

AUSCULTACION DE PRESAS: TENDENCIAS GENERALES UN PROTOTIPO: VALDECAÑAS

Dr. Ing. C. C. P. D. MARTINEZ BOUDES

Por una parte el Ministerio de Obras Públicas, a través de su Servicio Nacional de Vigilancia de Presas, y por otra parte las distintas empresas concesionarias y constructoras, han sentido desde hace años, en mayor o menor grado, la preocupación de someter a observación las presas que de ellos dependen.

La presente nota tiene por objeto extractar en lo posible aquellos criterios que aparezcan como comunes a las distintas empresas y organismos encargados de la auscultación.

A efectos de la exposición clasificaremos las medidas según se refieran a:

- a) Cargas externas.
- b) Efectos de las cargas.
- c) Determinación de las propiedades y estudio de los materiales de construcción.

1. CONTROL DE CARGAS EXTERNAS.

Las cargas fundamentales correspondientes a nivel de embalse y a temperatura ambiente, se recogen de manera sistemática en la mayoría de las presas españolas. En los últimos años y en las estructuras que han presentado alguna peculiaridad en cuanto a situación o dimensiones, se controla también la temperatura del agua del embalse.

2. EFECTOS DE LAS CARGAS.

2.1. *En la observación de efectos de las cargas distinguiremos aquellos controles que son controles de seguridad o sintomáticos, de los de investigación o analíticos.*

Los primeros nos indican globalmente si la estructura se comporta de una manera normal o si, por el contrario, algo "no va bien en la presa". Entre ellos pueden incluirse como fundamentales las medidas geodésicas, las de colimación, los péndulos y los controles de subpresión. A efectos de esta exposición consideraremos las medidas de deformaciones internas y tensiones como pertenecientes es al segundo grupo.

De una manera general la observación de las presas españolas se centra fundamentalmente en el primer grupo. Dejando de lado los factores no técnicos que ayudarían a explicar esta situación, parece oportuno indicar que, salvo raras excepciones, la mayor parte de las presas españolas son estructuras con tensiones relativamente modestas. Consecuencia de ello es el interés de hacer observaciones de magnitudes que podríamos llamar, en el sentido matemático, integrales (por ejemplo, corrimientos absolutos de puntos de estructura), y no determinar tensiones o deformaciones unitarias.

Sin embargo, en las presas importantes recientemente construidas, y en las que actualmente están en construcción o en proyecto, las campañas de auscultación previstas cubren no solamente estas medidas sintomáticas, sino también las medidas analíticas suficientes para poder averiguar en análisis fino si el comportamiento de la estructura ha sido el previsto por el cálculo y el modelo, y para preparar una base instrumental que permita en la eventualidad de un mal funcionamiento localizar con exactitud aquellos parámetros estructurales que no respondan a las previsiones hechas.

Especialmente las últimas grandes bóvedas construidas o en construcción en España (Aldeadávila, Belesar, Valdecañas, La Barca...) están provistas de una red de aparatos de auscultación interna completa (medidores de juntas, extensómetros, deformámetros...).

2.2. Observaciones topográficas.

La experiencia española en este tipo de observaciones es extensa. Algunas presas se vienen observando por este procedimiento desde hace más de quince años (por ejemplo, La Cohilla, en que se han hecho más de 30 observaciones completas). Hay actualmente en España tres o cuatro grupos de especialistas que tienen experiencia en este tipo de trabajos, aparte de los equipos propios de algunas empresas hidroeléctricas. Los métodos de observación e interpretación varían según los realizadores, aunque se

15

tiende a abandonar los métodos gráficos de interpretación a favor de los métodos analíticos mecanizados.

2.3. Péndulos.

Las presas de importancia están equipadas con

troles se realizan también en los taladros de dicha pantalla, que han quedado abiertos.

2.5. Auscultación interna.

Para dar una idea de la densidad de aparatos instalados en alguna de las recientes grandes bóve-

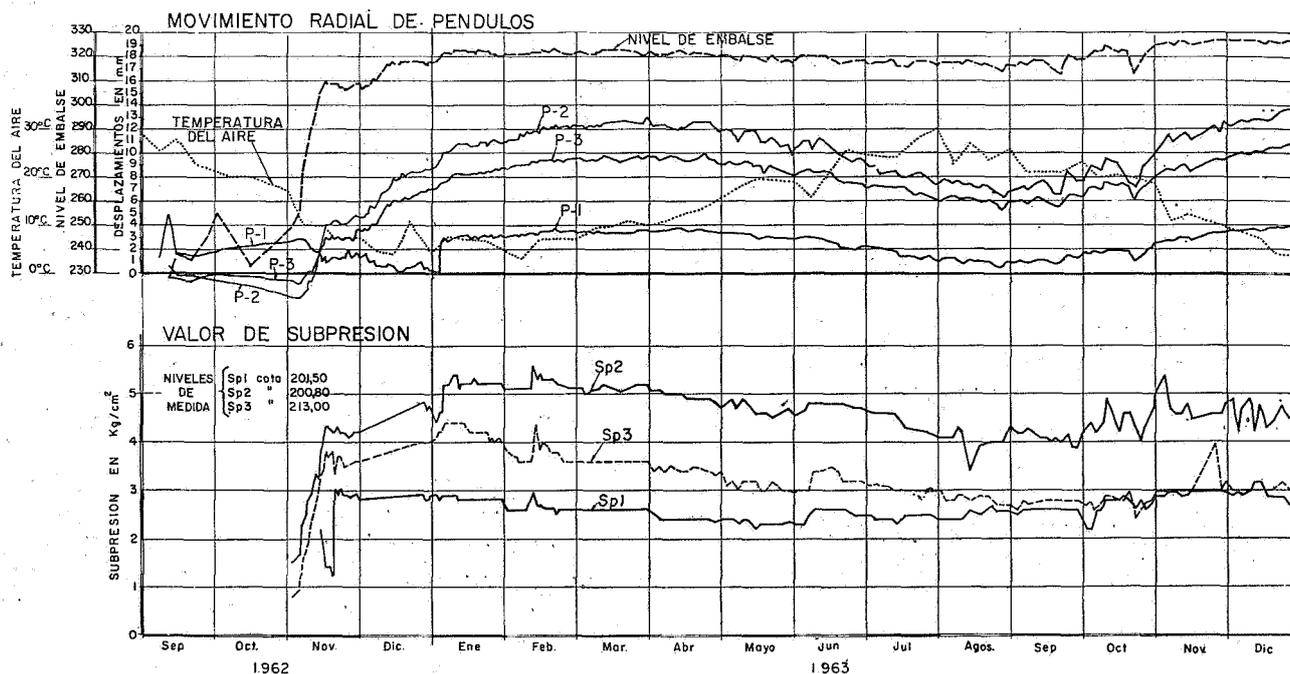


Figura 1.ª

péndulos que han demostrado ser instrumentos precisos y de interpretación segura; por ejemplo:

Belesar	6 péndulos.
Aldeadávila	3 " (fig. 1.ª).
Valdecañas	3 " "
Prada	3 " "
San Sebastián	2 " "

Es de destacar que esta última presa transmite por teletipo sus medidas a la oficina central de la Empresa concesionaria.

2.4. Medidas de subpresiones.

En la mayoría de las presas se controla diariamente el caudal de filtraciones y la subpresión, utilizando para ello los taladros de la pantalla de drenaje (fig. 1.ª). En algunos casos en que la inyección de la pantalla de impermeabilidad se ha hecho por el procedimiento de doble circulación, estos con-

das, se cita Belesar, en la que se han instalado 236 deformámetros, 54 medidores de junta y 220 termómetros. La figura 2.ª resume alguna de las medidas.

Los aparatos utilizados en las distintas presas son de resistencia o de cuerda vibrante, sin que hasta ahora pueda observarse una tendencia clara hacia ninguno de los dos procedimientos.

Se tiende a disminuir el número de puntos de observación, pero concentrando los aparatos en ellos. Por otra parte, parece aumentar en las últimas obras la proporción de aparatos de lectura directa de tensiones.

2.6. Intensidad y distribución de las mediciones.

El programa de auscultación empieza desde el momento en que se instala el aparato, y en algunas presas se han hecho estudios para determinar la

Fig. 1.ª—Presa de Aldeadávila. Corrimientos radiales y subpresiones. Sketch No. 1.—Aldeadávila dam. Radial displacement and uplift.

influencia del peso propio durante la construcción. En todo caso se establecen *a priori* unos programas de medida, condicionados a niveles de embalse y a variaciones de temperatura (que se consideran fundamentales para una buena interpretación de resultados). Aparte del control básico permanente durante la vida de la obra (con este propósito se instala, a veces, aparato registrador en uno de los péndulos), se fija la duración de la primera campaña de observaciones como el mayor de los dos intervalos de tiempo siguientes: dos años naturales a

no sean todas ellas interpretadas; si se descubre una anomalía, se puede remontar en la serie de lecturas hasta localizar su origen.

3. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES Y ESTUDIO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Aparte de los realizados en laboratorios de pie de obra, los estudios especiales de materiales de construcción se han venido confiando a alguno de los laboratorios de carácter nacional (Laboratorio

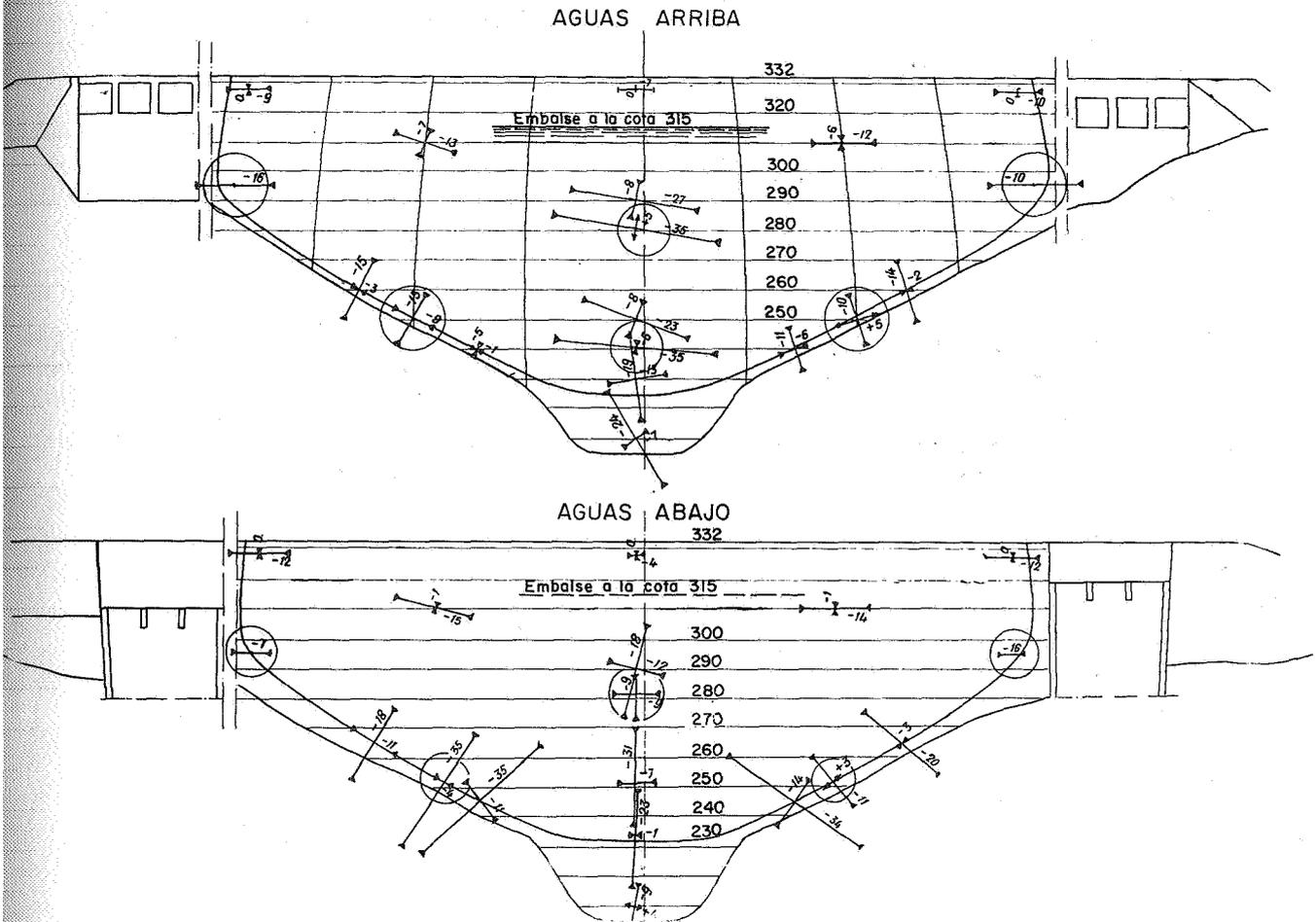


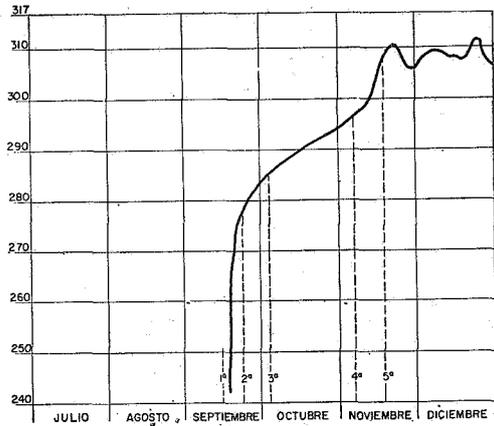
Figura 2.^a

partir de la terminación de la construcción; dos llenados hasta el máximo nivel, seguido de dos vaciados totales. La frecuencia de las observaciones depende mucho de los casos particulares, pero se tiende a hacer lecturas de aparato en exceso, aunque aquéllas que suponen un cálculo posterior laborioso

de Materiales de Construcción del Centro de Estudios y Experimentación del Ministerio de Obras Públicas, Instituto Eduardo Torroja, Centro de Estudios Hidrográficos, Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo...). Se tiende actualmente a complementar las informaciones del laboratorio

Fig. 2.^a — Presa de Belesar. Tensiones de carga hidrostática más peso propio (las tensiones en círculo son las obtenidas directamente del prototipo).

Sketch No. 2. — Belesar dam. Stresses of hydrostatic load plus dead load stresses (the circles indicate obtained directly from the prototype).



AÑO 1963
Figura 4.^a

con ensayos reológicos *in situ* del hormigón de las presas, y hace ya algunos años que se controla la evolución de módulos por procedimientos sónicos.

Ejemplos de la auscultación de la Presa de Valdecañas.

Se presentan a continuación algunos de los resultados que hemos obtenido durante la auscultación de la presa de Valdecañas, con ejemplos elegidos entre los tipos de medición a que nos hemos referido en la exposición de tendencias generales. La figura 3.^a resume el conjunto de los dispositivos

previstos en el proyecto, que se relacionan en el cuadro adjunto:

DENOMINACION	Aparatos colocados	Aparatos en servicio
Deformámetro ensayo reológico ..	I	I
Rosetas	R	34
Deformámetros tensionales. D	27	25
Deformámetros no tensionales	O	32
Tensímetros	T	15
Medidores de juntas.....	J	35
TOTAL	144	137
Captorees	C	123
PENDULOS:		
Puntos de lectura	7	7
Puntos de anclaje	2	2

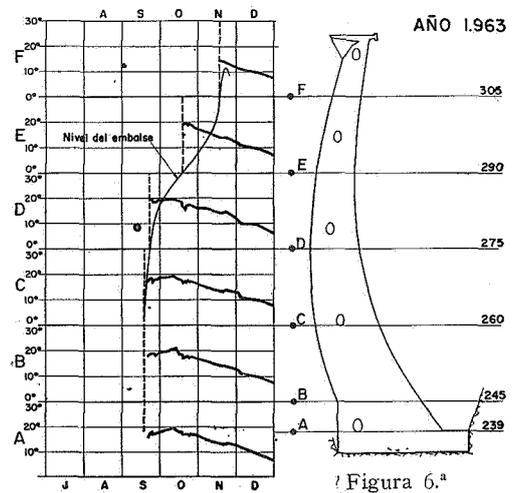


Figura 6.^a

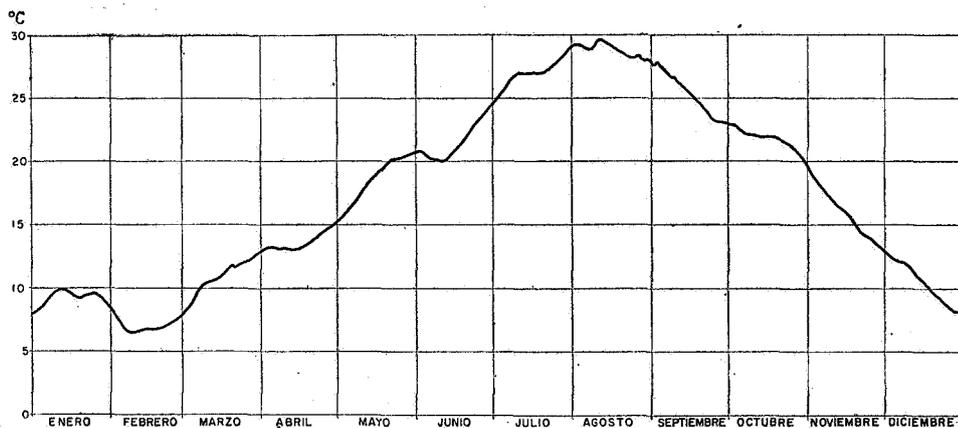


Figura 5.^a

- Fig. 4.^a—Nivel del embalse. Epocas de las observaciones geodésicas.
 Sketch No. 4.—Level of the reservoir. Periods of geodesic observations.
 Fig. 5.^a—Evolución de las medias de treinta días de la temperatura ambiente.
 Sketch No. 5.—Evolution of averages of 30 days of air temperature.
 Fig. 6.^a—Temperaturas del agua de embalse a diversas cotas.
 Sketch No. 6.—Temperatures of the reservoir water at different levels.

meses no hay diferencias apreciables de temperatura entre diversas cotas. La figura 7.^a representa el estado térmico de la presa poco antes de iniciarse la inyección de juntas.

2. EFECTOS DE LAS CARGAS.

2.1. Colimación y observaciones topográficas.

Se ha situado en la clave de coronación de la

presa una señal, cuyos corrimientos se observan por alineación desde un pilar fijo en el aliviadero de la margen derecha, con referencia a otra señal fija en el aliviadero de la margen izquierda. La alineación es sensiblemente tangente al arco, y con ella se mide el corrimiento radial de la clave mediante lectura directa sobre la escalilla de referencia.

Aguas abajo de la presa se ha establecido una red, formada por seis hitos de observación, triangulada y compensada con precisión geodésica. Los

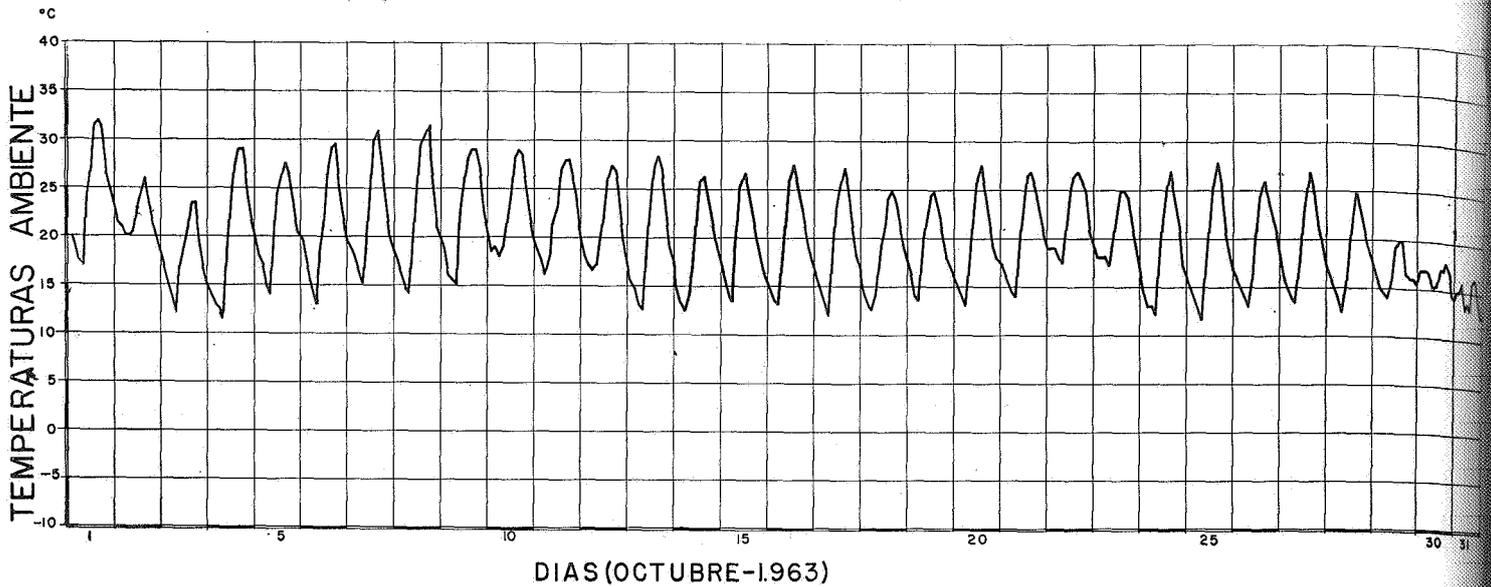


Figura 9.^a

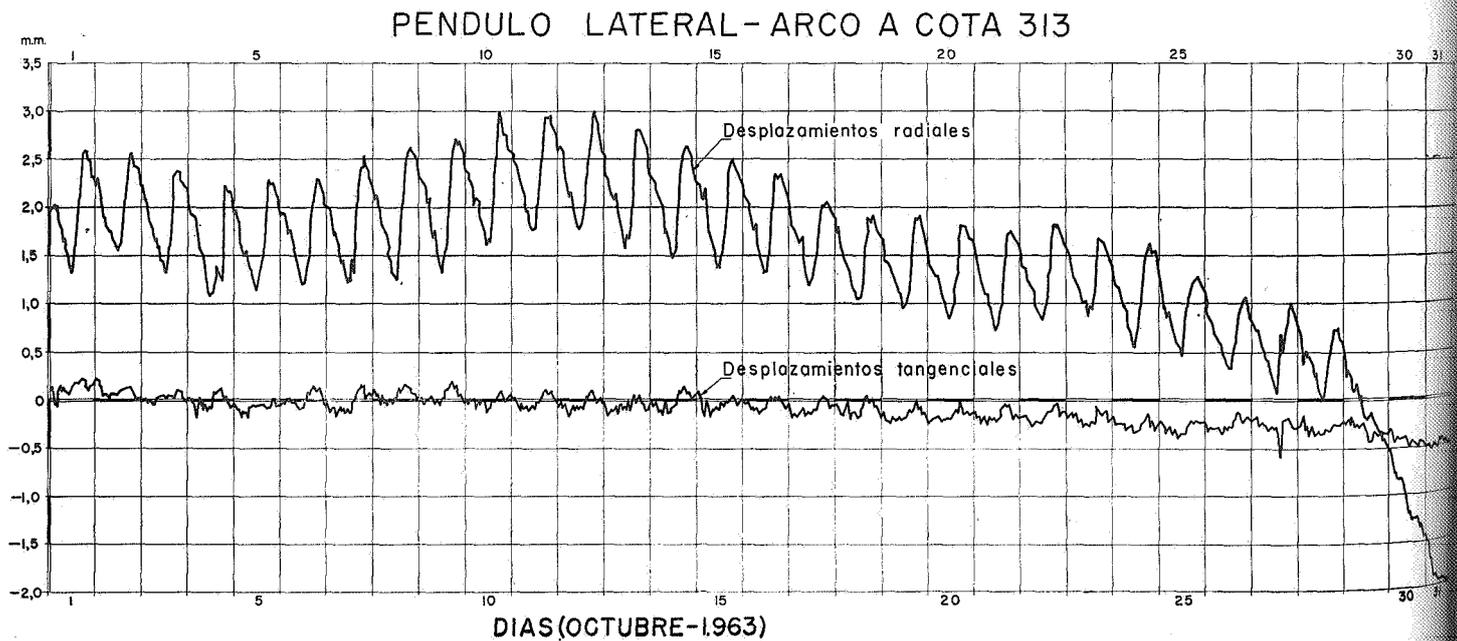


Figura 10.

Fig. 9.^a — Variación de la temperatura del aire.
Sketch No. 9. — Variation of the air temperature.

Fig. 10. — Desplazamientos diarios medidos con péndulo.
Sketch No. 10. — Daily displacements measured by a plumb-bob.

hitos son pilares de hormigón armado de gran sección, cuidadosamente cimentados, con placas especiales de apoyo para el teodolito, y están protegidos por una caseta. Existen a su vez hitos de referencia situados aguas abajo, a suficiente distancia de la

de la presa y de los estribos se han dispuesto 35 señales formando una malla de cinco filas horizontales y once columnas, que se observan desde los cuatro hitos más próximos a la presa.

Las señales utilizadas son cónicas, con ángulo de 50° en el vértice, forma que facilita la puntería con visuales inclinadas. El dispositivo de intercambio de señales y teodolito sobre los pilares permite asegurar un error de centrado sobre el vértice menor de 0,1 mm. Las observaciones se hacen utilizando dos teodolitos Kern DKM 3.

En coronación y prolongándose en la margen izquierda hasta un punto considerado fijo, se han colocado unas placas de apoyo de bronce, sobre las que se realizan nivelaciones de precisión. Estas placas de apoyo están situadas cada 28 m. dentro de la zona de bóveda.

En la figura 8.^a se resumen los corrimientos en planta de los puntos observados en uno de los arcos superiores. Los círculos trazados corresponden a círculos de error probable, determinados por el procedimiento de mínimos cuadrados, utilizando el conjunto de observaciones que corresponden a cada punto.

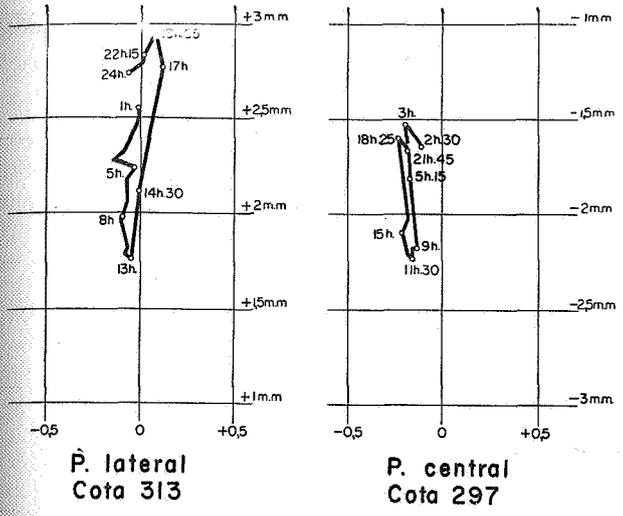


Figura 11.

presa, como para asegurar que en ellos son nulos los corrimientos. Sobre el paramento de aguas abajo



Figura 12.

Fig. 11. — Ciclo de desplazamientos por temperatura, correspondiente al día 11-X-63.
 Sketch No. 11. — Cycle of temperature displacements corresponding to the 11th October 1963.

Fig. 12. — Desplazamientos radiales medidos con péndulo.
 Sketch No. 12. — Radial displacements measured with a plumb-bob.

2.2. Corrimientos relativos.

Los corrimientos relativos de distintos puntos de la presa se miden mediante los péndulos.

Hemos previsto en Valdecañas la instalación de tres péndulos, aunque actualmente sólo hay dos en servicio: hay uno en la ménsula central y los otros

Las figuras 9.^a, 10 y 11 corresponden al análisis del movimiento diario de presa en un momento en que la carga hidrostática era pequeña.

El gráfico 9 representa la variación cíclica de temperatura ambiente que tiene un máximo hacia las diecisiete horas y un mínimo hacia las siete horas. El gráfico 10 corresponde a la variación cíclica

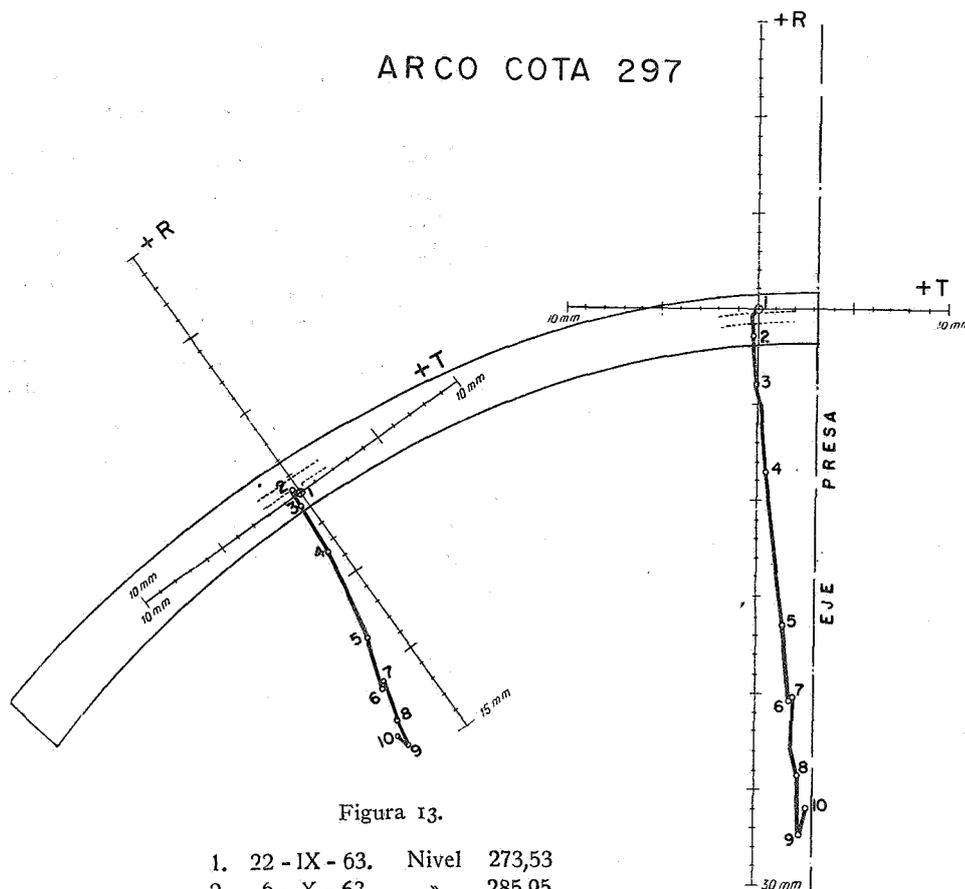


Figura 13.

1.	22 - IX - 63.	Nivel	273,53
2.	6 - X - 63.	»	285,95
3.	20 - X - 63.	»	290,67
4.	3 - XI - 63.	»	294,87
5.	17 - XI - 63.	»	305,51
6.	24 - XI - 63.	»	310,48
7.	1 - XII - 63.	»	306,03
8.	15 - XII - 63.	»	308,05
9.	22 - XII - 63.	»	310,33
10.	29 - XII - 63.	»	307,65

están en riñones de arcos simétricamente dispuestos con relación al eje de la presa. Los puntos de medida son cuatro, en el péndulo central, y tres, en los laterales. En el péndulo central se va a instalar un aparato teleregistrador para medir los corrimientos del punto de amarre a cota 297.

clica del desplazamiento en un péndulo lateral, consecuencia del ciclo de temperaturas. Se observa que al máximo de temperaturas corresponde un desplazamiento máximo hacia aguas arriba con un retraso de una hora, y a la temperatura mínima corresponde el máximo desplazamiento hacia aguas

Fig. 13.—Trayectorias en planta obtenidas por medio de los péndulos.

Sketch No. 13.—Horizontal trajectories obtained by means of the plumb-bobs.

abajo con un retraso de cinco horas. La figura 11 representa el movimiento en planta para un día cualquiera, tanto para el péndulo central como para un péndulo lateral. El máximo desplazamiento diario medido fué de 1,4 mm.

Las figuras 12, 13, 14 y 15 corresponden a un resumen de corrimientos radiales.

2.3. Deformaciones.

Las deformaciones unitarias en el interior de la obra se miden utilizando extensómetros de resistencia Carlson. Se han colocado en total 94 deformámetros, siguiendo dos criterios paralelos.

Uno de ellos es el de la comprobación en la

MENSULA CENTRAL

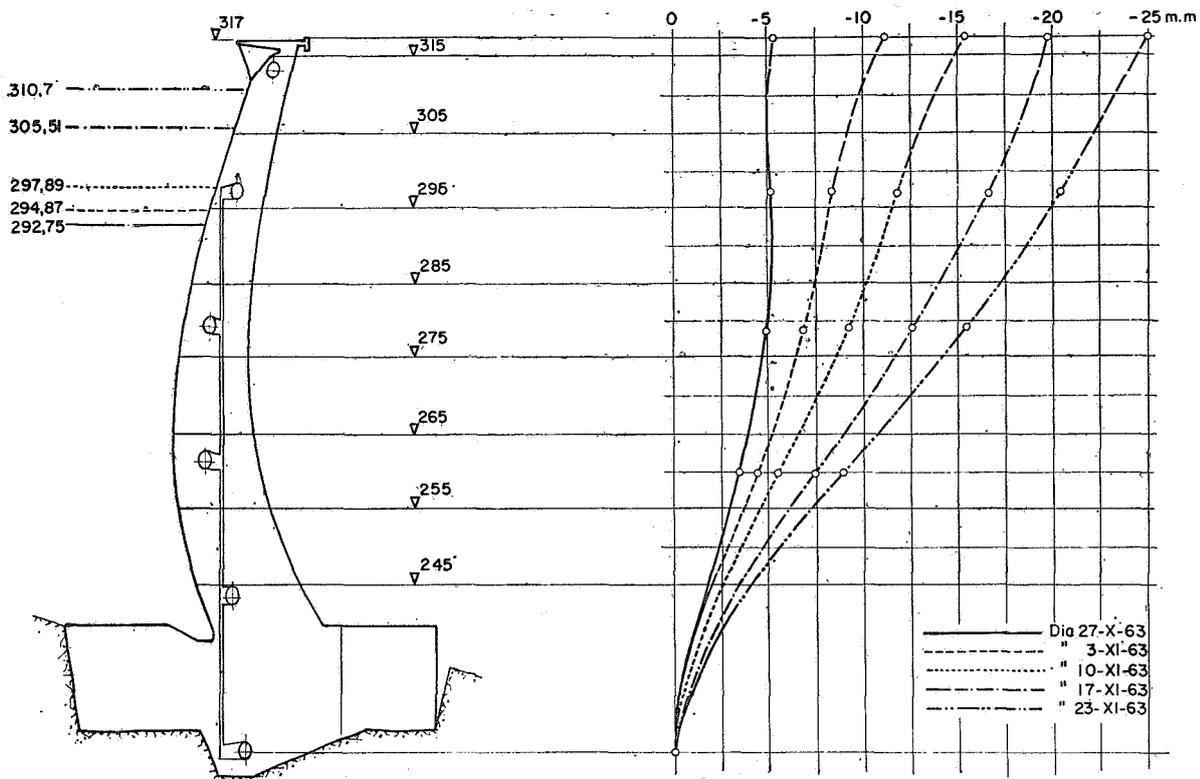


Figura 14.

El gráfico 12 da el corrimiento de dos puntos de la ménsula central en función del nivel de embalse. La figura 13 representa las trayectorias en planta de puntos del arco 297 obtenidas mediante los péndulos. En la figura 14 se representan, junto al perfil esquemático de ménsula central con galerías y disposición del péndulo, las deformadas a distintos niveles de embalse, trazadas por los puntos medidos. La figura 15 corresponde a la ménsula del péndulo lateral.

presa real de aquellos puntos de máximas tensiones, resultado de los cálculos y del estudio en modelo. En el otro se pretende poner en evidencia las modificaciones que puede sufrir el campo tensional de la presa bajo las condiciones reales de construcción y funcionamiento.

Se han instalado, por una parte, deformámetros aislados en aquellos puntos en que la dirección de las isostáticas es bien conocida, y rosetas superabundantes en aquellos en que se conoce peor. En

Fig. 14. — Deformadas radiales de la ménsula central y cotas de embalse en distintas fechas, obtenidas con péndulo y colimación. Sketch No. 14. — Radial deformations of the central cantilever and reservoir levels at different dates, obtained with plumb-bob and alignment.

todo caso, en cada punto de medida existe un deformámetro de tensión nula (deformámetro pasivo) que está aislado de los efectos de las cargas exteriores y nos sirve para medir las deformaciones autógenas y poder separar efectos en los deformámetros vecinos de tensión no nula.

del embalse. La temperatura media de los treinta días anteriores es de 24°. En el paramento de aguas arriba existen pequeñas compresiones horizontales bastante simétricas, salvo en la zona alta, debido a la distinta insolación de las dos mitades de presa. Aguas abajo, las compresiones inclinadas son de

MENSULA LATERAL

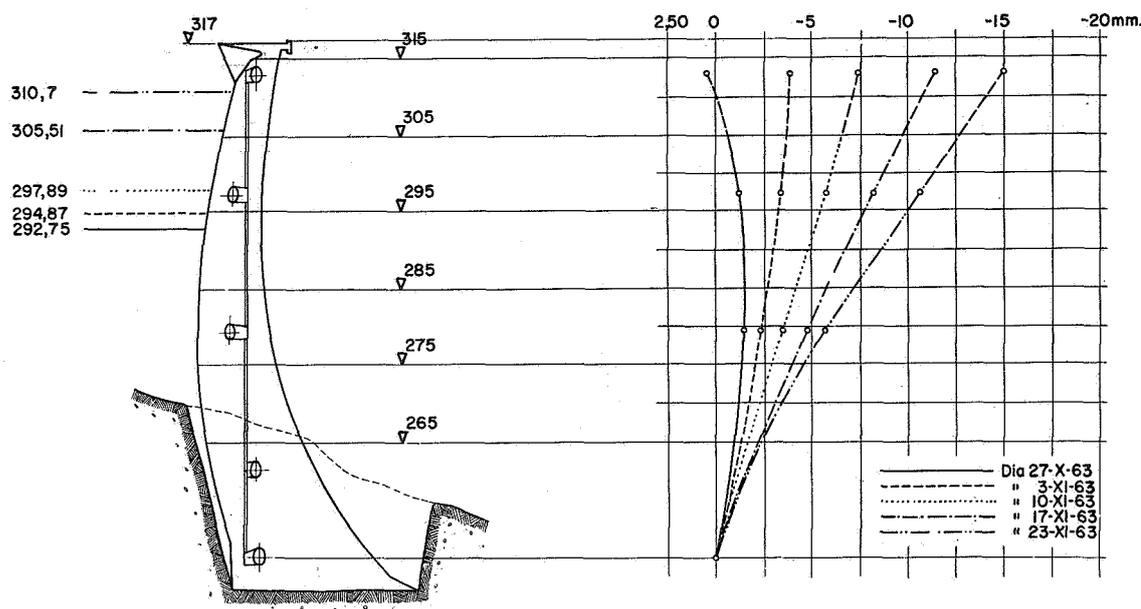


Figura 15.

2.4. Tensiones.

Se realiza la medición directa de tensiones mediante 15 tensímetros Carlson, cuyos criterios de aplicación son análogos a los de los deformámetros. Estos aparatos se utilizan para obtener resultados interpretados, sin más que unos rápidos cálculos de corrección térmica.

La figura 16 reproduce un gráfico-tipo de un tensímetro. Se observa que, estando el embalse vacío, a un aumento de temperatura corresponde un aumento de compresión. Esta disminuye muy rápidamente después de iniciado el descenso de temperatura. La carga hidrostática modifica el sentido de la variación de tensión a partir del mes de octubre.

La figura 17 corresponde a un mapa de tensiones inmediatamente antes de comenzar el llenado

15 Kg./cm.² a una cota media. En la figura 19 hemos representado las tensiones con nivel de embalse 308,5 y temperatura media de los treinta días anteriores de 12°. Aguas arriba, las compresiones han aumentado a cota 290 y han disminuido en el resto, siendo de destacar la disminución de la tensión vertical en el pie de ménsula por efecto de la carga hidrostática. Aguas abajo, las tensiones son algo mayores que en la figura anterior y su distribución menos simétrica.

2.5. Juntas.

La variación de ancho de las juntas en los paramentos y galerías descritas se ha medido mediante deformámetros mecánicos Huggenberger. Sus resul-

Fig. 15. — Deformadas radiales de la ménsula lateral y cotas de embalse a distintas fechas, obtenidas con péndulo.

Sketch No. 15. — Radial deformations of the lateral cantilever and reservoir levels at different dates, obtained with plumb-bob.

TENSIMETRO T.4 BLOQUE - M.I-4 Cota 279, aguas arriba, horizontal

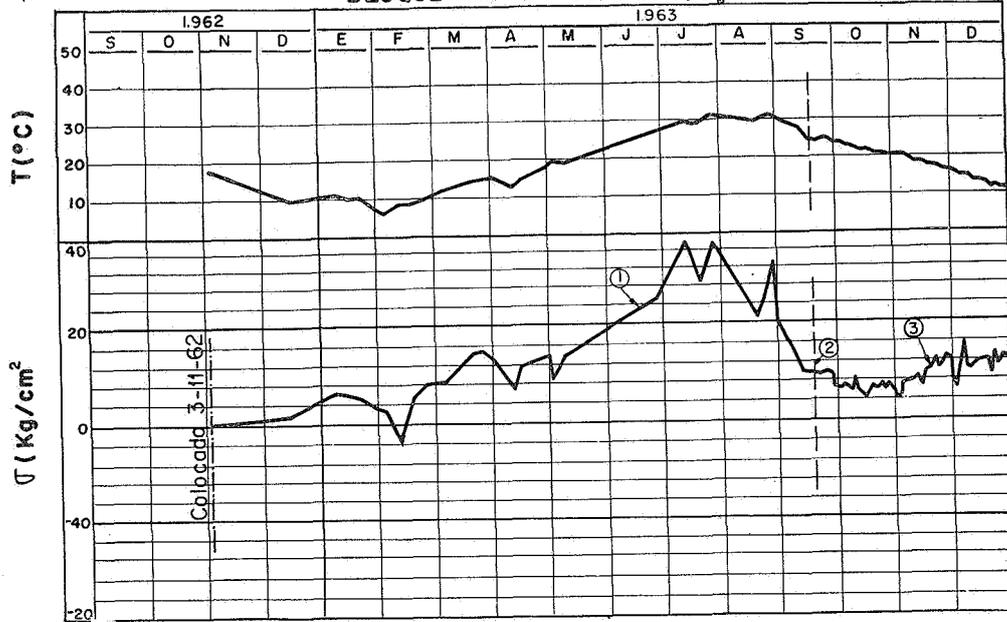


Figura 16.

TENSIONES MEDIDAS CON TENSIMETROS

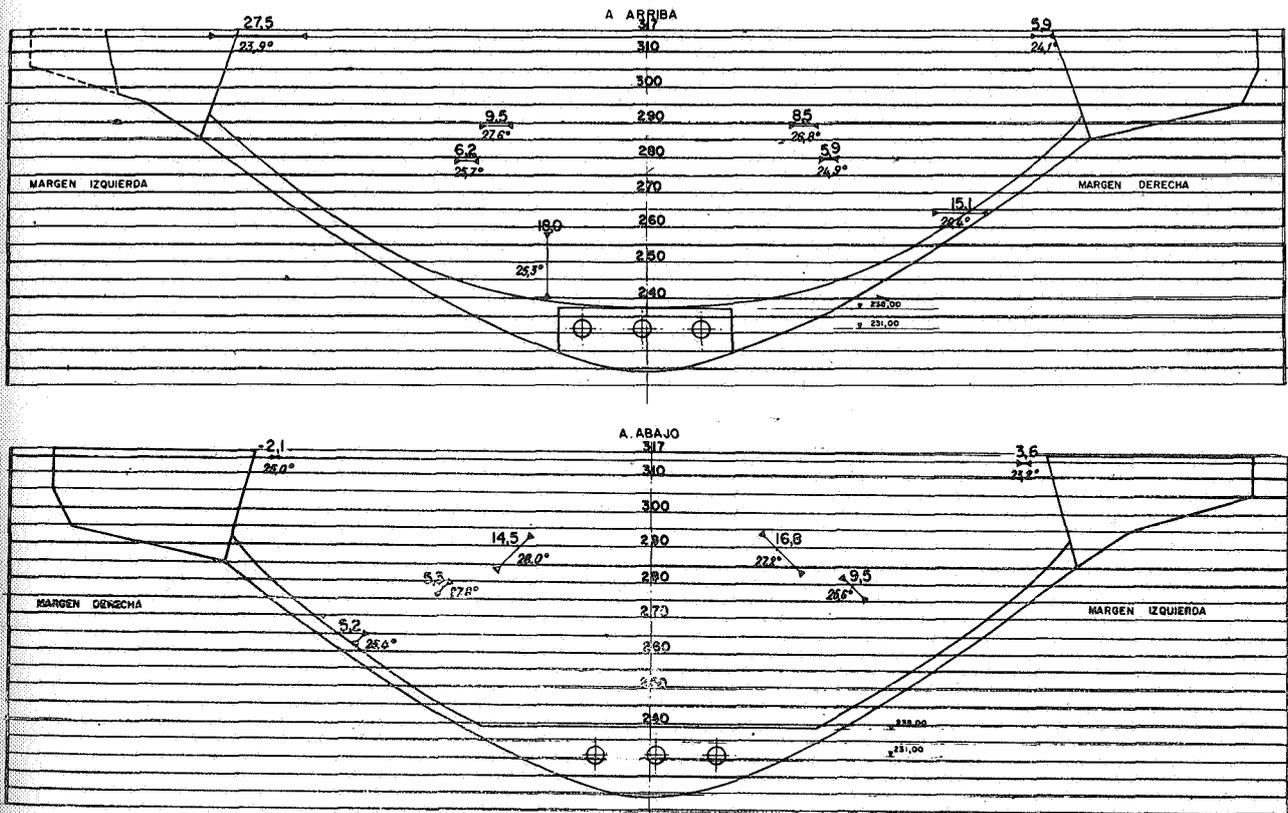


Figura 17.

Fig. 16. — Gráfico-tipo de un tensímetro: 1, aumento de compresiones por subida de la temperatura a embalse vacío; 2, comienzo del llenado del embalse; 3, aumento de compresiones al subir el nivel del embalse, a pesar del descenso de temperatura.
 Sketch No. 16. — Type graph of a stress-meter: 1) Increase of compressions by rise in temperature when the reservoir is empty. 2) Beginning of the filling of the reservoir. 3) Increase of compressions when the reservoir level rises, in spite of the drop in temperature.

Fig. 17. — Estado tensional correspondiente al 17-IX-63. Embalse sin carga. Temperatura media normal, 24° C. Tensiones, en kilogramos/cm.².
 Sketch No. 17. — Tensional state corresponding to the 17th November 1963. Reservoir without load. Normal average temperature 24° C. Stresses in Kg/cm²

tados se interpretan teniendo en cuenta las acciones exteriores de temperatura, humedad ambiente e insulación. En el cuerpo de la presa y en su superficie media se han instalado 35 medidores de juntas Carlson. Estos aparatos funcionan muy bien y permiten comprobar de manera directa el monolitismo de la estructura.

El gráfico 19 es un gráfico-tipo de medidor de

3. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL HORMIGÓN.

Para poder interpretar con garantía las medidas de los deformámetros y para conocer el valor real de las características reológicas del hormigón, se ha hecho un ensayo de determinación *in situ* y una serie de ensayos en laboratorio.

TENSIONES MEDIDAS CON TENSIMETROS

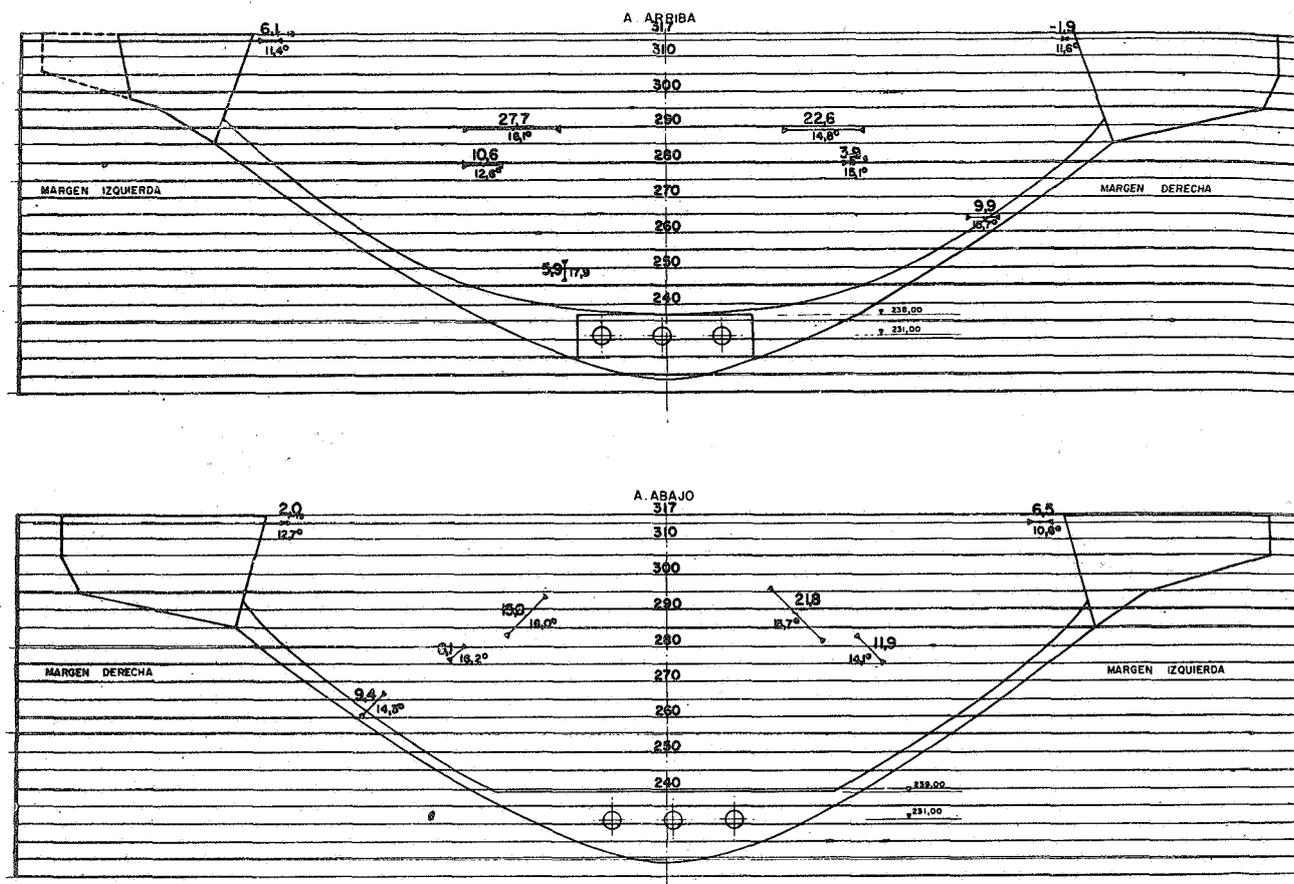


Figura 18.

juntas interno. Antes de inyectar se observa una apertura progresiva de la junta al enfriar los bloques adyacentes, seguida de un cierre por nuevo aumento de temperatura. Una vez inyectada, la junta no se mueve, salvo pequeñas aperturas y cierres originados por la variación de tensiones horizontales, térmicas o hidrostáticas.

El ensayo *in situ* consiste, en esencia, en aislar en el cuerpo de la presa un cilindro de hormigón de 400 mm. de diámetro y 1.050 mm. de altura, en cuyo interior va embebido un deformámetro Carlson, dejando en su parte inferior una cavidad en la que se dispone un gato hidráulico de 50 Tn., con el que se somete el cilindro a compresión por

Fig. 18. — Estado tensional correspondiente al 4-XII-63. Nivel de embalse, 308,50. Temperatura media normal, 12° C. Tensiones, en Kg./cm.².

Sketch No. 18. — Tensional state corresponding to the 4th December 1963. Reservoir level 308,50. Normal average temperature 12° C. Stresses in Kg/cm.².

intermedio de una placa de reparto. El ensayo se efectúa aplicando la carga por escalones, de modo que la compresión en el hormigón aumenta 7,8 ki-

logramos/cm.² en cada uno de ellos. Se hacen varias lecturas del deformámetro dentro de cada escalón, llegándose a una compresión máxima de 39 kilo-

MEDIDOR DE JUNTAS J.10 Junta 5-6D, cota 274

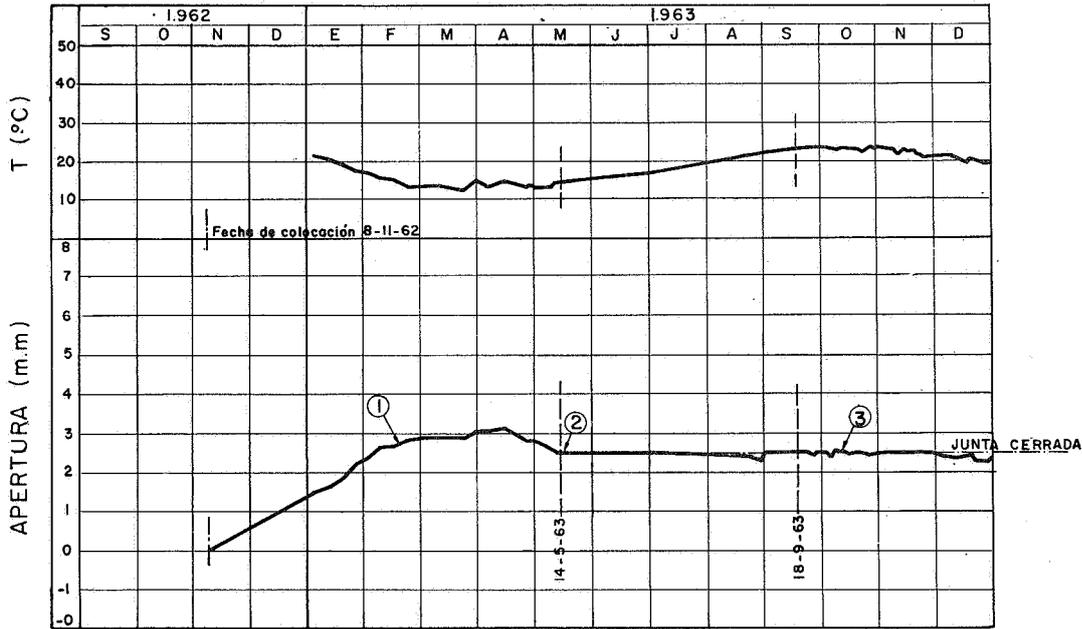


Figura 19.

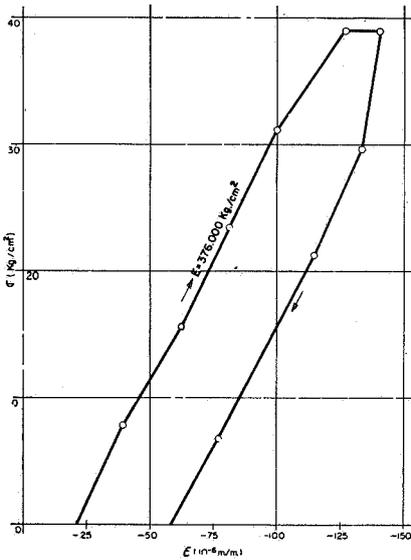


Figura 20.

gramos/cm.² en el cilindro del hormigón. Se mantiene esta carga durante varias horas (seis horas en la mayoría de los casos), con el fin de estudiar la fluencia, y después se quita la presión de nuevo por escalones, hasta llegar a presión cero en el gato. Durante estas operaciones de mantenimiento y descarga se siguen haciendo lecturas del deformámetro (figura 20).

Dibujando un gráfico tensiones-deformaciones, puede deducirse el módulo de elasticidad, que es sensiblemente el mismo tanto en la subida como en la bajada.

La fluencia se supone que sigue la ley logarítmica:

$$\Delta \epsilon = \sigma \cdot \ln(\Delta t + 1) \cdot F(K)$$

pudiendo determinarse F(K) con los datos del ensayo.

Fig. 19.—Gráfico típico de un medidor de juntas: 1, comportamiento de la junta, sin inyectar } apertura } al } disminuir }
la temperatura; 2, fecha de inyección de la junta; 3, junta inyectada, oscilación muy pequeña alrededor de la posición en que } cierre } al } aumentar }
quedó al inyectar.

Sketch No. 19.—Typical graph of a joints measurer: 1) Behaviour of the joint without grouting } opening } with } decrease }
in temperature. 2) Grouting of the joint. 3) Grouted joint. Small oscillation around the grouting position. } closing } } increase }

Fig. 20.—Ensayo reológico in situ, a los siete días. Ciclo de carga y descarga.

Sketch No. 20.—Reological "in situ" test after 7 days. Cycle of load and unloading.

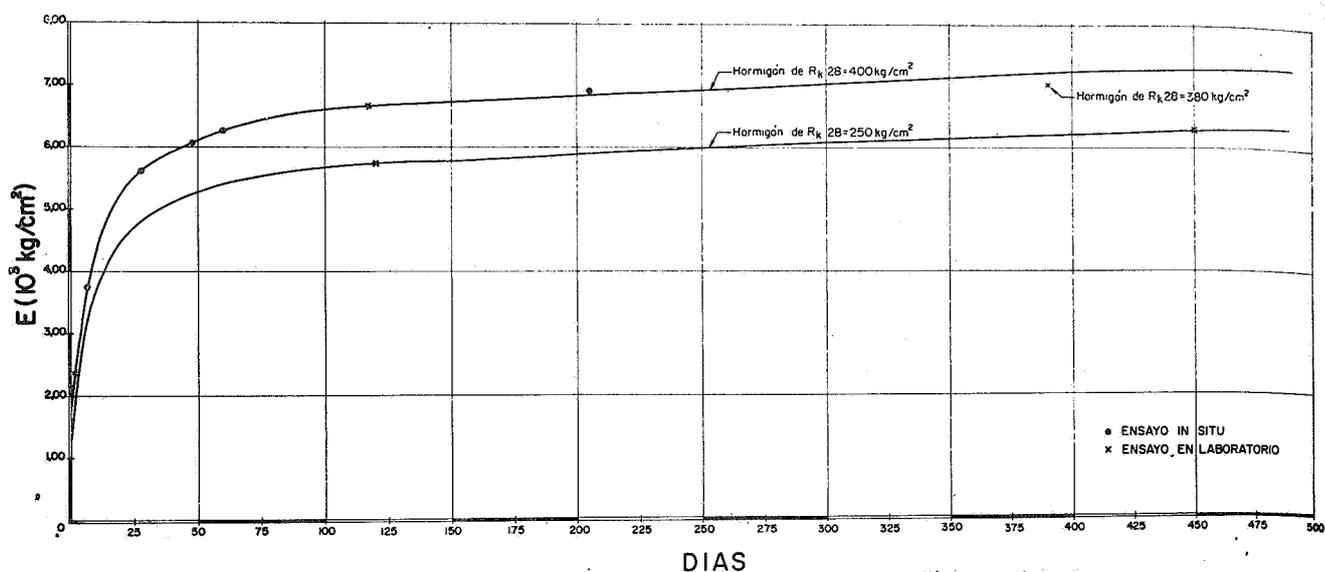


Figura 21.

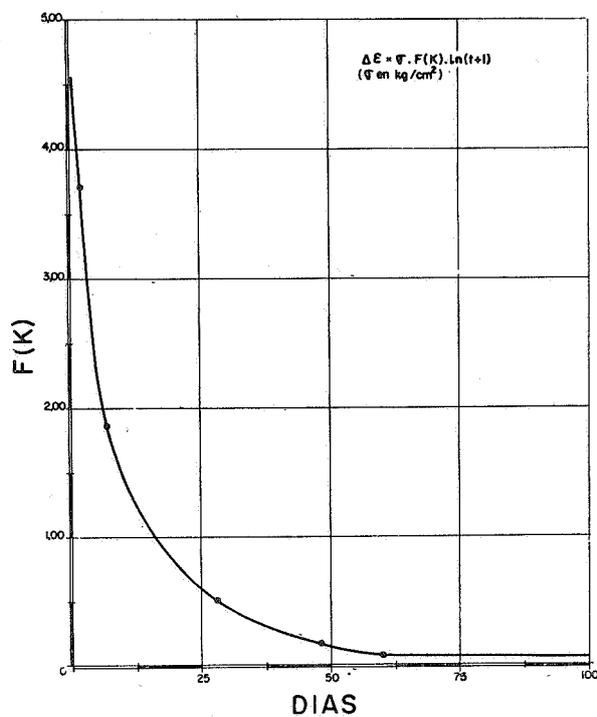


Figura 22.

Se han efectuado también ensayos en laboratorio sobre probetas cilíndricas de 15×30 cm. y sobre testigos sacados de la presa por sondeo, que se cortan con las mismas dimensiones. Estos ensayos fueron realizados por el Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción del Ministerio de Obras Públicas obteniéndose como resultado los diagramas de carga y módulos de elasticidad noval y reiterativo.

Teniendo en cuenta las diferentes edades a que se realizaron los ensayos y la resistencia característica del hormigón a los veintiocho días, se establecieron las curvas de módulo de elasticidad y de fluencia para un hormigón-tipo de 250 Kg./cm.^2 de resistencia característica a los veintiocho días. Se da también la curva de módulo de elasticidad para un hormigón de 400 Kg./cm.^2 de resistencia característica que se ha presentado en varios de los ensayos (figs. 21 y 22).

Los valores obtenidos son excepcionalmente altos, pero parecen de confianza, puesto que los ensayos *in situ* y los ensayos en laboratorio, realizados por procedimiento y personas totalmente distintas, han dado resultados concordantes.

Fig. 21.—Variación del módulo de elasticidad instantáneo con la edad del hormigón.

Sketch No. 21.—Variation of the instantaneous elasticity modulus with the age of the concrete.

Fig. 22.—Variación del coeficiente de fluencia con la edad del hormigón.

Sketch No. 22.—Variation of the creep modulus with the age of the concrete.