

TORRE DE TOMA DEL CANAL DE EL ATAIZAR (*)

Por JOSE ROMAN SANCHEZ DE LA NIETA

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

En este artículo sobre la torre de toma del canal de El Atazar, que une el embalse del mismo nombre con la red de distribución del abastecimiento de agua a Madrid, se hace una sucinta exposición del proceso seguido para su emplazamiento, proyecto y construcción. La torre de toma construida tiene la particularidad de su sencillez, dentro de cumplir dos objetivos principales, aparte de su función propia: la facilidad de su construcción, dado la forma cilíndrica y la posibilidad de que se puede tomar siempre el agua de la zona que más convenga. Se comenta la cimentación de la torre, que en un talud con las características geológicas y geotécnicas del macizo rocoso de El Atazar presentaba muchos problemas, y se detallan las medidas adoptadas para mejorar las características resistentes y de deformabilidad del macizo. Con una breve descripción de la pasarela de acceso a la torre y del proceso de construcción, termina el artículo.

Antecedentes. Elección del emplazamiento.

El hiperembalse de El Atazar, situado en el Lozoya bajo y que toma el nombre de un pequeño pueblo próximo, consigue la regulación completa posible del río en este lugar.

Los caudales regulados por el embalse formado por la presa de El Atazar se conducen a Madrid a través del canal del mismo nombre, que, en su recorrido, tiene dos secciones: la primera, entre la torre de toma y la almenara de Torrelaguna, puesta en servicio en 31 de mayo de 1971 con agua del embalse de El Atazar, donde se une a la segunda sección, que enlaza Torrelaguna con la red de distribución en la plaza de Castilla, puesta en servicio con agua del Lozoya y Jarama en julio de 1966.

La toma de agua para este canal de El Atazar, que tiene lugar en el embalse mediante una torre formada por una estructura de hormigón de 83 m de altura y 9 m de diámetro, estaba enlazada en el primitivo proyecto con la coronación de la presa mediante una pasarela pretendida de 42 m de longitud, con el fin de obtener un agua que hubiera permanecido el mayor

tiempo posible embalsada, o sea, que hubiera sufrido los efectos de decantación y autodepuración que proporciona el embalse y, al mismo tiempo, facilitar su construcción al caer dentro de la acción de los medios de puesta del hormigón de la presa.

Posteriormente, fue preciso abandonar su primitivo emplazamiento debido a que al ser necesario ampliar las excavaciones del estribo derecho de la presa, la de la torre interferiría la zona afectada por el desagüe de medio fondo. Por ello la ubicación de la torre se desplazó paralelamente a la ladera a lo largo de una curva de nivel, buscando el acceso a aquella mediante una pasarela desde un camino a la cota de coronación de la presa.

Examinadas las condiciones geotécnicas del terreno en este nuevo emplazamiento mediante un estudio geosísmico del mismo, en las dos soluciones que se presentaban a distancias, respectivamente, de la coronación de la presa de 140 y 270 m, así como la morfología exterior de la ladera, se decidió elegir la solución más alejada principalmente por estar situada en un macizo distinto del afectado por la excavación del desagüe de medio fondo, separado de esta zona por una vaguada.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de enero de 1974.

Las características geológicas y geotécnicas del emplazamiento, elegido según los datos suministrados por los informes del "Estudio geotécnico de la roca de cimentación de la torre de toma de El Atazar", realizados por la Sociedad de Reconocimientos Geofísicos, ya citados, se resumen a continuación:

1. Disposición estructural del macizo.

Macizo formado por pizarras silíceas, de buena calidad geotécnica, pero muy fisuradas, dispuestas en apretados pliegues que forman una estructura isoclinal de orientación general Norte-Sur.

La orientación de la esquistosidad se mantiene entre N-5° y N-10° W. con buzamiento 70-75° al Este.

2. Sistemas principales de fisuras.

D₁: Dirección N-90-100° E., buzamiento 55-65° N.

D₂: Dirección N-90-100° E., buzamiento 45-60° S. N-40° E., subvertical.

3. Estado de alteración y de compresión de la roca.

Las medidas sísmicas definen:

- 1.º Capa superficial de 5 a 8 m de espesor, inadecuada para soportar obras permanentes sometidas a ciclos de sumersión y emersión. Celeridad de 1,0 a 1,4 Km/segundo.
- 2.º Capa decomprimida hasta 20 m de profundidad. Celeridad de 2,0 a 2,5 Km/segundo.
- 3.º Fondo comprimido. Celeridad 4 Km/segundo.

4. Deformabilidad de la roca de cimentación.

	E_0 Tm/cm ²	E_1 Tm/cm ²	D Tm/cm ²
1. Capa superficial	—	—	—
2. Capa decomprimida.	120	85	40
3. Fondo comprimido ...	300	210	120

E_0 = módulo de elasticidad dinámico.

E_1 = módulo de elasticidad estático.

D = coeficiente de deformación previsible.

Coeficiente de deformación media para los asientos de la fundación:

$$D = 35 \text{ a } 40 \text{ Tm/cm}^2.$$

5. Características resistentes.

Para el macizo rocoso, suponiendo que las zonas decomprimidas han sido tratadas con inyecciones y que la colocación de tirantes compense la falta de cohesión de la zona débil superficial, se puede tomar:

Angulo de rozamiento inter. $\varphi = 38^\circ$

Cohesión mínima media ... $C = 2 \text{ Kg/cm}^2$

Dichos datos fueron completados con ensayos geotécnicos de laboratorio para estudiar las características resistentes en las superficies de deslizamiento, que se confiaron a la empresa Geotecnia y Cimientos, S. A.

Se obtuvo la clasificación Casagrande de los materiales de relleno y se realizaron ensayos de compresión simple, triaxiales y edométricos.

También se realizó, por mediación del Laboratorio de Análisis de Agua del Canal de Isabel II, un detenido estudio de las aguas subterráneas existentes en las inmediaciones del emplazamiento de la torre, comprobándose su agresividad.

Descripción de la torre de toma. Comprobación de su estabilidad.

La toma del canal de El Atazar consiste en una torre cilíndrica de hormigón armado, con tres tomas selectivas a distintas alturas para efectuar la misma del agua de mejor calidad, de acuerdo con la variación estacional, térmica, la eutrofización del embalse, etc.

Las características que definen la instalación de toma, tanto geométricas, mecánicas y de accionamiento, son las siguientes:

Cota de la cubierta de la torre.	884,150.
Cota nivel máximo embalse	872,000
Cota nivel solera galería	801,594
Altura total de la torre	82,556 m.
Altura sumergida con máximo embalse	70,406 m.
Diámetro exterior	9,00 m.
Diámetro interior	7,00 m.
Número de niveles de toma	3.
Cota del nivel superior	858,835.
Cota del nivel intermedio	834,635.
Cota del nivel inferior	810,635.
Número de compuertas por nivel.	1.

Tipo de compuerta	Circular, con cierre estanco.
Clase de estructura de la compuerta	Metálica.
Diámetro de la compuerta	5 m.
Altura de la compuerta	1 m.
Suspensión	Vástagos de acero inoxidable.
Número de puntos de suspensión por compuerta	3.
Mecanismo de accionamiento	Husillos roscados de acero inoxidable, cabezales de suspensión, reductor central y reductores de accionamiento manual.
Tipo de accionamiento	Eléctrico y manual.
Desembalse máximo de la galería de presión	16 m ³ /seg.
Desembalse máximo por toma selectiva	16 m ³ /seg.
Sistema de rejilla	Poligonal.
Velocidad del agua en la rejilla	0,63 m/seg.
Velocidad del agua en la compuerta	1 m/seg.
Cierre estanco de la galería de presión	Compuerta-vagón.
Dimensiones compuerta-vagón	2,5 x 3,4 m ² .
Sistema de accionamiento de la compuerta-vagón	Crick de aceite.
Suspensión de la compuerta-vagón	Vástagos acero inoxidable.
Cierre de la compuerta-vagón	Sin presiones equilibradas, con nivel máximo de agua en el embalse.

La estabilidad de la torre de toma se ha estudiado teniendo en cuenta las siguientes acciones:

Embalse vacío.

1. Acción del viento sobre la torre.
2. Acción del viento sobre la pasarela.
3. Esfuerzos sísmicos horizontales.
4. Peso propio.
5. Peso de mecanismos, compuertas y pasarela.

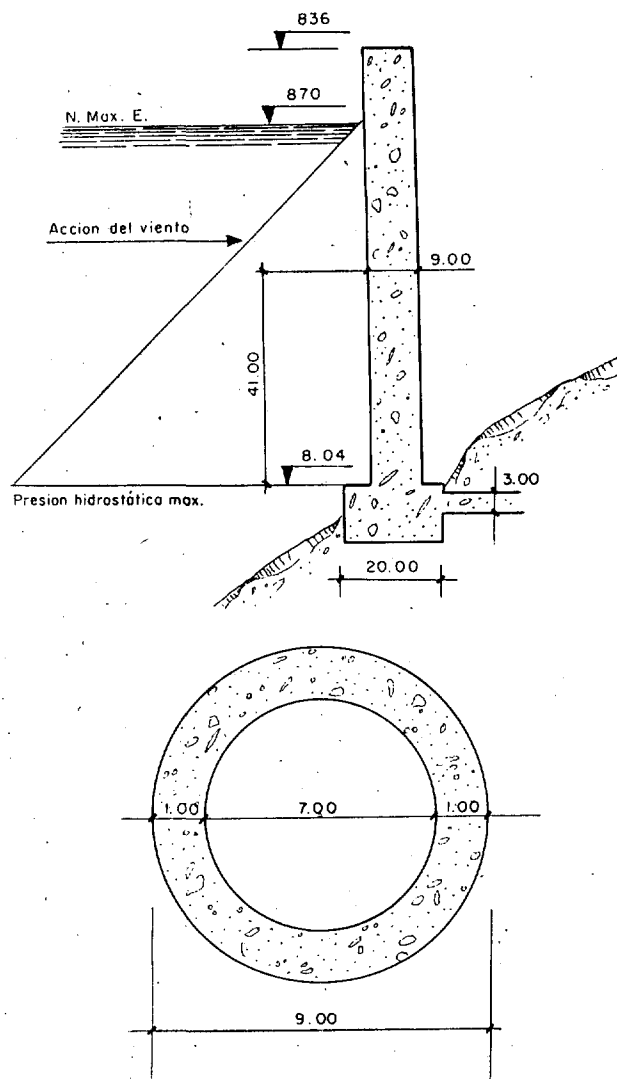


Fig. 1. — Estabilidad de la torre de toma.

Embalse lleno.

1. Presión hidrostática con las compuertas anulares cerradas.

Como resulta en ambos casos que se está siempre en compresión, la torre se arma con la cuantía mínima, es decir, el 8 por 100 de la sección resistente.

Situación de las tomas selectivas. Compuertas de toma y de aislamiento de la galería.

Las tomas selectivas, en número de 3, se han situado de acuerdo con la previsible estratificación estacional del agua embalsada. La

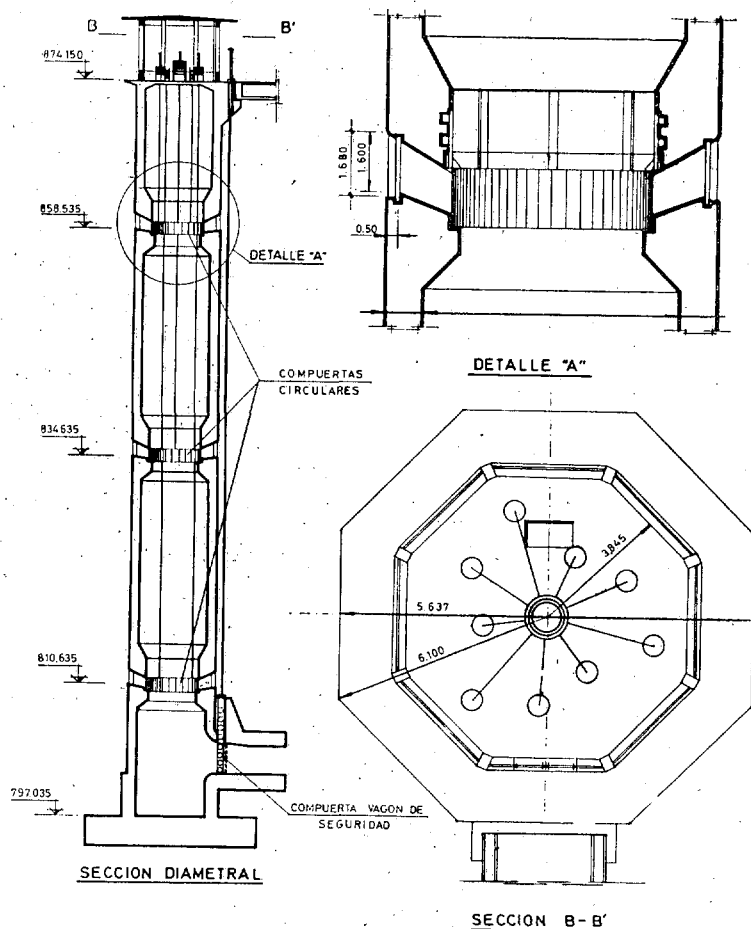


Fig. 2. — Sistema de cierre de la torre de toma del canal de El Atazar.

toma se realiza a través de una rejilla circunferencial que permite el acceso del agua a través de todo el perímetro de la torre de toma, donde, mediante los oportunos abocinamientos, se dimensiona la altura de la compuerta metálica circular en 1 m y el diámetro en 5 m, con lo que se aligera notablemente la misma, con la repercusión no sólo económica en la compuerta propiamente dicha y también en el mecanismo de elevación, sino en conseguir una mecanización más precisa logrando un mejor ajuste y, por tanto, un cierre más perfecto que garantice la estanqueidad lo más posible, muy difícil de lograr con compuertas de mayor diámetro y altura.

El sistema de maniobra consiste en un mecanismo central y tres grupos de husillos y sus vástagos correspondientes en acero inoxidable,

dispuestos de modo que cada tres de ellos sostienen una compuerta por tres puntos, según los vértices de un triángulo equilátero (situados a 120°). Cada sistema de tres vástagos está girado, en relación a los otros dos, 40° .

Con el fin de poder dejar en seco la galería de presión en caso de producirse una avería, o simplemente para su revisión periódica aun con embalse lleno, se coloca a la salida de la torre una compuerta-vagón de seguridad de 2,5 m de luz por 3,4 m de altura, con accionamiento eléctrico y a mano por crick de aceite a presión y vástagos de suspensión en acero inoxidable, efectuándose el cierre de la compuerta también de forma que quede estanca, en caso de necesidad, la parte central de la torre, aun con nivel máximo de agua en el embalse.

Estabilidad de la ladera por encima y por debajo de la cimentación de la torre. Cálculo de la cimentación. Disposiciones para asegurar la estabilidad de la ladera.

Decidido el emplazamiento, se estudió la cimentación de la torre de toma que, en un talud con las características geológicas y geotécnicas del macizo rocoso de la presa de El Atazar, presentaba una serie de problemas enlazados entre sí que fue preciso analizar separadamente. Estos problemas se resumen como sigue:

- Definición de la morfología de la cimentación.
- Estabilidad de la cimentación propiamente dicha.
- Estabilidad de las laderas.
- Cálculo de la estructura de la cimentación.

Estos problemas, a su vez, estaban íntimamente ligados con:

- El proceso de ejecución de las excavaciones.
- Los tratamientos del terreno mediante anclajes, inyecciones y drenajes.

Morfología de la cimentación.

La cimentación de la torre está constituida por una losa de 18 m de diámetro y de 2,50 m de espesor, separada unos 6 m del borde del talud.

Para el coeficiente de balasto se admite un valor medio de 285 Kg/cm^3 . Las solicitaciones fueron descompuestas en dos estados simétricos y entimétricos. La carga máxima sobre el terreno es de 16 Tm/m^2 .

Para mejorar las características resistentes y de deformabilidad del macizo rocoso de la cimentación, se han realizado un conjunto de tratamientos del terreno que consisten en:

1.º La ejecución de seis (6) anillos concéntricos de sondeos, separados 1,50 m entre sí y con una separación entre taladros de cada círculo de 1,50 m. Dichos taladros, con una profundidad final de 18 m, han sido inyectados con una presión de 1 Kg/cm^2 , en los nueve primeros metros, y con una presión de 2 Kg/cm^2 , en una segunda fase, reperforando los 9 m an-

teriores y llegando hasta los 18 m. La primera fase se hizo con la torre a media altura, y la segunda, con la torre y los anclajes de 200 Tm, que luego se detallan, terminados.

Las lechadas de inyección se elaboraron en mezcladoras de alta turbulencia, de modo que fueran coloidales para obtener un alto grado de penetrabilidad y colmatar las fisuras, formando un terreno consolidado e impermeable para la cimentación de la torre.

El análisis y estudio del resto de los problemas condujeron a la serie de trabajos y operaciones siguientes:

a) Una excavación de 2 a 3 m de profundidad paralelamente a la ladera y en toda la zona que afecta a la torre, eliminando la roca decomprimida, evitando posteriores desprendimientos y dejando preparado el terreno para los tratamientos convenientes del macizo.

b) Una excavación de profundidad de unos 20 m con un talud 1/2 que permitió poder ejecutar la cimentación y alojar la torre.

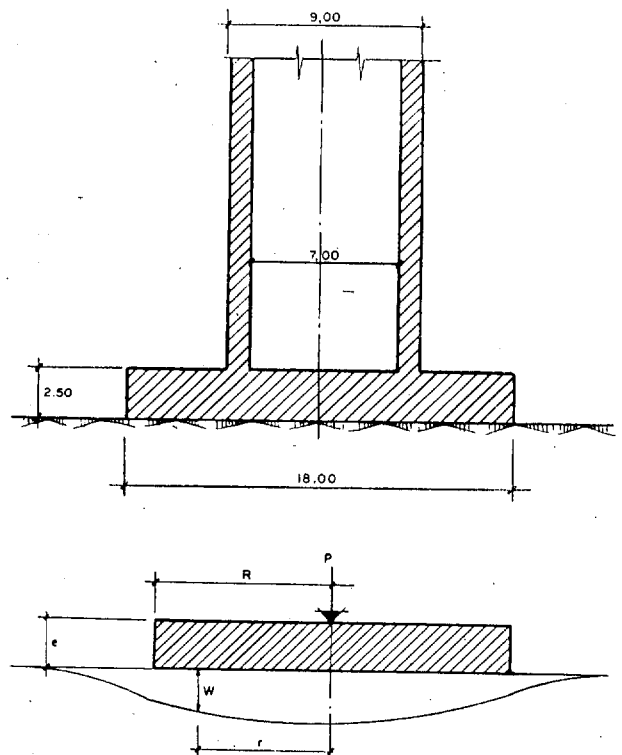


Fig. 4. — Esquema de la cimentación y de las deformaciones del suelo.

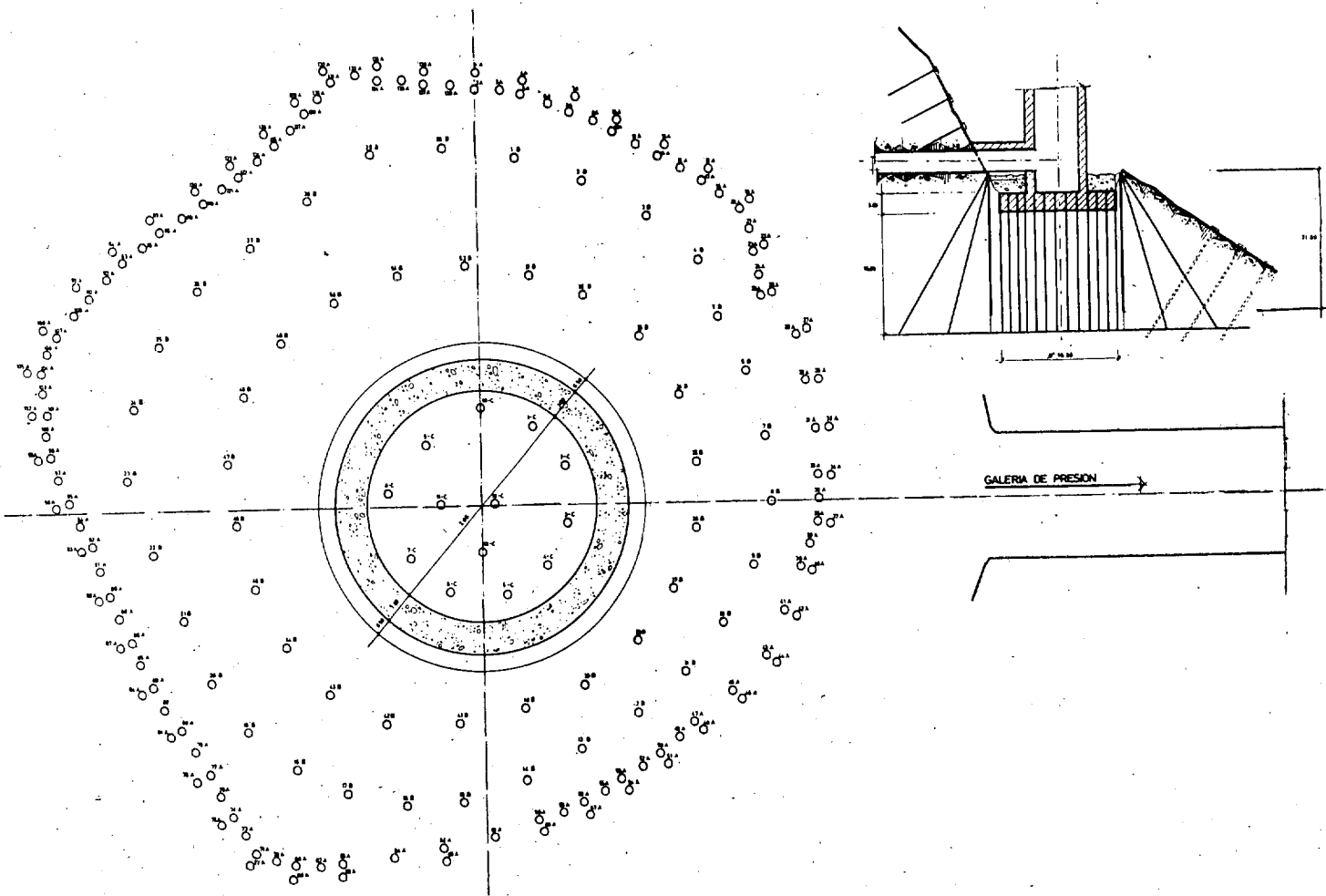


Fig. 5. — Planta de inyecciones en la cimentación de la torre.

c) La sujeción de los bloques producidos por las diaclasas, para evitar desprendimientos peligrosos, mediante bulones con cabeza de expansión inyectados de 19 mm de diámetro y 8 m de profundidad.

d) La introducción de una compresión exterior virtualmente uniforme de $2,50 \text{ Tm/m}^2$, en la zona de talud pronunciado, a fin no sólo de estabilizar la ladera durante el período de construcción, sino también para resistir las acciones del agua intersticial sobre aquella en un desembalse rápido.

Se introduce dicha compresión mediante pernos de anclaje de 6 Tm de capacidad, de 12 m de longitud y 19 mm de diámetro, distribuidos en una malla de $2 \times 1 \text{ m}$ y encepados

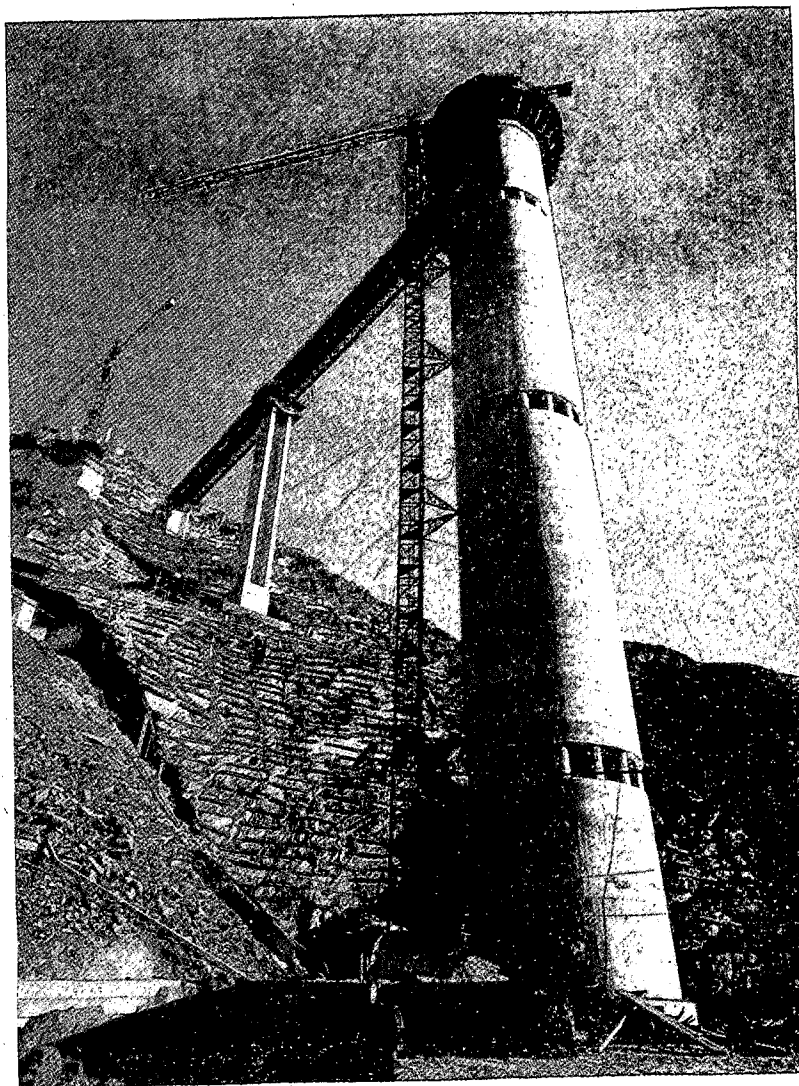
por sus cabezas mediante vigas de perfil laminado en U.

e) La introducción de una compresión exterior, virtualmente uniforme, de $1,25 \text{ Tm/m}^2$ en la zona comprendida entre la anterior y la cota de acceso a la pasarela, una vez limpiada del material suelto.

Se introduce la compresión mediante pernos de anclaje de 6 Tm de capacidad, de 12 m de profundidad y 19 mm de diámetro, distribuido en una malla de $2 \times 2 \text{ m}$ y encepados por sus cabezas mediante vigas de perfil laminado en U.

El fin de esta compresión exterior es dar al terreno un mayor coeficiente de seguridad frente a los efectos del desembalse rápido ya mencionados.

Fig. 8. — Anclajes en la ladera. Torre de toma. Cimbrado. Pasarela de acceso. Encofrado deslizante. Sistema de construcción de la torre.



f) Anclar la ladera por debajo de la torre de toma en un ancho de 31,70 m, llegando con los anclajes hasta el cauce, cubriendo una longitud de 51,70 m.

Se colocaron 118 anclajes con una capacidad para cada uno de 200 Tm, dispuestos con una inclinación de 30° por debajo de la horizontal.

Los anclajes han sido protegidos mediante tubos P.V.C. ante la agresividad de los terrenos y aguas circulantes, y en la ejecución de las cabezas interiores y en las inyecciones de cierre y protección se han empleado cementos puzolánicos.

Mediante un ensayo *in situ* de modelo reducido del anclaje fue definida la longitud de la

cabeza interior, llegándose a la conclusión de que podía utilizarse una tensión de adherencia entre lechada y roca de 6 Kg/cm^2 .

Las cabezas exteriores de los anclajes van alojadas en un retículo de vigas longitudinales y transversales (según la línea de máxima pendiente) de hormigón armado, cuyo objeto principal es absorber y repartir convenientemente los esfuerzos de los anclajes, constituyendo por sí mismas, por su disposición, un elemento estabilizador.

Con este conjunto de vigas y el efecto de los anclajes consigue un reparto de compresiones en el terreno con un total de 23.600 Tm, que equivale a una presión de $14,2 \text{ Tm/m}^2$.

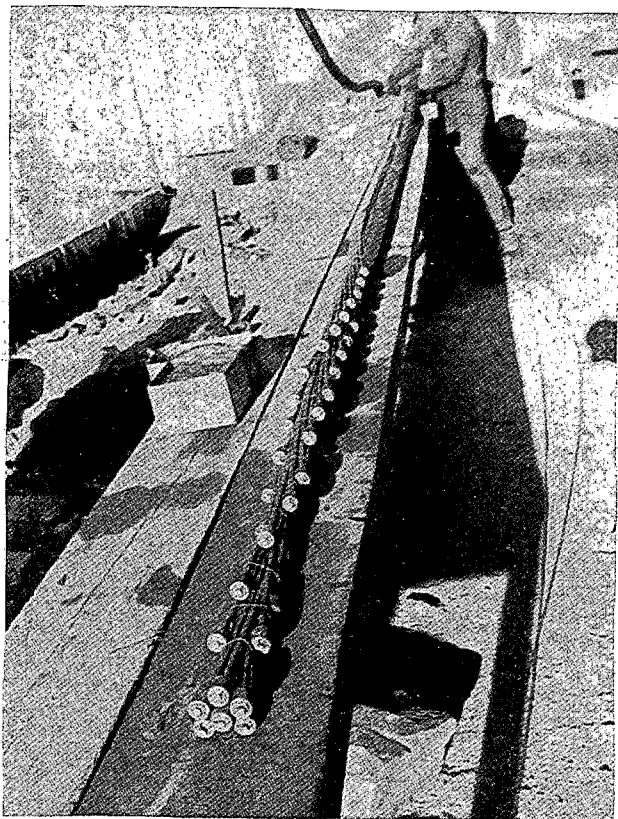


Fig. 9. — Presentación de un anclaje de 200 Tm.

La profundidad de los anclajes (30 a 36 m) quedó definida por el estudio geosísmico y la inspección del propio túnel en su boca de entrada, estableciendo dos dimensiones distintas de la longitud libre de dos anclajes contiguos (20 y 25 m alternativamente) con el fin de separar lo más posible los bulbos de tensión.

g) Como complemento de todos los elementos de estabilización anteriormente descritos, se ha utilizado un recubrimiento de toda la zona afectada por los bulones situados en la ladera sobre la torre de toma y de los rectángulos formados por la retícula de hormigón armado de los anclajes, constituido por gunita en capas de 5 cm de espesor, armada con malla metálica.

Se han colocado drenes perforados en el terreno, dotados de tubería filtrante de material plástico.

El gunitado y el sistema de drenes evitará la alteración de la superficie formada por roca meteorizada y descompuesta, canalizando además a través de los drenes los movimientos de agua que necesariamente han de producirse, como consecuencia de las variaciones de nivel del embalse.

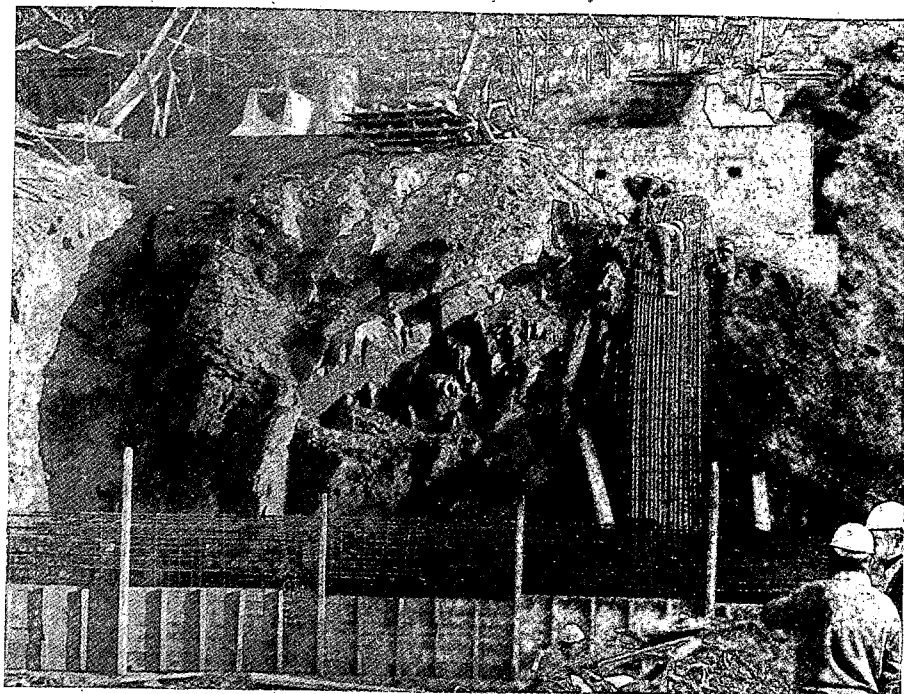


Fig. 10. — Colocación de la armadura de una viga transversal de la retícula de reparto de los esfuerzos de los anclajes.

Sistema constructivo de la torre de toma.

La construcción de la torre se ha llevado a cabo mediante dos grúas Pingon-26, una de ellas de 104 m de altura debidamente anclada a la propia torre, a medida que ésta iba creciendo. La grúa de menos altura fue indispensable para el traslado de materiales desde la cota 874 a la cota 801 de la plataforma de cimentación de la torre, al no existir camino de acceso a la base de la torre. La zapata de cimentación cúbica, 763 m³ de hormigón, donde van alojados 121.000 Kg de acero.

El ritmo de crecimiento de la torre fue de 3 m l/día, alcanzándose máximos de 5 m l/día,

lo que representa haber colocado 75 m³/día como media con puntas de 125 m³/día.

El encofrado deslizante utilizado, con molde de 1,25 m l de generatriz, disponía de 16 gatos hidráulicos de accionamiento manual, llevaba incorporado un andamio inferior desde donde se efectuaban los retoques y repasos de la superficie recién desencofrada.

La ejecución de las ménsulas en la pared interior de la torre, a la altura de las compuertas para instalación de éstas, representó serias dificultades al carecer de andamios, por lo que fue preciso la instalación de robustas plataformas sobre estructura metálica.

Las fotografías de la torre en construcción son lo suficientemente expresivas del sistema.

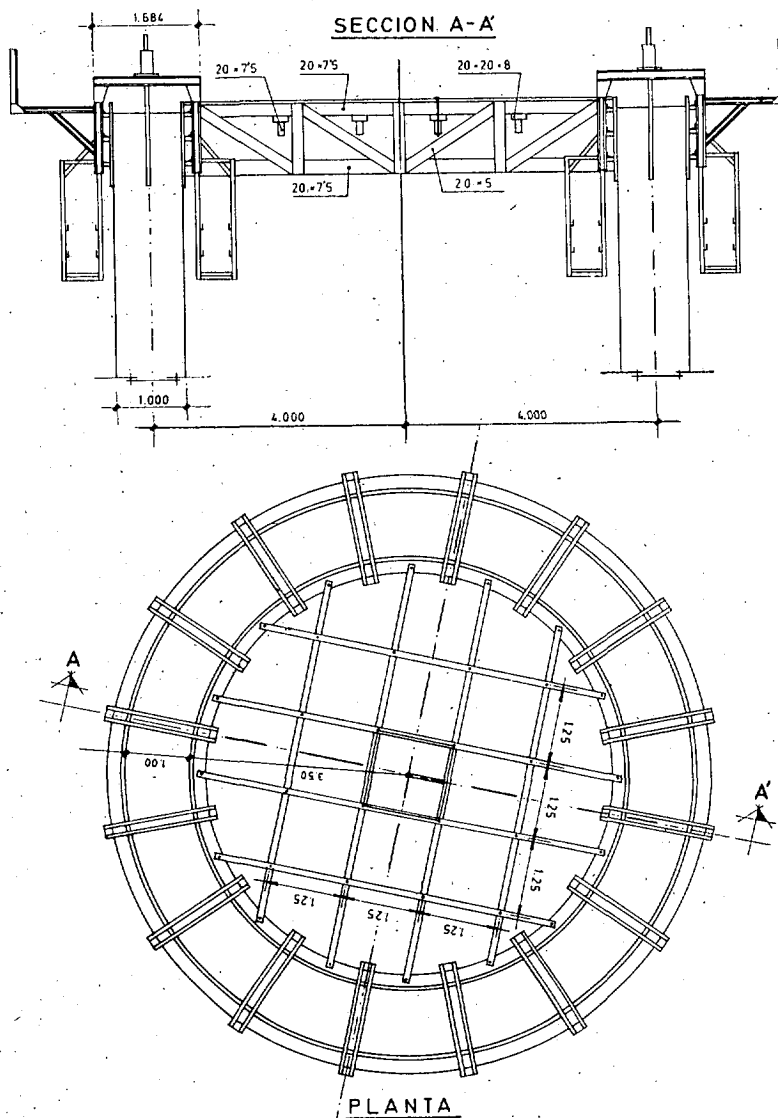


Fig. 11. — Esquema del encofrado deslizante.

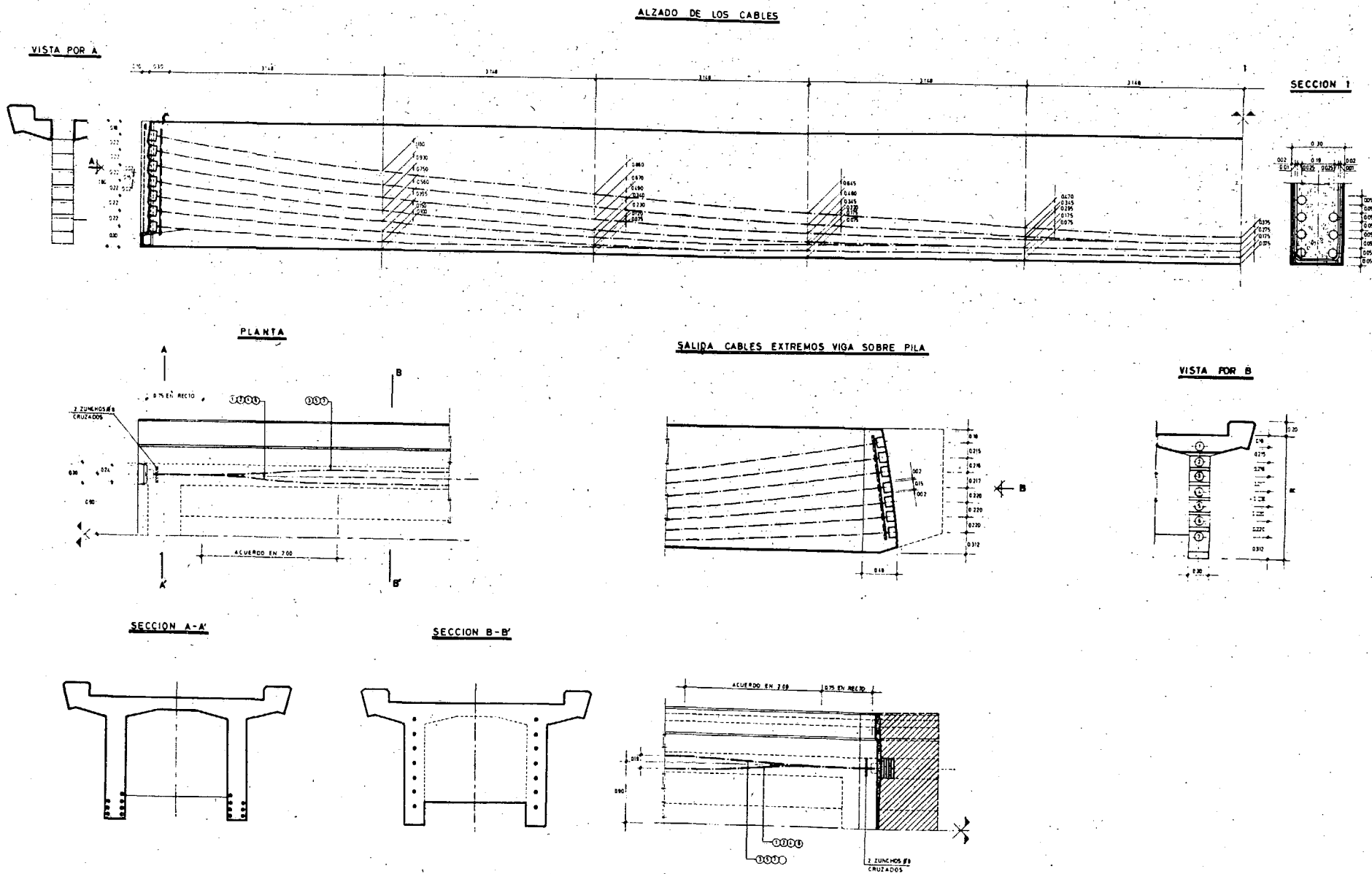


Fig. 12. — Formas y armaduras de la pasarela de acceso de hormigón pretensado.

Pasarela de unión de la torre con el camino de acceso desde las instalaciones de la presa.

Para acceder desde la cota de coronación de la presa a la torre de toma se ha construido una pasarela de hormigón pretensado, cuyas características se detallan a continuación:

Longitud	67,23 m.
Luz primer vano	32,63 m.
Luz segundo vano	34,60 m.
Canto	1,30 m.
Ancho total	3,40 m.
Ancho de calzada	2,60 m.
Sección	En TT.

Altura de la pila	44,00 m.
Sección de la pila	Doble T.
Hormigón en pila	195 m ³ .
Acero empleado	40 Tm - REA 46.
Hormigón pretensado en vigas	150 m ³ .
Acero especial pretensado	4.700 Kg (14 cables ϕ 8 mm).
Sustentación	Cimbras Roglá.

La pasarela fue construida por procedimientos Freyssinet, y sustentada mediante dos cimbras dobles Roglá con un total de 84 pirámides.

La pila de 38 m fue hormigonada, como la torre, con un molde deslizante, y su ejecución duró doce días.

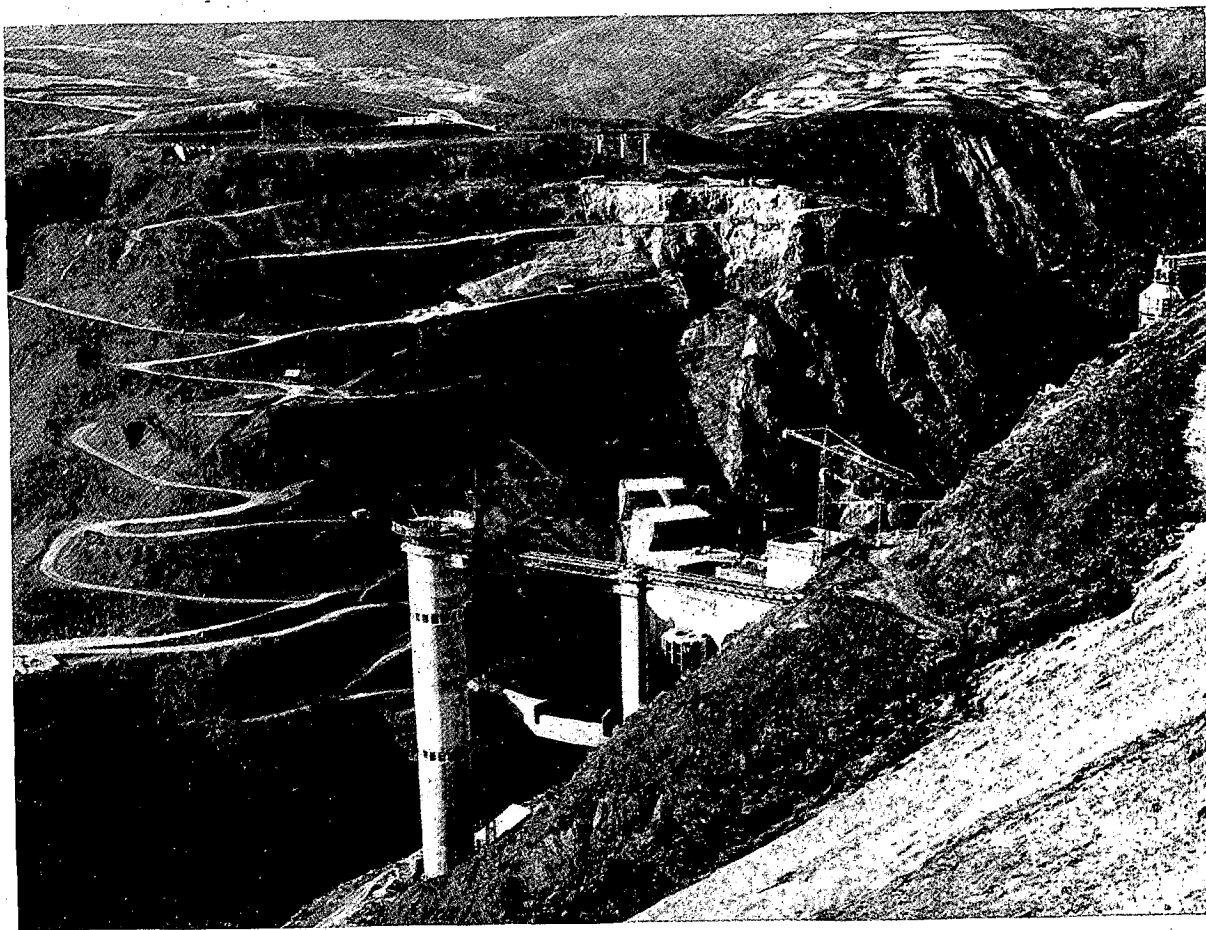


Fig. 13. — Cimbrado de la pasarela de acceso. Construcción de la torre y pila intermedia.