

PROSPECCION ELASTICA

Por MARIANO FERNANDEZ BOLLO,

Ingeniero de Caminos.

Continúa el trabajo iniciado en nuestro número de enero sobre el tema del epigrafe, describiéndose en el presente los fundamentos de los aparatos que pueden emplearse en estos ensayos, reseñando algunos resultados obtenidos en la práctica.

II

De acuerdo con lo indicado en el artículo anteriormente publicado, la investigación de las características mecánicas del subsuelo puede hacerse por medio de la medida de la velocidad, frecuencia y amortiguamiento de las ondas que se propagan en él.

Para efectuar estas medidas es preciso, ante todo, disponer de ondas elásticas; es decir, generarlas y después recogerlas y transmitir las a los aparatos de medida. Puede operarse, bien con ondas entretenidas, que se propagan en forma continua por el subsuelo, o bien con ondas generadas por golpes o explosiones, verdaderos impulsos, cuya naturaleza analizaremos más adelante.

1. Generadores de ondas entretenidas.

Para transmitir ondas de frecuencia diferente a la propia del suelo a estudiar, se precisan fuentes considerables de energía, que suelen ser motores con pesos desequilibrados, lo cual permite el empleo de frecuencias muy bajas.

Para obtener una gama más completa y fácil de regular, es preferible utilizar osciladores electromagnéticos o electrónicos conectados a un "motor" formado por un electroimán con armadura elásticamente unida a una barra recibida en el suelo.

Respecto al primer método, pueden leerse, entre otros, los trabajos de uno de los precursores, A. Heinrich (1), y los de Kohler (2), Bergstrom (3), Müller (4) y otros continuadores del sistema, que principalmente se ha utilizado en Europa.

Ante las mayores facilidades que da un barreno para transmitir impulsos mucho más enérgicos al suelo, el sistema de sollicitación entretenida se ha visto relegado a los laboratorios para los ensayos sobre probeta, utilizándose osciladores electrónicos de potencia

media en los clásicos ensayos de resonancia para el estudio del módulo elástico y en los de medidas de amortiguamiento o defasaje. (Véase, entre otros, los trabajos de Coviaux (5) y la publicación núm. 10 de Philips, *Mesures Electroniques*.)

Como las medidas en obra no precisan las transmisiones a gran distancia de las de prospección, se ha utilizado en ellas, por el autor, tanto osciladores electrónicos de potencia considerable como osciladores electromagnéticos con motor "chopper", que presentan sobre las máquinas vibrantes las ventajas ya indicadas, de mayor amplitud de regulación y más facilidad de transporte y alimentación. En la figura 1.^a se indica esquemáticamente un excitador.

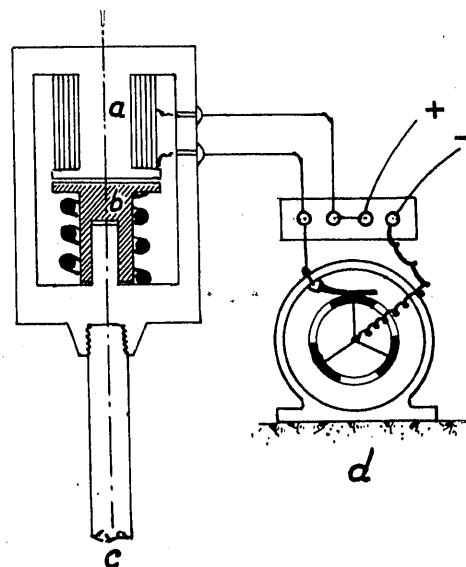


Fig. 1.^a — Generador electromagnético: a, electroimán; b, armadura oscilante; c, barra de fijación; d, interruptor rotatorio.

2. Generador de impulsos.

La sollicitación con impulsos aislados se ha realizado inicialmente con golpes o barrenos. En prospección sísmica sólo se trabaja hoy día con explosivos. Un estudio experimental de Hubert (6); da una relación de rendimientos muy expresiva, ya que el efec-

(1) Über die Ausbreitung von Bodenschwingungen in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Untergrundes Bautech. 1930, Hefte 51.

(2) *Bauingenieur*, 16, 1935, 25-26.

(3) Sven G. Bergstrom et Linderholm: *Dynamisk metod att utrona ytliga marklagens genomsmittling elasticitetsegensheter*.

(4) "Vorschläge für die Klassifizierung des Baugrundes aus Grund von Schwingungsmessungen". *Annalen der Deutsch. Ing.*, 1923.

(5) Ph. Claude Coviaux: *Electronique*, 1948, n. 39.

(6) F. Hubert: *Zeit Geophysik* (1924-25).

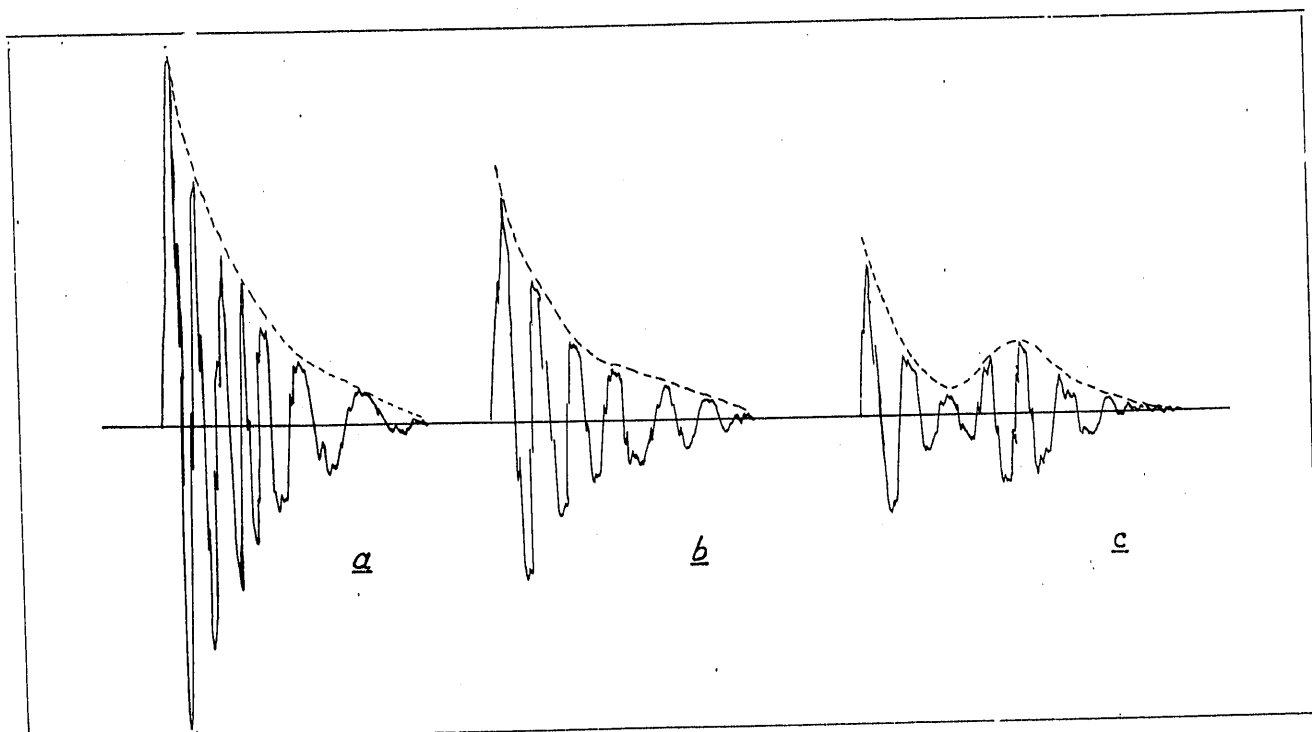


Fig. 2.^a—Ondas elásticas con sismógrafo a 45° $\left(\text{suma } \frac{P+5}{\sqrt{2}}\right)$, en granito del Lago de Sanabria (Zamora). Representación, teniendo en cuenta la dispersión geométrica y compensando para obtener curvas de alturas con: a), 1 m. del generador; b), 10 m. del generador; c), 100 m. del generador.

to de 100 Kg. de dinamita resulta equivalente a la caída de 7,5 Tn. desde 16 m. de altura.

En prospección de obras, aunque excepcionalmente se han utilizado barrenos o pequeñas cargas, lo normal es que baste con un golpe del orden de los 10 Kgm. para transmisiones en roca dura. El impulso puede obtenerse también con el "motor" electromagnético, cerrando un interruptor.

La naturaleza del impulso conseguido en la inmediación del punto donde se aplica se aproxima generalmente bastante al tipo de onda amortiguada clásico, y al alejarse, evoluciona por efecto de la aparición de los distintos tipos de onda, la polarización de la superficie del suelo y los accidentes del subsuelo. Como ejemplos de casos normales podemos observar los gráficos de la figura 2.^a, que se han reducido, pasándolos de las fotografías a dibujos a una escala igual de tiempos.

3. Sismógrafos.

Durante un período de varios años y en muy variados terrenos, se han llevado a cabo ensayos de varios sismógrafos: a capacidad, electromagnéticos, de inducción y de resistencia variable. Para ensayos en que resulte de gran interés una exacta reproducción de la onda, es preferible el tipo capacitivo, que además permite una selectividad direccional rigurosa. El utilizado, construido en principio análogo al descrito por

Gane (7), con armaduras cilíndricas, ha sido finalmente reducido a una forma plana múltiple, muy efi-

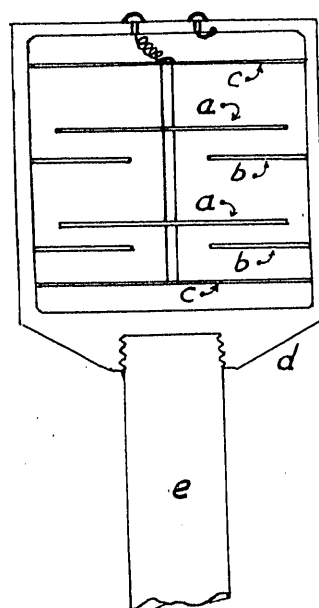


Fig. 3.^a—Sismógrafo capacitivo a $1/2$: a, armadura móvil; b, armadura fija; c, soporte elástico; d, caja; e, barra de fijación.

(7) P. G. Gane: "An electrostatic seismometer". *Bull. of the Seismological Soc. of America*, v. 38, p. 95.

caz. Sólo presentan el inconveniente práctico de precisar un aparato intermedio (comparador-capacímetro, estudiado en el trabajo 184 del Congreso Nacional de Ingeniería 1950), que, aunque sencillo, exige una fuente adicional de alimentación o cables desde la principal, que siempre pueden ser causas de perturbaciones considerables. La figura 3.^a indica el esquema de utilización de estos sismógrafos.

En los trabajos usuales se utilizan de preferencia los de tipo electromagnético dinámico de impedancia relativamente alta (4 000 Ω a 800 hz. y 1 800 Ω c. c.), que proporcionan calidad suficiente y una señal normal fuerte (hasta 10 mV. de máximo). Los sismógrafos inductivos aún proporcionan más señal, pero la calidad es defectuosa.

En todos ellos es de la mayor importancia un amortiguamiento suficiente para que transmitan las vibraciones del suelo y no perturben éstas por resonancias u oscilaciones propias.

4. Amplificación y estudio de la onda.

Los sismógrafos convierten la oscilación del suelo en una tensión eléctrica correlativa, de una forma sensiblemente lineal con ella. Esta tensión es débil para actuar sobre aparatos de observación o medida. Por ello es preciso utilizar amplificadores, que han de presentar una ancha banda de paso y ganancia lo más constante y estable posible.

Limitándose a una relación de ganancia de 1 000, se puede obtener fácilmente con dos pasos pentodos bien estudiados, o tres, a triodo.

Un ejemplo de amplificador se observa en la figura 4.^a, en la entrada del cronógrafo. Otros tipos más perfectos se han desarrollado posteriormente sobre la

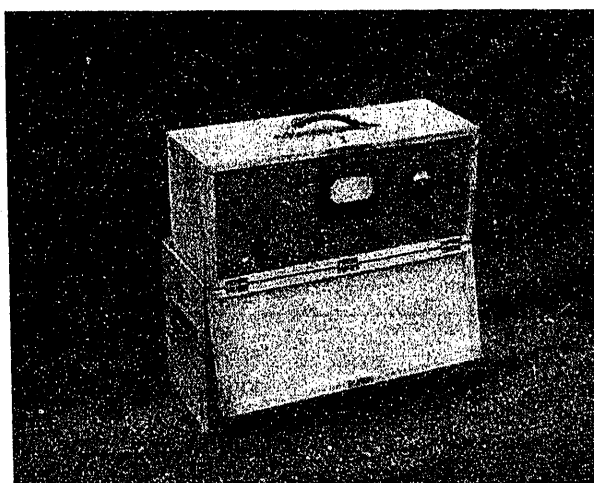


Fig. 6.ª — Equipo de amplificadores y cronógrafo de condensador.

misma base de dos pentodos, de acuerdo con las necesidades demostradas en el curso de los trabajos.

Para el estudio de la onda se ha utilizado casi siempre un oscilógrafo de 70 mm., descrito con detalle en el trabajo 187 del Congreso Nacional de Ingeniería de 1950, que, a su vez, amplifica la señal de más de 10 a 100 veces, según sea necesario para alcanzar los 150 V. que precisa el barrido. Sus dimensiones, de 15 . 27 . 18 cm., le hacen portátil en grado sumo, y muy manejable (fig. 5.^a).

En los últimos equipos se ha formado un conjunto, amplificadores, cronógrafo y oscilógrafo, con alimentación incluida, de 70 . 40 . 30 cm., especialmente útil en galerías, cimientos y puntos donde escasee el espacio disponible (fig. 6.^a).

Las ondas recibidas, visibles en el oscilógrafo, se pueden fotografiar con una cámara ordinaria provista de lente de aproximación o que pueda enfocar a menos de 50 cm.

5. Medida de la velocidad y del amortiguamiento.

La determinación de la velocidad se efectúa por el tiempo que emplea la onda objeto del estudio en alcanzar sucesivamente a dos sismógrafos, cuya distancia se mide. Así se obtiene una velocidad aparente de propagación, que varía con la naturaleza de la roca, el tipo medio de onda y las posibles reflexiones o refracciones del medio.

Como las velocidades son muy variables con el tipo de onda, para obtener resultados más fáciles de comparar, se suelen referir las medidas siempre a ondas longitudinales, que son las más rápidas o preliminares. El orden de magnitud de estas velocidades es el siguiente:

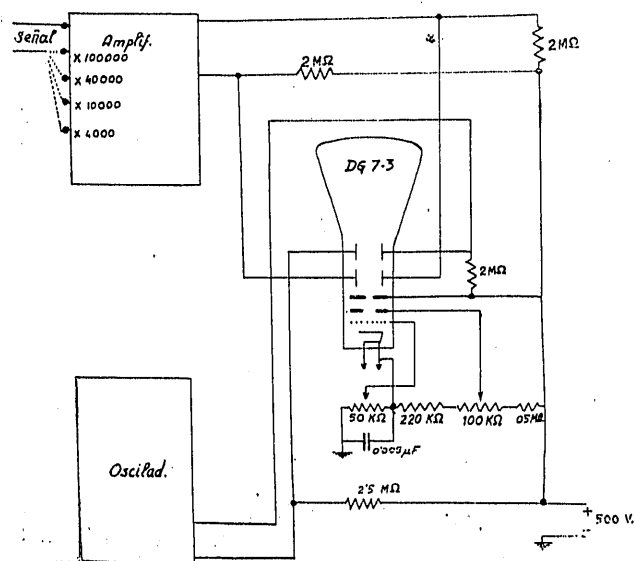


Fig. 5.ª — Esquema simplificado del oscilógrafo especial.

Roca	Localidad	Módulo de compresión	Velocidad
		Ton./cm. ²	M./s.
Granito duro . .	Pirineo (Huesca) . .	450	5 500
Gra.° calcosódico.	Naval.ª de la Mata .	260	3 800
Caliza dura . . .	Barazar (Vizcaya) .	320	4 500
Marga calcárea .	Villarreal (Alava) . .	95	2 150
Morrena glacial .	Lago Sanabria (Zamora)	8	900

Por tanto, para medidas del orden de 5 m., se precisa una exactitud de 1/10 000 de segundo. Estas medidas, en rigor, son posibles con un oscilógrafo cuya frecuencia de barrido sea conocida, pero resulta más cómodo emplear un cronógrafo.

Distintos tipos se han utilizado en varias ocasiones: a condensador (esquema de la fig. 4.ª), de puente con tiratrones y balístico, contador con oscilador-patrón, etc. Todos pueden ser útiles, caracterizándose los mencionados, en el orden indicado, por las ventajas de comodidad y sencillez de empleo, seguridad de funcionamiento y exactitud, y los inconvenientes de su variabilidad de tarado, incomodidad de medida o gran volumen, con dificultad de alimentación.

Para medir el amortiguamiento de la energía, puede emplearse un balístico a la salida del amplificador, como método más aconsejable, ya que nos da la energía total, o medir sobre la curva del oscilógrafo.

Si se opera con un generador de onda continua, pueden unirse simplemente las salidas a un medidor de potencia de salida (decibelímetro).

Para evitar errores por falsa apreciación del coeficiente de amplificación, basta proceder como sigue:

Designemos las medidas por a_1 y a_2 (a_2 más alejada). Tendremos:

$$a_1 = K' W_0; \quad a_2 = K'' W_d;$$

siendo K' y K'' los factores de cada conjunto sismógrafo amplificador.

Cambiando ahora los sismógrafos entre sí:

$$b_1 = K'' W_0; \quad b_2 = K' W_d;$$

de donde:

$$\frac{W_d}{W_0} = \frac{a_2 b_2}{a_1 b_1};$$

y por tanto:

$$\alpha = \frac{e}{2d} l_n \frac{a_1 b_1}{a_2 b_2}.$$

Es importante no desclavar o cambiar los soportes de los sismógrafos, ya que un cambio de sitio introduciría errores experimentales en el valor de α .

En el caso antes citado, de excitación discontinua del suelo, se precisa contar con la posibilidad de que los impulsos iniciales no sean exactamente iguales. Para las medidas se precisan dos aparatos medidores.

Designando por A y B los emplazamientos de los sismógrafos a distancia d , y sin variar en ningún mo-

mento las conexiones, se mide primero con el sismógrafo 1 en A , y el 2, en un punto próximo al A , obteniendo las medidas a_1 y a_2 . Después se coloca el sismógrafo 1 en B y no se mueve el 2. Se obtienen así las medidas b_1 y a'_2 . Si k_1 y k_2 son las constantes de los dos equipos 1 y 2 (sismógrafo-amplificador-integrador), tendremos:

$$a_1 = K_1 W_0; \quad a_2 = K_2 W_0; \quad b_1 = K_1 W_d; \quad a'_2 = K_2 W_0;$$

de donde:

$$\frac{W_0}{W''} = \frac{a_1}{b_1} \cdot \frac{a'_2}{a_2} \quad \text{y} \quad \alpha = \frac{e}{d} l_n \frac{a_1 a_2}{b_1 a_2}.$$

Los resultados no suelen ser iguales que los obtenidos con ondas continuas, debido sin duda a la diferente proporción en que entran las frecuencias en el grupo aislado del impulso que en el caso de oscilación entretenida. Las diferencias son relativamente pequeñas (hasta un 15 por 100).

6. Medida de la frecuencia.

Para medir con exactitud la frecuencia de resonancia del suelo, es preferible un generador de ondas continuas a los impulsos aislados. Basta ir variando la velocidad del motor o del vibrador (ésta más difícil de regular) para alcanzar una máxima relación

$\frac{W_d}{W}$, siendo W la potencia empleada en excitar el suelo (proporcional a f_3). En general coincide con un máximo de W_d , debido a la rápida variación de esta magnitud en las proximidades del acuerdo.

Operando con impulsos aislados se pueden colocar dos circuitos ondamétricos a la salida de amplificadores y los dos sismógrafos bastante alejados del punto de excitación. Acordados los dos ondámetros sobre f_1 , se hacen las medidas a_1 y b_1 :

$$a_1 = K_1 W_{f_1}; \quad b_1 = K_2 W_{f_1},$$

de donde:

$$a_1 = \frac{K_1}{K_2} \cdot b_1.$$

Cambiando el ondámetro 1 a f_2 , por ejemplo, más alta:

$$a'_1 = K_1 W_{f_2}; \quad b_1 = K_2 W_{f_2},$$

de donde:

$$a'_{1f_2} = \frac{K_1}{K_2} b'_1;$$

y por tanto:

$$\frac{W_{f_2}}{W_{f_1}} = \frac{a'_1 b_1}{a_1 b'_1};$$

si $\frac{W_{f_2}}{W_{f_1}}$ es > 1 , f_2 está más próximo a la resonancia,

y si es menor, más alejado. Con cuatro o cinco ensayos se halla una cifra que se aproxima mucho a la obtenida de la otra forma, pero es más lenta de obtener y precisa mayor habilidad operatoria.