

ENCAJE DE PRESAS BOVEDA EN CERRADAS ASIMETRICAS

Ing. C. C. P. R. LOPEZ

Ing. C. C. P. E. GIMENEZ

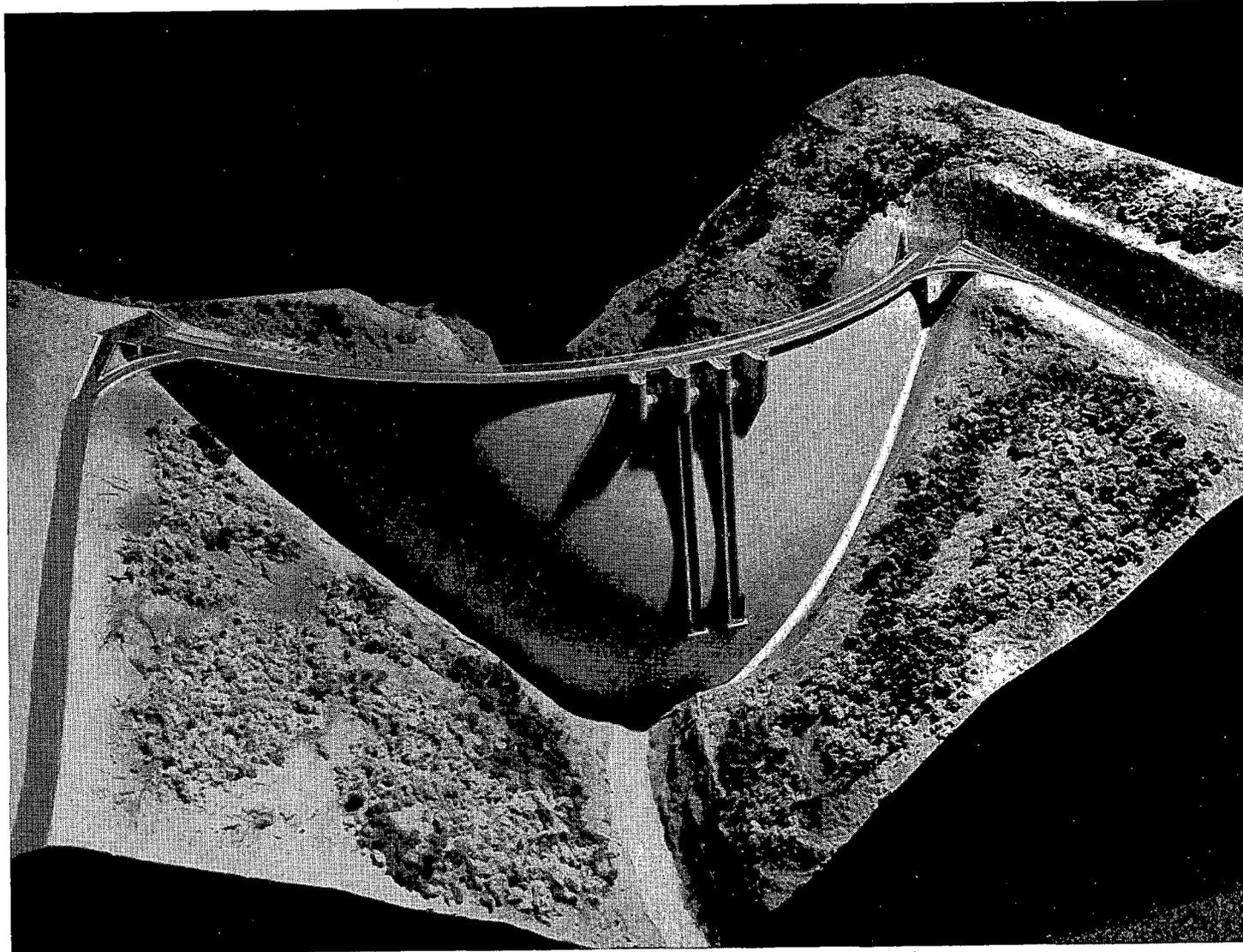
1. INTRODUCCION

Hace tiempo, la asimetría de la cerrada se consideraba, a veces, como un escollo considerable, para proyectar un cierre con presa bóveda.

Pensamos que la razón de esta repulsión radicaba en la complejidad operatoria —de cálculo tensional— que acarrearía la adopción de estructuras no perfectamente simétricas. Hoy en día, con los ordenadores electrónicos, se ha superado este problema, y el proyectista, puede en

8

Fig. 1. — Presa de Casares. (Casares Dam.)



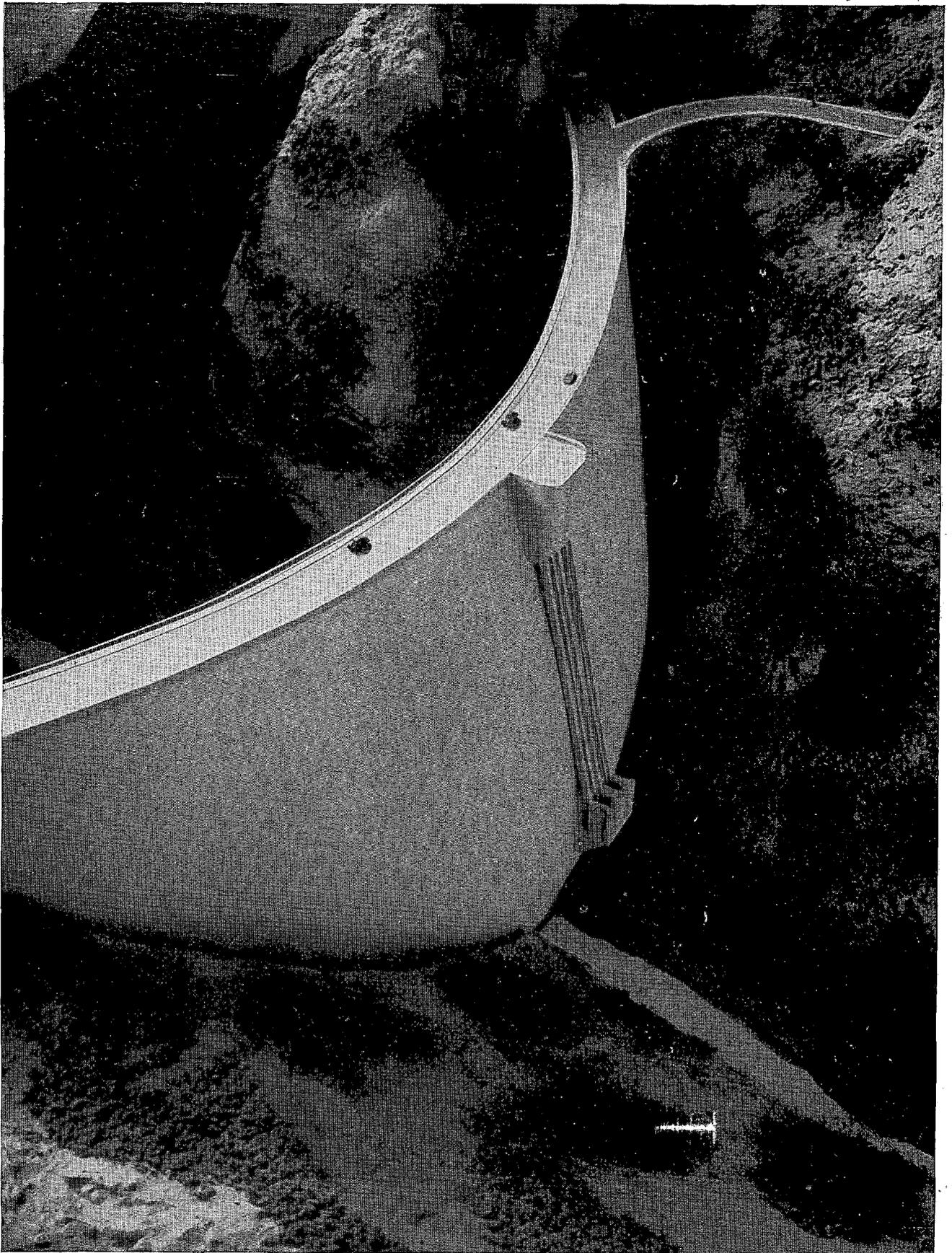


Fig. 2. — Presa de Torio.
(Torio Dam.)

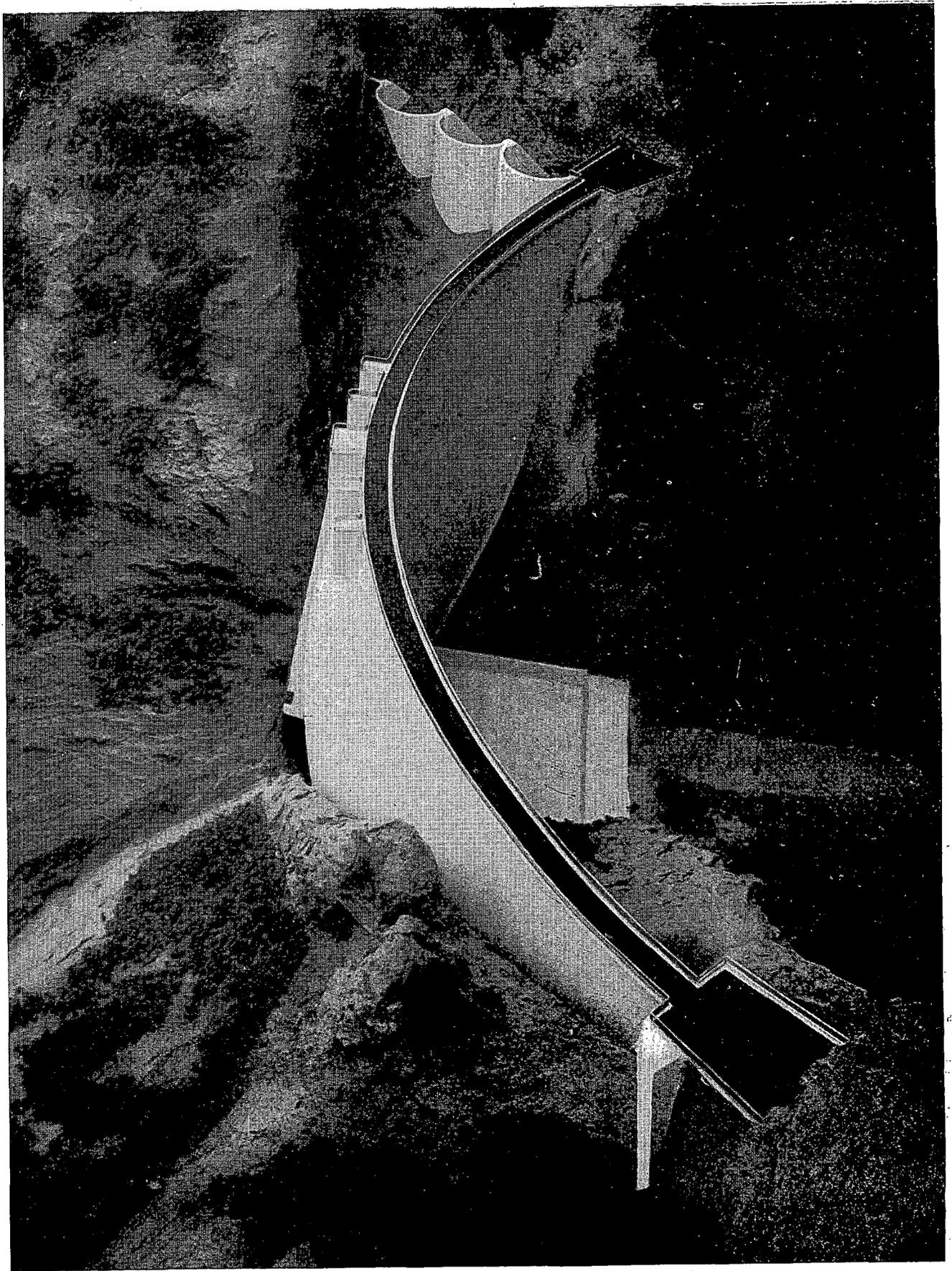


Fig. 3. — Presa de Beberino.
(Beberino Dam.)

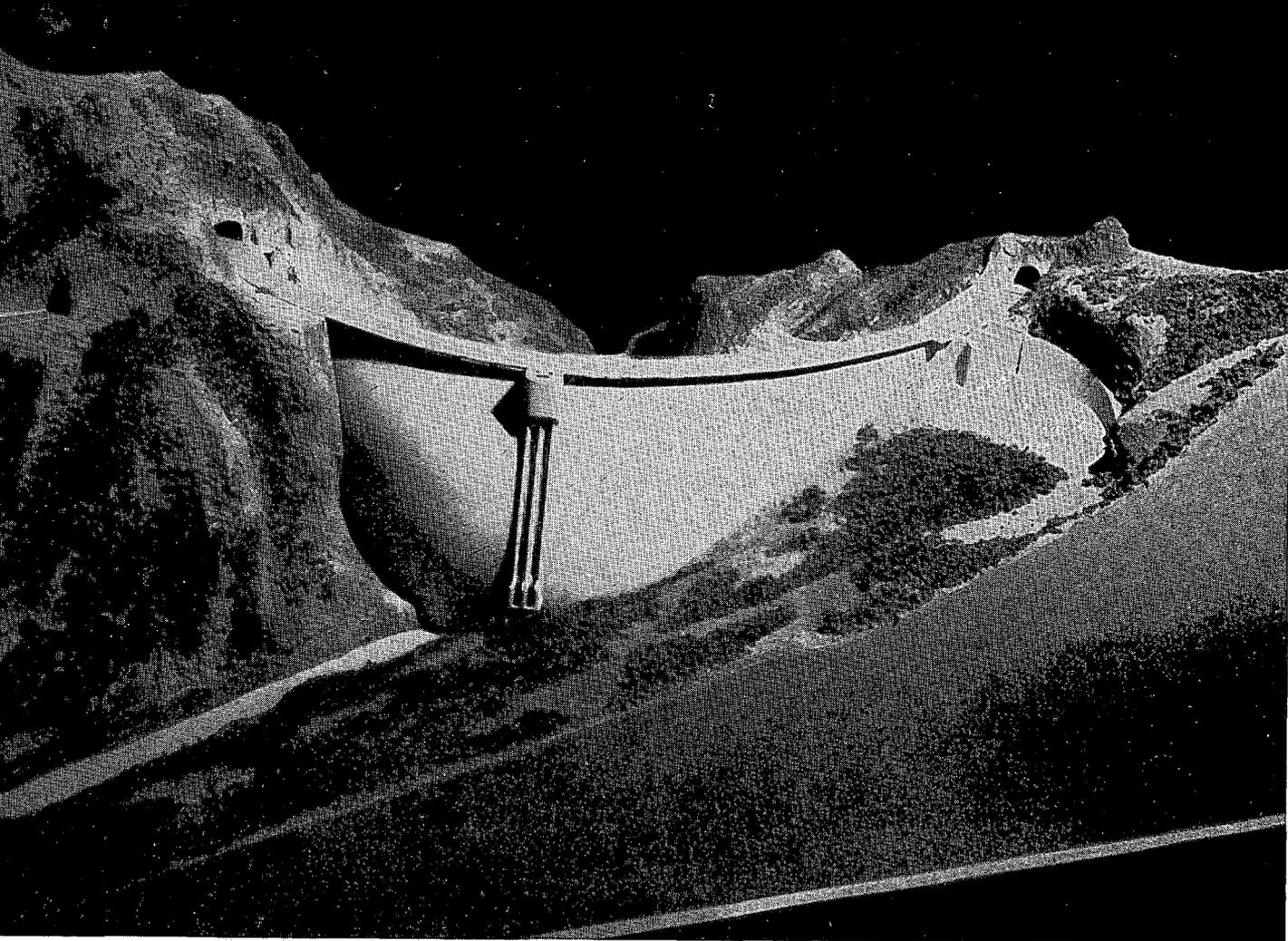
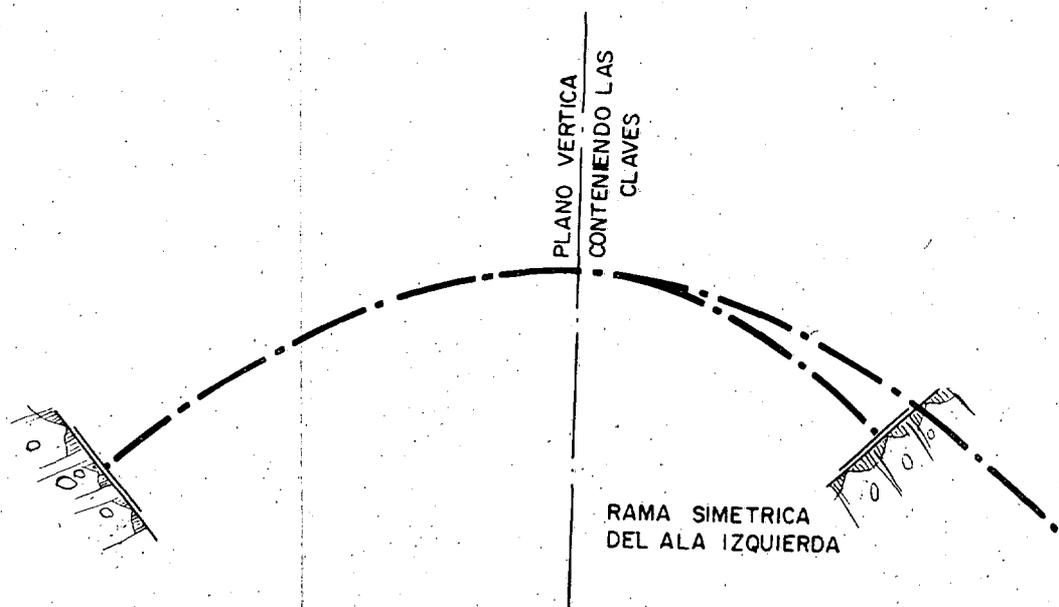


Fig. 4.—Presa de Riaño.
(Riaño Dam.)

Figura 5.



pocos días, obtener el resultado tensional de formas más complicadas que las convencionales, y confrontar los resultados de varias soluciones.

La complejidad a que antes aludíamos era la causa, pensamos, de que de forma sistemática, se proyectase un zócalo o "pulvino" de hormigón para convertir, artificialmente, la cerrada en simétrica, y se desechase la solución de encajar una bóveda, cuando la excavación y hormigón necesario, para adaptar la cerrada a una bóveda simétrica, eran prohibitivos.

No obstante, a pesar de la facilidad que —como decíamos— ofrece el poder programar los cálculos estructurales para ordenadores electrónicos, sigue como "la inercia" de convertir la cerrada en simétrica, para poder proyectar una bóveda simétrica sin que a nuestro entender exista razón de proceder así, sistemáticamente, siendo sólo casos especiales los que podrían requerir esta práctica.

Lo acabado de decir, no va en contra de proyectar un zócalo, geoméricamente más o menos regular —adaptán-

dose al *perímetro del contacto presa terreno*— ensanchando hacia aguas abajo de forma que centre la resultante de la acción del arco. Esta circunstancia, junto con el ensanchamiento de la franja de contacto, confluyen a aminorar las máximas tensiones que debe soportar la roca de fundación, lográndose también —y esto es lo más importante— un empotramiento que interesa mayor masa de roca para resistir los esfuerzos transmitidos por la estructura.

En el artículo que publicamos —en agosto de 1967— en el número especial de la Revista de Obras Públicas, editado con motivo del IX Congreso de Grandes Presas, decíamos:

"Muy rara vez, la asimetría topográfica, impide el proyectar una presa bóveda delgada, cuando las características geomecánicas de la fundación son satisfactorias".

Nos proponemos —en el presente artículo— desarrollar, brevemente, este aserto, acompañándole de ilustraciones gráficas de proyectos y obras nuestras.

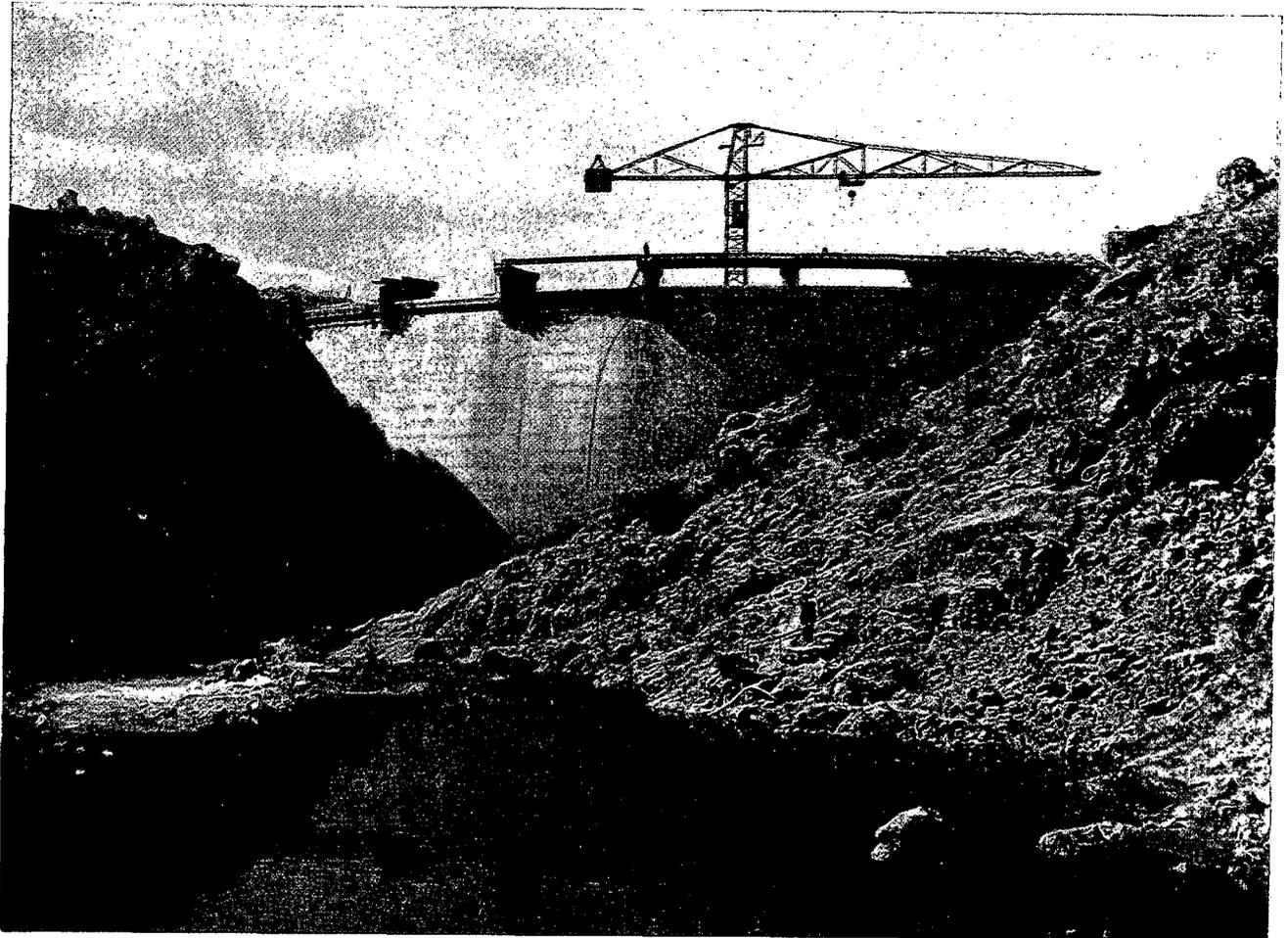


Figura 6.

2. ENCAJE DE LA ESTRUCTURA

2.0. Vamos a exponer los recursos que ofrece la técnica actual, y la forma de utilizarlos a manera que la asimetría de la cerrada va aumentando, ilustrando la exposición con algunos casos concretos.

Advirtamos, que al hablar de la forma más o menos asimétrica de la cerrada, nos referimos a la cerrada que queda una vez efectuadas las excavaciones, y desprovista, por tanto, aquélla, de la roca no apta para la fundación y excluimos —naturalmente— las imposiciones que pudieran prevenir de la forma de estratificación, familias de diaclasas, accidentes notables, que pueden influir de forma importante en el diseño de la estructura, pero que efectúan, tanto a cerradas simétricas, como asimétricas, y que en cualquier caso deberán ser objeto de un estudio específico.

2.1. Presas con definición geométrica y contorno asimétrico.

En caso de cerradas con poco o no mucha asimetría basta, en general, elegir una definición geométrica adecuada a las características de la cerrada (forma en V o U, orientación de los planos de discontinuidad, características mecánicas de la roca de fundación, etc.) y continuar las alas de la presa hasta su intersección con el terreno. Puede o no proyectarse un zócalo adaptándose a esta intersección, y en el primer caso cabe dar a éste forma de curva sin puntos angulosos, o hacer una unión hormigón-roca escalonada. Nosotros en particular —por las razones que hemos indicado en el apartado 1— preferimos proyectar zócalo de unión, y definirle de una forma geométrica.

Con cualquiera de estas modalidades se evita el "pulvino" o superficie simétrica de donde arranca la bóveda, lo cual supone una considerable complicación constructiva en el arranque de las ménsulas.

Casos como éste son las presas bóvedas de Casares, Torio y Beberino (bóvedas de 51, 105 y 78 metros de altura respectivamente) y cuyas formas pueden apreciarse en las figuras 1, 2 y 3.

Aun en cerradas notablemente asimétricas puede llegarse con esta solución a un encaje satisfactorio. Una representación, genuina, de este caso lo constituye la presa de Riaño (fig. 4) de la que se trata ampliamente en otro artículo de esta publicación.

2.2. Presas con definición geométrica conteniendo todas las claves de los arcos en un mismo plano vertical.

En las cerradas muy asimétricas pueden, en ciertos casos, encajarse satisfactoriamente una estructura con la definición del epígrafe, es decir, en que las normales en clave a los arcos a los distintos niveles son coplanarias, pero los desarrollos de éstos son distintos a cada lado del plano anterior en cuanto a sus leyes de curvaturas y espesores.

Así, por ejemplo, si procede en el caso de la figura 5,

dando gradiente más suave a la disminución de curvatura, en la margen izquierda que en la derecha. Lo contrario habrá que hacer —en este caso— con la variación de espesores. Conviene que en clave tengan ambas ramas el mismo radio de curvatura, porque la vista denuncia desagradablemente los cambios bruscos de éste.

2.3. Presas en que las claves de los arcos forman una superficie reglada de plano director horizontal.

La cerrada, fuertemente asimétrica, de los Angeles de San Rafael presenta un caso típico en que una definición del tipo del epígrafe solventaba todos los inconvenientes y dificultades que presentan estas cerradas, para efectuar el cierre con una bóveda.

Sigamos el proceso de encaje de esta bóveda, para ver la forma en que esta definición va venciendo las dificultades inherentes a la fuerte simetría de la cerrada.

El sitio escogido para implantación de la presa presenta —como puede verse en la figura 6— una fuerte asimetría siendo la margen izquierda casi vertical y la derecha muy tendida. Asimismo, mientras la margen izquierda tiene un talud prácticamente constante, el talud de la margen derecha se va tendiendo, a manera que se sube de cota, dándole un perfil convexo. La roca es un gneis compacto de gran dureza en el fondo del valle.

Las soluciones presa con definición geométrica simétrica, pero con contorno asimétrico, siguiendo la forma del terreno (caso de la presa de Riaño) o la forma descrita en el apartado 2.2, se desecharon por las siguientes razones:

- Si se toma el plano que contiene las claves de los arcos, centrado con el río, los arcos superiores en la margen derecha, inciden en el terreno casi tangencialmente, necesitando un gran estribo.
 - Si se toma el plano de simetría centrado con los arcos superiores, para que éstos incidan bien en el terreno, los arcos inferiores lo hacen mal en la margen izquierda y, además, se quedan con una ley de espesores absurda, al tener la clave en el arranque derecho.
 - Las posiciones intermedias del plano de simetría ofrecen los defectos de las dos posiciones extremas —desde luego en menor cuantía— sin llegar nunca a un resultado satisfactorio.
 - Ante estas consideraciones se ve que la fuerte asimetría de la cerrada exige una bóveda concebida de tal forma que las claves de los arcos no estén dentro del mismo plano, sino que en cada nivel el arco correspondiente esté bien encajado.
- Para el diseño de una presa de estas características se ha procedido observando las siguientes premisas:
- En cada nivel el arco correspondiente debe tener una buena incidencia en ambos márgenes.
 - La clave de los arcos debe estar más o menos centrada en los mismos.

- La ley de variación de orientación de las claves de los arcos será uniforme.
- Las ménsulas —o secciones verticales— deben presentar un ligero desplome hacia aguas arriba, sin que llegue a perjudicar su equilibrio para embalse vacío (figura 7).

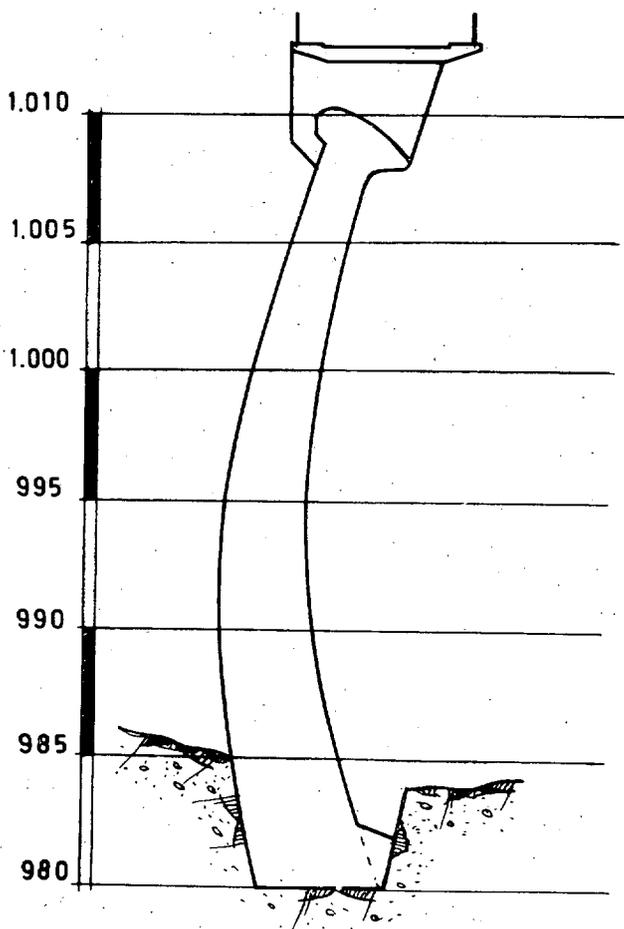


Figura 7.

De esta forma, y mediante diversos tanteos, se llegó a la solución definitiva, en la cual las claves de los arcos cortan al paramento de aguas abajo del arco de coronación en puntos tales que sus distancias mutuas son proporcionales a la diferencia de cotas de los arcos (figura 8).

Como secciones horizontales se han proyectado arcos, cuyos paramentos son dos arcos de circunferencia con distinto centro, de forma que el espesor crece de clave hacia los arranques. Se consideró la posibilidad de que los arcos fueran de curvatura variable (arcos de tres centros o espirales logarítmicas), pero debido a la estrechez de la cerrada y esbeltez de la presa, la carga soportada por los arcos debe aproximarse mucho a la carga hidrostática, por lo que parece preferible el arco circular.

La solución elegida es, pues, una bóveda de doble curvatura, cuyas secciones horizontales están formadas por dos arcos de circunferencia y cuyas claves forman un helicoides de plano director.

Las características más importantes son:

Altura sobre el cuenco	34,00 m.
Altura sobre cimientos	37,25 m.
Espesor máximo de los arcos en clave ...	4,80 m.
Espesor mínimo de los arcos en clave ...	1,90 m.
Espesor en arranque de los arcos	de 1 a 1,35.
Espesor en clave de los arcos	
Ángulos de los arcos	de 90° a 40°.
Volumen de hormigón (incluido estribos).	6 900 m. ³ .

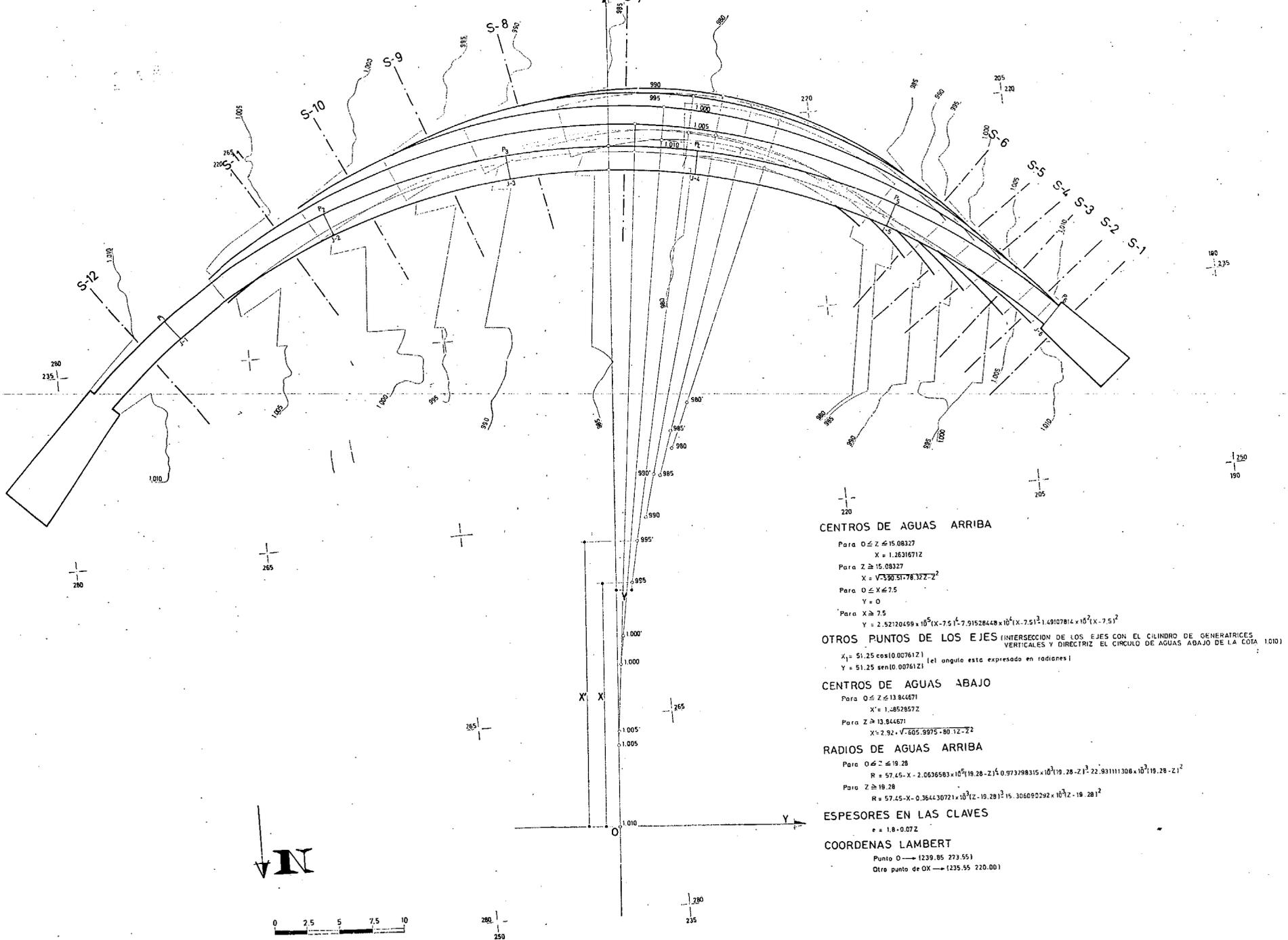
La incidencia de los arcos en el terreno es altamente satisfactoria debido a la definición de la presa. Además, se ha dado a los arcos un ángulo pequeño, lo cual si bien aumenta el trabajo a flexión del hormigón, hace que la incidencia de los esfuerzos sobre la cimentación sea mejor, resultando una mayor seguridad para el conjunto resistente presa-apoyos.

La forma de las secciones verticales es también satisfactoria. Todas crean unas compresiones en el pie de aguas arriba, debidas a su desplome, sin llegar a límites peligrosos para embalse vacío y permiten, al mismo tiempo, un vertido del aliviadero sin tocar la presa. Es de destacar que las ménsulas de la margen izquierda están más desplomadas hacia aguas arriba que las de la margen derecha, cuando desde el punto de vista estructural sería conveniente que fuera al revés, ya que por ser la margen derecha más tendida, las ménsulas de este lado se cargarán más. Esto se podría haber logrado pero a costa de disminuir el ángulo de incidencia de los arcos con la margen derecha. Después de varios encajes se ha considerado la solución elegida como la más correcta teniendo en cuenta que el trabajo de los arcos es, con mucho, el más importante.

Queremos hacer resaltar que si bien la definición adoptada encierra algunas dificultades de proyecto que obvian las definiciones más simples es éste un pequeño y único inconveniente que no da a cambio inapreciables ventajas:

- El poder centrar el arco a cada nivel buscando una incidencia favorable y equitativa para ambas márgenes.
- El lograr que los arcos —forma resistente fundamental de la estructura— trabajen favorablemente.
- Conseguir una disminución del cubo de hormigón y una distribución racional del mismo.

La presa que cubica 7 500 m.³ ha sido construida por Construcciones Civiles, S. A. en un plazo de ocho meses dirigiendo los trabajos el Ingeniero de Caminos señor Cañedo. El Director de la obra fue el Doctor Ingeniero señor Ramírez Gallardo.



CENTROS DE AGUAS ARRIBA

Para $0 \leq Z \leq 15.08327$
 $X = 1.2631671Z$

Para $Z \geq 15.08327$
 $X = \sqrt{3.8051 \cdot 76.327 \cdot Z^2}$

Para $0 \leq X \leq 7.5$
 $Y = 0$

Para $X \geq 7.5$
 $Y = 2.52720699 \times 10^5 \cdot X - 7.51^2 - 7.91528468 \times 10^4 \cdot X - 7.51^2 + 1.0107814 \times 10^7 \cdot X - 7.51^2$

OTROS PUNTOS DE LOS EJES (INTERSECCION DE LOS EJES CON EL CUINDRO DE GENERATRICES VERTICALES Y DIRECTRIZ EL CIRCULO DE AGUAS ABAJO DE LA COTA 1010)

$X_1 = 51.25 \cos(0.007612)$
 $Y = 51.25 \sin(0.007612)$ (el angulo esta expresado en radianes)

CENTROS DE AGUAS ABAJO

Para $0 \leq Z \leq 13.844671$
 $X' = 1.4852857Z$

Para $Z \geq 13.844671$
 $X' = 2.92 \cdot \sqrt{605.9975 \cdot 80.12 \cdot Z^2}$

RADIOS DE AGUAS ARRIBA

Para $0 \leq Z \leq 19.28$
 $R = 57.45 \cdot X - 2.0636583 \times 10^5 \cdot 19.28 - Z)^2 + 0.973798315 \times 10^7 \cdot 19.28 - Z)^2 + 22.831111308 \times 10^7 \cdot 19.28 - Z)^2$

Para $Z \geq 19.28$
 $R = 57.45 \cdot X - 0.364430721 \times 10^7 \cdot Z - 19.28)^2 + 15.305092292 \times 10^7 \cdot Z - 19.28)^2$

ESPORES EN LAS CLAVES

$e = 1.8 - 0.07Z$

COORDENAS LAMBERT

Punto O \rightarrow (1239.85 273.55)
 Otro punto de OX \rightarrow (1235.55 220.00)

Figura 8.

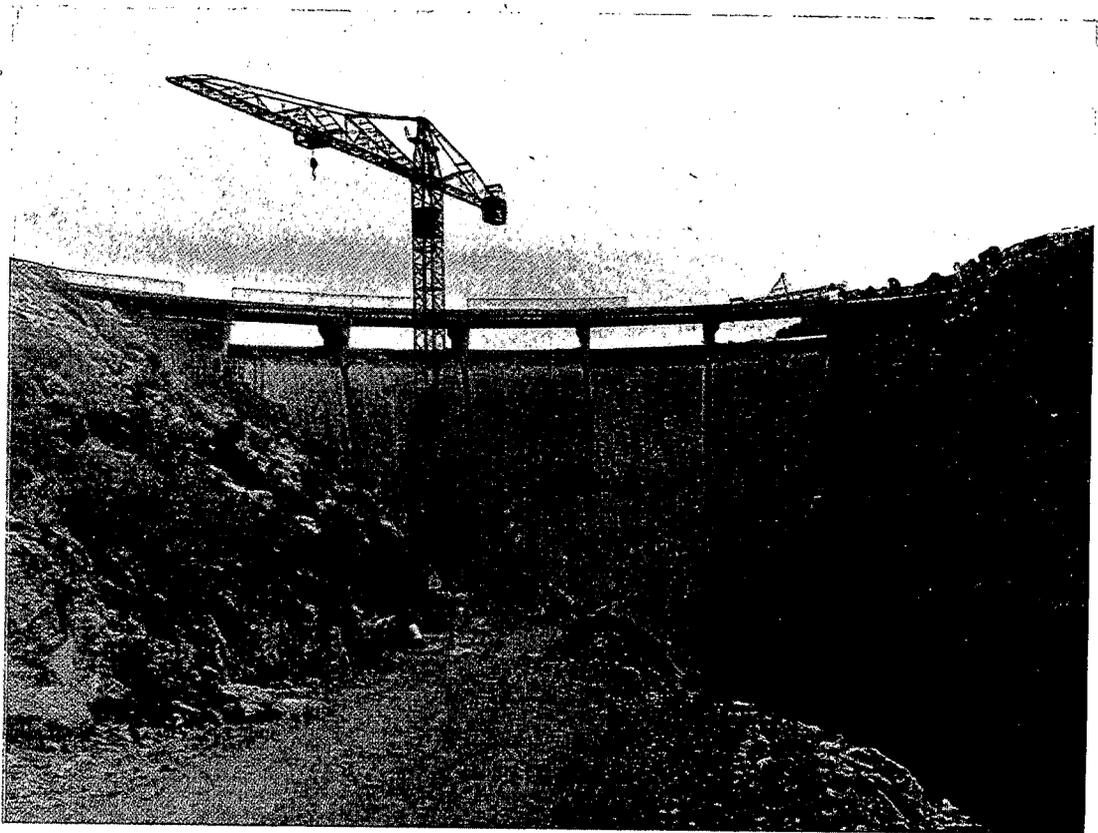


Figura 9.

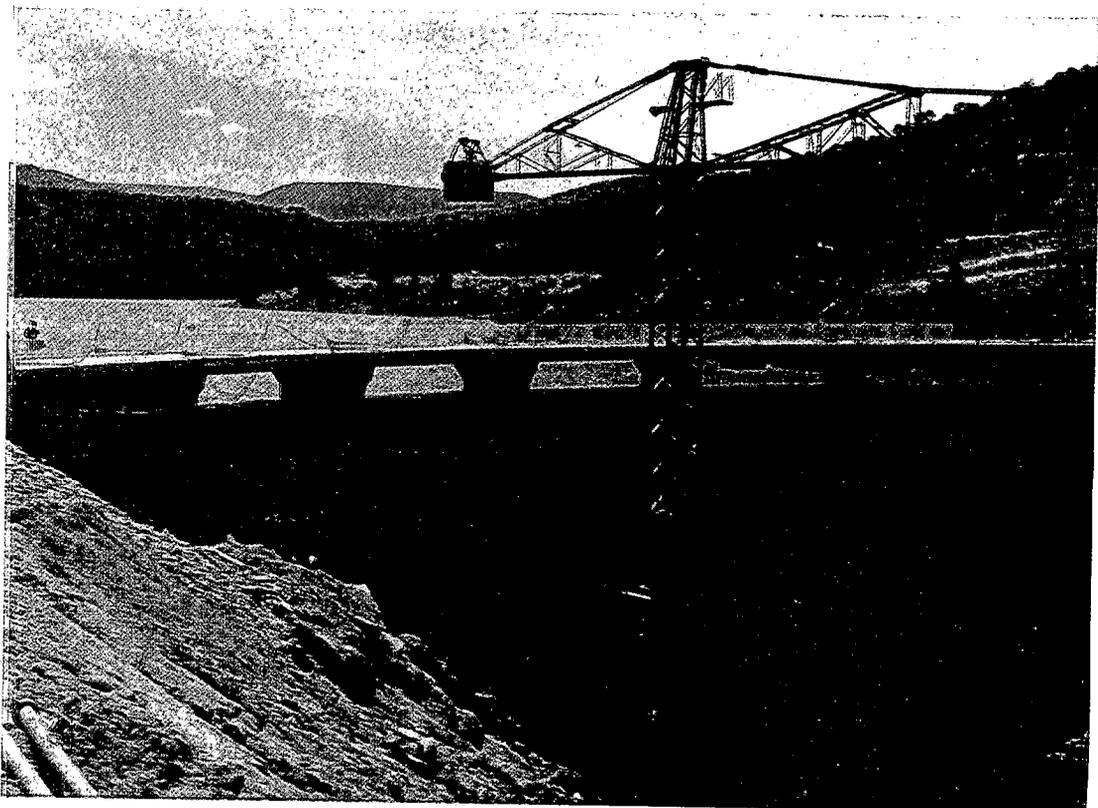


Figura 10.