

PROSPECCION ELASTICA

Por MARIANO FERNANDEZ BOLLO,
Ingeniero de Caminos.

Bajo el epígrafe de "Introducción" explica el propio autor el contenido del presente artículo en el que se recogen interesantes resultados de la aplicación del método expuesto por él mismo en artículos anteriores, a obras de diferentes características.

III

1. Introducción.

En artículos anteriores de los meses de enero y abril del pasado año, se expusieron los fundamentos teóricos y disposiciones experimentales utilizadas para investigar, por medio de ondas elásticas, el terreno donde han de ubicarse obras de Ingeniería.

Esta investigación no se refiere tan sólo a las configuraciones topográficas subterráneas, cuyo estudio por este sistema constituye la prospección denominada generalmente "sísmica", sino a las cualidades del propio terreno, cuyo módulo elástico y condiciones de fisuración influyen en la velocidad y frecuencia de las ondas transmitidas, así como su viscosidad interna en el amortiguamiento de las mismas.

En este breve trabajo se exponen algunos resultados obtenidos por aplicación del método a obras de diferentes características, debiéndose observar aquí que, generalmente, con el fin de poder interpretar bien los resultados, se ha completado el estudio con el de ciertas muestras en Laboratorio, reconocimientos geológicos de la zona colindante y prospecciones eléctricas, sondeos o calas, donde ha sido preciso.

2. Estudio del túnel para galería de presión de Ibonciecho.

El importante conjunto hidroeléctrico que construye Energía e Industrias Aragonesas, S. A., en la cuenca alta del Gállego, provincia de Huesca, para crear un salto que utiliza la capacidad de los lagos

de origen glaciar de Campopiano y Respomuso, efectúa su desagüe por una galería a presión, abierta en el borde montañoso del macizo granítico de Panticosa.

Desde el punto de vista geológico, la galería es muy interesante, ya que corta toda la zona de contacto del paleozoico pregranítico con el macizo hipogénico.

Una vez abierta la galería y antes de revestirla, se procedió a efectuar medidas de velocidad sobre las rocas, con sismógrafos electromagnéticos y cronógrafo de condensador. También se efectuaron determinaciones simultáneas de absorción, con ayuda de dos balísticos.

El gráfico de resultados, bastante simplificado para poder encajarlo en el formato adecuado, se encuentra en la figura 1.^a. Las ordenadas aisladas corresponden a medidas cortas (5 a 10 m.), y las líneas, al promedio que cabe esperar, de acuerdo con las medidas más largas.

A la vista de la heterogeneidad de la roca, se tomaron bastantes muestras y se consultó el informe geológico del Prof. D. Clemente Sáenz, cuyas previsiones se hallaron confirmadas en el perfil. Es interesante la inclusión magnesiana de la zona próxima a la abscisa 1.500, así como la zona de fisuración, en el contacto de la parte metamórfica con la granitizada, abscisa 500, que fué penosa para la perforación.

No menos de doce rocas esencialmente distintas forman el terreno cortado por el túnel, y por su interés práctico damos acácer de las más importantes sus características en un cuadro:

ROCA	Abscisa	Módulo Tn./cm. ²	Absorción Tn./cm./s.	Módulo din. Tn./cm. ²
Caliza eifeliense	170	100	10	120
Calcofilita eifeliense	360	40	20	60
Esquisto silíceo fis.	525	50	70	75
» metamorfizado	600	65	10	90
Cuarcita granitizada	900	200	6	350
Paragranito perácido	1.275	300	8	460
Talcita	1.500	3	150	10
Granito diorítico	1.800	210	4	360
» calcosódico	2.000	170	6	210
» porfirole y diorítico	2.400	350	—	480

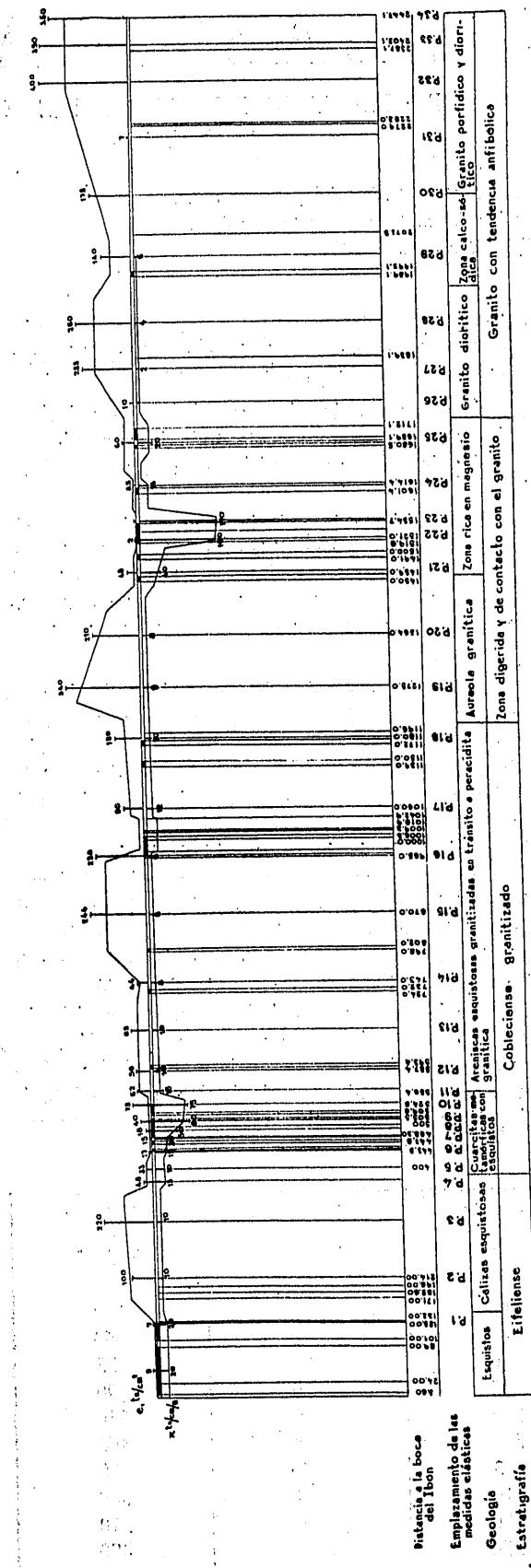


Figura 1.^a

Como el cuadro sólo tiene carácter de orientación, se han considerado valores típicos y se han redondeado las cifras.



Fig. 2.^a — Aspecto, con 40 aumentos, de la roca de la abscisa 1 500 (1 bociecho).

De acuerdo con los coeficientes hallados, pudo así disponerse el revestimiento, teniendo en cuenta la carga de agua (90 m.), con una gran economía sobre la consideración de no colaboración de la roca y mucha mayor seguridad que con una calidad de roca estimada por consideraciones petrográficas o medida en probeta.

Aunque el método se había aplicado antes a otros emplazamientos de obras, entre otras a varias galerías de presión, probablemente se trata de la primera galería terminada con revestimiento dimensionado en esta forma (marzo 1949).

3. Estudio de la conducción forzada Moncabril.

En la región limítrofe de las provincias de Zamora y Orense, denominada tradicionalmente Sanabria, la Sociedad Anónima Hidroeléctrica Moncabril construye aprovechamientos del alto Tera, que crean un salto de 500 m. (aproximados) en el Pico del Fraile, algo al W. de Ribadelago (Lago de San Martín o de Sanabria).

Esta montaña está formada por viejos paquetes silúricos, muy afectados por la tectónica hercíniana y la granitización consecutiva (macizos en relación con el granito de la Tierra del Bollo).

Aquí el granito y el gneis predominan absolutamente, con características migmatíticas en el contacto y carácter muy diferente del de los macizos pirenaicos. Especialmente la fisuración se encuentra en proporciones muy inferiores, siendo, en cambio, muy intensa la corrosión química.

La figura 3.^a muestra los resultados obtenidos en dos de los trozos de galería estudiados, pudiendo con-

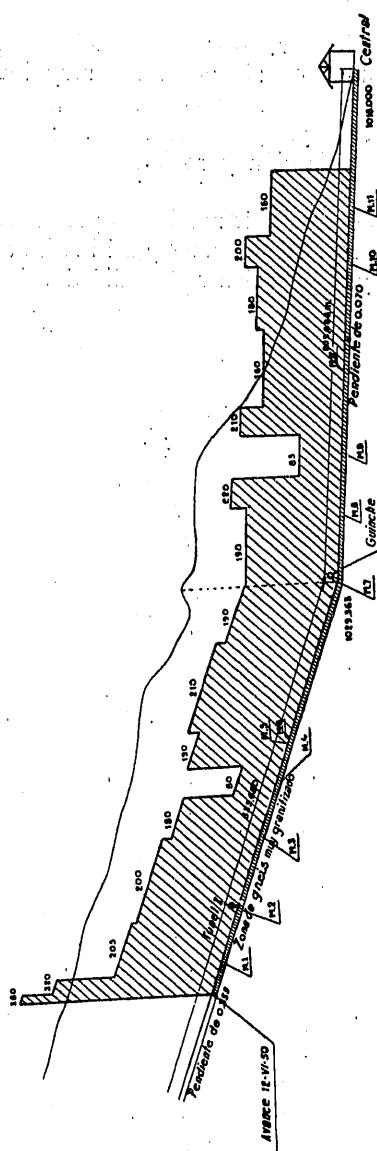


Figura 3^a



Fig. 4^a.—Roca de la galería Moncabril, con 40 aumentos.

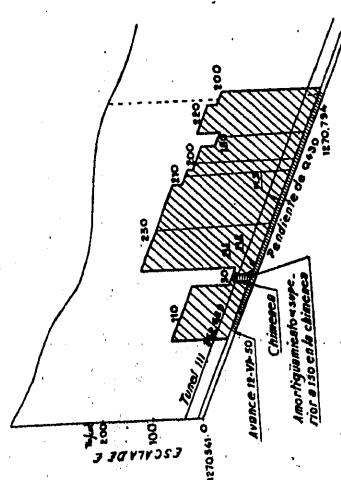
siderarse en este caso un valor medio para el granito o rocas muy granitizadas del módulo elástico del orden de 200 Tn./cm.². Las zonas inferiores lo son en corta longitud y se deben, principalmente, a caolinizaciones por la hidratación que ocasionan litoclasis con circulación de agua freática, destacándose entre ellas la "chimenea caolínica" del tramo superior con $E = 30$ y absorción 150 (Tn./cm.² y Tn./cm./seg.). En general, la roca es más bien ácida y posee una gran variedad de feldespatos, pudiendo considerarse como una representante normal la de la figura 4^a.

En conjunto, los resultados comprobaron los obtenidos en 1948 desde el exterior, antes de perforar la galería (1950) y operando en los afloramientos sanos puestos de relieve por la erosión glaciar.

4. Estudio de la galería de presión de Cap-de-Long.

En la vertiente Norte del Pirineo (departamento de Altos Pirineos), la Région d'Équipement Pyrénées-Atlantique de Electricité de France construye rápidamente uno de los conjuntos hidroeléctricos más interesantes del tipo de alta montaña, cuyo aprovechamiento se centra en el salto múltiple de Pragnères. Entre las distintas galerías forzadas que comprende y han sido estudiadas por este procedimiento, se destaca, por sus características geológicas especiales y distintas de los ejemplos antes citados, la que une el lago de Cap-de-Long con el punto triple donde las conducciones de La Glaire se unen a la galería principal.

En la figura 5^a puede observarse el perfil de módulos con distintas solicitudes. Se caracteriza por



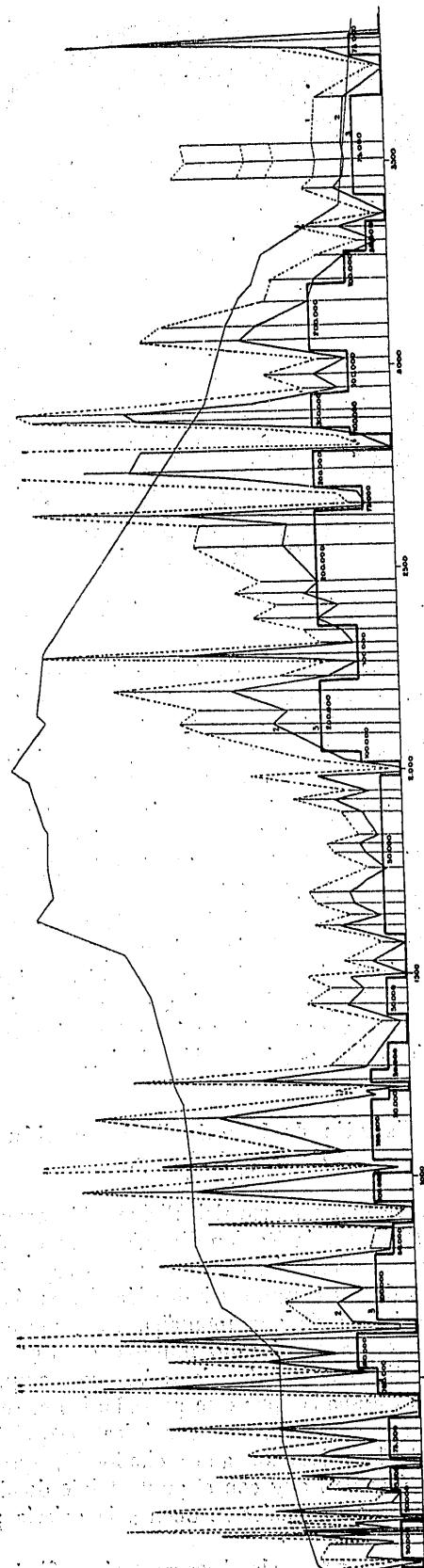


Figura 5.^a

su intensa variabilidad, a causa, sin duda, de la fracturación frecuente y en algunos casos muy intensa. Por lo demás, el granito es, mineralógicamente considerado, muy notable, ya que en su seno se percibe el efecto de la milonitización y soldadura posterior de los cristales.

Este hecho fué puesto de manifiesto por el estudio petrográfico del Prof. Capdecomme y del Prof. Farran, de Toulouse, cuyas previsiones de calidad coinciden

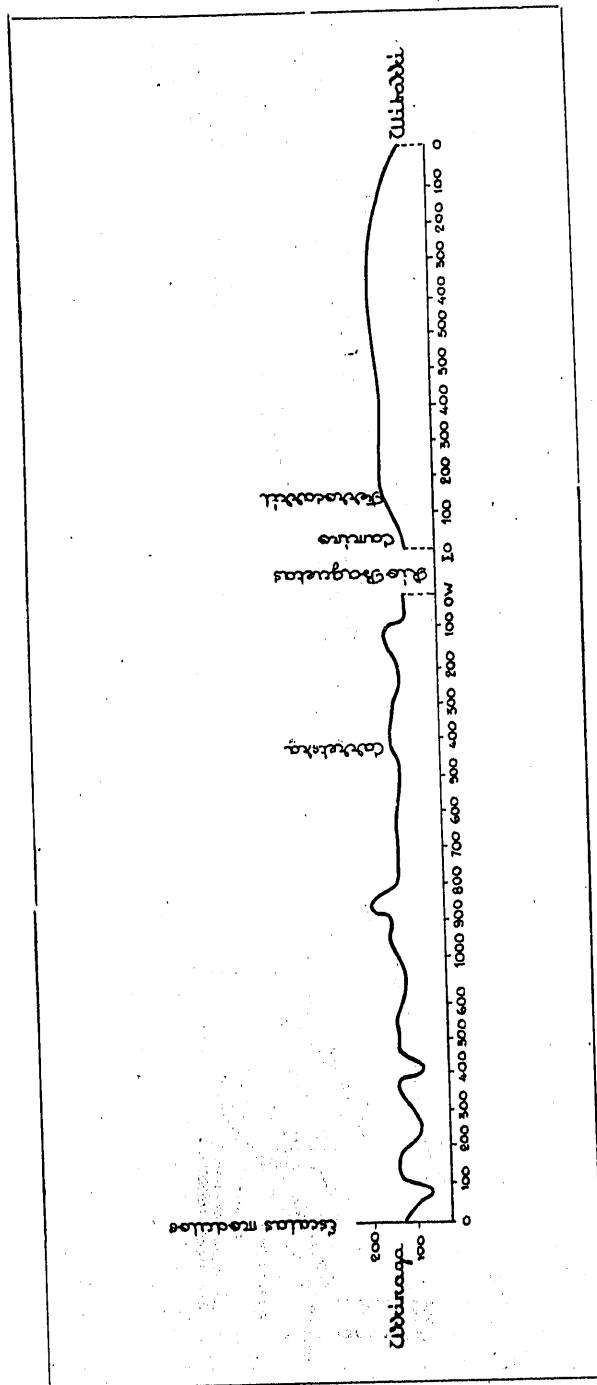


Figura 6.1

de forma notable con el resultado obtenido por medida de velocidades.

Ante la imposibilidad de fijar líneas parecidas a las deducidas para otras galerías, en el gráfico figura una línea de mínimos que, en este caso, previo saneo e inyección de las fisuras, podría superarse considerablemente, ya que la roca, si no estuviese fisurada, sería casi tan rígida en muchos sitios como la más dura del túnel de Ibonciecho, antes citado.

El granito de este tramo pertenece al macizo de Neouvielle, independiente del de Panticosa (relacionado con el de Cauterets), y a esta independencia y a su proceso tectónico distinto se podrá, probablemente, atribuir la diferencia de estado elástico.

5. Galería en calizas: Ulibarri-Urrunaga (Alava).

La galería de comunicación entre los embalses de Ulibarri y Urrunaga, en Alava, se abre en los paquetes calcáreomargosos del cretáceo superior, que corta siguiendo sensiblemente los estratos. Por esta razón predomina en los resultados la uniformidad, apenas interrumpida por algunos puntos débiles, debidos a fisuras o meteorización. El orden de magnitud del módulo hallado está comprendido entre 120 y 180 toneladas/cm.². Estos valores no deben considerarse como constantes en la caliza, ya que en la misma región se han obtenido, según la mayor o menor proporción de arcilla y carbonato cálcico, variaciones considerables, como puede apreciarse en el cuadro con el que se termina este trabajo. Allí se incluyen otros datos de los estudios hechos para Saltos del Zadorra, S. A.

6. Emplazamiento de presa en el río Sil.

El Salto de San Esteban, construido por Saltos del Sil, S. A., en la última parte del curso del Sil, cerca de Orense, se crea merced a una presa en arco-gravedad de unos 100 m. de altura, que se apoya en paragranito originado por la acción del macizo granítico del SW., probablemente enlazado con el que se halla algo más lejos, al NE. del emplazamiento, y acunando entre los dos un paquete posiblemente cámbrico, intensamente transformado.

En realidad, la roca es más bien un paragneis que un paragranito, según puede apreciarse en la fotografía; y una vez explorada, se pudieron obtener, entre otras, las siguientes importantes conclusiones:

1. El estribo izquierdo es más rígido que el derecho, obteniendo para ello los valores medios de $E = 280 + j 43 f$ y $E = 200 + j 10 f$, respectivamente.

2. El estribo izquierdo es, por otra parte, más irregular que el derecho, por lo cual, si sus cargas han de pasar de 10 Kg./cm.², convendrá establecer

disposiciones que eviten la concentración de esfuerzos en los contactos y filones, excavando éstos y saneando adecuadamente aquéllos.

3. La roca es más rígida cuanto más descendemos en la ladera, llegándose en la parte inferior a un E dinámico del orden de 600 Tn./cm.², que corresponden sólo a un E bajo 10 Kg./cm.² de 350 Tn./cm.².

7. Enlace del revestimiento y la roca. Control de la mejora de la misma por inyecciones.

En la galería de presión del Salto de Picadas (Alberche), que construye Obras y Construcciones Industriales, S. A., la roca en que se ha perforado el túnel es de calidad poco satisfactoria. Se trata de un gneis procedente de capas irregulares paleozoicas metamorfizadas y profundamente afectadas por la falla inmediata del zócalo del sistema central español y por una larga meteorización que ha caolinizado en muchas capas los feldespatos hasta gran profundidad.

En colaboración con el Sr. Hernández Rubio, de la Sociedad antes citada, se diseñó un dispositivo con pequeños sismógrafos de 30 mm. de diámetro y provisto de preamplificadores Philips (GM 4570).



Roca limpia, en el emplazamiento de San Esteban.

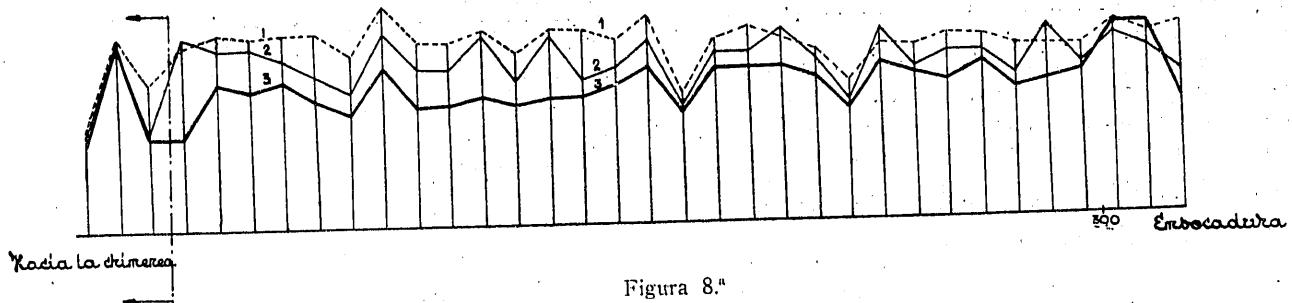


Figura 8.^a

Se abrieron orificios de profundidad suficiente para atravesar el revestimiento, penetrando suficientemente en la roca. Se efectuaron medidas de velocidad, tanto en el hormigón como en la zona de enlace y la misma roca, tanto en la galería, ya inyectada, como en la chimenea, aún por inyectar.

El resultado fué muy interesante, ya que se pudo comprobar que, en la parte sin inyectar, el revestimiento era prácticamente independiente de la roca, desde el punto de vista mecánico, y ésta presentaba variaciones de módulo desde el orden de 250 Tn./cm.² a 40 Tn./cm.². En contraste con esto, la parte inyectada, donde la roca era de calidad aún más deficiente e irregular, las variaciones son de 120 a 250 Tn./cm.², y sólo en algún punto excepcional baja a 90 Tn./cm.². Además, las medidas en la zona de enlace presentan una considerable uniformidad, salvo en algún punto excepcional, y demuestran una perfecta unión de la roca y el revestimiento. Al observar el gráfico, podrían interpretarse erróneamente algunas bajadas en el hormigón como defectos del mismo, pero casi siempre corresponden más bien a las juntas que, aun cosidas por la inyección, muchas veces no pueden alcanzar el mismo módulo que las zonas sin ellas.

Las inyecciones fueron ejecutadas por la Sociedad especialista de los Procedimientos Rodio.

8. Estudio del hormigón de una presa *in situ*.

El procedimiento de la onda elástica *in situ* no puede dar determinaciones elásticas de tanta precisión como procediendo sobre probetas, donde se llega al 1% (*), pero se puede aplicar rápidamente sobre la misma obra, con diferencias del orden de un 5%, cosa suficiente en muchos casos.

Así se ha realizado sobre la Presa de la Cohilla, bella bóveda de 110 m. de altura, en el río Nansa (Santander). Se pudieron poner de manifiesto varios puntos de interés, y entre ellos:

1. El hormigón de la presa es prácticamente uniforme, coincidiendo sensiblemente su variación de módulo con la de edad.

(*) E. D. F.-Garonne: "Application des méthodes modernes d'essais au contrôle de la résistance des bétons". *Lab. Regional*, 1951.

2. El hormigón de relleno de juntas es algo más rígido y menos uniforme que el del cuerpo de la obra, y su enlace con los macizos es completo en todos los puntos examinados.

3. El módulo medio actual es de 210 Tn./cm.², y el de las juntas se acerca a 260 Tn./cm.². Este último sobrepasa en algún punto las 300 Tn./cm.² y su valor dinámico llega a 450 en ellos.

9. Algunas consecuencias.

Es fácil deducir algunas consecuencias interesantes de los estudios expuestos, entre las cuales se pueden indicar:

a) Es muy variable la calidad mecánica de los macizos graníticos, con su composición química, su edad, su textura mineralógica y los efectos de su puesta en yacimiento y esfuerzos tectónicos posteriores. Por otra parte, existen toda clase de rocas más o menos afines, de cualidades muy parecidas exteriormente, pero mecánicamente consideradas muy heterogéneas. Su estudio detenido, geológico, petrográfico y elástico, es conveniente casi siempre y a veces indispensable. Los estudios complementarios de Laboratorio sobre muestras también pueden ser muy interesantes.

b) Las calizas, especialmente si son algo margosas, y con más razón las margas, son rocas de dureza extremadamente variable, con módulos desde 300 Tn./cm.² o algo más, en calizas puras, a menos de 20 Tn./cm.², en margas terciarias. En ellas, la meteorización llega, a veces, a profundidades muy grandes, y este hecho ha de tenerse en cuenta en toda apreciación por medio de ondas elásticas.

c) Los ensayos de rocas muy anisotropas, como los esquistos, permiten apreciar una enorme influencia de la orientación, y este hecho ha de ser analizado detenidamente, ya que, en muchos casos, influirá de modo decisivo en el funcionamiento del terreno, desde el punto de vista elástico.

d) Las medidas en obras construidas de hormigón pueden permitir juzgar del estado del mismo con bastante aproximación, y muy especialmente de su enlace, desde el punto de vista estructural con la roca o entre macizos.

10. Algunos valores numéricos.

El valor práctico de valores obtenidos en distintos terrenos no es tan grande como puede parecer en una primera apreciación, ya que, según se indica antes, multitud de condiciones los hacen variar mucho, sin

que exteriormente sean muy perceptibles. Pero, por lo menos, siempre pueden dar una orientación, según se expresa en el cuadro adjunto.

La última determinación se ha tomado de una publicación del Cement and Concrete Research Inst., de Estocolmo.

ESPECIE DE LA ROCA	MÓDULO E Tn./cm. ²	ABSORCIÓN Tn./cm./s.	SITUACIÓN
<i>Granitos:</i>			
Calcosódico	170	5	Sallent, Galería Ibonciecho.
Idem	195	3	Bohonal (Cáceres). Galería.
Acido albítico	320	8	Idem id.
Diorítico porfir.	210	4	Sallent, Galería Ibonciecho.
Idem augit. fino	350	—	Idem id.
Idem más alcalino	450	—	Cap-de-Long; Galería principal.
Idem id. fisurado	60	—	Idem id. Zona milonítiz.
Paragranito perácido	290	8	Sallent, Galería Ibonciecho.
Idem gneísico alt.	40	30	Picadas, Chimenea de equilibrio.
Idem de cuarzo sil.	280	40	San Esteban (Orense).
<i>Gneis y estrato cristalino:</i>			
Gneis medio	130	—	Picadas (Madrid).
Idem granitoide ácido	200	10	San Esteban (Orense).
Idem id. más básico	180	15	Moncabril (Zamora). Galería.
Idem id. más básico alt.	50	110	Idem id.
Cuarcita metamórfica	200	6	Sallent, Galería Ibonciecho.
Idem id.	130	—	Gal. Castillon (A. Pirineos). Francia.
Caliza met. marmoré	360	—	Idem id.
Idem id. corneana	450	—	Gal. Cestrède (Altos Pirineos).
Esquisto metam. máx.	75	—	Gal. Arrens (B. Pirineos). Francia.
Idem id. mín.	12	—	Gal. Escarra. Río Gállego (Huesca).
Esquisto sil. met. máx.	140	—	Idem id.
Idem id. mín.	90	—	Sallent, Galería Ibonciecho.
Esquisto met. magnesiano	20	—	—
Talcocita metamórfica	3	150	—
<i>Calizas y areniscas:</i>			
Caliza cretácea	400	—	Barazar (Alava). Zadorra.
Caliza margosa cret.	250	—	Idem id.
Caliza Griotte	130	—	Gal. Escarra (Huesca).
Idem id.	110	—	Gal. Cestrède (A. Pirineos). Francia.
Arenisca calc. cocena.....	80	20	Presa de Torla (Huesca).
Flysch eoceno	60	70	Torla (Huesca).
<i>Margas y esquistos:</i>			
Margas cretáceas calc.	90	80	Villarreal (Alava). Zadorra.
Idem id. alterada	40	180	Urrunaga. Id. id.
Marga arcillosa	9	350	Ventana Barazar (Alava).
Esquisto margoso	25	—	Gal. Escarra (Huesca).
Idem arcilloso	50	—	Gal. Pragnères (Altos Pirineos).
Idem calcáreo { Moriz	150	—	Idem id.
Idem calcáreo { Vert	110	—	—
<i>Terrenos muebles:</i>			
Arenas compactas	12	Más 10 ³	Morrena Galeride (Zamora).
Gravera	0,5	Idem	Jarama (Madrid).
Fango cuaternario	0,01	—	Estocolmo.