

EL COMPORTAMIENTO INICIAL DE LA PRESA DE SUSQUEDA (*)

SEGUNDA PARTE

Por ARTURO REBOLLO

Ingeniero de Caminos

Esta es la continuación del trabajo aparecido en el número de noviembre sobre los resultados obtenidos en la auscultación de la presa de Susqueda.

En aquella primera parte se consideraron las sollicitaciones exteriores e interiores actuantes sobre la estructura y el cimiento.

En esta segunda parte se estudia el estado de tensiones resultante y los métodos empleados en su determinación.

En la tercera parte de este trabajo, que aparecerá próximamente, se analizarán 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.

2. Tensiones obtenidas a partir de las deformaciones del hormigón.

2-1. La distribución e instalación de los aparatos medidores.

Hemos instalado dos tipos de instrumentos para medir las tensiones: extensómetros y tensímetros, ambos fabricados por R. W. Carlson. Los primeros nos proporcionan las deformacio-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de marzo de 1971.

nes unitarias del hormigón; los segundos, dan directamente las tensiones.

Los extensómetros, en número de 230, los hemos repartido sobre el cuerpo de la presa muy próximos a los paramentos, aunque situados fundamentalmente sobre el contorno de la cimentación, ya que las tensiones en esa zona son las más importantes y representativas del comportamiento de la obra. Hasta el momento han dejado de funcionar 12, cinco de los cuales fueron averiados por la ejecución de uno de los taladros de inyección al interceptar el grupo de cables conductores.

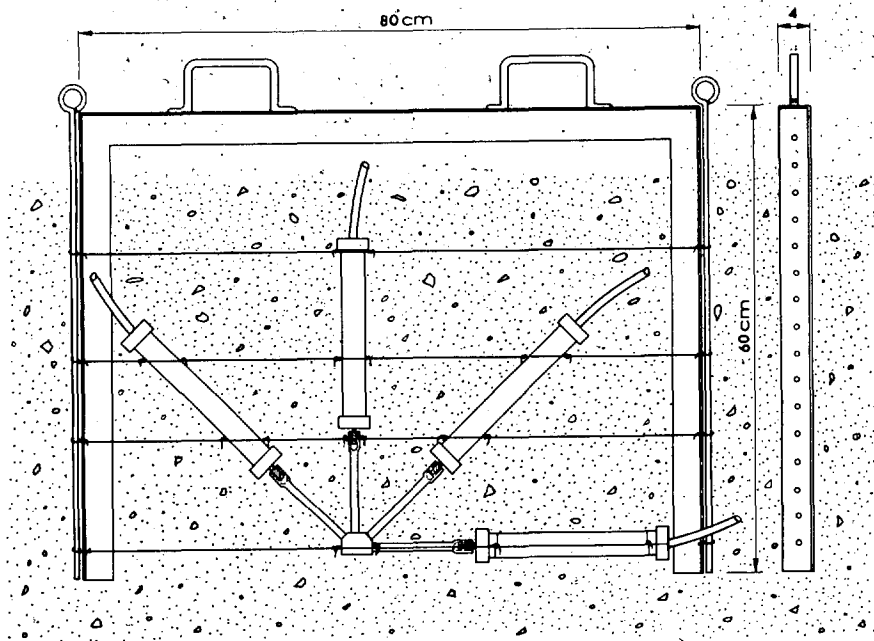


Fig. 23. — Marco portarosetas. Su sencilla extracción del interior de la masa de hormigón permite colocar los extensómetros en la posición correcta.

Estos aparatos se han instalado: aislados, cuando las tensiones a medir solamente iban a tener un carácter indicativo y temporal de cara a la primera puesta en carga; en grupos de dos, horizontal y vertical, colocados principalmente en la ménsula central; y en rosetas de cuatro, según ejes vertical-horizontal y a 45°. En todos los puntos donde se han colocado estos aparatos se les ha acompañado siempre de un extensómetro corrector o de tensión nula. La distancia a que quedaban situados del paramento ha venido a ser del orden de 70-80 cm.

Para la colocación de los extensómetros en el interior de la masa de hormigón se han fijado éstos a un entramado de hilos de acero, que venía sujeto y tensado en los extremos por medio de dos pasadores verticales $\varnothing 6$, a un mar-

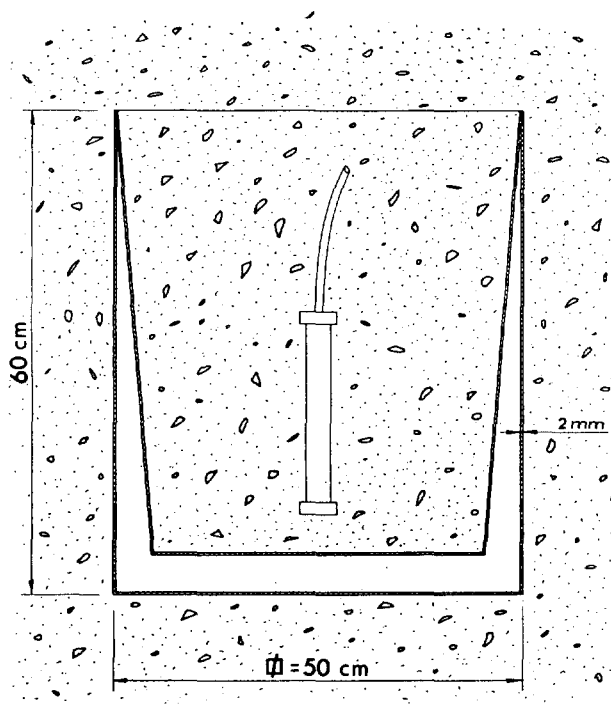


Fig. 24. — Disposición del extensómetro corrector o de tensión nula en el interior del hormigón.

co metálico rectangular suficientemente rígido, al que le faltaba el lado inferior. Se instalaba este marco-puente de acuerdo con la posición que debían ocupar los extensómetros, siempre en un plano sensiblemente paralelo al paramento y se extendía la tongada, dejando embebido todo este aparellaje del que quedaba siempre el lado superior del marco fuera del hormigón. Una vez extendido éste y con la pasta ya ini-

ciando el fraguado, se extraían con toda sencillez los pasadores y a continuación el marco metálico, con lo que los extensómetros quedaban libres en el interior de la masa y perfectamente situados en posición (fig. 23).

Los extensómetros correctores se han instalado en posición vertical en el interior de unos cajones de 50×50 cm.² de base y 60 cm. de altura. Estos cajones venían provistos de una doble pared con cámara intermedia de aire, lo que permitía crear en torno a este aparato un medio isostático y aislado a los efectos de la tensión exterior pero no a los posibles efectos locales de la temperatura, expansión del hormigón y cambios de volumen debidos al contenido de humedad. El material empleado en la confección de los primeros cajones fue el cobre, aunque posteriormente se fabricaron con plancha de hierro galvanizado de 2 mm. de espesor con que también se aseguraba un mínimo para la deformabilidad de la pieza (figura 24).

Los tensímetros, como hemos indicado, dan directamente las tensiones a través de las variaciones de resistencia, según la dirección en que se han colocado, que coincide sensiblemente con la de las isostáticas. Hay nueve en total; van situados en la base de la bóveda muy próximos al paramento de aguas abajo, siguiendo aproximadamente el contorno del zócalo, excepto el situado en el bloque central que está colocado dentro del mismo zócalo a pocos metros de la roca. Esta situación general obedece fundamentalmente al hecho de ser esta zona del zócalo donde mayores compresiones esperábamos obtener en el hormigón, según los estudios y ensayos llevados a cabo en el proyecto. En la colocación de estos aparatos hemos tenido especial cuidado en atender todas las recomendaciones del fabricante procurando sobre todo que quedaran en completo contacto con el hormigón.

Los cables terminales de todos los aparatos a que nos hemos referido han quedado recogidos en la galería de visita más próxima desde donde se realizan todas las lecturas.

2-2. El cálculo de las tensiones a partir de las deformaciones unitarias.

Con la instalación de los extensómetros hemos pretendido deducir las tensiones principales en un plano paralelo al del paramento en las

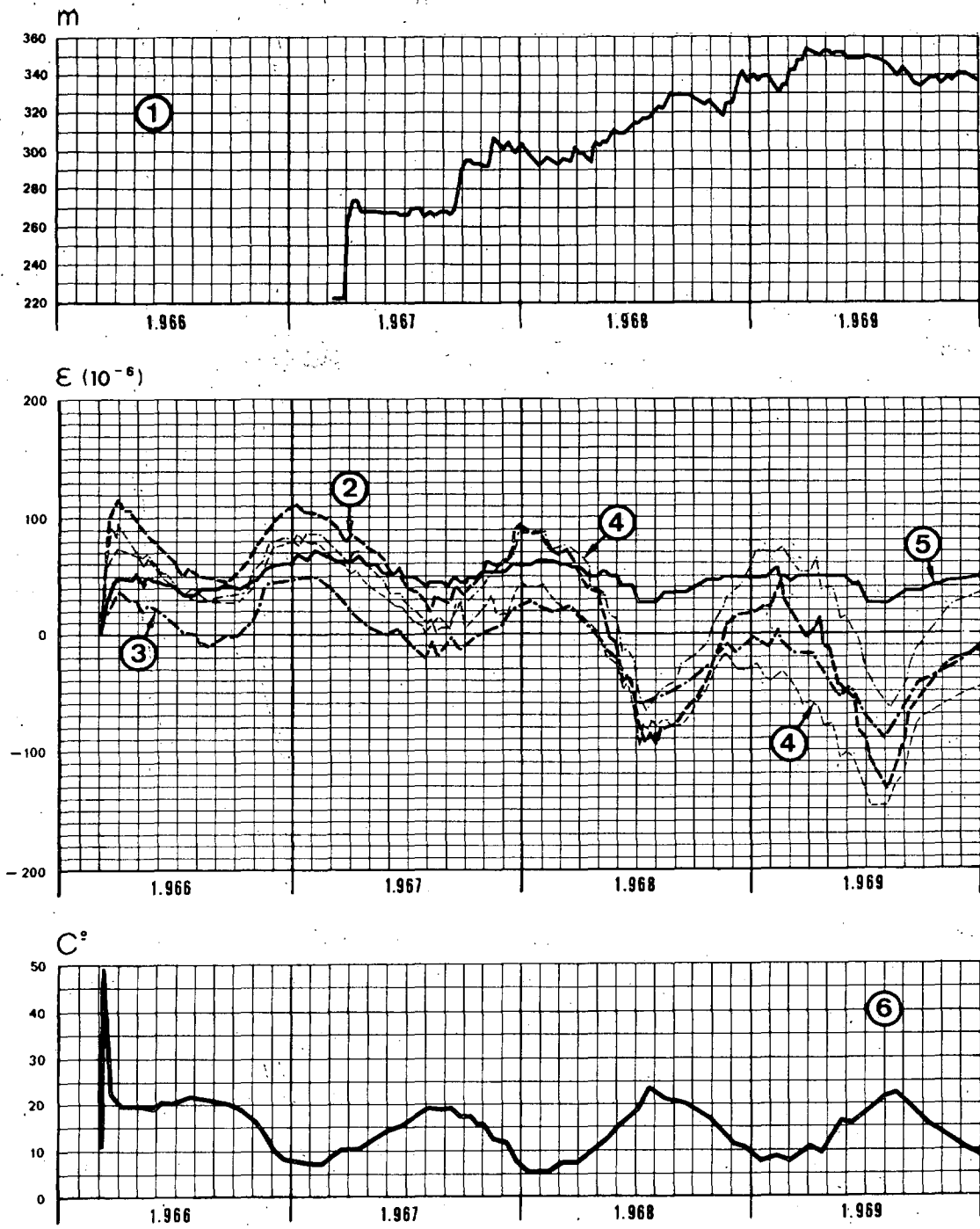


Fig. 25.—Deformaciones unitarias registradas por el grupo de extensómetros del bloque 13 situados a la cota 262 m. en el paramento de aguas abajo: 1, curva de embalse; 2, extensómetro horizontal; 3, extensómetro vertical; 4, extensómetros a 45°; 5, extensómetro corrector o de tensión nula; 6, envolvente de las temperaturas registradas por cada uno de los aparatos anteriores; los valores resultan ser todos prácticamente coincidentes. No están incluidas las correcciones por temperatura y expansión térmica del hormigón.

zonas más características de la estructura y seguir la marcha de las deformaciones en otras zonas menos representativas, especialmente durante la primera puesta en carga, por si se produjera alguna anomalía de consideración.

Suponiendo el hormigón como un cuerpo elástico, isótropo y homogéneo, lo que naturalmente es mucho suponer, la deformación unitaria en una dirección en función de las tensiones, según tres direcciones ortogonales, nos viene dada por la ecuación:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right]$$

y análogamente para las otras direcciones y, z; siendo E el módulo de elasticidad y ν el coeficiente de Poisson.

Al despejar en estas expresiones las tensiones en función de las deformaciones unitarias obtenemos para una dirección cualquiera la relación:

$$\sigma_x = \lambda e + 2G \cdot \epsilon_x$$

y análogamente para las otras direcciones y, z. Estas últimas igualdades se denominan ecuaciones de Lamé y su desarrollo puede consultarse en cualquier tratado de elasticidad:

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}$$

$$e = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

siendo esta última igualdad el denominado módulo de rigidez o de elasticidad transversal.

Pues bien, partiendo del valor $\nu=0,2$ generalmente aceptado para el hormigón, las anteriores expresiones de las tensiones se nos convierten en:

$$\sigma_x = E \cdot (1,111 \epsilon_x + 0,278 \epsilon_y + 0,278 \epsilon_z)$$

y de forma análoga las expresiones σ_y, σ_z .

Ahora bien, las deformaciones $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$, suministradas directamente por los extensómetros, además de los efectos de la tensión han experimentado también la influencia de otros efectos locales que es preciso corregir, según hemos señalado. Es por esta razón por lo que hemos instalado los extensómetros correctores o de

tensión nula; en ellos por estar situados en el interior de una pieza teóricamente libre e isostática:

$$(\epsilon_x)_c = (\epsilon_y)_c = (\epsilon_z)_c = \epsilon_c$$

con lo cual nos basta conocer la deformación en una dirección cualquiera, por ejemplo, la vertical en la que ha sido instalado el aparato, para conocer la tensión de corrección que, según la fórmula anterior, será:

$$\sigma_c = E \cdot (1,111 \epsilon_c + 0,278 \epsilon_c + 0,278 \epsilon_c) = E \cdot 1,667 \epsilon_c$$

La corrección de temperatura para estos aparatos facilitada por el fabricante representa $7,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$, que es necesario tener en cuenta para conocer la deformación unitaria real de cada aparato. No obstante, por haber resultado ser, en la mayoría de los casos, prácticamente coincidentes las temperaturas de los distintos aparatos de cada grupo, dicha corrección viene compensada en el desarrollo del cálculo por la del aparato corrector; lo que también ocurriría en la posible corrección por la expansión o contracción térmica del hormigón.

En los casos en que partimos de una roseta de extensómetros hemos ajustado y suavizado previamente las curvas de las deformaciones suministradas por los aparatos, a fin de que la suma de las deformaciones en dos direcciones ortogonales cualesquiera permanezca invariante (fig. 25).

Señalaremos también que en nuestro caso no hemos colocado ningún extensómetro en la dirección radial de la bóveda, con lo que no podemos aplicar las anteriores fórmulas de la tensión en toda su amplitud, ni calcular la tensión en esa dirección, lo que tiene un interés relativo para el análisis que hemos pretendido realizar, dado que en aquella dirección las tensiones suelen ser suficientemente pequeñas.

2-2-1. El problema del módulo de elasticidad.

Analizando desde un principio todo este proceso de cálculo observamos que a lo largo de él introducimos numerosos supuestos e hipótesis: desde la impecable instalación y funcionamiento del aparato hasta la perfecta homogeneidad e isotropía del hormigón. Pues bien, en todo este proceso de cálculo nos aparece otro parámetro directamente proporcional a las tensiones,

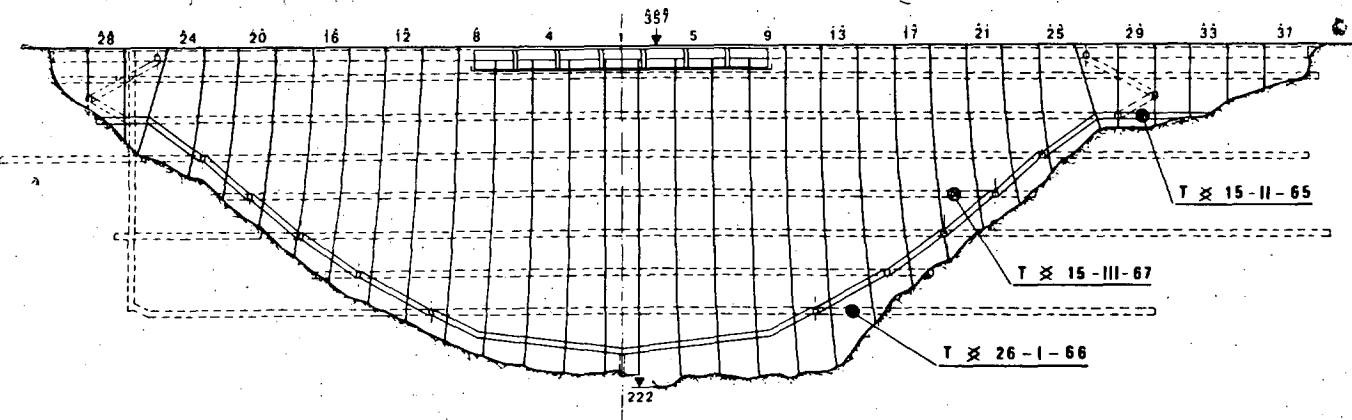


Fig. 26. — Medidas del módulo elástico del hormigón realizadas desde las galerías de visita con gato hidráulico. T, fecha de la puesta en obra de los diferentes hormigones investigados.

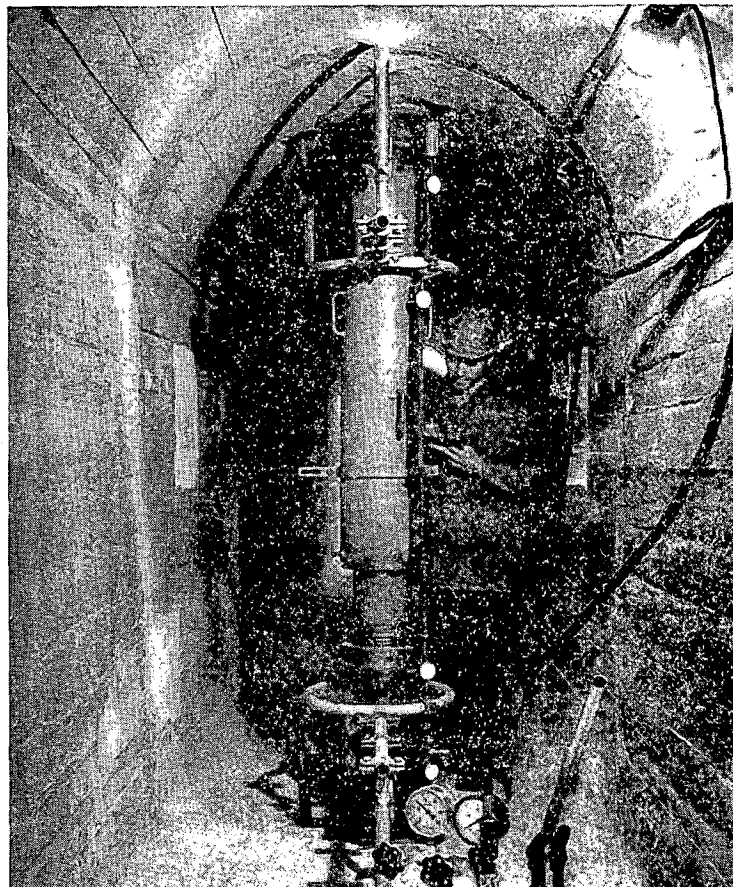
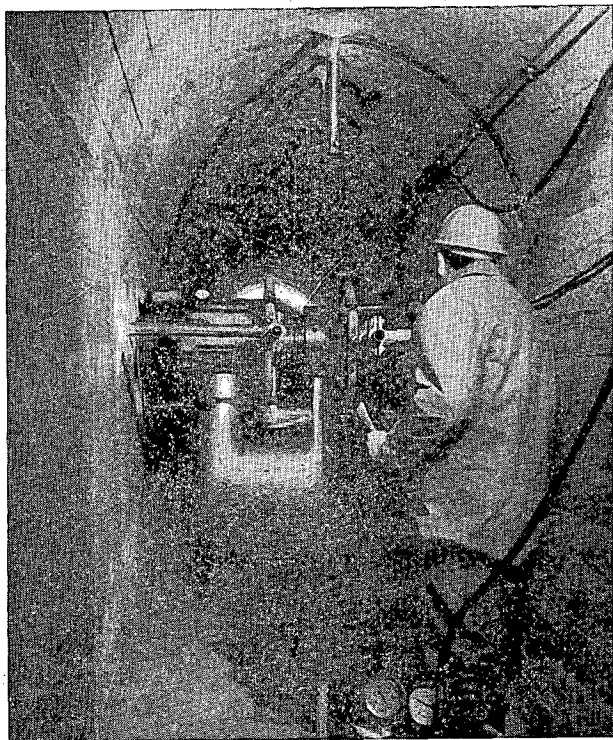
el módulo de elasticidad, cuya valoración entraña un problema más, quizá el más difícil, en la obtención de las mismas.

En términos generales este parámetro se puede medir bien en probetas elaboradas o extraídas del propio hormigón de la presa, bien "in situ", con la ayuda de un gato, empleando comparadores extensométricos para la medida de las deformaciones.

En nuestra opinión el primer procedimiento suministra valores para el módulo especialmente

favorables, debido no sólo al carácter excesivamente puntual de las medidas, sino también al proceso inevitablemente selectivo que entraña la fabricación u obtención de las probetas. Por ello hemos tratado de emplear el segundo procedimiento con el que los valores obtenidos pensamos serían más acordes con la realidad.

En este sentido solicitamos a principios de la primavera del presente año la colaboración de la Sociedad de Reconocimientos Geofísicos, Sociedad Anónima, para la realización de tales



Figs. 27 y 28. — Medidas del módulo de elasticidad en las galerías de visita. Gato en posición horizontal y vertical.

medidas en tres zonas situadas en el interior de la presa, aprovechando las galerías de visita, en las que fijamos tres puntos con diferentes edades para el hormigón (fig. 26).

Estas medidas se realizaron con el gato en posición horizontal, según el sentido radial, y en posición vertical; con placas de apoyo suficientemente rígidas de 25 cm. de diámetro; y con comparadores de tipo mecánico que apreciaban 1/100 mm. En cada ensayo se realizaron cuatro ciclos de carga y descarga de unas dos horas de duración cada uno, transmitiendo presiones en las placas de 32, 64, 96 y 128 Kg./cm.² En ocasiones estos ciclos se dejaron en carga constante uno o dos días para medir los efectos de la fluencia (figs. 27 y 28).

En la elaboración de los resultados colaboraron los Ings. H. Argüelles y M. F. Bollo, siendo supervisados por el Dr. Ing. M. F. Bollo.

Por cada ensayo y en cada placa de carga teníamos cuatro valores para el módulo elástico correspondientes a cada uno de los cuatro ciclos de carga; de dichos valores hemos seleccionado el más representativo, según el siguiente criterio: el valor correspondiente al primer ciclo (32 Kg./cm.²) lo hemos desestimado siempre, por no ser totalmente representativas estas primeras deformaciones del hormigón; de los

valores correspondientes a los restantes ciclos (64, 96 y 128 Kg./cm.²) hemos hallado la media; despreciando en alguna ocasión el valor correspondiente al segundo ciclo si el valor correspondiente del módulo elástico era mayor que el obtenido en los ciclos tercero y cuarto.

Con ello hemos obtenido cuatro valores por cada uno de los tres ensayos realizados; ensayos que corresponden a hormigones de diferente edad, con lo cual teníamos una idea preliminar de la curva que adopta el referido módulo de elasticidad.

Es de notar cómo el hormigón más antiguo, el correspondiente al ensayo de la galería G-2, es el que ha suministrado valores más bajos para el módulo; esta aparente anomalía debe explicarse por la circunstancia de que el hormigón en que se han obtenido aquellos valores correspondía a las primeras tongadas de la obra, donde las instalaciones iniciaban su rodaje y la dosificación de la pasta no era lo suficientemente ajustada, de ahí que aquel primer hormigón acuse también la primera época de su fabricación en estas medidas directas de su módulo de elasticidad.

Señalaremos también que las galerías sobre las que se efectuaron estas medidas tenían una armadura de zunchado, \varnothing 15 cada 20 cm., cuya

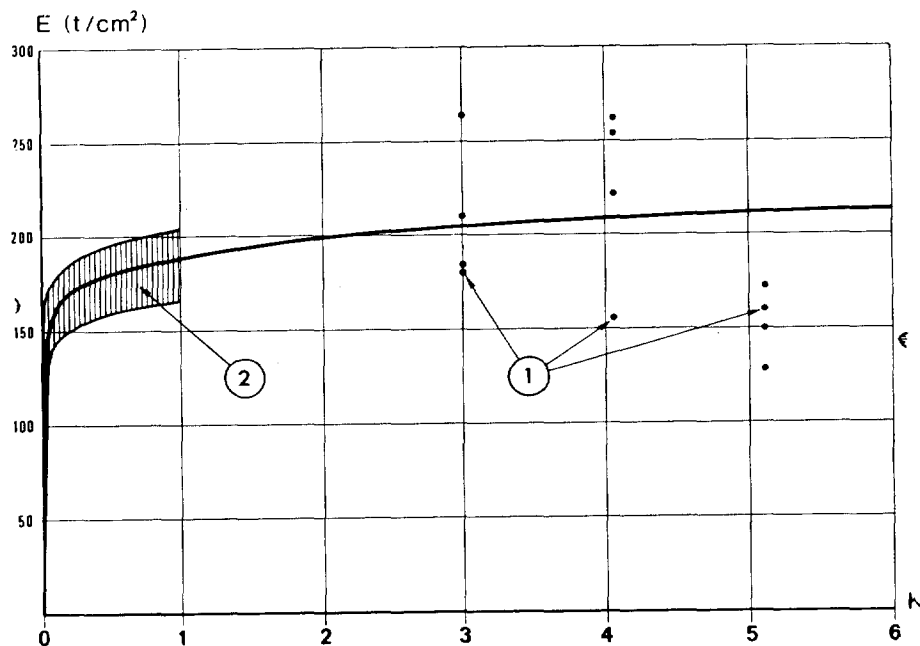


Fig. 29. — Variación media del módulo de elasticidad del hormigón a lo largo del tiempo: 1, valores obtenidos a través de los ensayos con gato; 2, huso envolvente de los valores proporcionales a la raíz cuadrada de las cargas de rotura en probeta cilíndrica, de las 21 000 ensayadas con el hormigón de la presa, a los tres, siete, veintiocho, noventa y tres-cientos sesenta y cinco días; K, tiempo en años.

favorable influencia sobre los valores del módulo hemos considerado despreciable.

Así, pues, con estos doce valores para el módulo correspondientes a tres edades diferentes del hormigón, aproximadamente 3, 4 y 5 años, podíamos entrever la curva del módulo con más o menos exactitud, pero nos faltaba sobre todo concretar la forma de dicha curva en el primer año.

Este problema lo hemos resuelto a base de considerar la proporcionalidad existente entre el módulo de elasticidad y la raíz cuadrada de las cargas de rotura de hormigón en probeta cilíndrica, roturas con las que contamos durante el primer año hasta un total de 21 000, según hemos referido en otra ocasión. Ahora bien, esta proporcionalidad tiene expresiones diversas según los distintos autores, lo que puede originar una notable dispersión en los resultados, lo cual es lógico, teniendo en cuenta que el proceso de fabricación y curado de las probetas es diferente para cada caso; y análogamente, las circunstancias generales de curado del hormigón de la presa, de clara influencia sobre el valor del módulo. La relación entre ambos procesos a través de una fórmula matemática necesariamente puede dar lugar a resultados muy distintos según la fórmula empleada.

Por ello hemos considerado el huso general de aquellas roturas, limitado por las envolventes extremas, y le hemos ido aplicando diferentes coeficientes sobre las raíces de sus valores hasta encontrar un huso correspondiente a los valores del módulo, que se ajustará en posición y dirección a los valores del módulo obtenidos con los ensayos de gato. De esta forma, el inicio del trazado de la curva del módulo puede estimarse con suficiente aproximación, y con ello obtenerla en estos primeros años de la vida del hormigón (fig. 29).

2-2-2. El análisis de la fluencia.

Otro de los problemas con que nos hemos encontrado en el cálculo de las tensiones ha sido la valoración de las deformaciones por efecto de la fluencia, especialmente en los primeros meses del hormigón, máxime cuando en esta primera época no habíamos realizado ensayos de carga in situ.

Al mencionar el concepto de fluencia nos hemos querido referir a su expresión clásica:

$$\varepsilon = \sigma [1 / E + F(K) \cdot I_n(t + 1)]$$

donde:

ε = deformación unitaria global: elástica más la debida a la fluencia, expresada en millonésimas.

σ = tensión a que se mantiene sometido el hormigón.

E = módulo elástico a la edad K .

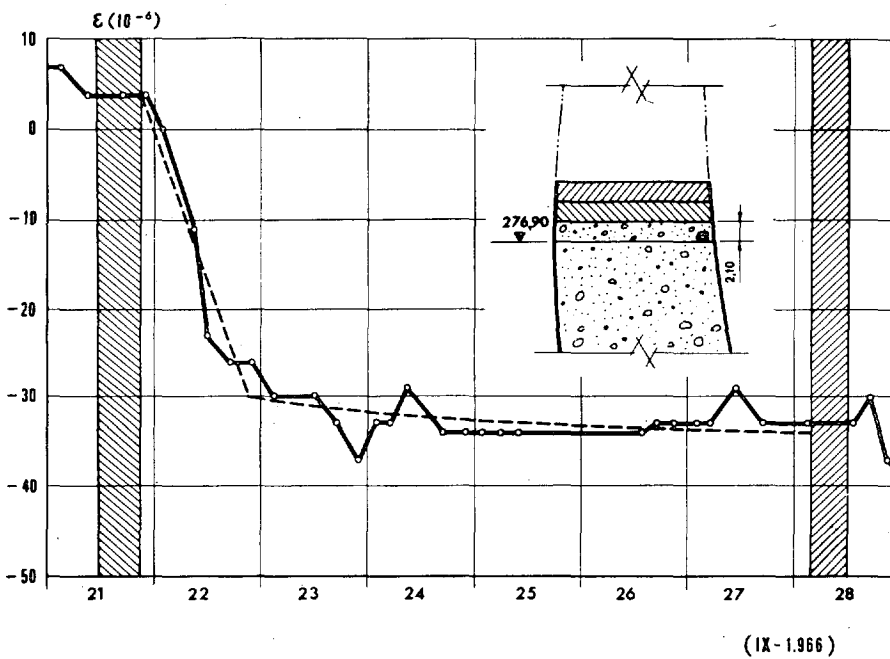
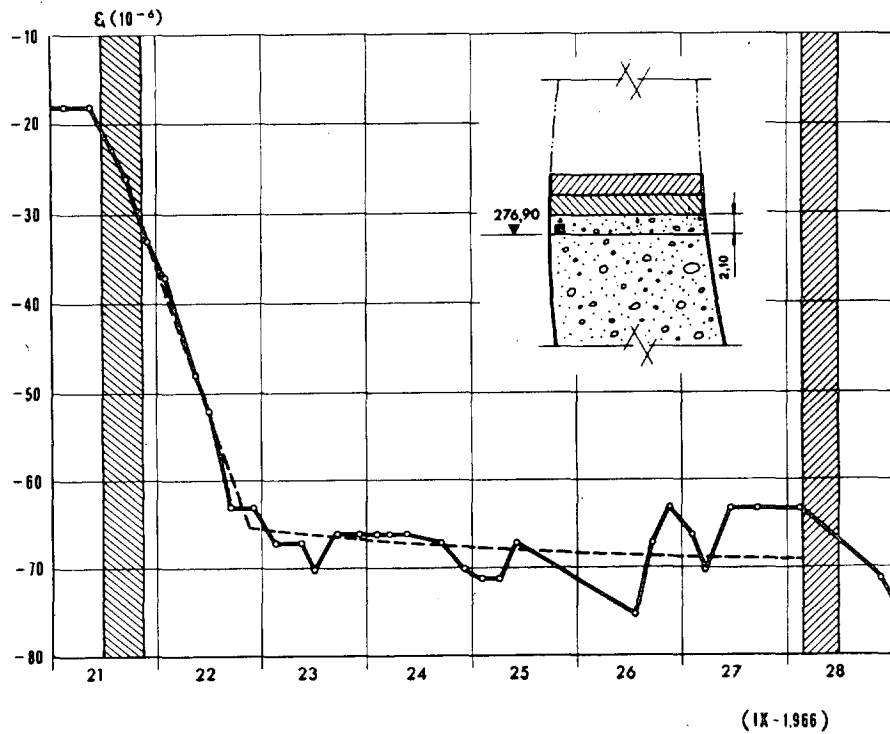
$F(K)$ = parámetro variable según las diferentes edades K del hormigón correspondiente al instante en que se le aplica la tensión σ .

t = tiempo en días que se mantiene la tensión desde el instante de su aplicación.

Por tanto, en dicha expresión, el primer término representa la deformación unitaria puramente elástica, y el segundo término aquella otra debida al efecto de la fluencia. Para valorar la incidencia de este último efecto sobre los resultados de las tensiones que queremos calcular es preciso conocer la función $F(K)$.

Ello ha representado un verdadero problema al no haber realizado desde el principio de la puesta en obra del hormigón ensayos de carga sobre el mismo; sin embargo, hemos tratado de resolverlo a base de analizar la correspondencia directa de las tensiones a peso propio durante la construcción de los bloques y las deformaciones a que han dado lugar las registradas por los extensómetros.

Ahora bien, las deformaciones de los extensómetros vienen influidas también por los efectos térmicos de la retracción y temperatura ambiente; de ahí que la resolución del problema se haya centrado en deslindar sobre las deformaciones globales de los aparatos las térmicas de las debidas al peso propio. Para ello hemos partido de la hipótesis de que durante la construcción de los bloques, las deformaciones térmicas teóricamente han de ser iguales en todas direcciones al estar las juntas abiertas y al deformarse el bloque con libertad por funcionar como pieza isostática. Por tanto, si las tensiones térmicas horizontales y verticales son sensi-



Figs. 30 y 31.—Variación de las deformaciones unitarias obtenidas por la diferencia entre las indicadas por un extensómetro vertical y otro horizontal colocados en el mismo punto. Se exponen dos casos correspondientes a la ménsula central, situados en la misma tongada. Estas curvas se han asimilado a otras que presentan un primer tramo que correspondería al comportamiento elástico, el instantáneo más el diferido, y otro segundo tramo, que correspondería al efecto de la fluencia; resultando ciertamente curioso la gran similitud de ambos ejemplos. Del primer tramo se deduce un módulo elástico de 32.000 Kg./cm.² y del segundo un coeficiente $F(K)$ de 2,9, siendo el hormigón de siete días.

blemente iguales, al menos en diversos momentos de la construcción, al expresar la diferencia entre las tensiones verticales y horizontales paralelas al paramento, partiendo de la fórmula del apartado anterior, nos resulta:

$$\sigma_z / E = 0,833 (\epsilon_z - \epsilon_x)$$

deformaciones que coincidirían con las debidas solamente al peso propio.

Con la representación gráfica de la expresión de estas diferencias a lo largo del tiempo pueden analizarse los períodos en que la tensión a peso propio permaneció constante, entre la ejecución de dos tongadas consecutivas; después de transcurridas las primeras horas de carga donde nos aparecerán las deformaciones elásticas, tanto instantáneas como diferidas, las deformaciones siguientes serán debidas a la fluencia; por tanto, basta igualar la expresión anterior con aquella otra que nos da la deformación por fluencia para deducir el $F(K)$, partiendo de la base que la curva se ciña lo más posible a la expresión del neperiano y partiendo también de la base que calculamos la tensión a peso propio por el método elástico.

Este análisis no ha sido posible realizarlo en todos los períodos de tiempo en que la tensión a peso propio permanecía constante, dado que las hipótesis de partida para el efecto térmico no son rigurosamente exactas. Ocurre en ocasiones que el predominio térmico se hace notar más en el extensómetro horizontal que en el vertical y viceversa, lo que ocurre de una manera periódica a lo largo del ciclo anual. De ahí que sea preciso considerar solamente los períodos más propicios e ir deduciendo así diferentes valores para el $F(K)$. No obstante, nos hemos encontrado con casos especialmente significativos como los que presentamos en las figuras 30 y 31.

Siguiendo este análisis en los seis grupos de extensómetros que tenemos colocados en la ménsula central hemos encontrado diversos valores para dicha función a lo largo del tiempo algo dispersos, pero que hemos asimilado a una curva media, resultado de su interpolación tal como recogemos en la figura 32. En dicha curva se aprecia claramente la disminución de dicha función a partir de los tres meses de la puesta en obra del hormigón.

Este hecho ha sido corroborado por los ensayos de fluencia realizados durante las medidas del módulo elástico con gato hidráulico. Es-

tos ensayos fueron cuatro: dos, en la galería G-1 con el gato en posición horizontal y vertical y manteniendo la tensión a 64 Kg./cm.² durante veinticuatro horas hasta la estabilización de las deformaciones; otros, en la galería G-4 con el gato en posición vertical y manteniendo la tensión a 128 Kg./cm.², también durante veinticuatro horas, y el último en la galería G-7 con el gato en posición vertical y manteniendo la tensión a 128 Kg./cm.² durante cuarenta y ocho horas.

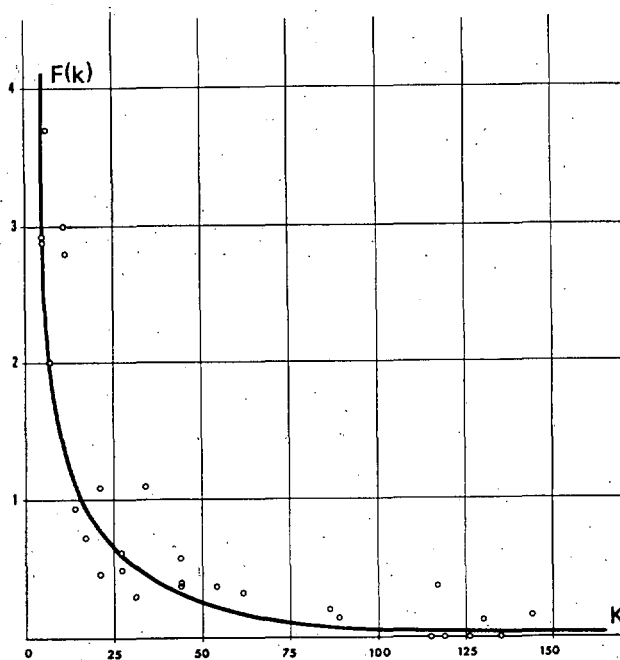
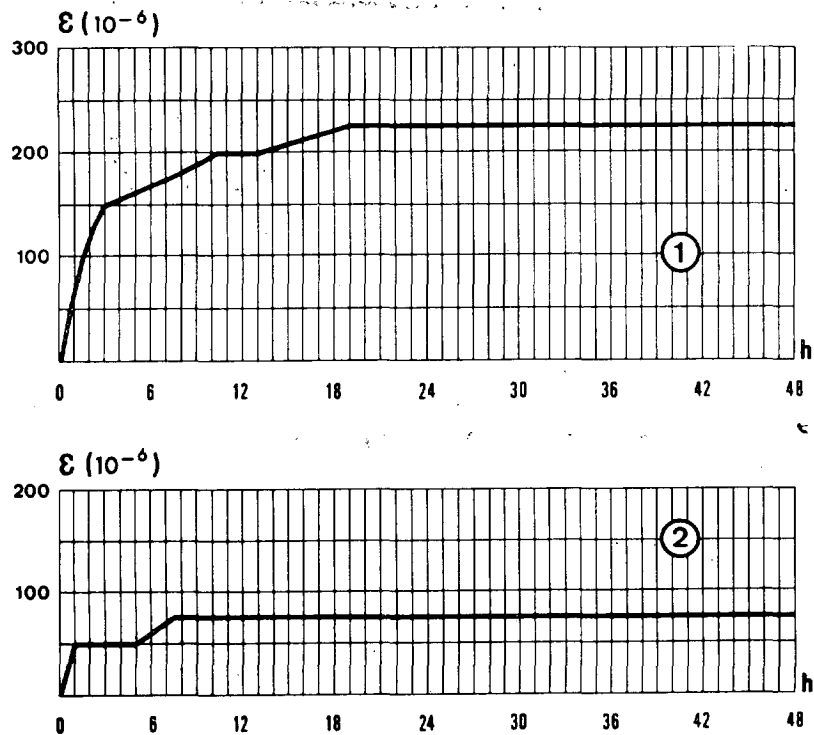


Fig. 32. — Variación media obtenida para el parámetro de la fluencia del hormigón en función del tiempo K, en días.

De este último ensayo exponemos en la figuras 33 y 34 las curvas que ligan las deformaciones unitarias con el tiempo de cada una de las dos placas del gato, en las que puede observarse una marcada estabilización de aquéllas una vez transcurridas las primeras horas, en las que aún se notan los efectos de los fenómenos elásticos diferidos, indicándonos la notable debilitación de este fenómeno de la fluencia para estas edades del hormigón.

Las anteriores curvas las hemos expresado en deformaciones unitarias, partiendo de la expresión de Boussinesq, que nos da la deformación media unitaria en un sólido semiindefinido:

$$\epsilon = \frac{2}{(1 - \nu^2) \cdot \pi \cdot R}$$



Figs. 33 y 34. — Variación de las deformaciones unitarias del hormigón a lo largo del tiempo bajo una carga permanente de 128 Kg./cm.², según el ensayo de fluencia realizado en la galería G-7, con el gato en posición vertical: 1, placa techo; 2, placa solera.

donde R es el radio de la placa de carga; por tanto, en nuestro caso, $\varepsilon = 53,10^{-6}$ por cada 1/100 mm. que haya asentado dicha placa.

A la vista de estos valores se comprende que al reducir las curvas anteriores a su concepto unitario; o sea, para una tensión $\sigma = 1 \text{ Kg./cm.}^2$, y al tratar de hallar el valor correspondiente a $F(K)$ a partir de las primeras veinticuatro horas de la acción permanente de la carga, una vez que podemos asegurar que aquellas deformaciones solamente son originadas por el efecto de la fluencia, se deduce para dicho parámetro un valor ya sumamente pequeño que, como indicábamos anteriormente, corresponde a una franca aminoración de este efecto.

A título indicativo añadiremos que los ocho valores deducidos a través de estos ensayos para la viscosidad interna del hormigón han variado entre $30,10^{19}$ y $200,10^{19}$ poisses.

2-2-3. Resultados obtenidos.

Fijadas, pues, las funciones de la fluencia y del módulo de elasticidad hemos procedido al

cálculo de las tensiones según las fórmulas que las definen en función de las deformaciones unitarias de los aparatos, aunque según hemos indicado, haciéndolas extensivas únicamente al plano paralelo a los paramentos.

El cálculo se ha ido haciendo por intervalos de tiempo para posteriormente integrarlos hasta la fecha que más nos interesara; estos intervalos se han escogido casi siempre atendiendo a los cambios de sentido que experimentaban las deformaciones de los aparatos.

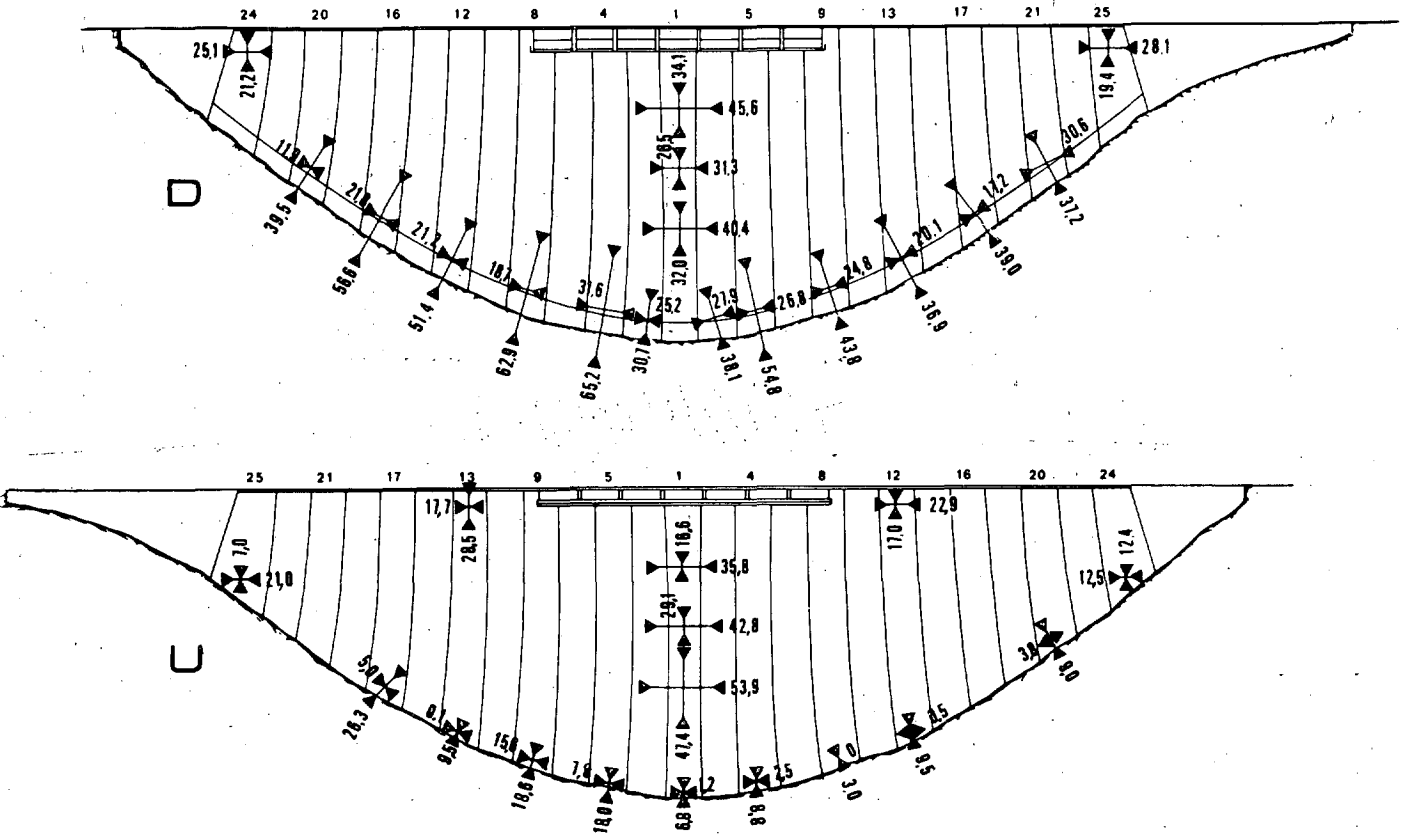
Como la deformación indicada por los aparatos es suma de deformaciones elásticas y de fluencia, y como de cada una de éstas a su vez conocemos su expresión en función de la tensión, podemos así deducir esta última. Aunque inmediatamente se comprende que este proceso no deja de ser sumamente laborioso, no obstante, lo hemos llevado adelante para poder ofrecer los resultados con suficiente rigor.

Una vez definidas las tensiones en las cuatro direcciones ortogonales de las rosetas hemos procedido a la determinación de las tensiones

principales, según las fórmulas que nos suministra la teoría de la elasticidad.

En las figuras 35 y 36 exponemos los resultados obtenidos para las tensiones en las zonas más significativas de los paramentos, habiendo procurado incluir siempre las parejas de los puntos simétricos de la bóveda. Estos resultados co-

cia finales de agosto del mismo año, cuando el efecto de la temperatura es más acusado y la dilatación de la bóveda es mayor, a pesar de haber descendido el embalse 11 m. hasta la cota 340. De ahí la notable influencia que puede tener la temperatura en el comportamiento de la estructura y de ahí la amplitud con que venimos



Figs. 35 y 36. — Estado tensional correspondiente a los primeros días de junio de 1969 con el embalse a su cota máxima, 351 m., después de haber estado a plena carga durante dos meses. D, U, paramentos de aguas abajo y aguas arriba, respectivamente.

responden a la integración de las tensiones desde la colocación de los aparatos hasta los primeros días del mes de junio de 1969, cuando el embalse se encontraba precisamente a su cota máxima, inmediatamente después de haber estado a plena carga durante dos meses.

Es interesante notar cómo este estado de tensiones no corresponde al máximo a pesar de estar el embalse lleno, todo ello debido al efecto térmico. En efecto, por la tendencia general que adoptan las curvas de las deformaciones, el estado máximo de tensiones se nos produce ha-

analizando este efecto desde el inicio mismo de la obra según hemos especificado en apartados precedentes.

2-3. Las tensiones suministradas por los tensímetros.

Como hemos indicado, estos aparatos nos suministran directamente las tensiones que tiene el hormigón en el punto y en la dirección en que se hallan instalados; siendo preciso hacer una pequeña corrección por el cambio de tem-

peratura, que suministra el propio aparato, corrección que se realiza según una fórmula que facilita el fabricante y que viene en función del módulo de elasticidad.

les están bastante de acuerdo con aquellos otros suministrados por los extensómetros, coincidiendo en algún caso con notable exactitud como puede apreciarse en la figura 38.

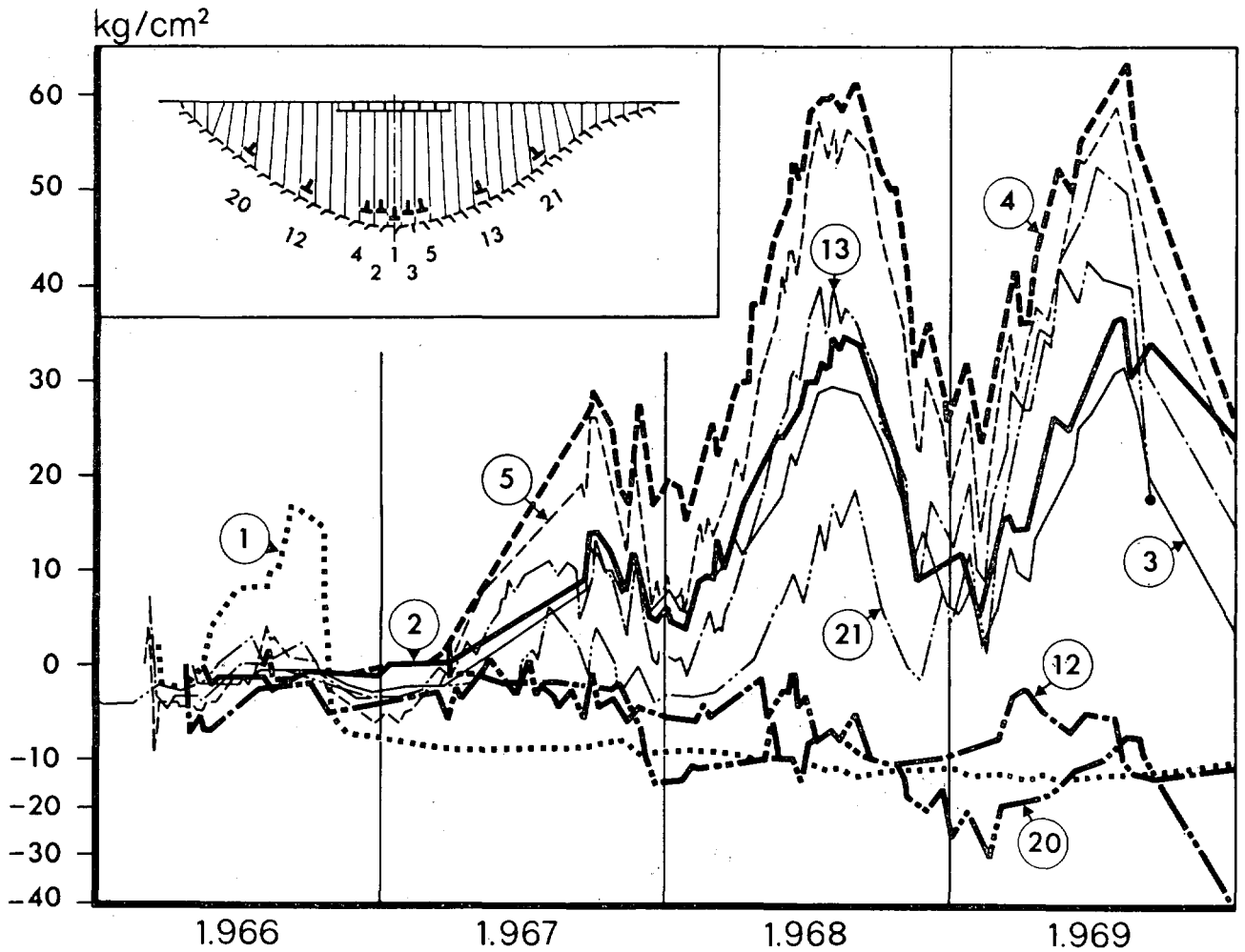


Fig. 37. — Tensiones suministradas por los tensímetros, instalados próximos al paramento de aguas abajo. Incomprendiblemente, el 1, 12 y 20 dan considerables tracciones en una zona que, en general, está sometida a compresión. El 21 dejó de funcionar a finales de 1969. Los cinco restantes siguen sensiblemente el estado de compresión que se registra en aquella zona de la bóveda.

En la figura 37 se representan la variación de los valores de las tensiones proporcionadas por estos aparatos a lo largo del tiempo. Puede observarse cómo 3 de los 9 marcan tracciones en una zona que lógicamente está sometida siempre a compresión excepto a embalse vacío; lo que nos indica lo delicado que resulta el funcionamiento de estos aparatos; de los otros 6 tensímetros, uno dejó de funcionar al cabo de tres años, proporcionando los 5 restantes unos valores para las tensiones que en líneas genera-

2-4. Posibles limitaciones de estos análisis.

Este estado de tensiones a la cota de máximo embalse, deducido a partir de los diferentes tipos de aparatos colocados en el interior del hormigón, viene a sumarse a los obtenidos en el cálculo analítico y aquellos otros de los dos ensayos estructurales, realizados en dos laboratorios especializados diferentes. De estos cuatro estados de tensiones proporcionados por los métodos tan distintos a que nos hemos referido po-

demos concluir que en primera aproximación, los valores se mantienen dentro de unos límites semejantes.

Ahora bien, al comparar relativamente todos estos resultados apreciamos discrepancias de cierta importancia, pues mientras que por un procedimiento obtenemos compresiones nota-

convicción desde la iniciación del proyecto, que un principio de rotura bien en la estructura o bien en el terreno, pero sobre todo en este último, no sería nunca detectado por un análisis de las tensiones de la estructura. Incluso lo pudimos comprobar en el ensayo estructural de la que denominamos solución 18A: la puesta en

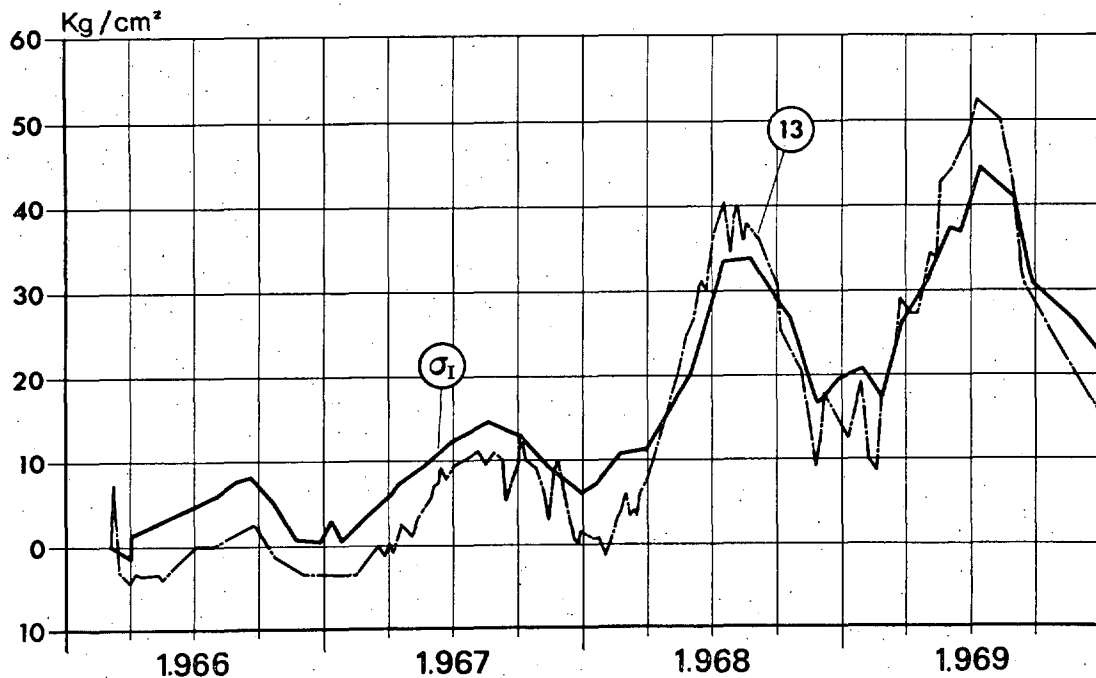


Fig. 38. — Sorprendente coincidencia entre las tensiones suministradas por el tensímetro núm. 13, instalado aproximadamente según la dirección de las isostáticas, y la evolución de la tensión principal en aquel sentido, deducida con la roseta de extensómetros instalada en el mismo punto.

bles por otros apenas se detectan, e igualmente para las tracciones que en algún caso, concretamente en un ensayo en modelo, se presentaban muy elevadas, según ya lo hemos especificado en otra ocasión, no se obtiene ninguna comprobación de su existencia por el resto de los análisis efectuados.

Esta dispersión relativa de los valores de las tensiones nos confirma lo delicado que puede resultar tomar decisiones sobre el proyecto de la estructura o su explotación posterior, basándose exclusivamente en los valores de las tensiones, cualquiera que sea el procedimiento empleado y lo fuera de lugar que puede quedar el énfasis que algunos autores ponen en el cálculo de tales parámetros. Pero para nosotros no es esto lo más grave, ya que hemos tenido la

carga de dicho modelo determinó una singular concentración de tracciones en su pie de aguas arriba, acabando por fisurarse claramente el modelo en aquella zona, lo que apenas repercutió en el estado tensional anterior; y, sin embargo, la estructura tenía una fisura de consideración (*).

Como en la realidad pudiera producirse este principio de rotura, sobre todo en el terreno, sin

(*) A este respecto, y por insistir sobre el tema, transcribimos el siguiente párrafo de la intervención del doctor ingeniero A. del Campo en el pasado Congreso de Grandes Presas, celebrado en Montreal: "Los ingenieros que nos hemos formado en la primera mitad de este siglo hemos sufrido un empacho de mecánica elástica, y no nos consideramos satisfechos hasta no obtener unas tensiones para nuestra estructura, sin preocuparnos demasiado si los entes de razón, que son las tensiones, resultan ser índices verdaderamente determinantes de la seguridad de la misma."

que realmente nos percatáramos de ello; y más si los aparatos medidores no coinciden estrictamente con la zona en cuestión, podría darse el caso de tener un grave accidente en ciernes con un estado tensional "correcto".

Y como este principio de rotura puede hacer entrar en juego otros parámetros del mecanismo resistentes de la obra, tales como la tectónica

del macizo y la subpresión, nos hemos visto obligados a concentrar todo el proceso de la auscultación sobre la "observación de los movimientos y desplazamientos de la estructura y del terreno" como único indicador verdaderamente objetivo del comportamiento de obra.

(Continuará.)