

CALCULO TENSIONAL DE PRESAS BOVEDA OBTENIDO A PARTIR DE MEDICIONES REALIZADAS «IN SITU» (*)

Por ANGEL PEREZ SAIZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director de OFITECO

El alto grado de hiperestatismo, la imposibilidad de introducir en el cálculo de una presa bóveda variables, no sólo mal conocidas sino susceptibles de evolución, como son: resistencia y módulo elástico del hormigón, deformabilidad del macizo de apoyo, régimen hidráulico de las cimentaciones, etc., obligan al Ingeniero a disponer medios para controlar, por una parte, la seguridad de la obra proyectada, y por otra, conocer mejor su comportamiento.

Dentro del capítulo de la seguridad, cuyo criterio consistirá en la reproducción de los mismos fenómenos en condiciones comparables de carga y temperatura, la medición de tensiones constituye una parte importante junto con los desplazamientos presa, terreno y comportamiento de juntas.

De los métodos, aparatos, cuidados y pasos a seguir para conocer el estado tensional en una presa bóveda, es de lo que trata este artículo. En él hemos distinguido entre presas recientes, con plan de auscultación, previsto en proyecto y presas antiguas, donde no se dispusieron medios para este control.

I. Introducción.

La lectura, hace unos meses, del estupendo artículo sobre el comportamiento inicial de la presa de Susqueda, de nuestro compañero Arturo Rebollo, publicado en la REVISTA DE OBRAS PUBLICAS de diciembre de 1970 (ref. 1), nos animó a escribir este otro, fruto de nuestra experiencia dentro del campo de la auscultación de presas; al redactarlo nos guía el deseo de aportar nuestra modesta colaboración a un tema de interés como es el cálculo del estado tensional de presas bóveda, a partir de mediciones realizadas en la propia obra.

El autor del artículo anteriormente reseñado menciona algo cuyo conocimiento es tan antiguo como la propia auscultación; se trata de las discrepancias que se obtienen al comparar los resultados del cálculo analítico, modelo reducido y mediciones en la propia obra. A nuestro entender, la razón es que tanto en el cálculo analítico como en los ensayos estructurales, es muy difícil, por no decir imposible, introducir magnitudes que influyen en la seguridad y comportamiento de la obra, no sólo mal conocidas, sino susceptibles de evolución, como son: re-

sistencia y módulo elástico del hormigón, deformabilidad del macizo de apoyo, régimen hidráulico de la cimentación e influencias climáticas.

Los distintos métodos de cálculo existentes hoy en día suministran resultados concordes (ref. 2), partiendo de unas hipótesis de cálculo previamente establecidas. Si en estas hipótesis pudiésemos introducir todas aquellas variables que influyen en el estado tensional final de la estructura, es claro que la observación sobra, puesto que de antemano sabríamos cómo se comportaría la obra proyectada por nosotros. Pero el alto grado de hiperestatismo y la complejidad del problema hace difícil no sólo prever la reacción de la estructura ante fenómenos localizados, sino muchas veces explicar *a posteriori* esta reacción.

Por ello, creemos que es aventurado tratar de comparar los resultados obtenidos por los distintos métodos y sacar conclusiones negativas por la dispersión existente, puesto que esta dispersión es precisamente la única que justifica el control de la obra.

Otro aspecto polémico, totalmente distinto, que queremos comentar brevemente es la necesidad o conveniencia de conocer el estado tensional con miras al control de la seguridad de la presa. Palabras de M. Gerard Willm, ingeniero

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de abril de 1972.

jefe en la E. D. F. de Grenoble, son las que a continuación se expresan (ref. 3):

"El criterio de la seguridad consistirá en reproducir exactamente los fenómenos, en condiciones comparables de carga y de temperatura, de tal forma que cualquiera que sea el fenómeno en cuestión, debe considerarse sospechosa toda evolución y debe preocupar toda aceleración de una manifestación evolutiva." Nosotros estamos de acuerdo con estas palabras.

Es cierto que al ser necesario realizar una selección de los puntos a controlar estamos midiendo el estado tensional en ese punto y no conocemos la participación que un desequilibrio puede tener en la tensión resultante final, pero si nosotros calculamos las tensiones principales y comparamos en circunstancias semejantes de temperatura y carga estas tensiones, cualquier tendencia a evolucionar nos está indicando una modificación importante en el modo de trabajo de la obra, que hay que seguir y tratar de conocer. Además de esto, el conocimiento de las direcciones principales y la comparación con los datos obtenidos mediante cálculo analítico y modelo reducido nos puede orientar sobre las zonas más cargadas de la cimentación, ya que las zonas menos deformables y más resistentes polarizan el estado tensional.

De acuerdo con lo especificado en esta introducción, pensamos que en el caso de una presa bóveda nuestro esfuerzo para la realización de una buena auscultación con vistas a la seguridad debe encaminarse no sólo al conocimiento de los desplazamientos presa-terreno y comportamiento de juntas, sino también al estado tensional; pero este conocimiento no debe basarse únicamente en la obtención de las magnitudes absolutas, pues tan importante como éstas es la continuidad y reproductibilidad para estados semejantes, en función de las variables que intervienen en el estado final.

De los métodos empleados, cuidados necesarios, aparatos y pasos para conocer el estado tensional en cada momento, es de lo que va a tratar este artículo.

II. Medida directa de tensiones.

La medida directa de tensiones, si no fuera por las dificultades que éstas presentan, es al-

tamente sugestiva. Los métodos de medida empleados son dos: uno consiste en introducir en la masa del hormigón un cuerpo muy rígido, otro consiste en una lámina o disco que medirá tensiones normales sin alterar apenas las condiciones de contorno del aparato.

Inclusión rígida.

Se demuestra que cuando se coloca un cilindro, sometido a un esfuerzo axial uniforme, dentro de un material elástico y ambos están íntimamente unidos, una variación σ en la tensión del material crea en el cilindro una tensión uniformemente repartida σ' y relacionadas por la ecuación: $\frac{\sigma'}{\sigma} = k$ (k es función del módulo de Poisson (ν) y elástico (E) del hormigón, del módulo elástico del cilindro (E'), del radio de éste, etc.) (refs. 4 y 5).

Se ha comprobado que la relación $\frac{\sigma'}{\sigma}$ tiende a un valor límite cuando $\frac{E'}{E}$ tiende a infinito, y que para valores de $E' > 3E$ es prácticamente independiente de las variaciones del módulo elástico del hormigón.

Basándose en este principio, son bastantes los aparatos existentes en el mercado mundial y se distinguen principalmente por la distinta manera de medir el acortamiento que sufre el cilindro. Han sido contruidos por el LNEC, Hast, Wilson, Potts, Hawkes, entre otros.

El LNEC utiliza el principio de la cuerda vibrante, pues la frecuencia de vibración de su hilo es función de su longitud, de acuerdo con

$$\text{la relación } f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}}$$

L = longitud del hilo.

σ = tensión del hilo.

γ = peso específico del hilo.

Hast emplea un dispositivo de magnetostricción, formado por un solenoide, sobre el que se enrolla una bobina. La deformación del solenoide altera la permeabilidad magnética del sistema y el voltaje de impedancia disminuye en la bobina, midiéndose éste.

Potts y *Wilson* emplean bandas extensométricas.

Hawkes se basa en las propiedades birrefringentes del vidrio.

Todos estos aparatos que indicamos aquí

parecen tener un campo de aplicación más extenso dentro del dominio de la mecánica de las rocas, aunque dicha aplicación, en cualquier caso y de acuerdo con la experiencia obtenida, presenta muchos inconvenientes.

Medidor de placa o disco.

Lo hemos llamado así por su forma, parecida en unos casos a un disco de gran diámetro y pequeño espesor y en otros a una placa. Estos medidores de tensión (*stress meter*) tienen que poseer una gran rigidez a la compresión para medir tensiones normales sin apenas deformación.

De los primeros en utilizar este sistema po-

namiento es hidráulico y muy sencillo, nos referimos a la célula tipo Glotz, comercializada en gran número de países (Alemania, Austria, Estados Unidos, Francia, etc.). Un esquema de esta célula puede apreciarse en la figura 1.

El aparato comprende: un captor de presión, una cámara de equilibrio utilizable para varios captores y un equipo de bombeo con un manómetro. El principio de funcionamiento es el siguiente: la presión P que se ejerce sobre la célula se transmite mediante aceite al hueco 1 de la cámara de equilibrio, donde existe un diafragma que cierra la conducción 4 de retorno. La bomba comunica una presión a través de 3 al hueco 2 de la cámara de equilibrio, hasta que el diafragma se separa y se esta-

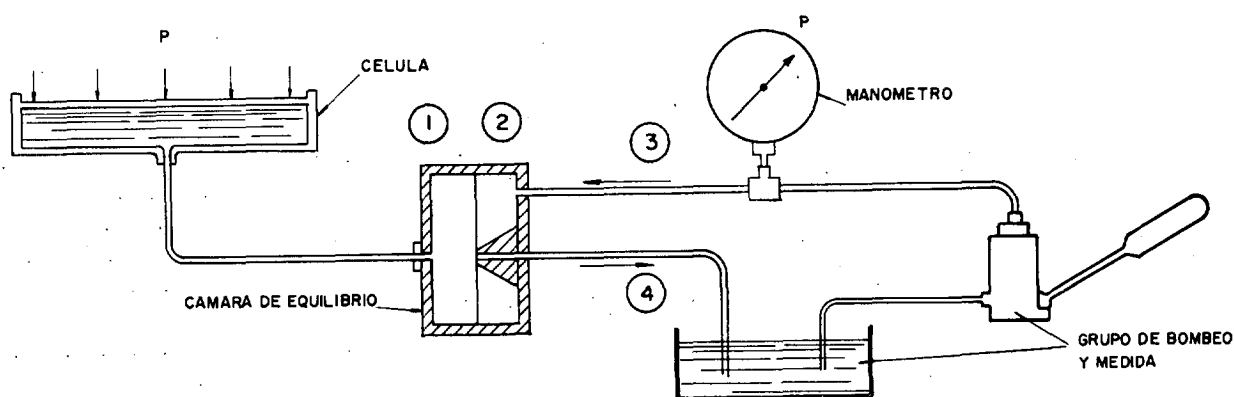


Fig. 1. — Esquema del medidor de tensiones tipo Glotz.

dremos citar a Golbeck; sistema que fue perfeccionado posteriormente por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos.

El profesor Carlson patentó una célula de resistencia eléctrica que ha sido muy utilizada en los últimos años. Consta de dos placas que, al ser cargadas, deforman hidráulicamente una membrana central mediante una capa de mercurio cuyo espesor es de 0,2 mm. El desplazamiento de esta membrana cambia la relación de resistencias eléctricas de un elemento sensible que se mide a distancia mediante un puente Wheastone. Esta relación está ligada a la tensión que deseamos medir mediante unas funciones suministradas por el fabricante, en las cuales intervienen, entre otros factores, los espesores de las placas y de la capa de mercurio, constante del aparato y coeficiente de dilatación lineal del hormigón (ref. 5).

Posteriormente a este sistema ha sido desarrollada una célula cuyo principio de funcio-

blece la comunicación entre 3 y 4 de una forma regular. La presión del aceite, indicada por el manómetro, equilibra la presión P que se ejerce sobre la célula.

El sistema, como puede apreciarse, es sencillo, y si a esto añadimos su robustez y bajo precio, comprendemos la amplia difusión alcanzada. Esta célula se ha empleado principalmente en revestimiento de túneles, muros, pantallas continuas, presas de tierra, etc.

Debemos indicar que tanto un tipo como otro de células solamente miden compresiones, influyendo las variaciones volumétricas del hormigón y la evolución de las propiedades mecánicas en los valores obtenidos. Esto lleva consigo el hecho de que una vez colocado el aparato, incluso con todos los cuidados posibles, el disco no se mantiene en contacto íntimo con el hormigón y los resultados no son de garantía, como ya se ha comprobado en gran número de obras (ref. 1 y 5).

III. Medida indirecta de tensiones.

III.1. Generalidades.

Los inconvenientes que plantea la medida directa de tensiones, a pesar de su sencillez aparente, obliga a tratar de resolver el problema a través de métodos indirectos.

El procedimiento consiste en medir, en puntos escogidos, las deformaciones unitarias en varias direcciones y relacionar estas magnitudes con las tensiones existentes, mediante las ecuaciones de la elasticidad, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas del hormigón.

El método no es sencillo debido a la cantidad de factores que intervienen, pero los resultados obtenidos, cuando el equipo técnico encargado tiene la suficiente preparación, son altamente satisfactorios. Hoy en día los errores cometidos se mueven dentro de las tolerancias que el ingeniero admite en el conocimiento de una magnitud determinada, y se ha comprobado que la utilización sistemática de este método para la determinación de tensiones en presas bóveda o en estructuras de hormigón está plenamente justificada.

Distinguiremos entre presas donde, por haberlo previsto, es posible dejar, durante la fase de construcción, los aparatos embebidos en el hormigón y presas construidas sin ningún sistema de auscultación y que causas especiales hagan deseable el conocimiento del estado tensional. Las técnicas, como es lógico, son distintas y los aparatos también. En cualquier caso, vamos a prescindir del método, muy sencillo pero de resultados poco satisfactorios, de medir deformaciones unitarias en paramentos o en hastiales de las galerías de inspección, que sólo se justifica en casos especiales.

III.2. Presas con sistema de auscultación previsto en proyecto.

III.2.1. Distribución y número de aparatos.

La distribución de los puntos de medida y el número de aparatos en cada punto depende de las características de la obra. Se pueden dar normas generales, pero cada obra es un caso particular, puesto que entendemos que una presa es un ser armónico, con vida propia y como tal debe estudiarse.

En primer lugar, debe señalarse que el control de tensiones es un capítulo más de la vi-

gilancia de la obra, y por ello es preciso estudiar la situación y número de puntos de medida, con vistas a que la información recibida ayude a la interpretación global de la misma; no obstante, es claro que, en principio, dicho control de tensiones debe realizarse en aquellos puntos en que las tensiones hayan sido determinadas mediante el cálculo o ensayos en modelo reducido. Puntos que suelen coincidir con valores máximos o mínimos de éstas y que están simétricamente situados, si existe simetría de cargas y de forma. Además, como se prevé que las tensiones máximas o mínimas aparezcan en los paramentos, es allí donde se sitúan los aparatos de medida, aunque lo suficientemente separados de aquéllos para que no aparezcan fenómenos locales; una distancia de 0,5 a 1 m suele ser lo corriente, aunque esto es bastante discutible y creemos que esta distancia debería aumentarse, de acuerdo con los resultados obtenidos en muchas presas.

En cuanto al número de aparatos necesarios en cada punto, depende del estado tensional que se espere: si es unidimensional se precisará uno, bidimensional tres y tridimensional seis; sin embargo, suele ser práctica corriente colocar mayor número de aparatos que nos permitan comprobar la buena calidad de las lecturas, realizar alguna pequeña compensación de las mismas e incluso continuar con la vigilancia si alguno de ellos se ha averiado.

Es un hecho sobradamente conocido que no todas las deformaciones son debidas a tensiones; por ello se precisa colocar otro aparato que, aislado del campo tensional, nos informe sobre la magnitud de dichas deformaciones; este aparato, que siempre es necesario, se conoce con el nombre de extensómetro corrector o neutro.

Por último, suele ser conveniente, para realizar la corrección por efecto Poisson, colocar en el caso de estado tensional plano otro extensómetro normal a dicho plano de tensiones.

III.2.2. Aparatos utilizados. Características.

Para la medición de deformaciones unitarias en el hormigón con aparatos embebidos en su masa, aunque existen otros tipos, se emplean normalmente extensómetros de cuerda vibrante y de resistencia eléctrica tipo Carlson. La deformación se obtiene, en un caso, a partir de la variación de la frecuencia de vibración de

un hilo o de la resistencia total y relación de resistencias eléctricas de dos hilos de acero de pequeño diámetro en el otro.

Entre los fabricantes de los primeros destacamos a Telemac (Francia), Mahiak (Alemania), Geonor (Noruega) y Galileo (Italia). Los de resistencia eléctrica (tipo Carlson) los fabrican Kiowa (Japón), Hugenbergerr (Suiza) y Terra-metric (Estados Unidos). Estos aparatos son bastante conocidos y no vamos a insistir sobre las particularidades de cada tipo y las diferencias entre sí. Sin embargo, sí vamos a indicar las características que deben reunir para que las mediciones efectuadas puedan ser de garantía, y éstas son las siguientes:

- Bajo módulo de deformabilidad en sentido longitudinal para acompañar las deformaciones del hormigón sin alterar el estado de tensión.
- Mantenimiento del cero inicial, o sea, que no existan fenómenos de deriva sin posibilidad de recuperación.
- Gran sensibilidad y precisión, de forma que se aprecien deformaciones unitarias del orden de μ/m .
- Longitud adecuada para que los áridos de mayores dimensiones empleados sean como máximo 1/3 de la longitud del aparato.
- Gran rigidez transversal y pequeño diámetro.
- Posibilidad de medir la temperatura con bastante exactitud para calcular las deformaciones unitarias y poder estudiar la influencia de las variaciones térmicas en las deformaciones unitarias medidas.

Generalmente, los extensómetros fabricados por las casas mencionadas anteriormente poseen estas características, pero, a nuestro entender, los aparatos de cuerda vibrante dan con el tiempo mejores resultados por dos razones:

- 1.^a Más facilidad para mantener el cero inicial, ya que los aparatos de resistencia eléctrica necesitan resistencias de aislamiento del orden de 200.000 M Ω , no siempre fácil de conseguir y mantener.
- 2.^a Actualmente se tiende a concentrar los puntos de medida en el menor número posible de centrales, incluso en una central única, donde se instalan equi-

pos de lectura totalmente automáticos, con computador y *plotter*. En estas condiciones, se obliga a grandes recorridos de cables, cuya longitud, en el caso de aparato tipo Carlson, influye en la resistencia eléctrica del conductor que interviene en el equilibrio del puente Wheastone. Con los aparatos de cuerda vibrante lo que se mide es la frecuencia de vibración de un hilo, que es independiente de la longitud del cable.

Los pasos a seguir para obtener las deformaciones unitarias, a partir de las magnitudes medidas, son los siguientes:

Extensómetros de cuerda vibrante:

$$\varepsilon = c \frac{4 L^2 \rho}{E g} [f^2 - f_0^2].$$

ε = deformación unitaria.

L = longitud del hilo.

ρ = densidad del material del hilo.

E = módulo elástico del material del hilo.

g = aceleración de la gravedad.

f_0 = frecuencia de vibración medida en el instante cero.

f = frecuencia de vibración medida en un momento determinado.

c = constante del aparato.

Extensómetros tipo Carlson.

$$\varepsilon = \alpha \left[\frac{R_1}{R_2} - \left(\frac{R_1}{R_0} \right)_0 \right] + \beta (R - R_0).$$

$\frac{R_1}{R_2}$ = relación de resistencias medidas en un instante dado.

$\left(\frac{R_1}{R_2} \right)_0$ = relación de resistencias medidas en el instante cero.

R = resistencia total medida en un instante dado.

R_0 = resistencia total medida en el instante inicial.

α = Cte mecánica del aparato expresada en Microns por metro por cada 0,0001 de variación en la relación de resistencias.

β = Cte de corrección por temperatura, expresada en Microns por metro por cada 0,01 Ω de variación de la resistencia total.

III.2.3. Cálculo tensional.

Si desde un principio dibujamos las deformaciones calculadas en unos ejes deformación unitaria-tiempo, vemos que existe una relación muy directa entre la temperatura ambiente y su

evolución con las deformaciones unitarias medidas. Se ha comprobado, además, que los gradientes térmicos inducen a tensiones en el hormigón superiores a las creadas por peso propio, e incluso iguales o superiores a las debidas a carga hidrostática durante el proceso de llenado. A esto hay que añadir fenómenos de restricción de la cimentación, especialmente en presas con refrigeración artificial, que originan, en la primera vida de la obra, tensiones positivas cerca de la cimentación.

Esta sensibilidad de las presas bóveda a los efectos térmicos, aunque normalmente no suele incidir sobre la seguridad, puede ocultar perturbaciones no previstas que es necesario conocer y seguir. Por ello, la realización de cálculos tensionales es totalmente necesaria no sólo durante la puesta en carga y posterior explotación, sino también al finalizar el período de hormigonado.

La forma de enfocar el problema, en uno u otro caso, es distinta, pero los pasos a seguir para conocer las tensiones y direcciones principales son los mismos. El proceso es el siguiente:

- 1.º Compatibilización de las deformaciones unitarias de forma que la suma en dos direcciones ortogonales cualesquiera sea un invariante. Esta compatibilización, en la práctica, suele realizarse fácilmente y las dispersiones que se obtienen son pequeñas.
- 2.º Corrección por efecto térmico, contenido de humedad, cambios volumétricos del hormigón, introduciendo, como después veremos, las deformaciones unitarias medidas por el extensómetro corrector.
- 3.º Corrección por efecto de Poisson.
- 4.º Corrección del efecto de fluencia.
- 5.º Cálculo de las tensiones principales, teniendo en cuenta las ecuaciones de la elasticidad.

Las ecuaciones que ligán las deformaciones unitarias, medidas en tres direcciones normales entre sí con las tensiones, son:

$$\epsilon'_i = \frac{1}{E} [\delta'_i - \nu (\delta'_j + \delta'_k)],$$

siendo:

$$\epsilon'_i = \epsilon_i - \epsilon_c;$$

ϵ_i = incremento de deformación unitaria, medida por el extensómetro activo y ya compatibilizada.

ϵ_c = incremento de deformación unitaria, medida por el extensómetro corrector y que es la misma en cualquier dirección.

Despejando las tensiones en función de las deformaciones, obtenemos las ecuaciones de Lamé:

$$\delta'_i = \lambda (\epsilon'_i + \epsilon'_j + \epsilon'_k) + 2G \epsilon'_i,$$

siendo:

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

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

Entrando en estas ecuaciones con el valor $\nu = 0,20$ normalmente aceptado, obtenemos:

$$\delta'_i = E (1,111 \epsilon'_i + 0,278 \epsilon'_j + 0,278 \epsilon'_k) = E [(1,111 \epsilon_j + 0,278 \epsilon_j + 0,278 \epsilon_k) - 1,667 \epsilon_c].$$

En esta ecuación, debido al efecto de fluencia, hay que introducir un coeficiente de corrección. Este coeficiente viene expresado por:

$$\frac{1}{E} \left[\frac{1}{1 + f(k) \ln(t + 1)} \right]$$

siendo $f(k)$ la fluencia específica del hormigón y t el tiempo de carga en días, de forma que la expresión final es:

$$\delta''_i = E (1,111 \epsilon''_i + 0,278 \epsilon''_j + 0,278 \epsilon''_k).$$

A partir de aquí determinamos las tensiones en tres direcciones de un mismo plano y con ellas las tensiones principales, tanto en magnitud como en sentido y dirección.

Como es lógico, todo este proceso puede automatizarse totalmente con un programa adecuado e incluso añadiendo un *plotter* al ordenador dibujar las tensiones principales a una escala apropiada, resultando el procedimiento cómodo y rápido.

III.2.4. Variables que intervienen en el cálculo tensional.

Como hemos visto, para obtener las tensiones a partir de las deformaciones unitarias medidas, debemos conocer una serie de variables que influyen en el resultado final; entre ellas: módulo elástico, fluencia y cambios volumétricos del hormigón.

Además, para realizar un cálculo tensional hemos de tener en cuenta una serie de factores, que solamente el técnico responsable puede seleccionar para escoger los diversos períodos de cálculo, hasta conseguir abarcar bien todo el proceso de hormigonado o fases escogidas del llenado; dichos factores son: interrupciones de hormigonado, mantenimiento de la cota del embalse, crecimiento rápido de alguna de estas variables, comienzo de la refrigeración, temperatura de los puntos donde se controlan las tensiones, etc.

La explicación es sencilla: entre una fecha final y una inicial se han desarrollado unas tensiones que son las que tratamos de conocer. El módulo elástico y la fluencia, durante este período, cambian y al principio de la obra muy rápidamente; el error que se introduce al tomar los valores de E y $f(k)$, correspondientes a la fecha media, es pequeño cuando el llenado y hormigonado se realizan rápidamente, siendo prácticamente constantes E y $f(k)$ durante todo el período; sin embargo, si éstos son lentos y, por tanto, el intervalo de tiempo entre la fecha inicial y final es grande, la deformación por fluencia puede ser muy importante y la variación de E considerable, introduciendo efectos secundarios que nos pueden enmascarar las tensiones que deseamos conocer si no analizamos el proceso habido desde la fecha inicial hasta el momento final. En estas condiciones, es conveniente dividirlo en períodos cortos, aplicando después el principio de superposición, donde se tengan en cuenta los factores arriba mencionados.

Obtención del módulo elástico.

Una de las variables que intervienen en la obtención de las tensiones, partiendo de las deformaciones unitarias, es el módulo de elasticidad. Este parámetro puede medirse de cuatro formas distintas:

- 1.º Realizando, con la ayuda de gatos hidráulicos, ensayos de carga y descarga en las galerías de la propia obra y midiendo las deformaciones mediante comparadores.
- 2.º Emplazando tensímetros próximos al punto donde se miden las deformaciones, de tal forma que conozcamos la tensión en una dirección, en la cual se mide también la deformación unitaria.
- 3.º Realizando ensayos en probetas elaboradas con hormigón de las mismas características que el que rodea a los grupos de extensómetros, o bien, en probetas extraídas mediante perforación.
- 4.º A partir de la proporcionalidad entre el módulo elástico y la raíz cuadrada de las cargas de rotura, en probetas ensayadas en el laboratorio de obra.

El primer procedimiento, aunque algunos autores opinan que es el más aconsejable, tenemos nuestras dudas sobre él. La razón es que los ensayos se realizan en singularidades de la estructura, como son las galerías, con armaduras de zunchado y donde los campos de tensiones están alterados. Hay otra razón, y es que para realizar un cálculo tensional no nos interesan valores del módulo elástico del hormigón de la presa, sino del que rodea a los grupos de extensómetros, que casi siempre es un hormigón más rico en cemento por la eliminación de los áridos más gruesos. Este aspecto obliga a prescindir también de la obtención del módulo elástico a partir de probetas extraídas mediante perforación, cuyo hormigón además se perturba por estas manipulaciones.

El cuarto procedimiento nos suministra solamente valores indicativos, con dispersiones notables de acuerdo con la fórmula que escojamos para relacionar el módulo elástico con la raíz cuadrada de la carga de rotura. Según esto, solamente nos queda emplear tensímetros, uno por cada punto de medida, o bien realizar ensayos en probetas elaboradas con el mismo hormigón que rodea al grupo de extensómetros.

El uso de tensímetros es el procedimiento más cómodo, pero estos aparatos plantean inconvenientes, como ya comentamos en el apartado II. Estimamos por ello que realizar ensayos en probetas, obtenidas a partir del hormigón que rodea a los grupos de extensómetros,

vibradas y curadas en condiciones similares al del hormigón en masa, es lo más aconsejable. Las probetas, en número de tres o cuatro por cada grupo, se someterán a ensayos de carga y descarga en el laboratorio de pie de obra, alcanzando valores máximos de las cargas en función de la edad del hormigón, sin llegar en ningún caso a la rotura.

Fluencia del hormigón.

Es totalmente válido emplear las ecuaciones de la elasticidad para conocer el incremento de tensión habido en un lapsus de tiempo corto y para edades del hormigón, en las cuales las propiedades mecánicas de éste tienden a la estabilización. Sin embargo, cuando hay que determinar las tensiones en un período largo o el hormigón es muy reciente, hay que tener en cuenta la fluencia del hormigón y las ecuaciones de la elasticidad pura no son válidas.

En estas condiciones se empieza por admitir que la fluencia es proporcional a la tensión y que la superposición de efectos es válida; hipótesis que se han comprobado y son correctas para tensiones alejadas de la rotura. La expresión que se emplea para el cálculo de la fluencia es la propuesta por Rafael:

$$\varepsilon = \frac{1}{E(k)} + F(k) \ln(t+1);$$

$$\frac{1}{E(k)} = \text{deformación elástica de un hormigón de edad } k.$$

$$F(k) \ln(t+1) = \text{deformación por fluencia, función de la edad } k \text{ del hormigón.}$$

$$F(k) = \text{parámetro variable, función de la edad del hormigón.}$$

$$t = \text{tiempo de aplicación de una carga unitaria.}$$

Si conociéramos $F(k)$ nuestro problema estaría resuelto, puesto que a las deformaciones ya compatibilizadas y corregidas del efecto de Poisson, bastaría aplicarle, como ya indicamos, un coeficiente corrector, de valor

$$\frac{\frac{1}{E(k)}}{\frac{1}{E(k)} + F(k) \ln(t+1)}$$

para obtener las deformaciones unitarias proporcionales a tensiones. La forma correcta de acometer el problema es realizar ensayos en probetas sometidas a carga constante para edades distintas del hormigón; sin embargo, esto no suele realizarse en la mayoría de las obras por problemas que no vienen al caso, y debemos recurrir a otros medios.

En principio, parece lógico pensar que la fluencia de un hormigón determinado está relacionada de alguna forma con su módulo elástico. Hormigones con un módulo elástico alto, generalmente alcanzan valores bajos de la deformación por fluencia, y al contrario (ref. 9).

Los técnicos portugueses, a partir de ensayos de fluencia realizados en algunas presas de su país, han comprobado que, en efecto, dentro de los límites de error admitidos, se puede obtener $F(k)$ partiendo del conocimiento del módulo elástico y relacionando este valor de E con los valores de $F(k)$ obtenidos en hormigones donde se realizaron ensayos de fluencia.

Como comprobación de los valores obtenidos de esta forma, podremos valernos de las deformaciones unitarias, realmente medidas en puntos situados en bloques sin inyectar y con las juntas abiertas. En esta época las deformaciones por efectos térmicos, si no existen gradientes, son iguales en todas direcciones, funcionando el bloque isostáticamente. La única tensión existente en estas condiciones es vertical, que podremos calcular de acuerdo con el proceso de hormigonado. Las ecuaciones, como ya hemos visto, que ligán las tensiones con las deformaciones unitarias, son:

$$\delta_z = E [(1,111 \varepsilon_z + 0,278 \varepsilon_y + 0,278 \varepsilon_x) - 1,667 \varepsilon_c],$$

$$\delta_x = E [(1,111 \varepsilon_x + 0,278 \varepsilon_y + 0,278 \varepsilon_z) - 1,667 \varepsilon_c].$$

al ser $\sigma_x = 0$ restando

$$\delta_z = 0,883 E (\varepsilon_z - \varepsilon_x).$$

De acuerdo con esto, después de hormigonada una tongada, hasta hormigonar la siguiente, σ_z ha permanecido constante. Las deformaciones elásticas se acusan al principio y el resto de las medidas se deben a fenómenos de fluencia. Relacionando esta deformación con la expresión que liga la fluencia, obtenemos $F(k)$.

Cambios volumétricos en el hormigón por temperatura, contenido de humedad y expansión autógena.

Como hemos visto en el apartado III.2.3, debemos introducir en el cálculo, además de las deformaciones unitarias medidas por los extensómetros activos, aquellas deformaciones que el hormigón sufre y no sean debidas a tensiones. Estas se miden mediante extensómetros

to que alteran el estado libre de tensiones al tener que acompañar al hormigón en sus deformaciones.

Para evitar este inconveniente, la firma francesa Telemac ha desarrollado un sistema que evita la necesidad de disponer una pieza metálica como la mencionada anteriormente. En este caso la disposición del corrector es la indicada en la figura 3, donde se detallan los elementos más importantes.

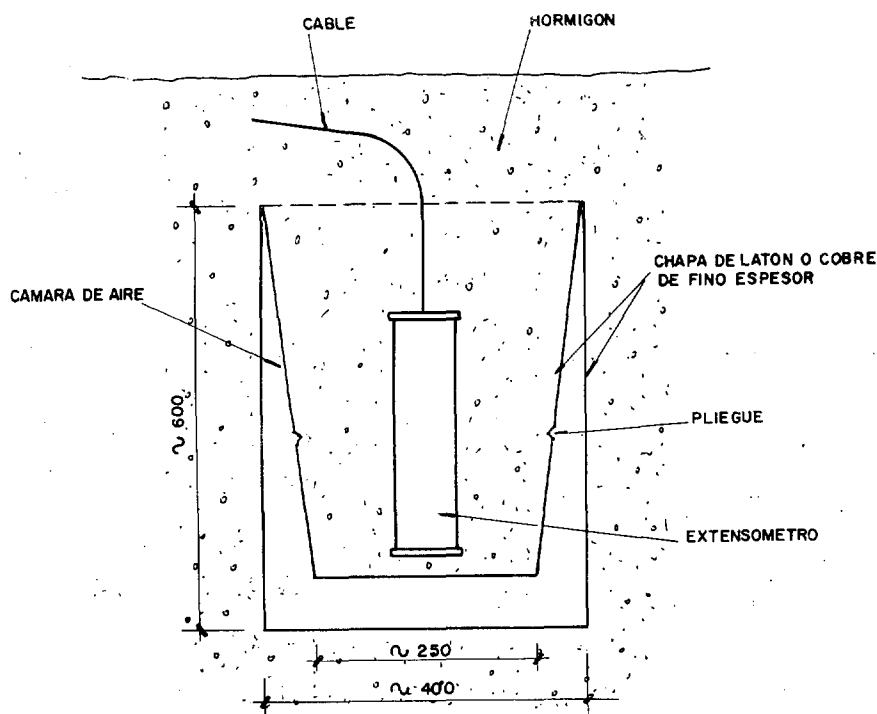


Fig. 2. — Extensómetro corrector.

colocados en posición vertical dentro de una pieza cilíndrica y con una cámara de aire que los aísla del campo de tensiones.

Las dimensiones de esta pieza son variables según el especialista, pero están próximas a las que se indican en la figura 2.

Estas piezas se fabrican con materiales muy deformables, normalmente cobre o latón de fino espesor y con pliegues que aumenten la deformabilidad. Sin embargo, a pesar de utilizar espesores muy finos y materiales de bajo módulo de deformabilidad, suelen influir en mayor o en menor grado de las mediciones obtenidas, pues

Comentaremos brevemente, pues ello puede ser tema de un artículo, que los datos obtenidos a partir de los extensómetros correctores son de gran utilidad si son elaborados por técnicos especialistas. Estos datos nos permiten calcular, además de las deformaciones unitarias proporcionales a tensiones, los valores del coeficiente de dilatación lineal, cambios volumétricos del hormigón habidos durante el período de fraguado, expansión higrométrica e incluso valores aproximados del coeficiente de permeabilidad.

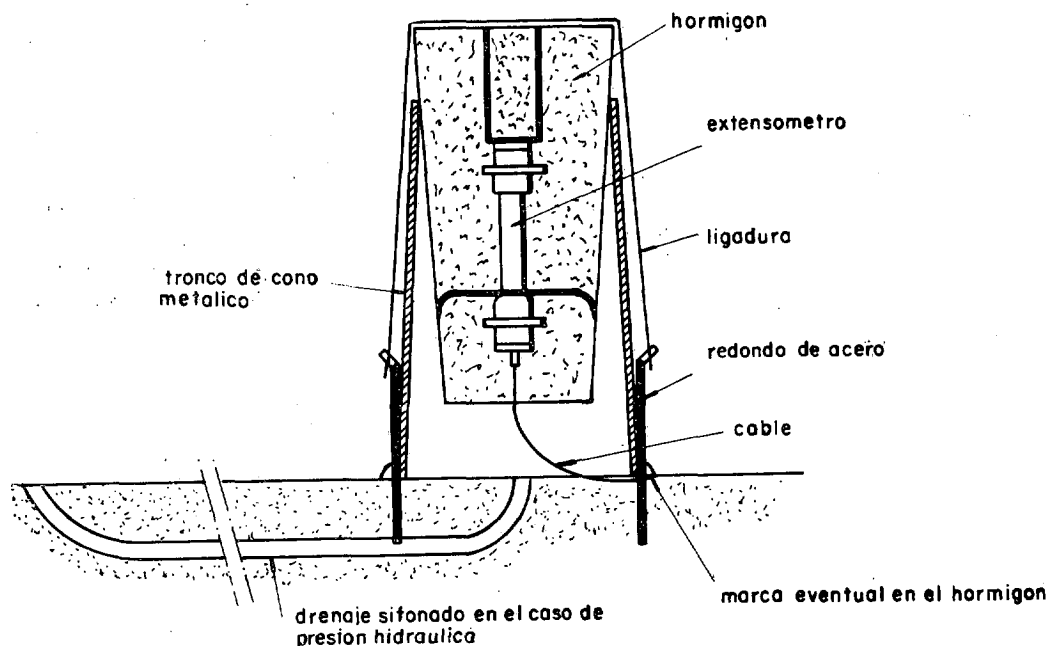


Fig. 3. — Extensómetro corrector de Telemac.

III.3. Presas antiguas sin sistema de auscultación.

III.3.1. Generalidades.

Por considerarlo un tema de interés, una de nuestras preocupaciones ha sido el conocimiento del estado tensional real de una presa construida hace tiempo y en la cual, por las circunstancias que rodearon la ejecución del proyecto o por los escasos medios de que se disponía en aquella época, no fue posible prever un sistema de auscultación completo.

A pesar de que el principio teórico y la técnica utilizada para la obtención de tensiones en estas presas es la misma que se emplea para la determinación de tensiones naturales en macizos rocosos, no conocíamos, hasta muy recientemente, obras donde estas mediciones se realizarán; quizá porque los aparatos existentes en el mercado no estaban suficientemente desarrollados, resultando el proceso caro y de poca garantía.

Ultimamente, gracias al perfeccionamiento, por el Bureau of Reclamation, de un aparato desarrollado por el Bureau of Mines de EE. UU., se han realizado, con resultados satisfactorios, las mediciones de tensiones en las presas americanas de Stewart Mountain (1928-1930), Horse Mesa (1924-1927) y Mormon Flat (1923-1925). Todas presas bóveda de pequeño espesor.

Este procedimiento, que marca una pauta a seguir, puede realizarse en gran número de presas antiguas y en obras que, por alguna causa de tipo técnico, sea aconsejable conocer el estado tensional en un momento dado.

III.3.2. Principio teórico. Método de liberación de tensiones (stres-relief).

Al realizar un taladro, en un material elástico, homogéneo e isótropo, cualquier variación en las tensiones del mismo se traduce en una variación de las dimensiones transversales del taladro. Si se miden estas variaciones, según tres diámetros diferentes, y se suponen conocidos el módulo elástico y coeficiente de Poisson, podemos calcular la magnitud y dirección de las tensiones principales de la siguiente forma:

$$\delta_1 + \delta_2 = \frac{E}{3D(1-\nu^2)} (\Delta D_1 + \Delta D_2 + \Delta D_3),$$

$$\delta_1 - \delta_2 = \frac{\sqrt{2}E}{6D(1-\nu^2)} [(\Delta D_1 - \Delta D_2)^2 + (\Delta D_2 - \Delta D_3)^2 + (\Delta D_1 - \Delta D_3)^2]^{1/2}$$

$$\operatorname{tg} 2\theta_1 = \frac{\sqrt{3}(\Delta D_2 - \Delta D_1)}{2\Delta D_1 - \Delta D_2 - \Delta D_3}$$

E = módulo elástico del material.

ν = coeficiente de Poisson.

δ_1, δ_2 = tensiones principales en el plano normal al eje del taladro.

$\Delta D_1, \Delta D_2, \Delta D_3$ = variaciones del diámetro, según tres direcciones.

θ_1 = ángulo que forma δ_1 con la dirección, según la cual se mide ΔD_1 .

El método de liberación de tensiones (*Stress-relief*), como su nombre indica, consiste en liberar un cilindro, mediante perforación, del estado tensional circundante. Esta liberación de tensiones produce en él unas deformaciones que son las que tratamos de medir y para lo cual existen, fundamentalmente, dos procedimientos: utilizar un medidor de deformación transversal o bien una roseta de extensómetros pegados a la cara superior del cilindro.

Si utilizamos el primer procedimiento, la manera de proceder se indica en la figura 4 y las ecuaciones válidas son las expresadas anteriormente.

Empleando el segundo procedimiento (figura 5) lo que se mide son las deformaciones unitarias según tres direcciones; dos normales y una a 45° en la cara superior del cilindro; en este caso las ecuaciones son:

$$\varepsilon_1 \text{ ó } \varepsilon_2 = \varepsilon_h + \varepsilon_v \pm \sqrt{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_h + \varepsilon_v)^2 + (\varepsilon_h - \varepsilon_v)^2}.$$

La dirección de ε_1 , medida en sentido contrario a las agujas del reloj respecto a la dirección de ε_h , viene expresada por:

$$\text{tg } \theta_1 = \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_h)}{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_h + \varepsilon_v)}.$$

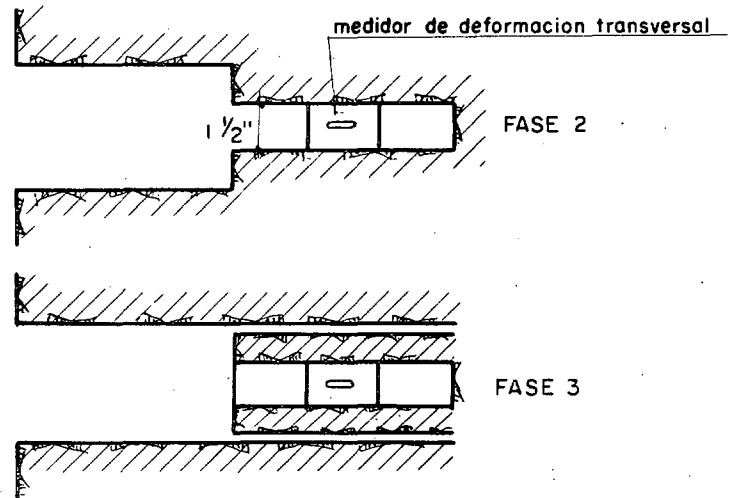
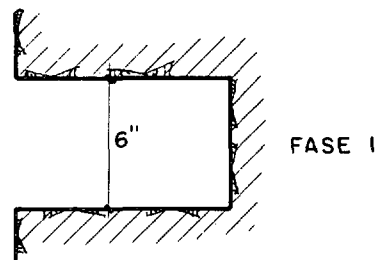
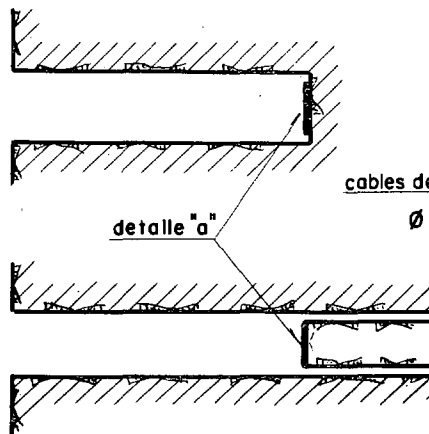


Fig. 4. — Método de liberación de tensiones empleando un medidor de deformación transversal.

Una vez conocidas las direcciones principales, las tensiones en el extremo del taladro son:

$$\delta_1 = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2),$$

$$\delta_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1).$$

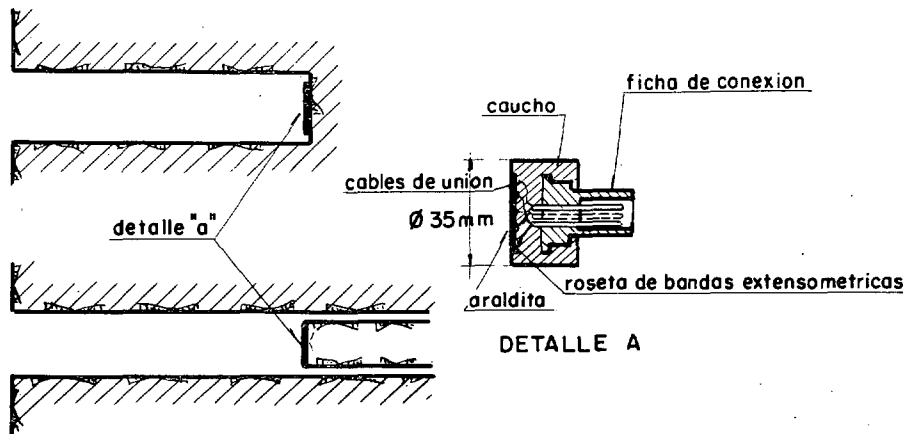


Fig. 5. — Método de liberación de tensiones empleando el doorstopper de Leeman.

III.3.3. Aparatos utilizados. Características.

Los aparatos existentes en el mercado mundial y que se han aplicado, con más o menos éxito, en el campo de la mecánica de rocas, forman un número muy elevado.

Uno de los primeros fue fabricado por Mahiak (Alemania) en dos versiones distintas, según el diámetro del taladro, 52 ó 92 mm. El transmisor es una célula de cuerda vibrante que va conectada a un vástago, el cual se hace salir, mediante un tornillo, hasta presionar sobre la pared de la célula, alcanzando una presión de contacto de 60 Kg/cm². Para que el instrumento pueda ser orientado se le equipa con un clinómetro; puede alcanzar profundidades hasta de 50 m y ha sido utilizado con éxito en gran número de obras. Este aparato presenta el inconveniente de que sólo mide un corrimiento transversal, obligando, para conocer el estado deformacional, a emplazarlo en distintas posiciones, midiendo por ello los corrimientos en planos diferentes; este hecho puede no tener demasiada importancia en el caso de determinar las tensiones en macizos rocosos, pero aplicado a presas bóveda, donde son de esperar gradientes de tensiones, necesitamos un aparato que nos mida simultáneamente las variaciones transversales en tres direcciones. El Doopstopper de Leeman y el medidor fabricado por el Bureau of Mines y perfeccionado por el Bureau of Reclamation cumplen este requisito.

El Doopstopper de Leeman presenta dos inconvenientes:

- 1.º Que realiza las medidas en el extremo del taladro, donde existe concentración de tensiones.
- 2.º Que para asegurar una buena adherencia entre la célula y la cabeza del taladro es necesario que esté suficientemente seco; esto puede lograrse mediante inyección de aire caliente en puntos próximos a la superficie, pero para ciertas longitudes de taladro este problema se agrava.

Estos inconvenientes no se presentan en el caso de utilizar el medidor del Bureau of Reclamation, aunque, como es lógico, tiene los propios inherentes al método, que en el apartado III.3.4 comentamos.

III.3.4. Medidor de deformación transversal del Bureau of Reclamation.

Forma de operar, ventajas e inconvenientes.

El medidor, montado en un cilindro de aluminio anodizado de 10,5" de longitud y 15/16" de diámetro, está formado por seis pistones de acero, montados radialmente para formar un ángulo de 60° entre sí, los cuales están en contacto con unas ménsulas de cobre-berilio a las que se les ha pegado, formando un puente Wheastone, bandas extensométricas por las dos caras; cualquier deformación de la pared del taladro se transmite mediante los pistones a las ménsulas que flexionan, acusando estos cambios los *Strain gauges* que han sido previamente calibrados. En la figura 6 puede apreciarse una sección de este aparato.

La forma de operar es la siguiente:

- 1.º Se perfora un taladro de 6" de $\varnothing$ en dirección normal al paramento hasta una profundidad de 6".
- 2.º Se extrae el testigo y se colocan unas guías en el taladro para centrar una corona de tamaño EX (1,5").
- 3.º Con esta corona se perfora hasta una profundidad de 1,65 m (~ 5 pies).
- 4.º Se introduce el medidor en el taladro EX hasta alcanzar una profundidad de unas 12", orientándolo para conocer con exactitud la dirección en la que se van a medir las deformaciones; esta operación, cuando las longitudes del taladro son considerables, requiere gran cuidado y experiencia por parte del operador.
- 5.º Se toma la lectura inicial y se comienza la sobreperforación, leyendo a intervalos regulares hasta que se termina de acusar deformaciones; esto ocurre al sobrepasar en unos 5 cm el punto de emplazamiento del medidor (ref. 4).
- 6.º Se extrae el testigo para someterlo a ensayos, con objeto de obtener el módulo elástico.
- 7.º Se introduce el aparato dentro del sondeo y se vuelven a repetir las mismas operaciones.

De las objeciones que se pueden hacer a este sistema las dos más importantes son:

- 1.^a El hecho de que al ser necesario realizar una perforación estamos alterando el estado tensional y, por ello, midiendo tensiones relativas.
- 2.^a El módulo elástico, determinado mediante ensayos realizados en testigos extraídos, se introduce en el cálculo con un límite de error que realmente no conocemos, a pesar de las correlaciones existentes entre los resultados de los ensayos realizados en laboratorio e *in situ*.

Estos inconvenientes no nos limitan el método que suponemos viable, ya que el error introducido con E en el conocimiento de las tensiones es de menor importancia que las indicaciones que nos suministran estas mediciones sobre las tensiones desarrolladas en algunas zonas y sobre las direcciones preferenciales de las tensiones principales.

III.3.5. Mediciones y resultados obtenidos en presas americanas empleando el medidor de deformación transversal del Bureau of Reclamation de EE. UU.

Como ya indicamos en el apartado III.3.1, se han realizado mediciones en las presas bóveda americanas de Stewart Mountain, Horse Mesa y Mormon Flat (ref. 11), cuyos resultados presentamos.

Primeramente establecieron un programa experimental para definir la orientación de los taladros, con vistas a obtener una mayor precisión en los resultados y determinar el estado tridimensional. Encontraron que, desechados tres taladros normales entre sí por imposibilidad física de realización, mediciones hechas en taladros cuyo sejes forman 60° proporcionan los mejores resultados, pero como las tensiones en dirección radial suelen ser en el caso de presas bóveda de importancia secundaria, comprobaron que taladros cuyos ejes forman entre sí ángulos de $22,5^\circ$ suministran resultados satisfactorios de las tensiones vertical-horizontal en planos tangentes a la bóveda.

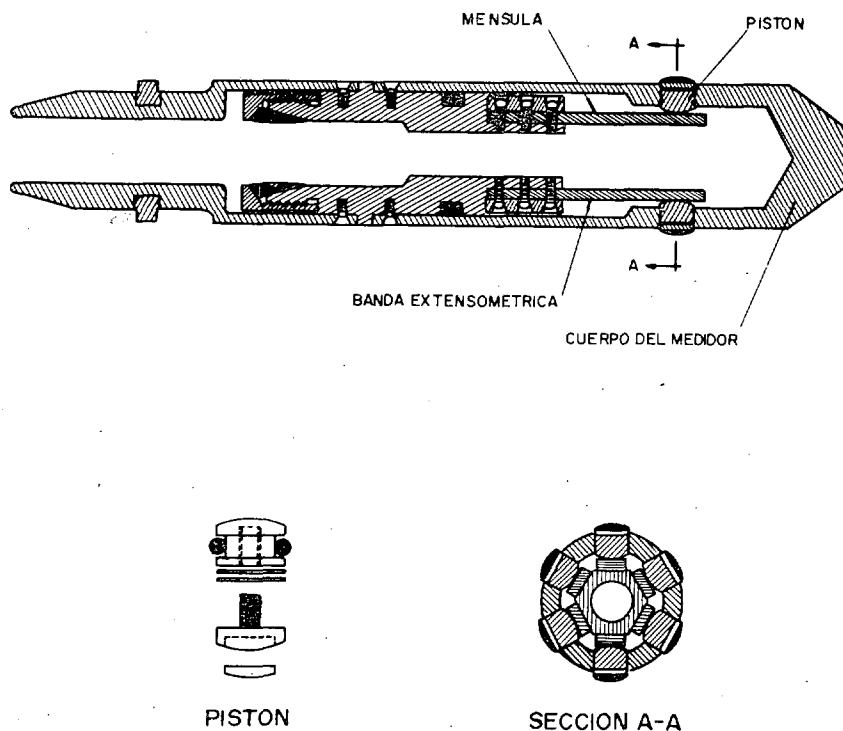
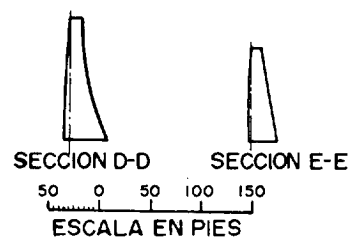
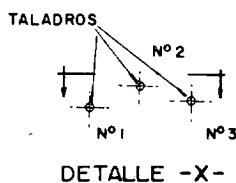
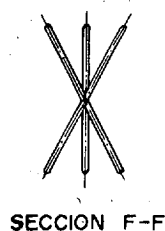
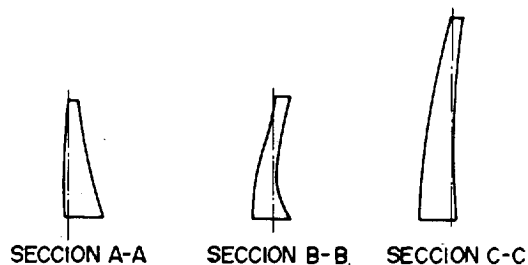
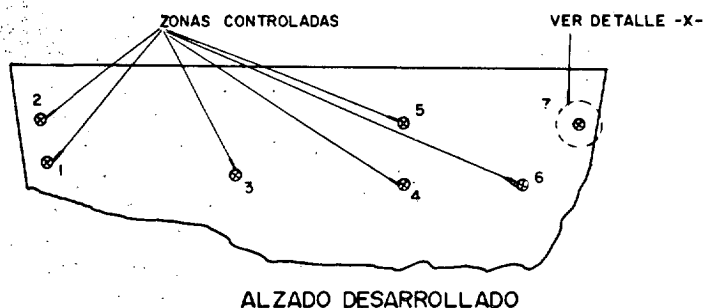
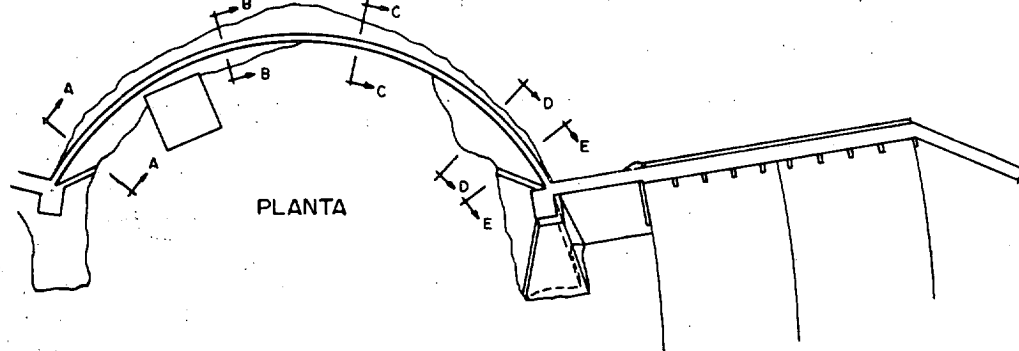
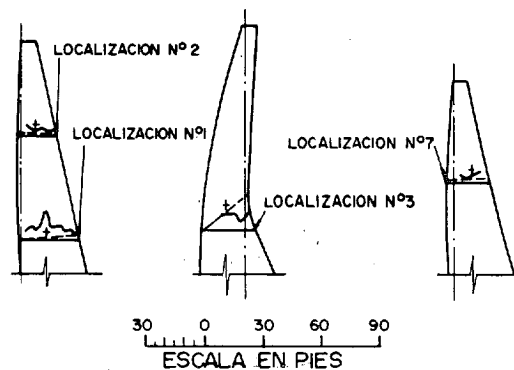
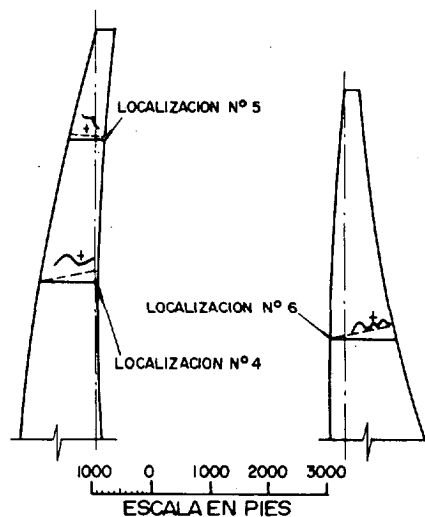
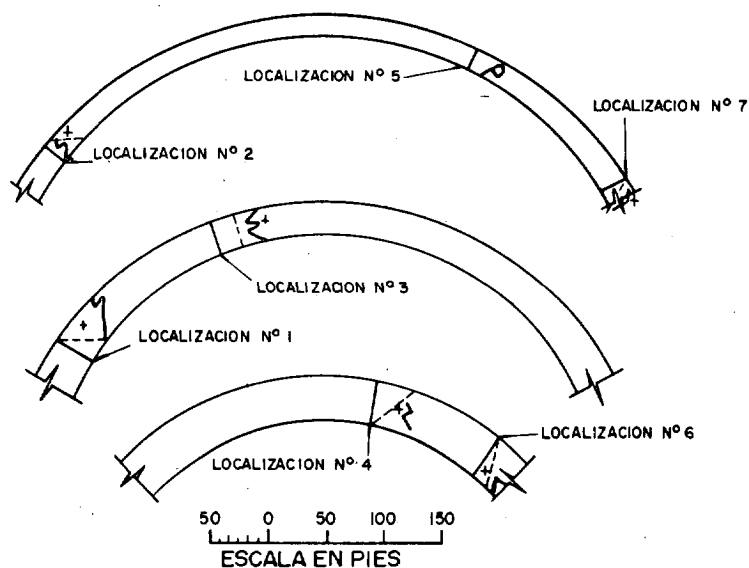


Fig. 6. — Medidor de deformación transversal del Bureau of Reclamation U. S. Department of the interior.



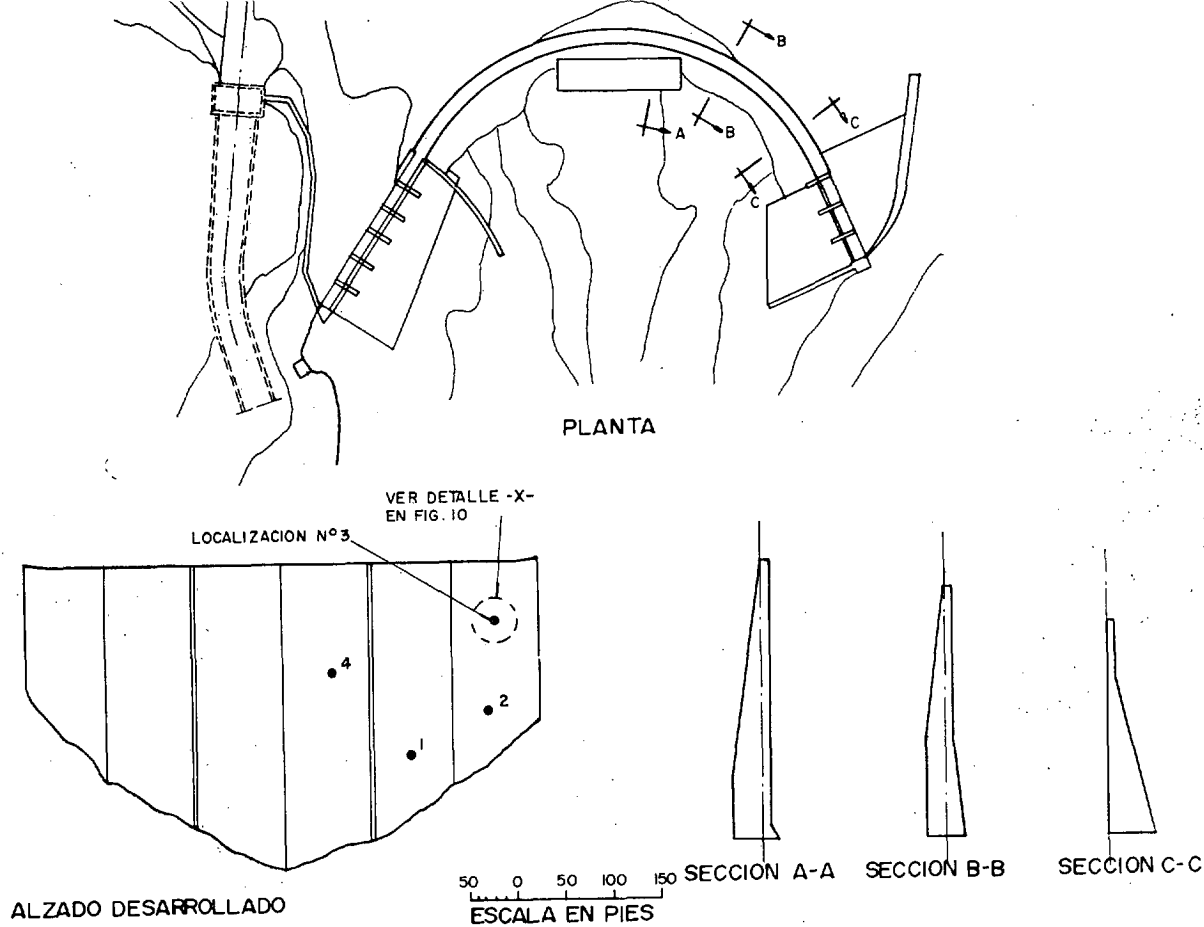
LOCALIZACION DE TALADROS



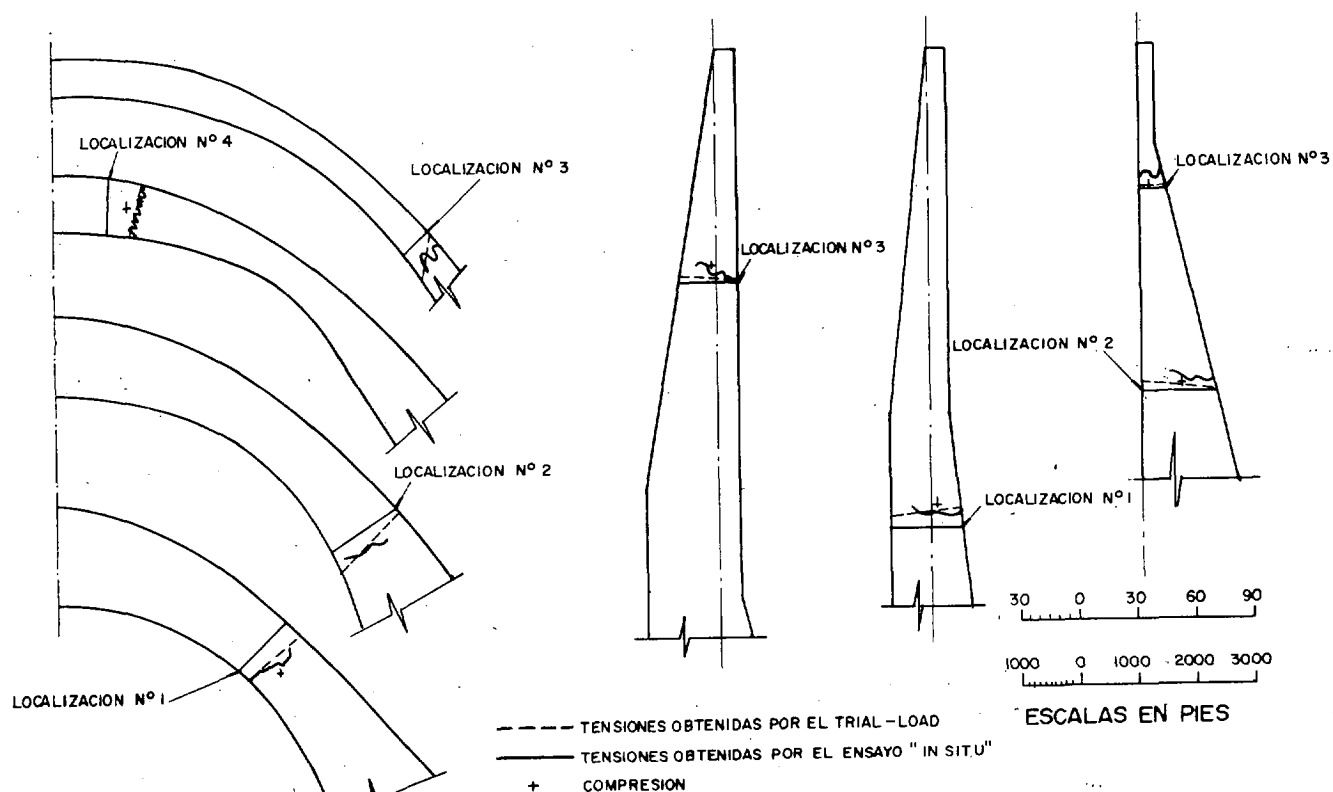
--- TENSIONES OBTENIDAS POR EL TRIAL-LOAD
 — TENSIONES OBTENIDAS POR EL ENSAYO "IN SITU"
 + COMPRESION

COMPARACION DE TENSIONES

Fig. 7.— Presa de Stewart Mountain. Localización de taladros y comparaciones de las tensiones obtenidas por el método del Trial-Load y por ensayo *in situ* (Bureau of Reclamation U. S.).

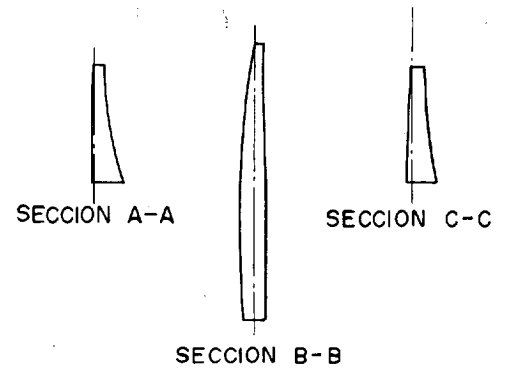
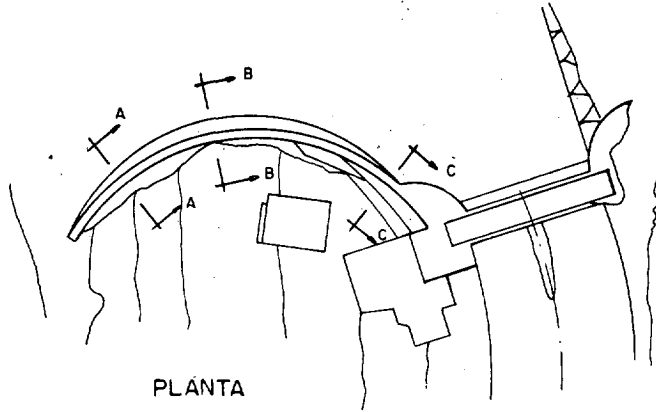


LOCALIZACION DE TALADROS

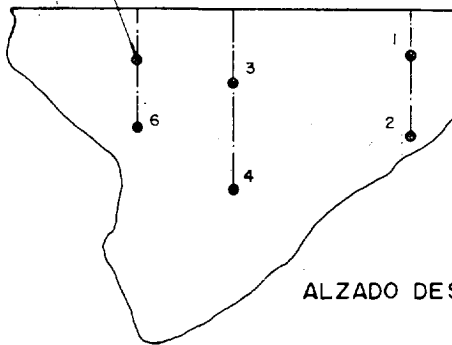


COMPARACION DE TENSIONES

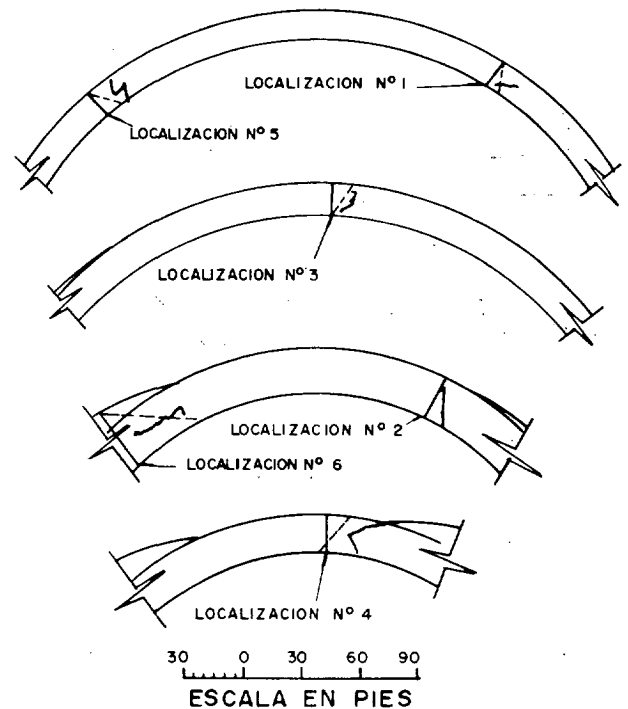
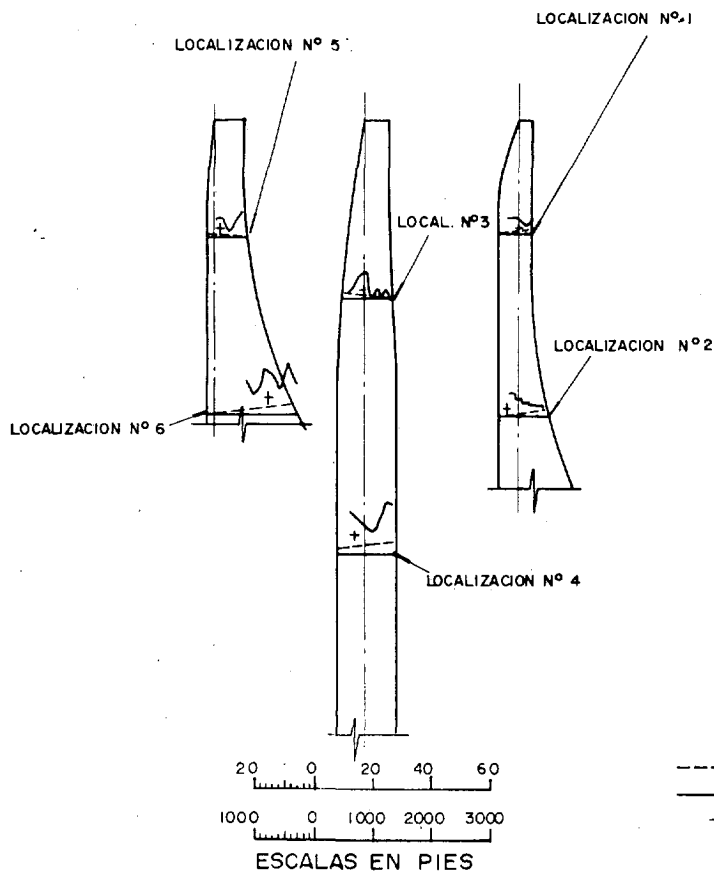
Fig. 8. — Presa de Horse Mesa. Localización de taladros y comparación de las tensiones obtenidas por el método del Trial-Load y por ensayo *in situ* (Bureau of Reclamation U. S.).



LOCALIZACION N° 5



50 0 50 100 150
ESCALA EN PIES



----- TENSIONES OBTENIDAS POR EL TRIA-LOAD
———— TENSIONES OBTENIDAS POR EL ENSAYO "IN SITU"
+ COMPRESION

Fig. 9. — Presa de Mormon Flat. Localización de taladros y comparación de las tensiones obtenidas por el método del Trial-Load y por ensayo *in situ* (Bureau of Reclamation U. S.).

De acuerdo con esto, en la presa de Stewart Mountain (fig. 7) realizaron, en siete zonas distintas, tres taladros por zona, uno normal al paramento de aguas abajo y los dos restantes formando $22,5^\circ$ con el central y separados en vertical 18° . En Horse Mesa (fig. 8), tres taladros, con idéntica disposición, en tres zonas distintas, y uno más, aislado, normal al paramento de aguas abajo. En Mormon Flat (fig. 9), seis taladros normales al paramento, cada uno en zona distinta.

Las tensiones, obtenidas mediante estos ensayos, pueden apreciarse en las mencionadas figuras números 7, 8 y 9, donde se comparan además con las suministradas por el cálculo, para condiciones similares de carga, nivel máximo de embalse y mínima temperatura en el hormigón.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ARTURO REBOLLO: "El comportamiento inicial de la presa de Susqueda", 2.^a parte. R.O.P. de diciembre de 1970.
2. J. LAGINHA SERAFIM, J. CALDEIRA RODRIGUES, A. PORTELA DOS SANTOS, M. JORGE MILHO: "O método de ajustamento completo para o cálculo de barragen abobada". Técnica, Revista dos Alunos do I.S.T., 1970.
3. M. GERARD WILLM: "Observación y auscultación de presas". C.E.H., noviembre de 1965.
4. A. ROBERTS: "La medida de tensiones y deformaciones en macizos rocosos". Stagg Zienkiewicz.
5. J. LAGINHA SERAFIM: "Medida de tensiones y deformaciones", edición C.E.H., septiembre 1963.
6. A. U. HUGGEMBERGER: "Método y aparatos de medida y de control". C.E.H.
7. A. ALVAREZ, M. PEREZ CABO: "Control system of the la Barca Dam". X Congreso de Grandes Presas. Q. 38, R. 31.
8. A. FERREIRA DA SILVEIRA: "Cálculo de las tensiones a partir de los resultados de la observación". C.E.H., septiembre de 1963.
9. ACI, COMMITTEE 207: "Mass concrete for dams and other massive structures".
10. OSKAR JACOBI, EGON BRANDLE: "Electric remote measuring instruments".
11. MERLIN D. COPEN, GEORGE B. WALLACE: "Determination of in situ stresses in concrete dams". Journal of the Power Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. March 1971.
12. BUREAU OF RECLAMATION: "Manual Concrete".
13. E. TORROJA: "Teoría de Elasticidad".
14. E. R. LEEMAN: "The CSIR Doorstopper and triaxial Rock stress Measuring Instruments". Rock Mechanics. May 1971, Vol. 3.