

de la conmoción en la superficie del suelo y de sus llegadas sucesivas á los puntos a ó b *c*.... Los círculos de esta superficie que tienen el punto A por centro común se llaman *círculos coseísmicos*, porque todos los puntos de cada uno de ellos deben recibir la conmoción en el mismo instante. Pero la intensidad de la sacudida experimentada irá disminuyendo evidentemente á la par de los radios de los círculos ó, lo que es lo mismo, á la vez que sus distancias al foco de conmoción. Por último, las distancias Aa , ab , bc , etc., recorridas por la onda en su movimiento por la superficie del suelo, irán disminuyendo á medida que ésta se aleje del punto A , y como están recorridas en espacios de tiempo iguales, resultan de aquí valores decrecientes para la velocidad de propagación.

En el centro A y en un corto radio á su alrededor, la dirección del impulso producido por la llegada de la onda á los objetos es la de la vertical; estos objetos sufren la sacudida de abajo á arriba como si hubieran recibido directamente el choque, y por esta razón se da el nombre de *vertical seísmica* á la del centro de conmoción. Mas á medida que la distancia á este centro es mayor, la superficie de la onda forma ángulos cada vez mayores con la superficie del suelo; las normales Oa_1 , Ob_2 , etc., forman también ángulos crecientes con la vertical, y por lo tanto los movimientos de los cuerpos alcanzados por la sacudida deben ser más y más oblicuos, y más y más inmediatos á la horizontal. En un mismo círculo coseísmico, la dirección de las sacudidas estará inclinada por igual sobre el horizonte, y todas sus proyecciones convergerán hacia una misma región de la superficie agitada, hacia el punto A . Por último, si estas sacudidas se ejercen sobre un plano vertical, por ejemplo, sobre la pared de un edificio de modo que produzcan grietas, éstas formarán ángulos rectos con la línea de dirección ó con la vertical á la onda seísmica.

Debemos confesar que estas consideraciones generales no son aplicables sino al caso ideal en que nos hemos colocado, pues en realidad serán más ó menos complicadas según que las condiciones naturales disten más de la hipótesis. Sin embargo, creemos que bastarán para que se comprenda la posibilidad de resolver varias cuestiones y en especial la que hemos planteado más arriba, ó sea la investigación del foco de conmoción de un terremoto, con tal que haya sido posible reunir suficiente número de datos.

Supongamos desde luego que se ha podido anotar con suficiente exactitud la hora á la que ha ocurrido, por ejemplo, la primera sacudida de un terremoto en cierto número de puntos. Todos aquellos en que se haya sentido esta sacudida á la misma hora pertenecerán, á corta diferencia, al mismo círculo ó á la misma curva seísmica. Por consiguiente, si en el mapa de la región agitada se reúnen dichos puntos con una curva continua, las verticales á esta curva convergerán hacia el centro de conmoción ó circunscribirán una región en que está contenido. Así, pues, con un número suficiente de datos de esta clase se podrá determinar la posición de dicho centro, que las más de las veces no es un solo punto, sino una línea, una superficie cuya forma y extensión están indicadas aproximadamente por las de las curvas coseísmicas. Este método está sujeto á algunas dificultades en la práctica: una de ellas consiste en la comparación de las horas de las observaciones, en la reducción al tiempo medio del lugar, de las indicaciones dadas por relojes de bolsillo ó de pared mal arreglados. Además, es muy difícil saber si la sacudida que se ha sentido en todas partes es la misma, aun cuando es sumamente probable cuando se trata de un terremoto de una sola sacudida, ó cuando el número limitado de sacudidas ha sido el mismo en todas las estaciones, ó en fin cuando se ha tomado nota exacta de todos sus intervalos.

A falta de la hora, se puede encontrar el centro de conmoción comparando las intensidades de las sacudidas, las cuales se suelen medir por sus efectos. Las ondas parecen propagarse por la superficie de la tierra como si emanaran del punto A de esta superficie. Allí su intensidad llega al máximo y va decreciendo de modo que siempre permanece igual en los diferentes puntos de una misma curva coseísmica. Por consiguiente, si se reúnen con una curva continua todos los puntos en que la sacudida experimentada ha sido de igual violencia, se tendrán tantas curvas de esta clase que se podrán combinar series de observaciones semejantes, y se podrá deducir de ellas, como por el método precedente, la posición, la forma y la extensión de la comarca que circunscribe el centro de conmoción. Pero ¿cómo se pueden comparar las intensidades de una misma sacudida en diferentes lugares? A falta de instrumentos especiales á propósito para anotar estas intensidades, se comparan los efectos exteriores de las sacudidas. M. Alberto Heim recomienda el método siguiente: se colocan en una misma línea todos los puntos en que las paredes de mampostería han sido derribadas ó grietadas, en otra línea los de los muebles que han ido á parar lejos de su sitio habitual, y por último en otra línea aquellos en que la sacudida se ha percibido sin consecuencias. También se pueden buscar los puntos en que aquélla ha presentado los caracteres de una conmoción y los en que se ha notado un movimiento ondulatorio, ó en fin los puntos en que se han sentido una, dos ó tres sacudidas distintas.

Finalmente, se puede averiguar también la posición del centro de conmoción mediante el estudio de las direcciones en que se han efectuado las sacudidas. La caída de los cuerpos situados á bastante altura, como las partes superiores de los edificios, los campanarios de las iglesias, las chimeneas de las casas, basta por lo común para adquirir datos de dicha dirección, ya ocurra hacia atrás á causa de la inercia del cuerpo, ó ya sea hacia adelante, cosa que, aunque rara, sucede alguna vez. Levantando en muchos sitios diferentes el ángulo de esta dirección con la meridiana del lugar, se podrán trazar en la carta líneas cuya convergencia indicará el centro de conmoción. Pero en todos los casos habrá que examinar con cuidado las condiciones en que se hallaban los objetos en el momento de su caída, pues de lo contrario se podría incurrir en un error. Un caso mencionado por Fuchs demuestra la influencia que ejerce la situación de los objetos en la dirección de su caída y por lo tanto en la aparente dirección del movimiento seísmico. Cuando el terremoto que se sintió en Mallorca en 1851, "había en el parque varias series de fusiles apoyados en las paredes; al principio del terremoto, que se dirigía de Oeste á Este, los fusiles apoyados en la pared oriental del edificio continuaron en pie, al paso que todos los que estaban al Oeste quedaron tendidos con regularidad en el suelo, con la boca del cañón mirando al Este. También cayeron los fusiles apoyados en las paredes Norte y Sur, pero con irregularidad, y se amontonaron entrecruzándose en todos sentidos."

En todo lo que precede, sólo hemos tratado del centro de conmoción, es decir, del punto de la superficie del suelo de donde parecen partir las ondas seísmicas irradiando en todas direcciones. Pero sería más importante determinar el verdadero foco del movimiento, situado verticalmente debajo del primero á profundidad desconocida. Se puede resolver esta cuestión interesante de varios modos, partiendo siempre de la hipótesis ideal en que nos hemos colocado, salvo el tener que modificar la solución discutiendo las condiciones reales de los fenómenos observados.

Refiriéndonos á la figura 176, se ve que la profundidad desconocida del foco de conmoción O es un lado común á los triángulos rectángulos AOa , AOb , etc. Los la-

dos Aa , Ab son distancias ó longitudes conocidas, si se ha empezado por averiguar la posición del centro seísmico A . No se conocen las dos hipotenusas Oa , Ob ; pero en la hipótesis de la velocidad uniforme de la propagación de las ondas, se conoce su relación, puesto que se han anotado las horas en que se ha sentido la sacudida en a y b , y por lo tanto se puede calcular fácilmente la longitud de AO por una sencilla ecuación. Hay otra solución indicada por Roberto Mallet, la cual requiere que se conozca la verdadera dirección del movimiento ondulatorio en a , es decir, el ángulo formado por la línea Oa con el horizonte ó con su proyección horizontal Aa . Véase cómo se puede conseguir.

Supongamos que en m (fig. 177), lugar en que ha ocurrido la sacudida, hay una pared vertical y rectangular $abcd$, situada al paso de la onda, la cual sale siguiendo la dirección mU . El choque propenderá á producir grietas como mm , nn , en ángulo recto con la dirección de emergencia. Conociendo así la inclinación de OU con el horizonte, es decir, el ángulo de emergencia, por la inclinación de las grietas mismas, para encontrar la posición del foco bastará trazar un triángulo rectángulo, uno de cuyos lados Am así como un ángulo AmO son conocidos, problema gráfico ó trigonométrico de los más sencillos (1).

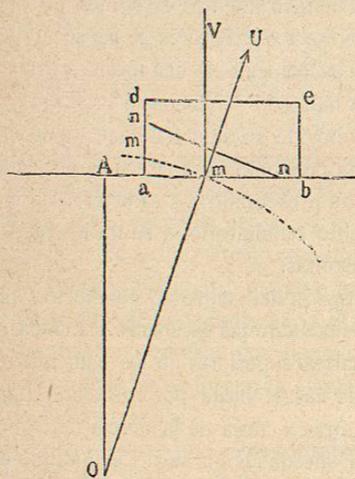


Fig. 177.—Determinación del foco de conmoción por la dirección de las grietas de una pared vertical.

toda su exactitud y oportunidad: "Aunque no se debe considerar esta valuación más que como una aproximación rudimentaria de la verdad, ofrece sin embargo gran interés, por cuanto tales investigaciones repetidas podrían dar más adelante resultados positivos, sobre todo cuando se hayan hecho en el momento de la convulsión observaciones relativas al tiempo, á la dirección y á la intensidad de las sacudidas con todo el cuidado que requieren las indagaciones científicas. Esta clase de observaciones exigen el auxilio de instrumentos muy delicados; y el problema, sumamente complicado, lo es mucho más de lo que pudiera suponer el lector en vista de la sencilla explicación que acabamos de dar. En efecto, haré observar que el choque que produce la vibración ó la onda de terremoto no engendra un solo movimiento como habíamos supuesto, sino dos, uno longitudinal y otro transversal. Al principio de las convulsiones, este segundo movimiento sigue casi instantáneamente al primero con el cual forma ángulos rectos; pero como esta última vibración se propaga algo más despacio que la primera, no llega á la superficie, si la distancia que ha de recorrer es considerable, hasta que transcurre cierto espacio de tiempo, y con frecuencia causa en los edificios daños más graves que la que la ha precedido.

(1) Se ha supuesto aquí que la pared está situada en el plano vertical que pasa por el centro A . Si así no fuese, no por eso sería más difícil la solución del problema, aunque éste fuera menos sencillo.

„El detenido dictamen de M. Hopkins demostrará también que cuando una ondulación atraviesa capas de densidad y de elasticidad diferentes, cambia hasta cierto punto no sólo de velocidad, sino también de dirección, encontrándose á la vez refractada y reflejada de un modo análogo al del rayo luminoso que pasa de un medio de cierta densidad á otro de densidad diferente. Cuando la sacudida atraviesa un espesor de muchos kilómetros en la capa terrestre, encuentra necesariamente rocas de gran variedad, así como rocas y fallas que estorban más ó menos la marcha del movimiento vibratorio. Del propio modo, la fractura de las paredes de un edificio resulta considerablemente modificada por la naturaleza de los materiales que lo componen y por la cohesión mayor ó menor de la argamasa que sirve para unir y cimentar la piedra y los ladrillos. Débese pues tener en cuenta en los cálculos de M. Mallet la incertidumbre de los datos de que disponía cuando trató de estimar la profundidad debajo de la superficie á que había tenido origen el choque de 1857; y en cuanto á aquella de que emanaron los movimientos de 1783, nos es mucho más difícil formar la menor conjetura verosímil. Hay sin embargo un principio de interés general que M. Mallet deduce de todos los hechos conocidos hasta el día relativamente á los temblores de tierra, y que formula así: "Los puntos subterráneos de que parten los choques jamás están situados á gran profundidad, y su distancia á la superficie no pasa nunca de treinta millas geográficas (223 kilómetros?);" conclusión muy importante y que desearíamos ver confirmada más adelante por la observación y por la teoría."

Los terremotos se propagan en todos los terrenos. Según lo observa Humboldt, ocurren lo mismo en el granito que en el micasquisto, en la caliza como en la arenisca, en la traquita lo mismo que en la amigdaloides; se han sentido sacudidas en los terrenos de aluvión tan flojos de Holanda, hacia Midleburgo y Flessinga. Sólo que, según lo han demostrado las cifras anteriormente citadas, la velocidad de propagación varía entre grandes límites, no con arreglo á la constitución química de las capas atravesadas por las ondas, sino según su estructura mecánica y también en razón de los accidentes de toda clase que se presentan en el interior de las capas. A veces la onda se interrumpe en un punto para reaparecer más allá, como si algún obstáculo la hubiera forzado á separarse de la superficie para continuar su camino á mayor profundidad. Nótese especialmente estas interrupciones cuando las ondas seísmicas se propagan á lo largo de una costa, ó siguen la dirección de una cordillera. Acerca de este punto, dice el autor del *Cosmos* que dichas interrupciones, puramente locales, de las conmociones transmitidas por las capas superiores, tienen quizás alguna analogía con un fenómeno notable ocurrido á principios del siglo actual en las minas de Sajonia: en las de plata de Marienberg notáronse tan violentas sacudidas que los obreros aterrados se apresuraron á subir, pero en la superficie del suelo no se había sentido nada. He aquí ahora un fenómeno opuesto: en noviembre de 1823, los mineros de Falun y de Persberg no notaron sacudida alguna en el momento en que un violento terremoto aterraba á los habitantes de la tierra que tenían sobre sus cabezas. En muchas ocasiones han ocurrido sacudidas que, notadas en la superficie, no han llegado á las capas profundas del suelo. Otro ejemplo: un fuerte terremoto asoló en marzo de 1872 el distrito minero de Lone-Pine al Sudeste de California: desde las dos y media de la madrugada hasta el amanecer se contaron lo menos 300 sacudidas. La ciudad de Lone-Pine se derrumbó por completo, sin que una sola casa quedara en pie. Pues bien, los obreros que trabajaban en las minas no sintieron ninguna sacudida, ni aun las más violentas. ¿Qué obstáculos se oponen al movimiento de propagación en tal ó cual sentido, ya sea de abajo á arriba,

ó bien de arriba á abajo? ¿Por qué ciertas comarcas que parecían indemnes han llegado á ser el centro de conmociones más ó menos frecuentes, después de una sacudida de cierta violencia? ¿Por qué parece agrandarse el área de conmoción de ciertos centros sísmicos (1)? Cuestiones son estas en las que aún reina la mayor obscuridad.

Acerca de este punto, habría que repetir en condiciones variadas los experimentos del género del que emprendió R. Mallet hace veintidós años sobre la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en terrenos de diferentes naturalezas. Habiendo tenido que volar algunas rocas en las canteras de Holyhead, aquel ilustrado ingeniero midió la velocidad con que las sacudidas ocasionadas por millares de kilogramos de pólvora se propagaban en diferentes rocas. Esta velocidad, que era de 250 á 300 metros por segundo en la arena húmeda, y de unos 500 en el granito friable, llegó casi á 600 en el granito compacto. Varió asimismo con la intensidad de la explosión ó con la carga de pólvora, siendo de 450 metros cuando esta carga era de 1.000 kilogramos, y de unos 600 con una carga cinco veces y media menor. En estos experimentos interesantes, la violencia de las vibraciones era enteramente comparable con los efectos de las sacudidas de los terremotos.

VI

APARATOS AVISADORES É INDICADORES DE LOS TERREMOTOS.—SEISMÓGRAFOS Ó SEISMÓMETROS

Acabamos de ver las dificultades que presenta la observación científica ó metódica de los fenómenos de los terremotos. Cuando se trata de una sacudida violenta, estas dificultades dependen en gran parte de la imposibilidad casi absoluta en que está el observador de conservar la sangre fría necesaria. Si la sacudida es tan débil que no inspira ningún temor, aunque bastante fuerte para que se la perciba fácilmente, la dificultad desaparece; pero se reproduce en sentido inverso, cuando sólo es cuestión de oscilaciones imperceptibles, de estremecimientos del suelo, que son fáciles de confundir con otras causas de agitación cuando se les llega á percibir. Compréndese pues que se haya procurado suplir esta insuficiencia con la invención de procedimientos mecánicos ó de aparatos especiales.

Dase el nombre de *seismómetro* ó *seismógrafo* á todo aparato capaz de dar indicaciones sobre los diferentes elementos de un terremoto, de avisar el momento en que ocurre una sacudida, de anotar la dirección en que se efectúa, de inscribir la hora en que ha comenzado así como la en que ha cesado, y por tanto su duración, de medir si es posible su intensidad, etc. Al principio el seismógrafo se redujo simplemente á un vaso lleno de agua cuyo movimiento se examinaba: se espolvoreaba de salvado la superficie del líquido, y cuando por efecto de la más leve sacudida el agua oscilaba en el vaso, dejaba fijas en las paredes y en la dirección de su movimiento partículas de salvado que indicaban por su posición misma la orientación de la sacudida, y por la altura á que se habían elevado, su intensidad aproximada. También se adoptó un péndulo,

(1) "Desde la destrucción de Cumaná (4 de septiembre de 1797), y tan sólo desde aquella época, la península de Maniquarez, situada enfrente de las colinas calizas del continente, experimenta todas las sacudidas de la costa meridional en sus capas de micasquito. Las que desde 1811 á 1813 agitaron casi sin interrupción el suelo de los valles del Mississippi, del Arkansas y del Ohio, iban extendiéndose hacia el Norte de un modo notable. Parece como si desaparecieran sucesivamente ciertos obstáculos subterráneos, y que una vez libre el camino, el movimiento ondulatorio se propaga tan luego como se produce." (*Cosmos*, t. I.)

compuesto de una pesa terminada en una fina punta metálica y suspendida de un hilo sobre una superficie plana formada de arena muy fina. Estando la punta en contacto con la arena, cuando alguna oscilación la mueve, traza en su superficie un ligero surco, cuya dirección marca la orientación de la sacudida.

Éstos aparatos tienen un mérito, el de la sencillez; mas, aparte de que las indicaciones son muy efímeras, los datos que proporcionan son sobrado incompletos. Haciendo intervenir un agente de gran sensibilidad, la electricidad, se han discurrido aparatos más exactos, más delicados á la vez que más completos, como el *seismógrafo electro-magnético*, que el profesor Palmieri ha instalado en su precioso Observatorio del Vesubio. Veamos de hacer comprender en qué consiste este ingenioso aparato.

El seismógrafo Palmieri se compone de dos partes distintas: la una hace las veces de motor ó de *transmisor*, y es la que recibe y transmite los movimientos sísmicos, verticales ú horizontales, choques ú ondulaciones; la segunda, el *anotador*, marca los instantes precisos del principio y del fin del fenómeno, y como es común á las sacudidas verticales y á las horizontales, vamos á describirle ante todo (1).

Comprende dos relojes distintos, y los dos marcan, además de los días del mes, las horas, minutos y segundos. Uno de ambos está siempre en marcha, y sirve para indicar, parándose, el principio del temblor de tierra. En el momento de ocurrir la sacudida, la armadura de un electroimán que está en relación con el aparato transmisor, pone en movimiento un brazo de palanca que cae sobre el péndulo del reloj y le detiene, resonando al propio tiempo un timbre que avisa de este modo al observador. Al detenerse el primer reloj pone el segundo en marcha en virtud de un movimiento de escape; y en seguida se desenrolla una cinta de papel con la velocidad de un centímetro por segundo, pasando por delante de las puntas de dos lápices de diferentes colores. Uno de estos lápices está fijo en la armadura de un electroimán enlazado con el mecanismo del transmisor que marca las sacudidas verticales; el otro marca las horizontales ú ondulatorias. Según que ocurra uno ú otro de estos movimientos sísmicos, una corriente anima el electroimán que le corresponde; entonces su armadura hace que el lápiz se apoye en la cinta de papel, donde deja señalado un trazo cuya longitud es proporcional á la duración de la sacudida. Según que el trazo señalado sea encarnado ó negro, por ejemplo, sábase cuál ha sido la clase de conmoción ocurrida; su longitud marca en centímetros el número de segundos de su duración; los puntos en que se han detenido las agujas del primer reloj indican la hora exacta en que ha empezado el te-

(1) Los chinos, que parecen haberse adelantado en todo á la civilización occidental, para quedarse estacionados en el período de infancia, si no en todo, cuando menos en lo que atañe á las ciencias, idearon un seismógrafo hará unos diez y siete siglos. Véase lo que acerca de esto dice la Revista inglesa *Natura*: "Este instrumento, inventado el año 136 de nuestra era por un tal Chioko, se compone de una esfera hueca que lleva encima un gollote, y que por su forma se parece á una botella de vino. Exteriormente está adornada de caracteres antiguos y de figuras de animales. Por dentro pasa una varilla puesta de modo que puede moverse en ocho direcciones diferentes. En el contorno exterior hay ocho cabezas de dragón que contienen una bola cada una, y debajo una rana con la boca abierta. Cuando sobreviene una sacudida de terremoto, la varilla cae en una de las ocho direcciones y expulsa la bola que se mete en la boca de la rana correspondiente. Así se puede averiguar la orientación de la sacudida. Es el mismo principio que el de nuestros recientes seismómetros, y no se debe olvidar que los chinos establecieron una oficina seismológica provista de estos aparatos hace mil ochocientos años, en una época en que no se conocía la América y en que la mitad de la Europa actual se hallaba en estado salvaje."

Es muy cierto: pero también hace mil ochocientos años que los chinos no han hecho adelantar un paso al asunto, del propio modo que, siendo inventores de la brújula, no han pasado, en cuestión de magnetismo terrestre, de sus carros indicadores del Sur.