

NOTAS SOBRE MECANICA DEL SUELO

Por JOSÉ A. JIMÉNEZ SALAS, Ingeniero de Caminos.

Comisionado el autor en Alemania, durante los años 1942-43, para el estudio de la Mecánica del Suelo, resume en este trabajo los orígenes y orientaciones de esta joven rama de la Mecánica aplicada, exponiendo, asimismo, su criterio personal sobre tan interesante tema.

I

Mecánica del suelo, Geomecánica, Geotecnia, Edafomecánica, son expresiones que, con sentido equivalente, se han incorporado desde hace pocos años al lenguaje del Ingeniero, demostrando con su uso una creciente preocupación del técnico constructor por los problemas que el suelo, común sustento de él y de sus obras, encierra.

¿De cuándo arranca esta preocupación? Es frecuente, al tratar de estos asuntos, el encontrar opiniones escépticas y hasta despectivas, amparadas en el argumento positivo de mostrar las obras construídas sin el auxilio de las teorías de la nueva rama de la Ciencia. Sin entrar a examinar el valor intrínseco del argumento, encontramos que es falso.

Karl von Terzaghi, Ingeniero a quien la Mecánica del suelo debe grandes aportaciones prácticas y teóricas, relataba en su discurso inaugural de la primera Conferencia Internacional de Mecánica del Suelo, celebrada en Harvard en 1936, que había revuelto libros, memorias y boletines antiguos, para averiguar cómo se había ido formando el cuerpo de doctrina sobre el comportamiento de los terrenos que imperaba en los tratados de los años anteriores a la primera guerra mundial.

Hacia 1880, dice, se observa un rápido declive de la capacidad de cuidadosa observación. Antes de esa fecha se encuentra un número inesperado de interesantes observaciones en el campo, publicadas por Ingenieros, algunas de ellas verdaderas obras maestras que pueden rendir enseñanzas hasta en la actualidad. Sin embargo, a partir del año ochenta del siglo, el interés por observar la naturaleza se desvanece, salvo excepciones. Me inclino, sigue diciendo, a explicar esta desgana por la confianza creciente, producida por la inercia de la mentalidad humana, en las teorías que se refieren al comportamiento de los terrenos.

Hubo, por lo tanto, hombres que investigaron estos problemas: Coulomb (1773), Poncelet (1840), Rankine (1856), Culmann (1866), Considère (1870), Mohr (1871), Lévy (1873), Boussinesq (1876) y muchos otros, construyeron con sus investigaciones una

Mecánica del Suelo, aunque no la llamaran así. Los que les siguieron se dedicaron a vivir de lo que aquellos ilustres hombres de ciencia les legaron, y las aportaciones posteriores son esporádicas.

Pero había un peligro fundamental: los constructores de la teoría miraban a la Naturaleza, y sabían, al dar a la imprenta sus obras, que no eran más que primeras aproximaciones que no llegaban a cobrar sentido más que dentro de ciertos límites, que comprenden casos hipotéticos que jamás se presentan puros en la realidad. Pero conducían a sencillas fórmulas de fácil aplicación. Pasaron al libro y al texto, y cada vez más alejadas de las memorias originales, se convirtieron en artículo de fe que se aprendía en la Escuela, y cuya mejor demostración estaba en la creencia común.

Si las estructuras proyectadas a partir de ellas se sostenían, era algo tan natural que no había por qué mencionarlo. Si se hundían, era una fatalidad inexplicable que convenía ocultar, pues podría suponerse que el autor del proyecto no estaba al tanto de las teorías.

No faltaban, claro es, quienes veían las discrepancias con la realidad, pero preferían abandonar las fórmulas y utilizar su experiencia directa, sin aportar materiales utilizables para la generalidad.

Hacia 1912, la situación llegó a un período de crisis, bien acusada por el hecho de que el cambio de rumbo se hizo simultáneamente y sin acuerdo previo en varios países a la vez. En América, grandes corrimientos durante la construcción del Canal de Panamá, alguna ruptura de presas de tierra, y los alarmantes asientos de algunos edificios públicos, condujeron a la formación en el seno de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, el 7 de enero de 1913, del "Comité especial para codificar las prácticas actuales sobre poder portante de los suelos de cimentación y para informar sobre las características físicas de los suelos en relación con las estructuras de ingeniería", título que fué abreviado enseguida por el uso, convirtiéndose en el de "American Foundation Committee", que es el que ostentó en lo sucesivo.

En Suecia, casi simultáneamente, ocurrieron va-

rios corrimientos en desmontes de ferrocarriles, con resultados catastróficos tanto en pérdidas económicas como en desgracias personales, a raíz de los cuales se nombró, en diciembre del mismo año de 1913, la "Comisión para la investigación geotécnica de los corrimientos de tierras en los Reales ferrocarriles suecos".

Los trabajos del Comité americano comenzaron en forma de encuesta, y fueron de una gran utilidad, al reunir una ingente documentación de casos prácticos, pero carecieron, durante la primera época, del anhelo fundamentalista que induce a buscar la ley que rige el cúmulo de datos. Demostró, por otra parte, cómo en muchos casos la elección de cargas admisibles, tal como se hacía en aquel entonces, era completamente caprichosa, y la trivialidad de las observaciones usuales sobre las obras ejecutadas.

La Comisión sueca eligió otro camino. Comenzó a trabajar por cuenta propia, observando e investigando directamente sobre las propiedades de los terrenos, así como la correlación entre los hechos acaecidos y los que pudieran haberse previsto según las teorías clásicas, y así, junto a una gran labor de aplicación práctica — pues seleccionó y estudió a lo largo de ocho años de trabajo trescientos perfiles de terrenos estimados peligrosos, y preconizó obras de consolidación y defensa en una longitud total de cincuenta y seis kilómetros de vía —, planteó una serie de problemas y estableció unas orientaciones para atacarlos que hacen que sea considerada como la fundadora de la nueva escuela, aunque sea cronológicamente posterior al Comité americano.

Por aquellos años, el Ingeniero Karl von Terzaghi, que había tenido ocasión de comprobar en la práctica profesional, en Austria, Transilvania y Rusia, las lagunas de la teoría, andaba buscando una nueva dirección más cercana a la realidad. Intentó primero apoyarse en la Geología, pero comprendió pronto que la definición geológica de un terreno ha de ser completada por otros datos que determinen más detalladamente sus características. La Ciencia del Suelo o Edafología empezaba en aquella época, habiendo partido del campo de la agronomía, a erigirse en ciencia natural independiente, aunque no aislada, de las aplicaciones prácticas. La aportación de los sabios rusos fué una de las más importantes, y sin duda el ejemplo influyó en Terzaghi, y le indujo a emplear el método experimental, a partir de los fenómenos elementales. En 1917 comienza, con limitados medios, a llevar a cabo algunos ensayos en el Colegio americano de Constantinopla, y en 1925 publica en Viena su *Erdbaummechanik*, primer tratado sistemático sobre Mecánica del Suelo, fundando poco después el primer laboratorio en la Escuela Técnica Superior de la misma ciudad.

La historia de la Mecánica del Suelo muestra después una marcha segura y rápida hacia una difu-

sión cada vez más extensa y una penetración más profunda. En 1943 existían, sólo en Alemania, los siguientes laboratorios: el de Viena, algo anticuado de instalaciones, pero muy rico en experiencia y documentación; dos, magníficos, en Berlín: el Preussische Versuchsanstalt y el de la Deutsche Gesellschaft für Bodenmechanik; el de Dresde; el de Munich, modernísimo; los de Dantzig y Darmstadt, además de los de Hannover, Hamburgo y Karlsruhe, que habían sido, ya en aquellas fechas, dañados por los ataques aéreos.

La utilidad de las investigaciones realizadas viene así demostrada por la proliferación de los centros que a ellas se dedican, sobre todo si se tiene en cuenta que ha venido a complicar la tarea diaria del Ingeniero; es decir, a chocar contra la rutina y la pereza inherente a la naturaleza humana, ya que los resultados de su aplicación a cualquier caso concreto son más complicados de obtener y aplicar que las de las teorías clásicas.

Pero una rápida revista a algunos de los proble-

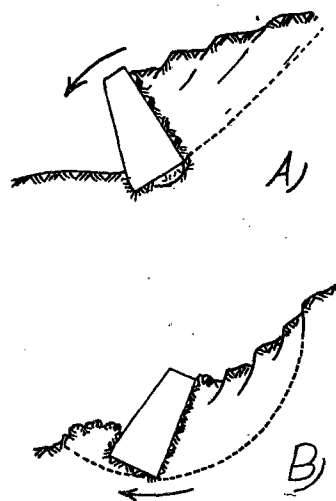


Figura 1.ª

De la teoría clásica de empuje de tierras se deduce que el vuelco de un muro de sostenimiento, caso de producirse, habrá de ser como en A se indica. La observación directa, sin embargo, señala como más corriente la forma B de ruptura de equilibrio, con formación de una superficie de deslizamiento profunda, de forma aproximadamente cilíndrica de revolución.

mas atacados puede llevarnos de otra manera al mismo convencimiento. La teoría clásica estudia la estabilidad al vuelco de los muros de sostenimiento, suponiendo que tienden a caerse, como la figura 1.ª, A, indica. La Comisión sueca observó desde el principio, y cualquiera puede hacer lo propio, que muchos muros se caen, como la figura 1.ª, B, muestra, y su presidente, Fellenius, elaboró un método para el estudio de ese tipo de ruptura, que tiene también amplia aplicación en el estudio de corrimientos de tie-

rras (1) — excluyendo los debidos a estratificación —, que toman la forma de la figura 2.^a.

En cimentaciones, el camino recorrido ha sido enorme. En los libros tan sólo de hace veinte años, encontramos listas de cargas por centímetro cuadrado admisibles para cada caso de terreno: arenas flojas, margas compactas, arcilla seca, arcilla medianamente húmeda, etc. En la actualidad no se encuentran esas denominaciones, sustituidas por datos nu-

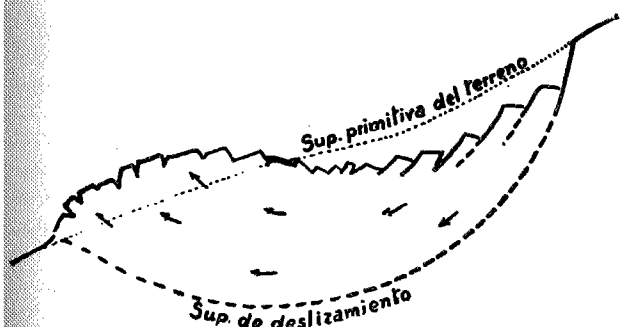


Figura 2.^a

También los corrimientos de tierras, excepto en casos en que existe estratificación aproximadamente paralela a la superficie del terreno, ocurren con formación de una superficie de deslizamiento cilíndrica.

méricos mucho más precisos e independientes del criterio del observador y, sobre todo, ha desaparecido el vago concepto de carga admisible, sustituido por algunos criterios que permiten fijar la distribución de cargas, teniendo en cuenta la forma y dimensiones de la superficie cargada y las características de la estructura que se apoya.

Si sobre una cierta superficie de terreno aplicamos cargas crecientes, llega un momento en el que se produce un hundimiento brusco. Evidentemente, ahí una carga que no se debe sobrepasar. Pero, en primer lugar, el hallar la carga por centímetro cuadrado correspondiente a la carga que ha ocasionado el hundimiento, y considerarla, previa aplicación de un coeficiente de seguridad, como admisible para otra superficie de forma y dimensiones distintas que la ensayada, constituye una generalización que queda injustificada en aquellos libros, y que la observación sólo comprueba entre ciertos límites.

Pero, además, toda carga aplicada sobre el terreno produce un asiento, y éste no debe ser mayor del que la estructura superpuesta pueda resistir, sin que las deformaciones producidas comprometan su estabilidad. Y este asiento también depende, no sólo de la carga por centímetro cuadrado aplicada sobre el terreno, sino de la forma y dimensiones de la su-

perficie de carga. La figura 3.^a, A (1), muestra los asientos producidos por una carga aplicada por medio de placas muy rígidas, cuadradas, sobre un cierto limo con 46 por 100 de arena, ligeramente calizo. Se aprecia claramente que el asiento aumenta para una misma carga unitaria con el tamaño de la placa, excepto para los tamaños muy pequeños, para los cuales se produce una especie de punzonamiento. La figura 3.^a, B (1), indica los asientos obtenidos en un determinado terreno, al aplicar cargas crecientes sobre una placa de carga y los producidos posteriormente en un edificio construido en el mismo lugar, cuya superficie cargada era, naturalmente, mucho mayor que la de la placa de carga.

El hecho, perfectamente claro y fácilmente com-

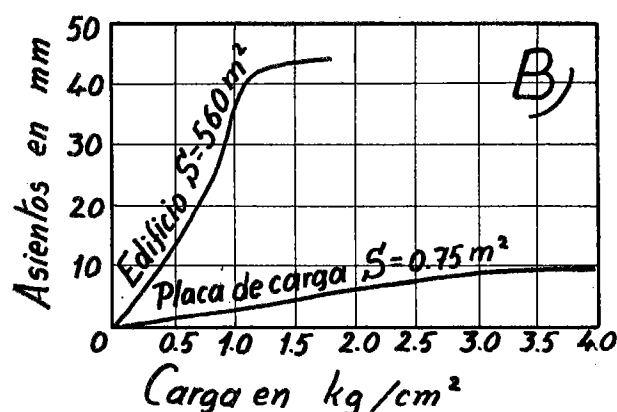
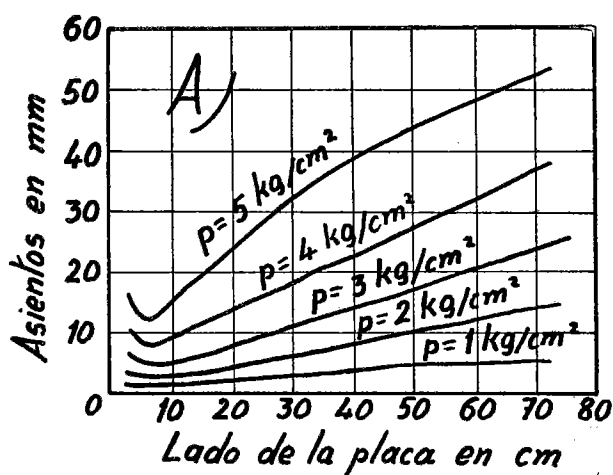


Figura 3.^a

Los asientos de un área cargada, de la superficie del terreno no depende solamente de la presión, sino también de la forma y dimensiones del área cargada. — A. Comparación de los asientos producidos por una misma presión aplicada en área cuadrada de distinto lado. — B. Comparación de los asientos observados en una prueba de carga con una pequeña placa, y los sufridos después por un edificio construido sobre el mismo lugar del ensayo. (Según Kögler y Scheidig).

(1) Entrecanales (José): *Aplicación de los métodos de comprobación de estabilidad de taludes en tierras coherentes*. (Ed. REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS.)

(1) De Kögler und Scheidig: *Baugrund und Bauwerk*, 2.^a edic. Berlín. Ernst und Sohn. 1939, págs. 116 y 117.

probable, se ignora en los libros clásicos. Para ellos, el problema es obtener un asiento muy pequeño, despreciable. Es un signo de debilidad del terreno del que se debe huir, sin pararse a medirlo. La Mecánica del Suelo considera el asiento como un fenómeno natural, como la flecha de una viga o la extensión de un tirante. Los mide, los prevé y estudia si son compatibles con la estructura proyectada. Y como ésta suele ser más afectada por las diferencias entre los asientos de sus diversas partes que por los asientos tomados en valor absoluto, en el caso de que dichas diferencias hubieran de producirse, juega con las variables libres, forma y dimensiones de la superficie de cimentación y profundidad a que se aplica la carga, hasta anularlas o reducirlas a valores aceptables.

Los pilotajes constituyen un tipo de cimentación que ha experimentado grandes transformaciones en su teoría y práctica. Era corriente la hinca de un pilote de prueba, que se cargaba hasta que se producía el hundimiento brusco, deduciendo de aquí una carga admisible y un asiento correspondiente a ella. Después se generalizaba el resultado obtenido, suponiendo que la resistencia total del pilotaje era igual a esa carga multiplicada por el número de pilotes, y que el asiento vendría a ser del orden del que experimen-

taba el pilote de prueba para esa carga. Ambas suposiciones son erróneas.

La carga resistida por un pilote es transmitida al terreno, en parte, por la punta, y en parte, por rozamiento del terreno con el fuste. Esta última se propaga a su vez a capas más profundas. En total, la distribución de la carga en un plano horizontal que pasa por la punta sigue una ley aproximadamente campaniforme (fig. 4.^a, a). En los planos más profundos las presiones se reparten, dando una campana de forma más aplastada.

Cuando los pilotes son varios, las campanas que representan la distribución de carga se superponen (figura 4.^a, b). Las cargas unitarias resultantes son, en algunos puntos, mayores que las ocasionadas por el pilote aislado, y la carga que cada pilote puede resistir es menor que la que podría resistir aquél. Los asientos son mayores, y desiguales para los distintos pilotes; mayores, para los centrales.

Estudiando la curva de distribución de cargas, que varía para cada terreno y para cada tipo y longitud de pilote, es posible determinar una separación entre ellos tal que el efecto de superposición, en la zona más peligrosa, no dé cargas inadmisibles. Hay que tener en cuenta que la zona más peligrosa pueden no ser las capas próximas debajo de la punta, ya que puede ocurrir que, aunque en esta región las cargas unitarias son elevadas, el terreno sea muy resistente, y en cambio, en una zona más profunda, existan estratos o bolsadas de terreno de peores características.

Sin embargo, es prácticamente imposible evitar la superposición de las campanas, ya muy aplastadas, en zonas profundas, y, aun en el caso corriente de que las cargas unitarias resultantes, mayores que las producidas por el pilote único, no sean peligrosas, el asiento, excepto cuando lleguemos a un terreno prácticamente incompresible (p. ej., roca), será considerablemente mayor.

* * *

Quedaría, a pesar de todos los avances logrados, perdida la mayor parte del trabajo de los que a la Mecánica del Suelo han dedicado su entusiasmo, si el Ingeniero moderno se dedicara a sustituir las antiguas fórmulas por las nuevas. Es mucho más importante el que se extienda, con fórmulas nuevas o antiguas, una nueva manera de enfocar el asunto. Nueva manera que a su vez es antigua: el retorno a la observación de la Naturaleza.

El suelo es un material vario e inestable. Para tratar con él es preciso desprenderse de los hábitos adquiridos al manejar materiales cuyas características mecánicas vienen en catálogos. Las del suelo varían en cada punto de la superficie, y en cada uno de éstos, con la profundidad. Varían también con el tratamiento mecánico a que le sometamos, pues tiene

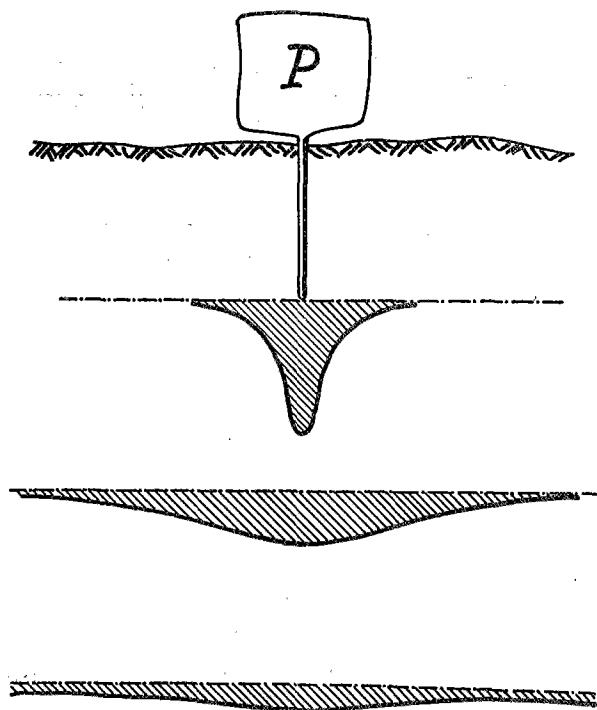


Figura 4.^a, a.

La carga aplicada por un pilote se transmite al terreno, en parte, por la punta, y en parte, por rozamientos con el fuste. De la combinación de los dos efectos resulta una distribución campaniforme de presiones sobre un plano horizontal que pase por la punta. En planos más profundos, las presiones se distribuyen también en forma de campana, pero más achatada cuanto más profunda.

siempre una gran histéresis. Varían con las circunstancias meteorológicas e hidrológicas. Varían, en fin, con el tiempo.

Consecuencia de esto ha sido el gran impulso que han adquirido modernamente los laboratorios de ensayo de tierras, como antes hemos visto en el caso de Alemania.

En general, estos laboratorios enfocan el problema desde un punto de vista acentuadamente técnico, y se ocupan únicamente de aquellas propiedades que intervienen de manera directa en la estabilidad de una obra o que determinan las condiciones de empleo de suelos en presas, terraplenes, etc. Estudian principalmente las propiedades mecánicas y algunas sencillas, físicas y químicas, que permiten una descripción concreta, expresada en cifras, de la muestra de tierra estudiada, con el criterio del Ingeniero de construcciones civiles.

Cuando precisan datos geológicos, requieren el auxilio del servicio competente, lo que suele ser, sobre todo, interesante en anteproyectos, pues permite dar una primera ojeada sobre lo que el terreno puede ser, y establecer en consecuencia un programa de sondeos y ensayos necesarios para el estudio definitivo.

Tampoco se ocupan de los análisis químicos completos ni de la determinación del pH, ni de estructuras cristalinas, recurriendo a los laboratorios de Física, Química y Mineralogía, cuando el conocimiento de tales propiedades se presenta como necesario para la resolución de un problema constructivo.

Se libran así de otro peligro. Así como unos olvidaron la Naturaleza a causa de las fórmulas, éstos podían olvidarla a causa del laboratorio, que, aunque actúa con materiales naturales, los tiene en cantidad y condiciones muy diferentes de las del exterior.

La práctica del ensayo por el ensayo es una desviación esterilizadora que a veces apunta en algunas publicaciones, y por eso el laboratorio de Mecánica del Suelo debe limitar los ensayos a los de utilidad directa.

Pero, a cambio de esta limitación por un lado, debe extender su acción más lejos de lo que pudiera atribuirse en principio a un laboratorio. por otro: las observaciones sobre el terreno. En efecto, los ensayos de laboratorio no pueden dar más que una limitada idea del fenómeno natural. En primer lugar, la infinita variedad de que hemos hablado, y que desaparece en la muestra que se ensaya, y en segundo, y más importante, que, para deducir la marcha del fenómeno natural a partir de los datos del laboratorio, es preciso aplicar un mecanismo matemático. Ahora bien: las complejas características del material que nos ocupa, que no sigue la ley de Hooke, que tiene una gran histéresis, que es plástico en muchas ocasiones, y las del estado de fuerzas a las que le sometemos, que frecuentemente hay que estudiar en

tres dimensiones, hace imposible de todo punto al presente, y podemos suponer que en un futuro próximo, un tratamiento matemático que se ajuste a la realidad con la misma exactitud que los que aplicamos a los otros materiales que maneja el Ingeniero.

La comprobación directa en "tamaño natural" se hace, pues, imprescindible, y un laboratorio de Mecánica del Suelo ha de desarrollar, fuera de sus locales, tanta actividad, cuando menos, como dentro de ellos, llevando a cabo pruebas de carga, investigando las rupturas de equilibrio y asientos producidos en obras construídas, y recogiendo, estudiando y sistematizando cuantos datos se obtienen con distintos fines sobre los terrenos y su comportamiento, sea con sondeos, pozos, túneles, excavaciones, etc.

* * *

Al llegar a este punto creemos deber una explicación de por qué, de todos los nombres mencionados en las primeras líneas de este artículo, no hemos empleado después más que el de Mecánica del Suelo. Esto responde a una preferencia razonada: el nombre de Geomecánica parece, a primera vista, muy

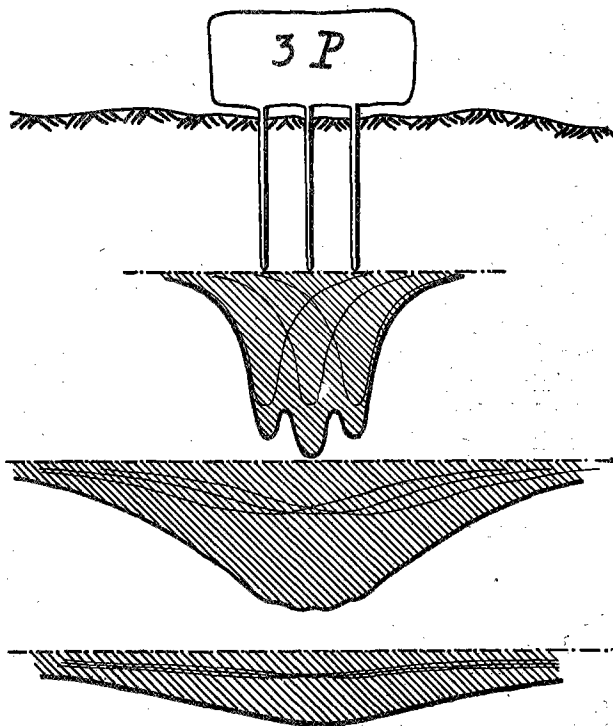


Figura 4^a, b.

Al hincar varios pilotes próximos, se superponen en parte las campanas y producen cargas unitarias sobre el terreno, mayores que el pilote aislado. Los asientos son mayores, y pueden ser bastante diversos en los diferentes pilotes. La resistencia individual de cada uno puede ser también muy inferior a la del pilote aislado.

adecuado, y hasta fué empleado por nosotros en dos publicaciones anteriores escritas en colaboración con el Prof. D. José M.^a de Albareda y Herrera (1); pero se ha objetado que el prefijo "geo" corresponde más bien a la tierra tomada como totalidad. Así, por ejemplo, la Geofísica se ocupa de aquellos fenómenos que solamente en la tierra considerada en conjunto se presentan, bajo las enormes presiones, temperaturas y esfuerzos que en el seno de ella se producen.

Pero cuando hubo que desechar el nombre fué al encontrar que la Geomecánica existía ya, y con una orientación más ajustada a las consideraciones anteriores; es la Mecánica de los grandes movimientos seculares de la corteza terrestre y tiene íntima conexión con la Geología tectónica.

El nombre de Geotecnia tiene tradición; se empleó por primera vez en la Comisión sueca que ya hemos citado, y se emplea actualmente por escandinavos y franceses. Pero nunca hemos comprendido el misterio de su nacimiento. Si el prefijo es inadecuado, según acabamos de ver, no lo es menos el sufijo. Pasando porque sea un técnica de las tierras y no de la Tierra, ese nombre puede ser aplicado a la Agronomía, a la Cerámica y hasta a la Minería. Es un nombre que no dice nada, y lo hemos comprobado por el número de veces que hemos tenido que explicar su significado.

No ocurre lo mismo con el de Mecánica del Suelo, que no tiene, a nuestro parecer, más que dos inconvenientes no demasiado grandes: el de ser una expresión y no una palabra, lo cual alarga y hace más complicada la estructura de la frase, y el de tener un sentido quizá algo restringido, ya que el ingeniero necesita, para los problemas constructivos, recurrir, en ocasiones, a consideraciones no sólo mecánicas, sino de otras ramas de la física y también de la química del suelo. Sin embargo, esto puede ser saludable, pues impide el perder de vista la finalidad, que es mecánica: sostener una estructura o mantener la estabilidad de forma de una cierta masa de terreno. Además de que pudiéramos aducir que no se desvirtúa el nombre porque se empleen medios ajenos a él, del mismo modo que se estudia electricidad aunque se empleen medios ópticos y los fenómenos caloríficos que la acompañan, y un análisis químico sigue siéndolo aunque utilice la pesada y la filtración, procesos físicos.

El nombre de Mecánica del Suelo tiene, por otra parte, la ventaja de ser traducción literal del nombre anglosajón y del alemán, los dos grupos que reúnen la inmensa mayoría de lo publicado sobre esta mate-

ria. Queda solamente por examinar el nombre de Edafomecánica, que, muy ajustado al sentido, rechazamos por cacofónico y pedante.

* * *

Volviendo a la actividad del laboratorio de tierras, o de Mecánica del Suelo, encontramos en la literatura una multitud de métodos de ensayo, cuya interpretación no siempre es clara. Pero, prescindiendo de los anticuados y de aquellos cuya utilidad es de pura investigación, estos ensayos han de dividirse en dos grupos: los que se realizan en el laboratorio propiamente dicho y los que se llevan a cabo *in situ*.

Pero, además, tienen otra forma de clasificarse, según el fin que persiguen. En efecto, dos métodos hay de llegar por la razón al conocimiento: el inductivo y el deductivo. El primer grupo de ensayos pretende dar una "descripción en cifras" del terreno, que permita beneficiar los resultados de la experiencia, determinando con exactitud cuándo dos suelos son análogos y debe esperarse de ellos análogo comportamiento. El segundo es el de los ensayos que pretenden averiguar los índices que expresan las propiedades mecánicas del suelo, para, por medio del cálculo, determinar su comportamiento en unas condiciones dadas.

Los ensayos de laboratorio pertenecientes al primer grupo, y cuya utilidad ha sancionado la experiencia, son:

Análisis granulométrico.

Límites de Atterberg y de retracción.

Cono sueco.

Análisis químicos parciales: materia orgánica, carbonatos.

Y del segundo grupo:

Peso específico de la fase sólida.

Densidad aparente.

Humedad natural.

Permeabilidad.

Compresión con constricción lateral.

Resistencia al corte.

Compresión triaxial.

En cuanto a los ensayos *in situ*, pertenecen al primer grupo los de penetración, y al segundo, los de agotamiento, los de carga, los de presión del agua intersticial y los de prospección por vibraciones.

También se hacen ensayos del tipo del segundo grupo, pero que ocupan un lugar intermedio entre los de *in situ* y los de laboratorio, como son aquellos en los que se pretende reproducir experimentalmente, en un modelo poco reducido de muro, tablestaca, etcétera, las condiciones naturales para medir las tensiones y deformaciones que se producen.

Vamos a examinar los métodos empleados moder-

(1) José M.^a Albareda Herrera y J. A. Jiménez Salas: "Edafología y Geomecánica", *Rev. de la Universidad de Madrid*, julio 1942, y "Geomeccanica e Scienza dal Suolo", *Rev. Scientia*, Roma, diciembre 1941.

namente en cada uno de estos ensayos, y terminaremos con algunas indicaciones sobre la toma de muestras, punto de partida de toda la experimentación en el laboratorio.

* * *

El análisis granulométrico. — El análisis granulométrico fracciona el suelo en grupos de partículas de distintos tamaños. Muy frecuentemente se le aplica el nombre de "análisis mecánico" que se le dió en un principio, para distinguirlo del análisis químico, que era casi exclusivamente el que antes se practicaba.

Es un ensayo fundamental que se hace con toda muestra que llega al laboratorio, pues caracteriza muy bien los suelos y es relativamente sencillo y fácil de llevar a efecto.

La razón de su importancia es que las partículas de suelo de distintos tamaños difieren entre sí no sólo en sus dimensiones, sino en su génesis, estructura, propiedades físicas y composición química.

Salvo raras excepciones (p. e., tierra de diatomeas), todas ellas proceden de la destrucción de las rocas de la corteza terrestre; pero mientras las de mayor tamaño deben su origen al desmenuzamiento de esas rocas producido por las heladas, los cambios bruscos de temperatura, la fricción de otras partículas arrastradas por otra corriente de agua, por la erosión física, en fin, las segundas, más finas, proceden de un verdadero ataque químico — erosión química — efectuado sobre las mismas rocas, de una hidrólisis de algunos de sus componentes ocasionada por el agua que se precipita de la atmósfera, ayudada por el ácido carbónico procedente del aire, y, en ocasiones, por débiles ácidos orgánicos, producto de la descomposición de los vegetales.

Las partículas mayores forman las arenas, que son simplemente roca pulverizada. Las más finas, las arcillas, de propiedades completamente distintas a las rocas de origen. Las rocas arcillosas que existen en la Naturaleza no son nunca primitivas, sino producto del metamorfismo de arcillas.

Las arenas son sueltas, tienen gran rozamiento interno, varían poco de volumen con el grado de humedad, son permeables, tienen un volumen de huecos que rara vez sobrepasa el 25 por 100 del total y sus granos son casi siempre redondeados.

Las arcillas tienen gran cohesión cuando están secas, hasta el punto de parecer verdaderas rocas; tienen un escaso rozamiento interno, lo cual hace que, al disminuir por la humedad la cohesión antes citada, sean muy plásticas, se hinchan al admitir agua, son impermeables, el volumen de huecos es con frecuencia el 60 por 100 del total y sus partículas tienen siempre forma de plaquitas, lo que, como en el caso de los cristales minerales (que es lo que en realidad son), revela una particularidad de la ordenación de sus moléculas.

Intermedia entre estas dos fracciones está el limo, tanto por el tamaño de sus partículas como por sus propiedades. En el aspecto técnico, hemos de señalar la facilidad que tiene para fluidificarse. La arcilla, muy plástica cuando está húmeda, se deja, si es compacta, penetrar difícilmente por el agua, ya que es muy impermeable. El limo, en cambio, aunque no tan plástico como aquélla, es más permeable y resulta, por ello, más peligroso. Los fangos más temibles son, con frecuencia, limosos.

Por todo ello queda demostrada la importancia de determinar en qué proporción se hallan en cada suelo las partículas de arena, de limo y de arcilla. Pero cuando hemos de fijar qué límites de tamaño de las partículas corresponden a cada fracción, encontramos que son muchas las divisiones empleadas. Esto proviene de que, evidentemente, los límites que puedan fijarse han de ser siempre algo arbitrarios, ya que el tránsito de arena a arcilla a través del limo es gradual y no por saltos, y cada autor fija los que cree que se ajustan mejor al caso, según su criterio.

Sería muy conveniente una normalización que hiciera comparables todos los datos de diversas procedencias, pero por ahora no se ha logrado.

En principio, la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (Congreso de Washington, 1927), aceptó como internacional la clasificación de Atterberg, que es la siguiente:

Arcilla: partículas con diámetro máximo de 0,002 milímetros.

Limo: partículas entre 0,002 y 0,02 mm.

Arena fina: partículas entre 0,02 y 0,2 mm.

Arena gruesa: partículas entre 0,2 y 2 mm.

Gravilla: partículas entre 2 y 20 mm.

Grava y piedra, mayor de 20 mm.

Si embargo, esta clasificación no excluye otras que cada organismo considere más adecuadas para sus fines particulares. Apoyándose en esto y en que la clasificación citada tiene el defecto de englobar en el calificativo de limo las partículas entre 0,005 y 0,002 mm. de propiedades bastante claramente arcillosas, el Bureau of Soils de Washington utiliza, a partir de 1930, la siguiente, que ha sido adoptada por muchos:

Arcilla, menor de 0,005 mm.

Limo, de 0,005 a 0,05 mm.

Arena muy fina, de 0,05 a 0,10 mm.

Arena fina, de 0,10 a 0,25 mm.

Arena media, de 0,25 a 0,5 mm.

Arena gruesa, de 0,5 a 1 mm.

Gravilla, de 1 a 2 mm.

Y en los laboratorios de Mecánica del Suelo alemanes, se usa en todos ellos la siguiente, a partir de

una disposición oficial de 31 de enero de 1936 sobre unificación de la toma de muestras y denominaciones de terrenos atravesados:

- Piedra, mayor de 70 mm.
- Grava gruesa, de 30 a 70 mm.
- Grava media, de 5 a 30 mm.
- Grava fina, de 2 a 5 mm.
- Arena gruesa, de 1 a 2 mm.
- Arena media, de 0,2 a 1 mm.
- Arena fina, de 0,1 a 0,2 mm.
- Polvo (Mehlsand): grueso, de 0,05 a 0,1 mm.; fino, de 0,02 a 0,05 mm.
- Limo: grueso, de 0,006 a 0,02 mm.; fino, de 0,002 a 0,006 mm.
- Arcilla: gruesa, de 0,0006 a 0,002 mm.; fina, de 0,0002 a 0,0006 mm.
- Ultraarcilla, de 0,00002 a 0,0002 mm.

La ultraarcilla es ya un coloide propiamente dicho, y, por debajo de 0,00002, se entra en el campo de las disoluciones verdaderas.

En cuanto a la ejecución del análisis granulométrico, es decir, a la determinación de los tantos por ciento, en peso, de partículas pertenecientes a cada una de las fracciones de una de las clasificaciones antes citadas, los tamices permiten la separación de las partículas hasta 0,06 mm. de diámetro. Para las partículas menores, hay que recurrir a los métodos derivados de la aplicación de la ley de Stokes.

Según ésta, la velocidad de caída de una esferita en un fluido es:

$$v = \frac{2}{9} r^2 \frac{D_1 - D_2}{\eta} g;$$

en la cual son:

- v = velocidad de caída de esfera en cm./s.
- r = radio de la esfera en cm.
- η = viscosidad del fluido en gr./cm. $\times$ s.
- D_1 = peso específico de la esfera en gr./cm.³.
- D_2 = peso específico del fluido en gr./cm.³.
- g = 981 cm./s.²;

que se reduce, con un fluido determinado, a una cierta temperatura, y un peso específico conocido de la esfera, a:

$$v = K r^2.$$

En agua a 20° y con un peso específico de la esfera de 2,65, término medio de los que se hallan en el suelo, la fórmula se convierte en:

$$v = 35970 r^2.$$

Fundándose en esta propiedad, se han elaborado muchos métodos, que pueden dividirse en dos grupos:

los de levigación y los de sedimentación. Los primeros someten la muestra de suelo a una corriente ascensional de agua. Aquellas partículas cuya velocidad de caída sea inferior a la de la corriente ascensional, son arrastradas, y no lo son las que tengan una velocidad superior. Son métodos engorrosos y sólo se practican cuando se desea una separación real de los distintos grupos de partículas. En la actualidad están fuera de la práctica corriente de los laboratorios.

Al presente se prefieren los métodos de sedimentación, y entre ellos, en la práctica, el de la pipeta. Consiste, esencialmente, en dispersar la muestra de tierra en agua hasta obtener una suspensión homogénea. Se deja después en reposo, y, después de un cierto tiempo, t , se sumerge el extremo en una pipeta, a una cierta profundidad (p. e., 10 cm.), y se absorben 20 c. c. del líquido, que se vierten después en una cápsula, donde se evaporan, pesando después el residuo sólido.

En el momento de absorber por la pipeta, todas las partículas cuya velocidad sea mayor, en el ejemplo considerado, de 10/ t cm./s., estarán ya debajo de su punta y no serán absorbidas. El residuo seco nos dará, por lo tanto, un peso proporcional al de las partículas de velocidad de descenso menor de 10/ t cm./s., y, por lo tanto, de radio menor que el correspondiente a esa velocidad. Repitiendo la operación para diferentes tiempos, se puede obtener la clasificación de las partículas, según sus tamaños, en cuantos grupos se quiera.

Un método análogo es el de Casagrande, que consiste en introducir un densímetro, midiendo así la densidad de la mezcla agua-suelo, a una cierta profundidad y en un determinado momento, deduciendo de ahí la concentración de la suspensión. Es más sencillo de ejecutar, ya que suprime la engorrosa evaporación a sequedad, pero es menos exacto.

En todos los procedimientos es preciso ejecutar correcciones por diferencia de temperatura, de peso específico de las partículas, etc., que están representadas en ábacos, que las hacen en extremo sencillas de llevar a cabo.

La aplicación de la ley de Stokes a las partículas del suelo ha de ser mirada, aparte de esto, con algunas limitaciones.

En primer lugar, la fórmula exige que el medio de dispersión puede considerarse como homogéneo, respecto a la partícula. Las muy finas llegan a tener elementos de tamaño comparable al de las moléculas. Aparece el movimiento browniano y la ley de Stokes deja de tener validez.

Por otra parte, la velocidad de caída ha de ser lo suficientemente pequeña para que los movimientos del fluido no sean turbillonares. Existe una velocidad de descenso crítica y un radio crítico correspondiente. Con agua a 20° y partículas de peso específico 2,7, la ley de Stokes pierde su validez para partículas de

radio mayor de 0,24 mm. Esto, sin embargo, no es problema, pues esas partículas pueden ser separadas por tamizado.

Pero la mayor diferencia entre la realidad y la ley de Stokes, procede de que las partículas de suelo no son esferas macizas y lisas. Esta dificultad se orilla creando el concepto de "radio efectivo" de la partícula, que es el de una esfera imaginaria que cayese con la misma velocidad que ella. A estos radios efectivos se refieren los límites señalados en las clasificaciones que anteriormente dimos.

Representación e interpretación del análisis granulométrico.

La forma más corriente de representar los resultados del análisis granulométrico es la de la figura 5.^a. En ella se señalan, en papel semilogarítmico, los tantos por ciento, en peso, de partículas con radios mayores que uno determinado.

Muy adecuado para trabajos delicados, hemos encontrado que tiene algunos inconvenientes para trabajos de laboratorio técnico.

En primer lugar, su interpretación no es fácil. Si en vez de tratarse de una figura con cinco curvas, correspondientes a cinco tipos de suelo que varían progresivamente, se tratara de una sola, sería preciso bastante práctica y no poca reflexión antes de clasificarlas. Después, es corriente representar en un mismo diagrama varias muestras de suelo pertenecientes a un mismo estrato, pues interesa su comparación. Pues bien: estas curvas, muy parecidas, se entrecruzan y superponen hasta formar un borrón ininteligible. Por último, son difíciles de delinear, y esto es importante. Si se quieren presentar bien, hay que recurrir a plantillas que jamás encajan del todo exacta-

mente en la curva. En manos esta tarea de delineantes que no comprenden la importancia que una pequeña desviación puede tener, se sufren, a veces, errores de importancia.

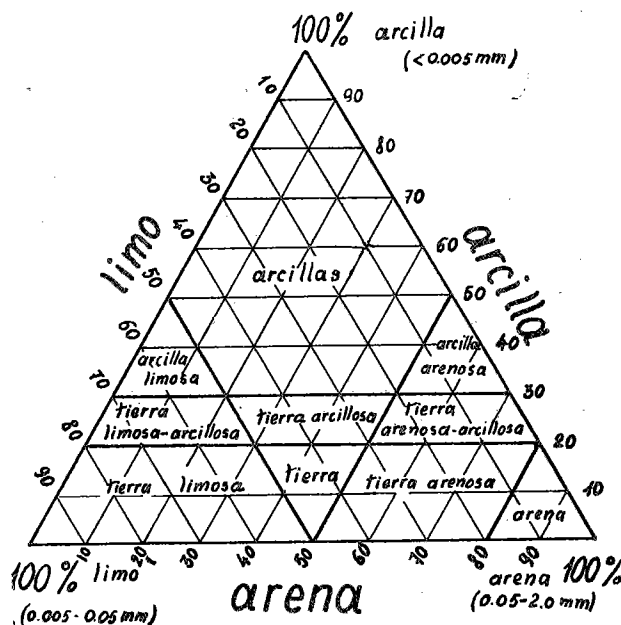


Figura 6.^a

Representación triangular de la composición granulométrica de un suelo, con división en zonas según el Bureau of Soils, Washington. ("Tierra" se emplea como traducción de "loam").

Creemos que es mucho más idónea para muchos casos, dentro de la práctica ingenieril, la representación en diagrama triangular, separando solamente tres fracciones de suelo: arenas (con gravilla), partículas mayores de 0,05 mm.; limo, partículas entre 0,05 mm. y 0,005 mm., y arcilla, partículas menores de 0,005 milímetros, división que corresponde a la del Bureau of Soils de Washington.

La representación de un suelo es sencillísima, y se reduce a fijar un punto en un diagrama impreso, lo que puede hacerse con toda precisión, así como copiarse. Cuando se representan varios suelos, se forma una pequeña constelación de puntos, señalando cada uno por un número. Esta representación resuelve muy bien el problema de clasificar un suelo, que es, al fin y al cabo, la finalidad del ensayo. La figura 6.^a nos da una división en zonas, según el mismo Bureau of Soils, que permite hacerlo instantáneamente. Hemos traducido, por no hallar mejor expresión, "loam" por tierra, para denominar una serie de suelos de composición media, que, sin aspecto arenoso, son mucho más ligeros, permeables y socavables que los arcillosos.

Observemos la amplia zona de las arcillas. Es casi innecesario advertir que la denominación "arcilla" tiene, en este caso, el sentido vulgar, que equivale con

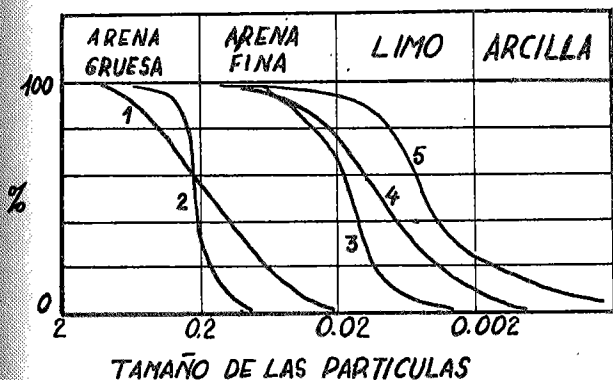


Figura 5.^a

Representación de la composición granulométrica de un suelo en curva acumulativa. El suelo, 1, es una arena de río. El 2, una arena de dunas, de composición más uniforme por haber sido seleccionada por el arrastre eólico. El 3, un loes del que puede decirse lo mismo. El 4, un fango limoso, y el 5, un suelo limoso-arcilloso.

más precisión a "suelo arcilloso" y distinto al que antes hemos empleado, de fracción del suelo resultado de la erosión química, de partículas menores que 0,002 ó 0,005 mm., según la clasificación que se adopte.

También es imprescindible la representación en curva continua, como en la figura 5.^a, en aquellos casos en que sean muy importantes algunas características físicas del suelo, ligadas íntimamente con la granulometría. No es corriente este caso en trabajos de cimentación, pero se presenta con frecuencia en la construcción de presas de tierra (permeabilidad, capilaridad, posibilidad de arrastre de las partículas más finas), estudio del subsuelo de caminos (suelos con gran capilaridad, suelos que se levantan con la helada), firmes de tierra estabilizada con betún (cálculo de la superficie específica), etc. Pero, aun en estos casos, propugnamos que se acompañe a la curva un diagrama triangular que permita darse cuenta, a la primera

ojeada, de qué clase de suelo es la que estamos tratando.

Finalmente hemos de hacer breve referencia a los análisis granulométricos rápidos, ideados para ser llevados a cabo en un sencillo laboratorio de campaña. De ellos, el que parece haber dado mejor resultado práctico es uno que se ha usado extensamente en la construcción de aeropuertos y carreteras de tierra estabilizada en Alemania. Su fundamento es el mismo que el de los métodos de sedimentación antes descritos. Pero no se usa ni densímetro ni pipeta, sino simplemente se observa el volumen aparente del suelo depositado en el fondo de la probeta en tiempos determinados, obteniendo después los tantos por ciento de cada fracción (sóamente de arcilla, limo y arena) por medio de unos ábacos dibujados con los datos obtenidos de muchos cientos de determinaciones.

(Continuará.)