

PRESENTE Y FUTURO DE LA MECÁNICA DEL SUELO⁽¹⁾

Por JOSE LUIS ESCARIO Y NUÑEZ DEL PINO,
Ingeniero de Caminos.

El autor hace una síntesis del estado actual de la ciencia de la Mecánica del Suelo, señalando los problemas fundamentales hoy planteados y las interesantes tendencias que se marcan en esta importante y moderna rama de la ingeniería.

Toda obra de ingeniería civil o de arquitectura se apoya sobre el suelo; la estabilidad de la estructura que el ingeniero construye, del suelo tiene que partir; en él se originan las reacciones que hemos de tener en cuenta para el cálculo de su estabilidad y resistencia. Por ello, la ciencia del suelo es fundamental en toda obra de ingeniería. Nuestros antepasados, intuitivamente, buscaron la manera de cimentar; como arte, con sentido mecánico y con un conocimiento práctico, pero sin un análisis matemático. Verdad es que lo mismo sucedía con las estructuras en sí; fué el técnico artista y el maestro de obras quienes concibieron y ejecutaron las viejas construcciones que hoy admiramos; muchas veces ante la cúpula de San Pedro, las bóvedas de nuestras Catedrales góticas, o la estructura del Acueducto de Segovia, no hemos sabido qué admirar más, si el poder creador del artista o el sentido constructor del técnico que osó realizar aquella estructura, simplemente por el buen sentido constructivo. Yo recuerdo siempre la frase, cortante y certera, de nuestro profesor de resistencia de materiales, cuando un alumno en el encerado disponía alguna estructura erróneamente: "eso hace mal efecto mecánico a la vista". El sentido mecánico era antes, es hoy y será siempre base fundamental de toda obra de ingeniería. Hace algo más de un siglo, el sentido mecánico empezó a cuajar en las teorías matemáticas de la resistencia de materiales primero, de la elasticidad después. Conocidas las propiedades fundamentales de los materiales básicos, el cálculo permitía llegar a determinar las cargas de trabajo de la estructura proyectada, pero ésta debió ser concebida primero con un sentido resistente; el cálculo no es en definitiva más que un auxiliar para dimensionar correctamente los diferentes elementos que el ingeniero concibe y dispone por sentido mecánico. El in-

geniero no debe olvidar nunca que, como alguien dijo, el cálculo es un auxiliar del sentido común, no un sustitutivo de él. Al dimensionar matemáticamente las estructuras, llegando a calcular los esfuerzos que sobre el suelo producían, se empezó a pasar del proyecto puramente experimental y empírico de la cimentación a su cálculo racional. Ya en 1776 Culomb había presentado a la Academia de Ciencias de Francia una memoria sobre la teoría del empuje de tierras, teoría que se mantuvo, sin discusión fundamental, hasta hace treinta años en que, profundizando más en los fenómenos, se pudo apreciar que el modelo matemático de Culomb era excesivamente simple. La mecánica del suelo, como ciencia, empezó sus primeros balbuceos teóricos allá por 1915, y fué en Viena donde en 1925 apareció el primer libro de esta especialidad, el "Erdbanmechanik", del profesor Terzaghi, en el cual cuajaba su experiencia personal durante los años que estuvo en la oficina Americana del Robert Collège de Instambul. La Mecánica del Suelo es una ciencia de enorme complejidad; en las teorías de la elasticidad y de la resistencia de materiales operamos con materiales *fabricados* por nosotros, principalmente hierro y acero, cuyas características de calidad y resistencia podemos conocer *a priori* con suficiente exactitud; a pesar de todo, para cubrir nuestra ignorancia y ante las diferencias entre las hipótesis de constitución y comportamiento de los materiales y la realidad, tomamos coeficientes de seguridad de 2 ó de 3. En la Mecánica del Suelo el problema es mucho más complejo; tenemos que aplicar nuestros cálculos a elementos naturales discontinuos y normalmente heterogéneos; elementos, además, cuyas propiedades cambian muchas veces frente a la acción de los agentes exteriores, cargas de las estructuras en valor absoluto y en velocidad de aplicación, proporción de agua, etc. Además, es corriente que la acción de las cargas, que la estructura origina en el suelo del cimiento, repercute no sólo en un estrato más o menos heterogéneo, sino en varios totalmente distintos, cuya disposición entre sí y en relación la estructura tiene una influencia trascendental en el comportamiento del conjunto.

(1) Este trabajo fué redactado por el Profesor Escario como pórtico de las reuniones que la Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones organizó durante los días 5 al 9 de mayo de 1958, y que por cortesía de su autor nos honramos en insertar en nuestras páginas para que su interesante contenido llegue lo antes posible a conocimiento de nuestros lectores.

La ciencia de la Mecánica del Suelo se apoya, muy principalmente, en la determinación experimental de las características técnicas del suelo, obtenidas en cada caso experimentalmente en el laboratorio o *in situ*. En una estructura podemos partir de las características mínimas a exigir corrientemente del acero, del cemento o del hormigón; en un problema de suelos no es posible; los errores que cometeríamos tomando de un manual la cohesión o resistencia a esfuerzo cortante de una arcilla, por ejemplo, no serían tolerables; el ensayo previo del material con el cual hemos de trabajar es fundamental. Pero aún hay más: la característica que del laboratorio obtengamos hay que saberla interpretar; puede llevarnos a error una aplicación simplista de su valor; en ciertos tipos de suelos, por ejemplo, es sabido tiene importancia trascendental para su resistencia a esfuerzo cortante la rapidez de aplicación de la carga. Esto no tenía explicación aplicando la teoría clásica de Culomb; su error fué suponer que el suelo no era compresible y que la deformación antes de la rotura era despreciable; todo ello podía ser más o menos cierto si entre las partículas del suelo no pudiera haber agua, que cambia las características del problema: la presión del agua intersticial influye decisivamente en el valor de la resistencia a esfuerzo cortante, y como el agua no es un elemento permanente del suelo, sino accidental, y su proporción y forma de encontrarse en el mismo puede variar según la intensidad y tiempo que las cargas actúen sobre el suelo y condiciones de drenaje, se comprende que el simple resultado de un análisis triaxial puede inducir a error grave si las circunstancias del suelo y de la estructura, carga y ritmo a que ésta ha de producirse, no se tuvieron en cuenta.

En los problemas de corrimientos y drenajes sucede algo muy semejante: es el ensayo y los valores en él obtenidos un auxiliar muy importante del ingeniero, pero éste no puede descansar simplemente en ellos. El principal factor es su experiencia para apreciar las circunstancias de la naturaleza que le permitan: primero, comprender el porqué del fenómeno que trata de corregir o encauzar, y, después, enjuiciar cómo el *cuero vivo*, que es el suelo, actúa y ha de reaccionar ante las medidas que el ingeniero proyecte. Tal vez, más aquí que en otros problemas de ingeniería, la labor del técnico es arte y ciencia conjuntamente; una idea bien clara de los principios fundamentales, un conocimiento lo más completo posible de las condiciones de cada problema y el arte del ingeniero para proyectar, en cada caso, las medidas convenientes en la forma más eficaz y económica.

La ciencia de la Mecánica del Suelo ha progresado espectacularmente en los últimos veinte años: en el conocimiento de los principios fundamentales y en los métodos de experimentación y comprobación. Para el conocimiento de los problemas la geología del suelo es fundamental; el estudio geológico debe ir unido al geotécnico; solamente así podremos llegar a

apreciar e interpretar algunos fenómenos complejos, como son los de preconsolidación y entumecimiento, y solamente con la visión conjunta, geológica y geotécnica podremos explicarnos la formación del suelo y su evolución pasada y previsible: el reconocimiento personal del terreno es imprescindible; los ensayos *in situ* o en laboratorio, deben disponerse primero para comprobar o rectificar la imagen que el ingeniero tiene del fenómeno estudiado, después para dimensionarlo y determinar las características que servirán para proyectar los elementos de cimentación. En este aspecto no hay que perder de vista que intereses, no son sólo las propiedades físicas de las partículas que componen el suelo, sino las de su estructura, teniendo en cuenta su posición relativa, su agrupamiento y las proporciones de las fases sólida, líquida y gas, que pueda tener su conjunto. Ello tiene una importancia trascendental, no sólo en los fenómenos de resistencia, sino en los de capilaridad y permeabilidad, fundamentales en el comportamiento del suelo. Por ello, los ensayos *in situ* sobre el suelo sin perturbar son fundamentales. La obtención de muestras "no perturbadas" es una aproximación de la realidad, que muchas veces puede ser excesivamente grosera, pues el suelo es conjunto siempre heterogéneo, en calidad unas veces, en estructura con gran frecuencia, que no es lícito sustituir por una muestra de algunos centímetros, aunque hayamos conseguido alterarla lo menos posible, en el proceso de su extracción. A los ensayos de carga que vienen haciéndose de antiguo, hay que añadir el empleo de los penetrómetros *in situ* de un enorme interés, ensayo para cuyo estudio y normalización se designó en Londres, el verano pasado, una Comisión especial; a ellos se ha añadido, en práctica corriente, la prospección geofísica en todas sus técnicas. Y ya normalizadas en el campo de la investigación, pronto entrarán en el de la práctica, las medidas de densidad y humedad por desviación de rayos γ y por medio de isótopos. Y en el campo de la mecánica de rocas, los ensayos directos de capacidad de resistencia en rocas blandas y las pruebas del Profesor Haefeli, de Zurich, sobre ensayos de compresibilidad *in situ*.

El laboratorio ha de equiparse cada vez más con medios y aparatos que le permitan actuar en el campo donde la importancia de su labor crece de día en día, sin que ello pueda restar atención a la tarea trascendental que incumbe al laboratorio; en él se han de estudiar los fenómenos para sentar los principios y leyes fundamentales, en constante evolución, que servirán para actuar en el campo con conocimiento de causa.

Así, uno de los problemas más complejos con el que ha de luchar el ingeniero en la mecánica del suelo y en el que el laboratorio ha prestado y ha de prestar más servicios, es en el estudio de los suelos cohesivos. Los materiales recogidos dentro de la denominación genérica de arcilla, son de una enorme diver-

sidad y, por tanto, su comportamiento en la naturaleza es muy distinto; se pasa sin solución de continuidad desde los limos, de plasticidad muy pequeña, a las arcillas de plasticidad más elevada. En España hemos llegado en materiales, puede decirse normales, a límites líquidos de 110; en algunos tipos extraordinarios se ha alcanzado la cifra de 300. La diferencia tan grande en la capacidad de absorción de agua se comprende perfectamente de lugar a fenómenos totalmente distintos: de variaciones de volumen, entumecimiento y retracción, de dificultades de evacuación de agua, cambios en la cohesión, etc.; estos fenómenos, de enorme interés en la práctica de ingeniería, son muy complejos, pues en ellos interviene, como es sabido, no solamente la granulometría de la arcilla, sino su naturaleza y las sales que llevan impregnadas. Solamente en las salas del laboratorio, con medios de investigación apropiados y con una técnica cuidadosamente depurada, es posible llegar a explicarse el comportamiento de estos materiales en el terreno, y, conociéndolos a fondo, será posible actuar en obra en forma conveniente; el problema de la presión del agua intersticial en las arcillas se pudo comprobar en el laboratorio y se ha medido después en la realidad; tiene una importancia trascendental especialmente en el estudio de la estabilidad de presas de tierra; para ellas el Bureau of Reclamation en Estados Unidos y Skempton y Bishop en Inglaterra, han desarrollado un método que permite prever la presión intersticial antes de la construcción, de acuerdo con los resultados obtenidos en el laboratorio con las tierras a ensayar. Gracias al conocimiento de este fenómeno ha sido posible aumentar, con plena seguridad, la altura de las presas construídas en los últimos años, llegando a más de 90 m.

También en la técnica de la compactación se ha progresado considerablemente en el laboratorio con el estudio teórico, y, por ello hoy día se pueden realizar con garantía, los terraplenes que constituyen una presa o una carretera; aunque la consolidación cuesta relativamente cara en presas es imprescindible, y en terraplenes de caminos la ventaja que se logra compensa muy sobradamente y es muy poco lo que pesa el coste en relación con el presupuesto de la obra. Hemos tenido que compactar, y hemos compactado con éxito, terraplenes de altura de 8 m., en los cuales por razones de orden económico, que el ingeniero ha de tener siempre presentes, nos hemos visto obligados a utilizar tierras de pésima calidad, arcillas con límite líquido superior a 80 y algunas que contenían una fuerte proporción de yeso; en ambos casos fué preciso extremar las precauciones, índices de compactación de 100 por 100 o superiores y cuidar escrupulosamente del drenaje, pero el éxito que se obtuvo fué rotundo. Preocupación fundamental en las obras de compactación es la vigilancia en obra de los

dos factores fundamentales: proporción de agua y densidad obtenida; el método que se emplee ha de ser rápido dentro de la exactitud precisa, pues el número de ensayos, especialmente en terraplenes de vías de comunicación donde la naturaleza del suelo va variando, tiene que ser elevado y hay que cuidar, nunca debemos olvidar que somos constructores, de interrumpir lo menos posible la marcha del trabajo; en este aspecto han de mejorarse los métodos corrientemente empleados que cumplen la condición de exactitud, pero que son algo más lentos de lo que sería deseable; en presas el problema es más simple, pues aunque la vigilancia debe ser aún más rigurosa, la calidad del suelo a emplear es mucho más uniforme; el estudio en el laboratorio debe completarse con ensayos en gran escala que fijen para cada calidad del suelo y tanto por ciento de humedad, el número de pasadas preciso para cada espesor de tongada.

¿Qué tendencias se señalan para el futuro de la ciencia de la Mecánica del Suelo? Como hemos señalado, claramente se marca la tendencia a que el laboratorio salga al campo; al empleo de medios de investigación que nos permitan conjuntamente el conocimiento geológico y geotécnico, con los medios de prospección en el terreno que ya hemos indicado: los de penetración estática o dinámica, la prospección geofísica, sin olvidar los horizontes que abre el empleo de los radio-isótopos en la determinación de la humedad y de la densidad del suelo. Paralelamente a esta actuación exterior para el estudio de cada caso concreto, el laboratorio prestará su ayuda para puntualizar las características de los materiales, y en el laboratorio también se ha de seguir sin desmayo la investigación para profundizar en el conocimiento de los fenómenos en modelo reducido, conocimiento que nos ha de permitir, luego en la realidad, interpretar y cifrar los hechos. En este estudio de laboratorio hemos de estar atentos a los progresos del análisis por radioactivación, que se funda en el empleo de isótopos radioactivos, que parece superior al espectrográfico, para determinar los elementos difíciles de distinguir unos de otros y que tal vez, en el campo del estudio de las arcillas o suelos raros, podrá servir para explicar fenómenos que hasta ahora no hemos llegado a analizar. No hay que olvidar el empleo de rayos infrarrojos, que ya ha permitido investigaciones de alto interés en el campo del estudio de arcillas, llevadas a cabo por mis colaboradores Jiménez Salas y Serratos.

Por último, sería deseable que se prestase la debida atención a un análisis de los resultados obtenidos en la realidad; es problema más que nada económico, de una falsa economía, pues el gasto que puede representar, en cifras absolutas tal vez algo elevado, se vería ampliamente compensado por los avances que había de permitir; nunca es caro investigar, pues en la investigación está la base del progreso.