

SECCION DE ESTUDIOS GEOGRAFICOS Y CLIMATOLOGICOS

LA INSCRIPCION DE LOS TEMBLORES DE TIERRA

ALGO SOBRE SISMOGRAFIA PRACTICA EXPLICADA

I

Generalidades

1.—*Introducción.*— Los temblores de tierra son repentinos y fugaces y considerados como raros en muchos lugares de la tierra, debido al escaso alcance de nuestros sentidos; pero el ingenio humano, después de muchas peripecias en sus investigaciones, ha llegado a lograr notables descubrimientos, aunque ellos todavía están lejos de colmar las aspiraciones o curiosidad de sabios o incultos; así se ha llegado a descubrir que los temblores son cotidianos en la Tierra, gracias a los aparatos especiales inventados para su estudio, los cuales, a la vez que consistentes, son admirablemente sensibles; basta para justificar este aserto expresar la verdad de que en un observatorio se registran temblores de cualquier región del planeta.

2.—*Péndulo suspendido.*—Durante un temblor todo se mueve, así que hubo que buscar algo que no se moviera para utilizarlo de referencia y registrar el movimiento. La observación nos ha hecho sabedores de que un cuerpo ligado al extremo de un hilo o varilla suspendida por el otro extremo es tanto más estable (mantenerse quieto) cuando se mueve el extremo de suspensión (a cuyo rededor pueda girar el cuerpo) cuanto más pesado es el cuerpo, más larga la varilla y más rápidos los movimientos del extremo de suspensión.

3.—*Sismógrafo.*—Si a este cuerpo se le provee de una punta inscriptora que trace una huella sobre una superficie, la cual participe de los movimientos del suelo, se tendrá para el caso de un pequeño desalojamiento de éste (para una traslación), una traza rectilínea de la punta sobre la "superficie registradora." Estamos en el caso de considerar un movimiento relativo del suelo con respecto a la punta o de la punta con respecto al suelo.

Cuando el suelo, y con éste el punto de suspensión invariablemente ligado a él, se desaloja en un sentido, supongamos de Sur a Norte, la punta dará una huella igual al desalojamiento del suelo, pero trazada en sentido contrario; esto es, de Norte a Sur. Para cada traslación, la punta dará una huella igual, pero de sentido contrario, y como una curva no es sino una sucesión de traslaciones infinitamente pequeñas, para el caso en que el suelo describa una trayectoria curvilínea, la punta dará una trayectoria de la misma magnitud, pero inversa; fácilmente se comprende que por medio de una palanca de primer género, perpendicular a la traslación, de brazos iguales y cuyo punto de apoyo esté en el suelo, ligando a un extremo la punta y haciendo que el otro extremo inscriba en la superficie registradora, se obtendrá la verdadera traslación del suelo.

Perfeccionamientos

4.—*Registro del tiempo.*—Si por un dispositivo cualquiera se hace que la punta inscriptora haga marcas especiales a cada minuto, por ejemplo, se sabrá también la hora en que cada movimiento parcial se verifica; así se podrá relacionar el espacio al tiempo, esto es, se podrá tener la ley del movimiento.

5.—*Descomposición del movimiento.*—Ya pudo haberse notado que los movimientos del extremo inscriptor de la palanca sólo serán iguales a los del suelo cuando éstos sean perpendiculares al brazo de la palanca sobre el que opera el cuerpo; de ahí que al cuerpo suspendido se le provea de dos varillas horizontales (llamadas “varillas de propulsión”), perpendiculares entre sí y capaces de girar alrededor del extremo con el cual obran sobre una palanca, como se describió antes. Esto equivale a descomponer un movimiento en dos componentes; pero como el movimiento del suelo puede estar inclinado sobre el horizonte, para obtener la verdadera trayectoria vemos que falta todavía el movimiento componente vertical; éste se obtiene por medio de otro cuerpo suspendido, pero de un resorte, y que se mantiene estacionario para las rápidas elevaciones o descensos del suelo. De aquí que haya dos clases de sismógrafos: los horizontales, que dan componentes horizontales, y los verticales, que dan la componente vertical. Se concibe, pues, que recomponiendo estos tres movimientos que suministran los sismógrafos, se puede obtener en cada instante el movimiento del suelo, y, por lo tanto, su verdadera trayectoria.

6.—*Superficie registradora móvil.*—Las huellas que darían así los sismógrafos serían curvas que se cortarían repetidas veces, haciéndose indiscernibles, y para evitar este inconveniente, es ventajoso dar a la superficie registradora un movimiento conocido, verbigracia, un movimiento de traslación uniforme; después, descontando, digamos así, este movimiento, se tendrá la verdadera trayectoria componente. Esto constituye otra de las características de los aparatos actualmente en uso.

7.—*Multiplicación.*—No sólo porque hay movimientos tan pequeños o lentos que nos pasan inadvertidos, sino porque los hay que, aunque sumamente pequeños, son capaces de ocasionar grandes estragos (lo cual, dicho sea de paso, se debe tanto a la rapidez de la conmoción como a la cantidad de masa terrestre conmovida); es igualmente ventajoso amplificar los movimientos, a fin de hacerlos perceptibles; esto se consigue, ya sea con el pantógrafo o con las palancas de que se habló, y otras más que pueden añadirse, haciendo que los brazos que amplifican el movimiento sean mayores que los que lo reciben. La amplificación constituye otra de las características de los sismógrafos modernos.

8.—*Amortiguamiento.*—Todavía más, y finalmente, diremos lo que es el amortiguamiento en estos aparatos. Los cuerpos suspendidos mencionados no son enteramente estacionarios, adquieren un movimiento pendular propio que se mezclaría con el que se trata de registrar; la resistencia de un fluido, sea el aire, permite eliminar las oscilaciones propias de los péndulos y constituye el amortiguamiento.

II

El sismógrafo horizontal Wiechert

1.—Este instrumento es uno de los más aceptados y del cual se obtienen excelentes resultados. Haremos una descripción sucinta de él en sus partes esenciales.

Consta (fig. 1) de una masa de hierro *M* soportada por una columna vertical, también de hierro, el portamasa *P*, capaz de moverse alrededor de un eje horizontal *E*, orientable, que descansa en el suelo, lo cual le da un plano de oscilación. De un punto cualquiera, *B*, del portamasa, parte perpendicularmente al eje la varilla horizontal de propulsión *V*, en relación con la palanca *L*, sostenida por uno o dos resortes, *R*, fijos a la mesa *M'* y ligada por un extremo, mediante una varilla *V'*, con otra palanca, el sistema amplificador, cuyo brazo mayor lo constituye el estilete *E'* que lleva la punta inscriptora *I*, y por

el otro extremo al amortiguador *A*; la palanca del estilete gira alrededor del eje *D*. El estilete se desliza sobre la superficie de un tambor *S* cubierto con una tira de papel ahumado *T*, cuyo hollín es levantado por el menor contacto; esta tira, pegada con engrudo por sus bordes transversales, forma un anillo que es manteni-

bido, al desarrollar la tira registradora es una recta.

2.—*Sismógrafo de dos componentes.*— Si al eje *E* se le provee de otro eje de rotación perpendicular a él y que lo corte, el punto de intersección será un centro de rotación del sistema; esto se consigue con un sostén a la Cardán, formado con

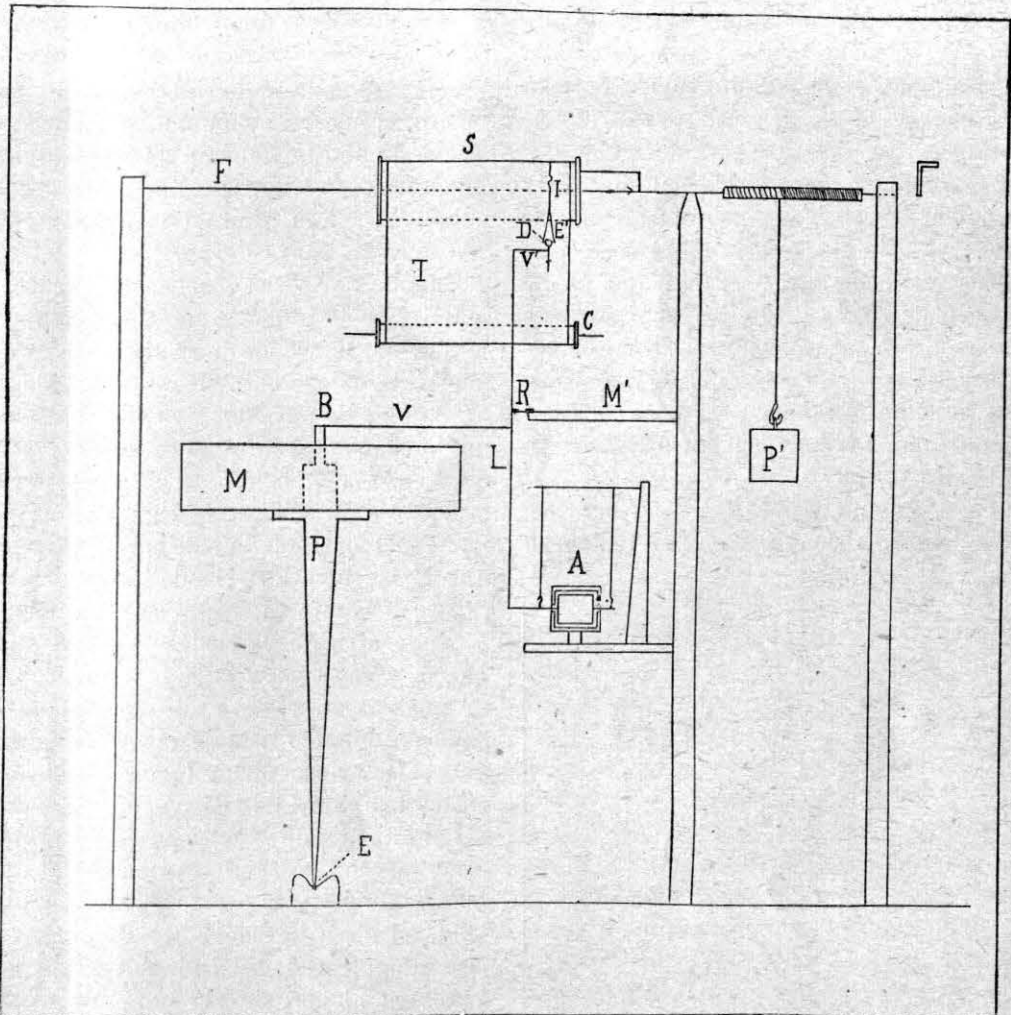


Fig. 1.—Sismógrafo horizontal de Wiechert

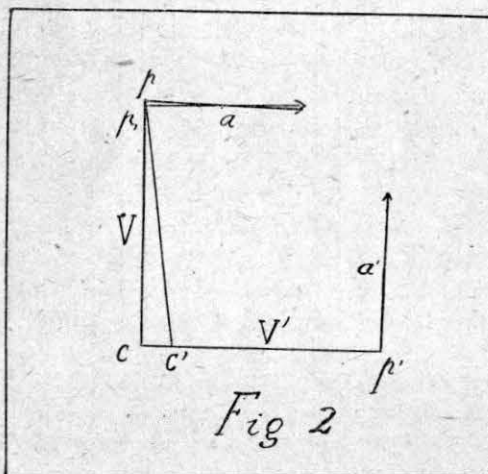
do tenso por un cilindro de cartón *C*. El tambor adquiere un movimiento de rotación al ir descendiendo el peso *P'* y otro de traslación por un dispositivo especial, por ejemplo, el de constituir el tambor como una tuerca atornillable en la barra fija *F* en forma de tornillo; así el estilete describe una hélice que, como es bien sa-

dos pares de resortes planos; un par está situado en un plano vertical y da un eje de rotación horizontal que pasa por sus centros; el otro par está situado a la misma altura que el anterior en otro plano vertical perpendicular al primero y da el segundo eje, que pasa por los centros de los resortes respectivos: los dos ejes

están, pues, a igual altura y su intersección es el centro de rotación. A la masa así sostenida se le provee entonces de otra varilla de propulsión perpendicular a la que ya posee y el sismógrafo es capaz de dar las dos componentes horizontales. Una traslación del suelo en cualquiera dirección horizontal es descomponible en dos perpendiculares entre sí y paralela una de ellas a una varilla de propulsión; si la masa tiene un eje de rotación no más, el sismógrafo sólo registrará la componente paralela a la varilla de que está provisto, y la otra será destruída por la reacción de los apoyos del eje; para registrar la otra componente será preciso disponer otro sismógrafo igual, cuyo plano de oscilación sea perpendicular al del otro, o dar a uno de ellos un centro de rotación, aunque es mejor hacer uso de dos aparatos, porque en el caso de los sismógrafos de dos componentes, éstas no guardan la completa independencia requerible.

Demostración:

Sea C (fig. 2) la masa, V y V' las varillas de propulsión, las cuales tienen su



longitud definida 30 cm. 80 cm., 2 mts. Recordemos que sea la masa la que se mueva manteniéndose el suelo quieto o sea éste el que se mueva y la masa se mantenga estacionaria, siempre podemos considerar, por el movimiento relativo, que la masa se mueve con respecto al suelo. Se dice que las componentes son independientes cuando, moviéndose la masa en

dirección de una de las varillas, el estilete conectado a la otra varilla no registra movimiento alguno. Pues bien, si la masa se desaloja de C a C' , es claro que como la varilla es inextensible, ésta tomará una posición pc' u otra análoga, puesto que pc' es mayor que pc , pero de todas maneras el punto p se aproximará a la recta cp' ; al verificarse esto, la palanca ligada con V efectuará una rotación alrededor de a y así registrará un movimiento.

3.—Analogías.—Consideremos un sismógrafo Wiechert con una componente; lo que digamos de él será aplicable al que tenga un centro de rotación, y veamos sus analogías con el péndulo suspendido, que fué nuestro punto de partida.

Cuando se sostiene un bastón sobre la mano y se le imprime un movimiento de oscilación, moviendo la mano a derecha e izquierda, puede mantenerse el bastón sobre la mano sin caerse, y se advierte como que la parte superior no se mueve; fijando mejor la atención, se nota que no es la parte superior precisamente, sino una parte del bastón, uno de sus puntos, el que no se mueve o tiende a mantenerse fijo; este punto es el que en Mecánica se llama centro de percusión. Vemos, pues, que una masa soportada por una columna que descansa sobre un eje apoyado en el suelo, cuando éste se mueva a la manera que hemos dicho (como es el caso en los temblores de tierra), puede darnos un punto fijo, de igual modo que un péndulo suspendido. Pero la masa así dispuesta tendería a caerse de uno u otro lado del eje a la menor separación de su centro de gravedad del plano vertical que contenga al eje; de ahí que sea precisa la varilla de propulsión, no sólo para transmitir el movimiento a las palancas amplificadoras, sino para mantener la masa en equilibrio; esto se consigue en los sismógrafos Wiechert, haciendo que el eje de rotación de la primera palanca lo suministre un par de resortes planos situados en un plano perpendicular a la palanca con la cual están ligados; estos resortes tienen, como debe ser, la particularidad de que su reacción crece más rápi-

y por semejanza de los triángulos $C_2 pP$ y $C_2 a_3 a_2$, se tienen también

$$\frac{a}{c} = \frac{I}{L}$$

a se mide fácilmente sobre la tira, pero c es difícil de medir, y en cambio I y L pueden determinarse como luego se verá, y por esto es que para hallar el valor de la amplificación, se prefiere calcularlo por la fórmula que se obtiene de las anteriores:

$$V = \frac{I}{L}$$

5.—*Longitud del péndulo simple equivalente al instrumento y período propio de oscilación.*—Veamos, pues, cómo se obtienen los valores de I y de L .

Se demuestra en Mecánica que, en un péndulo material, la distancia del centro de percusión al eje de rotación es igual a la longitud del péndulo simple equivalente al péndulo material. Se dice que dos péndulos son equivalentes cuando tienen el mismo período de oscilación, llamándose así el intervalo de tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos de la masa pendular por un mismo punto de su trayectoria y en el mismo sentido. El período de oscilación del péndulo sismográfico se obtiene (con el fin de lograr aproximación), contando un número cualquiera de oscilaciones y, con ayuda de un reloj, el tiempo empleado en verificarlas, y dividiendo el tiempo entre el número de oscilaciones. Este período es otra de las constantes, se la designa con T_0 , y se le llama "período propio de oscilación del instrumento" o, simplemente, "*período propio*," para distinguirla del período de oscilación del suelo durante un sismo. Bien conocida es la fórmula que da el período de oscilación del péndulo simple, la cual es:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

En esta fórmula, vemos que sólo hay dos cantidades variables: T y L ; así, pues, conociendo una de ellas, puede calcularse la otra. Como para T , que en nuestro caso

será T_0 , acabamos de indicar la manera de medirla, podremos calcular a L , que necesitamos, despejándola de la ecuación como sigue:

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g}, \quad g T^2 = 4\pi^2 L, \\ L = \frac{g T^2}{4\pi^2};$$

como el cuadrado de N es aproximadamente igual a g , valor de la aceleración de la pesantez, la fórmula anterior se simplifica y toma, aplicada a nuestro caso, la forma sencilla:

$$L = \frac{T_0^2}{4},$$

que es la que se emplea en la práctica para determinar a L , que es llamada "longitud del péndulo simple equivalente al instrumento."

6.—*Sensibilidad.*—Antes de determinar a I , hagamos la útil consideración de la "*sensibilidad*," íntimamente ligada a la amplificación, y cuyo valor es costumbre hallarlo para con él calcular el de I .

Se comprende que es acertado llamar a un péndulo tanto más sensible cuanto mayor es la huella que marca para un determinado desalojamiento de la masa; pero siendo este desalojamiento, como se ve claramente en la fig. 4, proporcional a la inclinación del instrumento, conviene dar como definición la siguiente:

Se llama sensibilidad del sismógrafo horizontal, al desalojamiento, medido en milímetros, del estilete, para una inclinación del aparato igual a un segundo de arco.

Colocando en un punto sobre la masa diversos pequeños pesos m , se darán al péndulo distintas pequeñas inclinaciones, de tal manera que los desalojamientos pueden considerarse como rectilíneos; para uno cualquiera de estos casos de añadir pesos, como el que representa la figura 4, y recordando que en un triángulo rectángulo, un cateto es igual al otro multiplicado por la tangente del ángulo opuesto, se tendrá:

$$a = I \operatorname{tg.} i \dots \dots \dots (1)$$

$$I = \frac{a}{\operatorname{tg.} i} \dots \dots \dots (1')$$

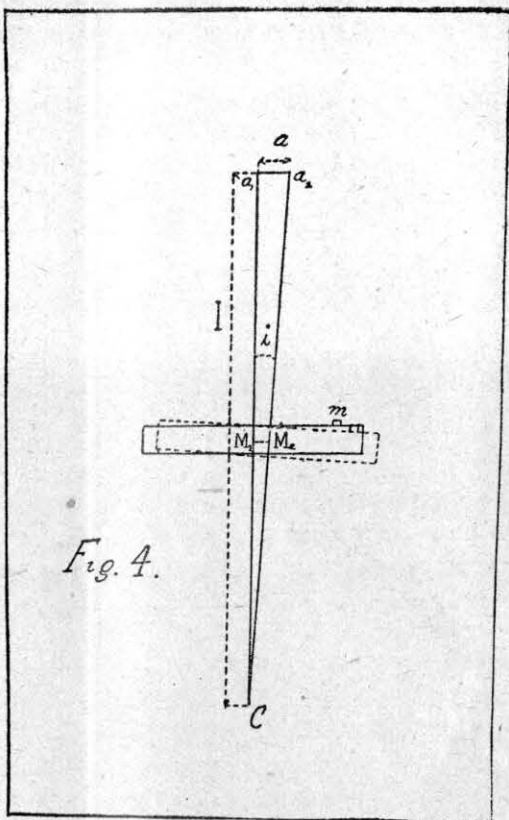


Fig. 4.

designando con a el desalojamiento o desviación del estilete y con i el ángulo de inclinación. Cuando $i=1''$, a medirá la sensibilidad, esto es, $a=E$; así que:

Substituyendo en esta expresión el valor de $\text{tg. } 1''$ que es

$$\text{tg. } 1'' = \frac{1}{\cot 1''} = \frac{1}{206165}$$

resulta:

$$E = \frac{I}{206000} \dots \dots \dots (2)$$

$$I = 206000 E \dots \dots \dots (3')$$

despreciando las 265 unidades que no tienen influencia en la práctica. De las ecuaciones (1') y (3') se sigue que:

$$\frac{a}{\text{tg. } i} = 206000 E,$$

y de aquí que

$$E = \frac{a}{206000 \text{ tg. } i} \dots \dots \dots (4)$$

en esta ecuación, para calcular el valor de E , sólo falta conocer el de $\text{tg. } i$. Se

obtiene por una fórmula que estableceremos después de describir la siguiente experiencia que se hace en la práctica:

Si se coloca el pequeño cuerpo de masa m , fig. 5, sobre un punto p de la masa del aparato a la distancia d de la posición normal de equilibrio, el aparato se inclinará, el centro de gravedad G_1 de la masa tomará una nueva posición G_2 a la distancia u , en la que encuentra su equilibrio el aparato; entonces la reacción del resorte R es una fuerza cuyo momento (producto de la fuerza por la distancia de su línea de acción al eje de rotación) será medido por el momento que lo contrarresta, el cual es $Mgu+mg (d+\Delta d)$, puesto que las fuerzas que tienden a hacer caer el instrumento son el peso Mg del mismo, más el contrapeso mg ; la cantidad Δd es lo que aumentó la distancia d por la inclinación que sufrió el aparato. Si quitamos el peso sobrepuesto, habremos dado lugar a una fuerza cuyo momento será el anterior $Mgu+mg (d+\Delta d)$ menos el momento $mg (d+\Delta d)$ del peso mg que quitamos: esto es, hemos dado lugar a la fuerza cuyo momento es Mgu , que hace volver al instrumento a su posición normal $C_1 G_1$. Ahora, si colocamos el peso m en un punto p' simétrico de p , damos lugar al momento mgd , y el instrumento toma una posición simétrica a la $C G_2$. Vemos claramente que los momentos Mgu y mgd producen rotaciones de $C G_2$ a $C G_1$ y de $C G_1$ a $C G_3$ iguales y en el mismo sentido, luego estos momentos son iguales: así pues:

$$Mgu = mgd \text{ o } Mu = md \dots \dots \dots (5)$$

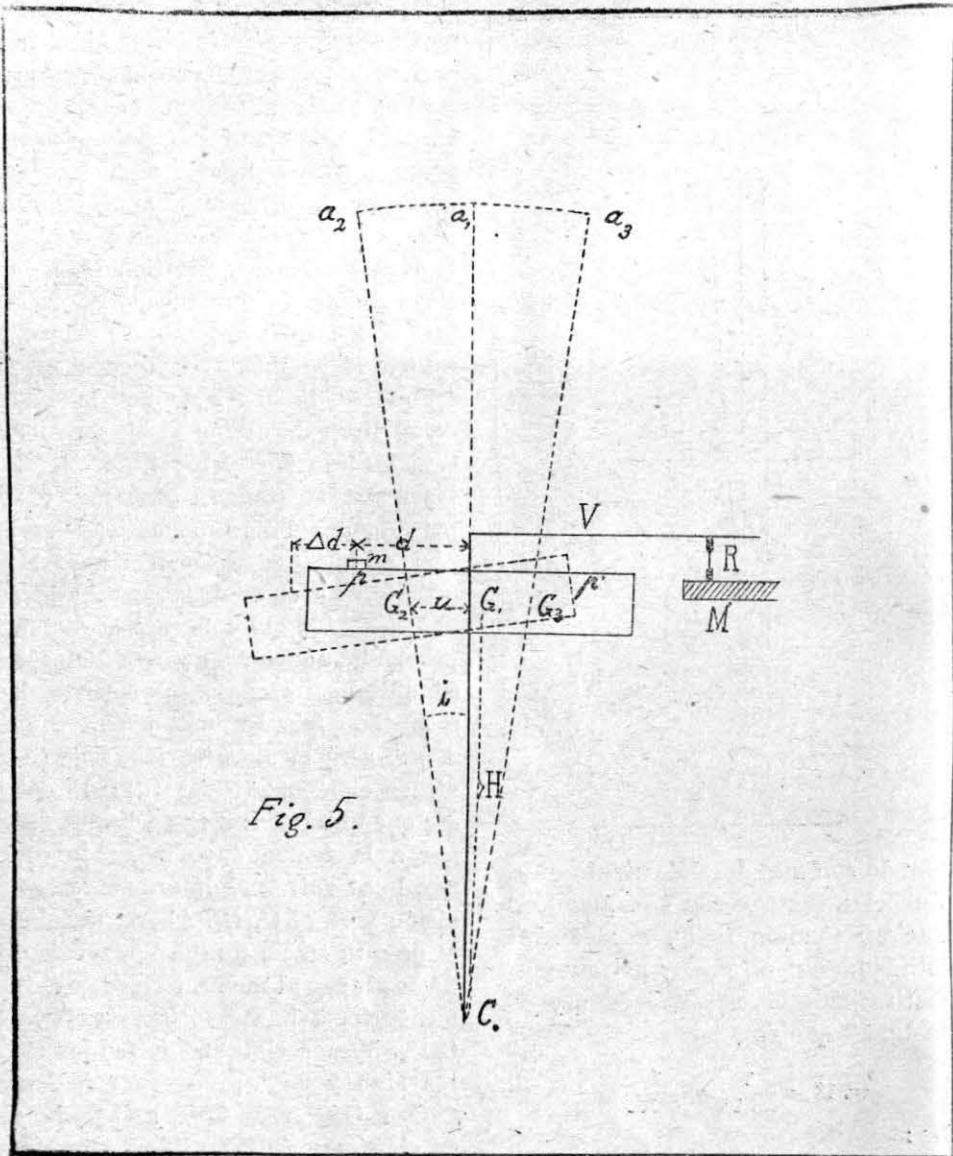
Como lo muestra la figura, para la tangente del ángulo i , cuyo valor buscamos, tenemos:

$$\text{tg. } i = \frac{u}{H} \dots \dots \dots (6)$$

el valor de u lo obtenemos de la expresión (5), y es:

$$u = \frac{md}{M} \dots \dots \dots (7)$$

el de H , altura del centro de gravedad sobre el eje de rotación, se determina co-



mo lo enseña la Mecánica experimental o, como es el caso, lo dan los constructores para cada instrumento.

Substituyendo en la igualdad (6) el valor de u dado por la (7), resulta:

$$\text{tg. } i = \frac{\frac{md}{M}}{H} = \frac{md}{MH}$$

este valor de tg. i substituído a su vez en la (4), da:

$$E = \frac{a}{\frac{206000 \text{ md}'}{MH}}$$

esto es, se tiene finalmente para la sensibilidad:

$$E = \frac{M H a}{206000 \text{ md}} \quad (8)$$

E se obtiene en milímetros porque el desalojamiento a del estilete, siendo muy pequeño, se le mide en milímetros. Como para un instrumento dado, M y H son constantes, si para medir la sensibilidad se emplea un mismo peso m y se le coloca siempre a la misma distancia d, m y d serán también constantes y

$$\frac{M H}{206000 \text{ md}}$$

será igualmente una constante, un coeficiente que llamaremos k , que se calculará una vez por todas y que, multiplicado por a , dará la sensibilidad en todo caso que se la quiera determinar:

Siendo, pues:

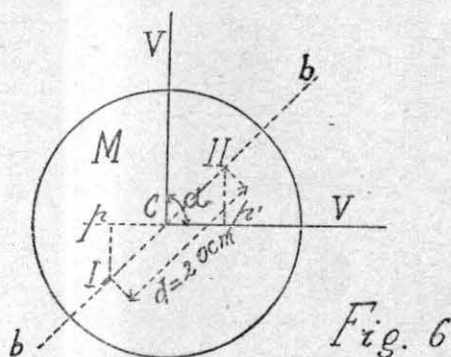
$$k = \frac{M H}{206000 \text{ md}} \dots\dots\dots (9)$$

la fórmula de la sensibilidad es:

$$E = k a \dots\dots\dots (10)$$

a se mide de a_2 á a_3 , y correspondientemente d de p á p' , y con estas medidas se calcula el valor de E ; pues es claro que su valor no se altera cuando en la fórmula (8) de la que se obtiene, se multiplica por 2 a a en el numerador y a d en el denominador.

Cuando el sismógrafo es de dos componentes, con una sola operación se obtiene la sensibilidad de los dos; sobre la masa M se traza una recta $b b$, bisectriz del ángulo recto a que forman las componentes, como se ve en la figura 6, y sobre ella



y a distancias iguales, 10 c. m. por ejemplo, se marcan los dos puntos I y II.

Del triángulo rectángulo C IIp' se obtiene:

$$\overline{Cp'} = \frac{1}{2} d \cos p' C II = \frac{1}{2} d \cos 45^\circ$$

$$\overline{Cp'} = \frac{1}{2} d 0.707 \text{ y } \overline{pp'} = 0.707;$$

para el caso del sismógrafo de dos componentes, como se ve por la figura, la fórmula (9) que sería:

$$k = \frac{M H}{206000 \text{ m pp'}}$$

se convierte en

$$k = \frac{M H}{206000 \times 0.707 \text{ m d}} \dots\dots\dots (9')$$

como se dijo antes, el valor de este coeficiente deberá calcularse una vez por todas para cada aparato, para expeditar el cálculo de:

$$E = k a \dots\dots\dots (10)$$

que se empleará para cada componente substituyendo el valor especial de a que dé cada una de ellas.

7.—Longitud del indicador equivalente.—En el párrafo anterior se obtuvo la fórmula (3'):

$$I = 206000 E \dots\dots\dots (3')$$

en la que si substituimos el valor de E , que ya sabemos determinar, obtendremos el de I , que nos faltaba, por hallar también el de V .

Si E es dado en metros I se obtendrá igualmente en metros; pero, como ya dijimos antes, E es dado en milímetros; esto causa una transformación en la fórmula (3') para hallar I en metros. En efecto, la fórmula: $I = 206000 E$ quiere decir:

$$\frac{I}{1^m} = 206000 \frac{E}{1^m}$$

de ahí que:

$$\frac{I}{1^m} = 206000 \frac{E}{1000^{\text{mm}}} =$$

$$= 206 \times 1000 \frac{E}{1000 \times 1^{\text{mm}}} = 206 \frac{E}{1^{\text{mm}}}$$

resultado que se expresa como sigue:

$$I^m = 206 E^{\text{mm}}$$

que es la fórmula usada.

8.—Resumen.—Hemos considerado sucesivamente las cinco constantes V , T_0 , L , E , I ; de éstas, dos requieren una experiencia cada una para su determinación, ellas son T_0 y E ; las otras tres, L , I , V , se calculan. En el párrafo 5 se indica la manera de obtener a T_0 ; en el párrafo 6 se indica la experiencia necesaria para obtener a a que servirá para hallar el valor de E .

Por todo lo anterior, se habrá visto que la manera práctica de proceder es la siguiente:

Se determina primero a T_0 y en seguida la cantidad auxiliar a ; después se procede

a los cálculos de las otras constantes por el orden y fórmulas que van a continuación:

$$L = \frac{4}{T_0}, E = k a, I^m = 206 E^{mm}, V = \frac{L}{I}$$