

DETERMINACIÓN DE LAS DEFORMACIONES DE LA PRESA DE SANTA LUZIA, POR EL MÉTODO DIRECTO DE AUSCULTACIÓN SONORA.

Por JOSÉ GUEDES PINTO MACHADO, Ingeniero Civil, I. S. T.

La REVISTA se complace en publicar el presente artículo de nuestro ilustre colega portugués Sr. Pinto Machado, que ha sido traducido por nuestro compañero D. Manuel Salto. El tema, que está claramente reflejado en el título, nos parece del mayor interés y pone de manifiesto la importancia de estas mediciones de las deformaciones internas de las obras, como el verdadero método racional de comprobar las previsiones e hipótesis que han servido de base a los cálculos. La REVISTA agradece al autor y al traductor esta colaboración de la ingeniería portuguesa, y hace votos porque continúe.

La presa de Santa Luzia es una presa arco, ubicada en una cerrada del río Unhais, llamado también río Pampilhosa. Su altura máxima es de 79,5 m., y su "tirant d'air" es de 73 m.

Está hecha de hormigón, su volumen es de unos 80 000 m.³ y proporciona un embalse de 45 millones de metros cúbicos. En la figura 1.^a puede verse la presa casi terminada, y en la 2.^a, el embalse conseguido ya. El proyecto lo hizo el ingeniero consultor francés André Coyne, que se ha distinguido en la construcción de gran número de presas.

Una presa, como dice con gracia el profesor Lugeon en su trabajo "Geologie des Barrages", es un cuerpo vivo que se mueve y envejece. Auscultar y conocer las variaciones de sus características físicas y mecánicas es una aspiración, casi un deber de conciencia, de los constructores de presas. Para conseguir esto, se emplean sistemas y métodos numerosos. Casi sin excepción, los procedimientos empleados tratan de medir las deformaciones, y comparando estas deformaciones en diferentes épocas, juzgan del comportamiento de la obra.

La comprobación de un aumento creciente de la deformación en un punto de la obra, en una misma dirección, es señal evidente de su inestabilidad, y, por el contrario, la repetición con carácter cíclico de las deformaciones en un mismo punto y una misma dirección, nos hace pensar, sin reservas, en sus buenas con-

diciones de estabilidad; medir las deformaciones de estas grandes masas de hormigón es, sin duda, de un gran interés para la ciencia y para los constructores. El primer método de que la ingeniería echó mano para juzgar de la estabilidad de una obra, fué la medición de las deformaciones sufridas por ciertos puntos.

Este sistema, cuyo valor es innegable, y cuya aplicación es fructuosa, no pasa de ser un recurso por lo que a la resistencia de materiales se refiere. La técnica de este método no profundiza en la esencia del problema que pretende resolver; se limita a darnos indicaciones sobre el comportamiento de la estructura considerada en conjunto, pero no nos muestra cómo la

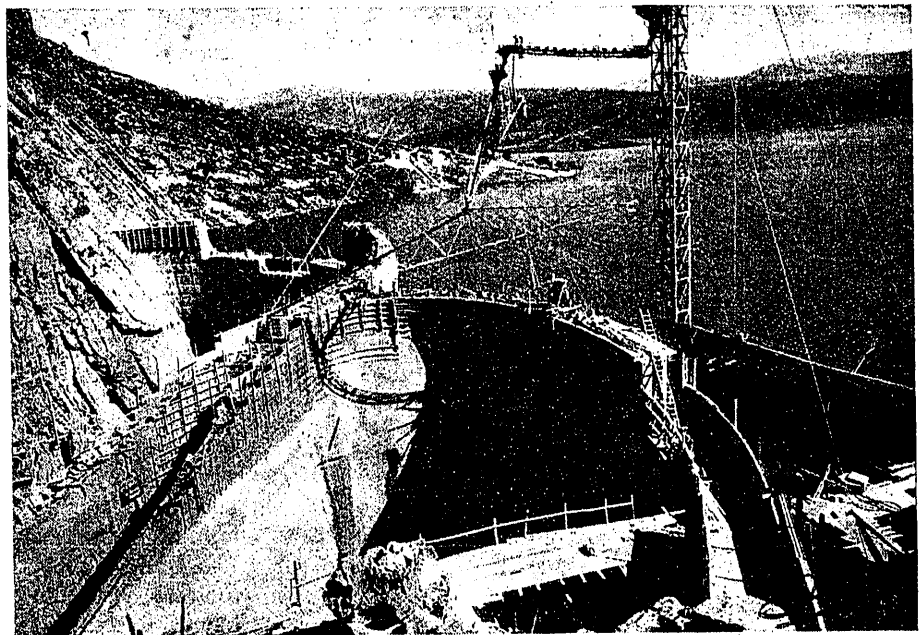


Figura 1.^a



Figura 2.ª

materia reacciona con las solicitaciones de las fuerzas exteriores.

Partiendo de los desplazamientos de ciertos puntos de una estructura, sólo podemos conocer el comportamiento del material de que está construída por un proceso indirecto basado en las hipótesis que nos sirvieron para su cálculo. Caemos en un círculo vicioso que nos impide hacer una crítica de las hipótesis fundamentales de cálculo adoptadas, partiendo de las deformaciones medidas.

La crítica de los principios en que se basan los métodos de cálculo es el instrumento que permite que la ciencia de la construcción progrese.

Por otra parte, esta crítica sólo puede hacerse comparando las condiciones de trabajo del material, deducidas por el cálculo, con las que tienen lugar en la realidad, obtenidas por una medición directa. La necesidad de esta confrontación entre el cálculo y la realidad fué sentida por los constructores, que por eso se esforzaron en poner en práctica otros sistemas de auscultación que les permitieran medir directamente las condiciones físicas en que se encuentra el material.

Entre los diversos métodos empleados para esto se destaca, por ser muy sugestivo, el proceso de medición acústica, empleado por primera vez en grandes masas de hormigón por el Ingeniero André Coyne.

Este procedimiento se empleó en la presa de Santa Luzia, y los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios.

Del método y de los resultados obtenidos vamos a ocuparnos en este sucinto artículo.

El sistema de medición de las deformaciones por el método acústico tiene por fundamento la variación que experimenta una cuerda vibrante cuando varía la tensión a que está sometida.

El principio, como se ve, es bastante simple: la realización práctica fué, sin embargo, trabajosa. En la figura 3.ª se ve la cubierta metálica donde va encerrada la cuerda vibrante, envolvente, que va colocada dentro de la masa de hormigón y orientada según la dirección en que la deformación desea medirse.

En la figura 4.ª se representa la sección longitudinal del aparato. En el interior lleva un electroimán que puede excitarse desde el exterior

por medio de una corriente eléctrica, por un cable que sale al exterior.

El sonido producido por esa cuerda cuando se la hace vibrar, solicitada por el electroimán, se transmite al exterior a través del mismo cable y se oye con un micrófono, después de ser convenientemente rectificado y ampliado.

La figura 5.ª muestra el aparato para escuchar.

Además del micrófono, este aparato tiene una cuerda vibrante con un tornillo micrométrico graduado en un extremo que permite medir, con una exactitud de micras por metro, los aumentos de longitud de esta cuerda con relación a un sonido patrón emitido por un diapasón que también forma parte del aparato. Haciendo que la cuerda del aparato de medida y la que está embebida y anclada dentro de la masa de hormigón emitan idéntico sonido, conoceremos la variación de longitud experimentalmente por ella con rela-

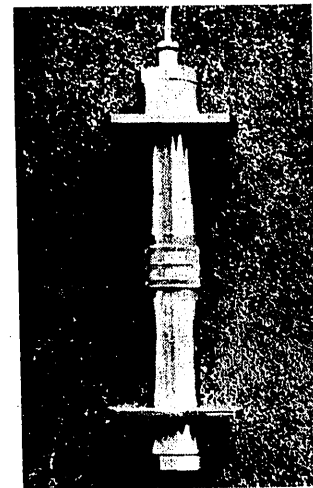


Figura 3.ª

ción a un estado anterior, estableciendo la igualdad

$$\frac{\Delta L}{L} = \left[\frac{L}{L_1} \right]^2 \times \frac{\Delta L_1}{L_1}$$

en que L representa la longitud de la cuerda del elasticómetro colocado en el hormigón, y L_1 la de la cuerda del aparato, y $(\Delta L/L)$ y $(\Delta L_1/L_1)$ los aumentos

unitarios de longitud de una y otra cuerda vibrantes, respectivamente. El valor de $(\Delta L_1/L_1)$ lo obtenemos por la lectura del tornillo micrométrico, y, una vez conocido, podemos calcular el alargamiento $(\Delta L/L)$ sufrido por la cuerda colocada dentro de la masa de hormigón.

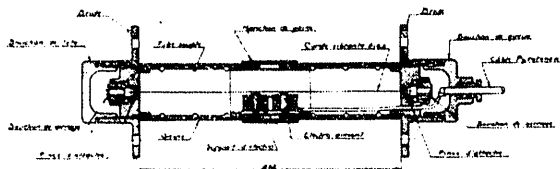


Figura 4.ª

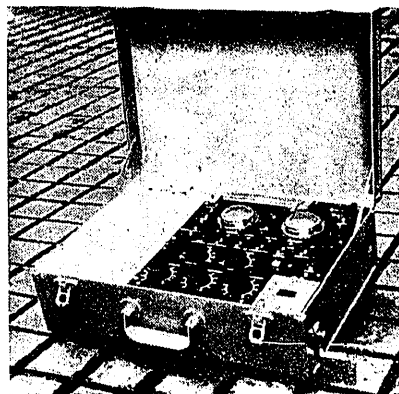


Figura 5.ª

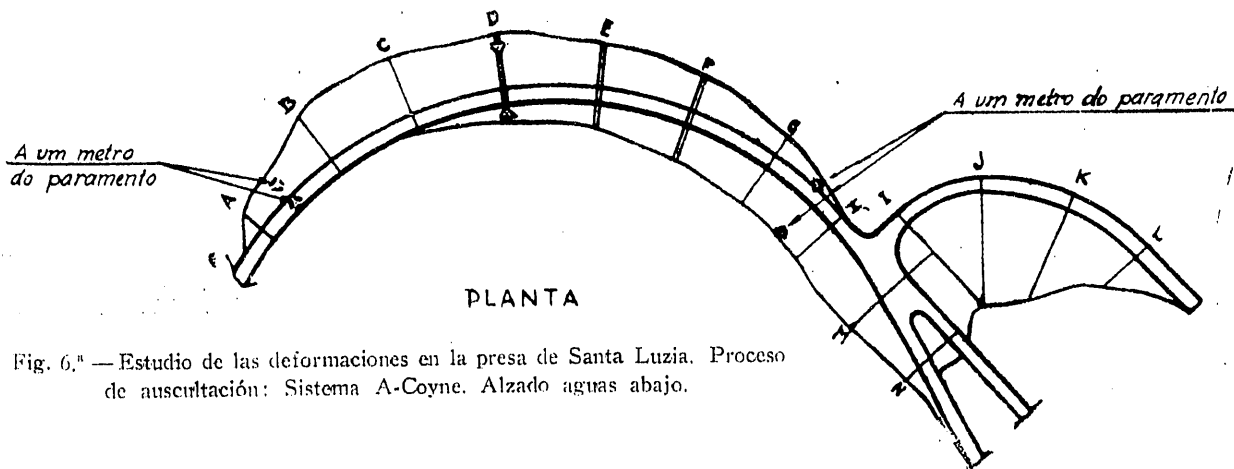
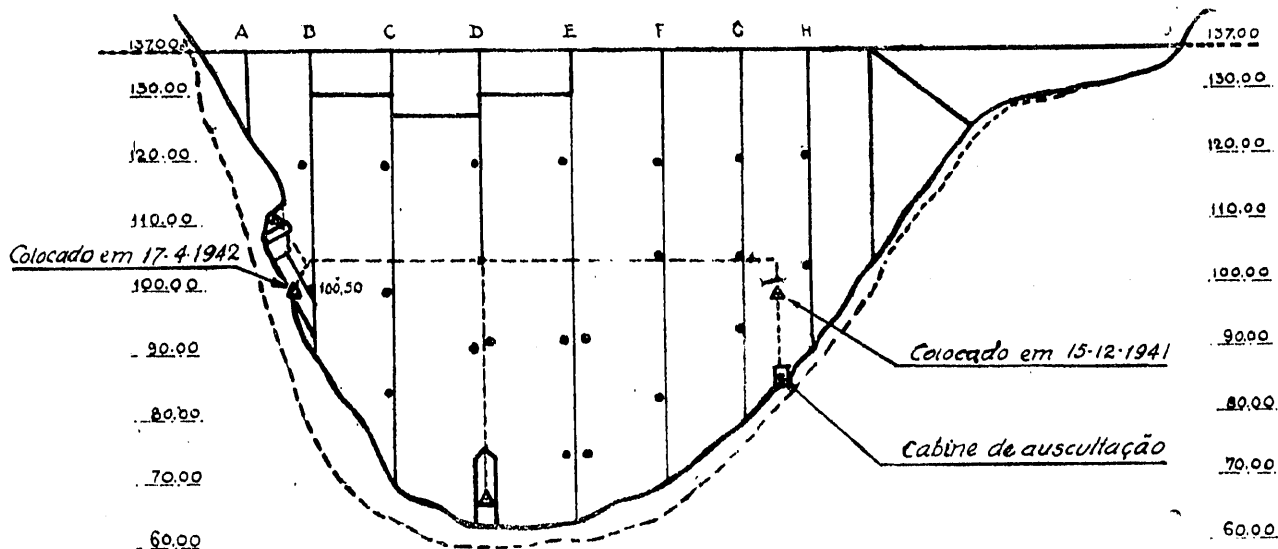


Fig. 6.ª — Estudio de las deformaciones en la presa de Santa Luzia. Proceso de auscultación: Sistema A-Coyne. Alzado aguas abajo.

El desplazamiento experimentado por la cuerda es evidentemente el mismo que el del hormigón, y el problema queda así completamente resuelto.

Por su educación profesional los ingenieros perciben con mayor claridad el concepto de carga de trabajo que el de deformación unitaria.

Como, además, los reglamentos especifican las car-

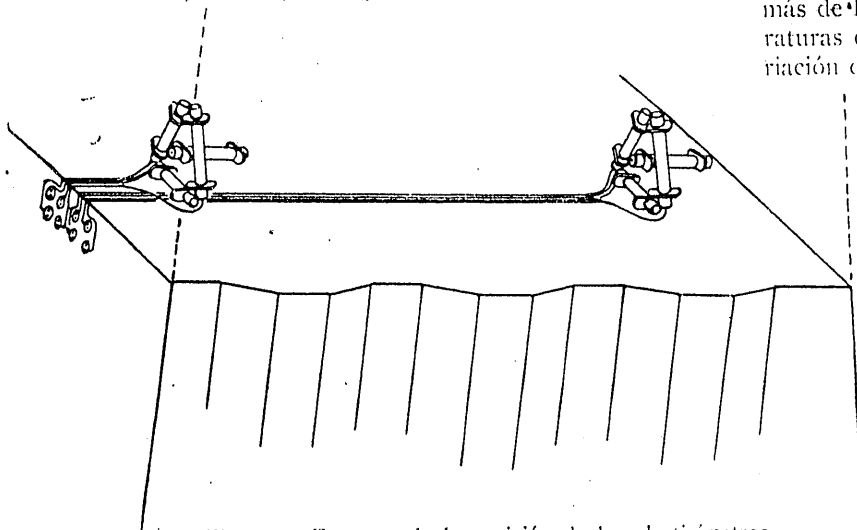


Fig. 7.ª — Esquema de la posición de los elasticímetros.

gas de trabajo, hay casi siempre interés en pasar de deformaciones a esfuerzos, cosa fácil conociendo el coeficiente de elasticidad del material.

Este coeficiente no es constante para el hormigón;



Figura 8.ª

varía un poco con la magnitud de los esfuerzos y, sobre todo, con la humedad del medio que rodea al hormigón.

En general, puede adoptarse para él un valor de 2×10^6 Kg./cm.² en ambientes secos.

El Ingeniero Coyne refiere en la Memoria descriptiva de la presa de Santa Luzia que las experiencias recientes muestran que el coeficiente de elasticidad de los hormigones mantenidos en atmósferas húmedas o sumergidos en agua eran del orden de 1×10^6 kilogramos por centímetro cuadrado.

Los aparatos están contruídos de modo que, además de las deformaciones, podamos medir las temperaturas de la masa de hormigón, basándose en la variación de la resistencia óhmica de un hilo en función de su temperatura.

El aparato de escucha tiene a este efecto una resistencia variable, graduada ya en grados de temperatura, que permite establecer el equilibrio de un puente Wheaston, en el que la rama desconocida es la cuerda del elasticímetro colocado en el hormigón.

En la figura 6.ª se indica la posición de los diferentes elasticímetros que se han colocado en la presa. Los que interesan para saber el comportamiento del arco son los grupos puestos en los bloques AB y GH. Los otros se distribuyeron en algunos puntos notables con objeto de estudiar las deformaciones en estos puntos, pero no interesan para estudiar el comportamiento del arco y no nos ocuparemos de ellos en este artículo.

No se pudieron colocar dentro del cuerpo de la presa todos los elasticímetros que estaban previstos porque no llegaron a tiempo de Francia, por las dificultades del momento actual.

Es particularmente de lamentar no haber podido estudiar las deformaciones en la clave del arco a la misma cota en que se colocaran los demás aparatos.

En los dos bloques, AB y GH se colocaron los apa-

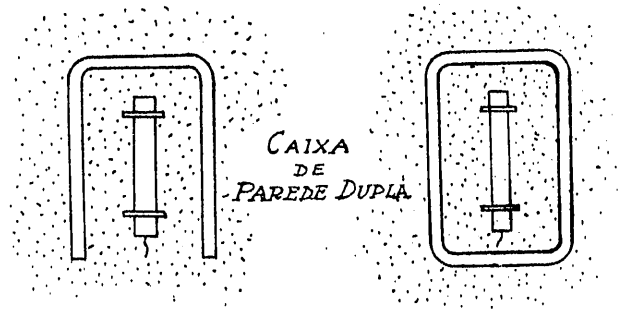


Figura 9.ª

ratos en grupos de cuatro, dispuestos como se indica en perspectiva en las figuras 7.ª y 8.ª.

El que está colocado en la dirección de un radio acusaba deformaciones pequeñas, porque los esfuerzos en esta dirección son también muy pequeños.

Grupo A-B. - Aguas arriba.

De 17-11-42 a 12-3-43.

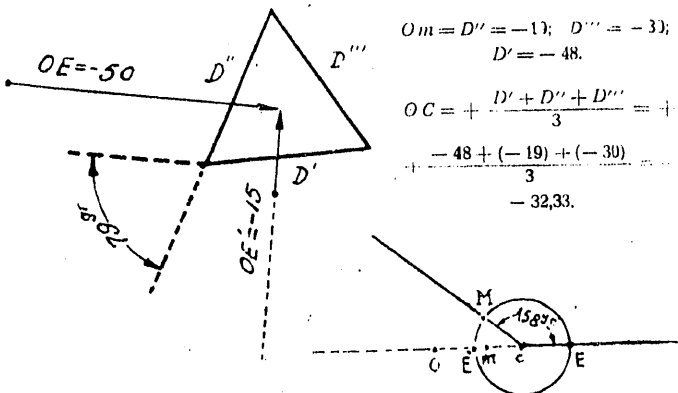
Cota de embalse: 123,7.

$$Om = D'' = -11; \quad D''' = -33; \\ D' = -48.$$

$$OC = + \frac{D' + D'' + D'''}{3} = + \\ \frac{-48 + (-11) + (-30)}{3} = + \\ -32,33.$$

$$Mm = +0,57735 (D''' - D') = 0,57735 (-33 - (-48)) = +10,33.$$

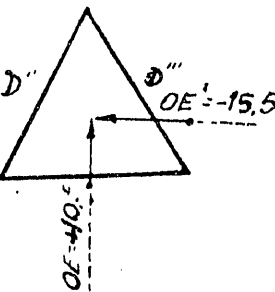
$$\text{Deformaciones principales} \dots \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} OE' = -15 \\ OE = -50 \end{array} \right.$$



Grupo G-H. - Aguas arriba.

De 19-11-42 a 12-3-43.

Cota de embalse: 123,7.

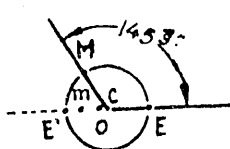


$$Om = D'' = +6; \quad D''' = +2; \\ D' = -15.$$

$$OC = + \frac{D' + D'' + D'''}{3} = + \\ \frac{-15 + 6 + 2}{3} = -2,33.$$

$$Mm = +0,57735 (D''' - D') = +0,57735 (+2 - (-15)) = +0,57735 (+17) = +9,81.$$

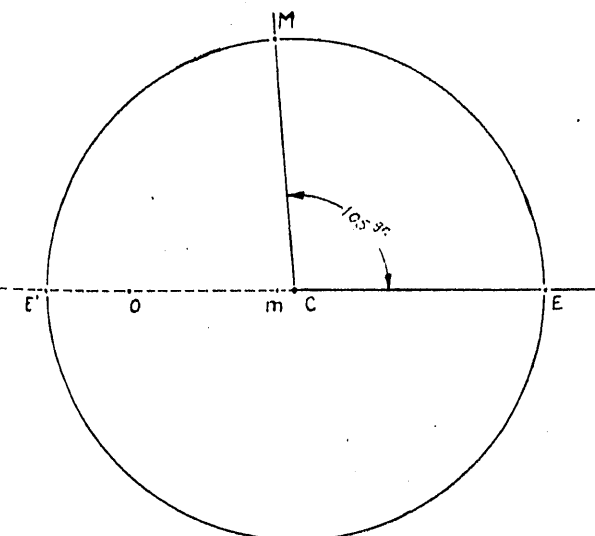
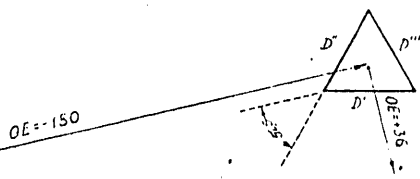
$$\text{Deformaciones principales} \dots \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} OE' = +10,5 \\ OE = -15,5 \end{array} \right.$$



Grupo A-B. - Aguas abajo.

De 17-11-42 a 12-3-43.

Cota de embalse: 123,7.



$$Om = D'' = -64; \quad D''' = +17; \quad D' = -169.$$

$$OC = + \frac{D' + D'' + D'''}{3} = + \frac{-169 + (-64) + 17}{3} = -72.$$

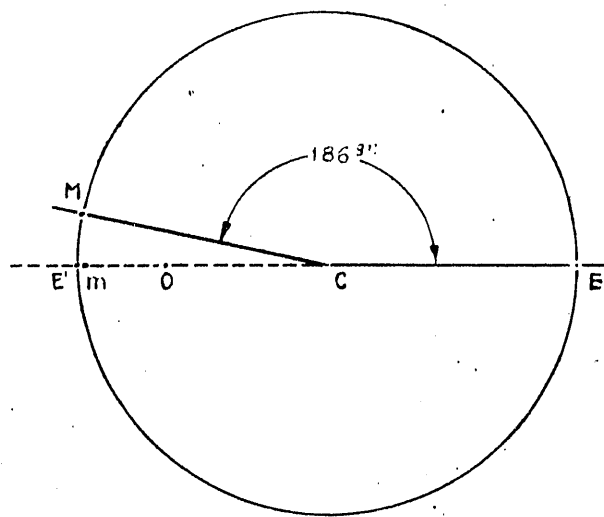
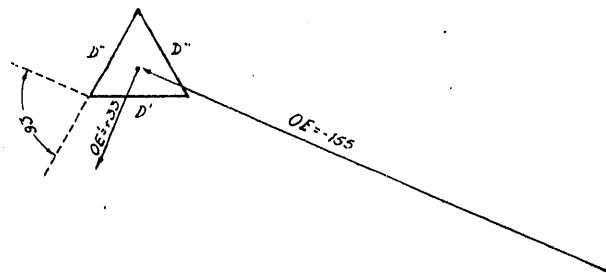
$$Mm = +0,57735 (D''' - D') = 0,57735 (17 - (-169)) = +107,38.$$

$$\text{Deformaciones principales} \dots \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} OE = +36 \\ OE' = -180 \end{array} \right.$$

Grupo G-H. - Aguas abajo.

De 19-11-42 a 12-3-43.

Cota de embalse: 123,7.



$$Om = D'' = +31; \quad D''' = -90; \quad D' = -124.$$

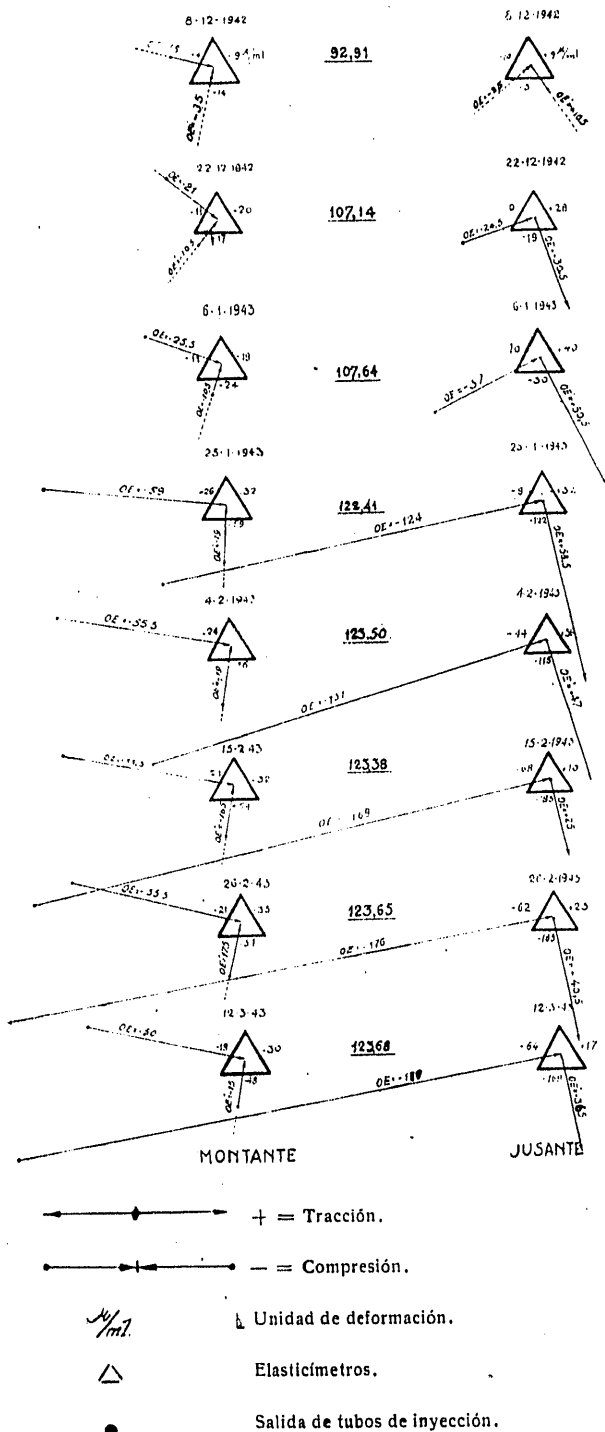
$$OC = + \frac{D' + D'' + D'''}{3} = + \frac{-124 + 31 + (-90)}{3} = -61.$$

$$Mm = +0,57735 (D''' - D') = 0,57735 (-90 - (-124)) = +1963.$$

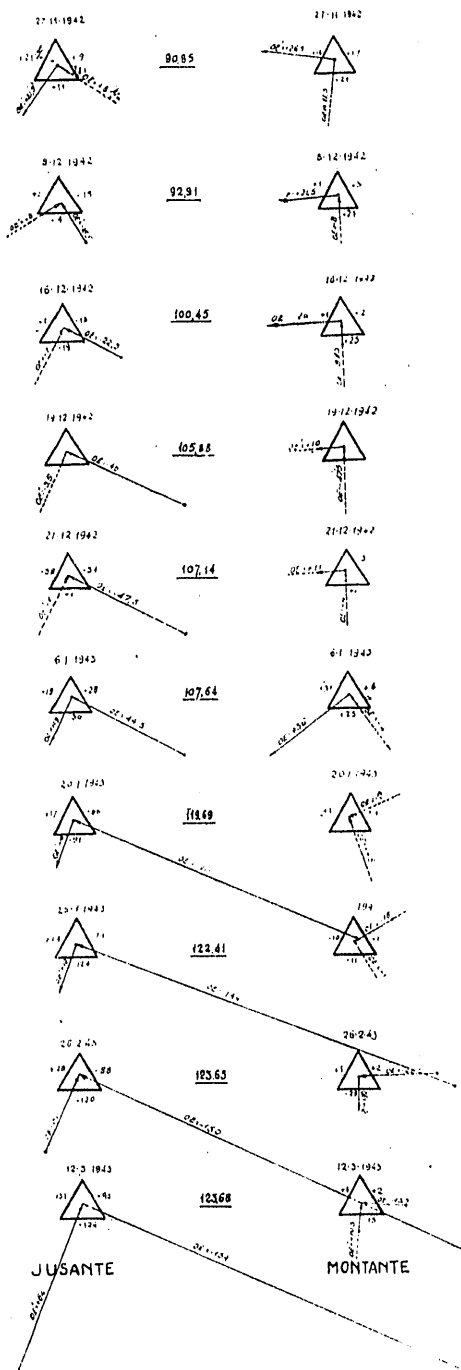
$$\text{Deformaciones principales} \dots \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} OE = +155 \\ OE' = +32 \end{array} \right.$$

Figura 10.

Deformaciones en el bloque A-B.
(Cota 100,5). — Cotas de agua.



Deformaciones en el bloque G-H.
(Cota 100,5). — Cotas de agua.



O el día 19-11-1942.

Fig. 11. — Estado inicial tomado como origen de las deformaciones.

Puede decirse que, prácticamente, las variaciones acusadas por él son solamente debidas a la desigualdad del coeficiente de dilatación del hormigón y del acero de la cuerda vibrante, y esta circunstancia puede ser aprovechada para corregir las lecturas de los otros elasticímetros.

Pero si se quiere una corrección más rigurosa, deberá colocarse junto a cada grupo de elasticímetros otro separado de la masa de hormigón por una caja de dobles paredes, como se indica en la figura 9.^a, para sustraerle de la sollicitación de los esfuerzos mecánicos.

Partiendo de las deformaciones medidas en los tres elasticímetros de cada grupo que están en un mismo plano pueden calcularse fácilmente las deformaciones principales en ese plano.

Para simplificar el cálculo de las dos deformaciones principales, los elasticímetros están colocados según los lados de un triángulo isósceles de base horizontal. La determinación se hace fácilmente por el procedimiento gráfico de Mohr, del que damos algunos ejemplos en la figura 10.

En la figura 11 se indican las deformaciones medidas en los elasticímetros y las deformaciones principales correspondientes para diferentes alturas de agua embalsada.

Es muy interesante ir siguiendo cómo van variando las direcciones principales a medida que va subiendo el nivel del agua en el embalse.

Este examen muestra por un lado que la magnitud de la deformación principal correspondiente al empuje va aumentando a medida que el agua va subiendo y, por otro, que a medida que el agua va subiendo, la dirección de este empuje se va acercando más a la horizontal, sin llegar a alcanzarla totalmente ni aun cuando el nivel del agua es bastante más elevado que la cota en que están colocados los aparatos.

Este efecto no es una particularidad de esta presa, sino por el contrario, ha tenido lugar en todas las presas arco en que se han efectuado estas medidas, y pone de manifiesto que la hipótesis de cálculo normalmente seguida en el cálculo de presas arco, que consiste en tomar como sólido elemental para los efectos del cálculo los arcos que se obtienen cortando la estructura por planos horizontales, no concuerda de un modo absoluto con la forma en que el material se comporta una vez construída la estructura.

La comprobación de este hecho ha dado lugar al empleo de un nuevo método de cálculo de presas de dovelas; y esta circunstancia basta para hacer entrever el gran partido que la técnica puede sacar de este proceso de medición directa de las deformaciones.