

# COMPORTAMIENTO INICIAL DE LA PRESA DE SUSQUEDA (\*)

## TERCERA PARTE

Por ARTURO REBOLLO

Ingeniero de Caminos

*Con esta tercera parte finaliza el artículo sobre los resultados obtenidos en la auscultación de la presa de Susqueda, según anunciamos en el número anterior. En las presentes páginas se analizan los movimientos y desplazamientos observados en el complejo presa-terreno, haciéndose también referencia al comportamiento del talud de la excavación de la margen derecha del embalse.*

### 3. Desplazamientos en la estructura y roca de apoyo.

#### 3.1. Los movimientos en las juntas de construcción

Para controlar el funcionamiento de las juntas de construcción hemos colocado los clásicos medidores Carlson, embebidos transversalmente a las mismas, que a través de su resistencia óhmica nos indican cómo evoluciona la longitud de su abertura o cierre.

El total de aparatos instalados asciende a 48, siendo su campo de medida del orden de 6 milímetros. Han funcionado normalmente todos, excepto seis; de ellos, dos dejaron de marcar al poco tiempo de su instalación; tres, a partir del momento de la inyección, y el restante, un año después de efectuada aquélla.

En la evolución de las aberturas de las juntas han actuado fundamentalmente el efecto térmico resultante de la superposición: retracción-ciclo externo ambiental y la carga hidráulica del embalse parcial.

Al efecto térmico ya nos hemos referido anteriormente, de modo especial al estado térmico de cada recinto en el momento de su inyección. En él la retracción juega el papel más importante, ya que el ciclo anual de la temperatura ambiente, contrayendo las juntas en verano y

abriéndolas en invierno, ha tenido solamente unas oscilaciones máximas del orden de  $\pm 0,5$  milímetros, que en muchos casos incluso no se han hecho notar.

Capítulo aparte merece considerar el embalse parcial que incidió sobre la estructura a partir del mes de marzo de 1967. Este embalse tenía un doble objeto: en primer lugar, contrarrestar el efecto del peso propio de las ménsulas a fin de que éstas no adoptaran comprometidos desplazamientos hacia aguas arriba, lo que conseguimos en primera aproximación una vez que cerramos el túnel de desvío y derivamos el río a través de los desagües de fondo situados en el cuerpo de la presa a la cota 263 m.; en segundo lugar, alcanzar las cotas 292-295 m., lo que nos iba a permitir poner en servicio la central eléctrica, al estar el umbral inferior de la toma de agua situado sobre la cota 287 m.

Este embalse parcial se mantuvo durante buena parte de 1967 al rededor de la cota 270 metros, habiendo observado a esa cota una cierta estabilización en la zona central y margen derecha de la estructura, y una tendencia a desplazarse hacia aguas arriba en las ménsulas de la margen izquierda, con cimentación más profunda que las de la derecha y con mayores tracciones en vacío en el pie de aguas abajo.

Una vez el embalse en la cota 290 m. no observamos ningún cambio especial en la tendencia de los desplazamientos. En cambio, al aumentar el nivel de 10 m. en diciembre del mismo año hasta la cota 300 m., se produjo un mar-

\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 15 de abril de 1971.

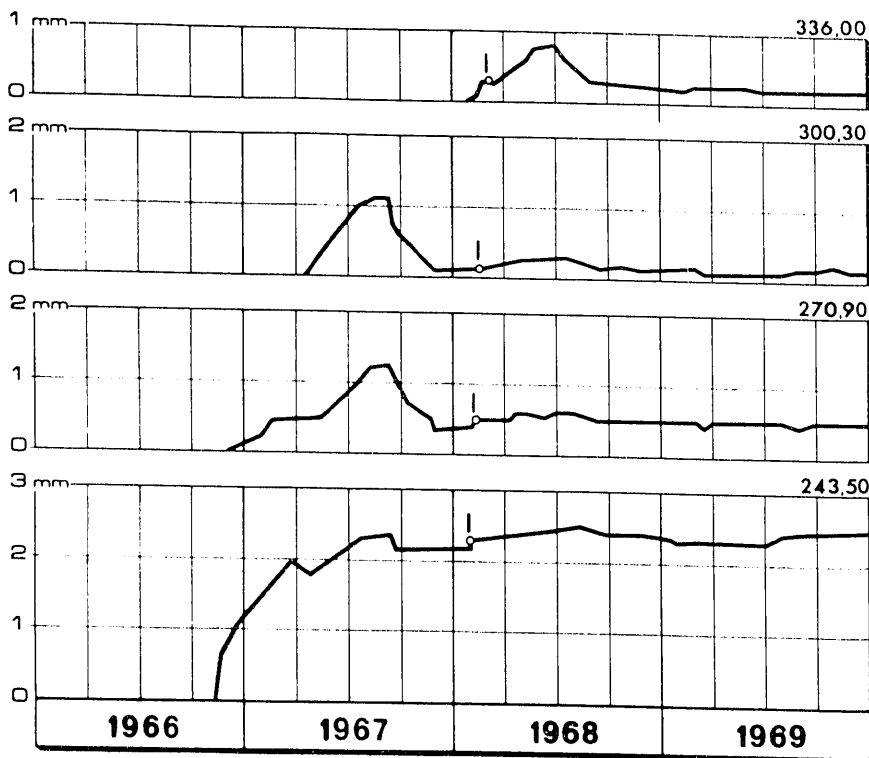


Fig. 39.—Evolución de las aberturas de la junta 1-2 suministradas por medidores Carlson situados a diferentes cotas. I, fecha en que se ha concluido la inyección del recinto donde está instalado cada medidor.

cado desplazamiento de la estructura hacia aguas abajo que produjo las correspondientes contracciones en las juntas.

En vista de ello, rebajamos el nivel hasta la cota 295 m. en el momento de la inyección de las juntas durante los primeros meses de 1968, al objeto de que los movimientos de cie-

rrer de las juntas fueran mínimos, sin perjudicar el normal funcionamiento de la central. Por otra parte, en esta cota, 295 m. de inyección, el cálculo analítico no daba todavía tracciones en el pie de aguas arriba de las ménsulas supuestas independientes, por lo que el efecto arco prácticamente no se iba a producir.

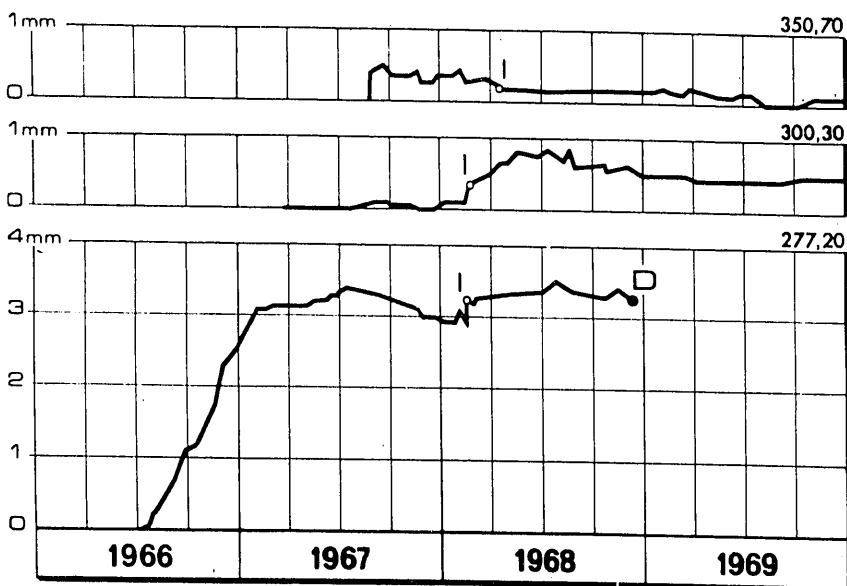


Fig. 40.—Evolución de las aberturas de la junta 14-16 suministradas por medidores Carlson situados a diferentes cotas. I, fecha en que ha concluido la inyección del recinto donde está instalado cada medidor; D, aparato averiado.

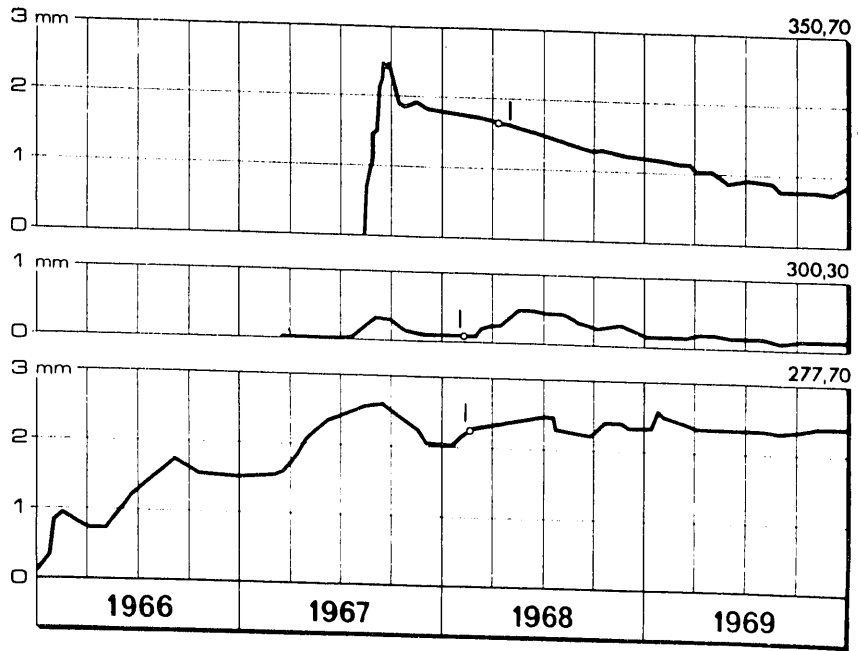


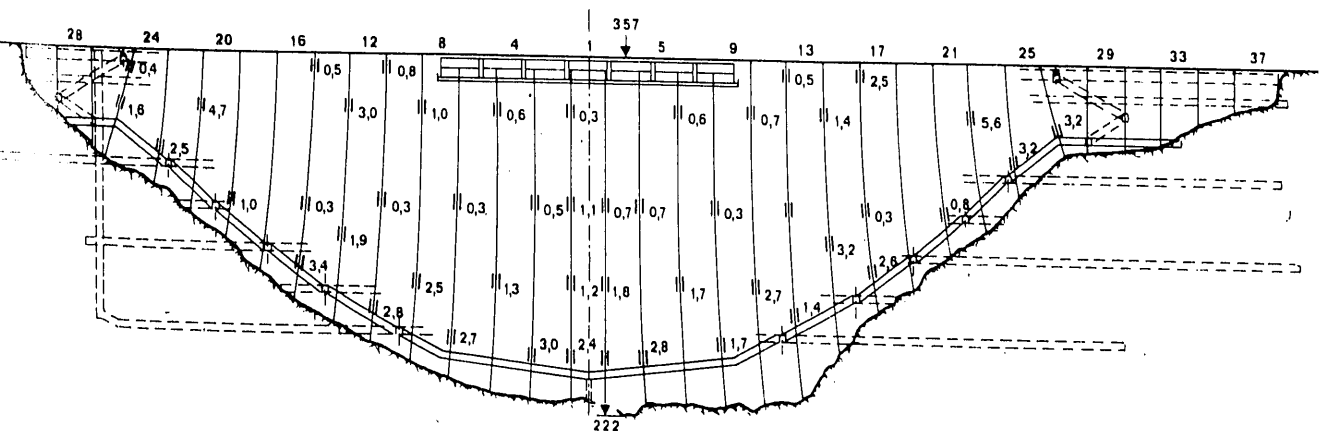
Fig. 41.—Evolución de las aberturas de la junta 15-17 suministradas por medidores Carlson situados a diferentes cotas. I, fecha en que se ha concluido la inyección del recinto donde está instalado cada medidor.

El fenómeno de la contracción parcial de las juntas lo hemos recogido con todo detalle y puede verse referido en las figuras 39, 40 y 41. En la figura 42 reflejamos las aberturas máximas absolutas que han sido recogidas por los medidores antes de la inyección de las juntas, mientras que en la figura 43 representamos dichas aberturas en el momento mismo de la inyección del recinto correspondiente a cada medidor. Si consideramos, además, una ley de variaciones continua de las aberturas a lo largo de juntas, podemos obtener en diversas secciones horizontales de la presa los valores totales inter-

grados de dichas aberturas, que recogemos en el siguiente cuadro:

Sección cota — metros	Longitud media de la sección — metros	Suma de aberturas máximas antes de la inyección — milímetros	Suma de aberturas en la inyección — milímetros
335	379,5	38,4	33,0
300	335,7	29,8	21,1
270	255,6	34,9	23,2
245	170,2	27,5	20,0

Fig. 42.—Aberturas máximas absolutas en milímetros registrados por los medidores de juntas antes de la inyección.



Esta suma de las aberturas máximas no es del todo comparable, puesto que no han sido nunca coincidentes en una fecha determinada. No obstante, estos valores máximos, como límite superior del fenómeno, nos sirve para dar una idea de la relativa importancia del problema, precisamente por lo reducidos que resultan todos ellos. Lo que más importa destacar es el cuidado con que se han ido controlando, permitiéndonos en todo momento conocer su alcance.

Llaman la atención las aberturas máximas que resultan en la zona superior de las juntas 21-23 y 20-22 de 5,6 y 4,7 mm., respectivamente, muy elevadas en comparación con el resto de los valores. Esto puede tener la siguiente explicación: los bloques en cuestión situados en la zona alta de las laderas quedaron aislados algún tiempo durante la construcción, presentando un cierto desplome hacia el centro del cauce, lo que es muy probable provocara una deformación o deslizamiento en la roca de cimentación, cuyas diaclasas estaban todavía sin tratar, que sin duda ocasionó este despegue en las juntas correspondientes.

A título de curiosidad tanteamos la repercusión que habría tenido sobre la estructura el caso hipotético de haberse producido un llenado del embalse con las juntas de la presa abiertas, problema que puede plantearse durante la construcción de cualquier presa, dado que, en general, las obras provisionales de desviación no están dimensionadas normalmente para evacuar las aportaciones de las máximas riadas. Pues bien, el cierre total de las juntas no ocasionaba más que un incremento del orden de 7 Kg./cm.<sup>2</sup> en el pie de aguas arriba de la ménsula central y una ligera variación en el estado general de las compresiones; lo cual es bastante lógico, dado lo pequeñas que resultaban dichas aberturas.

A partir del momento de la inyección, operación que como hemos indicado se llevó a cabo en el primer trimestre de 1968, las medidas suministradas por los medidores de las juntas han quedado muy estabilizadas. En las figuras 44 y 45 recogemos los incrementos que han experimentado los medidores de juntas hasta finales de 1968 y 1969, respectivamente, referidos al momento en que se efectuó la inyección; indicando de una manera análoga en el cuadro adjunto la suma de tales incrementos a las mismas cotas anteriores, suponiendo para efectos

de interpolación una ley lineal para dichas aberturas a lo largo de cada junta:

Sección cota — metros	Suma de incrementos en 31 XII-68. Nivel embalse 339 m. — milímetros	Suma de incrementos en 31 XII-69. Nivel embalse 335 m. — milímetros
335	0,0	— 3,0
300	+ 2,1	+ 0,3
270	+ 2,3	+ 2,1
245	+ 1,6	+ 1,1

Como puede apreciarse, estos valores, sumamente reducidos, se mantienen perfectamente dentro de los errores de interpolación y de la propia lectura de los aparatos, denotando, como hemos señalado, una marcada estabilización en aquellas aberturas.

En vista de todo ello y también de la estabilización del estado térmico no prevemos que sea necesario volver a inyectar las juntas en el futuro. Ahora bien, existe una posibilidad de una nueva abertura controlada de las juntas, posibilidad que ha de realizarse con toda precisión y cuidado, si realmente puede interesar provocarla en el caso de que en los años venideros se vayan apreciando deformaciones irreversibles tanto en la fundación como en la estructura, que hagan recomendable intentar su corrección. En este sentido existe la posibilidad de hacer descender el embalse desde la cota más baja, 287 metros de la toma de agua de la central, hasta la de los desagües de fondo, 263 m.; cota absoluta de embalse mínimo, a la cual, como hemos señalado, ha de volver a manifestarse la tendencia de las ménsulas a desplomarse hacia aguas arriba y, por tanto, a abrirse sus juntas.

Esta tendencia pudiera muy bien resultar más acusada que durante el embalse parcial, durante 1970 a la cota 270 m., dado que en aquel entonces faltaba por hormigonar todavía una buena parte de la presa sobre toda la zona central.

Esta operación que también puede interesar efectuarla por motivos ajenos al comportamiento de la estructura, en el caso de suministro en años muy secos a riegos o abastecimiento, podrá siempre realizarse con toda precisión, puesto que podemos conocer en todo momento tanto los desplazamientos hacia aguas arriba de

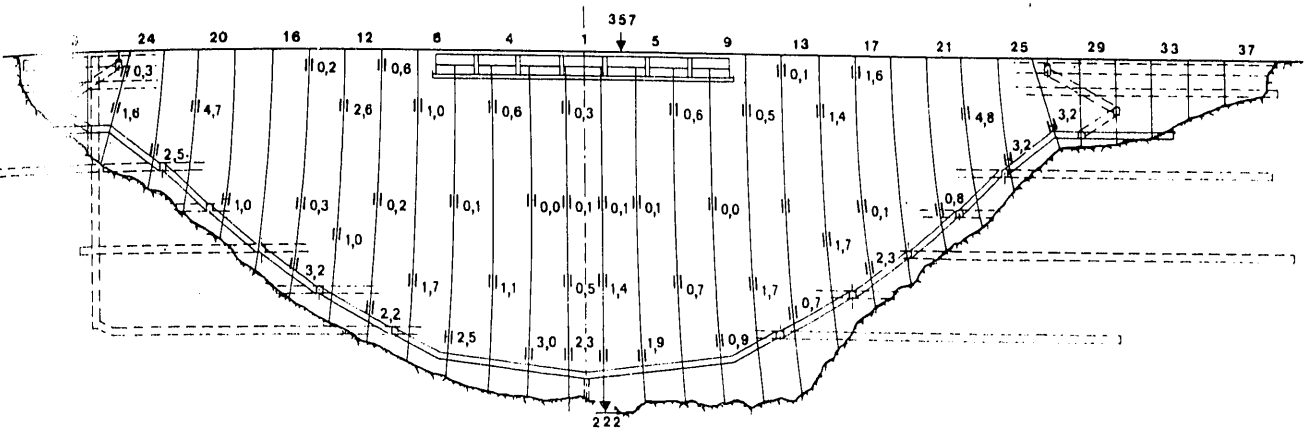


Fig. 43.—Aberturas, en mm. de los medidores de juntas en el momento de concluir la inyección del recinto correspondiente.

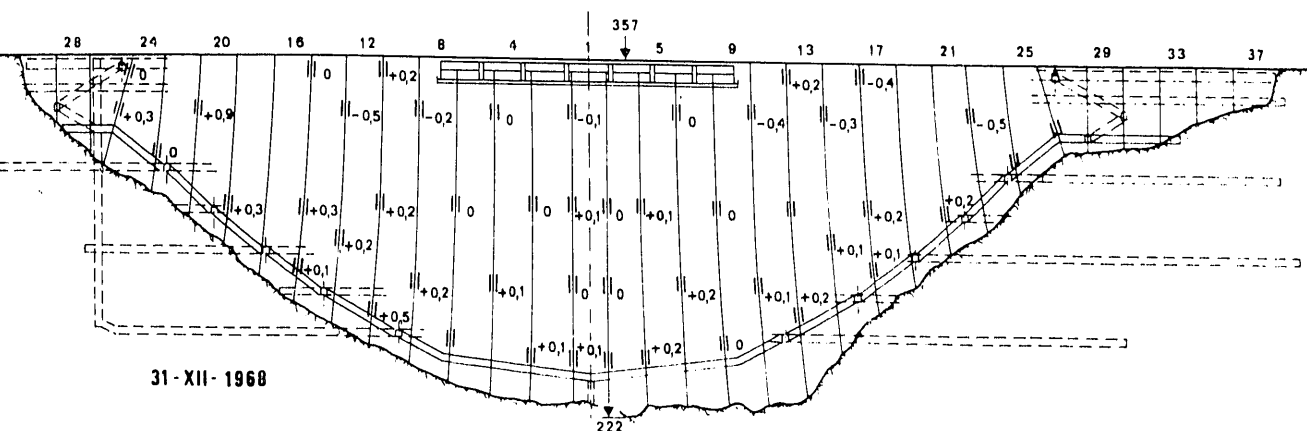


Fig. 44.—Incrementos en mm. de las aberturas de juntas desde el momento de la inyección a principios de 1968, hasta finales del mismo año.

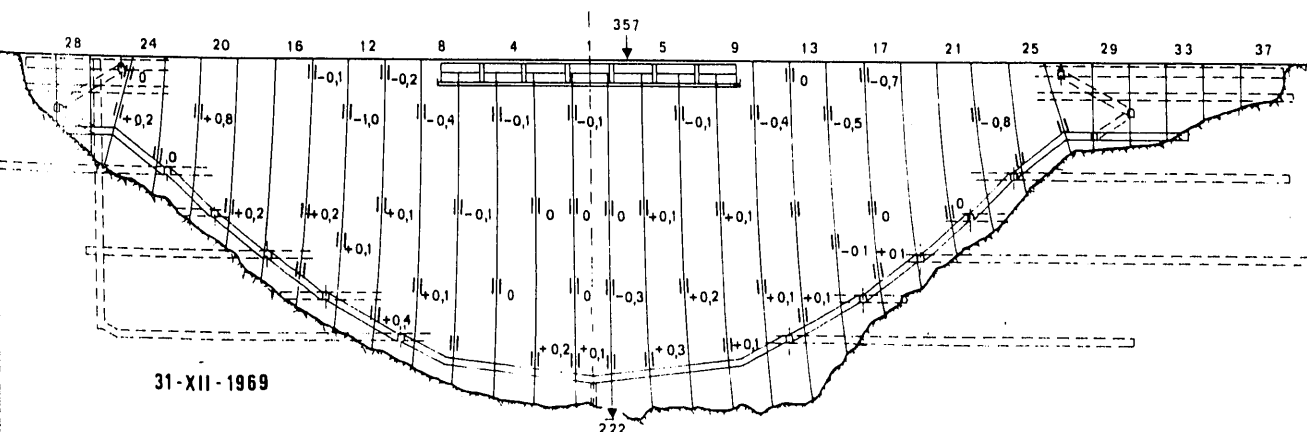


Fig. 45.—Incrementos en mm. de las aberturas de juntas desde el momento de la inyección hasta finales de 1969.

las ménsulas así como las posibles aberturas de sus juntas a través del sistema de aparatos de control establecido.

### 3.2. La variación de los caudales en la pantalla de control de movimientos

En este tipo de presas el pie de aguas arriba está sometido a unas variaciones tensionales importantes que pueden pasar de notables estados de compresión a embalse vacío a estados de tracción cuando el embalse está en carga; ello puede determinar un estado de fatiga en la zona de contacto roca hormigón, especialmente en la roca, que de por sí es poco resistente a la tracción, y desembocar en un incipiente estado de

prerotura que no sea detectado ni por el análisis de las tensiones ni tan siquiera el control de los desplazamientos en el hormigón y terreno, especialmente si la tectónica favorece la posibilidad de una primera fisuración; fisuración que puede hacer entrar en juego, como hemos indicado anteriormente, nuevas variables que modifiquen las condiciones de equilibrio en que se basa la estabilidad de la obra.

Pues bien, para controlar este posible fenómeno hemos dispuesto desde la galería perimetral 18 taladros, pasando próximos al pie de aguas arriba y penetrando 40 m. en la roca, según la dirección normal al terreno, constituyendo a lo largo de toda la cimentación una gran pantalla en abanico, que hemos denominado de control de movimientos, con el único objeto de medir

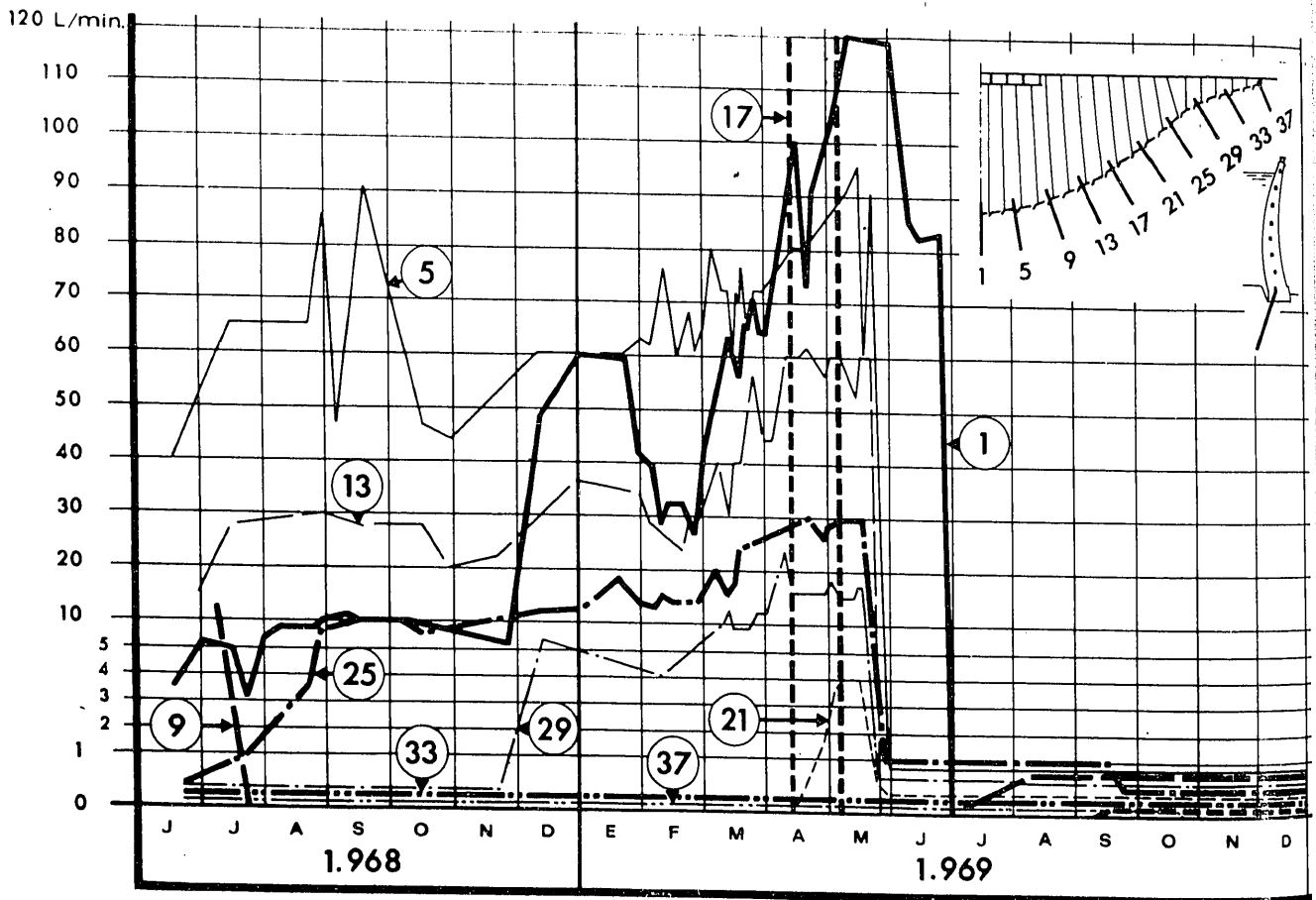


Fig. 46.—Variación de caudales en los taladros de la pantalla de control de movimientos de la margen izquierda. Los del 1, 5 y 13 no parecen obedecer exclusivamente a la variación del nivel del embalse sino también a posibles tracciones en las fisuras de la roca. El 9 ha quedado obturado por las concreciones cálcicas. En el 17 se aprecia una rotura repentina posiblemente en estas concreciones. A partir del verano de 1969 puesta a cero de la pantalla, con la reinyección y reperforación de los taladros.

las variaciones específicas del caudal en dichos taladros, al responder directamente a una mayor o menor apertura de las posibles fisuras por ellos interceptados; no siendo su misión el controlar las presiones intersticiales, que serían por lo general muy altas en esa zona, al estar los taladros muy próximos al embalse.

En términos generales, el caudal suministrado por estos taladros, que en nuestro caso tienen un diámetro medio de 60-70 mm., es proporcional a la sección útil de las fisuras que dan agua y a la raíz cuadrada de la altura de carga del embalse. Cualquier variación relativa que no respondiera a la del incremento exclusivo de la altura del nivel del embalse supondría una variación en la sección útil de las fisuras que están en comunicación con dicho taladro. Esto puede no ser exactamente cierto, ya que un aumento de carga del embalse puede producir un

lavado de tales fisuras, aumentando su sección útil al paso del agua, sobre todo durante la primera puesta en carga; siendo también posible el fenómeno contrario. No obstante, y a pesar de no conocer con exactitud aquel grado de proporcionalidad, con los datos de estos caudales puede detectarse con bastante aproximación la marcha del comportamiento del pie de aguas arriba en la base de la presa ante posibles fenómenos de fisuración, sobre todo los bruscos, para así prevenir su influencia ulterior en el comportamiento general de la obra.

En las figuras 46 y 47 exponemos las curvas de los caudales de los taladros anteriormente citados. Puede observarse cómo el caudal en algunos de ellos, tales como el 1, el 5 y el 13, experimenta notables aumentos al alcanzar el embalse su máximo nivel, que no parecen obedecer exclusivamente al aumento de la carga

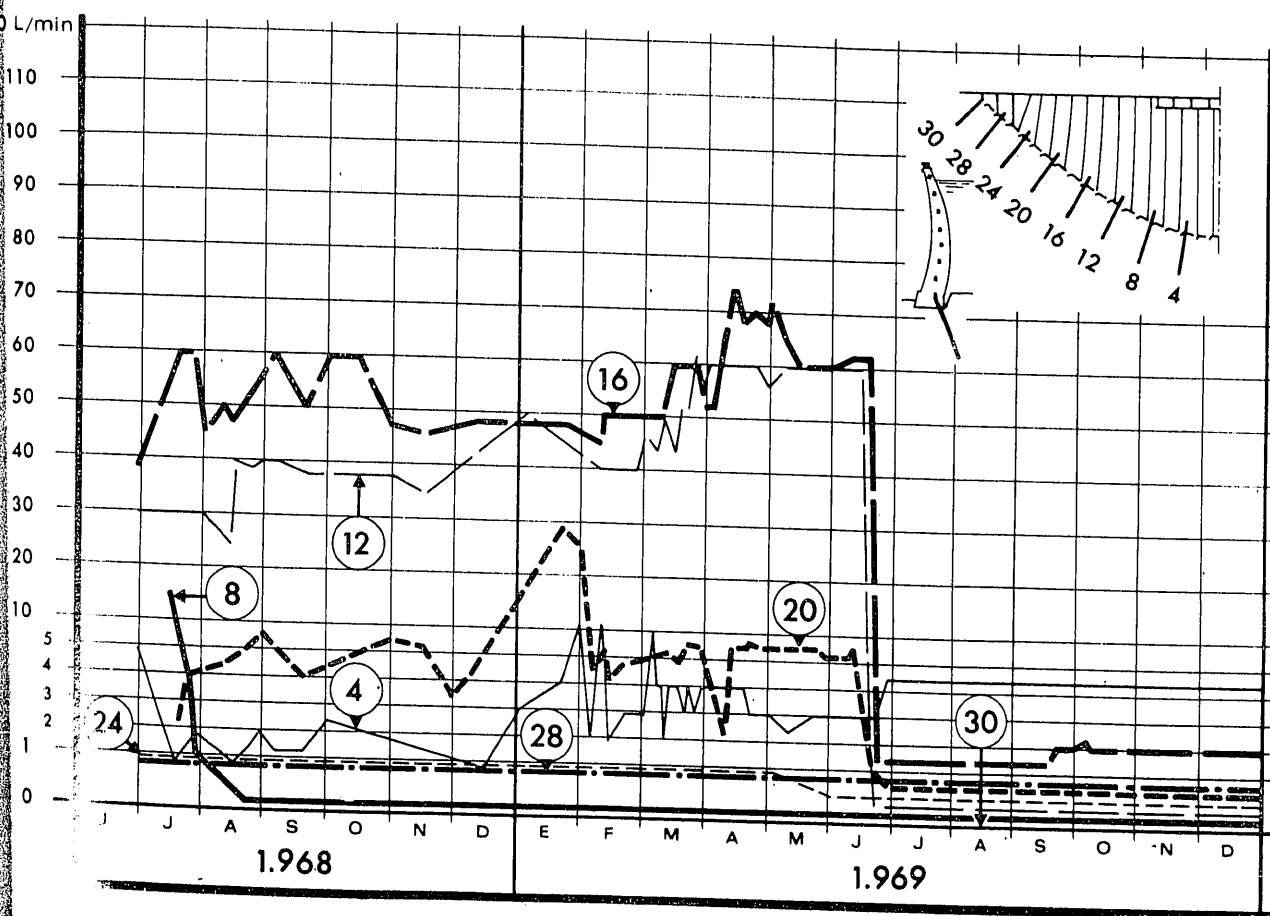


Fig. 47. Variación de caudales en los taladros de la pantalla de control de movimientos de la margen derecha. A partir del verano de 1969 puesta al origen de la pantalla.

del agua o al posible efecto de lavado, sino también a una distensión de las fisuras de la roca debidas sin duda a la presencia de ligeras tracciones en aquella zona del contacto roca-hormigón.

Como hemos señalado, estas tracciones nos han parecido que han de ser muy pequeñas, de algunos Kg./cm.<sup>2</sup> nada más, tal y como fue determinado en el cálculo analítico, puesto que una vez desaparecida la punta de la máxima carga del agua se advierten decididas recuperaciones en el módulo de los caudales, lo que demuestra un carácter más bien elástico en el comportamiento de apertura y cierre de dichas fisuras; no habiéndose vislumbrado en absoluto la aparición de la rotura brusca en esta zona de la base, que necesariamente habría comportado la presencia de tracciones más elevadas.

Caso aparte es el comportamiento del taladro 17, en el que sí podemos hablar de un fenómeno de rotura precisamente por la irrupción instantánea de un caudal suficientemente elevado, superior a los 100 l./minuto. No obstante, por las observaciones llevadas a cabo creemos que la rotura se produjo en las concreciones cálcicas que habían obturado desde un principio el taladro al aumentar la presión con el llenado del embalse. De todas formas, el fenómeno ha quedado perfectamente reflejado.

Es preciso notar cómo en las zonas altas, correspondientes a los estribos, los caudales de estos taladros permanecen inalterables a lo largo del tiempo, lo que está en correlación con lo reducidas que se presentan en estas zonas las variaciones tracción-compresión.

Ahora bien, una vez que el embalse después de rebasar su cota máxima inició el descenso de nivel, decidimos trasladar al origen los resultados de estos análisis a base de reinyectar estos taladros, naturalmente a la presión mínima indispensable, y reperforarlos de nuevo para facilitar en el futuro las medidas de estos caudales y su interpretación ante las posibles nuevas fisuras o aberturas que pudieran manifestarse en esta zona del pie de aguas arriba, con lo que se confirmará fácilmente si los fenómenos que puedan seguirse produciendo tienen un carácter reiterativo, residual o solamente ocasional de la primera puesta en carga.

Es por ello, por lo que estas posibles liberaciones tensionales, que podríamos llamarlas acomodaciones estructurales, al traducirse en

un principio de rotura que puede hacer entrar en juego otros parámetros del mecanismo resistente de la obra, tales como la subpresión y la tectónica del macizo, nos han obligado a concentrar todo el proceso de la auscultación sobre la observación de los movimientos y desplazamientos de la estructura y terreno, como indicador verdaderamente real del comportamiento de la presa.

### 3.3. Los desplazamientos en el plano horizontal

La observación de estos movimientos la hemos considerado primordial para el control y el análisis del funcionamiento de la presa, ya que los límites entre los que han de referirse a lo largo del tiempo nos han de indicar no sólo la capacidad resistente del complejo estructural-terreno, sino también sus posibilidades de recuperación en los diferentes ciclos de carga-descarga y, sobre todo, la tendencia al aumento o estabilización de todos estos desplazamientos.

Dada, pues, la importancia que pueden tener los resultados de estas mediciones, por las decisiones que a partir de ellos puedan adoptarse sobre la explotación de la obra, hemos previsto realizarlas por partida doble, empleando procedimientos diferentes, a fin de que nos proporcionen siempre su contraste y su comprobación.

En efecto, una primera serie de medidas geodésicas desde bases suficientemente alejadas nos suministran para los desplazamientos valores de carácter absoluto; mientras que una segunda serie de mediciones, tanto en los péndulos instalados en el interior de la presa, como en las galerías de drenaje, nos permiten confrontar aquellos valores.

#### 3.3.1. La auscultación geodésica

En ella partimos de seis bases, que hemos considerado fijas a lo largo del tiempo, a dos de las cuales (B-5 y B-6) les hemos dado coordenadas desde los vértices de replanteo de la presa. Desde ellas hemos fijado el cuadrilátero completado por B-3 y B-4, compensando matemáticamente los diversos ángulos de sus alineaciones, según se indica en la figura 48; desde ellas, de un modo análogo, también han quedado



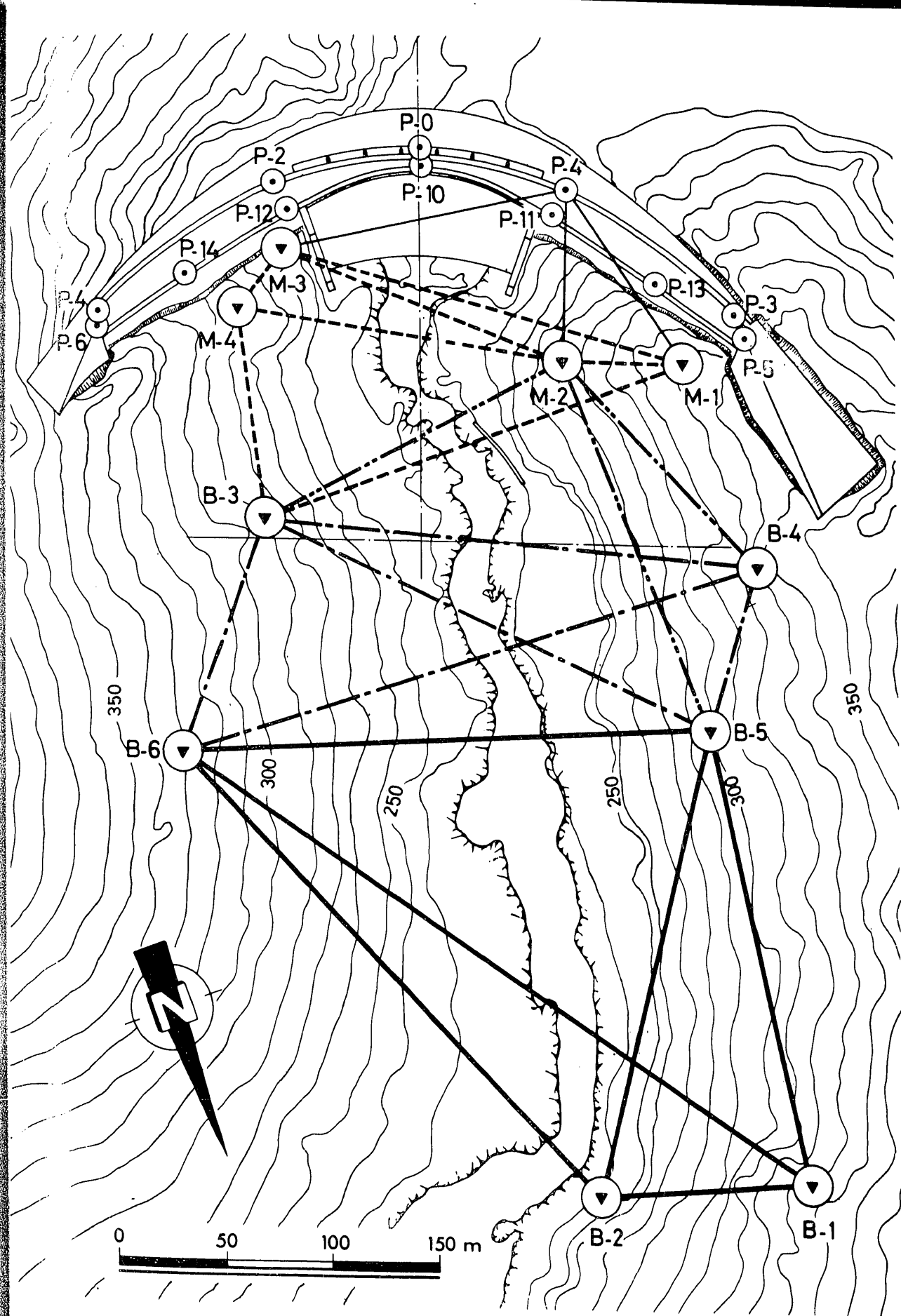


Fig. 4: Esquema general de la auscultación geodésica. B, bases fijas; M, bases móviles; P, puntos de medida en el hormigón de la presa.



Fig. 49.—Lectura desde una base geodésica.

do fijadas las B-1 y B-2, que son las bases más lejanas de la presa, quedando como reserva para un posible control de estas otras cuatro bases y como referencia general para las orientaciones.

Desde estas bases fijas y suficientemente alejadas hemos dado coordenadas a otras cuatro bases M, más próximas a la presa y, por tanto, ya consideradas móviles; estas coordenadas se obtienen por medio de cuadriláteros sucesivos, en los que también se compensan los errores de los cierres angulares a base de hacer mínima la suma de sus cuadrados, aplicando los multiplicadores de Langrange a las ecuaciones independientes. Todas estas operaciones se realizan con la ayuda de un ordenador, habiéndose realizado el proceso matemático con la colaboración del Ingeniero R. Marzo.

No obstante, y hasta el presente, estas ba-

ses no han experimentado desplazamiento alguno. Todas ellas están formadas por un pilar de hormigón convenientemente anclado a la roca y ubicado dentro de un recinto protector contra el ambiente exterior. Su elección ha respondido tanto a las condiciones de cimentación como a sus posibilidades de visibilidad y acceso (figura 49).

Desde estas cuatro bases móviles situadas en las proximidades de la presa ya pueden visarse por trisección los puntos situados sobre el paramento de la presa, cuyos desplazamientos se desean medir; no obstante, hay que emplear en alguno de ellos las bases fijas e incluso en algún caso solamente la bisección, dadas las condiciones no sólo de visibilidad, sino también de oblicuidad de las visuales.

Hemos elegido 11 puntos situados en la presa para controlar sus movimientos. Cinco de ellos situados en las proximidades del zócalo, siguiendo el contorno de la cimentación, y los otros seis en la coronación. Estos puntos están materializados por un cono metálico anclado en el hormigón y todos son fácilmente accesibles y pueden reponerse sin dificultad en caso de deterioro o inutilización.

Durante la construcción instalamos puntos provisionales en el centro del paramento para controlar las deformaciones de la bóveda durante el embalse parcial, que fueron eliminados una vez terminada la coronación, precisamente por ser prácticamente inaccesibles en caso de reposición. Todas estas medidas se vienen realizando con un teodolito Kern, tipo DKM 3, concebido especialmente para estos cometidos, y que dada su gran sensibilidad puede apreciar hasta  $1/4$  de segundo centesimal.

La resolución de todo el proceso de datos con el ordenador resulta indudablemente muy rápida, pero ocurre que hasta que los datos no entran en el mismo pueden pasar varios días por causas imprevistas y ajenas a los trabajos de campo. Por ello, después de cada lectura se realiza sobre los datos suministrados por el ordenador en la última medida una composición gráfica con las variaciones leídas para las orientaciones, que por ser en general muy pequeñas pueden asimilarse a su tangente, y componiendo los cierres en el entorno del punto a una escala cinco veces mayor de la real obtenemos con una rapidez extraordinaria, y dentro de la propia jornada de campo, los incrementos de

las coronadas de los puntos en cuestión con un error inferior al milímetro de lo que luego ha de cometer el ordenador.

Es curioso resaltar cómo teníamos también otro punto en la presa, situado precisamente en el centro de la coronación sobre la pasarela del aliviadero que hubo, finalmente, que desestimar. A pesar de haber quedado el tramo en cuestión completamente anclado a las pilas, se observó a medida que aumentaba la cota del embalse un retroceso paulatino de dicho punto hacia aguas arriba, motivado por el pandeo longitudinal de dicha pasarela al estar comprimida lateralmente por las zonas superiores de la bóveda de sección mucho más rígida que la de la propia pasarela.

### 3.3.2. Las lecturas en los péndulos

Hemos instalado tres péndulos directos tipo Huggenberger en el cuerpo de la presa. Dos de ellos laterales, simétricamente situados respecto al eje de la presa, anclados en la cota 351 metros, en el interior de la galería G-0; el tercero, situado en el centro de la bóveda, va anclado a un nivel inferior, 330 m., en la galería G-2 en razón de la existencia del vertedero y de la propia curvatura de la ménsula central.

Su lectura se realiza con un coordímetro y pueden obtenerse medidas en diversos niveles de la presa precisamente desde las diferentes galerías de visita. Con ello se obtienen, a través de estas medidas, que naturalmente tienen un carácter relativo, una inestimable confrontación con las anteriores medidas geodésicas, que siempre han de dar desplazamientos algo mayores, precisamente por englobar también los desplazamientos de la propia cimentación, que naturalmente pasan desapercibidos para los péndulos (fig. 50).

### 3.3.3. Las colimaciones en las galerías de drenaje

El fondo de estas seis galerías, excavadas en el terreno y situadas simétricamente tres en cada margen en un mismo plano vertical, se encuentran normalmente a más de 50 m. del hormigón de la cimentación, especialmente en la margen izquierda, en que esta distancia rebasa



Fig. 50.—Lectura de uno de los péndulos.

siempre los 100 m. Pues bien, en el final de estas galerías hemos instalado unas bases fijas, desde las que se obtienen por colimación los desplazamientos horizontales-transversales de diferentes puntos situados a lo largo de la galería y empotrados en el hormigón del revestimiento, con lo que podemos obtener con suficiente sencillez y rapidez la deformada de la galería según aquella dirección. Esta deformada pueda completarse: primero, con la deformación en el sentido longitudinal suministrado por la auscultación geodésica de los puntos situados en el contorno de la cimentación próximos a los puntos donde comienzan estas galerías, y segundo, por la deformada de los asientos verticales obtenidos por su nivelación longitudinal, también desde su interior, según veremos más adelante.

La realización de las lecturas de estas coli-

maciones lleva normalmente un tiempo de cuatro a cinco horas, por ello, en un principio y cuando todavía no era importante la carga del embalse y prácticamente nula la deformación de la cimentación, con objeto de obtener mayor rapidez de control, mediamos exclusivamente las variaciones angulares desde las bases fijas del fondo de la galería a un punto situado en las proximidades de la cimentación, lo que nos permitía inmediatamente y en primera aproximación conocer si había existido algún movimiento de consideración.

Hemos de destacar la extraordinaria importancia de las medidas en estas galerías, pues, para nosotros son el mejor indicador sobre el comportamiento de la presa. En este sentido recalcaremos nuevamente nuestra oposición a la instalación de péndulos inversos en la cimentación pues, aparte de que no nos permiten medir los asentos verticales, las medidas que transmiten son demasiado importantes para las decisiones que se puedan tomar sobre la explotación de la presa, y estas medidas en algún momento corren el peligro de no poder analizarse debidamente, dado que el punto fijo de dichos péndulos no es en absoluto visitable al

estar por lo general ubicado en el fondo de un taladro y sobre él pueden influir causas no controladas, tales como desprendimientos, obturaciones, decalcificaciones, o sencillamente roturas o averías en el material, que originen un posible falseamiento de tales medidas. Esto ha de plantear delicados dilemas que pueden incidir de manera arbitraria en las decisiones a tomar sobre la explotación de la presa, afectando por lo general a notables intereses económicos.

Estos péndulos tampoco tendrían justificación si se colocaran en un pozo perfectamente visitable y debidamente acondicionado, pues, entonces sería más lógico por su sencillez instalar péndulos directos. Pero aun así es preferible remitirse a la auscultación desde las galerías de drenaje, pues, aparte de ser más económica su ejecución que los pozos verticales, actúan como verdaderos "péndulos horizontales", siendo sus bases fijas revisables y visitables con toda comodidad, y pudiéndose a su vez realizar desde ellos el control de la cimentación con toda rapidez.

Como además hemos comprobado, según especificaremos en el siguiente apartado, que

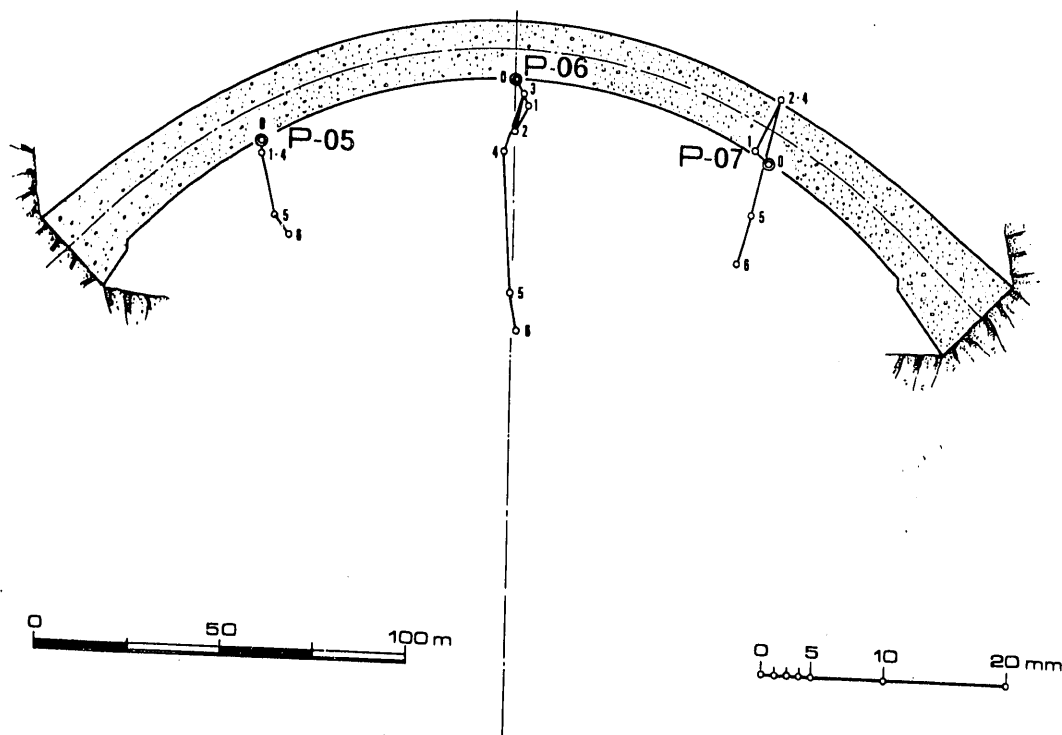


Fig. 51.—Desplazamientos a la cota 295 m. según la auscultación geodésica, obtenidos durante la construcción de la obra.

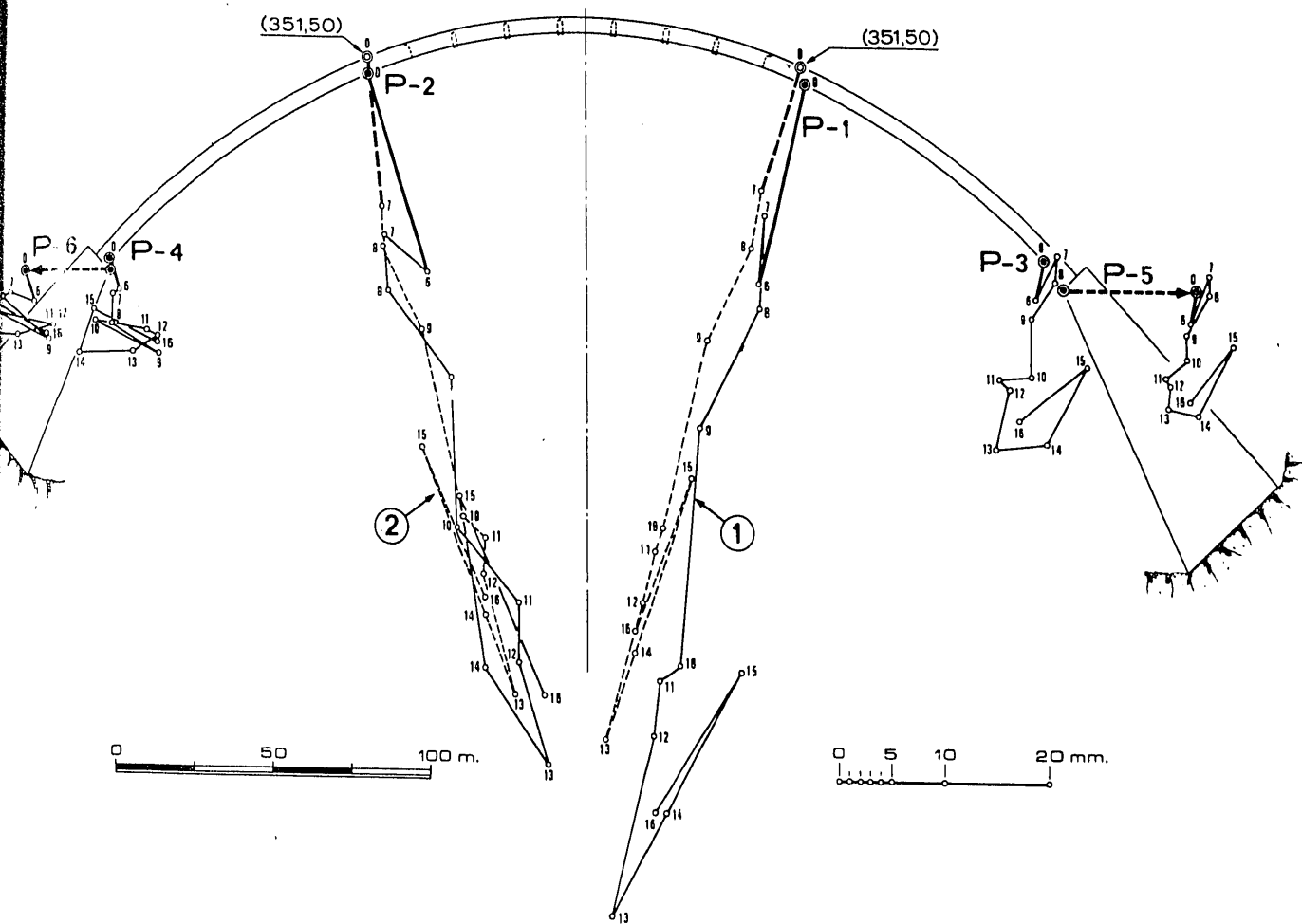


Fig. 52.—Desplazamientos de la coronación a la cota 357 m.; 1, auscultación geodésica; 2, péndulos. Nótese que las medidas de estos últimos corresponden a un nivel inferior, cota 351 m. Para la extrapolación de los vectores iniciales 0-6 y 0-7 han servido de base las medidas representadas en el gráfico anterior.

los desplazamientos del macizo de apoyo han tenido influencia hasta profundidades de 50-60 metros, la instalación de aquellos instrumentos que facilitan con garantía medidas a estas profundidades se hace prácticamente inviable.

Siguiendo la línea de este razonamiento acabaremos de resaltar las enormes ventajas de estas galerías de drenaje, pues aparte de realizar desde ellas las anteriores medidas básicas para controlar el comportamiento de la presa, sirven para investigar inicialmente, durante la redacción del proyecto, las características de la roca y la profundidad más conveniente para las excavaciones; posteriormente desde ellas puede efectuarse con toda efectividad el tratamiento por medio de inyecciones de la roca de cimentación y la impermeabilización del macizo ro-

coso; y, finalmente, desde ellas puede efectuarse no sólo las medidas de los movimientos en la propia cimentación a que antes nos hemos referido, sino también el drenaje profundo de la misma, controlando perfectamente las filtraciones y presiones intersticiales del macizo de apoyo.

3.3.4. Resultados de estas mediciones

En las figuras 51, 52, 53, 54 y 55 hemos representado sobre secciones de la presa a las cotas 295, 357, 313, 282 y 251 m., respectivamente, los movimientos que hemos medido en el plano horizontal suministrados por la auscultación geodésica, los péndulos directos instala-

dos en la bóveda y las colimaciones en las galerías de drenaje, cuya situación viene precisamente a coincidir con aquellas tres últimas cotas. Estas medidas están a escala y vienen referidas numeralmente del 1 al 16, correspondiendo a las fechas y cotas de embalse indicadas anteriormente en la figura 3 de la curva de embalse. En dichos gráficos hemos recogido las

das, lo que tuvo lugar entre las lecturas 6 y 7. En este sentido, hemos de notar cómo la primera medida geodésica que se registra de la coronación coincide con la lectura 6, en junio de 1968, una vez que había quedado completamente terminada su construcción.

En un primer vistazo sobre los gráficos anteriores observamos cómo todos los despla-

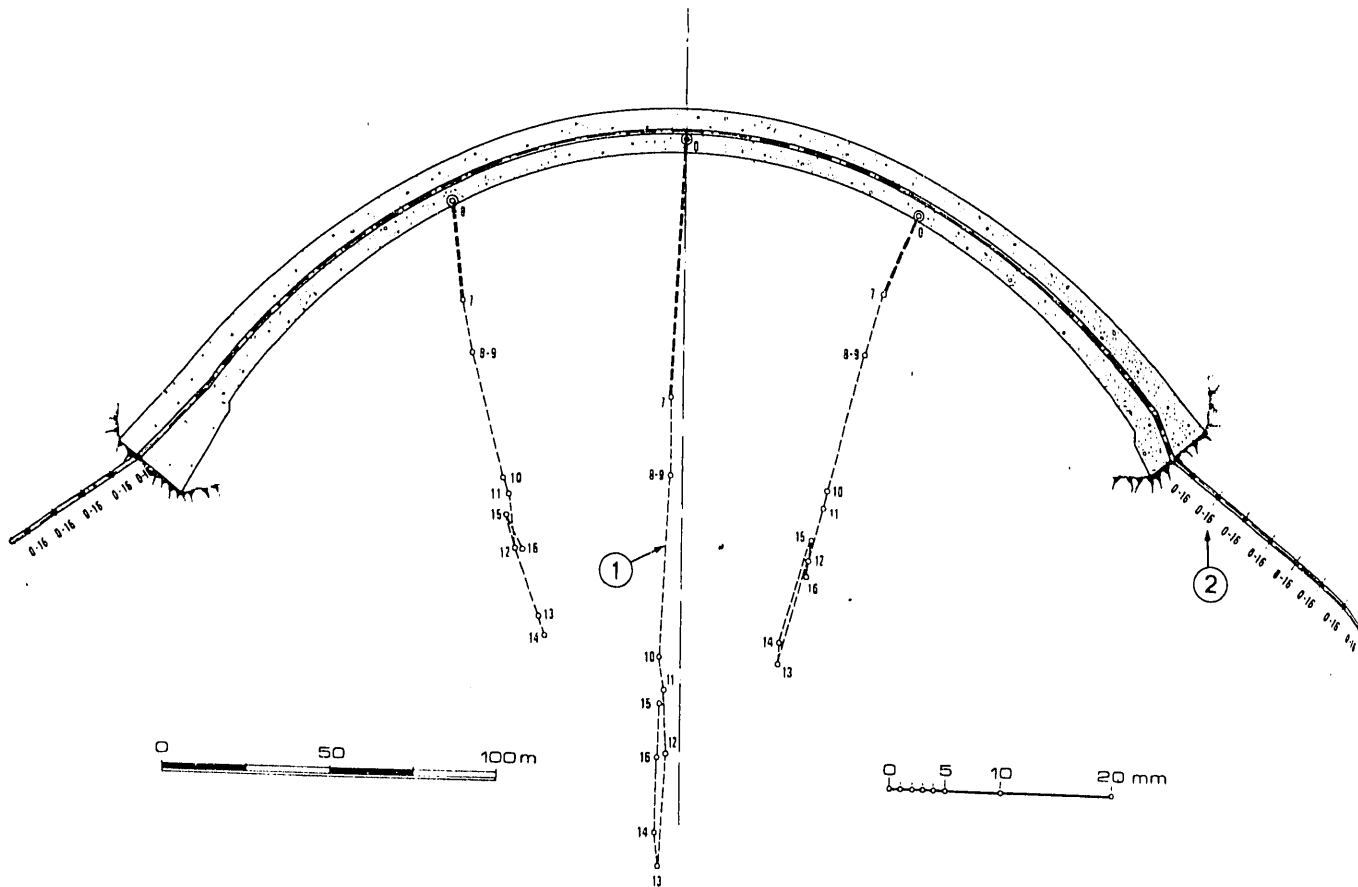


Fig. 53.—Desplazamientos de la sección por la cota 313 m.; 1, péndulos; 2, colimaciones en las galerías de drenaje.

lecturas más importantes de todas las que se han realizado, que hemos procurado hacerlas coincidir con las cotas y fechas más representativas de la historia del embalse.

Como hemos indicado durante la construcción, teníamos puntos provisionales para la auscultación geodésica que nos han permitido conocer las deformaciones de la presa durante la construcción, y, al mismo tiempo, una vez concluida ésta, situar con sus coordenadas los puntos donde se encontraban realmente los péndulos antes de comenzar a proporcionar medi-

mientos originados tanto en el terreno como en la estructura están dentro del mismo orden de magnitud que habíamos obtenido bien a través del cálculo analítico, bien a través de los diversos ensayos en modelo.

Notamos también cómo las deformaciones de la estructura presentan una ligera disimetría, acusándose más los desplazamientos de la margen izquierda; lo que está perfectamente de acuerdo no sólo con la mayor deformación de la cimentación en este margen, como luego veremos más adelante, sino también y de manera

particular con la propia disimetría de la estructura, no sólo en los estribos, el izquierdo de mayores dimensiones más esbelto, sino también en el zócalo; concretamente en los bloques 10 y 11, simétricos respecto al eje de la presa, mientras que en el primero la profundidad media del zócalo es de 9 m., en el segundo alcanza los 25 m.

No creemos que sobre esta disimetría ten-

plazamientos, sino también en cuanto a sus componentes tangenciales.

Cabe resaltar la notable coincidencia de los desplazamientos en la coronación, cota 357, entre los obtenidos con los péndulos y la auscultación geodésica, teniendo en cuenta que los primeros no acusan los movimientos de la cimentación y que sus medidas están referidas a

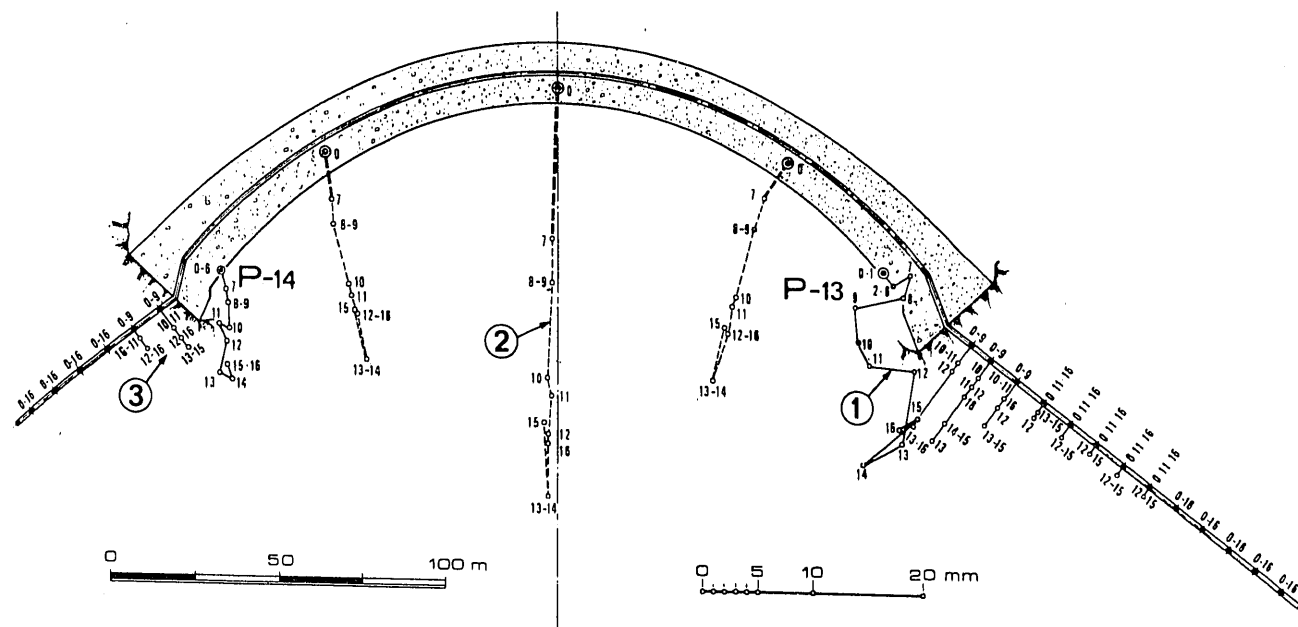


Fig. 54.—Desplazamientos de la sección por la cota 282 m.; 1,auscultación geodésica; 2, péndulos; 3, colimaciones en las galerías de drenaje.

ga alguna influencia apreciable el efecto de la insolación, que a causa de la orientación de la estructura se deja sentir más en la época del invierno sobre la margen izquierda que sobre la derecha.

Especialmente notamos la extraordinaria influencia del efecto térmico. Por ejemplo, entre las lecturas 13 y 14, en que el embalse se mantiene a su máximo nivel, la presa se desplaza uniformemente hasta 10 mm. hacia aguas arriba solamente por el hecho de pasar del mes de abril a junio; análogamente entre las medidas 15 y 16, teniendo el embalse la cota 340 en ambas, la estructura se desplaza unos 20 mm. hacia aguas abajo, esta vez por acusar el descenso de temperatura de agosto a noviembre. Y este hecho no solamente en cuanto a las componentes radiales de los vectores de los des-

plazamientos, sino también en cuanto a sus componentes tangenciales. unos puntos situados 6 m. más abajo, o sea, a la cota 351, y, por tanto, han de ser necesariamente menores. Ello nos ha servido como comprobación inestimable del correcto planteamiento y proceso de datos establecidos para la auscultación geodésica.

Los valores obtenidos para las deformaciones en la fundación también se muestran acordes con la intensidad de las cargas, pero nos parece que de forma especial con las características tectónicas. En efecto, una vez que el embalse alcanzó su cota máxima y se mantuvo en ella durante tres meses, los movimientos normales a la fundación y dirigidos hacia el interior del macizo rocoso siguiendo, aproximadamente, la dirección longitudinal de las galerías de drenaje, y deducidos de la auscultación geodésica a la altura de las cotas 282 y 251 m., dan

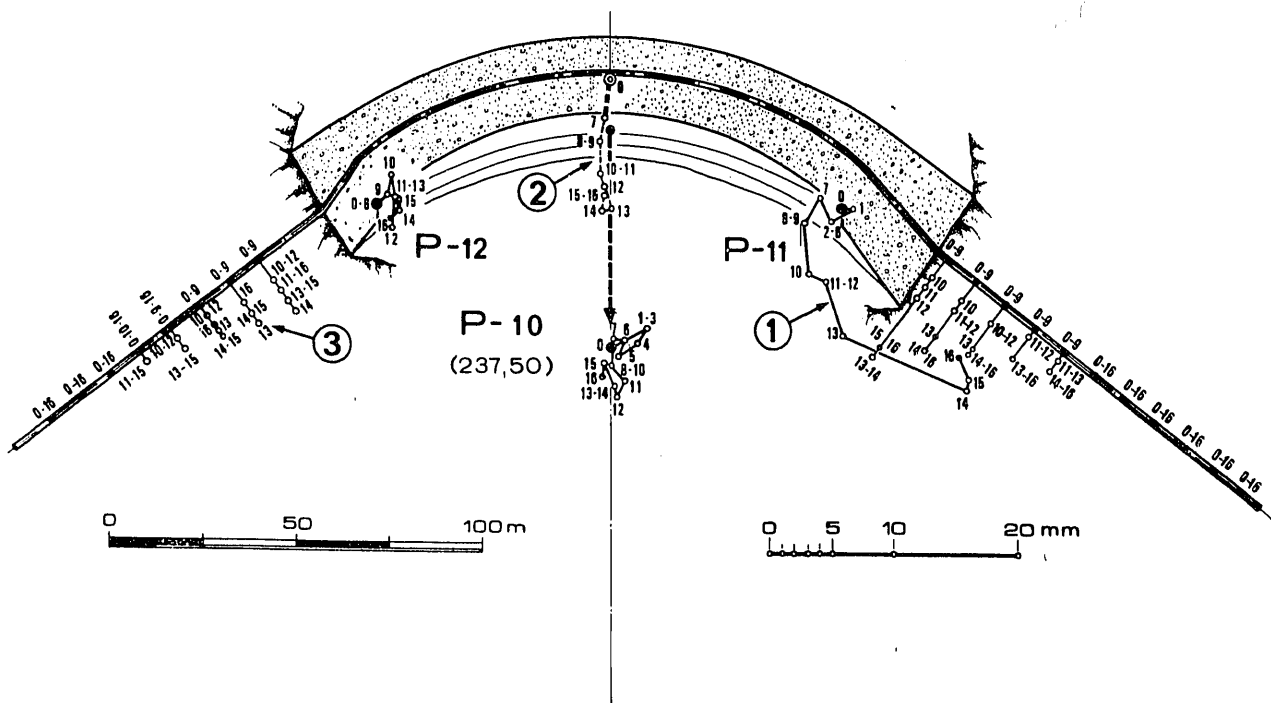


Fig. 55.—Desplazamientos de la sección por la cota 251 m.; 1, auscultación geodésica; 2, péndulos; 3, colimaciones en las galerías de drenaje.

las siguientes cantidades: 8 y 16 mm. para la margen izquierda, y 5 y — 1 mm. para la derecha, valores que tienden a disminuir hacia las cotas altas. Este marcado desequilibrio entre ambas márgenes radica, a nuestro modo de ver, en la presencia de dos notables accidentes tectónicos en la margen izquierda, el C y el D, con dos metros de espesor milonítico y arcilloso cada uno, y presentando sus planos de falla en la dirección normal a dichos movimientos, que a pesar de su detenido tratamiento no tiene nada de particular que hayan originado asientos hasta 1 centímetro mayores que en la margen derecha.

Los movimientos transversales a estos, o sea, los tangenciales a la cimentación, medidos desde las bases fijas en el interior de las galerías de drenaje y comprobados por la auscultación geodésica de los puntos próximos situados a la altura del zócalo también en la misma fecha, son los siguientes en las cotas 313, 282 y 251 metros; 0-12-11 mm. en la margen izquierda y 0-6-8 mm. en la margen derecha, respectivamente, notándose también aunque menos acusada y en nuestra opinión por las mismas causas, la disimetría anterior, y siendo las deformaciones de la zona inferior mayores que las de la zona

superior en razón de la magnitud de los esfuerzos unitarios, especialmente el cortante; no dejando de ser sorprendente que en la cota superior de las anteriormente indicadas sean nulos estos movimientos precisamente en ambas márgenes, quizá por el efecto rigidizador de los estribos sobre los esfuerzos y movimientos transmitidos por la bóveda en aquella zona.

La zona central de la cimentación en el eje de la presa prácticamente no se ha movido habiendo experimentado el punto situado sobre el zócalo, 11 m. por encima, un desplazamiento máximo hacia aguas abajo de 3 mm.

Es curioso notar en los propios gráficos, donde hemos reflejado los desplazamientos en el plano horizontal, cómo estos movimientos en la cimentación, o sea en el contacto roca hormigón no quedan totalmente amortiguados hasta una cierta profundidad dentro del macizo rocoso, profundidad que en algunas ocasiones es del orden de 50 m., indistintamente en ambas márgenes. Y también como tampoco se han apreciado en los mismos puntos medidas discrepantes entre los correspondientes al hormigón y a la roca, que indicaran un marcado deslizamiento entre la fábrica y el terreno.



Asimismo, es interesante constatar cómo el monitorio sobre el que se apoya e incide el flanco izquierdo de la presa, a pesar de su marcada esbeltez natural, no ha representado de por sí ningún desequilibrio mecánico para el comportamiento de la presa, a la vista de los desplazamientos tangenciales de esta zona de la cimentación completamente similares a los de la margen derecha, mucho más rígida y con un grado de empotramiento mayor para la estructura.

Indicaremos, por último, cómo será sumamente interesante comprobar, cuando el embalse se descargue suficientemente y recupere nuevamente las cotas 290-300 m. en condiciones térmicas similares, la magnitud de las primeras deformaciones irreversibles totales sobre todo las originadas en régimen plástico, a nuestro modo de ver, importante en la estructura, pero, sobre todo, en el terreno dado el índice de fisuración y tectonización de la roca, para iniciar el análisis de su futuro comportamiento, y en consecuencia, de la evolución de la estabilización de la presa.

A título indicativo podemos observar cómo entre las lecturas 10 y 16, efectuadas ambas a la cota 340 m. y con condiciones térmicas algo similares, ya se nos acusan especialmente en la zona superior de la presa y en las zonas laterales de la cimentación movimientos no recuperables hacia aguas abajo del orden de 1 cm. y 0,5 cm., respectivamente, valores que consideramos normales dadas las características de esta obra.

#### 3.4. El desplazamiento de la clave

Como dato no sólo curioso, sino también característico y representativo de los movimientos generales de la presa, exponemos en la figura 56 el desplazamiento total de la clave una vez que el agua alcanzó la cota 351 m., nivel de máximo embalse.

Este desplazamiento ha tenido dos fases: la primera, corresponde al movimiento de la estructura bajo los efectos del embalse parcial antes de la inyección de las juntas, con el agua a la cota 295 m.; la segunda, corresponde al periodo siguiente, hasta que el agua alcanzó la cota 351 m. Para medir estos movimientos ha sido preciso proceder a diversas interpolacio-

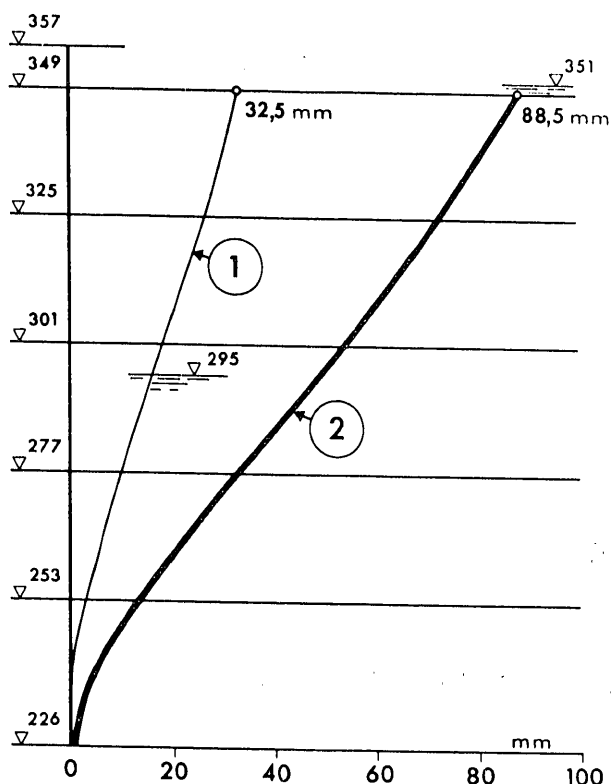


Fig. 56. — Desplazamiento de la clave: 1, antes de la inyección de las juntas hasta enero de 1968; 2, desplazamiento global hasta abril de 1969 con el embalse a su nivel máximo.

nes dado que, como ya hemos indicado, hubimos de desechar la auscultación geodésica del punto situado en la clave sobre la pasarela de coronación, no contando tampoco con el péndulo central más que hasta la cota 330 m.

Para deducir el movimiento de la primera fase nos hemos valido de los desplazamientos facilitados por la auscultación geodésica hasta enero de 1968, en los puntos provisionales instalados a la cota 295 m., extrapolándolos hasta la coronación con la misma directriz que han adoptado las deformadas suministradas posteriormente por los péndulos para unos desplazamientos idénticos a los anteriores en aquella misma cota. En la segunda fase, o sea, a partir de la fecha en que comenzaron a inyectarse las juntas, y hasta la lectura 6, indicada en la figura 3, el movimiento de la clave lo hemos deducido por el mismo procedimiento anterior. A partir de la lectura 6, en que ya contamos con la auscultación geodésica de las zonas laterales de coronación, hemos podido componer

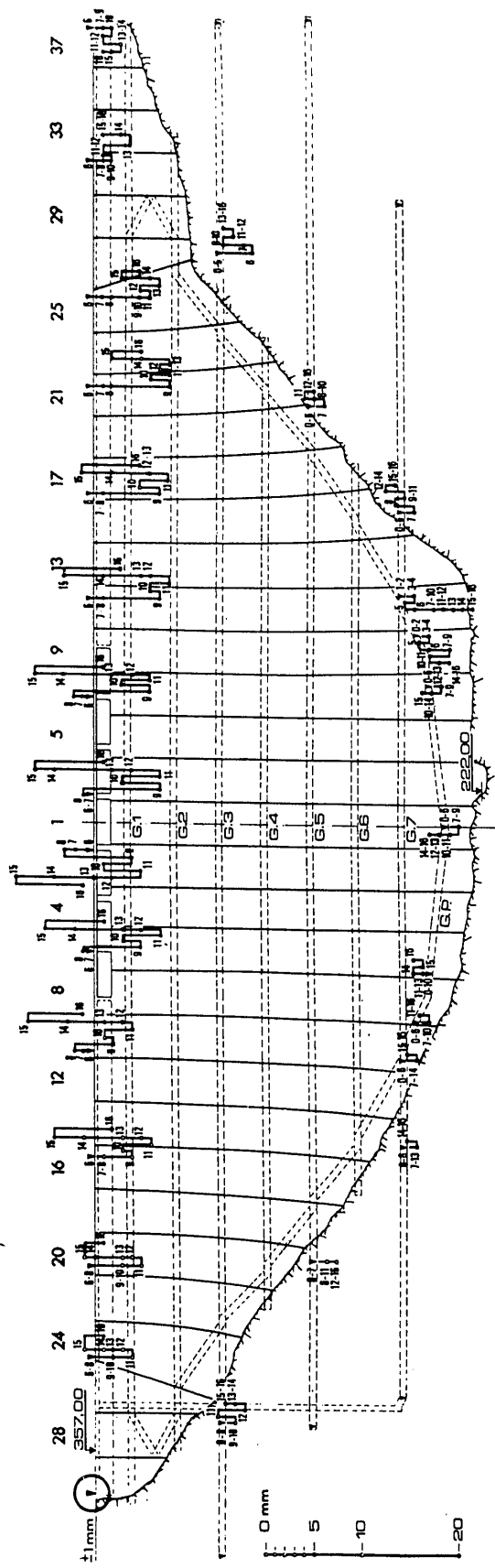


Fig. 57.—Movimientos verticales en la coronación y contorno de la cimentación.

le deformada absoluta de la cota 357, fijando sobre ella el vector correspondiente a la clave por la dirección deducida de los movimientos del péndulo central. Desde ese punto hemos podido enlazar la deformada real apoyándonos por un lado en el punto P-10 de la auscultación geodésica, a la cota 237,50 y, por otro, con la referencia de la directriz de la deformada del péndulo central.

De esta forma, hemos deducido para la primera etapa y con el embalse a la cota 295 metros un desplazamiento de módulo 32,5 mm. a la cota 349 m., que corresponde al último arco de la presa; para la segunda fase el desplazamiento deducido tiene un módulo de 56 mm.; como estos vectores están prácticamente alineados, el desplazamiento vectorial alcanza un módulo global de 88,5 mm., valor que está de acuerdo con aquellos otros obtenidos a través de los diversos ensayos en modelo y con el facilitado por el cálculo analítico, teniendo en cuenta las hipótesis de carga y demás efectos considerados en cada caso.

### 3.5. Los desplazamientos en el plano vertical

Nos los proporcionan en primer lugar las nivelaciones realizadas a lo largo de la coronación de la presa con bases de referencia alejadas de la misma que enlazan con las nivelaciones efectuadas sobre el talud de la margen derecha al que nos referiremos a continuación; en segundo lugar, las nivelaciones realizadas en el interior de las galerías de drenaje desde bases fijas situadas en el fondo de las propias galerías, y en tercer lugar las nivelaciones del pie de aguas abajo del zócalo, donde hemos situado una cadena de puntos controlados desde un itinerario suficientemente alejado.

Con ellos hemos pretendido determinar los movimientos verticales de todo el contorno de la presa, coronación y cimentación que completan plenamente aquellos otros a que nos hemos referido del plano horizontal. En la figura 57 incluimos los valores de todos estos movimientos en las fechas más características de las oscilaciones del embalse consignadas en la figura 3; los de coronación van referidos a una base del bloque 30, de la que hemos apreciado variaciones del  $\pm 1$  mm. Es de notar cómo estos movimientos son, en general, muy pequeños, acusándose más en el centro de la presa, donde

tanto por efecto de las cargas como de la temperatura se obtienen oscilaciones que no llegan al  $\pm 1$  cm., con amplitudes máximas inferiores a 1,5 cm.; notando también cómo la presencia de las deformaciones residuales están mucho más amortiguadas que en los desplazamientos horizontales, tratándose en cualquier caso de valores muy reducidos.

Hay que notar cómo en el bloque 11 se advierte un asiento de hasta 7 m., precisamente por encontrarse apoyado sobre una zona en que la roca presentaba una importante cuña formada por los accidentes que hemos denominado E y F, y cuyo encaje ha venido reflejado por los asientos de este bloque y del contiguo.

#### 4. El comportamiento del talud de la margen derecha

Desde un principio se nos pusieron de manifiesto las delicadas características, tanto geológicas como geométricas, resultantes de la ex-

cavación de este talud a fin de lograr un emporamiento adecuado de la presa en aquella ladera. Su desnivel de algo más de 200 m., por incluir al camino de rodadura de los blondines, comportó una extracción de 350-400 000 m.<sup>3</sup> de roca.

Esta excavación se realizó por fases sucesivas, a fin de no provocar decompresiones de gran volumen en el macizo que pudieran afectar a las obras adyacentes, blondines y toma de agua; pudiéndose cimentar la obra a principios de 1966, aprovechando la estabilidad temporal que habíamos logrado alcanzar. Sin embargo, durante la construcción de la presa observamos que el talud se desplazaba hacia la vertiente a razón de 0,5-1 cm. por mes, por lo que decidimos en octubre de 1967 realizar una primera serie de anclajes estáticos, una vez que consideramos suficientemente liberado el macizo de sus tensiones interiores y cuando habíamos apreciado en los diversos puntos provisionales de observación desplazamientos globales de 15 a 25 cm.

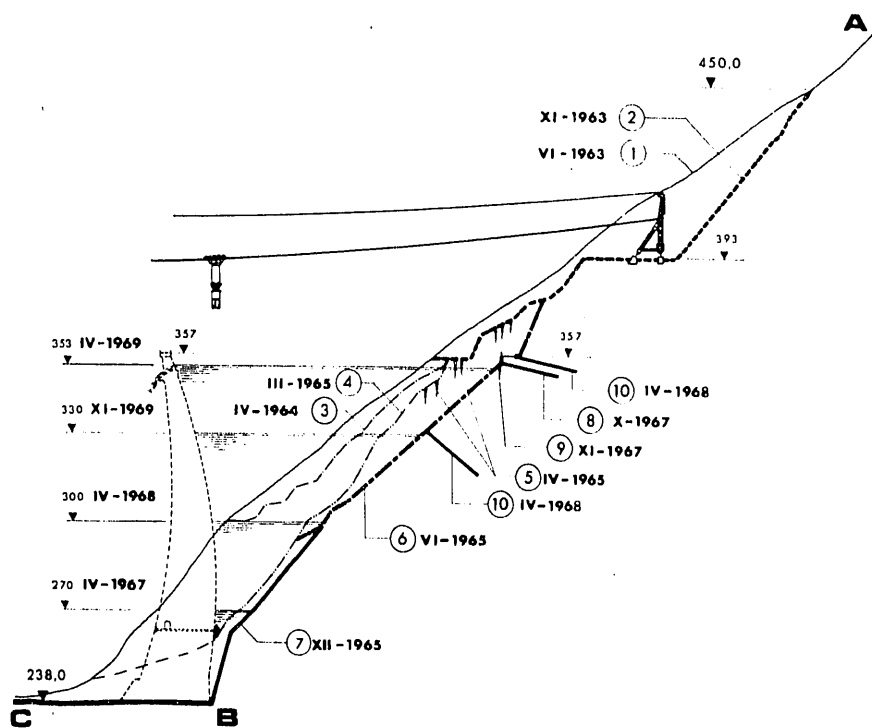


Fig. 58.—Evolución del perfil del talud de la margen derecha. Anclajes de consolidación: 1, primitivo terreno natural; 2, excavación previa de la carretera de acceso y del camino de rodadura de los blondines; 3, Limpieza preliminar con bulldozer de la roca más alterada; 4, fases sucesivas de excavación con explosivos; 5, fisuración más importante de las que se produjeron en los diferentes perfiles del talud; 6, nueva limpieza con bulldozer y saneo a mano; 7, perfil definitivo antes de cimentar la presa; 8, primera serie de anclajes estáticos; 9, fisuración resultante del efecto anclaje; 10, segunda y tercera series de anclajes.

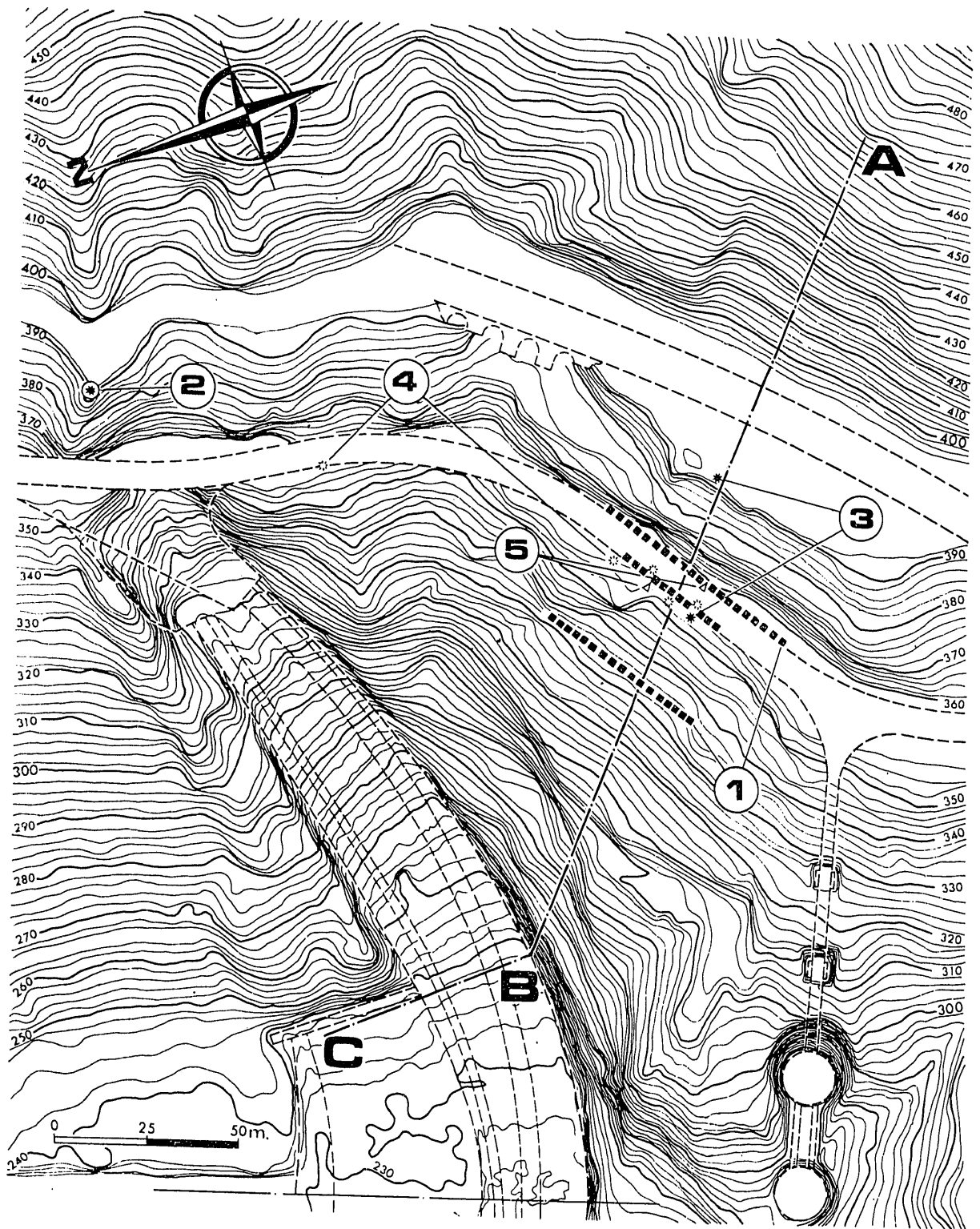


Fig. 59.—Estado final de las excavaciones de la presa y toma de agua. Sistema de observación para las deformaciones del talud: 1, anclajes estáticos; 2, base geodésica; 3, puntos de auscultación geodésica; 4, puntos de nivelación; 5, telemedidores de roca.

Es importante notar que los anclajes han sido puramente estáticos y no dinámicos, ya que no hemos querido coartar la libertad de la roca al liberarse de sus tensiones internas y añadir esfuerzos complementarios que modificarán las condiciones de equilibrio del talud.

En la figura 58 resumimos la historia de la ejecución y tratamiento de este talud.

#### 4.1. Sistema general de observación

Hemos situado sobre el talud dos puntos a diversas cotas, cuyo movimiento es controlado desde bases geodésicas exteriores; además de estos puntos existen cuatro puntos más, situados a la misma cota que la coronación de la presa como zona más sensible del talud, que se nivelan para conocer los asentos verticales de la roca.

A partir de la primera serie de anclajes a que nos acabamos de referir y hasta la primavera de 1968, los movimientos que apreciamos en el talud fueron mucho menores, asentos hasta de 18 mm. y desplazamientos hacia el valle de 3 milímetros, por ello decidimos proseguir su consolidación con una segunda y una tercera serie de anclajes del mismo tipo que los anteriores que nos iban a marcar el comienzo de otra nueva etapa de observaciones, para en función de ellas aplicar el tratamiento correspondiente.

Después de estos últimos tratamientos las medidas geodésicas y las nivelaciones han comenzado a suministrar medidas más estabilizadas, dentro de un entorno de  $\pm 2$  mm. de oscilación. Sin embargo, en agosto del mismo año y para apreciar cualquier pequeño movimiento en el interior de la roca que nos sirviera de aviso para detectar otros ulteriores movimientos de mayor importancia, instalamos en el talud dos telemedidores de roca Huggenberger de unos 20 m. de longitud, con vistas a la aparición de un nuevo parámetro del problema: las oscilaciones de nivel del embalse (fig. 59).

A partir de este momento, las deformaciones del talud se han mantenido prácticamente invariables; no obstante, nos ha sido posible seguir las en sus más pequeñas variaciones con este sistema de observación. Fue interesante como, al rebosar el embalse en el mes de abril de 1969, pudimos apreciar el efecto de la compresión de

la masa de agua sobre el talud, que se tradujo en un cambio de sentido en los desplazamientos precisamente hacia la montaña, aunque solamente del orden de algunas décimas de milímetro.

#### 4.2. Futuras previsiones

Creemos que con el método indicado hemos conseguido centrar el problema de la estabilización de este talud, aunque quede sin resolver de cara al futuro, al menos de manera definitiva. Las variaciones del embalse, que introducirán sucesivos ciclos de carga o descarga sobre el macizo rocoso, forzosamente han de desembocar en un estado de fatiga que muy bien pudiera hacer cambiar el estado general de equilibrio.

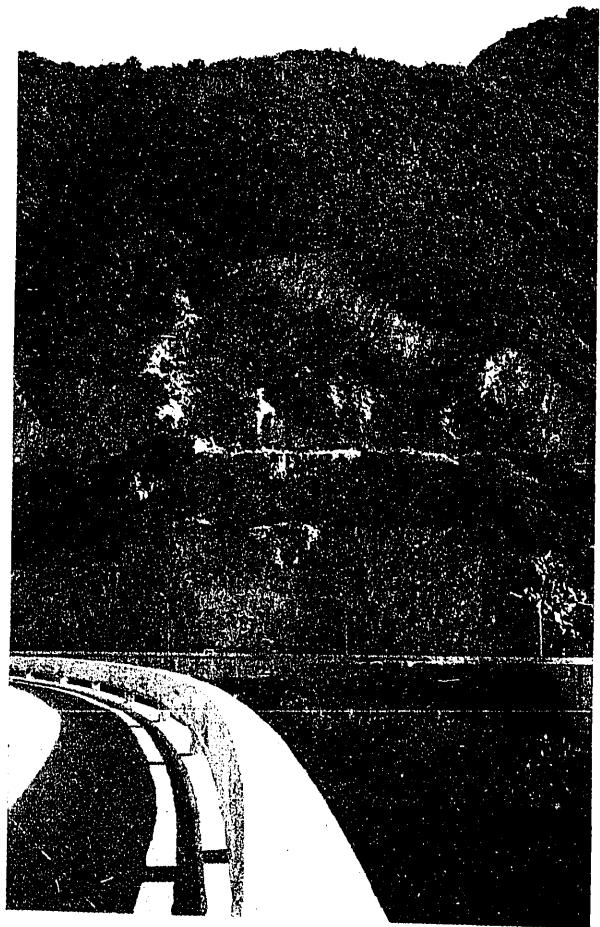


Fig. 60.—Vista del talud desde la coronación de la presa en noviembre de 1969.

En la actualidad el embalse ha descendido aproximadamente 25 m., sin que se haya vuelto a apreciar deformaciones ni en las coordenadas de los puntos de observación, ni asientos, ni variaciones notables en los comparadores de los teledadores. Lo cual no quiere decir que en un descenso fuerte del embalse se puedan producir (fig. 60).

En todo caso, con los datos que poseemos sobre su comportamiento desde que se comenzó la excavación, unidos a los de la geología de la roca del macizo y los que nos puede suministrar en cualquier momento el sistema de observación que acabamos de referir, creemos, y esto es, a nuestro modo de ver, lo más importante que cualquier eventualidad que se produjera y que respondiera a un movimiento del talud bien aislado o de conjunto, podríamos encauzarla con bastante conocimiento de causa hacia su más correcta solución.

### 5. Personal técnico colaborador

Durante la ejecución de la obra, el proceso de instalación de todos los aparatos de auscultación se realizó con la colaboración directa del Ayudante de Obras Públicas J. A. Granda; de las lecturas relativas a dichos aparatos se hizo cargo, desde aquel momento hasta la fecha, el facultativo de Minas J. López, habiéndose encargado a la vez de la vigilancia de la presa; de las medidas topográficas y geodésicas se ha encargado el topógrafo M. Olivar, especializado en estas técnicas.

### BIBLIOGRAFIA

- GOMEZ, M., BOLLO, M. F., ARGÜELLES, H. y PIQUER, J. "Traitement des roches de fondation par injections et son contrôle par la méthode géotechnique". VII. Congreso de Grandes Presas. Vol. I, Edimburgo, 1964.
- COMPTE, J. M.: "Nuevo abastecimiento de agua a Barcelona". Revista de Obras Públicas. Madrid, septiembre, 1966.
- REBOLLO, A.: "L'étude du terrain au barage de Susqueda". IX Congreso de Grandes Presas. Vol. V, Estambul, 1967.
- "Comptes rendus" al IX Congreso de Grandes Presas. Vol. VI, Estambul, 1967.
- "Presa de Susqueda. El proyecto". Revista de Obras Públicas. Madrid, agosto, 1967.
- "El sistema hidroeléctrico Sau-Susqueda-Pasteral". Electricidade, núm. 49. Lisboa.
- "El tratamiento y la comprobación de la cimentación en la presa bóveda de Susqueda". Revista de Obras Públicas. Madrid, diciembre, 1969.
- "Reinseignements sur la construction du barage route de Susqueda". X Congreso de Grandes Presas. Vol. IV, Montreal, 1970.
- "Procédé itératif dans la stabilisation d'un grand talus". II Congreso de Mecánica de las Rocas. Belgrado, 1970.
- OBERTI, G., y FUMAGALLI, E.: "Sul funzionamento statico della diga di Susqueda dall'analisi dei risultati sperimentali su modello". L'Energia Elettrica. Milán, julio 1970.