casi siempre de 0° C.

- La naturaleza del agua del río Tajo, potencialmente peligrosa por la presencia de sulfatos en proporciones muy variables.
- El tipo de árido a utilizar en la fabricación del

hormigón: granito machacado procedente de la cantera inmediata a la presa.

A la vista de lo anterior, el cemento debía reunir las siguientes cualidades:

- Bajo calor de hidratación con las ventajas inherentes al mismo.
- Capacidad de fijación de la cal libre del cemento, para hacerlo más resistente a los sulfatos.
- Conglomerante de gran plasticidad.

Lo dicho anteriormente nos condujo directamente a la utilización de un cemento "a la puzolana", con una proporción de puzolana que oscila entre el 28 y el 32 por 100.

Su comportamiento real es completamente satisfactorio.

3. Aliviaderos.

Han sido objeto de particular atención, por su importancia, el estudio de los aliviaderos de la presa de Alcántara, dentro de las prescripciones impuestas por las normas vigentes. Puntos de partida son, a este respecto, la "punta" de avenida, a la que estadísticamente se le puede asignar una frecuencia de quinientos años, y la sobreelevación de embalse en un supuesto de compuerta averiada.

Moviéndonos en la estrechez de estas disposiciones, cuyo acierto y oportunidad puede ser objeto de sustan-

ciosa polémica, hemos añadido la experiencia de nuestras anteriores realizaciones para ampliar en forma más práctica y directa los márgenes de seguridad incorporados al conjunto de presa-central. Esto se refiere en particular al fraccionamiento del dispositivo vertedero en dos totalmente independientes, lo que da una flexibilidad extraordinaria a la dirección de los vertidos, al control de las eventuales socavaciones y ofrece una seguridad difícil de ponderar para reparar, llegado el caso, los posibles desperfectos en los aliviaderos mismos.

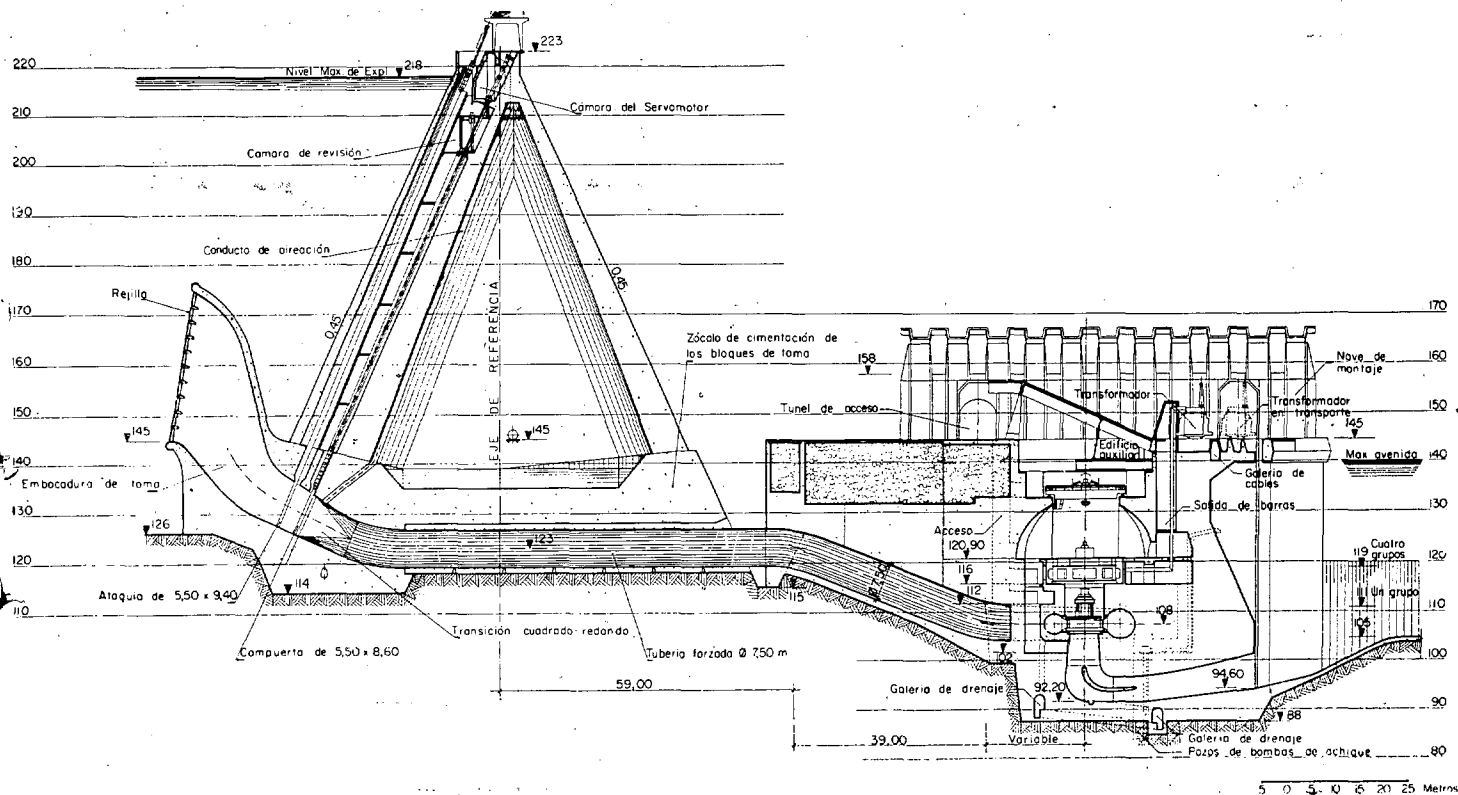
Así, disponemos de un aliviadero central (3 vanos), con amortiguación de resalto hidráulico en cuenco de solera larga, y otro lateral (4 vanos), de vertido en encauzamiento peraltado, o sea, en curva, con amortiguación de energía en cuenco de solera dentada.

Los 15 000 m.³/s., que encuentran una justificación estadística para la frecuencia $T = 500$ años, se evacuan, descrestados casi en un 20 por 100, descompuestos en hasta 4 400 m.³/s., por el aliviadero central, y 8 150 m.³/s. por el lateral.

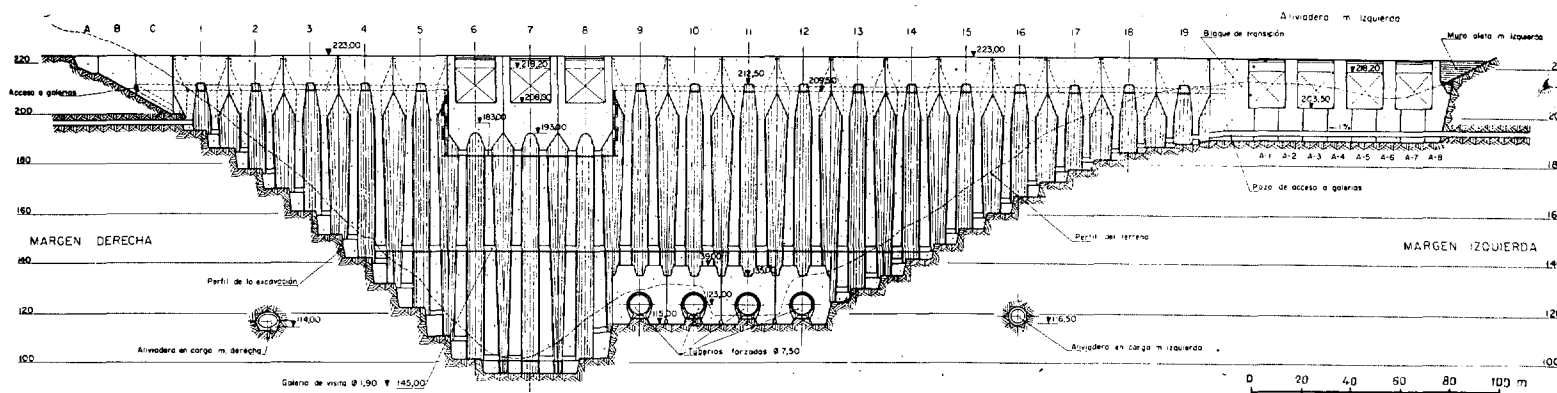
Completan el sistema anterior dos desagües de fondo idénticos, situados uno en cada margen, con su toma al abrigo de la ataguía bóveda de desvío.

4. Circuito hidráulico.

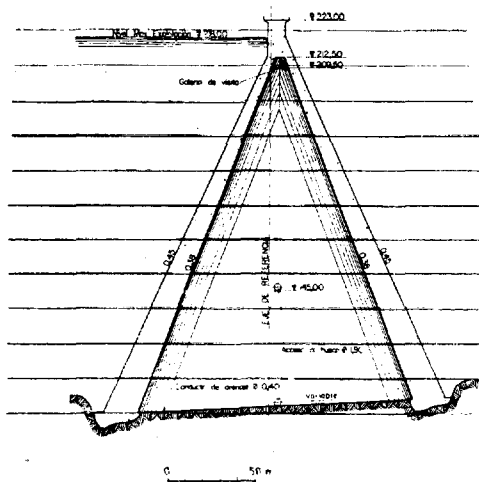
Las tomas de agua, en correspondencia con los ejes de bloques números 9, 10, 11 y 12, van ubicadas en ma-



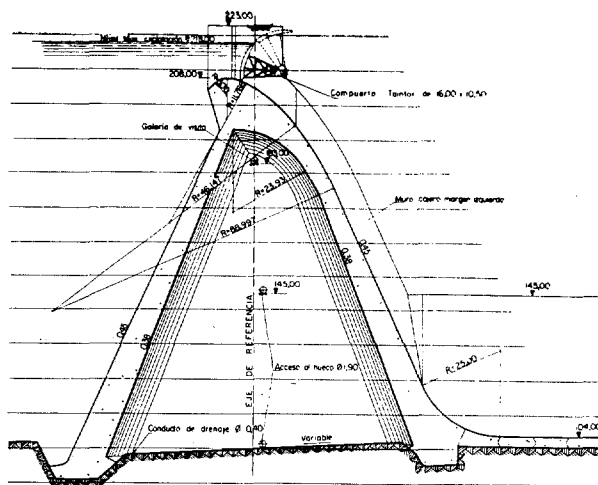
Sección por el eje de toma.
(Cross-section of intake.)



Sección longitudinal por el eje de la presa.
(Longitudinal section along dam axis.)



Sección por eje del elemento tipo.
(Cross-section of typical block.)



Sección por elementos de aliviadero.
(Cross section of spillway blocks.)

cizos independientes entre sí e independientes de los bloques citados, con el fin de no introducir distorsión alguna en el elemento tipo de presa, con su umbral a cota 145.

El caudal máximo admisible por toma es de 295 m.³/s., con admisión frontal, protegida por una rejilla metálica.

Las tuberías blindadas corren por los huecos del macizo de apoyo de los bloques citados. Son perfectamente visitables y tienen la ventaja de anular los peligrosos efectos de la presión intersticial exterior. Su diámetro es 7,50 metros.

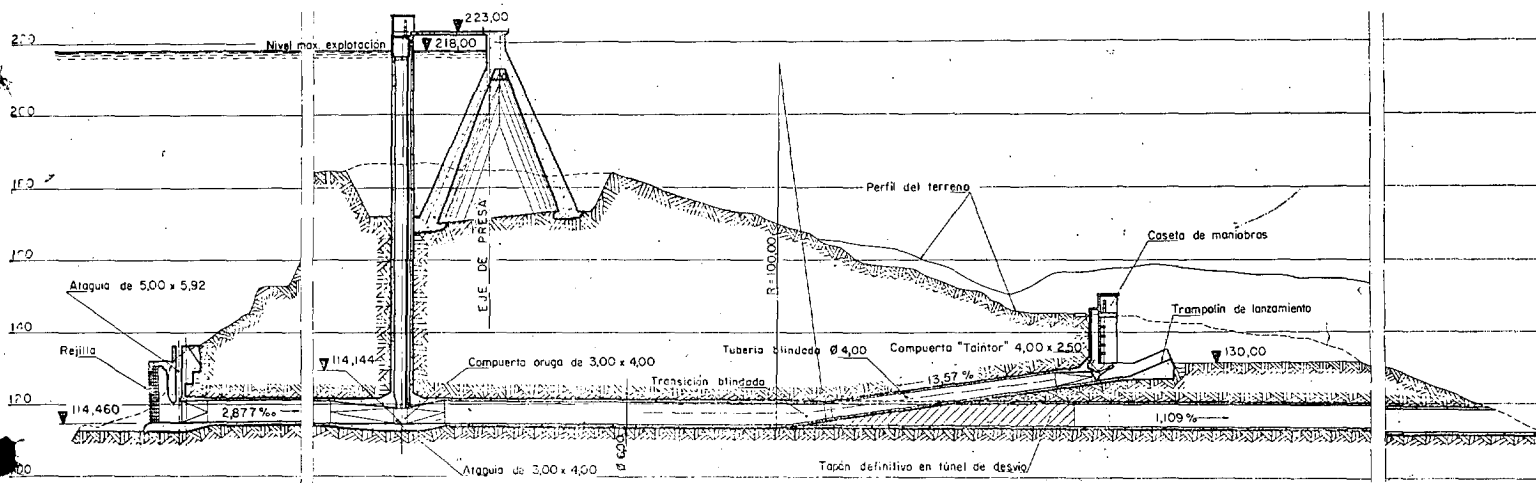
Los mecanismos de accionamiento y revisión de los elementos de cierre de las tomas, se han dispuesto en una cámara a cota 213, accesible desde coronación de la presa.

5. Central.

La central de pie de presa se encuentra situada en la margen izquierda, dentro del cauce del río y adyacente al cuenco del aliviadero central, de manera que forma parte del cajero del mismo.

Por su carácter de central de pie de presa, su salto varía con el nivel del embalse. Los niveles máximos y mínimos de explotación vienen definidos por las cotas 218 y 175, siendo la cota de la lámina de agua, en el canal de descarga, para un grupo funcionando a plena carga, la 111, y el nivel de estiaje en el río, la 108. Se ha fijado como altura nominal para el dimensionado de las turbinas, la correspondiente a una cota en el embalse de 198 m.

Una vez más hubo que resolver el ya relativamente



Aliviadero en carga.
(Outlet.)

frecuente problema, en centrales españolas, de conjugar el régimen irregular del río con un cauce relativamente estrecho: el derivado de la gran diferencia existente entre el nivel normal o de estiaje y el que se produce durante las máximas avenidas.

Esto obliga, por un lado, a bajar la cota del rotor de la turbina, condicionada por el peligro de cavitación con aguas bajas, con las consiguientes de excavación, y de otro lado, a disponer importantes estructuras de protección de la central en aguas altas.

Estos condicionantes: plano de simetría de la cámara espiral a la cota 108, nivel de máximas avenidas a la cota 143, hacían interesante el plantearse una solución de central subterránea, con el atractivo que suponía una total independencia entre la central y la presa. La disposición del conjunto presa-aliviadero y los completos estudios geológicos realizados, aconsejaban situar la central subterránea en la margen derecha. Se abordó esta solución y entre otras, razones de inestabilidad hidráulica que comprometían el buen funcionamiento de las máquinas, y cuya perfecta solución obligaba a dispositivos de equilibrio de grandes dimensiones, que conducían a volúmenes de excavación y estructuras resistentes de elevado coste, o a dispositivos todavía no fiables, como clapetas capaces de permitir el paso del aire a los tubos de aspiración, tras una parada brusca de las turbinas. El caso de Alcántara suponía extrapolación respecto casos existentes, y cuyo funcionamiento no se garantizaba.

Estas dificultades quedaban totalmente paliadas disponiendo la central, a cielo abierto, en la margen izquierda.

III. CONDICIONES TOPOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DE LA CERRADA

1. Características topográficas y geológicas.

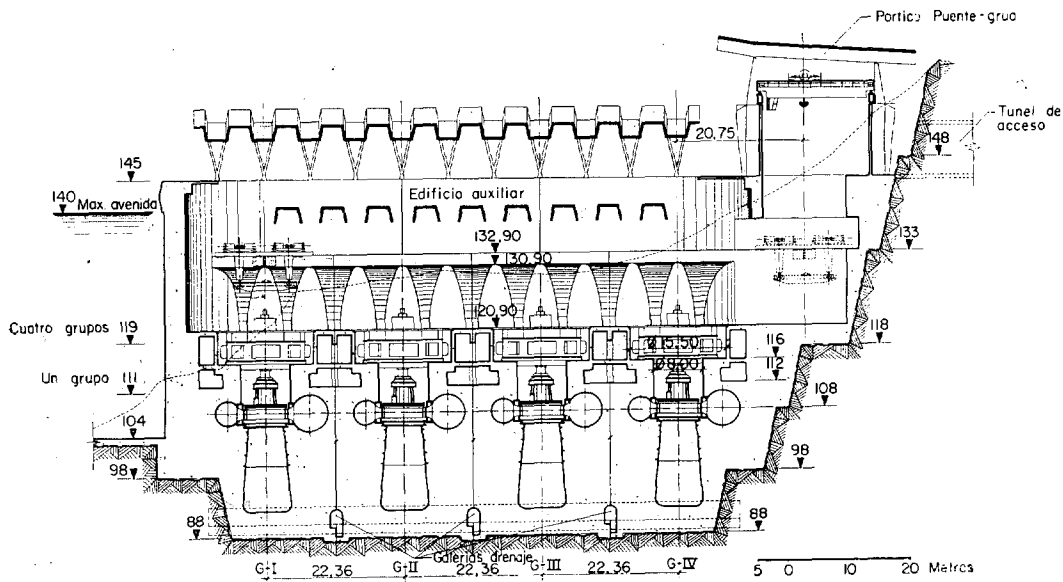
La cerrada tiene un perfil topográfico disimétrico, escarpado en la margen derecha y suave en la izquierda. En el centro existe una vasta plataforma, desarrollada hasta el pie de la margen izquierda, en la que se entalla un cañón de 30 a 40 m. de ancho, por el que discurre el Tajo en periodos de aguas normales.

Desde el punto de vista geológico, la cerrada de Alcántara es una formación cámbrica uniforme, constituida por filadidos y esquistos pizarreños subverticales, orientados WNW-ESE. Estos esquistos, de origen pelítico, más o menos lapidificados por los efectos del metamorfismo regional, forman barras finamente estratificadas en las que se intercalan localmente filones de cuarzo de débil espesor.

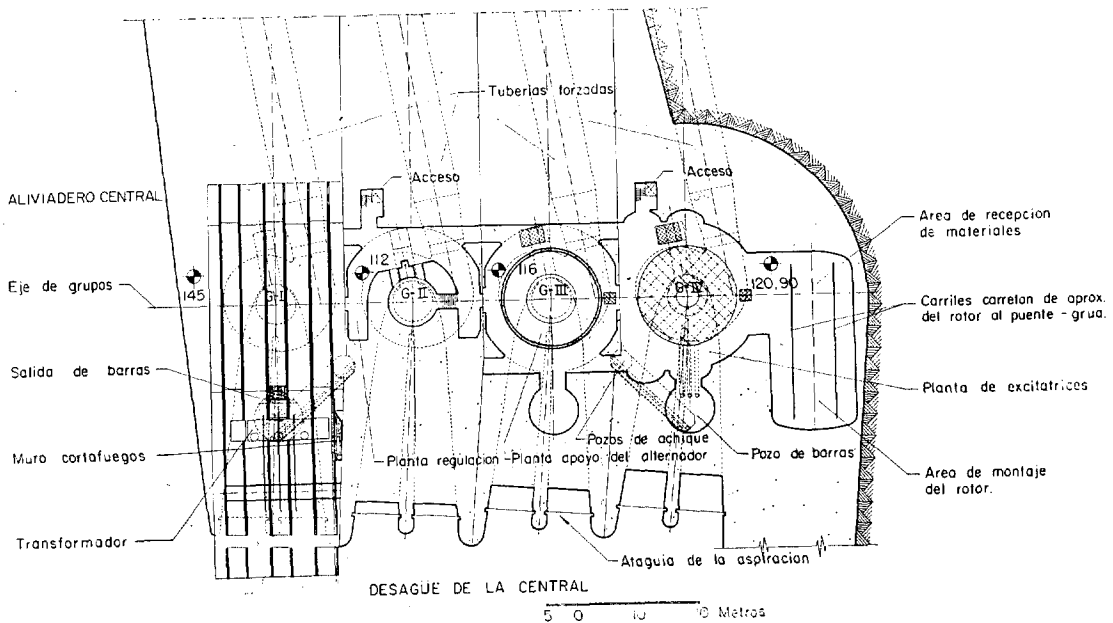
Desde el punto de vista geomecánico, el conjunto de estos esquistos presenta una fisuración principal, orientada ya en el sentido de los lechos, ya perpendicularmente a su dirección.

En el primer caso, da origen a litoclasas igualmente subverticales orientadas WNW-ESE., y el segundo, a diaclasas igualmente subverticales orientadas NNE.-SSW. Otra familia principal de fisuras denota la presencia de diaclasas secundarias, subhorizontales o inclinadas alternativamente hacia el interior o hacia el exterior de las laderas. Estas diaclasas secundarias no son continuas, y se cortan entre sí a corta distancia, a diferencia de las anteriores, que seccionan al macizo rocoso en larga distancia.

La estructura se caracteriza, finalmente, también, por



Central. Sección longitudinal por el eje de grupos.
(Power station. Longitudinal section along axis of units.)



Planta a diferentes niveles.
(Plant at different elevations).

la existencia de una red, normal en este tipo de macizos rocosos, de fracturas entrecruzadas de largas mallas —unas continuas y otras discontinuas—, cuya separación varía del decámetro a varios decámetros. Estas fracturas seccionan más o menos verticalmente al macizo pizarroso, y se hallan dispuestas oblicuamente a la es-

quistosidad principal. Son comparables a las superficies de rotura por esfuerzo cortante, que aparecen en una probeta de hormigón o de roca en un ensayo con rotura, en aparato triaxial.

Las fracturas citadas han provocado roturas con un deslizamiento limitado en el seno del macizo pizarroso,

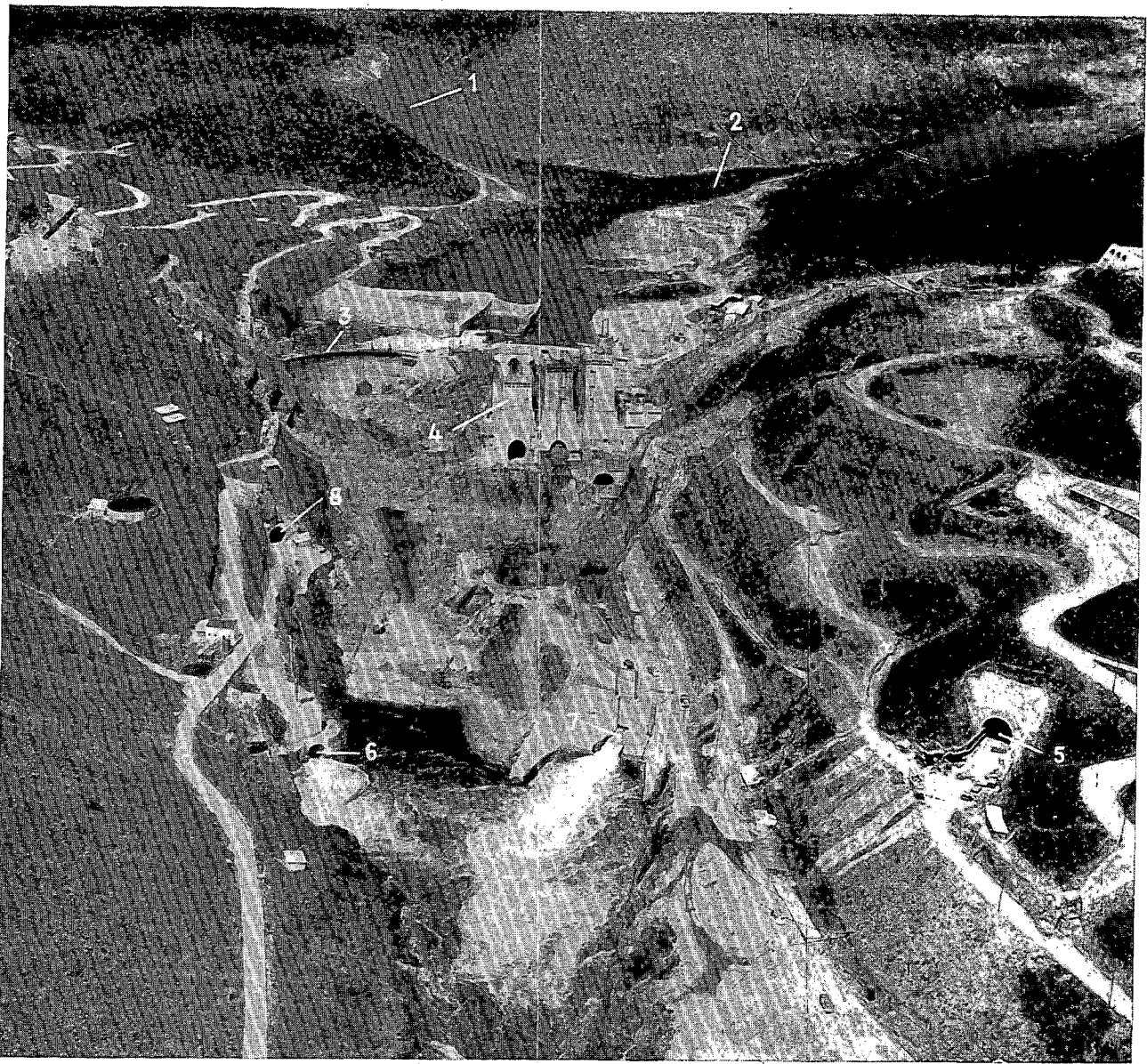


Foto 5.— Vista del emplazamiento desde aguas abajo: 1, río Alagón; 2, río Tajo; 3, ataguía; 4, presa; 5, acceso a la central; 6-7, túneles de desvío; 8, aliviadero en carga *M D*.
 (General view of site from downstream: 1) Alagón River; 2) Tagus River; 3) cofferdam; 4) dam; 5) access to power station; 6-7) diversion tunnels; 8) right bank outlet.)

al sufrir éste un esfuerzo de compresión superior al que originó su esquistosidad. De esta situación ha resultado la formación, a lo largo de las fracturas, de un borde estrecho continuo, o no, de pizarras más o menos fracturadas, incluso localmente trituradas.

Tales accidentes no tienen carácter excepcional o singular en los macizos esquistosos, y se encuentran con frecuencia en los macizos tectonizados, pero no realmente fallados.

2. Características geotécnicas de las formaciones.

De acuerdo con los resultados del estudio geológico,

se planearon los programas de ensayo geotécnico necesarios para definir las características del comportamiento de las formaciones que constituyen la fundación de la presa de Alcántara.

Los ensayos se refieren esencialmente a las cuestiones principales siguientes:

- La deformabilidad bajo la acción de la obra proyectada.
- La capacidad de resistencia y el coeficiente de seguridad del apoyo de la presa.
- El efecto que puede producir la presencia de agua procedente del embalse.

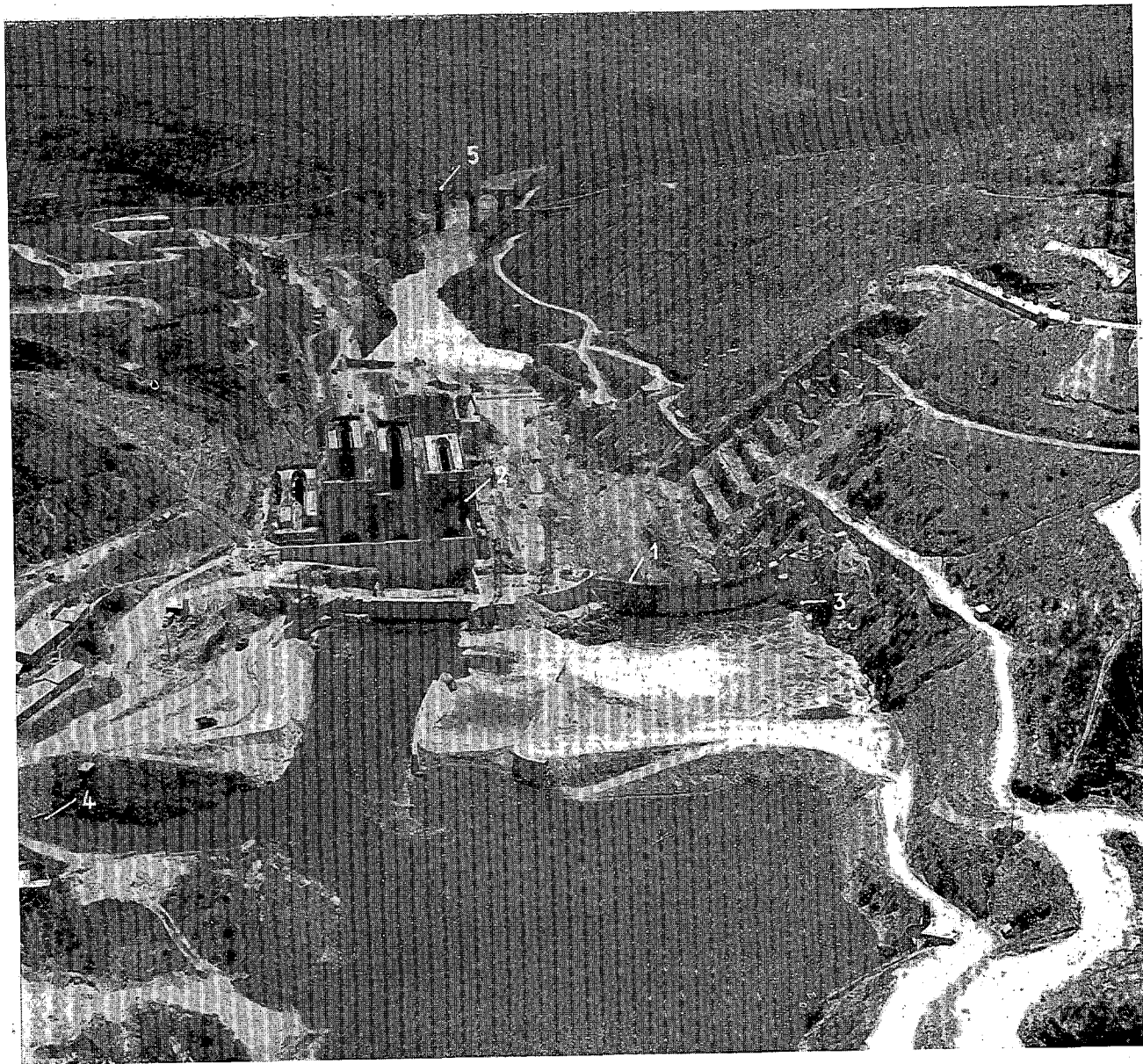


Foto 6.—Vista del emplazamiento de aguas arriba: 1, ataguía; 2, presa; 3, túnel de desvío *MD*; 4, túnel de desvío *MJ*; 5, puente romano.
 (View of site from upstream: 1) cofferdam; 2) dam; 3) diversion tunnel (right bank); 4) diversion tunnel (left bank); 5) Roman bridge).

— Resultados que puede aportar el tratamiento por lavado e inyecciones previsto.

Los diversos ensayos relacionados con la deformabilidad, proporcionaron información por procedimientos diferentes e independientes.

- Ensayos con placa bajo presión de gatos hidráulicos.
- Ensayos con presiómetros o gatos planos de 2,10 metros de diámetro.
- Ensayos con medida de celeridad de ondas elásticas.
- Ensayos con dilatómetro en sondeos.

Teniendo en cuenta los resultados de estos ensayos, se llega a poder establecer con bastante precisión las características del comportamiento reológico del macizo rocoso de apoyo, antes y después de su tratamiento.

De acuerdo con los resultados de las medidas sísmicas, y en correspondencia con las observaciones geológicas, pueden diferenciarse las siguientes zonas:

- Zona superficial de cobertura y roca alterada, incluso cabeceada superficialmente. Sus celeridades varían entre 1,4 a 1,7 Km./s. Ha sido retirada en las excavaciones previas al tratamiento.
- Zona de roca descomprimida con fisuras más o



Foto 7.— Excavación estribo derecho.
(Right abutment excavation).

menos abiertas, oxidadas y drenadas, con débiles rellenos limo-arcillosos procedentes de la zona alterada. Celeridades medias variables de 3,0 a 3,8 Km./s. y espesor suficientemente importante, en ciertas zonas, para convenir el estudio de un tratamiento de conjunto por inyecciones.

— Zona de roca compacta, prácticamente sana, de calidad geológica poco variable y de características geotécnicas bastante homogéneas. Celerida-

des medias entre 4,2 y 4,7 Km./s. Constituye un macizo rocoso de buena calidad para fundar una obra de hormigón.

Como características medias de deformabilidad se han obtenido las siguientes:

— Zona de roca decomprimida, cuyo espesor bajo los cimientos puede variar entre 2 y 25 m., antes del tratamiento.

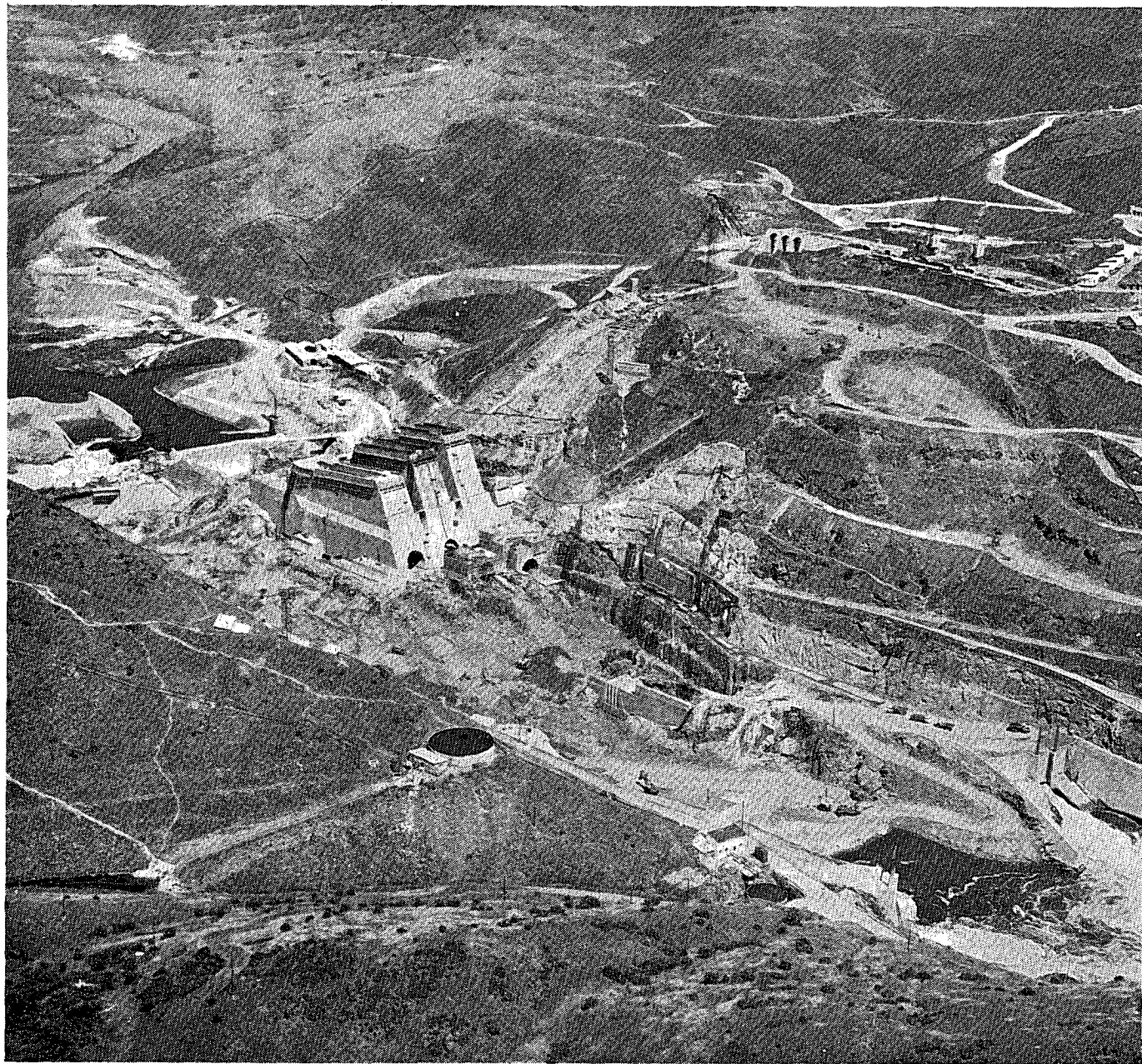


Foto 8.— Excavación de la central.
(Excavation of power station).

Antes del tratamiento.

| Según estratificación | | Normal |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| E | 150 T./cm. ² | 120 T./cm. ² |
| D | 90 T./cm. ² | 60 T./cm. ² |
| V | 0,29 T./cm. ² | 0,25 T./cm. ² |

Después del tratamiento.

| Según estratificación | | Normal |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| E | 250 T./cm. ² | 200 T./cm. ² |
| D | 120 T./cm. ² | 100 T./cm. ² |
| V | 0,26 T./cm. ² | 0,24 T./cm. ² |

E = Módulo elástico.
 D = Coeficiente de deformación.
 V = Coeficiente de Poisson.

— Roca profunda.

| Según estratificación | | Normal | |
|-----------------------|--------------------------|--------|---------------------|
| E | 350 T./cm. ² | 300 | T./cm. ² |
| D | 250 T./cm. ² | 220 | T./cm. ² |
| V | 0,26 T./cm. ² | 0,24 | T./cm. ² |

Las características intrínsecas mínimas encontradas son las siguientes:

Cohesión: $C = 4$ Kg./cm.²
 Angulo de rozamiento $\phi = 34^\circ$.

En resumen, el terreno de apoyo es una especie de "antigualla" geológica, que ha ido perdiendo en superficie—donde la decompresión es prácticamente total— parte de las buenas cualidades que, sin embargo, el macizo conserva intactas en profundidad, según han puesto de manifiesto, de forma irrefutable, los dos túncles para desvío provisional—posteriormente desagües profundos definitivos—, de 7,40 m. de diámetro.

IV. ACONDICIONAMIENTO PREVIO DEL CIMIENTO: "PRECONSOLIDACION".

Como consecuencia de los reconocimientos efectuados, se ha considerado conveniente efectuar, aparte del tratamiento clásico del terreno—consolidación y cosido, impermeabilización, drenaje, etc—, un acondicionamiento previo de la zona de roca que posteriormente va a ser afectada de modo más directo por el bulbo tensional de las cargas transmitidas al terreno por la estructura. Este procedimiento, que hemos dado en llamar "preconsolidación", tiene por objeto mejorar las condiciones de estabilidad y resistencia del terreno de cimentación, por medio del aumento de las características mecánicas de la roca.

El volumen de trabajo a realizar era enorme, y como, además, la garantía de lograr el objetivo deseado dependía fundamentalmente de la manera de hacerlo, se decidió efectuar antes un ensayo de preconsolidación previa, cuyas enseñanzas nos sirvieron para establecer la marcha a seguir en la preconsolidación general.

De la experiencia adquirida en dichos ensayos, realizados sobre un área de 45 x 33 m., se dedujeron las siguientes reglas, que se observaron durante la preconsolidación general:

1. De los taladros:

Distribución en planta: malla de 3,14 x 3,50 m.
 Extensión: 20 m. hacia aguas abajo de la presa;
 15 m. hacia aguas arriba de la presa.

Inclinación: 15° con la esquistosidad.
 Diámetro: no inferior a 2,5".

Salvo los taladros de la red de control, no interesa la extracción de testigos y sí el proceso de perforación que con mayor velocidad de ejecución permita unos desvíos mínimos.

2. Profundidad del tratamiento y longitud de las etapas.

La profundidad del tratamiento es variable según la zona de la presa. Oscila de 50 m. en la parte alta de la margen izquierda a 30 m. en el cauce, subiendo de nuevo hasta 40 m. en la zona alta de la margen derecha.

Realizado el techo de 7,50 m. de espesor por medio de una inyección a baja presión (2 Kg./cm.²) de lechada de dosificación 1 : 1 —zona que se elimina con la excavación definitiva de la presa— las tres primeras etapas de tratamiento tienen una profundidad de 5 m. En las siguientes, hasta alcanzar en cada roca la profundidad citada anteriormente, varían entre 5 y 8 m.

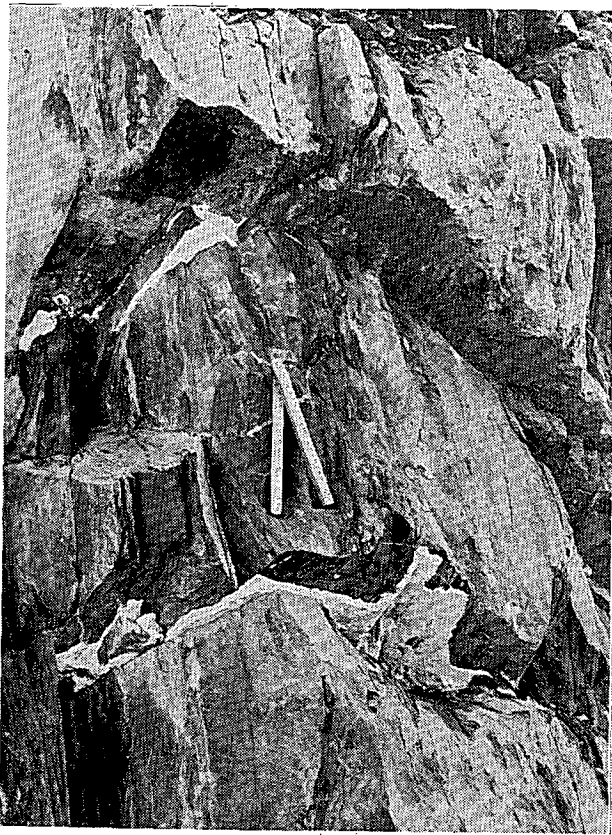


Foto 9. — Preconsolidación. Relleno de fracturas con lechada de cemento.
 (Preconsolidation. Filling of cracks with cement grouting).

El tratamiento se realizó por etapas descendentes efectuándose en cada una de ellas y en el orden que se citan

las siguientes operaciones: Perforación, lavado e inyección.

3. Operaciones a realizar en cada taladro.

Se perforan 7,50 m., se emboquilla y se inyecta el techo. Se reperfora antes del endurecimiento y se prolonga la perforación 5 m. Estamos ya en la 1.^a etapa. Se lava el taladro y se coloca un obturador a cota —7,50 m. y otro provisto de válvula en la boca del taladro. Se lava el primer recinto comprendido entre las cotas —7,50 m. y —12,50 m., introduciendo alternativamente agua y aire a presión. La expulsión del agua y aire inyectado con el material de relleno que este proceso permite arrastrar, se hace por los taladros próximos que han quedado abiertos. Cuando por ellos el contenido en arcilla del agua de purga resulte menos de 0,5 gr./l., se cierran y pasa a servir de taladro de purga el taladro por el que hemos inyectado agua y aire.

Una vez alcanzado el grado de lavado deseado para el grupo de taladros al que pertenece el de referencia, se hace la inyección de lechada en la 1.^a etapa con una presión máxima de 12 Kg./cm.² y con una lechada cuya concentración varía entre 1 : 4 y 1 : 1.

Terminado el fraguado se reperfora la zona inyectada y 5 m. más correspondientes a la 2.^a etapa. Después de un proceso análogo de lavado, se realiza la inyección de la 2.^a etapa con una presión de 15 Kg./cm.² La 3.^a etapa de inyección, realizada después de la 3.^a etapa de perforación y lavado, llega a 20 Kg./cm.², creciendo proporcionalmente en las siguientes etapas hasta 30 kilogramos/cm.².

4. Tratamiento de un grupo de taladros.

El grupo mínimo considerado es de 35 taladros, correspondiente a un rectángulo de 7 taladros en la dirección del eje de presa por 5 taladros en la dirección normal. Es decir, 7. filas de taladros paralelos a la máxima dimensión por 5 — mínimo — en la dirección normal.

El lavado se inicia inyectando agua y aire por las filas impares paralelas al eje de presa y abriendo sucesivamente los obturadores de boca de los taladros de las filas pares por los que sale agua cargada de arcilla. Aquellos en los que la cantidad de arcilla arrastrada sea inferior a 0,5 gr./l. pueden mantenerse cerrados. Cuando todos los taladros de las filas pares dan agua clara (inferior 0,5 gr./l) se pasan las bocas de inyección de agua y aire a los taladros de las filas pares y se repite una operación análoga a la descrita anteriormente, siendo los taladros de purga los de las filas impares.

El lavado se termina con otras dos sucesiones de ciclos, inyectando agua y aire en el primer ciclo por las

filas impares perpendiculares al eje de presa y en el 2.^o ciclo por las filas pares.

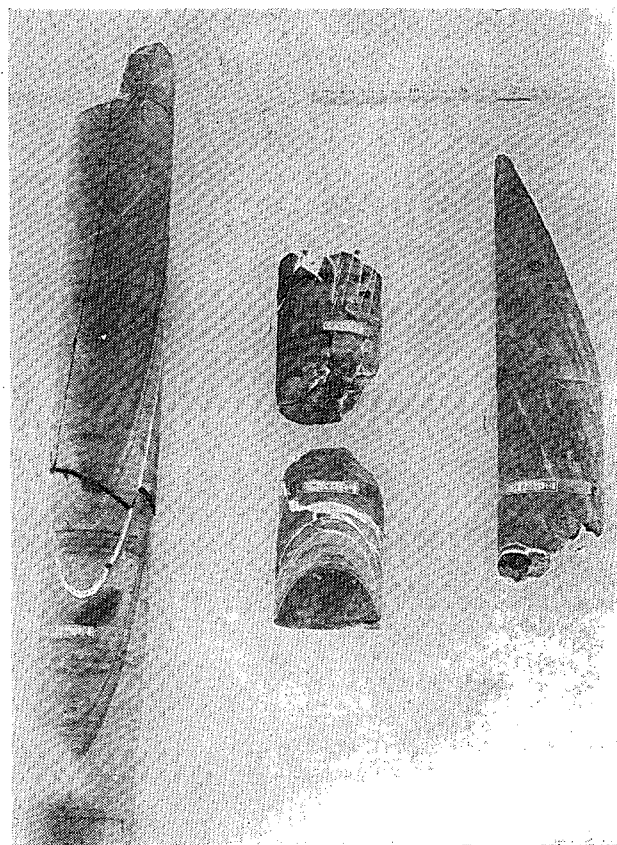


Foto 10. — Preconsolidación. Testigos de control realizados. (Preconsolidation. Control drill cores).

La inyección de cada etapa se realiza por taladros o filas de taladros paralelas al eje de presa, progresando de abajo arriba, y de aguas arriba hacia aguas abajo. No se inyecta ningún taladro que esté a menos de 20 m. de una zona en fase de lavado, cualquiera que sea la etapa que se esté realizando.

5. Resultados.

Las cifras que siguen dan idea del trabajo realizado.

| | | |
|--|-----------|-----------------------|
| Volumen total de roca tratada | 1 434 500 | m. ³ . |
| Metros lineales de perforación | 127 750 | m.l. |
| Cemento inyectado (sin contar relleno taladros) | 13 430 | Tm. |
| Tiempo total empleado en lavado. | 71 256 | horas. |
| Absorción por m.l. de taladro | 105 | Kg./m.l. |
| Absorción por m. ³ de roca tratado | 9,4 | Kg./m. ³ . |
| Ganancia en celeridad, transformada en módulo elástico | 20 al 35 | % |