

VALORACION DE LAS CARACTERISTICAS ELASTICAS DE LOS MACIZOS ROCOSOS CIMENTACION DE LA PRESA-CUPULA DEL EUME

Por LUCIANO YORDI DE CARRICARTE,
Ingeniero de Caminos.

Presenta el autor una somera e interesante descripción de tres métodos para determinar la deformación de la roca de cimientos que actualmente se utilizan en el estudio de presas, y se ocupa después de la aplicación del tercero, llamado sísmico o de determinación dinámica, al caso de la presa-cúpula del Eume.

Consideraciones generales.

Siempre que nos encontramos en un clima no muy extremado, ante una cerrada en V o en U no excesivamente amplia, de laderas simétricas o con posibilidad de transformar en tales, mediante un sacrificio mínimo de excavaciones, dotada de un desagüe sin características especiales, y con unas cimentaciones geológicamente satisfactorias y de características elásticas calculables, podremos construir la presa por antonomasia, o sea, una presa-bóveda, de gran esbeltez, con desplome hacia aguas abajo, de arco y radio variables y ángulos en el centro, que no se aparten mucho de los 125°.

Entre estas condiciones tradicionales, que nos sirven de base de partida para definir la presa ideal, vemos que hay que considerar en todo momento las características elásticas de la roca de fundación, aunque en la actualidad no se pueda realmente concebir una estructura de importancia destinada a funcionar elásticamente, sin tener en cuenta las condiciones externas del contorno y, por consiguiente, las reacciones del terreno en donde se va a apoyar dicha estructura.

Sin embargo, como antes decíamos, en las presas en arco o en cúpula, como es nuestro caso (presa del Eume; altura, 101 m.), tiene este aspecto de la deformación de la zona de cimientos una importancia grande en el momento de efectuar el análisis de la estructura, debido a que una variación de los valores usuales de los módulos de elasticidad de la roca que constituye la zona de apoyo puede crear diferencias notables en la distribución de las cargas entre los arcos y las ménsulas que constituyen la bóveda o cúpula. Además, complementando esta idea, existe el hecho de que los análisis de tensiones en los modelos reducidos de presas-arcos han demostrado la creación de esfuerzos en algún momento inadmisibles, al variarse entre ciertos límites la relación de los módulos elásticos de la roca del cimiento y del hormigón de la roca.

Teniendo también en cuenta que aun en rocas

sanas la extracción de simples probetas no basta para tener un conocimiento claro de las características elásticas del macizo donde se va a emplazar la obra, se ve plantear la necesidad de determinar con adecuada aproximación las citadas características, y, en particular, el coeficiente llamado convencionalmente módulo elástico, cuando, como veremos más adelante, sería más correcto, si se trata de rocas, hablar de deformaciones y no de módulos.

Métodos utilizados.

Citaremos a continuación, antes de entrar en el problema concreto, los tres métodos fundamentales que actualmente se utilizan para conseguir el fin antes señalado de determinación de la deformación de la roca de cimientos:

a) Aplicación de una presión uniforme por medio de agua a toda la superficie de una galería circular de pequeña longitud.

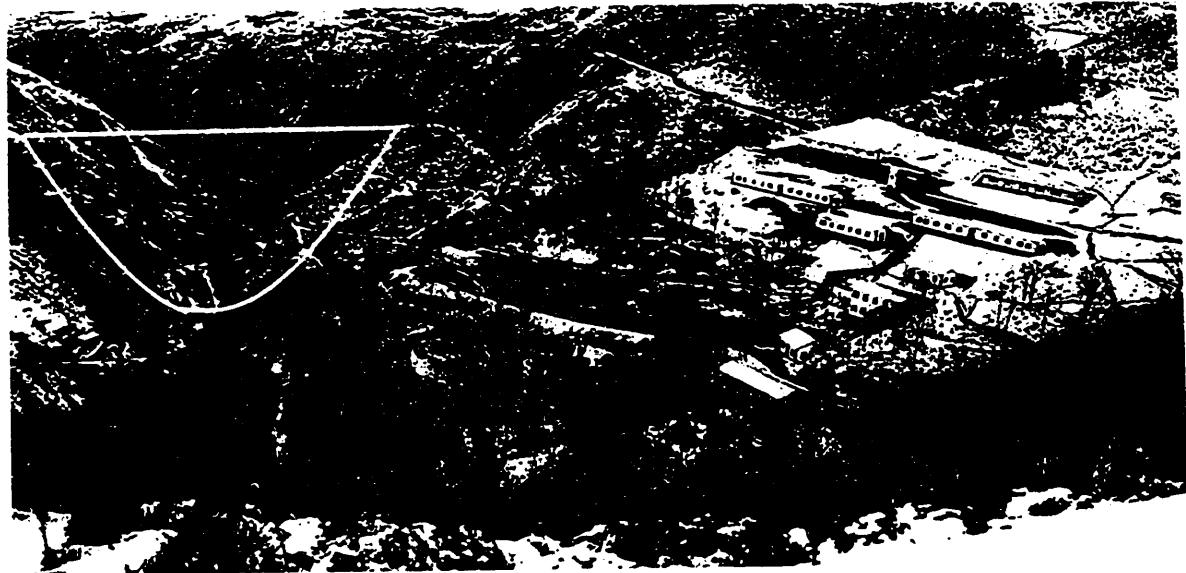
b) Aplicación de una fuerza a una superficie plana dentro de una galería; y

c) Determinación sísmica.

El primer método se lleva a cabo, en general, a base de galerías de 2 m. de diámetro y 17 Kg./cm.² de presión, excavadas sobre la superficie de cimientos y cubriendo y rejuntando la longitud de dichas galerías con impermeabilizantes, con ánimo de negar en las mismas, presiones internas. Si no se realiza esta operación de impedir la salida del agua por las grietas de la roca, se encuentran al final diferencias apreciables entre las deformaciones medidas, según los diversos diámetros de la galería. Este método tiene además de este inconveniente el de su lentitud y de su coste, y el de que cuando la roca no es muy uniforme hay que realizarlo en varios sitios, creándose así en la zona de cimentación puntos de menor resistencia con respecto al macizo general.

La fórmula usada para el cálculo del módulo de elasticidad por este método, es:

$$E = \frac{p \cdot d(1 - \nu)}{W}$$



Vista panorámica de la cerrada del Eume. En primer término, un aspecto parcial del campamento de la obra y de los caminos de servicio de la misma. Febrero de 1956.

en la cual E es el módulo de elasticidad; v , el de Poisson; p , la presión; d , el diámetro de la galería, y H' , la deformación diametral de la misma.

Esta fórmula, sacada del estudio presentado al V Congreso de Grandes Presas, celebrado en París en 1955, por los Ingenieros portugueses Rocha y Larginha, sobre dicha cuestión, tiene necesidad, para ser totalmente válida, según se cita en dicho estudio, de que se cumplan las siguientes condiciones:

1.^a La longitud de la sección ensayada debe ser suficientemente grande en relación al diámetro.

2.^a Las medidas deben hacerse lejos de los extremos.

3.^a La distancia de la galería a la superficie del suelo debe ser también grande comparada con su diámetro (esta condición no suele tener normalmente mayor importancia), y

4.^a La roca debe tener en todos los puntos y en todas las direcciones, debido a su peso propio, una capacidad de compresión superior al valor p .

Además de lo expuesto, el grado de exactitud de esta expresión y también de las de los otros métodos, dependen de hasta donde se considere la roca ensayada elástica, homogénea e isótropa, no pudiéndonos olvidar aquí de la que la deformación de una roca bajo cargas normales está, en general, mucho más lejos de la hipótesis simplificatoria de Hooke que otros muchos materiales metálicos, de madera o plásticos duros.

Por ello, en las rocas no se puede, como antes decíamos, hablar con rigor de módulos elásticos, sino más bien de deformaciones.

El módulo elástico es en este caso de las rocas un hábito mental que nos sirve para establecer unos índices comparativos entre unas y otras, ya que la representación en tres dimensiones de solicitudes,

deformaciones recuperables y deformaciones sólo recuperables con absorción de nueva energía, no va a ser nunca una recta, sino una cierta superficie.

Vemos así que este primer método, a pesar de su coste y de su dificultad de realización, no es totalmente exacto ni taxativo.

El segundo método de aplicación de una fuerza en una superficie plana, tiene la ventaja sobre el anterior de ser más simple y más económico, con el inconveniente de que la distribución de fuerzas transmitidas a las paredes de las galerías a través de bloques de hormigón o platos metálicos no está bien definida, lo cual hace difícil la interpretación de los resultados finales. De todas formas este método es más satisfactorio que el anterior.

La fórmula usada en este segundo método es:

$$E = \frac{p r (1 - v^2)}{W}$$

H' es en esta expresión el desplazamiento del centro



Vista de la cerrada del Eume; aspecto parcial del campamento y caminos de servicio de la misma.



Aspecto de la roca, en la que se apoyará el estribo derecho de la presa.

de una área con relación al de la otra, y los demás signos tienen el mismo significado que en la fórmula anterior.

La aplicación de esta fórmula implica, para ser válida, que las paredes de las galerías, normales a las superficies cargadas, no tengan esfuerzos de tracción y que la distancia de las superficies cargadas al nivel del suelo sea lo suficientemente grande para considerarse infinita, aproximadamente del orden de cinco veces el ancho de la galería.

Respecto al tercer método enunciado, llamado sísmico o de determinación dinámica, sabemos que en una roca ordinaria una cierta solicitudación, P , da lugar a una deformación recuperable o elástica, d' , y a otra irrecuperable o plástica, d'' , que hacen recorrer al punto representativo del estado de deformaciones-tensiones una cierta curva, siendo frecuente que esta curva presente un máximo de deformación recuperable.

En principio, se puede saber que en una roca, tal como se hallan en la naturaleza, no es posible, como venimos diciendo, fijar un módulo E , sino una función E , con dos partes correspondientes a los dos tipos de deformación a que antes abudimos, y que matemáticamente es cómodo representar en forma compleja de la siguiente manera:

$$E = c_1 + i c_2$$

en la cual c_1 y c_2 son funciones de P .

Por esta fórmula se ve que es fundamental el conocimiento de los valores de c_1 y c_2 *in situ*, pudiendo darse en la realidad dos casos: el de las rocas duras no rotas, con c_2 pequeño respecto a c_1 , y el de las

blandas o trituradas, en las que c_2 es del orden de c_1 o mayor.

Si c_1 es grande respecto a c_2 se efectuará una buena transmisión de una oscilación con poco amortiguamiento, y bastará medir la velocidad de propagación, que es función de c_1 , según las relaciones de Poisson y Stokes, que serán válidas aproximadamente y que tienen las siguientes expresiones:

$$V_L = \sqrt{\frac{\nu(\nu+1)}{(1+\nu)(2+\nu)}} \times \frac{c_1}{\nu}, \quad V_T = \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)}} \times \frac{c_1}{\nu}$$

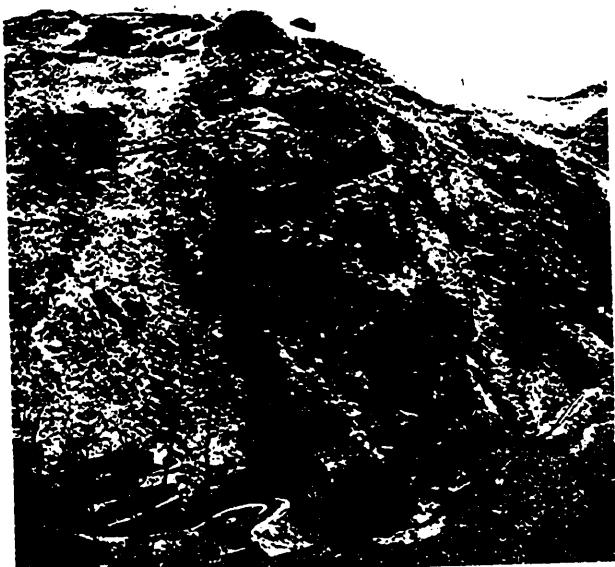
o sea, que a través de estas expresiones se ve que en un medio elástico las velocidades longitudinales V_L y V_T de propagación de una onda se relacionan con el módulo elástico y con el módulo de Poisson.

Determinadas, pues, las velocidades de propagación longitudinal y transversal de la onda elástica producida en el macizo de cimentación de la presa por una solicitación exterior, tal como un golpe o un explosivo, se ve que es posible, mediante unas relaciones matemáticas sencillas, hallar las características elásticas de la roca, necesarias para el análisis de la estructura que se va a apoyar en ella.

La esencia, pues, del método sísmico queda limitada a la medida de un tiempo para en función de él y de una distancia determinar una velocidad.

Aplicación a nuestro caso.

De estos tres métodos enunciados hasta aquí de forma sucinta, el empleado por nosotros en el caso concreto de la presa del Eume, fué el sísmico.



Vista general de la zona de emplazamiento del estribo izquierdo de la obra.

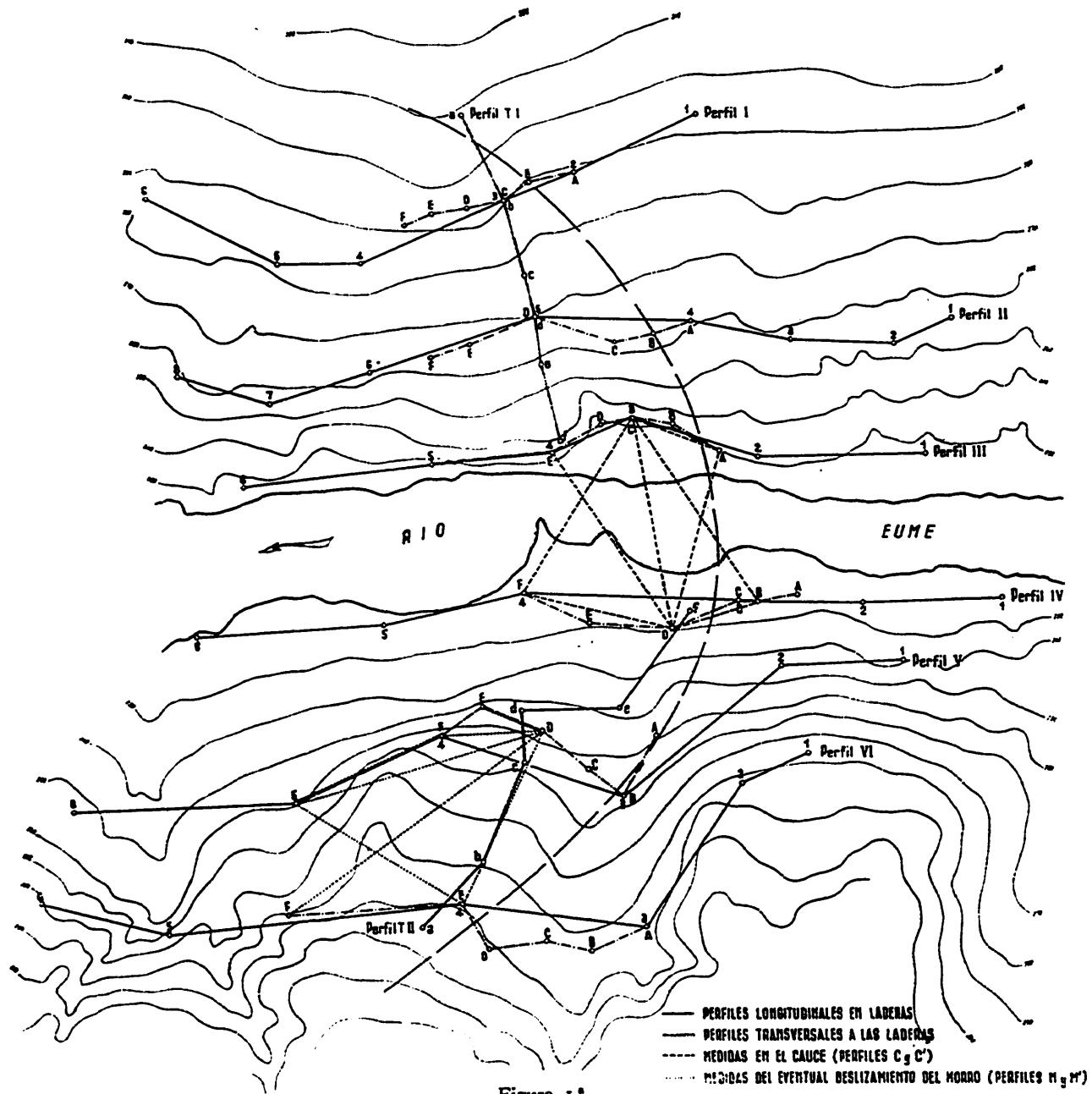


Figura 1.

A continuación exponemos cuáles fueron los motivos que nos indujeron a ello y los resultados obtenidos, así como su repercusión en el proyecto de la obra.

En este método, la determinación dinámica presenta la gran ventaja de valerse del registro del fenómeno instantáneo, tal como la propagación de la onda sísmica comunicada a la roca para obtener directamente los módulos que sirven de base para el correcto dimensionamiento de la obra.

Además, también se puede determinar por este método los módulos de la masa de roca profunda, que en general son más elevados que los anteriores, y que si bien es verdad que no tienen mayor efecto en el cálculo de la estructura, sirven en cambio para

un conocimiento general de las condiciones geológicas de la cerrada.

Otra ventaja de gran interés, es la que proviene de que al haberse empleado este sistema sísmico en muchos macizos rocosos donde estánemplazadas presas existentes, en construcción y en proyecto, se han determinado una serie de medidas que permiten contrastar muchos tipos de rocas por medio de un método rápido que da valores que tienen un cierto orden de magnitud.

No podemos aquí prescindir de la idea de que un 30 por 100 de error en el conocimiento del módulo elástico de una roca es perfectamente admisible.

El anterior orden de magnitud se ha fijado en muchos casos por contraste con los resultados ob-

tenidos por los otros dos métodos o por la observación directa del comportamiento elástico de la roca, una vez puesta la obra en carga.

En Italia se ha sugerido la clasificación de los módulos de elasticidad de las rocas, obtenidos por el método sísmico, en una escala decimal. Expresando los valores en la forma $m \times 10^5$ Kg./cm.², el campo de variación de m está comprendido entre 1 y 10, siendo la clasificación la siguiente:

Valores de "m".

- 1,00 a 2,50, roca mediocre.
- 2,50 a 5,00, roca buena.
- 5,00 a 7,50, roca muy buena.
- 7,50 a 10,00, roca óptima.

Esta tabla es útil para la comparación de valores cuando hay cierta analogía en las rocas.

Para poder pasar a la fase de aplicación práctica, es conveniente tener un punto de comparación, ya que así, por medio del contraste con otro método, se pueden deducir en primera aproximación los valores de los módulos elásticos obtenidos por medio del método sísmico.

Es evidente que esta determinación tiene un valor más práctico que científico, pero es de gran interés porque niega el que se cometan errores fundamentales en la cimentación de las grandes presas, no permitiendo alejarse demasiado de las condiciones que tiene la roca en la realidad.

De todas formas, este contraste, aunque sólo sea puntual, puede reducirse a los casos singulares, mien-

tras que en general podrá bastar la determinación sísmica, encuadrando los resultados obtenidos, para su debida corrección, en tablas comparativas.

Teniendo en cuenta lo dicho, la aplicación de este método sísmico al caso de la presa del Eume se hizo a la vista de la tectónica de la cerrada constituida por rocas cristalofílicas, predominantemente pizarrosas con estratos próximos a la vertical y sensiblemente normales al cauce del río, y teniendo además en cuenta la finalidad del reconocimiento, lo que permitió establecer un plan de medidas agrupadas en varios perfiles sísmicos longitudinales al cauce a fin de establecer los módulos de superficie y profundos, localizar los contactos que normalmente en ellos puedan existir y determinar el espesor de las zonas decomprimidas.

Otros perfiles transversales se realizaron para establecer los contactos paralelos al cauce y los módulos de las rocas en cada zona.

Independientemente de estas medidas fundamentales de módulos, se hicieron también otros dispuestos en el cauce a fin de establecer las características mecánicas de su roca de fondo; otras medidas se han efectuado para estudiar el eventual despegue de la ladera y para establecer la existencia de deslizamiento en un morro situado aguas abajo de la presa, en la margen izquierda.

De los perfiles longitudinales se llevaron a cabo tres en cada ladera, llegándose a distancias de hasta 200 m. Los transversales han sido uno en cada margen. En el plano (fig. 1^a) se presenta la situación de los perfiles sísmicos realizados.

Valores de los módulos elásticos de diversos emplazamientos de presas, obtenidos por el método sísmico.

NOMBRE	CLASE DE LA ROCA			
	Optima	Muy buena	Buena	Medioocre
Sauris	8.85	—	—	—
Vajont	6.15	—	—	—
Fedaia	—	3.85 E.D. 3.95 E.I.	—	—
Mis	—	3.75 E.D. 3.85 E.I.	—	—
Ambiesta	—	—	3.25	—
Maé	8.70 F.V.	—	3.10 E.D. 2.60 E.I.	—
Pieve di Cadore	—	5.15 F.V.	4.65 E.D. —	2.10 E.I. 2.10
Bareis	—	—	—	1.85 E.D. 1.75 E.I.
Val Gallina	—	—	—	—
Caprile	—	—	3.00	—

E.D. = Estribo derecho.

E.I. = Estribo izquierdo.

F.V. = Fondo del valle.

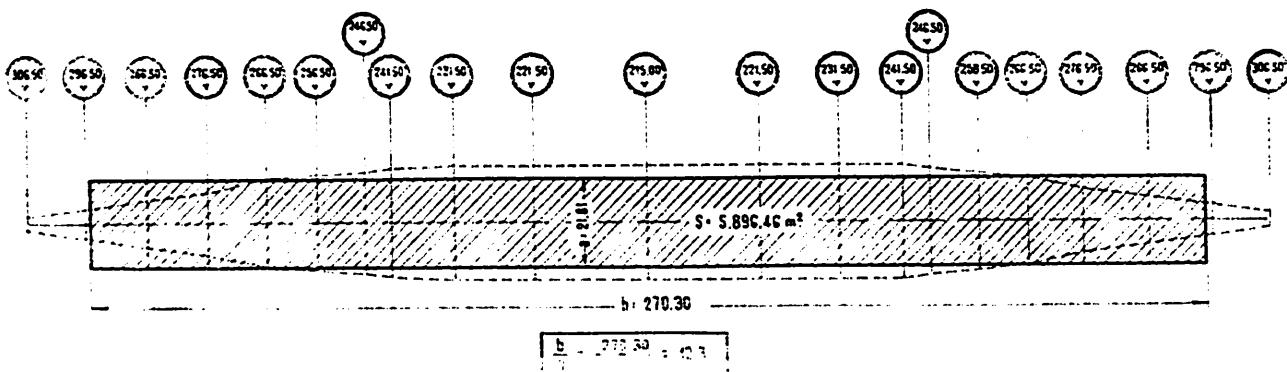


Fig. 2.*. — Desarrollo de la superficie de contacto de los arranques de los arcos con el terreno y área rectangular equivalente.

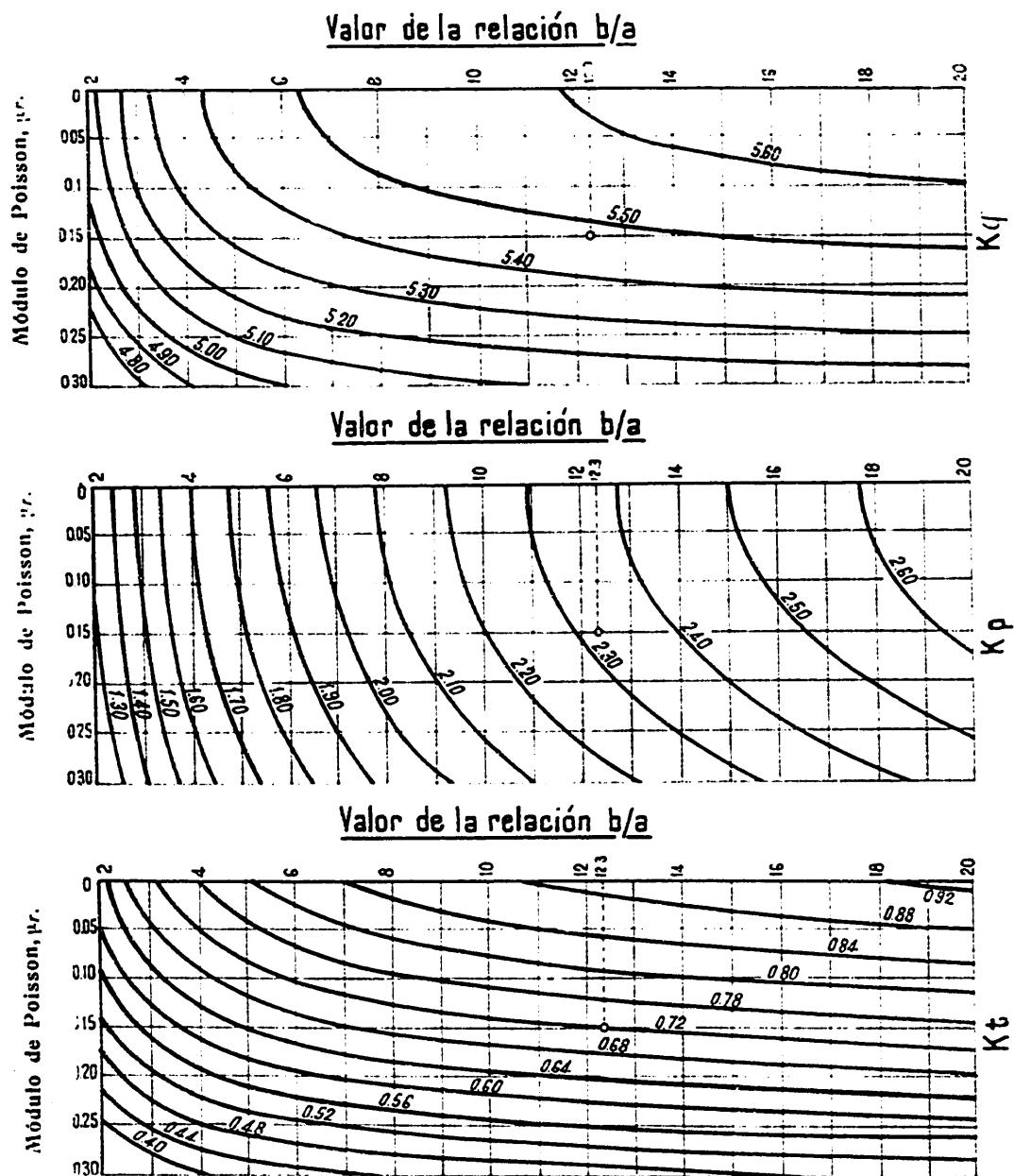


Fig. 3.*. — Valor de los coeficientes de deformación.

Para la determinación de los resultados se partió de un número de Poisson de 0.20 para el granito y de 0.15 para el gneis. Los resultados obtenidos pueden resumirse en la siguiente forma:

Estrigo derecho	$E = 2.00 \times 10^5 \text{ Kg./cm.}^2$
Cauce del río	$E = 5.00 \times 10^5$
Estrigo izquierdo	$E = 3.50 \times 10^5$

Vemos por ello, y teniendo en cuenta la tabla an-

Influencia de la deformación del cimiento.

Con este módulo aproximado de $E = 100.000$ kilogramos/cm.² (en general el módulo real de las rocas es siempre inferior al del hormigón), realizamos el cálculo de la "Valoración del efecto de la deformación de la roca" de la siguiente forma (método de Vogt).

Por efecto de la flexibilidad de la roca el arco ge-

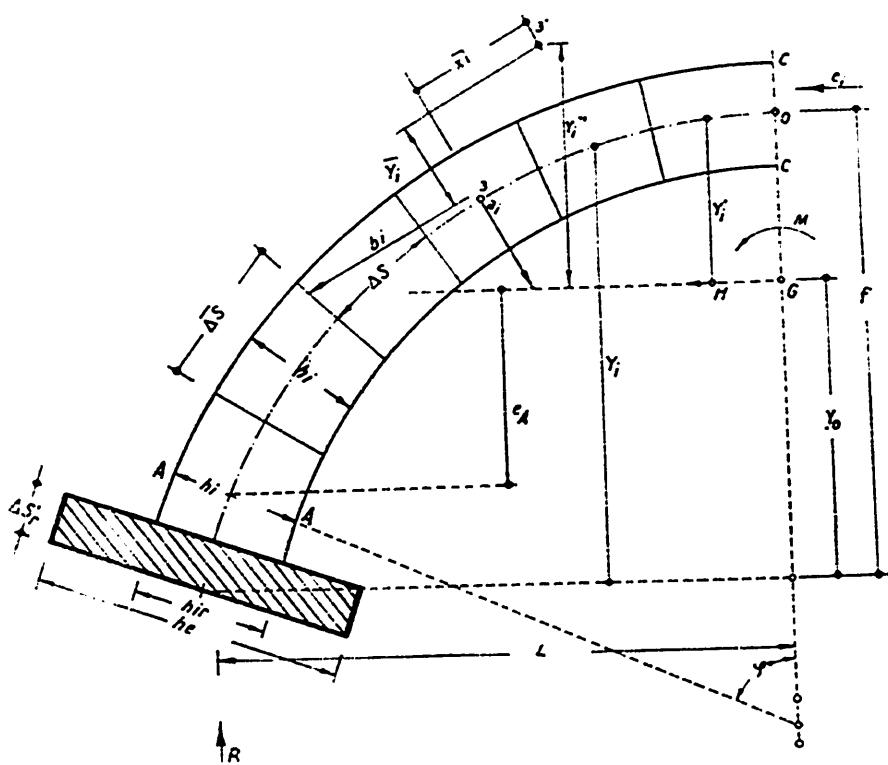


Fig. 1.º Influencia de la deformación del cimiento. Zapata teórica.

terior, que el emplazamiento es bueno en líneas generales, salvo en las zonas decomprimidas que tienen un espesor de 15 m.

No obstante, debido a la necesidad de hacer las laderas simétricas y de profundizar las zapatas de apoyo de los arcos en vez de ensancharlas, con ánimo de ir a zonas inferiores en las cuales las deformaciones de la roca son menores que en la superficie, estas zonas se suprimirán al hacer las excavaciones de la obra, evitándose así el peligro que podrían originar con su presencia.

Por contraste, como antes decíamos, con otras obras italianas y portuguesas ya construidas y observadas, fuimos a una reducción aproximada de 1/3 entre el valor del módulo de elasticidad de las laderas obtenido por el método sísmico y el que fijamos para el cálculo del proyecto como valor real (véase la tabla anterior).

nérico de altura unitaria sufrirá las siguientes deformaciones medidas en arranques (confróntese "Trial load method of analyzing arch dams". Bureau of Reclamation Bull. Denver, 1938):

$$\begin{aligned} &\text{— rotación: } \varphi = K_z \frac{N}{E_r \cdot h^2}; \\ &\text{— esfuerzo normal: } \eta = K_n \times \frac{N}{E_r}; \\ &\text{— esfuerzo transversal: } \tau = K_t \frac{M}{E_r \cdot h}. \end{aligned} \quad [1]$$

En estas fórmulas h , es el espesor del arco en el arranque; E_r , el módulo elástico de la roca; M , el momento flector; N , el esfuerzo en el eje, y K_n , K_t , los coeficientes señalados por el citado

texto del Bureau de Reclamation como funciones de la relación adimensional b/a , entre los lados de la superficie ideal rectangular equivalente a la superficie de contacto de los arranques de los arcos y también del módulo de Poisson, ν_r , de la roca (figura 2.^a). En nuestro caso tenemos:

— para la roca *in situ*: $\nu_r = 0,15$:

— y para la referencia b/a el valor: $\frac{b}{a} = 12,3$:

según se deduce del gráfico de la figura 2.^a.

Para obtener los coeficientes señalados en las fórmulas anteriores se utilizan los datos de la figura 3.^a, que nos permiten tener los siguientes valores:

$$K_\varphi = 5,48; \quad K_i = 2,33; \quad K_t = 0,72.$$

Con estos datos podremos calcular las dimensiones h_r y l_r que deben asignarse a la zapata ideal (figura 4.^a) del arco genérico, con la que se contará en el cálculo de los arcos para tener en cuenta la elasticidad de la roca, conociendo también el valor medio del módulo elástico de la roca, que según dijimos es igual a

$$E_r = 100\,000 \text{ Kg./cm.}^2$$

o, lo que es lo mismo, una relación, γ_r , entre el módulo medio del hormigón y el de la roca igual a 2,12, tomando como módulo de elasticidad del hormigón 42 000 Kg./cm.².

Con estos datos podremos ahora, con aproximación a la realidad, suponer la zapata teórica constituida por un material elástico que tenga un módulo E_r y considerando esta nueva incógnita unida a las otras dos que definen sus dimensiones h_r y l_r , definir una zapata ideal cuyas deformaciones sean congruentes con las tres de [1]. Las expresiones que nos

dan los valores buscados, teniendo en cuenta que $\gamma_r = E_h/E_r$, son:

$$h_r = h_i \times \sqrt{\frac{12 K_n}{K_\varphi}} = 2,26 h_i;$$

$$l_r = h_i \times \frac{2 K_t}{K_\varphi} = 0,263 h_i;$$

$$\gamma_r = \gamma \times \frac{K_n}{2 K_t} \times \sqrt{\frac{12 K_n K_\varphi}{12 K_n K_\varphi}} = 42,40;$$

todo ello para nuestro caso, en que $\gamma = 2,12$.

$$h_r = 2,26 h_i; \quad l_r = 0,263 h_i; \quad i = 42,40. \quad [2]$$

La zapata teórica de empotramiento, equivalente a la roca indefinidamente extendida, tendrá las dimensiones dadas en las dos primeras fórmulas de [2]

y un módulo $E_r = \frac{E_h}{42,40}$, del que tiene el hormigón del arco. En los cálculos hemos aplicado las fórmulas señaladas en [2], ellas resuelven el problema de tener en cuenta, con suficiente aproximación y gran prudencia, el efecto debido a la deformación de la roca contra la que se cimentan los arcos, no complicando el cálculo de los mismos, ya que el problema se reduce a asignarles una zapata en sus arranques.

Como final diremos que hemos señalado, de forma general, el criterio que hemos seguido al enfrentarnos con el problema de las cimentaciones de la presa-cúpula del Eume, así como el método realizado por el Laboratorio de Investigaciones Técnicas de Madrid para la obtención de las características elásticas de las rocas del cimiento.

Este problema enunciado siempre hay que mirarlo con atención cuando se trata de obras de la importancia de la que comentamos, por las consecuencias que puede tener en la alteración de las tensiones de la estructura, como así lo demuestran las experiencias deducidas de los muchos extensómetros colocados en fundaciones de obras hidráulicas ya construidas.