NOTAS SOBRE MECANICA DEL SUELO

Por JOSÉ A. JIMÉNEZ SALAS, Ingeniero de Caminos.

Termina con el presente artículo este interesante trabajo que venimos publicando. A continuación se describen algunos métodos de ensayos "in situ", tratando después de los de Laboratorio y terminando con una reseña de los laboratorios españoles de Mecánica del Suelo.

III

ENSAYOS "IN SITU"

Ensayos del primer grupo: Penetración.

Los sondeos son relativamente caros y lentos de ejecutar. Convendría reducirlos en lo posible, pero, por otra parte, es preciso explorar el terreno en gran número de puntos, con el fin de tener una clara idea de las variaciones de espesor y consistencia de los estratos, así como para descubrir las singularidades localizadas del terreno.

Una gran ayuda se puede encontrar en los diversos métodos de prospección, de los que el eléctrico parece haber entrado en la práctica corriente de la ingeniería. Pero la prospección es más apropiada para el examen de grandes áreas, y no tiene finura suficiente para aclarar los problemas corrientes de cimentación, excepto, si acaso, en aquellos casos en los que se encuentra roca a profundidad accesible. Más útiles en la mayor parte de los casos, y al mismo tiempo más sencillos, son los ensayos de penetración mediante la hinca de varillas aguzadas o carriles, según la profundidad que se desee alcanzar.

Otro aparato más elaborado, consiste en un cono de 10 cm.² de base y 60° de ángulo en el vértice, fijado en una varilla de 15 mm., que desliza en el interior de un tubo de 3,5 cm. de diámetro. El conjunto de tubo y cono se hinca en el suelo. La resistencia que se encuentra se compone de la resistencia en la punta y del frotamiento lateral. A profundidades escalonadas, se ejerce presión solamente sobre la varilla, obteniendo así la resistencia en la punta, y, por diferencia, el frotamiento lateral. El aparato puede construirse de modo que resulte muy portátil y de sencillo manejo.

Ensayos del segundo grupo.

Permeabilidad. — Ya vimos en el artículo anterior las dificultades de una medida correcta de la permeabilidad en el laboratorio. En consecuencia, la investigación directa sobre el terreno tiene una gran importancia.

Es bastante corriente el método de inyectar agua a presión en un agujero sondeado. El pequeño diámetro de éste trae el inconveniente de que la mayor parte de la carga de agua queda absorbida en un cilindro de suelo alrededor del agujero de inyección, de radio bastante escaso, que suele estar perturbado por la ejecución del sondeo.

Pueden también abrirse dos pozos, distantes de 5 a 20 m., y llenarlos, el uno, con agua, y el otro, con una disolución de sal común, hasta un nivel superior al primero, y observando la llegada de la disolución a éste por medio de nitrato de plata o por medidas de resistencia eléctrica. Se tropieza con dificultades debidas a la difusión, y en especial con los errores producidos por la existencia de corrientes freáticas.

El método más seguro es el de agotamiento. Es preciso disponer, además del pozo, un tubo agujereado, clavado en el terreno a una distancia del pozo suficiente para que no llegue su influencia, con el fin de tener constantemente un punto del nivel freático como referencia, y otro tubo en las proximidades del pozo, con el fin de poder medir la inclinación de la superficie del agua.

A pesar de todo, no siempre se llega, ni con las medidas en el terreno, a valores de la constante permeabilidad muy concordantes. Esto se debe a que el terreno mismo tiene permeabilidad muy distinta en sus diversos puntos. Con todo, los ensayos *in situ* que afectan a una masa importante, serán de mucha mayor confianza, aunque no la merezcan, en determinados casos, completa, que el ensayo en el laboratorio.

Ensayos de carga. — Los ensayos de carga son, a mi modo de ver, extremadamente interesantes, y siempre dan resultados más seguros que los de laboratorio. Se encuentra actualmente con frecuencia, en publicaciones que tratan de Mecánica del Suelo, una cierta tendencia a menospreciarlos. La creemos injusta, pero pensamos que su origen está en que el ensayo de carga, casi siempre, se hace mal y se interpreta erróneamente.

Examinemos ambos puntos: la placa de carga ha de ser lo mayor posible dentro de las limitaciones a que la economía obliga. Siempre será demasiado pequeña para que sea comparable con los apoyos de la estructura, y nunca estaremos completamente seguros de la licitud de la extrapolación, aunque se haga por medio de los mecanismos de cálculo más perfectos de que se disponga. Para una misma carga por centímetro cuadrado, las superficies grandes afectan a capas del suelo más profundas que las pequeñas. Es posible que exista un estrato compresible que ocasione un gran asiento en la estructura, y no haya influído en el descenso de la placa de carga. Un estudio completo, por lo tanto, reclama la ejecución de ensayos a profundidad, abriendo pozos, a no ser que se complemente con ensayos de laboratorio que nos garanticen la homogeneidad del terreno.

Las referencias de nivelación han de tomarse lo suficientemente alejadas para que no les afecte el descenso del terreno en las inmediaciones de la placa, ni el tráfico que necesariamente hay que desarrollar alrededor de ella. También hay que evitar los posibles asientos que pueden producir ensayos de agotamiento que se lleven a cabo simultáneamente, o trabajos de otro género que puedan alterar el equilibrio freático.

Si se aplica la placa sin ninguna precaución sobre la superficie del terreno, se producirán fluxiones del suelo en la zona del borde, que falsearán los valores de los asientos. Hay que cargar el terreno alrededor de la placa con otra placa anular. La carga por centímetro cuadrado que se precisa, se puede calcular por la fórmula de Fröhlich.

A cada incremento de carga, es preciso esperar a que se produzca todo el asiento, lo que siempre tarda un tiempo apreciable, y, en suelos poco permeables, días y aun semanas. El aparato para producir el esfuerzo debe ser adecuado para mantenerlo constante durante ese plazo.

Este ensayo suele tener como finalidad la determinación de los posibles asientos. No es adecuado para estudiar la "rotura" del suelo por esfuerzo cortante. Por lo tanto, podemos limitarnos a aplicar sobre el terreno presiones análogas a las que ejercerá sobre él la construcción definitiva. Pero, después del ensayo, hay que librarse de la idea de que los asientos obtenidos tienen una correspondencia directa de magnitud con los de la estructura. Los valores hallados sirven para calcular características mecánicas del terreno, que a su vez servirán para calcular los asientos de la estructura, cuyos apoyos tienen forma y dimensiones distintas de las de la placa. Por esta razón suele elegirse placa circular, que permite una interpretación matemática del ensayo, relativamente fácil y exacta.

Medida de la presión del agua intersticial. — En las arenas puede ser útil alguna vez para averiguar los posibles movimientos del agua freática, pero donde puede tener mayor interés es en arcillas poco permeables, pues nos indica su estado de consolidación, antes de aplicar las cargas de la estructura, y el curso de la misma, después de aplicarlas. Pero mientras en las arenas es de realización inmediata, pues se reduce a clavar un tubo en el suelo y observar el nivel que el agua adquiere en su interior, en las arcillas es complicado, pues precisamente por su poca permeabilidad el agua no llegaría dentro del tubo a su nivel de equilibrio en mucho tiempo, y hay que recurrir a manómetros capilares de mercurio, a veces aplicando contrapresión en la rama libre.

Prospección por vibraciones. — Este método de prospección ha recibido un especial desarrollo en Alemania, pues promete dar no solamente indicaciones sobre los estratos de diversa naturaleza que puedan presentarse en el terreno, sino también datos concretos sobre sus características mecánicas.

Deriva del procedimiento sísmico, muy usado en búsqueda de minerales e investigación de estructuras geológicas, que consiste en provocar ondas mecánicas en el suelo por la explosión de una carga, y estudiar su propagación por medio de una serie de sismógrafos. La diferencia estriba en que esas ondas se producen por un aparato que, en unos modelos, está provisto de dos pesadas masas que giran en sentidos contrarios alrededor de ejes que no pasan por sus centros de gravedad, y en otros, de una sola que tiene movimiento alternativo por medio de una biela. Se busca así una permanencia en el ensayo, que facilita la exploración y permite mayor finura de detalle.

Con todo, el método no ha alcanzado notable difusión. Su ejecución es complicada y su interpretación también; pero sobre todo hay las dificultades de que los terrenos sueltos, que no siguen la ley de Hooke y cuyas características mecánicas varían a cada ciclo de carga, son mucho menos adecuados para ser estudiados de esta manera que las rocas, objeto primordial de las exploraciones sísmicas antes citadas, y, por otra parte, de que el método no puede darnos ningún dato sobre las lentas deformaciones de las arcillas, pues las ondas de compresión no dan tiempo a la expulsión del agua intersticial.

Resulta, en cambio, utilísimo el procedimiento, en aquellos casos concretos en los que el objeto directo del estudio es la propagación de las vibraciones en el terreno. Como ejemplo citaremos el ensayo llevado a cabo para la proyectada nueva estación de Munich, en terrenos de arena fina de origen glaciar, en los que las vibraciones producían asientos. El estudio versó sobre la posible influencia que la circulación de los trenes pudiera tener sobre la cimentación de los grandes pilares de la cubierta.

Ensayos de laboratorio, a escala poco reducida.

Estos ensayos tienen su puesto adecuado en la investigación. Su elevado coste y el largo tiempo que requieren, hacen difícil su aplicación para la práctica inmediata. Se ha estudiado mucho de esta manera la distribución de cargas en el terreno, por medio de cápsulas manométricas.

Sobre empuje de tierras sobre muros, se ha trabajado también intensamente. Citaremos solamente el ensayo que se llevaba a cabo, a fines del año 1943, en la Degebo, de Berlín. Una dificultad de estos ensayos estriba en que la medida de los empujes hay que hacerla por medio de dinamómetros. Aparte de la dificultad de construir éstos cuando las presiones son grandes, precisan siempre, para efectuar la medida, un sensible desplazamiento del muro cargado, con lo que se falsea el valor del empuje. En el ensayo que citamos, el tablero que sustituía al muro cargado se apoyaba sobre puntos fijos por medio de cortas barras de acero, cuyas deformaciones, mucho menores que las exigidas por los aparatos de medida usados hasta ahora, eran determinadas por medio de auscultadores de cuerda vibrante.

Por la Preussische Versuchsanstalt, se llevaba a cabo un ensayo para el estudio de las presiones que las tierras ejercen sobre los tablestacados. Después de ejecutar un pequeño tablestacado con perfiles normales, se medía el empuje por cápsulas manométricas y se medían también las deformaciones de las tablestacas.

Toma de muestras inalteradas.

La toma de muestras es quizá el momento más delicado del ensayo de terrenos. No debe dejarse, como es frecuente, en manos de subordinados que carecen del criterio necesario para distinguir lo característico de lo accidental. Es preciso seleccionar unas pequeñas masas de tierra, en unos pocos puntos del terreno afectado; pero, de tal manera, que del ensayo de ellas pueda deducirse el comportamiento del total.

Las muestras pueden ser *inalteradas* o *alteradas*. Las primeras son las que se toman con su estructura y humedad natural. Es muy difícil poder hacerlo en suelos que no sean coherentes (arenas). Se han ideado procedimientos de congelación o impregnación para prestarles la cohesión que les falta, pero no han alcanzado mucho crédito, ya que la propia ejecución del procedimiento puede alterar la estructura. Normalmente, hay que conformarse con tomar muestras, en excavación abierta o pozos, de capas relativamente superficiales. Otro problema es el transporte, ya que las vibraciones destruyen la estructura.

Afortunadamente, el ensayo de muestras inalteradas no tiene una importancia fundamental, por regla general, en este tipo de suelos. Su misma falta de cohesión nos indica la ausencia de una verdadera estructura que una sus partículas, las cuales se hallan simplemente apoyadas entre sí. Las propiedades mecánicas varían poco entre una muestra inalterada y otra reconstituída, siempre que la segunda *tenga la misma compacidad* y el mismo grado de humedad que la primera. Resulta, por lo tanto, que lo que sí es fundamental es averiguar el índice de huecos y la humedad de las capas de arena. Si son superficiales, no hay dificultad alguna. No ocurre lo mismo en capas profundas, sobre todo con el índice de huecos, y a veces hay que sustituir esta determinación por la de la penetración, reconstituyendo luego la muestra de arena con compacidad tal, que con grado de humedad igual al natural, tenga la misma penetración que la hallada sobre el terreno.

Todo lo contrario ocurre en suelos coherentes; en éstos, una muestra alterada tiene poco valor, ya que en ella se ha destruído la estructura, resultado de una historia geológica que no podemos volver a reproducir y que determina las características mecánicas del suelo. Pero, al mismo tiempo, la obtención de muestras inalteradas en este caso no es difícil, y debe llevarse a cabo en cualquier trabajo de mediana importancia.

Para su extracción se han ideado numerosos aparatos, pero en muchos casos basta con un cilindro de acero (un trozo de tubo estirado), afilado en su borde inferior y roscado en el superior, para unirse, por medio de un acoplamiento, a una varilla de longitud adecuada. En la parte superior del tubo se disponen dos o tres pequeños agujeros para la salida del aire. Este tubo se lleva al fondo de un agujero sondeado por los procedimientos usuales, y se hinca por presión, a ser posible, y con moderados golpes de maza, en caso contrario. Para profundidades importantes puede ser conveniente disponer una maza tórica, dispuesta para golpear directamente sobre el acoplamiento del tubo a la varilla, y que es guiada por esta última. La hinca debe hacerse sin el menor balanceo lateral del tubo y sin el más pequeño giro alrededor del eje de la varilla.

Una vez hincado el tubo totalmente, se hace girar esta última aproximadamente media vuelta, lo que es suficiente para cortar la muestra a la altura del borde afilado y separarla del terreno. Una vez extraída, se desatornilla el acoplamiento y se quitan, con un cuchillo, unos dos centímetros de suelo por cada lado del cilindro, rellenando después el hueco con parafina fundida. Una vez endurecida ésta, se vuelve a echar más por los bordes, pues al enfriarse la primera porción suele producirse, por contracción, una grieta entre el cilindro y la parafina.

La elección del diámetro del tubo es siempre una cuestión delicada. Los diámetros grandes enca-

recen excesivamente el sondeo, pero dan mayor seguridad, ya que la zona de suelo próxima a las paredes siempre se altera, y sólo un diámetro grande permite seleccionar un núcleo al que no haya llegado esta perturbación. También hay que tener en cuenta el tamaño de las mayores partículas del suelo, y de manera muy especial, las dimensiones de los aparatos en los que han de ser ensayadas las muestras. En la práctica usual encontramos como corrientes diámetros de las muestras comprendidos entre 10 y 15 cm.

La longitud de la muestra ha de ser también bastante grande, entre tres y cinco veces el diámetro, escogiendo preferentemente el último de esos dos valores si se emplea el procedimiento de extracción que hemos indicado, ya que el suelo se sostiene dentro del tubo exclusivamente por rozamiento con las paredes, y podría caer si la longitud fuera insuficiente. Hay suelos que caen, a pesar de todo, y es preciso recurrir a los aparatos a que antes nos hemos referido, que producen un vacío en la cara superior de la muestra, bien por el movimiento de un émbolo, bien por una bomba auxiliar que actúa desde la superficie. El aparato ideado por Casagrande lleva este último dispositivo, y en cambio prescinde de la colaboración del rozamiento de la muestra con las paredes, pues lleva acoplado en su borde inferior un anillo cortante, cuyo diámetro interior es dos milímetros menor que el del tubo. La muestra de suelo, pues, entra dentro de este último con un juego lateral de un milímetro, con lo cual se anula el rozamiento.

Antes de proceder a la toma de una muestra, es preciso limpiar bien el fondo del agujero para que no quede fango flúido ni suelo procedente de desprendimiento de capas superiores. Debe agotarse, en general, el agua, si la hay, aunque existen suelos en los que, contrariamente, debe conservarse el agujero del sondeo con cierta carga de agua, para evitar que la corriente producida por el desnivel hidrostático origine deslavado y alteraciones en la estructura. No deben tomarse muestras inmediatamente después de una larga interrupción del trabajo; por ejemplo, al comenzar la jornada, pues la capa superficial, es decir, el fondo del taladro, estará alterada.

En casos difíciles, o cuando alguna circunstancia particular lo aconseje, pueden tomarse las muestras por medio de pozos o zanjas; pero es preciso precaverse contra la aparente seguridad de este método. La ejecución de los pozos o zanjas produce mayor alteración en el terreno que los sondeos, le permiten entumecerse, lo exponen a la helada, si hay ocasión para ello, y a veces ocasionan el deslavado de las partículas finas, si hay agua freática y se recurre a agotamientos.

La profundidad de los sondeos debe ser determinada en cada caso, previendo los cálculos que luego se han de hacer para determinar la estabilidad y asientos de la obra. Sin embargo, como a veces es difícil hacer esta estimación *a priori*, en Alemania se dan las siguientes cifras como norma previa:

a) Para obras cuya planta se aproxime a un cuadrado (razón de los lados menor que un medio).

En obras con 1 Kg./cm.^{2} de presión media sobre el terreno, el 80 por 100 del diámetro medio de la planta.

En obras con 2 Kg./cm.^{2} de presión media, el 160 por 100.

En obras con 3 Kg./cm.^{2} de presión media, el 240 por 100.

b) En obras de planta alargada (razón de los lados menor que un medio):

En obras con 1 Kg./cm.^{2} de presión media sobre el terreno, el 100 por 100 de dimensión transversal (es decir, la menor) de la obra.

En obras con 2 Kg./cm.^{2} de presión media, el 200 por 100.

En obras con 3 Kg./cm.^{2}, el 300 por 100.

Tanto en el caso *a*) como en el *b*), se considera como presión media el peso total del edificio, dividido por la superficie total de la planta. Solamente en cimentaciones que consten de elementos totalmente independientes, como pilas de puentes, zapatas de pilares, etc., cuya separación sea mayor del quíntuplo de su diámetro, se toma como dimensión media o menor y como presión media, la correspondiente al elemento.

Los sondeos han de proseguir a mayor profundidad que la indicada cuando hay posibilidad de encontrar capas de muy pequeña o nula resistencia, como capas de fango flúido, cavernas (en terrenos calizos) o estratos de yeso, sales sódicas o potásicas, que pueden haber sido o llegar a ser lavados.

En cuanto a los puntos donde deben tomarse muestras inalteradas, es fundamental el que se tome, por lo menos, una muestra de cada una de las capas que se encuentren. Solamente en aquellas en las que, después de repetidos intentos, no pueda lograrse la toma, se tomarán muestras alteradas en sacos de lona numerados.

Cuando una capa tiene una potencia mayor de 1,50 m., debe tomarse otra muestra en la mitad inferior, y en las capas de más de 3 m. de espesor, deben tomarse muestras, al menos, cada 2 m.

Los laboratorios españoles de Mecánica del Suelo.

La aportación española a la Mecánica del Suelo no es considerable, pero ello no debe deprimirnos. España es un país rocoso, y las dificultades debidas a la mala calidad del terreno se presentan con menor frecuencia y gravedad que en otros países que se asientan, en gran parte de su extensión, sobre sedimentos marinos recientes o derrubios glaciáricos.

Era, pues, justo que dejásemos a estos países abrir la marcha en el ataque a estos problemas.

No nos encontramos, por otra parte, tan atrasados como algunos creen. En primer lugar, porque los laboratorios no son, y ya lo indicamos en nuestro primer artículo, el refugio de elección para el cultivo de la Mecánica del Suelo, sino que ésta precisa, con mayor intensidad todavía, actuar en la Naturaleza, y, en este aspecto, se han hecho ya muchas cosas en España. Se han calculado algunas obras con arreglo a las nuevas teorías y se han hecho observaciones sobre otras muchas. Es evidente que, del estudio del terreno en su estado natural, surge como consecuencia el deseo de someterlo al método experimental, y de aquí la necesidad del laboratorio. Pero, puesto que éste es consecuencia y no causa, no debe extrañarnos que aparezca con algo de retraso, ni debemos creer que venga a ser una revelación, antes de la cual no había nada.

En España, que sepamos, existen tres laboratorios en los que puede hacerse, de manera más o menos completa, estudios sobre Mecánica del Suelo. Cronológicamente, es el primero el del Instituto Español de Edafología, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, dirigido por el sabio investigador Dr. Albareda Herrera, en el cual se llevan a cabo, desde hace varios años, análisis granulométricos y determinaciones de límites de Atterberg, sin contar otras muchas e importantes investigaciones no tan directamente relacionadas con la Mecánica del Suelo, lo cual no quiere decir que no sean de utilidad para ella. Citemos las que se llevan a cabo sobre la materia coloidal del suelo, los análisis completos de arcillas, que aclaran su formación y constitución, y las preparaciones micrográficas para el estudio de los suelos en láminas delgadas, por el método del profesor vienés Dr. Walter Kubiëna, que proporciona a la Edafología la misma inapreciable ayuda que prestan las preparaciones de rocas a la Petrografía.

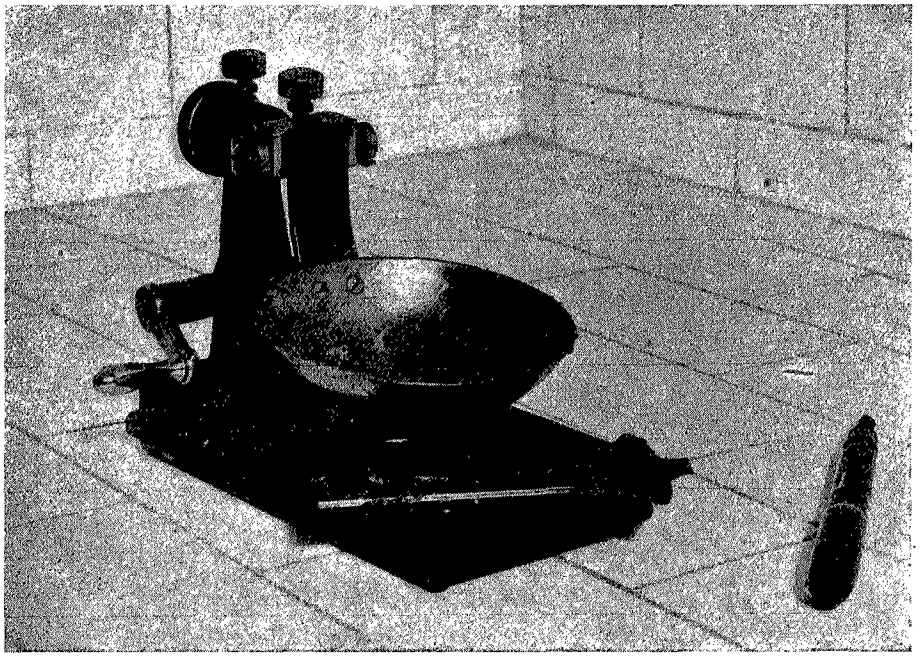

Fig. 22. — Cuchara para la determinación del límite líquido, con acanalador tipo europeo.

Este Instituto, además, cuenta ya con una considerable colección de suelos de todas las regiones de España y de Marruecos, y con un archivo en el que se recogen los datos de muchos centenares de suelos estudiados.

La figura 22 representa la cuchara empleada en este Instituto para la determinación del límite líquido, construída por el Instituto Torres Quevedo, también del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

El Laboratorio Central para Ensayo de Materiales de Construcción, dirigido por D. Eduardo Torroja, entre sus modernas instalaciones, que son orgullo de nuestro Cuerpo, cuenta con una sala de Geotecnia. Dispone de tres edómetros de un tipo moderno, que permiten introducir fácilmente las muestras inalteradas, y tres aparatos de corte del tipo de torsión en probeta anular. Pueden efectuarse en ella determinaciones de límites de Atterberg y llevarse a cabo

análisis granulométricos. Para estos últimos tiene dispuesta una tubería de tubos según el método de Wiegner. Consiste éste en introducir la mezcla suelo-agua en un tubo ancho, comunicado con otro lateral, estrecho. La diferencia de nivel entre ambos nos indica las variaciones de la densidad de la mezcla suelo-agua, y, por lo tanto, la marcha de la sedimentación.

También posee un aparato de carga sobre el terreno, para su empleo *in situ*, de bastante potencia, y que, a pesar de ello, por medio de un adecuado despiezo, puede transportarse fácilmente.

Finalmente, en los locales de nuestra Escuela, antes ocupados por el Laboratorio Central, ha terminado de instalarse, recientemente, el Laboratorio de Caminos, dirigido por el profesor de la asignatura don José Luis Escario. Una de las salas, al proyecto de cuyos aparatos y montaje hemos colaborado activamente, está dedicado casi por completo al ensayo de tierras y estudio de firmes de tierra estabilizada. La figura 23 muestra una vista del conjunto de la sala. En primer término, una prensa de 50 Tn. y su motobomba. En la prensa está colocado el aparato de Watts para el estudio de la plasticidad de las mezclas tierra-betún. La figura 24 muestra unas probetas en las que está llevándose a cabo el análisis granulométrico, por el método del densímetro. Al fondo, el agitador empleado para la dispersión del suelo.

Se dispone en este laboratorio de una bancada de tres edómetros y otra con tres aparatos de corte, del tipo de traslación, combinado este último con la motobomba de la prensa, para la producción del esfuerzo horizontal (figs. 25 y 26, respectivamente). En la figura 27 se ve un edómetro (1) desarmado, y en la 28 un aparato de corte.

En la figura 29 aparece la llamada aguja de Proctor, que no es, en realidad, más que un pequeño penetrómetro portátil, apto para examinar las capas superficiales del suelo, y, sobre todo, para apreciar el estado de consolidación de capas de tierra apisonada, bien sea en la construcción de terraplenes consolidados artificialmente o en la de firmes de tierra estabilizada.

(1) Hemos sido interrogados repetidas veces sobre el origen de la palabra *edómetro*. Procede de *oídos*, que quiere decir entumecimiento, hinchazón. Este aparato fué concebido primeramente por su autor para estudiar el entumecimiento de las arcillas expansivas. La raíz es la misma que la de la palabra *edema*.

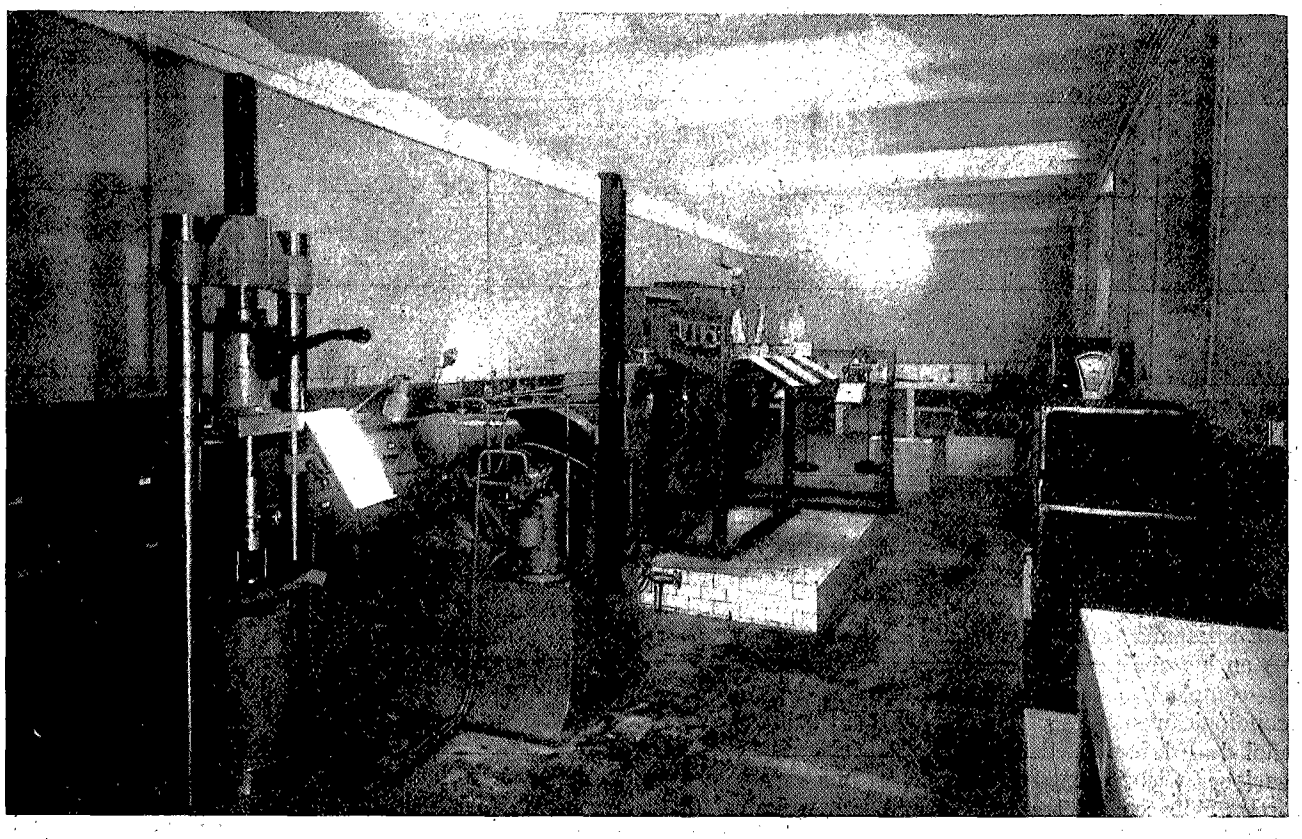

Fig. 23. — Sala de ensayo de tierras del Laboratorio de Caminos.

En primer término, a la izquierda, prensa de 50 Tn., en la cual está colocado el aparato Watts, para ensayo de la plasticidad de las mezclas tierra-betún. A continuación, y en fila, motobomba, bancada con tres aparatos de corte, y, transversalmente, bancada de edómetros.

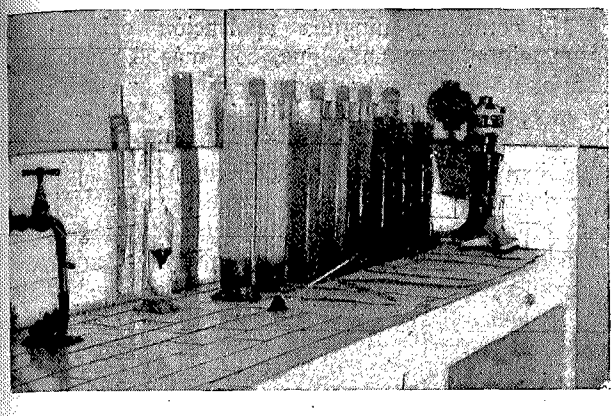

Fig. 24. — Análisis granulométrico por el método del densímetro.

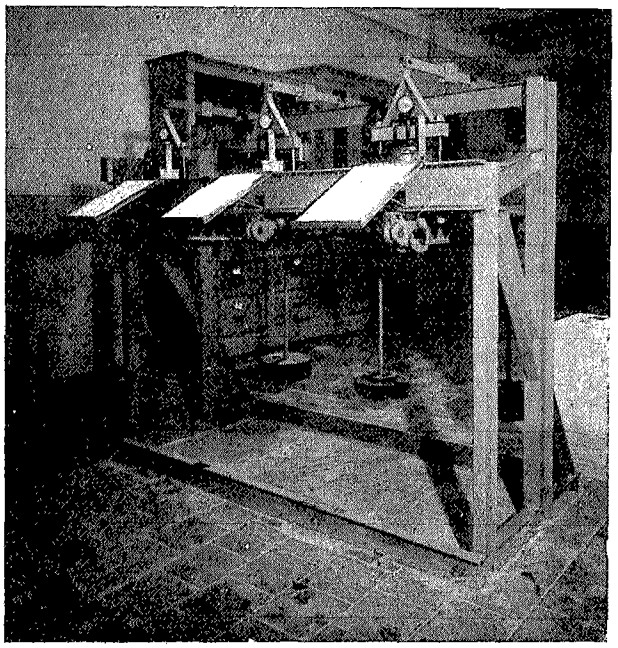

Fig. 25. — Bancada de edómetros.

En la figura 30 tenemos un pequeño, pero preciso, aparato de carga sobre el terreno. Excepto el trípode y las pesas, todo él puede desarmarse y guardarse en el estuche que se ve detrás. Todo el dispositivo puede transportarse fácilmente en un coche de turismo o a lomo de una caballería.

La placa de carga tiene solamente 20 cm. cuadrados. Esto trae dos inconvenientes: la pequeñez de los asientos que se producen y la pequeña profundidad de la zona afectada por el ensayo.

La primera se ha obviado, utilizando para la medida cuadrantes que aprecian la milésima de milímetro. Aunque para alejar el punto de referencia suficientemente de la placa de carga, para que no resultara afectado por las deformaciones, ha sido necesario disponer un juego de palancas que desmultiplica los movimientos de la placa de carga a la décima parte, los asientos se miden finalmente con la precisión de la centésima de milímetro, que es más que suficiente.

En cuanto al segundo inconveniente, no es de importancia dado la especialidad del laboratorio. Las

Fig. 26. — Bancada de aparatos de ensayo de resistencia al corte.

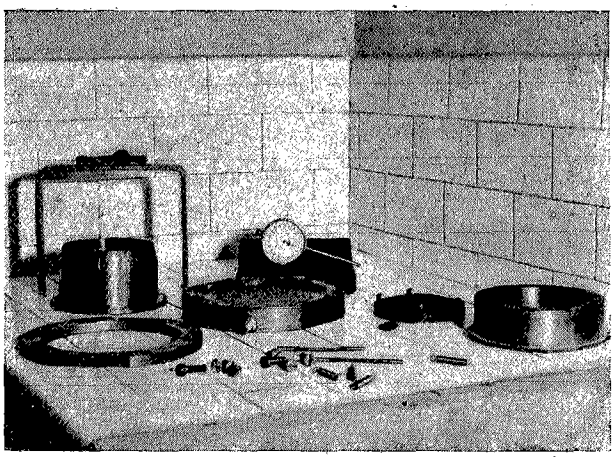

Fig. 27. — Edómetro.

cargas producidas por los vehículos se ejercen también sobre áreas reducidas, y, por lo tanto, afectan también a profundidades pequeñas. Por otra parte, el aparato es tan manejable que, si en algún caso se requiere, podrán hacerse perfectamente medidas en el interior de un pozo.

Hay que hacer notar que todos los aparatos de ensayo de tierras de este Laboratorio han sido construídos en España, si se exceptúan los cuadrantes de medida, y que también aquí se han dibujado sus planos, si bien inspirándose en aparatos clásicos empleados en el extranjero, pero siempre con modificaciones aconsejadas por la experiencia.

* * *

Toca a su fin esta corta serie de artículos, que quizá haya resultado larga para la paciencia del lector. No han sido nada parecido a una pequeña exposición sistemática de la Mecánica del Suelo, ni siquiera de su parte experimental.

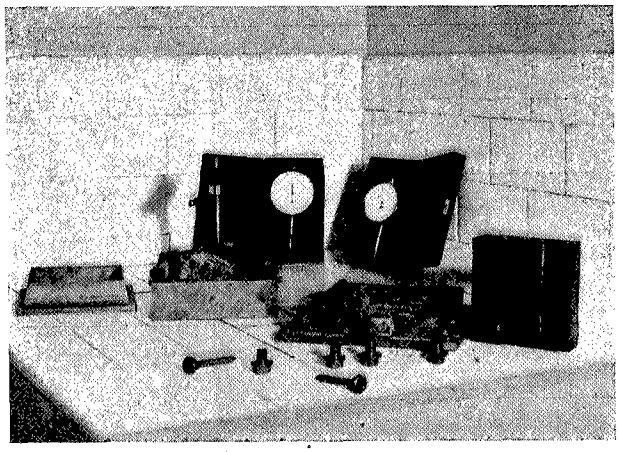

Fig. 28. — Aparato de ensayo de resistencia al corte.

No contienen ninguna aportación original del autor, ni tampoco nada que, con más o menos paciencia, no pueda encontrarse en libros y revistas, si se exceptúa algún modesto juicio de detalle. Pero nos sentiríamos fracasados si, quien los leyera, no percibiera a su través esa inquietud por los problemas que el terreno plantea, y que hoy se siente en todo el mundo. Desde muy diversos campos — biología, física, química, coloidequímica, ingeniería — se avanza hoy en el conocimiento del suelo, y la Edafología general recoge y sintetiza todas estas investigaciones, constituyéndose en Ciencia natural, in-

Fig. 29. — Aguja de Proctor.

dependiente, aunque no desligada, de las aplicaciones, igual que lo es, por ejemplo, la Geología. Se extiende una "conciencia edáfica" que es un camino más que se abre para el mejor entendimiento de la naturaleza, para disfrutar, con minuciosidad de conocedor, de la maestras pinceladas que la mano de Dios, manejando el pincel de las fuerzas cósmicas, ha colocado hasta en el más insignificante relieve del terreno.

La Técnica pudo ser, como algunos dicen, la organización del hombre para la lucha con la Naturaleza, pero hoy depone las armas y busca una fecunda colaboración. Inútil lucha era aquélla, y destinada a la derrota, ya que nosotros pasamos y la Naturaleza queda. Se cuentan como heróicas las luchas que la voluntad del hombre ha sido capaz de prose-

guir durante centenares de años. Al final, la Naturaleza vence siempre, pues podría proseguirla durante plazos de tiempo millares de veces más largos.

La obra de ingeniería no es más que un accidente del terreno. Una insignificante rugosidad, al lado de las masas montañosas, y si éstas son atacadas y derruídas, ¿qué probabilidad tendrá ella de subsistir? Las magníficas construcciones de la antigüedad cayeron en cuanto dejaron de recibir la constante ayuda del hombre, y hoy no son más que carcomidas ruinas. Las grandes estructuras metálicas, de que tan pródigo y orgulloso se mostró el pasado siglo, han tenido que ser desmontadas en un plazo que hubiera sido breve, en ocasiones, hasta para una vida humana, a pesar de los continuos cuidados para protegerlos de la oxidación.

No pretendamos, pues, ver en la Mecánica del Suelo un instrumento que nos va a permitir doblegar el terreno a nuestro capricho. Nos dará una mejor comprensión de sus condiciones, nos evitará errores y nos permitirá, con el conocimiento adquirido, proyectar la obra de tal forma que, sin violencias que las fuerzas naturales serían prontas en reprimir, se integre en el conjunto natural que la rodea, y, una vez hecho esto, contemplar sin inquietud cómo su substancia mineral se incorpora al ciclo común de destrucción e igualación, sintiéndonos colaboradores — y no forzadores — de la Creación, que es la mejor suerte que al ingeniero le puede caber.

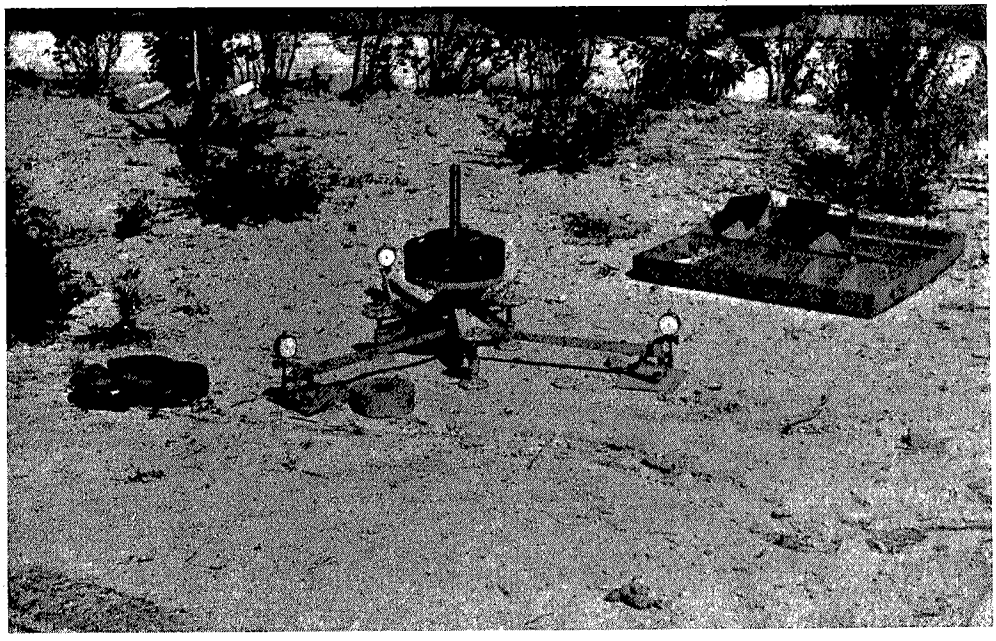

Fig. 30. — Aparato portátil de carga sobre el terreno.

Bibliografía.

Exhibir una nutrida bibliografía sobre Mecánica del Suelo, es tarea fácil y hasta es posible que brillante. El interés que estos problemas despiertan en la actualidad, provoca en el extranjero un verdadero alud de libros y artículos, cuyo examen permite comprobar que sus autores, a veces, tenían efectivamente algo que decir, y basta hojear ligeramente los índices de algunas revistas, para reunir algunos centenares de referencias. Pero, destinados estos artículos a quienes, aunque con más ciencia y experiencia que el autor, no han parado su atención, en medio de la tarea diaria, en el crecimiento de esta rama de la Mecánica aplicada, creemos improcedente el alarde, y preferible indicar las fuentes con las que pueden recuperar fácilmente, si estas cuestiones han llegado a interesarles, el tiempo perdido.

Comenzando por España, merecen el primer lugar, por cronología y amplitud de plan, los apuntes de la clase de Cimientos que explica D. José Entrecanales en la Escuela de Ingenieros de Caminos. Editados en multicopista en 1936, han sido objeto recientemente de una reedición, que se ha aprovechado para completarlos con la exposición de numerosos avances realizados en el intervalo. La obra del mismo autor *Aplicación de métodos de comprobación de estabilidad de taludes de tierras coherentes* (1), es una excelente re-

(1) Editorial REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, 1941.

copilación y examen crítico de las diferentes teorías desarrolladas sobre ese problema concreto.

La obra *Repartición de presiones sobre el terreno de cimentación,* del Dr. O. K. Fröhlich (1) es, en nuestra opinión, fundamental para quien desee iniciarse sólidamente en estos estudios. Hemos oído de él, en España, opiniones desfavorables sobre su utilidad; pero es que precisa darse cuenta de que existen muchos libros muy útiles, con el inconveniente de que es menester *leerlos,* y el libro de Fröhlich, como cualquier libro serio que trate sobre Mecánica del Suelo, dado el actual estado de estos estudios, no es un formulario. Algo lo recuerda, con todo, y en especial al tratar del criterio de la carga crítica en el borde, y precisamente por ello lo consideramos merecedor de algún reparo.

El libro *Caminos* (2), de D. José Luis Escario, contiene, distribuídas en su texto, numerosas indicaciones que sirven para formar criterio de la enorme importancia que para la construcción y conservación de los caminos tienen las circunstancias del terreno. Además de esa información difusa, utilísima porque puede servir para dar nacimiento a esa "preocupación edáfica" a que antes nos referíamos, dedica en sus capítulos XI ("Construcción de la explanación") y XVI ("Firmes económicos") considerable espacio al estudio de los terrenos, con un amplio criterio físico —más necesario aún en la ingeniería de las vías de comunicación que en el estudio de otros problemas, según indicamos en nuestro primer artículo— y al proyecto y ejecución de los modernos firmes de tierra estabilizada.

En la nueva edición del libro de los Sres. Gómez Navarro y Juan Aracil (3), podemos encontrar en el segundo tomo, capítulos XXXIV, XLVIII y LIII, que tratan, respectivamente, de las presas de tierra, los materiales para su construcción y los métodos para el cálculo de su estabilidad, un documentadísimo resumen de técnicas y teorías esenciales en el examen de los problemas que nos ocupan.

Finalmente citaremos *El Suelo,* de J. M. Albareda (4), excelente obra de Edafología general, por medio de la cual puede adquirirse una completa visión de totalidad sobre los complejos procesos que originan la formación del suelo y de las causas de sus propiedades observables. En particular, son útiles para el ingeniero los capítulos IV, XII y XIV. El primero trata del suelo como sistema disperso, en el que expone su estado de subdivisión y las consecuencias que él trae. Además, explica con todo detalle la técnica del método internacional para el análisis granulométrico. En el segundo trata de las relaciones entre el suelo y el agua, que, como hemos visto a lo largo de toda esta pequeña serie de artículos, son determinantes de sus más importantes cualidades mecánicas, y del tercero, "Propiedades físicas del suelo", es suficiente enunciar el título para dar idea de su interés.

De libros extranjeros hemos citado ya el de Fröhlich entre los españoles, ya que si hemos hecho una separación, ha sido para distinguir entre libros fáciles y difíciles de adquirir y no como reivindicación de aportaciones patrias, y así el libro citado queda incluído entre los primeros.

También hemos indicado en nuestro primer artículo la *Erdbaumechanik,* de Terzaghi, libro que fué, y a mi entender sigue siendo, precursor, pues creo que en sus páginas yacen todavía indicaciones susceptibles de gran desarrollo, pero que no es apropiado para una iniciación. En primer lugar, expone a perder inútilmente el tiempo discurriendo sobre problemas allí planteados, que hoy ya han sido resueltos o superados y en segundo, por razón de estilo, es de lectura trabajosa, aun con un perfecto dominio del idioma, y esto puede conducir a un prematuro desánimo.

Mucho más adecuado es el libro de Brennecke (1), que es muy completo, claro y sistemático. Recoge todas las novedades hasta el año de su edición, ya que está totalmente reformado respecto a las anteriores, hasta constituir una nueva obra en la parte que a estudio de los terrenos se refiere.

La Memoria de Hvorslev "Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden" (2), trata de una investigación llevada a cabo por su autor en el laboratorio de Viena, en el curso de la cual ideó el aparato de ensayo de la resistencia al corte que lleva su nombre, pero, aparte de esto, trae una primera parte en la que examina varios ensayos de laboratorio, con una riqueza de detalles de la técnica que no hemos encontrado en ninguna otra publicación.

El libro de Kögler y Scheidig, *Baugrund und Bauwerk* (3), es interesante y de fácil lectura.

El de Cestelli Guidi, *Meccanica dei terreni,* que nunca hemos leído detenidamente, nos ha parecido provenir, casi por completo, de la traducción, deficiente, de retazos de las obras alemanas que hemos citado. Puede ser útil para quienes encuentren dificultad en leerlas en su idioma original.

---

(1) Viena, Springer, 1934. Excelente traducción española de nuestro compañero Manuel Carrasco Arroyo, enriquecida con un artículo de Steinbrenner, editada por la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS en 1942.

(2) Madrid, 1943.

(3) *Saltos de agua y Presas de embalse,* 2.ª edición, Madrid, 1945.

(4) Madrid. Ed. Saeta. 1940.

---

(1) Brennecke-Lohmeyer: *Der Grundbau,* 5.ª ed., primer tomo, primera parte. Berlín, Ernst und Sohn, 1938. Solamente esta edición es interesante desde el punto de vista que consideramos.

(2) Copenhague, 1937.

(3) Berlín. Ernst und Sohn, 1939, 2.ª edición, poco diferente de la primera.

Sobre la consolidación de capas de arcilla, han publicado Terzaghi y Fröhlich una importante obra (1), en la que hay que prevenirse, si acaso, contra el excesivo aparato matemático, que hace olvidar, a veces, la simplificación de las hipótesis de partida y la incertidumbre de los datos experimentales.

En la monumental obra dirigida por Blanck (2), son en especial interesantes el tomo VI, dedicado a las propiedades físicas del suelo; el último, con un capítulo dedicado precisamente a las aplicaciones del conocimiento del suelo en la construcción, y el apéndice, destinado a poner al día la obra, en el capítulo en que vuelve a tratar de física del suelo. En todos estos lugares se encuentra la máxima información característica de la obra, la cual es poco conocida de los ingenieros, alejados de ella por su carácter de enciclopedia de Edafología general.

Sobre el análisis granulométrico por el método del densímetro, ha realizado Casagrande (Arthur) un estudio que agota el tema y que le ha valido el que el método se designe corrientemente por su nombre, apartando al de su creador, Bouyoucos. Los resultados del estudio se encuentran en un folleto (3), donde puede hallarse hasta el último detalle de la técnica operatoria, y donde, por cierto, consta con toda claridad la atribución de la paternidad del método a Bouyoucos. De aquí que la corriente denominación con el nombre de Casagrande sea espontáneo reconocimiento de méritos, sin sombra de suplantación.

(1) *Theorie der Setzung von Tonschichten.* Leipzig und Wien, Deuticke, 1936. Existe una edición francesa, quizá más fácil de procurarse ahora, de Dunod, París, 1939. La traducción es de tan escrupulosa fidelidad que ha conservado hasta las erratas de imprenta en las fórmulas...

(2) *Handbuch der Bodenlehre.* Publicación dirigida por Blanck, Edwin. Berlín, Springer. 12 volúmenes, más un apéndice.

(3) *Die Aräometer Methode zur Bestimmung der Kornverteilung von Böden.* Berlín, Springer, 1934.

Artículos muy valiosos pueden encontrarse en los *Proceedings* del I Congreso de Mecánica del Suelo, Harvard, 1936. Consta de tres tomos, y muchas de las comunicaciones son resumen de trabajos más extensos que no han llegado, por dificultades de comunicación, a nuestras manos. Quizá puedan producir alguna desorientación en quien no está documentado en estos problemas, pues su carácter de resumen les hace omitir, con frecuencia, fundamentos y referencias que se estiman ya conocidas. También puede ocasionar confusión la diversidad de temas y el modo de tratarlos, y el fárrago, común a todos los Congresos, de aportaciones formularias.

En estos últimos días, después de escritos los dos primeros artículos de esta serie, hemos conseguido un ejemplar del libro de Buisson (1), que habíamos visto citado varias veces en revistas.

No hemos tenido todavía tiempo de estudiarlo, pero en una primera lectura nos ha parecido excelente, sistemático y con aportaciones propias del autor, de mayor o menor interés, en casi todos los temas tratados, aunque no todas inéditas, pero que era preciso rebuscar en revistas.

Finalmente, si el lector desea algo más que esta breve lista de títulos, puede recurrir a la obra de H. Petermann (2), en la que encontrará cerca de dos mil quinientas referencias. El mismo autor continuó su tarea bibliográfica, y en 1942 tenía preparada una nueva obra con un número todavía mayor de referencias, distintas de las de la anterior, que no llegó a publicarse por dificultades materiales.

(Instituto Español de Edafología y Laboratorio de Caminos. Agosto de 1945.)

(1) M. Buisson: *Caracteristiques physiques et mécaniques des sols.* París, Dunod, 1942.

(2) *Schrifttum über Bodenmechanik.* Ed. Volk und Reich. Berlín, 1937.